

3.18

SPEZIAL

Biologie Medizin Hirnforschung

Spektrum

der Wissenschaft

Spektrum SPEZIAL Biologie Medizin Hirnforschung

8,90 € (D) · € 9,70 (A) · € 10,- (L) · sFr. 17,40 24524

Klimawandel

Strategien gegen die weltweite Bedrohung

- TROPEN** Sturmmonster mit globaler Tragweite
- AFRIKA** Rettung für ausgelaugte Ackerböden
- ARKTIS** Warum das Meereis so schnell verschwindet

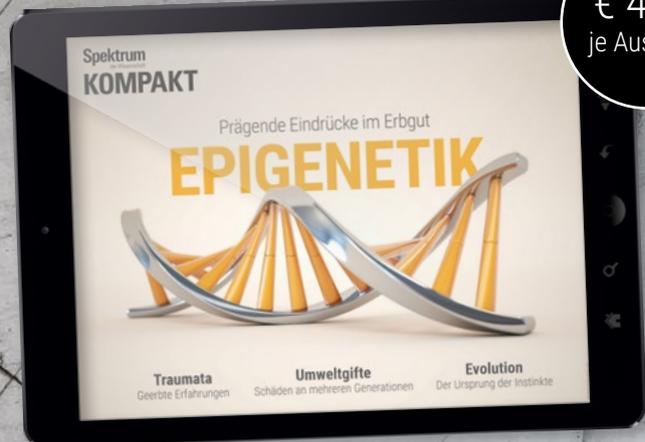


4

KOMPAKT THEMEN AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Ob A wie Astronomie oder Z wie Zellbiologie: Unsere **Spektrum KOMPAKT**-Digitalpublikationen stellen Ihnen alle wichtigen Fakten zu ausgesuchten Themen als PDF-Download zur Verfügung – schnell, verständlich und informativ!

€ 4,99
je Ausgabe



Bestellmöglichkeit und mehr als 100 weitere Ausgaben:
www.spektrum.de/kompakt



EDITORIAL PLANET IM SCHWITZKASTEN

Von Andreas Jahn, Redakteur dieses Hefts
jahn@spektrum.de

»Wird derhalb die größte Kunst, Wissenschaft, Fleiß und Einrichtung hiesiger Lande darinnen beruhen, wie eine sothane Conservation und Anbau des Holzes anzustellen, daß es eine continuirliche beständige und nachhaltige Nutzung gebe, weiln es eine unentbehrliche Sache ist, ohne welche das Land in seinem Esse nicht bleiben mag.«

Was hier im etwas schwerfälligen Deutsch des 18. Jahrhunderts anklingt, gilt als Geburtsurkunde modernen Umweltschutzes. Hans Carl von Calowitz (1645–1717), seines Zeichens Oberberghauptmann im sächsischen Freiberg, mahnte in seiner 1713 veröffentlichten »Sylvicultura oeconomica«, im Wald nur so viel Holz zu schlagen, wie wieder nachwächst – und erfand somit den Begriff der Nachhaltigkeit.

Nachhaltig sollten wir mit unserem gesamten Planeten umgehen. Doch leider sind wir Zeugen – und Verursacher – dramatischer Veränderungen zu Lande, zu Wasser und in der Luft: Der Ausstoß von Treibhausgasen heizt der Erde kräftig ein. In der Arktis tauen Permafrostböden auf und setzen dadurch noch mehr Kohlendioxid und Methan frei (S. 36). In den Tropen toben Wirbelstürme mit weltweit katastrophalen Folgen (S. 24). Und der durch CO₂ versauernde Ozean bedroht direkt das Leben im Meer (S. 6).

Während unsere europäischen Regionen unter sintflutartigen Regengüssen leiden, trifft der Klimawandel die Menschen in südlicheren Gefilden noch deutlich härter. Gegenmaßnahmen wie Aufforstungen in Afrika (S. 50) sollen die schlimmsten Folgen lindern. Doch solche Aktionen bleiben der berühmte Tropfen auf den heißen Stein; an der drastischen Eindämmung der CO₂-Freisetzung führt kein Weg vorbei. Das von der Bundesregierung ursprünglich anvisierte Klimaschutzziel, bis 2020 die Treibhausgasemissionen um mindestens 40 Prozent gegenüber 1990 zu senken, scheint allerdings in weite Ferne zu rücken. Die Koalitionspartner bekennen sich lediglich dazu, »die Handlungslücke zur Erreichung des Klimaziels 2020 so schnell wie möglich zu schließen«.

Eine nachhaltige Lektüre wünscht Ihnen
Ihr

DAS KÖNNTE SIE AUCH INTERESSIEREN:



Spektrum KOMPAKT »Extremwetter – Wenn die Elemente verrücktspielen«

Hurrikane, Überschwemmungen, Hitzerekorde, Dürreperioden – was ist mit unserem Wetter los? Und wie lassen sich solche Katastrophen vorhersagen? Darüber diskutieren Meteorologen und Klimaforscher.

Spektrum KOMPAKT – Themen auf den Punkt gebracht
Unsere Spektrum-KOMPAKT-Digitalpublikationen stellen Ihnen alle wichtigen Fakten zu ausgewählten Themen als PDF-Download zur Verfügung – schnell, verständlich und informativ!

www.spektrum.de/kompakt

INHALT

OZEAN

6 ÖKOLOGIE MEERESWELT IM WÜRGEGRIF

Die Ozeane versauern. Experimente deuten an, dass das zu dramatischen Verhaltensänderungen bei Meerestieren führen könnte.

Von Danielle L. Dixson

12 ARKTIS WELLEN ALS EISBRECHER

Am Nordpol schwindet das Meereis unerwartet schnell. Der Grund könnten Wellen in den offenen Wasserflächen sein.

Von Mark Harris

18 ANTARKTIS OZEAN IM AUFRUHR

Das Südpolarmeer nimmt gewaltige Mengen an Kohlenstoff und Wärme auf. Messdaten zufolge könnte sich das demnächst ändern.

Von Jeff Tollefson

ATMOSPHERE

24 TROPEN DAS STURMMONSTER

Ein mysteriöses tropisches Wettermuster löst weltweit Überflutungen, Hitzewellen und Wirbelstürme aus.

Von Eric Hand

30 METEOROLOGIE DAS WOLKENPARADOX

Satellitendaten zeigen Verschiebungen in der planetaren Wolkendecke. Wird das den Klimawandel abbremsen oder beschleunigen?

Von Kate Marvel

FESTLAND

36 BODENKUNDE TAUENDE TUNDRA

Forscher ermitteln, wie die Freisetzung von Treibhausgasen aus Permafrostböden die globale Erwärmung anfach.

Von Edward A. G. Schuur

42 ENERGIEPOLITIK KLIMAFAKTOR INDIEN

Nur wenn sich der Ressourcenverbrauch der aufstrebenden Gesellschaft Indiens dramatisch ändert, können die weltweit anvisierten Klimaziele erreicht werden.

Von Varun Sivaram

VLADISLAV / FOTODUA



ISTOCK / RAY HEMS



BRIAN ADAMS





62

FORSTWIRTSCHAFT DEM WANDEL GEWACHSEN



76

ARTENSCHUTZ DARF MAN BEDROHTE ARTEN UMSIEDELN?

GEGENMASSNAHMEN

50 LANDWIRTSCHAFT DIE GROSSE GRÜNE MAUER

Ein Vegetationsstreifen quer durch ganz Afrika soll die weitere Ausbreitung der Sahara nach Süden verhindern.

Von René Bally und Robin Duponnois

58 NACHHALTIGKEIT RETTUNG FÜR AFRIKAS ERDE

Wie lassen sich ausgelaugte Ackerböden regenerieren, damit sie wieder gute Erträge liefern? Indem die Bauern zwischen ihre Nutzpflanzen Bäume, Sträucher und andere ausdauernde Gewächse setzen.

Von John P. Reganold und Jerry D. Glover

62 FORSTWIRTSCHAFT DEM WANDEL GEWACHSEN

Damit Kanadas Wälder fit für die Erderwärmung werden, sollen aus südlicheren Regionen eingeführte Bäume ihre Gene für Hitzetoleranz darin verbreiten.

Von Hillary Rosner

68 HYDROLOGIE ÜBERSCHWEMMTE FELDER GEGEN DIE NÄCHSTE DÜRRE

Neue Strategien könnten helfen, überschüssiges Wasser für die nächste Trockenzeit unterirdisch zu sammeln.

Von Erica Gies

76 ARTENSCHUTZ DARF MAN BEDROHTE ARTEN UMSIEDELN?

Manche Tiere und Pflanzen werden den Klimawandel in ihrem Verbreitungsgebiet nicht aushalten. Sollte man sie an geeignete Orte umsiedeln?

Von Richard Conniff

3 EDITORIAL

57 IMPRESSUM

82 VORSCHAU

Alle Artikel auch digital
auf **Spektrum.de**

Auf **Spektrum.de** berichten unsere
Redakteure täglich aus der Wissenschaft:
fundiert, aktuell, exklusiv.



Titelbild: piyaset / Getty Images / iStock

ÖKOLOGIE MEERESWELT IM WÜRGEGRIFF

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

KATHY F. ATKINSON



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

» [spektrum.de/artikel/1520781](https://www.spektrum.de/artikel/1520781)

VLADISLAV FOTOLIA; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

▶ 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 beispielsweise 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 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, schienen die Anemonenfische unentschlos-

Bedrohte Ökosysteme: Die schleichende Versauerung setzt marine Lebensgemeinschaften weltweit unter Stress.



sen 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 entgegenzuschwimmen.

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

CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂- 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 untersuchten 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.

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.

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 ostamerikanischen Küste. Diese relativ kleinen Räuber ziehen in den warmen Gewässern zwischen South und North Carolina und Neu-England 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 einem 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.

Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter spektrum.de/t/fische



DALMATIN, O / STOCK.ADOBE.COM

Freilich muss man immer vorsichtig damit sein, Ergebnisse aus einer Laborumgebung 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 gewesen 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 Riffbarsche 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 Meerestieren 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 wie die Riffbarsche, 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 Kohlensäuregehalt im Wasser benötigten die Schnecken zunächst weniger Zeit, um sich aufzurichten, büßten dann aber ihre Fähigkeit ein, lauernden 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 Experimenten 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 riffbewohnender 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. ◀

QUELLEN

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

Das Kombipaket im Abo: App und PDF

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. (Angebotspreise nur für Privatkunden)



DOUGLAS37/GETTY IMAGES/ISTOCK



ARKTIS WELLEN ALS EISBRECHER

Die globale Erwärmung lässt die Eiskappe am Nordpol schwinden – so weit, so bekannt. Doch nun haben Forscher eine zusätzliche Bedrohung entdeckt: In der zunehmend offenen See türmen Winde immer höhere Wellen auf, die an der verbliebenen Eisdecke nagen und sie noch schneller zerstören.



Mark Harris ist Wissenschafts- und Technikjournalist in Seattle.

» [spektrum.de/artikel/1362276](https://www.spektrum.de/artikel/1362276)

Der Sommer 2014 war in der Tschuktschensee höchst ungewöhnlich. Normalerweise bleiben die arktischen Gewässer nördlich der Beringstraße fast das ganze Jahr über zugefroren. Doch diesmal gab es dort so gut wie kein Eis. Den 35 000 Walrossen in der Region blieb deshalb nichts anderes übrig, als sich am Strand im Nordwesten Alaskas niederzulassen; denn Eisschollen, von denen aus sie sonst auf Nahrungssuche gehen, waren weit und breit keine zu finden.

Und noch etwas Seltsames fiel dem Ozeanografen Jim Thomson von der University of Washington in Seattle bei einer Fahrt mit dem Forschungsschiff »Norseman II« eines Morgens im September auf: Ein großer Teil der Besatzung war seekrank. Mitten im Ozean mag das nicht ungewöhnlich erscheinen, doch in dieser Region, wo die Tschuktschen- an die Beaufortsee grenzt, war es schon merkwürdig. Da das Meer hier gewöhnlich eisbedeckt ist, können sich nämlich normalerweise keine Wellen bilden. Nun aber gab es weite offene Wasserflächen – und riesige Wogen: Fünf Meter hohe Brecher schubsten das Schiff hin und her und krachten auf das Deck. Die See war so rau, dass der Kapitän, um ein Kentern zu vermeiden, nicht gegen die Wellen ansteuern konnte, sondern vor ihnen herfahren musste. Während Thomson, ein erfahrener Seemann, seine Forscherkollegen kreidebleich über das Schiff wanken sah, genoss er selbst das stürmische Wetter. Er war hergekommen, um nach Wellen zu suchen – und hatte sie gefunden.

»Sie übertrafen alles, was je gemessen, geschildert oder auch nur für möglich gehalten worden war«, erinnert

er sich. Einige Monate vorher hatte er eine kleine Flotte von Tauchbojen ausgesetzt, und jetzt wollte er eine davon wieder einholen. »Rund sechs Stunden vor ihrer Bergung gab es die höchsten jemals von uns registrierten Wellen«, erzählt er.

Diese Wellen lösen vielleicht ein ebenso bedeutendes wie verwirrendes Rätsel. Warum schwindet das arktische Meereis in so atemberaubendem Tempo? Klimamodellen zufolge sollte es wegen der Erderwärmung durch den von Menschen verursachten Treibhauseffekt zwar schrumpfen, aber wesentlich langsamer, als das derzeit geschieht. Entweder sind die Modelle also falsch, oder es gibt einen bislang übersehenen Effekt. Thomson und andere Wissenschaftler glauben inzwischen, dass es sich dabei um Wellen handelt. Diese erhalten durch das klimabedingte Abschmelzen von Meereis mehr Raum, sich aufzuschaukeln, und prallen dann ihrerseits mit Macht dagegen und zermalmen es. Eine Roboterboje, die Thomson 2012 ausgesetzt hatte, wurde von einer sich auftürmenden Woge fast acht Meter hochgeschleudert.

Solche neuerdings auftretenden Riesenwellen können weit reichende Folgen für das gesamte Weltklima haben. Die arktischen Gewässer umgeben den Nordpol von der Beaufort- und Tschuktschensee nördlich von Kanada und Alaska über die Ostsibirische, Laptew-, Kara- und Barentsee oberhalb von Russland bis zum Europäischen Nordmeer und zur Grönlandsee im Atlantik. Die Eisbedeckung dieses gewaltigen Areals dürfte außer dem Lebensraum der Walrosse auch Meeresströmungen sowie vielleicht sogar den Strahlstrom in der Atmosphäre beeinflussen,



Nur ein einsamer Eisberg dümpelt in den Gewässern nahe der Inselgruppe Franz-Josef-Land, dem nördlichsten Punkt Eurasiens, wo das Meer früher das ganze Jahr über zugefroren war.

was sich auf das Klima bis in mehrere tausend Kilometer Entfernung auswirken würde. Und wenn das Eis die Küsten in der Region nicht mehr vor Erosion schützt, sind vermutlich auch die fragilen Permafrostregionen, die einen großen Teil davon ausmachen, in erhöhter Gefahr.

Diese Überlegungen führten Thomson und gut 100 andere Forscher 2014 zurück ins Nordpolarmeer, wo sie das modernste Fernerkundungsnetzwerk installierten, das je in solch eisigen Gewässern ausgebracht wurde. Das mehrere Millionen Dollar teure Unternehmen sollte endlich Klarheit darüber bringen, was das Auftauchen von Riesenwellen für die Zukunft zu bedeuten hat.

Ein fehlender Faktor

Schon seit Jahren sind sich Forscher bewusst, dass ihnen eine entscheidende Größe in der Arktis durch die Maschen schlüpft. Die Meereisfläche geht alljährlich im Sommer weitaus schneller und weiter zurück, als sämtliche Klimamodelle vorhersagen. Erstmals machte Julienne C. Stroeve vom National Snow and Ice Data Center in Boulder (Colorado) 2007 auf diese Tatsache aufmerksam. »Die Simulationen erfassen nicht wirklich, was vorgeht«, meint sie.

Akkurate Klimamodelle für die Arktis sind jedoch von entscheidender Bedeutung. Eis hat eine höhere Albedo als Wasser, wirft also mehr Sonnenstrahlung ins All zurück. Wenn es schwindet, heizt sich das Nordpolarmeer deshalb stärker auf – und damit auch die Atmosphäre über ihm. Nach Ansicht von Wissenschaftlern beim Pacific Northwest National Laboratory in Richland (US-Staat Washington) kann das den Strahlstrom stören – jenes Luftband, das sich in großer Höhe sehr schnell von West nach Ost bewegt und so beispielsweise dafür sorgt, dass ein Flug von Europa nach Amerika länger dauert als umgekehrt. Diese Strömung wirkt laut einigen Forschern als Barriere, die eisige Luft von den Polen daran hindert, nach Süden vorzustoßen. Wird sie geschwächt, kann es in Europa oder Nordamerika im Winter zu starken Kälteeinbrüchen

kommen, wie das in den letzten Jahren mehrfach der Fall war.

Laut Messungen durch Wissenschaftler von der Woods Hole Oceanographic Institution in Massachusetts nimmt der Salzgehalt der Beaufortsee stark ab. Weil das Eis immer dünner wird und sich weiter zurückzieht, liegt der Eintrag von Süßwasser dort heute um 25 Prozent über dem Wert von vor 40 Jahren. Würde dieses Süßwasser in den Nordatlantik gelangen, könnte es das großräumige Strömungsmuster in den Ozeanen beeinträchtigen. Etwas Ähnliches ist aus noch unbekanntem Gründen in den 1970er Jahren geschehen. Damals stieß salzarmes Wasser aus der Arktis nach Süden vor und brachte Strömungen durcheinander, welche für ein relativ mildes Klima in Nordwesteuropa sorgen. Nach Ansicht einiger Wissenschaftler lösten analoge Störungen schon in früheren Zeiten rasante Klimaumschwünge aus, beispielsweise das Alleröd-Interstadial vor ungefähr 12 000 Jahren, bei dem die Temperaturen in Grönland innerhalb weniger Jahrzehnte um rund acht Grad stiegen.

Zurückweichendes Eis beschleunigt derzeit auch die Küstenerosion in der Arktis. Bei rund einem Drittel aller Kontinentalränder weltweit grenzt Permafrost, also dauerhaft gefrorener Boden, direkt ans Meer. »Das Einzige, was diese Böden an Ort und Stelle hält, ist das Meereis, und sie dürften sehr schnell erodieren, wenn dieser Schutz wegfällt«, meint Hugues Lantuit, Geomorphologe am Alfred-Wegener-Institut in Potsdam. Einige Küsten entlang der Beaufortsee weichen bereits um bis zu 30 Meter pro Jahr zurück.

Diese Erosion bedroht Siedlungen, kann Ökosysteme zerstören und Land absinken lassen. Außerdem trägt sie zur Versauerung der Meere und zur globalen Erwärmung bei. Beim Tauen setzt Permafrostboden nämlich darin eingeschlossenes Kohlenstoff von Pflanzen, Tieren und Mikroorganismen frei, der sich schließlich zersetzt. Dabei entstehen die Treibhausgase Methan und Kohlendioxid. Letzteres löst sich im Meerwasser, säuert es an und macht es so lebensfeindlicher.

Auch Unternehmen wüssten gern genauer, was mit dem arktischen Eis geschieht. Öl- und Gasfirmen spekulieren darauf, in bisher zugefrorenen Meeresregionen Bohrungen vorzunehmen. Und wenn sich die sommerliche Schmelze zuverlässig vorhersagen ließe, könnten Schiffahrtunternehmen die legendäre Nordwestpassage nutzen, was die Fahrzeiten zwischen Pazifik und Atlantik um eine Woche verkürzen würde. Der Eisschwund hat auch die US-Marine alarmiert, nicht zuletzt wegen der Sicherheitsfragen, die ein plötzlich schiffbarer Ozean an der Nordgrenze Alaskas aufwirft.

Alles in allem gibt es also triftige Gründe, herauszufinden, warum das arktische Eis letzthin so überraschend schnell zurückgeht. Thomson vermutet, dass große Wellen mit ihrer zerstörerischen Gewalt entscheidend dazu beitragen. Sie könnten, wie er meint, die Diskrepanz zwischen Vorhersage und Realität erklären. »Bisher gibt es kein umfassendes Modell von Ozean, Atmosphäre, Wetter und Meereis, das die Wellen einschließt«, erklärt er. »Der mechanische Aspekt wurde einfach unterschlagen.«

AUF EINEN BLICK FATALES FEEDBACK

- 1 Das arktische Meereis zieht sich rascher zurück, als die Modelle der globalen Erwärmung vorhersagen. Der Grund dafür könnten gewaltige Wellen sein, die früher nie in der Region gesichtet wurden. Sie entwickeln sich in den offenen Meeresgebieten, die durch die Eisschmelze entstehen.
- 2 Die Wogen können weiteres Eis zerschmettern und so mehr freie Wasserflächen erzeugen, in denen sich noch größere Wellen bilden – ein verhängnisvoller Rückkopplungseffekt.
- 3 Die aufgewühlte See verstärkt zugleich die Küstenerosion und könnte auch Wettermuster außerhalb der Arktis negativ beeinflussen.



ALEX PETTYWASAK'S GOODARD SPACE FLIGHT CENTER

Wenn dichtes Packeis die Beaufortsee nördlich von Alaska bedeckt, können sich keine Wellen bilden.

Lantuit hält es gleichfalls für denkbar, dass die bewegte See für das Zurückweichen der Küsten mitverantwortlich sein könnte. »Noch gibt es kein gutes Modell der Wirkung auf Permafrostboden«, meint er, »allerdings scheint es logisch, dass höhere Wellen auch mehr Erosion hervorrufen.«

Tatsächlich gibt es Beobachtungen, die diese Annahme stützen. Elizabeth Hunke vom Los Alamos National Laboratory in Kalifornien modelliert schon seit Langem Ozeane und Meereis. Bei einer Forschungsfahrt in die Antarktis auf der anderen Seite der Erde stieß sie 1998 am Filchner-Ronne-Eisschelf in der Weddellsee auf einen seltenen Bereich mit offenem Wasser. »Ich sah Wellen mit enormer Wucht auf das Meereis krachen, das seit Jahren, Jahrzehnten oder vielleicht Jahrhunderten fest mit der Küste verwachsen war«, schildert sie. »Obwohl das Eis wirklich dick und widerstandsfähig war, hielt es der Gewalt des Wassers nicht stand.«

Auf der Jagd nach Riesenwellen

Da in der Arktis niemand Riesenwellen erwartete, suchte bis vor Kurzem auch keiner danach oder dachte gar daran, sie in Klimamodelle aufzunehmen. Das änderte sich erst mit den erstaunlichen Messungen, die Thomsons einsame Boje 2012 vornahm. Sie ließen nicht nur die Ozeanografen weltweit aufhorchen, sondern erregten auch die Aufmerksamkeit des US Office of Naval Research, eines Forschungsinstituts der US-Marine in Arlington County (Virginia). Dort gab es bereits ein mit zwölf Millionen Dollar dotiertes Projekt namens Marginal Ice Zone Program (MIZ) mit dem Ziel, das Schicksal des arktischen Eises zu klären. Im Sommer 2014 avancierte die Suche nach Wellen dank der Erkenntnisse von Thomson zum offiziellen Teil dieses Vorhabens.

Das Projekt spannte mehr als 100 Wissenschaftler aus allen Teilen der Welt zum ehrgeizigsten Unternehmen zusammen, das je gestartet wurde, um Licht in das sommerliche Abschmelzen des arktischen Meereises zu brin-

gen. In früheren Jahren hätten dazu Eisbrecher das Polarmeer durchpflügt, bemannte U-Boote die Tiefen ergründet und Satelliten am Himmel ihre Spähaugen auf die Arktis gerichtet. 2014 jedoch erfüllten kleine Schiffe, kurze Expeditionen und Unmengen an Drohnen im Wasser denselben Zweck. Autonome Unterwasserroboter können heute Plätze aufsuchen, die für Menschen unerreichbar sind, und 24 Stunden am Tag unermüdlich Daten sammeln.

Im Frühjahr 2014 flogen Wissenschaftler auf die dick zugefrorene Beaufortsee und installierten Dutzende von Instrumenten entlang einer 400 Kilometer langen Linie, die vom 73. Breitengrad Richtung Pol verlief. Die Geräte registrierten die Dicke der Eisschicht, die Temperatur und Zusammensetzung des Wassers darunter und das Wetter darüber. Sie waren als Schwimmkörper konstruiert, so dass sie, als im Sommer das Eis allmählich aufbrach und sie eine nach der anderen in das kalte Wasser plumpsten, weiterhin die gewünschten Daten aufzeichneten.

Spät im Juli 2014 begannen Thomson und fünf andere Forscher dann von der »Ukpik« aus, einem kleinen, zum Forschungsschiff umgebauten Fischerboot, raffiniertere Versionen der Instrumente in der Beaufortsee auszusetzen. Um diese Jahreszeit geht die Sonne dort niemals unter; rund um die Uhr taucht sie die bewegte See und glitzern-

Vor einigen Jahren setzten Wissenschaftler in der Beaufortsee ein Netz von Sensoren aus, um zu ergründen, warum das arktische Meereis in der jüngsten Vergangenheit noch viel schneller zurückgegangen ist, als Modelle für den Klimawandel vorhergesagt haben.



Die Karte zeigt die typische Ausdehnung des Meereises im Juli.

de Eisschollen in ihre schrägen, matten Strahlen. Kein anderer Seefahrer befand sich in jenen Tagen wohl so weit nördlich, mehr als 150 Seemeilen von der nächstgelegenen Siedlung entfernt. Abgesehen vom gelegentlichen fernen Blasen eines Grönlandwals ist dieser Teil der Beaufortsee ein trostloser Ort.

Für den Mangel an belebter Natur entschädigte in gewissem Maß die Gesellschaft der Roboter. Die Forscher bereiteten mehrere unterschiedliche Typen von Drohnen für den Einsatz vor. Bei einigen handelte es sich um Thomsons Standardbojen zum Registrieren von Wellen, ähnlich der 2012 in derselben Gegend installierten Version. Die anderen waren wesentlich komplexer: knapp zwei Meter lange, torpedoförmige Unterwassergleiter, die sich mit Hilfe von Schwerkraft, einstellbarem Auftrieb und einem beweglichen Flügelpaar selbstständig durch das Wasser bewegen (siehe auch **Spektrum** November 2014, S. 76). Jeder verfügt über eine Schwimmblase, die sich aufpusten oder entleeren lässt, wodurch das Gerät leichter oder schwerer als Wasser wird. Auf diese Weise legt ein solcher Gleiter bis zu 20 Kilometer am Tag zurück, indem er sich in eleganten Bögen auf- und abbewegt. Bei entsprechender Einstellung des Flügelpaars kann er auch um die Kurve fahren.

Am höchsten Punkt seiner geschwungenen Bahn reckt das Gerät wie eine neugierige Robbe kurz seine Nase aus

dem Wasser, um eine GPS-Ortung vorzunehmen sowie Daten an Satelliten zu übermitteln und von dort neue Instruktionen zu erhalten. Eine leistungsstarke Batterie liefert genug Strom für eine Betriebszeit von zehn Monaten.

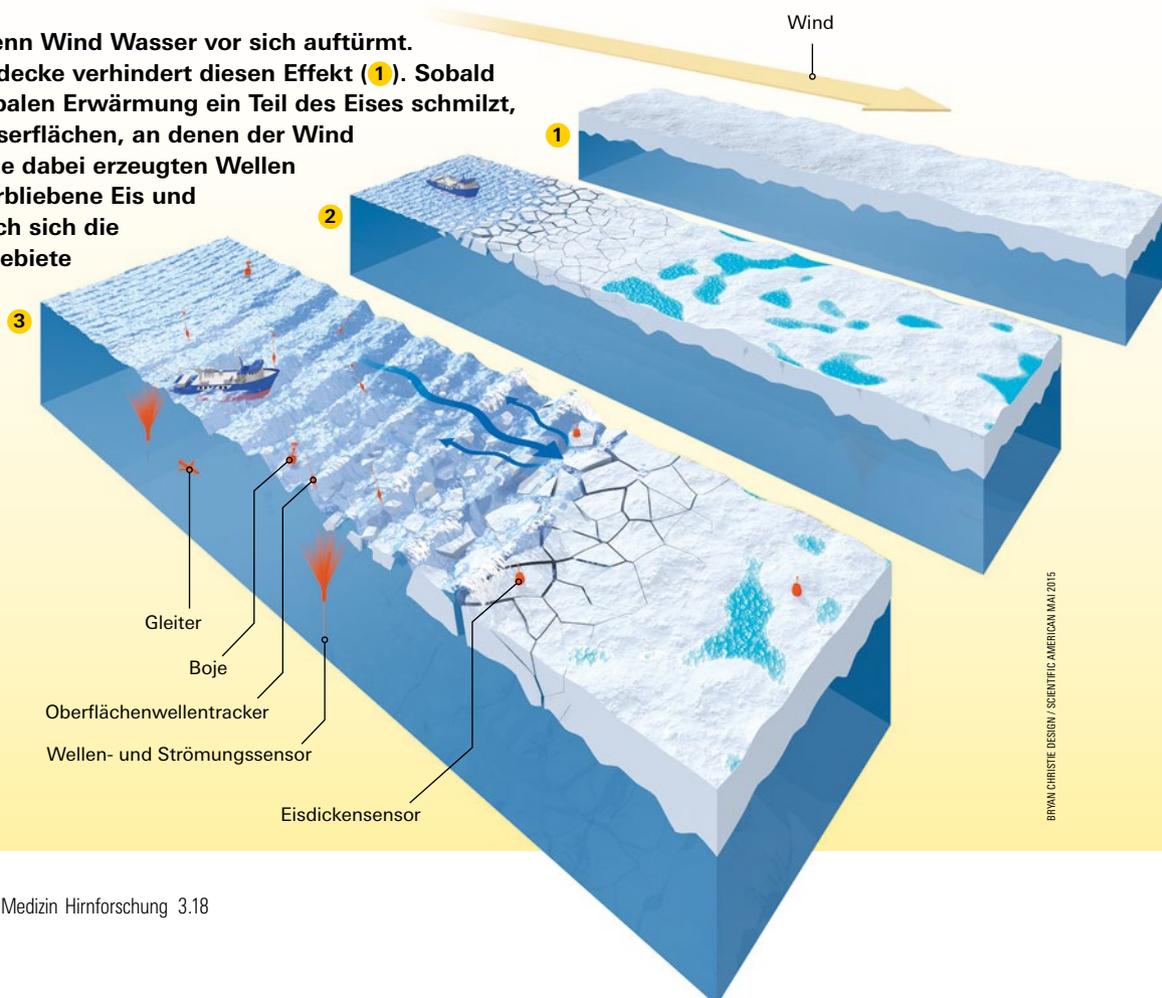
Thomson und seine Kollegen setzten insgesamt vier solche Gleiter aus. Diese pendelten zwei Monate zwischen offenem Wasser und Eisdecke hin und her. Dabei ermittelten sie die Turbulenz, die Temperatur und den Salzgehalt des Meers und maßen die Konzentration an organischem Material. Da bei längerem Aufenthalt unter der Eisdecke kein regelmäßiger Kontakt zu Satelliten möglich war, setzten die Forscher einen eigens entwickelten dritten Drohnentyp als Relaisstation ein. Von Solarzellen und Wellenkraft angetrieben, bewegen sich diese so genannten Wellengleiter zum Eisrand und kommunizieren von dort über akustische Signale mit den Unterwasserfahrzeugen. Insbesondere übermitteln sie Informationen über Längen- und Breitengrade sowie die Anweisungen der Forscher.

Für diesen Zweck hatte Lee Freitag, ein Ingenieur bei Woods Hole, ein System entworfen, um niederfrequente Schallwellen über weite Strecken im Meer zu übertragen: durch Reflexion an den Grenzen von Wasserschichten unterschiedlicher Dichte. Auf dieselbe Weise lassen Wale ihre Gesänge über ganze Ozeane hinweg erschallen. Um

Wechselspiel von Wind, Wellen und Eis

Wellen bilden sich, wenn Wind Wasser vor sich auftrüht. Eine geschlossene Eisdecke verhindert diesen Effekt (1). Sobald jedoch wegen der globalen Erwärmung ein Teil des Eises schmilzt, entstehen offene Wasserflächen, an denen der Wind angreifen kann (2). Die dabei erzeugten Wellen krachen gegen das verbliebene Eis und zersplittern es, wodurch sich die unbedeckten Meeresgebiete ausdehnen und noch größere, zerstörerische Wellen entstehen (3).

Um die Interaktion zwischen Wellen und Eis zu erforschen, brachten Wissenschaftler 2014 die hier gezeigten Instrumente aus. Dazu gehörten Bojen und Detektoren zur Messung der Wellenhöhe, Unterwassergleiter, die unter die Eisdecke vordringen können, und Sensoren zur Messung der Eisdicke.



BRYAN CHRISTIE DESIGN / SCIENTIFIC AMERICAN / MAI 2015

die Kommunikation der Tiere nicht zu stören, verwendeten die Forscher allerdings andere Wasserschichten und Frequenzen.

Roboter können ein viel größeres Gebiet abdecken als Eisbrecher. Da Letztere relativ schwerfällig sind, verfolgen sie meist eine feste Route – auch dann, wenn sich das interessante Geschehen vielleicht gerade ganz woanders abspielt. Die sehr viel wendigeren Wellen- und Unterwassergleiter können auf Anweisung der Forscher dagegen scharf abbiegen, um alle Bewegungen des Eises nachzuverfolgen, während es sich auflöst.

Es gibt einen weiteren Vorteil: Die Roboter benötigen nur ein kleines Mutterschiff. »Die ›Ukpik‹ eignet sich bestens für Manöver auf engstem Raum«, sagt Thomson. »Eisbrecher sind oft einfach zu groß. Wie ein Elefant im Porzellanladen zerstören sie genau die Wellen, die wir messen wollen.«

Die zerstörerische Kraft der Wogen

Nachdem er der Mannschaft geholfen hatte, zwei Wellengleiter zu Wasser zu lassen, erläuterte er mir, an die Reling gelehnt, wie Wellen entstehen. »Grundvoraussetzung ist natürlich Wind. Wenn er weht, sind zwei weitere Dinge nötig: Zeit und Entfernung. Je mehr Raum zur Verfügung steht, desto größer werden die Wellen. Dasselbe gilt für die Zeit. Richtig große Wellen brauchen beides: Raum und Zeit.«

Selbst in den wärmsten Jahren steckt die Arktis im Frühjahr noch unter einem Eispanzer. Doch gegen Ende des Sommers gibt es dort eine freie Wasseroberfläche von der doppelten Größe des Mittelmeers. Je ausgedehnter diese Fläche, desto größer ist die Streichlänge des Winds, und desto höhere Wogen türmen sich auf: Der Wind treibt das Wasser vor sich her – je weiter und länger, desto gewaltiger der Wasserberg.

Wenn das Meer eisfrei ist, absorbiert es auch mehr Sonnenlicht. Dadurch erwärmt sich das Wasser, heizt die Luft auf und verstärkt so den Wind. Die von ihm erzeugten Wellen können dann binnen Tagen Eisflächen von der Größe Deutschlands zerbrechen. Dabei entsteht mehr offenes Wasser, was die Bildung noch größerer Wellen begünstigt.

Unklar ist der genaue Beitrag der einzelnen Glieder dieser Rückkopplungsschleife zur Zerstörung des Eises. Auch stellt sich die Frage, inwieweit die Wellen das erneute Zufrieren des Meers im Herbst verzögern. Für ein besseres Verständnis solcher Zusammenhänge bedarf es genauere Kenntnisse über die Interaktion zwischen Wellen und Meereis.

Nach dem Aussetzen der Drohnen im Juli 2014 geriet die »Ukpik« in ein ausgedehntes Feld mit Eisbergen, die von kleinen Brocken bis zu Kolossen ähnlich jenem reichen, der 1912 die Titanic versenkte – ein ideales Umfeld für Thomsons Untersuchungen. Der Forscher beeilte sich, eine Boje fertig zu machen, die er noch außerhalb des Felds über Bord warf. Dann steuerte er behutsam zwischen das Eis und deponierte eine weitere.

Der Unterschied zwischen der offenen See und dem Eisfeld war eklatant. Hatte das Schiff eben noch heftig

geschaukelt, bewegte es sich schon erheblich sanfter, als es nur ein kleines Stück hineingefahren war. Einige hundert Meter weiter kam es völlig zur Ruhe, während auf der spiegelglatten Wasseroberfläche zwischen den Eisbrocken nur noch ein schwaches Kräuseln zu sehen war. »Das Eis wirkt wie ein Filter für die Wellen und lässt lediglich die längsten ein Stück weit hinein«, erläuterte Thomson. Unter anderem wollte er herausfinden, welchen Anteil die physikalischen Prozesse Streuung und Dämpfung an dem Filtereffekt haben.

Bei der Streuung wird die Wellenenergie lediglich umverteilt, bei der Dämpfung geht sie dagegen auf das Eis über, indem sie es zerbricht und aneinanderreibt. Dabei

Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter spektrum.de/t/arktis-und-antarktis



FOTOLIA / BIG-LABEL

entfaltet sie die größte zerstörerische Kraft. So dramatisch haushohe Wellen in der offenen See auf uns wirken mögen – die Messungen im Zentimeterbereich innerhalb von Eisfeldern dürften wesentlich mehr dazu beitragen, die Klimamodelle für die Arktis in den kommenden Jahren zu verbessern.

Was Thomson bisher herausgefunden hat, stützt jedenfalls seine Annahme, dass mehr Wellen zu weniger Eis und damit zu noch mehr Wellen führen. Das bestätigt auch W. Erick Rogers vom US Naval Research Laboratory. »Diese Rückkopplungsschleife scheint ein wichtiger Mechanismus zu sein, mit dem sich der Schwund des arktischen Meereises im künftigen wärmeren Erdklima verstehen lässt«, versichert er.

Als die »Ukpik« das Eisfeld wieder verlassen hatte und zurück in den Hafen tuckerte, traf sie auf ein kleines Boot mit einem alten Inuit und seinem Enkel aus der nahen Siedlung. Während die Welt noch kaum Notiz von den dramatischen Entwicklungen in der Arktis nimmt, bekommen diese Gemeinschaften – und die einheimische Tierwelt wie Eisbären, Robben, Wale und im Permafrost eingeschlossene Mikroben – die Auswirkungen schon empfindlich zu spüren. ◀

QUELLEN

Cohen, J. et al.: Recent Arctic Amplification and Extreme Mid-Latitude Weather. In: *Nature Geoscience* 7, S. 627–637, 2014

Stroeve, J. C.: Trends in Arctic Sea Ice Extent from CMIP5, CMIP3 and Observations. In: *Geophysical Research Letters* 39, L16502, 2012

Thomson, J., Rogers, W. E.: Swell and Sea in the Emerging Arctic Ocean. In: *Geophysical Research Letters* 41, S. 3136–3140, 2014



Rund um die Antarktis trifft das stürmischste Meer auf die größten Eismassen der Welt. Die gewaltigen Kräfte in der Region gelten als Motor der globalen Tiefseeströmungen.

ANTARKTIS OZEAN IN AUFRUHR

Das Südpolarmeer nimmt gewaltige Mengen Kohlenstoff und Wärme aus der Atmosphäre auf und verlangsamt so den Klimawandel. Neuen Messdaten zufolge könnte sich das demnächst ändern.

» [spektrum.de/artikel/1453301](https://www.spektrum.de/artikel/1453301)





Der Journalist **Jeff Tollefson** schreibt für »Nature« und lebt in den USA. Er berichtet vor allem über Energie-, Klima- und Umweltthemen.

► Auf zehn Meter hohe Wellen war Joellen Russell dann doch nicht vorbereitet. Dem Meer südlich von Neuseeland ausgeliefert, begann sie um sich und ihr Forschungsschiff zu bängen. »Der Ritt über die Wasserberge fühlte sich an, als würden wir jede Sekunde zwischen ihnen zerschellen«, erinnert sich die Ozeanografin von der University of Arizona an die Expedition von 1994. An ihrem Institut begegnet Russell Meeresströmungen sonst in Form von Computersimulationen und Klimamodellen. Damals hatte sie ein Kaventsmann fast über Bord gespült.

Bereits die ersten Daten der Sensoren sorgten für weitere Überraschungen. Die Meeresoberfläche enthielt wenig Sauerstoff, dafür viel Kohlenstoff und war saurer als erwartet – deutliche Zeichen für hinaufgespülte Nährstoffe aus den Tiefen der See. Wie sich später herausstellte, bestanden die Wellen aus uraltem Wasser, das seit Jahrhunderten keinen Kontakt mit der Atmosphäre gehabt hatte.

Seinerzeit haben Ozeanografen die seltsamen Umwälzprozesse im Südpolarmeer noch kontrovers diskutiert. Inzwischen sind sie als eines seiner besonderen Kennzeichen anerkannt: Rund um die Antarktis befördern die weltweit stärksten ausdauernden Winde ständig kaltes Tiefenwasser nach oben. Das Phänomen wird Auftrieb oder englisch Upwelling genannt. Die Bewegungen treiben mächtige Ströme an, die zwischen den Weltmeeren zirkulieren.

Wegen der unwirtlichen Bedingungen, wie sie Joellen Russell erfahren musste, konnten Ozeanografen das Südpolarmeer jahrzehntelang nicht in dem Maß erkunden, das seiner globalen Bedeutung gerecht geworden wäre. Inzwi-

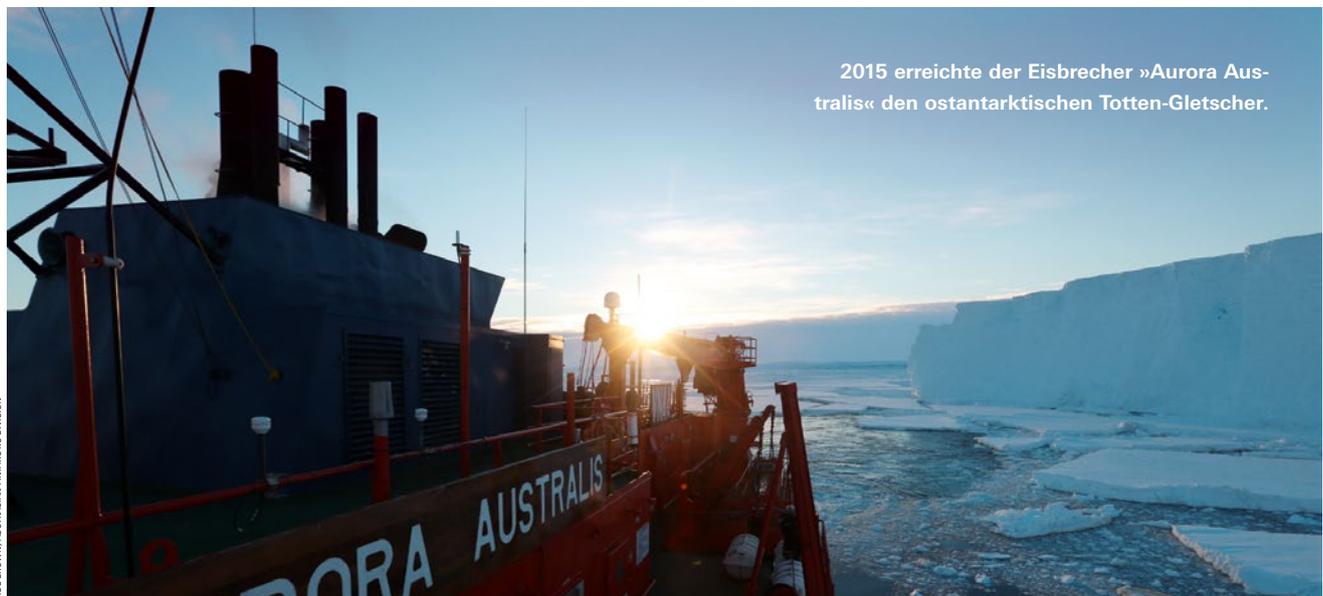
schen bricht eine neue Hightechära der Antarktisforschung an. Mit Hilfe von Bojen, Satelliten, Computermodellen, ferngesteuerten Robotern und sogar mit sensorbestückten Robben widmen sich Wissenschaftler aus der ganzen Welt den Gewässern um die Antarktis. Auf diese Weise wollen sie endlich die großen Datenlücken schließen.

Ein genaueres Verständnis davon, wie der Südliche Ozean und das globale Klima zusammenspielen, macht Vorhersagen für die Zukunft der antarktischen Eisschicht, der Erderwärmung und des Anstiegs der Meeresspiegel verlässlicher. Der Ozeanograf Arnold Gordon vom Lamont-Doherty Earth Observatory in Palisades im US-Bundesstaat New York hatte schon in den 1960er Jahren Analysen des Südpolarmees geleitet und meint nun: »Der Informationsreichtum von heute ist beeindruckend. Mit neuen Technologien können wir Daten aus den entlegensten Gebieten sammeln, ohne dafür Schiffe durch das Meereseis zu manövrieren.«

Umtriebiger Umschlagplatz für den Kohlenstoff der Welt

Insgesamt entzieht das Gebiet der Atmosphäre Wärme und Kohlendioxid. Laut vorläufigen Auswertungen könnte der Ozean jedoch von Jahr zu Jahr mehr von seiner Fähigkeit einbüßen, das Treibhausgas aus der Atmosphäre aufzunehmen. Damit stellt sich die Frage, inwieweit das Gebiet die globale Erwärmung weiterhin bremsen kann. »Das Südpolarmeer hilft uns im Augenblick gegen den Klimawandel. Das könnte sich jederzeit ändern«, bekräftigt der Ozeanforscher Michael Meredith vom British Antarctic Survey in Cambridge. Er will mit seinem Team Expeditionen durchführen, um die Prozesse zu dokumentieren.

Entlang des 60. südlichen Breitengrads gibt es einen erdumspannenden Meeresgürtel. Keine Landmassen bremsen hier Wind und Wellen, während sie um den Globus brausen. Seit den 1980er Jahren merken die Wissenschaftler immer deutlicher, welche wichtige Rolle diese besondere Region für das Weltklima spielt. Damals ver-



2015 erreichte der Eisbrecher »Aurora Australis« den ostantarktischen Totten-Gletscher.

PHIL BROWN, AUSTRALIAN ANTARCTIC DIVISION

suchten sie zu klären, warum die Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre in der letzten Eiszeit erst um etwa ein Drittel ab- und später wieder zunahm. Der Ozeanograf Jorge Sarmiento von der Princeton University vermutete dahinter Veränderungen im Südpolarmeer.

Drei Jahrzehnte später macht sich Sarmiento nun daran, große Datenmengen über den zeitlichen Verlauf der chemischen und biologischen Vorgänge zu sammeln und ihre Rolle für den Kohlenstoffhaushalt zu klären. Inzwischen leitet er das Southern Ocean Carbon and Climate Observations and Modeling Project (SOCCOM). Es begann 2014 und ist bis 2020 mit 21 Millionen US-Dollar ausgestattet. In seinem Rahmen wollen die Forscher insgesamt rund 200 batteriebetriebene Treibbojen entlassen, die in den oberen 2000 Metern des Südpolarmees regelmäßig auf- und abtauchen. Sie ergänzen das etablierte weltumspannende Beobachtungssystem Argo, das mit fast 4000 ähnlichen Bojen Daten zu Temperatur und Salzkonzentration aller Meere sammelt. Die Varianten von SOCCOM werden darüber hinaus den Gehalt von Sauerstoff, Kohlenstoff und Nährstoffen im Wasser rund um die Antarktis dokumentieren.

Mit den neuen Informationen können Sarmiento und sein Team die Modelle zum Austausch von Kohlendioxid zwischen den Meeren und der Atmosphäre verbessern. Indirekten Hinweisen zufolge fungiert das Südpolarmeer als eine Nettosenke und hat seit Beginn der industriellen Revolution bis zu 15 Prozent aller Kohlenstoffemissionen der Menschheit aufgenommen. Je nach Jahreszeit und Region entlässt kohlenstoffreiches, an die Oberfläche gespültes Wasser wieder einen Teil des Gases in die Atmosphäre.

Bald werden Forscher die Vorgänge im antarktischen Ozean beinahe in Echtzeit und flächendeckend direkt vor Ort messen können. »Wir haben gesehen, dass viel mehr Kohlendioxid in die Atmosphäre freigesetzt wird als bisher angenommen«, erzählt Sarmiento. Das scheint insbesondere im Winter der Fall zu sein. Die Untersuchungen basieren lediglich auf Messdaten der Bojen, die seit mindestens einem Jahr im Wasser schwimmen. Daher ist nicht klar, ob die höheren Emissionen repräsentativ für Veränderungen über das gesamte Südpolarmeer sind. »Das ist ein spannender Hinweis, weil dann die Kohlenstoffsenke schwächer wäre, als wir bisher dachten«, meint Alison Gray, die als Postdoktorandin in Princeton die Messungen auswertet.

Der Südliche Ozean verändert sich – doch was bedeutet das?

Ähnliche Hinweise gab es schon früher. Laut einer 2007 im Fachmagazin »Science« veröffentlichten Studie des Teams um Corinne Le Quéré, heute Leiterin des britischen Tyndall Centre for Climate Change Research, ging die Kohlenstoffaufnahme im Südpolarmeer zwischen 1981 und 2004 zurück. Die Forscher machen dafür die Winde um den antarktischen Kontinent verantwortlich. Deren Geschwindigkeit hat in dieser Zeit zugenommen, wahrscheinlich als Folge der globalen Erwärmung sowie des Ozonlochs. Dieses kühlt die Stratosphäre über der Antarktis.

Unstete Senke



Die Menge des Kohlendioxids, die das Südpolarmeer aus der Atmosphäre absorbiert, schwankt stark. In den 1990er Jahren sank die Aufnahme, seit der Jahrtausendwende steigt sie wieder. Forscher suchen noch die Ursachen – und fürchten eine erneute Umkehrung des Trends.

NATURE. MACH LANDSCHÜTZER, P. ET AL.: THE REINVIGORATION OF THE SOUTHERN OCEAN CARBON SINK. IN: SCIENCE 349, S. 1224-1224, 2015; TOLLERSON, J.: THE HOSTILE OCEAN THAT SLOWED CLIMATE CHANGE. IN: NATURE 539, S. 346-348, 2016. BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Der lokale Temperaturgegensatz verstärkt die Stürme, die wiederum mehr nährstoffreiches Wasser an die Oberfläche ziehen, wo es Kohlendioxid freisetzt.

Würde dieser Trend anhalten, könnte der Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre in Zukunft rascher ansteigen. Allerdings deutete eine weitere Veröffentlichung in »Science« 2015 auf eine effektivere Kohlenstoffsenke seit Anfang des Jahrtausends hin (siehe »Unstete Senke«, oben). Le Quéré ist sich nicht sicher, ob das eine Rückkehr zur Normalität darstellt oder lediglich eine Abweichung von einem lang-

AUF EINEN BLICK INSPEKTION ÜBERFÄLLIG

- 1 Kräftige Winde und Strömungen wälzen den antarktischen Ozean bis in große Tiefen um – mitsamt der Wärme, den enthaltenen Gasen und Nährstoffen. Das beeinflusst das Klima und die übrigen Weltmeere.
- 2 Trotz dieser globalen Bedeutung ist die Dynamik des Südpolarmees kaum erforscht. Die extrem unwirtlichen Bedingungen ließen vor Ort bislang nur vereinzelte Messungen zu.
- 3 Forscher wollen mit Hightech die Datenlücken schließen, etwa mit automatisierten Treibbojen. Erste Auswertungen deuten auf dramatische Veränderungen in der Region binnen kurzer Zeit hin.

fristigen Trend. Eigentlich wisse man nur: Der Südliche Ozean ist wesentlich unbeständiger als gedacht.

Die Bojen des SOCCOM-Projekts werden den Forschern bei diesen Fragen weiterhelfen, auch wenn es noch Jahre dauern dürfte, bis Genaueres bekannt wird. Le Quéré zufolge könnten selbst diese Daten nicht ausreichend Details liefern. Im Juli 2016 gab sie zu bedenken, dass Modelle zur Kohlenstoffaufnahme im Südpolarmeer stark von den Annahmen über das dortige Nahrungsnetzwerk abhängen. Bessere Klimaprognosen ließen sich darum nur mit umfassenderen Informationen zur Blüte des Phytoplanktons und Zooplanktons erstellen: »Das ist die nächste große Hürde.«

Der Kohlenstoff ist nur eines der wichtigen Themen für die Wissenschaftler. Sie wollen außerdem herausfinden, was mit der Wärme geschieht. Der Südliche Ozean ist Dreh- und Angelpunkt für ein Netzwerk von Strömungen, die Wasser, Wärme und Nährstoffe durch die Meeresbecken schieben. In der Nähe der Antarktis kühlt das Oberflächenwasser ab. Es wird dichter, sinkt herab und treibt Tiefseeströmungen an. Diese streichen über den Boden und ziehen gen Norden in den Pazifik, den Atlantik und den Indischen Ozean.

Viele der bisherigen Erkenntnisse stammen aus Erhebungen, die seit den frühen 1990er Jahren etwa alle zehn Jahre mit Hilfe von Schiffen durchgeführt worden sind. Dabei stellten die Wissenschaftler 2010 fest: Das Tiefenwasser hatte sich deutlich und überraschend stark aufgeheizt und etwa zehn Prozent der zusätzlichen Wärme aus dem globalen Temperaturanstieg absorbiert.



EPICSTOCKMEDIA / FOTOLIA

Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter spektrum.de/t/meere

Die Forscher fanden verschiedene Erklärungen. Beispielsweise wurde das Oberflächenwasser um die Antarktis herum immer salzärmer, teilweise wegen stärkerer sommerlicher Regenfälle über dem Ozean. Salzarmes Wasser hat eine geringere Dichte und sinkt daher möglicherweise nicht mehr wie gewohnt in die bodennahen Strömungen herab. »Das Wasser in der Tiefe erwärmt sich, weil es nicht genügend Kaltwassernachschub erhält«, erklärt der Ozeanograf Gregory Johnson von der National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) in Seattle, der auch Koautor der Analyse von 2010 war. Eine weitere Studie, die sich auf neue Beobachtungen von Schiffen stützt, kommt zum selben Schluss.

Für ein genaueres Bild brauchen die Forscher mehr Daten aus häufigeren Messungen. Das wird vielleicht mit dem geplanten internationalen Projekt Deep Argo möglich. Dabei sollen Treibbojen regelmäßig bis zum Boden abtauchen. Die Bojen der bestehenden Argo-Flotte halten nur

den Druck von 2000 Meter Wassersäule aus – im Durchschnitt ist das Meer mehr als doppelt so tief. Johnson gehört einem US-Konsortium an, welches die neuen Bojen vor den Küsten Neuseelands und Australiens testet. Andere Forscher wollen die Tiefenwasserströme mit Hilfe von verankerten Stationen beobachten. Seit 1999 betreut Gordon einige davon im Weddellmeer – eine der Hauptregionen, in der das kalte Oberflächenwasser absinkt und Strömungen am Meeresboden anstößt. Wie die Wissenschaftler herausfanden, wurde das Tiefseewasser in einigen Gebieten im Lauf der Zeit immer salzärmer. Die Langzeittrends sind jedoch noch nicht eindeutig. »Wir verstehen erst allmählich, wie sich das Bodenwasser verändert und wie das die gesamte globale Zirkulation beeinflusst«, sagt er.

Eine weitere Expedition beweist:

Auch die Ostantarktis verändert sich rapide

Im Januar 2015 kreuzten Ozeanografen auf dem australischen Eisbrecher »Aurora Australis« vor der ostantarktischen Küste. Dabei bot ein Riss im Meereseis eine einmalige Gelegenheit: Sie folgten ihm und erreichten den Rand des Totten-Gletschers, einen der größten Abflusspunkte für die dortige Eisdecke (siehe Bild S. 20). Keine andere Expedition kam je so nah an den Gletscher heran.

Das Eisschelf ist 200 Meter dick; darunter und davor brachte das Team Messgeräte ins Wasser (Bild rechts). Die Ergebnisse schockierten sie. An der Vorderseite des Gletschers stellten sie eine um drei Grad Celsius höhere Temperatur fest als am Aufsetzpunkt an der Basis, wo das Wasser gefriert. »Wir dachten immer, der Totten-Gletscher sei weit genug von warmen Gewässern entfernt und würde von ihnen nicht beeinflusst«, berichtet der Expeditionsleiter Steve Rintoul vom Antarctic Climate and Ecosystems Cooperative Research Centre in Hobart in Australien, »doch warmes Wasser war überall am Schelf.«

Andere Teams hatten schon warme Strömungen unter der westantarktischen Eisschicht ausgemacht. Rintouls Expedition konnte belegen, dass ein ähnlicher Prozess die östliche Antarktis untergräbt. Damit ist fraglicher denn je, wie lange die gigantischen Eismengen, die den Kontinent bedecken, noch überdauern werden.

Bislang ist unklar, was diese oberflächennahen Strömungen aufheizt. Erklärungen wie der Auftrieb warmen Wassers durch veränderte Windlagen diskutieren die Experten ebenso wie eine Kombination aus salzärmerem Oberflächenwasser und einer Zunahme von Meereis. Beides zusammen könnte eine Art Deckel auf dem Ozean bilden, der Teile des warmen, aufsteigenden Wassers in Richtung Küste drängt. »Jeder hat seine bevorzugte Begründung, ich natürlich auch. So funktioniert Wissenschaft nun einmal: Je mehr man beobachtet, desto komplizierter wird es«, kommentiert Gordon.

Einige Forscher beziehen die ständigen Bewohner der Antarktis in ihre Suche nach Antworten ein. Merediths Team vom British Antarctic Survey möchte beispielsweise Weddellrobben mit Sensoren ausstatten. Die Tiere könnten dann Messwerte sammeln, während sie unter der Eisdecke entlang des Kontinentalsockels nach Futter suchen. Diese Zone ist besonders bedeutsam, weil dort das kalte Wasser



Mit einer »CTD-Rosette« nehmen Forscher Wasserproben.

STEVE RINTOUL, AUSTRALIAN ANTARCTIC DIVISION

in die Tiefe sinkt. »Die Prozesse sind äußerst wichtig für die ganze Welt, lassen sich aber nur schwer messen. Mit den Robben könnten wir unsere bisherigen Grenzen überschreiten«, erklärt Meredith. Die Meeressäuger sind nur ein Teil des Plans. Die Forscher wollen außerdem autonome Gleiter auf programmierte Routen in bis zu 1000 Meter Tiefe schicken und dort Temperatur und Salzgehalt messen. Zusammen mit Beobachtungen vom Schiff aus soll das mehr Klarheit über die Vorgänge in der Region schaffen.

Aus den vielen Daten nun noch die richtigen Schlüsse ziehen

Das Sammeln von Messwerten reicht jedoch nicht aus. Wissenschaftler müssen damit den Transport von Wärme, Kohlendioxid und Nährstoffen um den Globus vorherzusagen können. Bis dahin ist es trotz fortschrittlicher Datenerhebung ein weiter Weg, denn nach bisherigen Erkenntnissen folgt das Upwelling keinem einfachen Muster. Vielmehr wirbelt das aufsteigende Wasser, bevor es die Oberfläche erreicht, zunächst eineinhalbmal um den Kontinent. Bei den Simulationen von Sarmientos Team waren nur die Modelle mit höchster Auflösung in der Lage, dieses Verhalten zu berechnen. Sarmiento meint, es werde sicherlich noch lange dauern, bis Computer die Prozesse in der Region gut nachvollziehen können.

Russell ist zuversichtlich, dass der Südliche Ozean langsam seine Geheimnisse preisgibt. Nachdem sie 1994 von ihrer ersten Fahrt zurückgekehrt war, beschäftigte sie sich erst einmal damit, die Simulationen zu verbessern.

Die damals vorhandenen Daten haben noch nicht genügt, um die Auswirkungen des von ihr beobachteten Upwellings irgendwie beziffern zu können. Inzwischen leitet sie die Modellrechnungen des SOCCOM-Projekts und bekommt mehr Daten, als sie sich jemals erträumt hat. »Aus Sicht einer Ozeanografin leben wir in einer faszinierenden Zeit«, meint sie, »dabei wohnen wir genau genommen einem beängstigenden geophysikalischen Experiment an unserem Planeten bei.« ◀

QUELLEN

Gordon, A. L. et al.: A Seasonal Cycle in the Export of Bottom Water from the Weddell Sea. In: *Nature Geoscience* 3, S. 551–556, 2010

Landschützer, P. et al.: The Reinvigoration of the Southern Ocean Carbon Sink. In: *Science* 349, S. 1221–1224, 2015

Le Quéré, C. et al.: Saturation of the Southern Ocean CO₂ Sink Due to Recent Climate Change. In: *Science* 316, S. 1735–1738, 2007

Purkey, S. G., Johnson, G. C.: Warming of Global Abyssal and Deep Southern Ocean Waters between the 1990s and 2000s: Contributions to Global Heat and Sea Level Rise Budgets. In: *Journal of Climate* 23, S. 6336–6351, 2010

Rintoul, S. R. et al.: Ocean Heat Drives Rapid Basal Melt of the Totten Ice Shelf. In: *Science Advances* 2, e1601610, 2016

nature

© Nature Publishing Group

www.nature.com

Nature 539, S. 346–348, 17. November 2016

TROPEN DAS STURMMONSTER

Ein mysteriöses tropisches Wettermuster, die so genannte Madden-Julian-Oszillation, löst Überschwemmungen, Hitzewellen und Wirbelstürme rund um den Globus aus.



Eric Hand ist Redakteur bei der Fachzeitschrift »Science« mit Schwerpunkt Geowissenschaften und Planetologie.

» spektrum.de/artikel/1405259

Zu Beginn einer Madden-Julian-Oszillation im Frühjahr 2011 türmten sich diese Wolken über dem Indischen Ozean auf.

OWEN SUYDEN



► Anfang 2015 ballten sich über dem Indischen Ozean Wolken zusammen und formierten sich zu einem düsteren Geschwader, das längs des Äquators ostwärts zog. Wo es hinkam, brachte es heftige Regenfälle und schwere Stürme. Als es im März schließlich östlich von Neuguinea den Pazifik erreichte, bedeckte es ein tausende Kilometer breites Areal, in dem die Wolken bis zur Stratosphäre emporragten. Andauernde starke Westwinde trieben warmes Wasser vor sich her und schoben es zu einem flüssigen Hügel zusammen, der sich zwar nur wenig über den mittleren Meeresspiegel erhob, aber tief in die kalten Schichten darunter eindrang. Dieser enorme Wasserwulst wälzte sich ostwärts wie eine auf dem Kopf stehende Flutwelle. Im Mai rollte eine zweite solche Warmwasserbeule, begleitet von Sturm und Regen, in den Westpazifik. Eine dritte folgte im Juli.

Schon vor dem Erscheinen dieses Trios hatte sich im Ostpazifik vor der peruanischen Küste warmes Wasser angesammelt, was auf den Beginn eines globalen Wetterphänomens hindeutete, das als El Niño bekannt ist. Zunächst schien es nur schwach auszufallen. Aber als die drei zusätzlichen Warmwasserschübe nach Durchqueren des Pazifiks dort eintrafen, verwandelten sie es in das stärkste solche Ereignis seit dem Rekord von 1997. Auf seinem Höhepunkt im Januar kam es zu schweren Regen-

fällen und Überschwemmungen an der normalerweise wüstenartig trockenen Westküste Südamerikas. Selbst das sonst sonnige Kalifornien versank teilweise in den Fluten.

Obwohl das ungewöhnlich starke El-Niño-Ereignis Schlagzeilen machte, fand das Phänomen, dem es seine Intensität verdankte, fast kein Echo. Selbst sein Name ist kaum bekannt: Madden-Julian-Oszillation (MJO). Das steht in krassem Widerspruch zur Bedeutung dieser meteorologischen Erscheinung – hat sie doch Auswirkungen weit über El Niño hinaus. In den Tropen ist die MJO der wichtigste Wetterfaktor, aber auch in höheren Breiten kann sie für Kälteeinbrüche, Hitzewellen, Regenperioden und Hurrikane sorgen. Adam Sobel, Atmosphärenforscher an der Columbia University in New York, wundert sich, dass wir trotzdem so wenig darüber wissen: »Die meisten haben nicht einmal davon gehört!«

Doch langsam beginnen die Wissenschaftler diese verborgene Kraft im Wetter- und Klimageschehen zu enträtseln. Nach jahrzehntelangen Fehlversuchen lässt sie sich inzwischen sogar am Computer simulieren. Das hilft insbesondere bei längerfristigen Wettervorhersagen. Klimaforscher wiederum versuchen herauszufinden, wie sich die MJO in einer wärmer werdenden Welt verhält. Und nach einer ausgedehnten Forschungskampagne im Indischen Ozean, an der Dutzende von Nationen teilnahmen, zeichnen sich auch erste Antworten auf die beiden elementarsten Fragen ab: Warum existiert die MJO überhaupt, und wie entsteht sie?

In manchen Jahren tritt keine einzige MJO auf, in anderen dagegen sind es mehr als ein halbes Dutzend. Meist entstehen sie im nördlichen Winter über dem Indischen Ozean, wo hohe Regenwolken zu Clustern verschmelzen. Vor dieser von Regen und Wind begleiteten »aktiven Front« befindet sich eine Schönwetterzone, die »Suppressionsregion«. Beide ziehen als Tandem mit einer Geschwindigkeit von etwa fünf Metern pro Sekunde ostwärts über Indonesien zum Pazifik. Dort lassen die Stürme nach, aber das System beschleunigt sich und bewegt sich nun um ungefähr 15 Meter pro Sekunde voran. Einige MJOs lösen sich auf, wenn sie auf den Gebirgswall der Anden treffen, andere setzen sich über Südamerika bis zum Atlantik oder Afrika fort. Manche umrunden sogar den Globus und erreichen nach ein bis zwei Monaten wieder ihren Ursprungsort im Indischen Ozean.

Während die aktive Front am Äquator entlangwandert, beeinflusst sie auch das Wetter in höheren Breiten. Im Indischen Ozean kann sie den indischen und australischen Monsun anstoßen oder verstärken. Über dem Pazifik lösen sich manchmal wellenartige Störungen von der MJO ab und lenken den Strahlstrom um, so dass er feuchte Luft aus der Region um Hawaii polwärts führt, die dann als atmosphärischer Fluss, Pineapple Express genannt, an der Pazifikküste Nordamerikas für sintflutartige Regenfälle sorgt (siehe **Spektrum** April 2013, S. 74).

Andere Fernwirkungen in der Atmosphäre führen zu Kälteeinbrüchen und Hitzewellen in Nordamerika und Europa. Und wenn es die MJO bis in den Atlantik schafft,

kann sie die Bildung von Wirbelstürmen beeinflussen. Diese treten dann mit bis zu viermal so hoher Wahrscheinlichkeit auf, wie eine Studie aus dem Jahr 2000 ergab. So entstand der Hurrikan Sandy 2012 direkt nach dem Durchzug einer starken MJO.

Roland Madden und Paul Julian gelang der Nachweis der später nach ihnen benannten Oszillation 1971 nur indirekt – durch kühne Schlussfolgerungen und einen der leistungsfähigsten damaligen Lochkartencomputer, den sie mit Daten von Wetterstationen auf weit verstreuten Inseln im Pazifik fütterten (siehe »Wie zwei Pioniere den Tropen den Puls fühlten«, S. 28). Doch bald offenbarte sich das Phänomen unmissverständlich auf Bildern von Wettersatelliten, die Pulks von Gewitterwolken zeigten, welche entlang des Äquators die Erde umrundeten. Allerdings ließen sich die MJOs nicht mit gängigen Computerprogrammen für Wettervorhersagen und Klimaprognosen reproduzieren.

Real, aber mit Wettermodellen nicht nachvollziehbar

Meteorologische Modelle unterteilen die Erdatmosphäre in Millionen von Kästchen. Wetterbeobachtungen liefern die Ausgangsdaten wie Temperatur, Luftfeuchte oder Windgeschwindigkeit für jede Zelle. Dann wird die Simulation gestartet und anhand physikalischer Gesetzmäßigkeiten die weitere Entwicklung berechnet. Durch Verkleinerung der Kästchen steigt die Auflösung – und damit die Zuverlässigkeit –; doch die nötige Rechenleistung erreicht dabei schnell astronomische Höhen. Eines der weltweit besten Vorhersagemodelle, das Forscher am European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), dem Europäischen Zentrum für mittelfristige Wettervorhersagen, in Reading (England) betreiben, verwendet Kästchen mit einer Seitenlänge von 16 Kilometern. Das ist immer noch zu grob, um lokale Vorgänge wie das Aufquellen einer Gewitterwolke zu erfassen. Erst in einem Jahrzehnt dürften Computer leistungsfähig genug für globale Modelle sein, welche die Entwicklung einzelner Wolken einbeziehen.

Einstweilen tricksen die Modellierer. Das geschieht mit »Parametrisierungen«, vereinfachten Gleichungen für kleinräumige Vorgänge wie die Wolkenbildung innerhalb der Kästchen. Bei dieser Vorgehensweise schlüpfen die MJOs jedoch irgendwie durch die Maschen. In den Modellen brauen sich zwar Sturmtiefs über den tropischen Meeren zusammen; doch geschieht das zu schnell an zu vielen Orten, wodurch die Feuchtigkeit lokal als Regen niedergeht, statt dass sich kleine bis mittelgroße Wolken zu den für MJOs typischen Geschwadern vereinigen.

Einen ersten Durchbruch brachte 2008 eine Veröffentlichung unter Federführung von Peter Bechtold. Der leitende Wissenschaftler am ECMWF erkannte, dass die üblichen Parametrisierungen Verwirbelungen an den Rändern von Wolkentürmen, in denen feuchtwarme Luftmassen aufsteigen, nicht berücksichtigen. Durch diese Turbulenzen wird trockenkalte Luft beigemischt, was Meteorologen als Entrainment bezeichnen. Das bremst den Aufstrom und verlangsamt die Wolkenbildung. So unterbleibt das frühzeitige Ausregnen, das die Entwicklung von MJOs im Keim ersticken würde. Bechtold zeigte, dass im Wolkenmodell des ECMWF solche Oszillationen auftraten, wenn er durch Änderung der Parametrisierungen dem Entrainment Rechnung trug.

Meteorologen weltweit griffen die neuen Erkenntnisse auf und bauten sie in andere führende Wettermodelle in Europa, Japan und den USA ein – was angesichts des bedeutenden Einflusses von MJOs auf das Wettergeschehen die Treffsicherheit der Vorhersagen erheblich steigerte. Das ECMWF erstellt inzwischen recht zuverlässige Prognosen für einen Rekordzeitraum von 25 Tagen. Anfang 2015 hat das WSI, eine Abteilung des privaten Wetterdienstes The Weather Company, ein Wettermodell auf MJO-Basis vorgestellt, das Kälteeinbrüche und Hitzewellen in Nordamerika und Europa bis zu fünf Wochen im Voraus anzeigen kann. Kunden sind laut Michael Ventrice, einem WSI-Forscher in Andover (Massachusetts), bisher hauptsächlich Hedgefonds und Börsenhändler, die auf die Preise von Energieträgern wie Heizöl oder Erdgas wetten wollen. Außerdem nutzen Einzelhändler – so der Wissenschaftler – MJO-Modelle anderer Anbieter, um den günstigsten Zeitpunkt für Schlussverkäufe zu ermitteln.

Klimaforscher sind bei der Simulation von MJOs noch nicht so weit wie die Meteorologen. Das rührt zum Teil daher, dass der Trick, der bei Wettervorhersagen recht gut funktioniert, bei weltweiten langfristigen Klimaprojektionen unerwünschte Nebeneffekte hat. Je mehr Entrainment man annimmt, was den größten Gewitterwolken Feuchtigkeit entzieht, desto mehr Wasserdampf bleibt für mittelgroße Regenwolken übrig, wodurch das Klima weltweit zu nass wird.

Einige Forscher basteln an Auswegen, indem sie weiter an der Parametrisierungsschraube drehen oder kleinräumige Wolken explizit simulieren. Dennoch produzieren laut einer Untersuchung vom Mai 2015 nur 8 von 27 globalen Klimamodellen eine passable MJO. Einige erzeugen sogar Exemplare, die sich in die falsche Richtung bewegen, also von Ost nach West.

Immerhin vermitteln die Modelle bereits eine Ahnung davon, wie MJOs in einer wärmeren Welt aussehen könnten. Laut einer Fachveröffentlichung vom Juli 2015 sollten

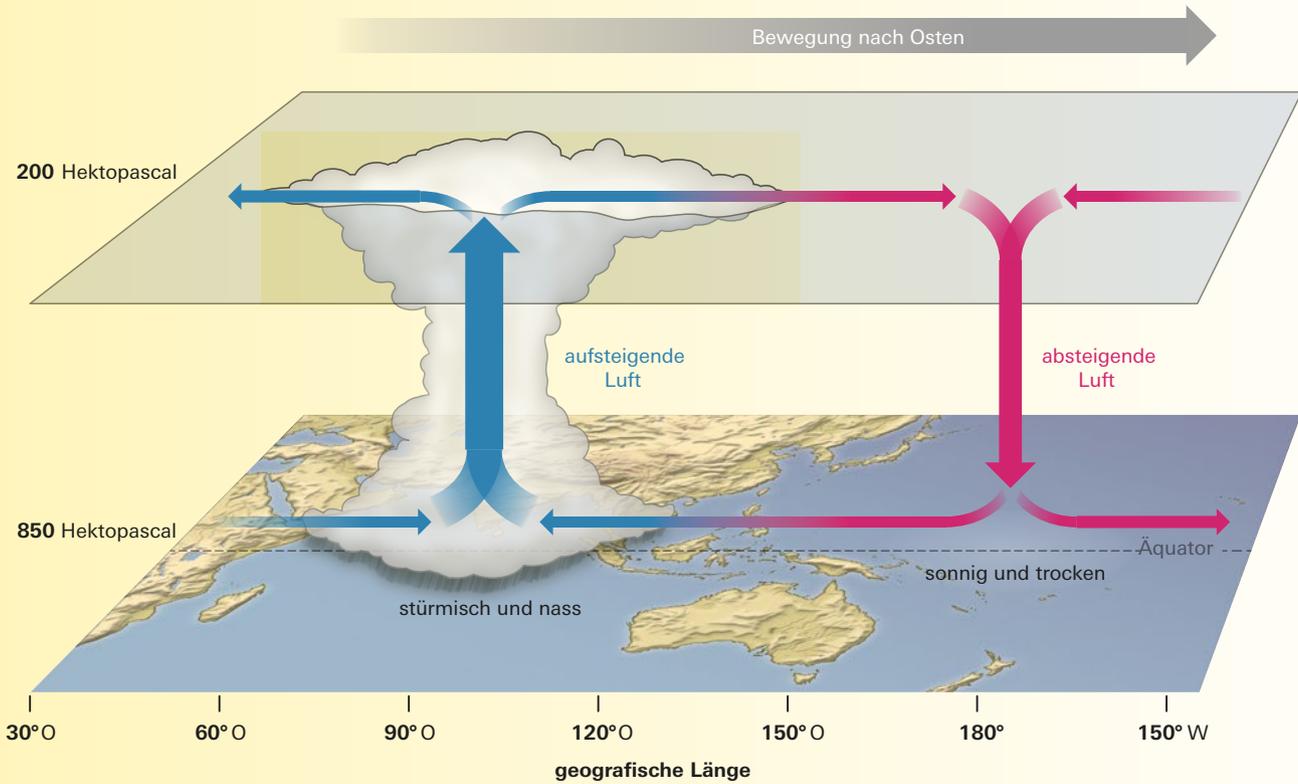
AUF EINEN BLICK VERBORGENE KRAFT IM WETTERGESCHEHEN

- 1** In unregelmäßigen Abständen braut sich im Indischen Ozean ein riesiges Sturmsystem zusammen, das dann ostwärts am Äquator entlang um den Globus zieht.
- 2** Dabei beeinflusst es das Wetter auch außerhalb der Tropen, wo es für Kälteeinbrüche, Hitzewellen, Regenperioden und Hurrikane sorgen kann.
- 3** Obwohl schon 1970 entdeckt, ließ sich das Phänomen erst vor wenigen Jahren am Computer simulieren. Inzwischen gibt es immerhin ein plausibles Erklärungsmodell, aber viele grundlegende Fragen sind immer noch offen.

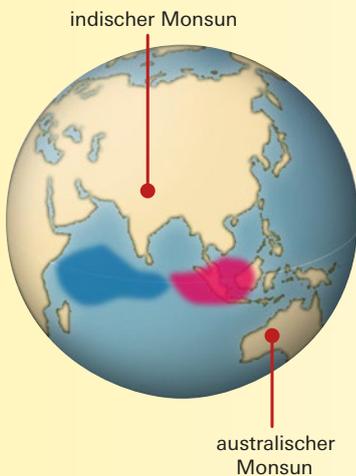
In 30 bis 60 Tagen um die Welt

Eine Madden-Julian-Oszillation (MJO) besteht aus einer aktiven Front, in der feuchte Luft aufsteigt, und einer vorgelagerten »Suppressionsfront« mit trockener, absteigender Luft. Beide wandern synchron längs des Äquators mit einer Geschwindigkeit von knapp 20 Kilometern pro Stunde ostwärts und können so unter günstigen Umständen in ein bis zwei Monaten den Globus umrunden. Dabei beeinflussen sie das Wetter nicht nur in den Tropen, sondern auch in höheren Breiten, indem sie Phänomene wie den Monsun und Hurrikane auslösen oder verstärken.

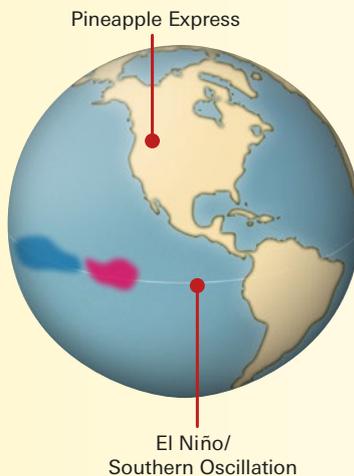
Madden-Julian-Oszillation



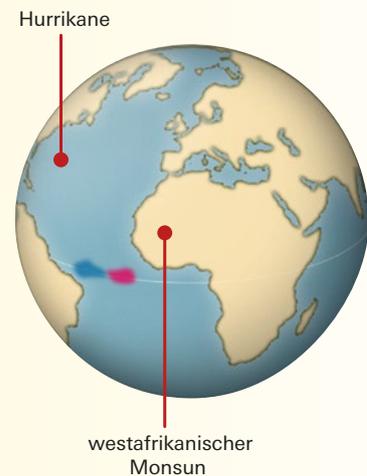
MJO bildet sich.



MJO regnet teilweise ab, aber nimmt Fahrt auf.



MJO setzt sich über dem Atlantik als paarweises Tief-/Hochdrucksystem fort.



Wie zwei Pioniere den Tropen den Puls fühlten

Anfang der 1970er Jahre fütterten zwei junge Wissenschaftler am National Center for Atmospheric Research (NCAR) in Boulder (Colorado) den Zentralrechner ihres Instituts mit dicken Stapeln von Lochkarten. Roland Madden, der vorher für die US-Luftwaffe Wettervorhersagen erstellt hatte, und Paul Julian mit seiner damals noch seltenen Erfahrung in der neuartigen Kunst, per Computer nach Mustern in Messdaten zu fahnden, setzten ihren Ehrgeiz daran, verborgene Rhythmen im Wetter der Tropen aufzuspüren.

Das für langweilig gehaltene tropische Wetter hatte mehr zu bieten als schwüle Hitze

Nach dem Ende des Zweiten Weltkriegs begannen Meteorologen auf weit im Pazifik verstreuten Inseln Wetterstationen zu errichten, an denen sich mit der Zeit umfangreiche Datensätze ansammelten. Deren Analyse enthüllte in den frühen 1960er Jahren einen 26-monatigen Zyklus beim Wind in der Stratosphäre, der die Bezeichnung quasizweijährige Schwingung (quasi-biennial oscillation) erhielt. Wie diese Entdeckung zeigte, hatte das für langweilig gehaltene tropische Wetter mehr zu bieten als die immer gleiche schwüle Hitze.

Madden und Julian vermuteten weitere Gesetzmäßigkeiten, die sie aufdecken wollten. Dafür stand ihnen ein fabelhafter neuer Computer zur Verfügung: eine CDC 600 der Control Data Corporation mit 64-Kilobit-Speicher und einer Taktfrequenz von zehn Megahertz. Außerdem beherrschten die beiden Forscher mit der gerade erst von Mathematikern entwickelten schnellen Fouriertransformation eine neuartige Methode, um Wetterdaten nach zeitlichen Mustern bei Windgeschwindigkeit, Temperatur oder Luftdruck zu durchforsten. Nur eines fehlte: ein ausreichend großer Datensatz.

Was Madden und Julian schließlich aufspürten, stammte von einem einsamen Fleck namens Kanton Island mitten im Pazifik. Das Atoll befindet sich etwa auf halbem Weg zwischen Hawaii und Fidschi – nahe dem Kreuzungspunkt von Datumsgrenze und Äquator. Ein Bediensteter ließ dort seit vielen Jahren täglich um 1 Uhr mittags einen Wetterballon aufsteigen, der Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Druck in verschiedenen Höhen maß und die Daten, aus denen sich über geometrische Berechnungen auch die Windgeschwindigkeit ergibt, per Funk an die Bodenstation übermittelte.

Die bis 1970 gesammelten Messwerte stapelten sich beim NCAR auf Magnetbändern. Madden übertrug sie auf Lochkarten zum Einlesen in die CDC 600. Tausende solche Karten bewahrt der inzwischen

79-jährige Forscher immer noch in Kartons in seiner Garage auf. »Ich verwende sie für Einkaufslisten«, sagt er. »Ich nehme an, dass sie nur noch Museumswert haben.«

Die Museumsstücke von heute ratterten seinerzeit durch den Rechner und speisten ihn mit Daten für die Fourieranalyse. Und die ergab Erstaunliches: Durchschnittlich alle 44 Tage fiel der Luftdruck stark ab, und die Windgeschwindigkeit erreichte ein Maximum. Madden und Julian schlossen daraus, dass in mittleren Abständen von eineinhalb Monaten ein Sturmtief die Insel heimsuchte. In ihrer Veröffentlichung von 1971 im »Journal of Atmospheric Sciences« sprachen sie von einer 40-bis- 50-Tage-Oszillation. Dennoch wussten sie nicht genau, worum es sich eigentlich handelt. »Uns standen lediglich Daten dieser einen Wetterstation zur Verfügung«, erinnert sich Madden. »Hatten wir es mit periodisch durchziehenden Tiefs oder mit lokalen Pulsationen zu tun? Wir konnten nur spekulieren.«

Um Klarheit zu gewinnen, verschafften sich die beiden Forscher meteorologische Aufzeichnungen von anderen entlegenen Inseln mit exotischen Namen wie Eniwetok, Wake und Yap. Außerdem zogen sie Luftdruckmessungen an Bord von Schiffen heran, die im Rahmen des Internationalen Geophysikalischen Jahres 1957/58 kreuz und quer über den Pazifik gefahren waren. Stück für Stück begann sich so ein geografisches Gesamtbild abzuzeichnen. Und das machte zunächst einmal deutlich, dass sich die Oszillation auf die Tropen beschränkte – jenseits von zehn Grad Nord oder Süd war nichts davon zu sehen. Unklar blieb dagegen, ob sie an Ort und Stelle verharrte oder als zusammenhängendes System über den Ozean zog.

Ein Heureka-Erlebnis: Roland Madden sah, wie die Störung am Äquator entlangwanderte

Eines Abends nahm Madden dann Unterlagen mit nach Hause, um sie in Ruhe zu sichten. Es handelte sich um Ausdrucke eines Datensatzes, der an der Meeresoberfläche gemessene Luftdruckwerte bei verschiedenen Längengraden im Zeitverlauf darstellte. Madden breitete sie über seiner Couch aus und begann sie zu studieren. Von Hand rechnete er die langfristigen Mittelwerte aus und stellte fest, dass praktisch an jedem Tag bei irgendeiner geografischen Länge eine negative Druckanomalie auftrat. Einen oder zwei Tage später befand sie sich dann ein Stück weiter östlich. Es war ein Heureka-Erlebnis – zum ersten Mal sah Madden, wie jene Störung, die dereinst seinen Namen tragen würde, am Äquator entlangwanderte.

sie an Häufigkeit und Stärke zunehmen, falls die globale Durchschnittstemperatur bis Ende des Jahrhunderts um vier Grad Celsius gestiegen ist – was angesichts ungebremster anwachsender Kohlendioxidemissionen durchaus realistisch erscheint. Das sei eine gute und schlechte Nachricht zugleich, meint Eric Maloney, Atmosphärenforscher an der Colorado State University in Fort Collins. »Stärkere MJOs werden wohl die Wetterextreme verschärfen, sich aber auch leichter für die jeweils bevorstehende Jahreszeit vorhersagen lassen.«

Neue Erkenntnisse durch internationale Kampagne

Was die Meteorologen betrifft, so erhoffen sie sich von der Auswertung einer rund 60 Millionen Dollar teuren Kampagne namens CINDY/DYNAMO endlich eine genaue Antwort auf die Frage, wie eine MJO überhaupt entsteht. Unter Führung von Japan und den USA richteten sie den Blick vor allem auf den Indischen Ozean. Es sei ein Rätsel, wieso die Oszillationen gerade dort ihren Ausgang nehmen, erläutert Chidong Zhang, der an der National Oceanic and Atmospheric Administration die Wechselbeziehungen zwischen Atmosphäre und Ozean untersucht und für den US-Beitrag zu dem Projekt verantwortlich war, an dem Universitäten und andere Forschungseinrichtungen aus 14 Ländern mitwirkten.

Vom Oktober 2011 bis März 2012 – eine Wintersaison, in der gute Chancen bestanden, ein paar im Entstehen begriffene MJOs zu erleben – nahmen die Teilnehmer der Kampagne das Zielgebiet ins Visier. Zwar erlauben Satelliten einen Blick von oben auf die Bewölkung. Aber um zu beobachten, wie eine MJO Gestalt annimmt, brauchten die Forscher ein vertikales Profil sämtlicher Wolkenschichten. Die Informationen dafür erhielten sie unter anderem von mehrkanaligen Radarstationen sowie von weiteren Instrumenten an Land und auf Schiffen oder Bojen. Wertvolle Messdaten lieferten auch mehr als 23000 Wetterballone und zwei Spezialflugzeuge.

Trotz der Datenfülle ließ sich der tiefere Grund für die Existenz der MJOs noch nicht eindeutig bestimmen. Nach einer neuen, aussichtsreichen Theorie handelt es sich um eine Sonderform so genannter Kelvinwellen. Diese Druckschwankungen bewegen sich zwar normalerweise sehr viel schneller ostwärts. Außerdem treten sie nur bei trockener Atmosphäre auf. Nach Aussage von Maloney deuten die Ergebnisse von CINDY/DYNAMO jedoch darauf hin, dass MJOs den »feuchten Modus« von Kelvinwellen in wasserdampfhaltiger Luft repräsentieren, die in Gewitterwolken zirkuliert.

Laut Del Genio, der als Außenstehender die Debatten verfolgt hat, »scheint die Feuchtemodus-Theorie an Boden zu gewinnen«. Zhang, der 2005 in einem Übersichtsartikel ein halbes Dutzend Erklärungsmodelle betrachtet hat, zögert aber, sie bereits zum Sieger zu erklären, obwohl er sie ebenfalls für recht überzeugend hält.

Selbst wenn die Theorie zutrifft, erhebt sich allerdings die Frage, warum die feuchte Luft zu der fraglichen Zeit ausgerechnet über dem Indischen Ozean zusammenströmt. Doch auch darauf scheint die Kampagne CINDY/DYNAMO eine plausible Antwort geliefert zu haben. Eine

entscheidende Rolle spielt demnach die innertropische Konvergenzzone (ITKZ): ein Band tiefen Luftdrucks, das zwischen den Passatwindssystemen der beiden Erdhalbkugeln verläuft und mit dem Sonnenstand auf- und abwandert. Im nördlichen Winter befindet es sich 500 bis 1000 Kilometer südlich des Äquators. Bei der Kampagne stellte sich nun heraus, dass sich die ITKZ immer kurz vor dem Auftreten einer MJO nach Norden verlagert und genau die Region im Indischen Ozean, in der sich das Sturmsystem zusammenbraut, mit feuchtwarmer Luft versorgt.

Der Anlass für die Verlagerung könnte laut Zhang trockene Luft sein, die aus nördlichen Regionen heranströmt. So wie sich die MJO auf das Wetter in höheren Breiten auswirkt, reagiere sie ihrerseits – vermutet Maloney – womöglich auf Einflüsse von dort. Obwohl die DYNAMO-Kampagne also denkbare Antworten auf einzelne Fragen gab, bleibt manches rätselhaft. Zum Beispiel sind sich die beteiligten Forscher nach Aussage von Zhang nicht einmal einig, wie viele MJOs sie beobachtet haben. Nach übereinstimmender Ansicht waren es mindestens zwei. Dagegen scheiden sich die Geister an einem dritten Ereignis, das nur einige der Kriterien für MJOs erfüllte. »Wir wollten herausfinden, was das Phänomen genau auslöst; aber am Ende waren wir uns nicht einmal sicher, worin es überhaupt besteht«, spottet Zhang. »Das nenne ich Fortschritt!« Doch ebendarin besteht das Wesen der Wissenschaft: durch das Klären von Begriffen und Verfeinern von Definitionen den Weg frei zu machen, der schließlich zur Lösung auch alter, hartnäckiger Rätsel führt. ◀

© Science

Dieser Artikel (hier in aktualisierter Form) erschien unter dem Titel »The storm king« in Science 350, S. 22–25, 2015; Abdruck genehmigt von AAAS

QUELLEN

Chang, C.-W. J. et al.: The Madden-Julian Oscillation in a Warmer World. In: Geophysical Research Letters 42, S. 6034–6042, 2015

Fu, X. et al.: Multi-Model MJO Forecasting during DYNAMO/CINDY Period. In: Climate Dynamics 41, S. 1067–1081, 2013

Krishnamurti, T. N. et al.: Madden Julian Oscillation. In: Tropical Meteorology. Springer, Heidelberg 2013, S. 143–168

Shinoda, T. et al.: Large-Scale Oceanic Variability Associated with the Madden-Julian Oscillation during the CINDY/DYNAMO; Field Campaign from Satellite Observations. In: Remote Sensing 5, S. 2072–2092, 2013

Zhang, C.: Madden-Julian Oscillation. In: Reviews of Geophysics 43, RG2003, 2005

Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter spektrum.de/t/das-wetter



VALDEZRL / STOCK.ADOBE.COM



Heizdecke oder Kühlkissen? Wolken gibt es in unterschiedlichsten Formen und Grau-Weiß-Schattierungen. Manche lassen mehr Wärmestrahlung passieren, andere weniger.

METEOROLOGIE

DAS WOLKENPARADOX

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.



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.

► spektrum.de/artikel/1555480

► Unmengen 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 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 Wärme Gleichgewicht erreicht ist.

Die Folgen einer Verdoppelung des CO₂-Gehalts für den Planeten nennt man Gleichgewichts-Klimaempfindlichkeit. 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 Temperatureffekt 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 reagieren, 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 (Hauftenwolken) 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

AUF EINEN BLICK ATMOSPHERE 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.

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 polwärtswandern, 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 Gleichgewichts-Klimaempfindlichkeit 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 Größenskalen 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.

NASA, SS7/APOLLO 17/CREW (AST7-14B-2618)



An einem normalen Tag bedecken Wolken mehr als 70 Prozent der Erde und haben somit einen starken Einfluss auf das Klima des Planeten. Das Foto zeigt eine Wolkendecke über dem Pazifik.

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 Richtung: 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 verhindern. 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.

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.



JEN CHRISTIANSEN / SCIENTIFIC AMERICAN DEZEMBER 2017

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

dem 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 Objekte 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.

Langzeittrends und kurzfristige 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 das Verschieben der Wolkendecke polwärts 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 Gleichgewichts-Klimaempfindlichkeit von 2 bis 4,5 Grad einpendeln? Noch ist die Verdopplung des CO₂-Gehalts der Atmosphäre nur ein mögliches Szenario. Doch wenn wir unsere Emissionen 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. ◀

QUELLEN

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



BODENKUNDE

TAUENDE

TUNDRA

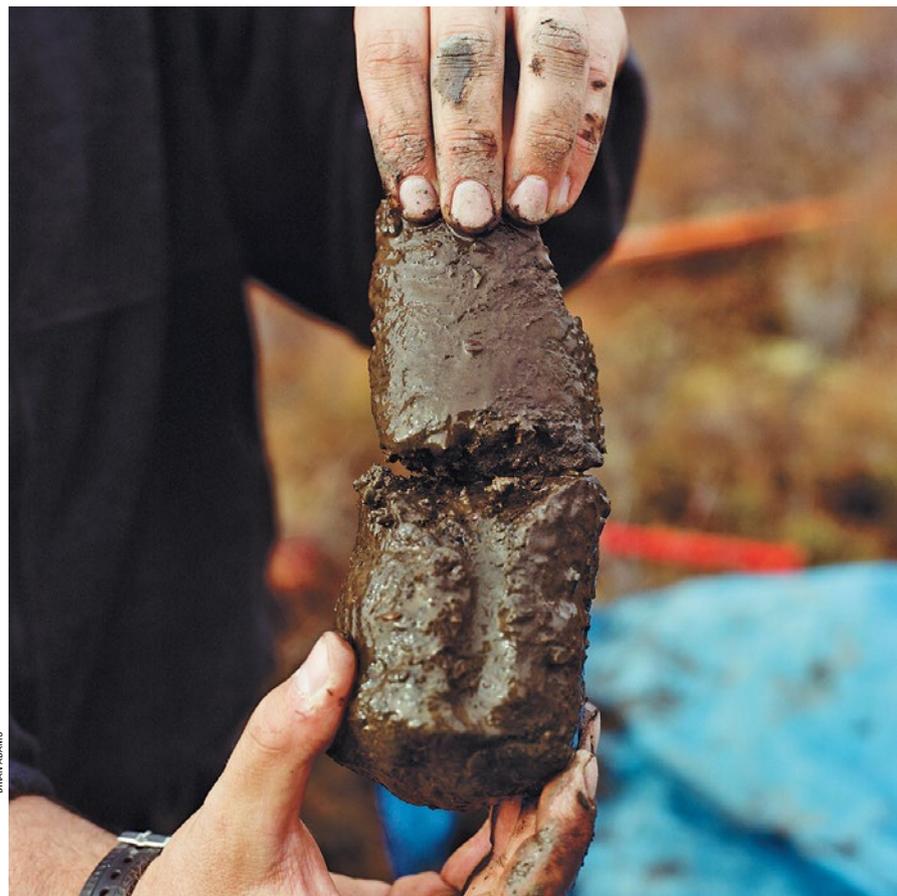
Die vielerorts steigenden Temperaturen erwärmen auch riesige Permafrostflächen in den Polarregionen. Vermutlich wird das die globale Erwärmung weiter anfachen. Nur wie stark?



Edward A.G. »Ted« Schuur ist Professor für Ökosystem-Ökologie an der Northern Arizona University in Flagstaff. Er betreibt seit fast zwei Jahrzehnten Feldforschung in der Arktis und ist leitender Wissenschaftler des Permafrost Carbon Network, einer internationalen Forschergruppe, die neue Erkenntnisse über den Kohlenstoff im Permafrost und dessen Einfluss auf das Klima zusammenführt.

» spektrum.de/artikel/1438960

Wissenschaftler ziehen am Forschungsstandort Eight Mile Lake bei Healy, Alaska, einen Bohrkern aus dem Permafrostboden. Farbe und Textur der Probe (rechtes Bild) deuten auf einen hohen Gehalt an organischem Material hin. Mikroorganismen zersetzen es, wodurch Treibhausgase in die Luft gelangen.



▶ Plötzlich entgleitet mir der 20 Kilogramm schwere Block aus Eis und Schnee. Trotz der Gummihandschuhe rutscht er aus meinen Händen und fällt krachend in den Graben zurück, den ich gerade aushebe. Ich richte mich auf, hole Atem und strecke mich. Mein Rücken schmerzt, obwohl ich extra einen Gewichtshebergürtel angelegt habe. Es ist ein klarer, kalter Tag in der Tundra Zentralalaskas. Zusammen mit fünf Kollegen schaufele ich seit mehr als einer Woche verkrusteten Schnee. Tonnen von Schnee, die sich an einem von sechs Fangzäunen gesammelt haben, hier, an einem leicht geneigten Hang unweit des Denali-Nationalparks.

Die harte Arbeit ist Teil eines Experiments, mit dem wir die Auswirkungen der globalen Erwärmung in dieser abgelegenen Gegend simulieren wollen. Die acht Meter langen und eineinhalb Meter hohen Zäune errichten wir jeden Herbst an dieser Stelle. Der Schnee, der sich an ihnen sammelt, schützt den Permafrostboden vor der eisigen Winterluft – er wirkt gewissermaßen wie eine Decke. Dadurch bleibt die Oberfläche des gewöhnlich ganzjährig gefrorenen Bodens wärmer, als sie normalerweise wäre. Im Frühjahr entfernen wir den überschüssigen Schnee, damit der Frühling unsere Versuchsflächen zur gleichen Zeit trifft wie die umliegende Tundra.

Indem wir den gefrorenen Boden im Winter wärmer halten, taut er im Sommer früher und bis in tiefere Schichten auf. Das soll Prognosen zufolge auch dann passieren, wenn die Temperaturen überall in der Arktis und in den Waldgebieten südlich davon steigen. Die Erwärmung schreitet hier momentan doppelt so schnell voran wie im weltweiten Durchschnitt. Aber was macht das mit dem Permafrostboden? So viel wissen wir: Er besteht aus Gestein, gefrorenem Erdschutt und Eis. Daher schmilzt er bei Erwärmung nicht, sondern taut. Wie ein Stück Hackfleisch, das aus dem Gefrierfach kommt, wird er weich, aber nicht flüssig. Dabei erwachen Mikroorganismen darin aus ihrem Kälteschlaf. Sie zersetzen die Überreste von Pflanzen und Tieren, die sich im gefrorenen Boden über



BRIAN ADAMS

Jahrtausende hinweg angesammelt haben und heute vor allem aus Kohlenstoff bestehen. Die Mikroben verwandeln dieses Material in die Treibhausgase Kohlendioxid oder Methan, die in die Luft entweichen.

Der Permafrostgürtel auf der Nordhalbkugel enthält solch gewaltige Mengen an organischem Material, dass schon die Freisetzung eines Teils davon den Klimawandel stark anfachen würde. Der durchgängig gefrorene Boden erstreckt sich über 16,7 Millionen Quadratkilometer – eine Fläche fast so groß wie Südamerika. Zusammen mit anderen Forschungsvorhaben soll unser Projekt in Alaska ergründen, wie groß die Erwärmung durch Permafrost in den kommenden Jahrzehnten tatsächlich sein wird.

Es ist allerdings alles andere als einfach, diese Frage mit genauen Zahlen zu beantworten. Zwar können Satelliten Veränderungen der Eisbedeckung aufzeichnen, wie sie etwa in Grönland stattfinden. Doch ein flächendeckendes Fernerkundungssystem für Permafrostregionen gibt es nicht. Wissenschaftler werten daher die Daten von Bodensensoren aus, die sie an bestimmten Stellen installiert haben. Lange gab es zu wenige dieser Messpunkte, weshalb wir laufend zusätzliche Sensoren installiert haben. Zusammen bilden sie das Global Terrestrial Network for Permafrost. Es umfasst mittlerweile mehr als 1000 mit Instrumenten ausgekleidete Bohrlöcher. In ihnen zeichnen Messfühler die Temperaturen auf, sowohl in den oberen als auch in tieferen Bodenschichten.

Wie die Messungen des Sensornetzes zeigen, hat sich der Permafrostboden innerhalb der vergangenen Jahrzehnte stetig erwärmt, wobei in den letzten Jahren an vielen Standorten neue Wärmerekorde zu verzeichnen waren. Die dramatischsten Anstiege gab es dort, wo die Bodentemperaturen in der Vergangenheit sehr niedrig

AUF EINEN BLICK ZEITBOMBE PERMAFROST

- 1** Permafrost – ganzjährig gefrorener Boden – taut in weiten Teilen der Arktis auf. Mikroben zersetzen dann Überreste von Pflanzen und Tieren, wobei sie Kohlendioxid und Methan in die Atmosphäre freisetzen.
- 2** Die ausgedehnte Permafrostregion der Nordhalbkugel speichert knapp 1,5 Billionen Tonnen organischen Kohlenstoff, etwa das Doppelte der in der Erdatmosphäre enthaltenen Menge.
- 3** 5 bis 15 Prozent dieses Reservoirs könnten in diesem Jahrhundert entweichen und den Klimawandel beschleunigen. Der beste Weg, das zu verhindern, ist, die globale Erwärmung insgesamt zu drosseln.



BRIAN ADAMS

Nicht weit von den schneebedeckten Gipfeln der Alaskakette messen Sensoren in weißen Kammern die Aufnahme und Abgabe von Kohlendioxid im Boden (links). Meghan Taylor von der Northern Arizona University zeichnet die Daten auf (rechts).



BRIAN ADAMS

lagen, bei minus zehn bis minus fünf Grad Celsius. Wir haben aber auch dort höhere Temperaturen registriert, wo der Boden mit minus zwei bis null Grad Celsius näher am Gefrierpunkt liegt und daher bereits eine Veränderung von einem Grad erhebliche Folgen haben kann. An einigen dieser Stellen taut außerdem im Frühling eine immer dickere Schicht an der Oberfläche auf.

50 Kilogramm Kohlenstoff in jedem Kubikmeter

Wenn wir alle weltweit aufgezeichneten Daten kombinieren, gewinnen wir ein gutes Verständnis dafür, wie sich die Bodentemperaturen in der Arktis verändern. Uns interessiert dabei nicht nur, wie viel Permafrost auftauen könnte. Wir wollen auch wissen, wie hoch der Anteil organischer Substanz in den aufweichenden Böden ist. Um diese Frage zu beantworten, hat mein Team im Frühjahr 2016 Löcher in den Untergrund gebohrt und Bodenproben entnommen. Seit Beginn unseres Projekts vor einem Jahrzehnt haben wir das immer wieder getan. Diese und andere Messreihen zeigen, dass der oberste Kubikmeter Boden etwa 50 Kilogramm organischen Kohlenstoff enthält. Das ist die fünffache Menge im Vergleich zu Böden der gleichen Region, die nicht dauerhaft gefroren sind. Und sogar das 100-Fache dessen, was Sträucher und andere Pflanzen in der Arktis speichern.

Mit organischem Kohlenstoff ist der Kohlenstoff gemeint, der in teilweise zersetzten, gefrorenen Organismen gebunden ist. Diese Präzisierung ist wichtig, da im Gestein so genannter anorganischer Kohlenstoff steckt, der sich bei Temperaturveränderungen aber meistens nicht löst. Insgesamt schätzen Forscher die im Permafrost der Nordhalbkugel gespeicherte Menge von organischem Kohlenstoff auf 1330 bis 1580 Milliarden Tonnen – etwa das

Doppelte des atmosphärischen Kohlenstoffgehalts. Allein die obersten drei Meter Boden im Permafrostgürtel enthalten ein Drittel der weltweiten Reserve in dieser obersten Schicht. Dabei nimmt die Zone gerade mal 15 Prozent der globalen Bodenfläche ein.

Wissenschaftler erfassen mittlerweile auch das Inventar organischen Kohlenstoffs an zuvor nie untersuchten Stellen, etwa am Meeresgrund der arktischen Schelfgebiete. Dieser submarine Permafrost löst sich langsam auf, wenn Meerwasser in ihn einsickert. Wir wissen noch nicht genau, wie viel organischer Kohlenstoff dort lagert. Fest steht, dass er ebenfalls in den Sedimenten der riesigen arktischen Flussdeltas enthalten ist. Allerdings gibt es dort bisher nur wenige Messpunkte. Diese Unterwasserreservoirs könnten unseren Schätzungen zufolge ungefähr 400 Milliarden Tonnen Kohlenstoff enthalten.

Fest steht, dass gewaltige Mengen Treibhausgase in die Atmosphäre gelangen würden, wenn die Permafrostböden auf der Nordhalbkugel auftauen. Wie groß der Betrag genau sein wird, hängt letztlich von drei Fragen ab. Erstens: Wie viel des Kohlenstoffs wandelt sich in Treibhausgase um? Mikroorganismen können nur einen Teil vom Kohlenstoff in ihren Stoffwechsel einbinden. Der Rest verbleibt im Boden, da er für die Mikroorganismen unerreichbar ist oder nicht als Nahrung taugt.

Zweitens: Wie schnell setzt mikrobielle Aktivität die Gase frei? Nach dem Auftauen des Bodens kann ein Teil des Kohlenstoffs aus zerfallener Biomasse in weniger als einem Jahr in die Luft gelangen. Der größere Teil wird aber höchstwahrscheinlich erst über Jahrzehnte emittiert. Der Grund dafür ist unter anderem, dass die Biomasse schon zu einem Teil zersetzt ist. In diesem Zustand bauen Mikroorganismen sie nur langsam weiter ab.



FOTOLIA / LAURIN RINDER

Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter spektrum.de/t/klimawandel

Die dritte Frage ist, welche Gase genau von den Mikroorganismen freigesetzt werden. Das Verhältnis von Kohlendioxid zu Methan bestimmt letztlich die Klimawirkung des Kohlenstoffs im Boden. Eine Tonne Methan erwärmt die Atmosphäre binnen 100 Jahren 33-mal so stark wie eine Tonne CO₂. Unter Wasser gesetzte, sauerstoffarme Böden (so genannte anaerobe Milieus) wie etwa Torfmoore produzieren weit mehr Methan als Kohlendioxid.

Um die drei Fragen zu beantworten, verfolgen wir die Gasfreisetzung aus dem Permafrost mit Infrarotmessgeräten. Sie erfassen die Konzentration der Gase in der Luft über Sekunden, Tage, Jahreszeiten und Jahre hinweg. An unserer eingangs erwähnten Messstation in Alaska, die sich in der Nähe des Eight Mile Lake befindetet, scheint die Tundra mehr Kohlenstoff an die Atmosphäre zu verlieren, als sie absorbiert. Die Erwärmung des Bodens durch Schnee entlang der Zäune fördert zwar das Wachstum der Pflanzen, die dabei der Luft größere Mengen Kohlendioxid als gewöhnlich entziehen und dieses speichern. Die steigenden Temperaturen helfen aber auch den Mikroorganismen, mehr kohlenstoffhaltige Biomasse im Boden zu zersetzen. Im Sommer gleicht das zusätzliche Pflanzenwachstum die erhöhten Emissionen aus dem Boden vollständig aus. Doch die Mikroben sind, anders als die Pflanzen, auch im Herbst und Winter aktiv. Über das ganze Jahr betrachtet gelangt daher mehr Kohlenstoff in Form von

Treibhausgasen in die Atmosphäre, als die Flora binden kann. Wenn wir unsere Befunde mit denjenigen anderer Teams kombinieren, kommen wir zu dem Ergebnis, dass dieser Befund generell für tauende Permafrostregionen gilt.

Ein Projekt unseres Netzwerks hat kürzlich auch dazu beigetragen, die Frage nach dem Verhältnis von Kohlendioxid zu Methan zu beantworten. Unter aeroben Bedingungen, wie sie in trockenen Böden vorliegen, setzen Mikroorganismen vorwiegend CO₂ frei. Doch unter anaeroben Bedingungen in Feuchtgebieten und Torfböden sondern sie neben Kohlendioxid auch Methan ab. Christina Schädel, die an der Northern Arizona University arbeitet, erforscht die daraus erwachsenden Folgen für das Klima. Im Gegensatz zu unseren Feldstudien verließ sich Schädel auf Experimente, bei denen Forscher gefrorenen Boden ins Labor bringen und dort erwärmen. Auf diese Weise können die Wissenschaftler exakt messen, wie schnell Kohlenstoff aus dem Boden in Kohlendioxid beziehungsweise Methan umgewandelt wird.

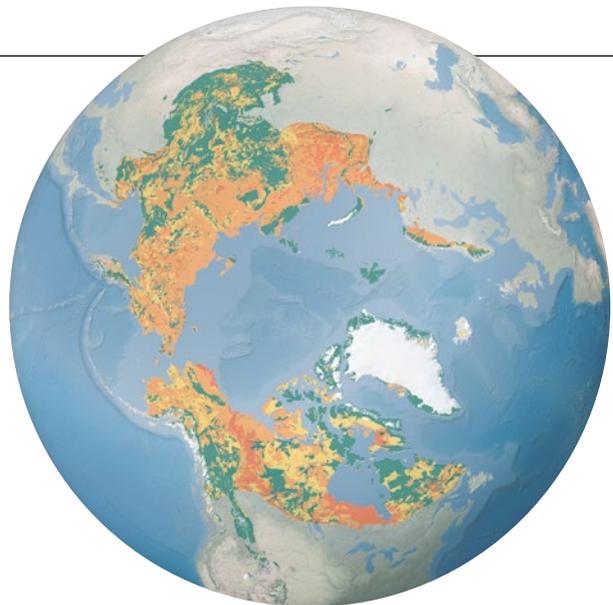
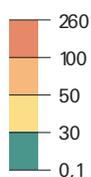
Schädel führte Daten von vergleichbaren, weltweit durchgeführten Tests zusammen. Dabei zeigte sich, dass die Kohlendioxidemissionen klar dominieren, sowohl bei aeroben als auch bei anaeroben Böden. Überraschenderweise ist der Klimabeitrag aerober Zersetzung doppelt so groß wie der von anaerobem Zerfall, obwohl Letzterer das besonders potente Methan emittiert. Das bedeutet, dass das Auftauen von Permafrost im trockenen Hochland die globale Erwärmung vermutlich stärker anfachen wird als das in nassen Niederungen. Daher hat die Verteilung von Hoch- und Tiefland in den Polargebieten einen großen Einfluss auf den Klimawandel.

Insgesamt schätzt unser Expertennetzwerk, dass in diesem Jahrhundert zwischen 5 und 15 Prozent des Kohlenstoffs freigesetzt werden, das meiste in Form von CO₂. Ausgehend vom mittleren Wert, also zehn Prozent, würden bis zum Jahr 2100 130 bis 160 Milliarden Tonnen

Kohlenstoffreservoir

Die Permafrostzone der Nordhalbkugel (farbig) enthält in den obersten drei Metern des gefrorenen Bodens geschätzte 1035 Milliarden Tonnen Kohlenstoff, die beim Auftauen entweichen und damit die globale Erwärmung deutlich verstärken könnten. Permafrost herrscht in den nördlichsten Regionen fast überall vor. Weiter im Süden tritt er lückenhafter auf, doch in beiden Regionen speichern viele Gebiete große Mengen an Kohlenstoff (rot und orange).

Kohlenstoff in den obersten drei Bodenmetern (in Kilogramm pro Quadratmeter Erdoberfläche)



MAPPING SPECIALISTS, NACH: SCHUIJR, E. A. G. ET AL.: CLIMATE CHANGE AND THE PERMAFROST CARBON FEEDBACK. IN: NATURE 520, S. 171-179, 2015 / SCIENTIFIC AMERICAN DEZEMBER 2016

Kohlenstoff zusätzlich in die Luft gelangen. Diese Menge entspräche etwa dem Kohlenstoff, der bisher weltweit durch Abholzung und andere Veränderungen der Landnutzung in die Atmosphäre eingetreten ist. Der Wert wäre allerdings viel geringer als derjenige aus der Verbrennung fossiler Energieträger. Durch diese wurden allein im Jahr 2012 knapp zehn Milliarden Tonnen Kohlenstoff frei.

Dennoch gilt: Durch die tauenden Böden wird der Klimawandel schneller ablaufen, als die Wissenschaftler allein angesichts der anthropogenen Emissionen vorhergesagen. Und dem Permafrost werden wahrscheinlich auch im kommenden Jahrhundert noch Treibhausgase entweichen. Jede zusätzliche Tonne Kohlenstoff, die aus der tauenden Arktis in die Atmosphäre gelangt, wird für die Menschheit zusätzliche Kosten verursachen.

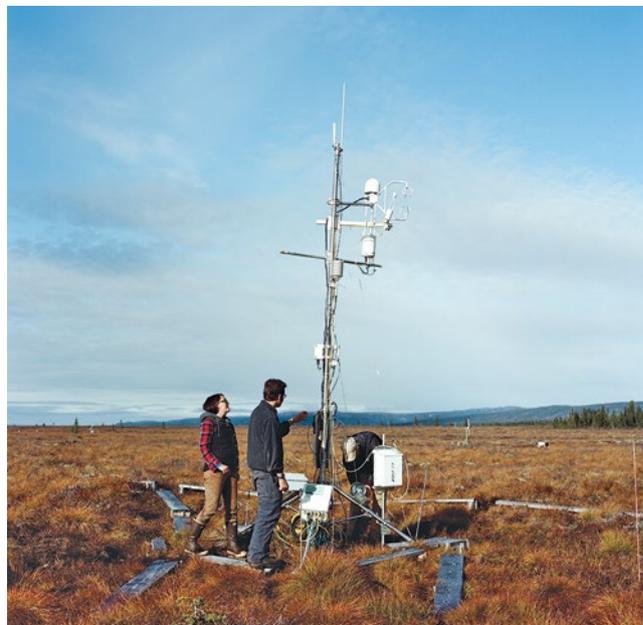
Maßnahmen, diesem Trend durch lokale Eingriffe in die arktische Landschaft zu begegnen, sind keine realistische Option. Die einzige Lösung besteht darin, die Emissionen aus der Verbrennung fossiler Energieträger und auf Grund weltweiter Abholzung stark herunterzufahren und so die globale Erwärmung insgesamt zu bremsen. Dadurch würde die Arktis langsamer auftauen und weniger Treibhausgase freisetzen. Menschen überall auf der Welt bliebe somit mehr Zeit zur Anpassung.

Absackende Böden beschleunigen das Auftauen

Die Schätzung, dass 5 bis 15 Prozent des Kohlenstoffs entweichen könnten, ist nur wenige Jahre alt. Für genauere Vorhersagen bräuchten wir ein noch besseres Sensornetzwerk. Es wäre im Stande, neben langfristigen Trends auch plötzliche Veränderungen zu detektieren. Initiativen wie das Arktisprojekt der Next-Generation Ecosystem Experiments des Energieministeriums der Vereinigten Staaten oder das Arctic-Boreal Vulnerability Experiment der NASA helfen uns derweil, Wissenslücken zu schließen. Diese gibt es beispielsweise bei der Modellbildung oder wenn Ergebnisse von Feldstudien auf den globalen Maßstab übertragen werden sollen.

Eine wichtige Frage ist auch, ob zunehmendes Pflanzenwachstum die Freisetzung des Kohlenstoffs ausgleichen könnte. Die jüngsten Simulationen deuten in diese Richtung. Demnach könnten längere Vegetationsperioden, höhere Temperaturen, mehr Pflanzennährstoffe aus Biomasseabbau und ein natürlicher Wandel hin zu schneller wachsenden Pflanzen die Kohlenstofffreisetzungen bis zum Ende des Jahrhunderts kompensieren. Diese Theorie steht allerdings im Konflikt zu unseren Experimenten vom Eight Mile Lake und anderen Standorten, die einen Verlust von Kohlenstoff an die Atmosphäre über das ganze Jahr verteilt nahelegen.

Ebenso wäre es hilfreich, wenn wir besser verstehen würden, wie tauender Boden absinkt. Wenn Eis im Permafrost schmilzt und als Wasser abfließt, sackt das Erdreich nach unten, was sein Auftauen beschleunigt. Vielleicht wird dieses Phänomen die Emissionen noch verstärken. Derzeit fehlen entsprechende Simulationen in den großflächigen Modellen, mit denen Forscher den Einfluss des Kohlenstoffs aus Permafrost auf das Klima untersuchen. Meine Kollegen und ich erlebten den Effekt im Frühjahr



Das ganze Jahr über misst ein Instrumententurm, wie viel Kohlendioxid und Methan der Boden der Tundra freisetzt. So ermitteln die Forscher, ob das Ökosystem unter dem Strich Treibhausgase aufnimmt oder abgibt.

2016 ganz direkt, als wir zum Eight Mile Lake zurückkehrten. Der Boden hatte wegen der Absenkung an manchen Stellen Wellen gebildet. Die Holzwege, die wir vor fast einem Jahrzehnt angelegt hatten, sind stark verbogen worden.

Im Frühjahr 2016 taute es am Eight Mile Lake zudem an einigen Stellen bis in eine Tiefe von mehr als einem Meter. Ein solcher Wert war in den Jahren zuvor meist erst am Ende des Sommers erreicht worden. Extreme Messdaten zeigten sich auch anderswo in der Arktis: Die winterliche Eisdecke im Nordpolarmeer erlebte schon früh im Jahr einen Rekordrückzug. Der Schnee rund um die Nordhalbkugel schmolz vielerorts schneller als sonst. Und die Oberfläche des grönländischen Eisschildes taute eher auf als in der Vergangenheit.

Schon jetzt entweichen aus dem Permafrostboden zudem laufend Treibhausgase. In Zukunft wird die Freisetzung wohl nicht so rapide erfolgen, wie mancher Klimaforscher in der Vergangenheit befürchtet hat. Dafür wird sie an vielen Orten auftreten und über viele Jahrzehnte hinweg anhalten – und es so deutlich schwerer machen, die globale Erwärmung zu bremsen. ◀

QUELLEN

Schuur, E. A. G., Abbott, B.: Climate Change: High Risk of Permafrost Thaw. In: Nature 480, S. 32–33, 2011

Schuur, E. A. G. et al.: Expert Assessment of Vulnerability of Permafrost Carbon to Climate Change. In: Climatic Change 119, S. 359–374, 2013

Schuur, E. A. G. et al.: Climate Change and the Permafrost Carbon Feedback. In: Nature 520, S. 171–179, 2015

ENERGIEPOLITIK KLIMAFAKTOR INDIEN

Der indische Subkontinent spielt eine entscheidende Rolle für die Zukunft der globalen Erwärmung. Nur wenn sich Indiens Energiepolitik dramatisch ändert, können die weltweit anvisierten Klimaziele erreicht werden.

► spektrum.de/artikel/1496903

Der Smog, den vor allem Dieselfahrzeuge verursachen, überzieht Neu-Delhi mit einem gesundheitsschädlichen Schleier. Von den 20 am meisten smogbelasteten Städten der Welt liegen 10 in Indien.



Varun Sivaram gehört dem Council of Foreign Relations an, einer privaten Denkfabrik mit Sitz in New York und Washington. Er leitet deren Program on Energy Security and Climate Change. Zudem ist er außerordentlicher Professor an der Georgetown University in Washington.

Bei der Pariser UN-Klimakonferenz von 2015 diente ein glitzernder Wasserfall als Blickfang für den indischen Pavillon. Drinnen verkündeten Multimedia-Präsentationen und prominente Diskussionsrunden, dass Indien schon bald nur noch saubere Energie produzieren werde. Premierminister Narendra Modi ging noch weiter. Er erklärte sein Land zum Anführer einer neuen International Solar Alliance – eines Solarbündnisses mit dem Ziel, in 120 Ländern die Sonnenenergie zu fördern. Das offizielle Indien präsentierte sich als Vorreiter im Kampf gegen den globalen Klimawandel.

Ich kam damals gerade von einer Forschungsreise quer durch Indien zurück und hatte Mühe, den kühnen Optimismus mit den dort beobachteten Tatsachen zu vereinbaren: überall Kohlekraftwerke, ein störanfälliges Strom-

Die fossilen Brennstoffe sind nominell billig, fordern aber einen hohen Tribut

netz, das von nennenswerten Mengen zusätzlicher Wind- oder Solarenergie hoffnungslos überfordert wäre, und die verbreitete Meinung, Indien sei als Entwicklungsland nicht verpflichtet, seine CO₂-Emissionen zu reduzieren, sondern dürfe mit fossiler Energie wachsen wie die großen Industrienationen vormals auch.

Dennoch unterzeichnete Indien zusammen mit 194 anderen Staaten das Pariser Klimaabkommen, das die Welt verpflichtet, die globale Erwärmung auf zwei Grad Celsius zu begrenzen. Im November 2016 trat das Abkommen in Kraft und wurde nach internationalem Recht für jedes der beteiligten Länder bindend – also auch für Indien. Nur US-Präsident Donald Trump kündigte Anfang Juli 2017 die Absicht an, von der Pariser Übereinkunft zurückzutreten.

Trotz der pathetischen Rhetorik hat die indische Regierung höchst unklare Vorstellungen von einer durch saubere Energie geprägten Zukunft. Zwar setzt sich Indien ehrgeizige Ziele für die Nutzung von Sonne und Wind, verpflichtet sich aber nur unzureichend, seinen CO₂-Ausstoß insgesamt zu reduzieren. Selbst wenn die Regierung gar nichts unternimmt und zusieht, wie die Emissionen rapide steigen, bleiben diese im Rahmen der enorm hohen Grenzwerte, die sich das Land in Paris genehmigt hat.

Das wäre eine Katastrophe für das Weltklima. Indien zählt zu den am schnellsten aufstrebenden großen Wirt-



GETTY IMAGES / LIGHT ROCKET / JONAS GRATZER

schaftsmächten. Seine Bevölkerung wird bis 2040 auf rund 1,6 Milliarden ansteigen, und der Strombedarf dürfte sich vervierfachen. Ohne drastische Gegenmaßnahmen wird das Land in der Jahrhundertmitte wahrscheinlich der größte Treibhausgasproduzent weltweit sein – gegenwärtig belegt es noch den dritten Platz hinter China und den USA – und damit alle Bemühungen zunichtemachen, den globalen Klimawandel zu bremsen. Denn sollte Indien seinen sprunghaft ansteigenden Energiehunger nur mit Kohlekraft stillen, wird sich sein Ausstoß von Treibhausgasen bis 2040 verdoppeln.

Dabei wäre das überhaupt nicht nötig, denn energiepolitisch ist Indien ein fast unbeschriebenes Blatt. Während in den alten Industrieländern die Aufgabe darin besteht, die traditionelle fossile Basis durch erneuerbare Energien zu ersetzen, verfügt Indien noch gar nicht über eine derart ausgebaute Infrastruktur. Ein Entwicklungsland hat die Wahl, von vornherein in Wind, Sonne und Erdgas zu investieren statt in Kohle (siehe **Spektrum** Mai 2017, S. 72). Zudem können sparsamere Geräte, Fabriken und Fahrzeuge den Energiebedarf zügeln und den Einsatz sauberer Quellen erleichtern. Was wäre nötig, um Indien auf diesen Pfad zu führen? Und welche energiepolitischen Entscheidungen hätten katastrophale Folgen für unseren Planeten?

Von schmutzigen Quellen zu sauberem Strom

Derzeit prägen umweltschädliche Quellen Indiens Energiemix. Zwei Drittel der Haushalte heizen und kochen mit Stroh, Holzkohle, Brennholz oder getrockneten Kuhfladen. Das deckt fast ein Viertel des nationalen Primärenergiebedarfs. Den Rest liefern fast ausschließlich Kohle und Öl. Kohlekraftwerke erzeugen drei Viertel des Stroms, und die Hälfte der indischen Fabriken verbrennt Kohle für die Stahlgewinnung und andere Prozesse. Der Transportsektor ist sogar fast komplett auf Erdöl angewiesen.

Die fossilen Brennstoffe sind nominell billig, fordern aber einen hohen Tribut. Sie tragen nicht nur zum Klima-



GETTY IMAGES / LIGHT ROCKET / JONAS GRATZER

Seit Jahrzehnten brennen in den Minen nahe der Großstadt Jharia ungeheure Kohlefeuer, verursacht durch Zigaretten, Blitzschlag oder Selbstentzündung. Sie blasen permanent giftige Gase und Kohlendioxid in die Luft.

wandel bei, sondern auch zur städtischen Luftverschmutzung: 10 der 20 smogreichsten Städte der Welt liegen in Indien. Kohlekraftwerke verbrauchen viel Wasser. Eine wachsende Abhängigkeit von Kohle- und Ölimporten schwächt die Wirtschaft; im Lauf der globalen Ölkrisen wurde die indische Währung stark abgewertet.

Der beste Weg zu moderner und sauberer Energie führt über den Stromsektor. Erneuerbare Stromquellen werden mit fallenden Kosten zunehmend wettbewerbsfähig gegenüber Kohle. Wenn Motorroller, Autos, Busse und Lastwagen künftig mit Strom fahren, ist der Verkehr nicht mehr völlig vom Erdöl abhängig.

Aber das alles ist leicht gesagt. Mehr als 300 Millionen Inder haben überhaupt keinen Zugang zum Stromnetz. Weitere Millionen sind zwar angeschlossen, bekommen aber nur hier und da Strom, weil das Netz in einem erbärmlichen Zustand ist – und gewiss nicht in der Lage, zusätzliche Energie aus Wind und Sonne zu verkraften. Nach heftigen Unwettern bleiben manchmal tausende Menschen wochenlang ohne Strom, wie ich auf meiner Reise durch Indien erlebte.

Ungeachtet dieser Tatsachen malt Modis Regierung ein verheißungsvolles Bild von der Zukunft. In Paris gelobte sie, den nicht fossil erzeugten Stromanteil von heute 24 Prozent bis 2030 auf 40 Prozent zu erhöhen. Ende 2016 erhöhte Modi seine Prognose sogar auf 60 Prozent – ein wahrhaft ehrgeiziges Ziel. Heutzutage beruht Indiens nichtfossiler Strom vorwiegend auf Wasserkraft, aber die Planung weiterer Wasserkraftwerke droht an vielen Hindernissen zu scheitern: Baugenehmigungen sind schwierig zu beschaffen, für Stauseen müssen große Flächen aufgekauft werden, und das Aushandeln von Entschädigungen für die umgesiedelten Gemeinden schürt politischen Streit. Auch Kernkraftwerke können angesichts chronischer Bauverzögerungen keine führende Rolle übernehmen.

Um ihr 60-Prozent-Ziel zu erreichen, setzt die Regierung deshalb fast ausschließlich auf Sonne und Wind, die bis 2030 rund 350 Gigawatt liefern sollen. Davon würden 250 Gigawatt durch Solarkraft erzeugt; das wären mehr als

80 Prozent der heute weltweit verfügbaren Solarenergie. Dieses Ziel ist zwar kühn, wird aber immer realistischer dank der fallenden Solarkraftkosten: Sie sind in Indien während der vergangenen fünf Jahre um zwei Drittel gesunken. Eine neue Solaranlage ist schon heute billiger als ein neues Kraftwerk, das Importkohle verbrennt, und wird 2020 sogar kostengünstiger sein als eines, das heimische Kohle nutzt. Außerdem investieren die Regierung und ausländische Geldgeber in ein nationales Netz so genannter grüner Korridore. Diese Übertragungswege verbinden sonnige Regionen wie die Wüste Thar im Bundesstaat Rajasthan mit weit entfernten Städten wie Mumbai und Delhi.

Die Regierung setzt sich das ehrgeizige Ziel, die Dächer in Städten, aber auch in entlegenen, nicht ans Stromnetz angeschlossenen Dörfern mit Solarmodulen auszustatten. Zum Vergleich verweist man gern auf das Fernmeldewesen, das einen Riesensprung vom lückenhaften Festnetz zu flächendeckendem Mobilfunk geschafft hat. Ebenso,

AUF EINEN BLICK OHNE INDIEN UNMÖGLICH

- 1** Der Energiebedarf der wachsenden Bevölkerung Indiens nimmt stark zu. Wenn sich der dortige Energiesektor nicht wandelt, bedrohen seine enormen CO₂-Emissionen die globalen Klimaziele.
- 2** Um den CO₂-Ausstoß zu beschränken, muss Indien den Übergang von Kohle zu Erdgas bewältigen und ein zuverlässiges Stromnetz aufbauen, das große Mengen von Wind- und Solarenergie aufnehmen kann.
- 3** Zusätzlich muss das Land Energiesparmaßnahmen einleiten und umweltschonende Verkehrsmittel fördern. Dafür braucht es technische und finanzielle Unterstützung aus dem Ausland.

meint man, könnte Indien in kurzer Zeit zu lokaler Solar-energie übergehen, die ohne nationales Leitungsnetz auskommt. Tatsächlich hat sich die Menge der Solarmodule in jedem der vergangenen vier Jahre fast verdoppelt.

Das mag zwar sein, aber große Fotovoltaik-Freiflächenanlagen sind viel billiger, und ein umfassendes Netz kann moderne Geräte wesentlich besser mit Strom versorgen – und nicht bloß die paar Glühlampen und Ventilatoren, für die ein Solarmodul auf dem Dach ausreicht. Es gilt also, sowohl die zentrale als auch die dezentrale Energieversorgung zu fördern und das Stromnetz auszubauen und zu verbessern. Dabei können einzelne Solarmodule und Bat-



Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter spektrum.de/t/energie

terien das gesamte System stabilisieren, indem sie zu einem lokalen Netz – einem Microgrid – verbunden werden, das eine Wohngegend, ein Krankenhaus oder ein Rechenzentrum bedient.

Erdgas hilft – doch Energiesparen entscheidet

Dennoch wird das Angebot an erneuerbarer Energie dem schnell zunehmenden Bedarf nicht nachkommen. Zudem sind verlässliche Energiequellen nötig, die das unvorhersehbare Schwanken bei Solar- und Windkraftanlagen ausgleichen. Vorläufig ist das Speichern in Batterien zu teuer, um das Problem flächendeckend zu lösen.

Als Ausweg bieten sich Gaskraftwerke an: Erdgas verursacht nur halb so viel CO₂-Ausstoß wie Kohle. Derzeit erzeugt es bloß acht Prozent von Indiens Strom, denn die heimische Produktion fällt kaum ins Gewicht, und Importgas ist teuer. Deshalb haben frühere Regierungen lieber auf die reichlich vorhandene heimische Kohle gesetzt. Doch da das weltweite Angebot von Flüssiggas zunimmt, sinken die Preise in Asien rapide.

Gaskraftwerke lassen sich billiger und schneller errichten als Kohlekraftwerke. Zudem können sie ihre Leistung rasch variieren und damit die Schwankungen der erneuerbaren Energien ausgleichen. Erdgas kann an Stelle von Kohle und Öl Gebäude und Fabriken mit Wärme versorgen; es kann sogar Verkehrsmittel antreiben und dadurch die CO₂-Emissionen weiter reduzieren. Vikram Singh Mehta, Leiter der Denkfabrik Brookings India und früher Chef der Firma Shell India, plädiert daher dafür, Indiens Energiepolitik auf Erdgas auszurichten. Das Land müsse massiv in ein eigenes Pipelinenetz für den Gastransport investieren sowie in Terminals für den Flüssiggasimport.

Die Regierung Modi scheint auf Mehta zu hören. Sie versprach im Dezember 2016, weder die öffentliche Hand

noch der Privatsektor würde nach 2022 noch ein einziges Kohlekraftwerk in Auftrag geben; dafür soll mehr Erdgas zum Einsatz kommen.

Aber selbst bei einer konsequenten Hinwendung zu erneuerbaren Energien und Erdgas werden auf mittlere Sicht Kohle und Erdöl den indischen Energiemix prägen. Deshalb sind, wie Navroz Dubash vom Center of Policy Research in Neu-Delhi betont, Investitionen in eine energieeffiziente Wirtschaft entscheidend. Indien könnte zum leuchtenden Vorbild eines Entwicklungslands werden, dessen Wirtschaft wächst, ohne dass gleichzeitig Energieverbrauch und Emissionen durch die Decke gehen.

Nach einer Prognose der Internationalen Energieagentur in Paris wird Indien bei gleich bleibender Effizienz 2040 viermal so viel Strom brauchen wie gegenwärtig, doch eine konsequente Energiesparpolitik kann die Zunahme halbieren. Derzeit verzehrt die Industrie mehr als 40 Prozent des indischen Energieaufkommens. Bei der Produktion von Stahl, Ziegeln und Düngemitteln würden effizientere Maschinen sowie der Übergang von Kohle zu Gas oder Strom enorm viel Energie und Schadstoffe einsparen.

Auch der atemberaubend wachsende Bausektor birgt ein großes Einsparpotenzial. Drei Viertel der Gebäude, die 2040 stehen werden, sind heute noch nicht vorhanden. Entsprechend droht der Stromverbrauch für Wohnungen und Geschäfte vor allem durch die Ausbreitung von Klimaanlagen zu explodieren, wenn die neuen Gebäude nicht Energie sparen.

Bereits heute ist Indien ein Vorreiter bei Maßnahmen zur Kostensenkung von energieeffizienten Produkten. Eine öffentlich-private Partnerschaft namens Energy Efficiency Services Limited, die massentaugliche Geräte billig anbietet, feiert durchschlagende Erfolge. Die Initiative hat bisher mehr als 200 Millionen LED-Energiesparlampen zum Preis herkömmlicher Glühlampen verkauft – somit deutlich billiger als im Westen üblich – und subventioniert nun die Entwicklung effizienter Klimaanlagen. Wenn das Beispiel Schule macht, wird die millionenfache Nachfrage des neu entstehenden Mittelstands nach modernen Dienstleistungen die Produktion sparsamer Geräte ankurbeln.

Indien könnte auch etwas gegen die wachsenden Emissionen des Verkehrssektors unternehmen. Derzeit verbraucht er nur 14 Prozent des nationalen Energieaufkommens, weil sehr wenige Inder ein Auto besitzen, doch bis 2040 dürfte sich die Treibstoffnachfrage infolge höherer Einkommen mehr als verdreifachen. Die politischen Entscheidungsträger verlangen inzwischen bessere Verbrauchswerte bei neu zugelassenen Fahrzeugen. Die indischen Städte sollten darüber hinaus in Ladestationen investieren, um Elektroautos attraktiver zu machen und den Einsatz erneuerbarer Energien im Verkehr zu ermöglichen. Da mehr als 80 Prozent aller in Indien verkauften Fahrzeuge Zwei- oder Dreiräder sind, könnte die Regierung die Elektrifizierung vorantreiben, indem sie Elektroroller und -rikschas fördert. Zudem würde ein gutes öffentliches Verkehrswesen das Verlangen nach privatem Auto-besitz bremsen.

Ein besser organisierter städtischer Verkehr könnte buchstäblich Millionen Leben retten. Delhi und andere

Großstädte ersticken im Smog und leiden unter der vor allem von Dieselfahrzeugen erzeugten Feinstaubbelastung; dadurch sinkt die Produktivität der Wirtschaft um jährlich 18 Millionen Dollar, und jedes Jahr sterben mehr als eine Million Menschen vorzeitig.

Licht und Schatten der indischen Solarprogramme

Bei meinen Unterhaltungen mit Firmenvertretern fiel mir ein starker Kontrast zwischen Indern und Ausländern auf. International tätige Firmen sehen in Indien einen lukrativen Markt, der im Rekordtempo größer wird – doch indische Unternehmer äußern unter vier Augen nur Hohn und Spott. Sie wissen um Indiens maroden Energiesektor, die fehlende Förderung für Infrastrukturprojekte, lähmende politische Streitereien und Korruption. Diese Hindernisse blockieren die reibungslose Einführung sauberer Energie vor allem aus vier Gründen.

Erstens ist das verrottete Stromnetz überhaupt nicht darauf vorbereitet, auch nur einen kleinen Zuwachs an erneuerbaren Quellen zu bewältigen, und die Überlastung wird immer schlimmer. Da mit dem Klimawandel Dürren häufiger werden, setzen die Bauern verstärkt Bewässerungspumpen ein, die tiefere Grundwasserschichten anzapfen und dabei mehr Strom verbrauchen. 2012 verursachte das massiv zunehmende Einsetzen von Pumpen

den größten Stromausfall der indischen Geschichte. Immerhin fördert die Regierung den Gebrauch von Solarmodulen, um damit zunächst 200 000 Bewässerungspumpen anzutreiben. Am Ende sollen alle 26 Millionen Pumpen, die derzeit mit Diesel oder Strom aus der Steckdose laufen, Solarenergie nutzen. Aber die bereits bankrotten Versorgungsunternehmen können nichts in ein besseres Netz investieren, denn sie stecken in einem Teufelskreis: Sie geben ihren Strom – meist auf Druck einflussreicher Lokalpolitiker hin – zu billig ab, verschulden sich noch mehr und können das Netz daher weder aufrechterhalten noch vor ungezügelterm Stromdiebstahl schützen.

Zweitens wird der Aufbau der Infrastruktur durch fehlende private Finanzierung und durch umständliche Vorschriften behindert. Dabei erfordert allein der Ausbau erneuerbarer Energien bis 2020 Investitionen von 150 Milliarden Dollar – weit mehr, als die Regierung aufbringen kann. Auch hier entsteht ein Teufelskreis: Die Banken haben vor allem im Energiesektor bereits große Kredite für gescheiterte Projekte vergeben und sind deshalb zu weiteren Investitionen kaum in der Lage. Oft verlangen sie exorbitante Zinsen. Zudem scheitern viele Projekte an unklaren Regierungszusagen oder verzögern sich durch Schwierigkeiten beim Landkauf.

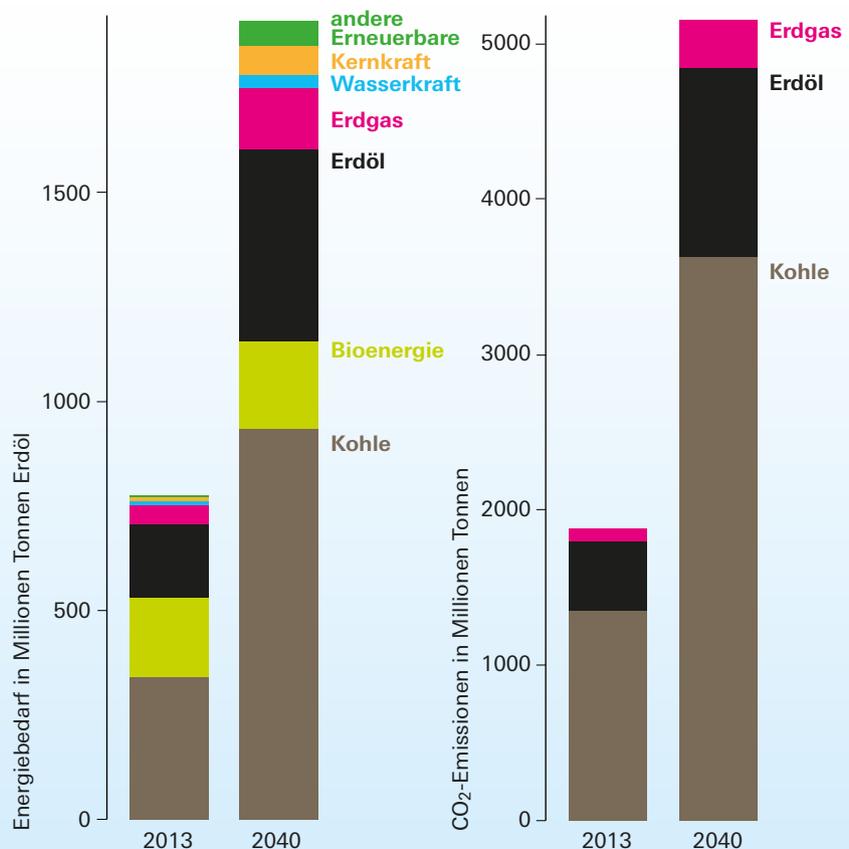
Drittens behindert die Politik vernünftige Maßnahmen. Zwar hat die Modi-Regierung ehrgeizige Ziele für Wind-

Mehr Energie, mehr Emissionen

Wenn Indiens Bevölkerung und seine Wirtschaft wie prognostiziert wachsen, würde sich die Energienachfrage bis 2040 gegenüber 2013 mehr als verdoppeln. Falls die Energiepolitik des Landes lediglich den 2015 bei der Pariser Klimakonferenz eingegangenen Verpflichtungen folgt, wird sich der Energiemix nur langsam ändern, und die CO₂-Emissionen könnten ebenfalls auf das Zweifache steigen. Für eine umweltfreundlichere Entwicklung muss Indien künftig stärker auf Erdgas, Solarenergie und Windkraft setzen sowie Elektroautos und das Energiesparen fördern.

Mit steigendem Energiebedarf ...

... wachsen auch die CO₂-Emissionen.



JEN CHRISTIANSEN, NACH: INDIA ENERGY OUTLOOK - WORLD ENERGY OUTLOOK SPECIAL REPORT, CEC/IEA, 2015, WWW.IEA.ORG / SCIENTIFIC AMERICAN MAI 2017



Lokale Netze – so genannte Microgrids – können Regionen mit Strom versorgen, die Überlandleitungen nicht erreichen. Solarmodule (links) liefern per Microgrid Strom für ein Dorf. In einem anderen lokalen Netz speichern Batterien die Solarenergie für trübe Tage (rechts).

und Solarenergie gesetzt, doch die Durchführung liegt zumeist bei den Bundesstaaten, die gern auf Zeit spielen. Eine weitere Regierungsinitiative zur Streichung der Treibstoffsubventionen erhöhte zwar die Preise für Benzin und Diesel, scheiterte aber beim Verteuern von Kerosin und Heizgas an politischen Widerständen. Solange Erdgas unter dem Marktwert verkauft wird, verspüren die Firmen kaum Anreize, neue Gasquellen zu erschließen, um die heimische Produktion zu steigern.

Und viertens hat die von Modi eingeführte Besteuerung der Kohleförderung nicht nur die Bergbauunternehmen erbittert, sondern auch deren Kunden – insbesondere die Stahlfirmen – sowie die Regierungen der Kohle produzierenden Bundesstaaten. Das sind mächtige politische Kräfte, an denen jede weitere Erhöhung der Steuer scheitern dürfte. Sie ist ohnehin viel niedriger als die Kosten der Umweltbelastung, die das Verbrennen von Kohle verursacht.

In dieser verfahrenen Lage geht es für die Politik zunächst einmal darum, die Versorgungsunternehmen von ihrer drückenden Schuldenlast zu befreien, denn nur dann können sie das Netz überarbeiten und erneuerbare Energie bezahlen. Die Regierung hat immerhin versprochen, einen Teil der Schulden zu übernehmen, wenn die Unternehmen im Gegenzug die massiven Verluste im Netz verringern, die oft mehr als ein Viertel der eingespeisten Energie auffressen. Überdies müsste Modi den Einfluss der Bundesstaaten auf die Energieversorger eindämmen, damit die Firmen nicht mehr gezwungen sind, lokalen Politikern zuliebe den Strom zu billig zu verkaufen.

Ebenso wichtig wären schärfere Vorschriften zur Energieeinsparung für die Industrie sowie das schnellere Bewilligen von Gaskraftwerken, Pipelines und Anlagen zum Flüssiggasimport. Gefragt sind auch stärkere Anreize zur Abscheidung und Speicherung von CO₂-Emissionen, wie dies eine Chemiefabrik in Südindien inzwischen praktiziert. Noch besser wäre es, schon früher als 2022 keine neuen Kohlekraftwerke mehr zuzulassen. All das wird ein Zusammenspiel von Zentralregierung und Einzelstaaten erfordern sowie Durchsetzungsvermögen gegen Industrie-lobbys.

Politisches Einvernehmen lässt sich am besten herstellen, wenn die erneuerbaren Energien finanzielle Vorteile bringen. Das haben Initiativen wie Energy Efficiency Services Limited durch die Förderung lokaler Kleinbetriebe erreicht.

Ein Anliegen der ganzen Welt

Eines ist allerdings klar: Indien wird den Übergang zu niedrigen CO₂-Emissionen nicht allein schaffen. Es braucht Hilfe bei der Entwicklung und Finanzierung neuer Technologien. Derzeit unterhält Indien bereits Partnerschaften mit den USA für die Erforschung und Entwicklung sauberer Energien, mit Deutschland zur Finanzierung eines stabilen Stromnetzes und mit multilateralen Entwicklungsbanken für die umweltfreundliche Modernisierung des Energiesektors.

Doch der Umfang der Hilfe muss mindestens auf das Zehnfache steigen. Andernfalls wird Indien weiterhin ineffiziente Kohlekraftwerke installieren, ausländisches Öl verschwenden und sich mit einem unzuverlässigen Stromnetz abmühen. Statt bloß zuzuschauen, ob und wie Indien allein in eine CO₂-arme Zukunft schreitet, sollten die Industrieländer ihm dabei helfen. Dafür gibt es einen starken finanziellen Anreiz: Länder, die Indiens Energiewandel beschleunigen, eröffnen der eigenen sauberen Energietechnik einen lukrativen Exportmarkt. Und darüber hinaus hängt davon die Zukunft unseres Planeten ab. ◀

QUELLEN

Berry, S. et al.: Energizing India: Towards a Resilient and Equitable Energy System. SAGE Publications, 2017

Ebinger, C.K.: India's Energy and Climate Policy: Can India Meet the Challenge of Industrialization and Climate Change? Brookings Institution, 2016

Sivaram, V. et al.: Reach for the Sun: How India's Audacious Solar Ambition Could Make or Break its Climate Commitments. Steyer-Taylor Center for Energy Policy and Finance, Stanford University, 2015

International Energy Agency (Hg.): India Energy Outlook. World Energy Outlook Special Report. Organisation for Economic Co-Operation and Development, Paris 2015

Spektrum PLUS+

DIE VORTEILSSEITE FÜR ABONNENTEN

Auf www.spektrum.de/plus finden Sie regelmäßig:

- digitale Produkte und Zusatzartikel zum kostenlosen Download
- Leserekskursionen zu interessanten Forschungseinrichtungen
- Ermäßigungen bei Tagungen oder Symposien von Kooperationspartnern
- Rabatte bei Leserreisen
- Veranstaltungen der neuen Reihe **Spektrum LIVE** zum Vorteilspreis

Weitere Informationen und Anmeldung:
Spektrum.de/plus

Spektrum LIVE

VERANSTALTUNGSREIHE ZUM 40-JÄHRIGEN JUBILÄUM DES
VERLAGS SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

In unserem Jubiläumsjahr laden wir Sie zu spannenden Vorträgen, lehrreichen Seminaren und anschaulichen Workshops ein. Lernen Sie Wissenschaft in einem neuen Format kennen – LIVE!

Aktuelle Veranstaltungen finden Sie auf
Spektrum.de/live

LANDWIRTSCHAFT

DIE GROSSE GRÜNE MAUER

Das Projekt ist kühn: einen Vegetationsstreifen am Rand der Sahara zu pflanzen, der sich durch den gesamten afrikanischen Kontinent zieht. Er soll die Ausbreitung der Wüste nach Süden aufhalten.



René Bally (links) war Forschungsleiter im Labor für Mikrobiologische Ökologie an der Universität de Lyon (Frankreich). **Robin Duponnois** ist Mikrobiologe an der Universität de Montpellier und Experte für tropische und mediterrane Symbiosen.

► spektrum.de/artikel/1314689

► Zehn Millionen Hektar Ackerland verwandeln sich weltweit pro Jahr in öde Wüstenareale. Eine drastische Verarmung der Böden, meist als Folge übermäßiger landwirtschaftlicher Nutzung, veranlasst immer mehr Bauern dazu, ihre Anbauflächen aufzugeben. Wind und Erosion machen die Böden dann endgültig unfruchtbar, indem sie die lockere Krume abtragen.

Diese Desertifikation bedroht weite Teile Afrikas, Südamerikas und Asiens. In reichen Ländern wie Australien tritt sie zwar ebenfalls auf. Doch hier haben die Farmer die Möglichkeit, das Vordringen der Wüste aufzuhalten – etwa durch gezielte Bewässerung. Rund 70 Prozent der trockenen und halbtrockenen Böden weltweit sind gefährdet; das entspricht 41 Prozent der irdischen Landflächen.

480 Millionen Menschen leben unter der Drohung, ihr Land verlassen oder sich einen anderen Lebensunterhalt suchen zu müssen.

Afrika ist besonders stark betroffen. Nach Schätzungen von Experten sind dort in den letzten 50 Jahren schon rund 650 000 Quadratkilometer fruchtbare Erde verloren gegangen – eine Fläche so groß wie Frankreich. Im vergangenen Jahrhundert ist die Sahara stellenweise um 250 Kilometer nach Süden vorgerückt. Der Kampf gegen die Desertifikation hat deshalb inzwischen oberste Priorität nicht nur für die Gemeinschaft der Sahel-Sahara-Staaten, sondern auch für die Afrikanische Union, die ihm in dem Programm »New Partnership for Africa's Development« (NEPAD) einen zentralen Platz einräumt.

Leider ist es mit den bisherigen Maßnahmen nicht gelungen, den Trend aufzuhalten. Deshalb bedarf es einer grundlegend neuen Strategie. Im Zusammenhang damit hat die Afrikanische Union 2005 das Projekt »Afrikas Grüne Mauer im Sahel« beschlossen. Ein etwa 15 Kilometer breiter pflanzlicher Schutzwall soll den gesamten Kontinent durchziehen und den Vormarsch der Sahara nach Süden stoppen. Er würde den Senegal mit Äthiopien verbinden, elf Länder durchqueren und hätte eine Gesamtlänge von 7000 Kilometern (siehe Bild rechts). Vorgesehen ist das großräumige Anpflanzen von Bäumen, so dass eine Art Waldgürtel entsteht, stellenweise aufgelockert durch landwirtschaftliche Anbauflächen.

Jahrzehnte fruchtloser Anstrengungen

Schon seit Jahrzehnten bemühen sich die meisten Länder der Sahelzone, die Lebensbedingungen der Bauern zu verbessern, die Ernährung der Bevölkerung zu sichern, den Energiebedarf durch die Erzeugung von Brennholz zu decken und bei alledem die Artenvielfalt zu bewahren. Auf der Agenda standen neben der Diversifikation der Land-

AUF EINEN BLICK DIE DESERTIFIKATION STOPPEN

- 1** Die Ausbreitung der Sahara nach Süden droht bis zu mehrere hundert Millionen Menschen ihrer Lebensgrundlage zu berauben.
- 2** Die Große Grüne Mauer soll die fortschreitende Desertifikation stoppen. Geplant ist ein Streifen aus Wald und landwirtschaftlich genutzten Flächen, der sich quer über den gesamten Kontinent zieht.
- 3** Das Vorhaben umfasst auch die Suche nach Möglichkeiten, die Produktivität der Agrarsysteme zu steigern und der Aufgabe landwirtschaftlicher Flächen entgegenzuwirken.



MASA / IMODIS, BEARBEITUNG CLAUDE MARAIS-SICRE, CEBRID, TOULOUSE

Die Große Grüne Mauer soll als 15 Kilometer breiter und 7000 Kilometer langer Vegetationsgürtel quer durch ganz Afrika verlaufen und dabei elf Länder durchziehen.



In dieser Akazien-Baumschule in der Region von Tessekére im Norden Senegals werden die Keimlinge vor dem Einpflanzen in freier Natur (Foto rechts) vier Monate lang in Töpfen gezogen.

wirtschaft und dem Anlegen von Bassins für Regenwasser auch Maßnahmen gegen die Desertifikation und den Abtrag fruchtbarer Böden. Zum Beispiel wurden auf Hängen kleine halbmondförmige Erdmauerchen errichtet, welche die Erde zurückhalten und gleichzeitig Wasserservoire bilden. Zudem verhindern sie das Ausschwemmen von tierischen Exkrementen und anderem wertvollem Dünger.

Auch gab es Anreize zum Einsatz traditioneller landwirtschaftlicher Praktiken wie dem Mulchen – dem Bedecken des Bodens mit pflanzlichen Abfällen – oder der Zai-Methode. Dabei überzieht man das Feld mit zahllosen etwa einen Meter breiten, flachen Becken und bringt darin die Samen aus (Bild S. 54). In den Vertiefungen sammeln sich Regenwasser und organischer Dünger, so dass die Pflanzen gut gedeihen. Das steigert nicht nur die Erträge, sondern verbessert auch ausgelaugte Böden, die damit wieder lockerer und durchlässiger werden. Da die Methode sehr arbeitsintensiv ist, lohnt sie sich freilich nur in Gebieten mit sehr geringen Niederschlägen von weniger als 300 Millilitern im Jahr.

Trotz der Förderung haben diese Praktiken bisher allerdings kaum Verbreitung gefunden. Hauptgrund ist der Mangel an organischen Überresten, da pflanzliche Abfälle in sehr trockenen Gebieten meist als Viehfutter dienen.

Insgesamt brachten die verschiedenen Initiativen deshalb nicht die erhofften Erfolge. Viele Faktoren, vor allem knappe Finanzmittel, behindern die Entwicklung der meisten Länder in der Sahelzone. Weniger kostspielige neue Projekte sollen deshalb nun die Wende bringen. Besondere Hoffnungen ruhen dabei auf der Großen Grünen Mauer. Die erste Präsentation fand am 1. und 2. Juni 2005 in Ouagadougou, der Hauptstadt von Burkina Faso, anlässlich des siebten Gipfeltreffens der Staatschefs der Gemeinschaft der Sahel-Sahara-Staaten statt. Zwei Jahre

später billigte die Afrikanische Union das Vorhaben. Zunächst war ein schlichter, 15 Kilometer breiter Waldgürtel vorgesehen, der den Kontinent durchziehen sollte. Dies stieß jedoch auf Skepsis, weil bereits negative Erfahrungen mit solchen Maßnahmen vorlagen.

So wurde in den 1970er Jahren in Algerien damit begonnen, einen »Grünen Damm« zu errichten: Ein 20 bis 30 Kilometer breiter Waldstreifen von der östlichen bis zur westlichen Landesgrenze sollte die Ausdehnung der Wüste nach Norden stoppen. Prozessionsspinnerrauen zerstörten jedoch die ersten Pflanzungen, die ausschließlich aus Aleppo-Kiefern bestanden. Anscheinend hatte niemand bedacht, dass Monokulturen besonders anfällig für den Befall durch Schädlinge und Krankheitserreger sind. Weitere Probleme kamen hinzu. So fraßen Herden von Weidetieren beim Durchqueren der Pflanzungen die jungen Triebe ab. Bis jetzt wurden daher nur 160 000 Hektar aufgeforstet, gerade einmal fünf Prozent der ursprünglich angestrebten Fläche von mehr als drei Millionen Hektar. Trotzdem läuft das Projekt weiter – nun mit einem Mix unterschiedlicher Baumarten.

Ein umfassender Entwicklungsplan

Eine ähnliche Anstrengung unternimmt China. Dort soll eine Große Grüne Mauer die Wüste Gobi einfrieden, um sie am Vorrücken zu hindern und die angrenzenden Städte vor Sandstürmen zu schützen. Auch hier pflanzte man ursprünglich nur einen Baumtyp – schnell wachsenden Eukalyptus – und setzt nun auf ein breiteres Artenspektrum. Die geschätzten Kosten des 1978 gestarteten Projekts liegen bei rund einer Milliarde Euro. Bis zu seinem Abschluss werden noch mehrere Jahrzehnte vergehen. Aber die bisher fertig gestellten rund 18 Prozent des Gürtels bilden schon jetzt den größten künstlich angepflanzten Wald der Welt.



Nutztierherden bedrohen die Pflanzungen, weil die Tiere die jungen Triebe fressen. Zum Gelingen der Großen Grünen Mauer ist deshalb ein Ausgleich zwischen den Interessen von Viehzüchtern und Landwirten erforderlich.

Angesichts dieser Erfahrungen begnügt sich das Projekt der Großen Grünen Mauer nicht mehr mit dem bloßen Anlegen eines Waldstreifens. In dem ausgeklügelten Entwicklungsplan ist vielmehr ein vielfältiger Pflanzengürtel vorgesehen, der außer Bäumen auch landwirtschaftliche Anbauflächen enthält. Angepflanzt werden sollen vor allem Arten, die einen ökonomischen Nutzen haben und an die Trockenheit angepasst sind. Zum Plan gehört ferner, Wassersammelbecken zu bauen, weitere Erwerbszweige wie Kunsthandwerk und Holzschnitzerei zu etablieren und den örtlichen Verwaltungsapparat sowie das Angebot an Dienstleistungen zu verbessern.

Für die Verbreitung Erfolg versprechender Praktiken sorgt ein Netzwerk aus ländlichen Entwicklungszentren, von denen aus Vertreter des Projekts – Funktionäre, Ingenieure und Agronomen – die beteiligten Gruppen und Werkstätten beraten. So will man das Abwandern der Bevölkerung aufhalten, das dazu führt, dass Äcker brach liegen und schließlich veröden. In einem Bericht des Sahara and Sahel Observatory – einer internationalen Organisation, die unter anderem gegen die Ausdehnung von Wüsten kämpft – von 2008 heißt es: »Die Große Grüne Mauer ist nicht als reine Baumwand konzipiert, die

sich am Rand der Wüste entlangzieht, sondern als ein Bündel von Maßnahmen und multisektoriellen Eingriffen zur Erhaltung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen mit dem Ziel, die Armut zu bekämpfen.«

Trotzdem bildet das Pflanzen von Bäumen ein wesentliches Element des Plans, sind diese doch die wichtigsten Garanten für die Gesundheit der Böden. Sie sorgen für die Zirkulation des Bodenwassers und halten die biochemischen Kreisläufe von essenziellen Nährstoffen wie Kohlenstoff, Phosphor und Nitrat aufrecht, die für die dauerhafte Fruchtbarkeit der Landflächen entscheidend sind. Eine zwei Meter hohe Akazie zum Beispiel hat bis zu vier Meter tief reichende Wurzeln, die Wasser und Nährstoffe aus dem Boden heraufholen. Mit ihrer Hilfe bildet der Baum neue Blätter, die wiederum das Erdreich düngen, wenn sie herabfallen. Als weiterer Dünger fungieren die Exkremente von im Geäst sitzenden Vögeln. Außerdem begünstigen Bäume die Entwicklung vieler für die Landwirtschaft nützlicher Mikroorganismen im Boden.

Für die Große Grüne Mauer wurden drei Hauptarten einheimischer Bäume ausgewählt: die Verek-Akazie (*Acacia senegal*), die Wüstendattel (*Balanites aegyptiaca*) und die Indische Jujube (*Ziziphus mauritiana*). Der als Gummiarabikum bekannte Saft der Verek-Akazie kommt unter anderem in der Lebensmittelindustrie, als Baumaterial und als Zusatzstoff in Textilien zum Einsatz. Auch die Wüstendattel findet vielerlei Verwendung: Blätter und Rinde werden als Heilmittel für Diarrhöe pharmakologisch genutzt, die Früchte sind essbar und lassen sich zu Saft oder Mus verarbeiten. Die Indische Jujube produziert ebenfalls genießbare Früchte.

Der Senegal hat als Vorreiter mit dem Aufbau der Großen Grünen Mauer begonnen. In eigens errichteten Baumschulen werden die Sämlinge vor dem Ausbringen in die Natur vier Monate lang in Töpfen gezogen (Bild links).

Die Große Grüne Mauer in Zahlen

Der Senegal kommt schnell voran mit der Errichtung der Großen Grünen Mauer. Von 2008 bis 2010 wurden

- ▶ 13 Baumschulen gegründet,
- ▶ 7750000 Setzlinge gezogen,
- ▶ 16225 Hektar Wald angebaut,
- ▶ 4540 Kilometer Feuerschneisen gegraben.



Bei der traditionellen Zai-Methode sind die Felder mit flachen Vertiefungen überzogen, in denen sich Wasser und Dünger sammeln. Das Verfahren ließe sich gut mit modernen Anbautechniken kombinieren, die im Rahmen des Projekts der Großen Grünen Mauer gefördert werden.

Zwischen 2008 und 2010 entstanden so aus fast acht Millionen Pflanzen gut 16 000 Hektar Wald; mehr als 4500 Kilometer Feuerschneisen dienen dem Schutz vor Bränden. Mittlerweile hat sich das Projekt in einem vergleichbaren Tempo weiterentwickelt.

Um die Dörfer herum angelegte Gärten verschaffen den Bewohnern zusätzliche Einkünfte. Frauen bauen dort Pflanzen mit hohem Mehrwert wie etwa Gemüse an. Es hat lange gedauert, das Projekt in Gang zu bringen – vor allem wegen institutioneller Hindernisse. Jüngste Ereignisse wie der Krieg in Mali wirkten gleichfalls hemmend. In den kommenden Jahren sollten schnellere Fortschritte zu erreichen sein.

Eine weitere Schwierigkeit ist, dass die Bäume erst nach 20 bis 30 Jahren voll ausgewachsen sind. Und nach ihrer Anpflanzung dauert es etwa zehn Jahre – im Fall der Großen Grünen Mauer also bis 2018 –, ehe sie überhaupt einen Einfluss auf die Ökosysteme haben. Die einheimische Bevölkerung muss sie so lange pflegen und beschützen, ohne unmittelbar davon zu profitieren. Zahlreiche Forschungsprojekte verfolgen deshalb das Ziel, das Baumwachstum zu beschleunigen.

Das Institut für Ökologie und Umwelt des französischen Forschungsverbunds CNRS (Centre national de la recherche scientifique) hat 2009 in Tessekéré im Nordosten Senegals in Zusammenarbeit mit mehreren Organisationen das Observatoire Hommes-Milieus international

(OHMi) eingerichtet. Dort befassen sich Forschungsgruppen des CNRS und des IRD (Institut de recherche pour le développement) sowie der Universitäten des Senegals und Burkina Fasos mit verschiedenartigen Fragestellungen – biologischen, ökologischen, kulturellen, sozialen, sanitären und klimatischen – im Zusammenhang mit der Errichtung der Großen Grünen Mauer.

Die Forstwirtschaft zum Beispiel ist an einer höheren Produktivität der Baumschulen interessiert. Hier ergaben Versuche mit Samen unterschiedlicher Herkunft, dass einige davon schneller wachsende und größere Bäume hervorbringen, die mehr Samen produzieren. Getestet wurde auch, inwiefern unterschiedliche Mischungen aus Sand und organischem Material das Wachstum eines Baums beeinflussen oder welche Rolle Größe und Form der Pflanzgefäße spielen. So haben wir ein Verfahren patentieren lassen, das darin besteht, verlassene Termitenhügel zu zermahlen und das Pulver mit Erde zu vermengen. Dieses Substrat lässt Sämlinge üppiger sprießen.

Ein weiteres zentrales Forschungsgebiet ist die Modellierung der lokalen sozioökologischen Verhältnisse, um ein besseres Regelungssystem zu erreichen. Wie sich in Algerien zeigte, gefährden Rivalitäten zwischen Viehzüchtern und Farmern Projekte wie die Große Grüne Mauer. Verschiedene Maßnahmen sollen dazu dienen, sie zu entschärfen. Zum Beispiel werden Durchgänge für die Herden geschaffen und Durchzugszeiten festgelegt, bei denen die Kulturen keinen Schaden nehmen.

Im sanitären Bereich geht es unter anderem um die Frage, ob das Anlegen großer Wasserreservoirs nicht zur Verseuchung umliegender Dörfer mit Insekten führt, die Krankheiten wie Malaria übertragen. Ein Forschungsprogramm zum Thema Biodiversität erfasst die heimischen Vogelarten und verfolgt, wie sie sich angesichts der landschaftlichen Veränderungen entwickeln, die der Bau der Großen Grünen Mauer mit sich bringt. Nicht zuletzt werden mögliche Einflüsse auf das Klima geprüft.

Mikroorganismen zur Bodenverbesserung

Zahlreiche Studien beschäftigen sich mit den Mikroorganismen, die natürlicherweise im Boden vorkommen und sich als wertvolle Helfer beim Bau der Großen Grünen Mauer erweisen könnten. Einige erleichtern die Aufnahme von Mineralien durch die Pflanzen, während andere Pathogene oder Parasiten in Schach halten. In diesem Bereich schlummern potenziell nützliche Ergebnisse in den Forschungslabors – in manchen Fällen schon seit Jahrzehnten –, die noch nie im großen Stil praktisch angewendet wurden. Eines der Ziele des Netzwerks ländlicher Entwicklungszentren und des OHMi ist es, den Farmern bedeutsame wissenschaftliche Erkenntnisse nahezubringen. Das betrifft zum Beispiel den nützlichen Effekt von Mykorrhizapilzen oder den Einsatz von Biopestiziden gegen parasitisch wachsende Pflanzen.

Mykorrhizapilze sind mikroskopisch kleine Bodenorganismen, die in Symbiose mit den Wurzeln bestimmter Pflanzen leben. Vor allem in trockenen und halbtrockenen Regionen tragen sie entscheidend zur Fruchtbarkeit des Bodens bei. Sie beschleunigen das Wachstum der Pflan-



Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter spektrum.de/t/wuesten

FORCDAN / STOCKADOB.COM

zen, indem sie mineralische Ressourcen erschließen und Nährstoffe wie Stickstoff, Phosphor und Kohlenstoff bereitstellen (Bilder auf der rechten Seite). Außerdem produzieren sie Substanzen, die für Schädlinge giftig sind.

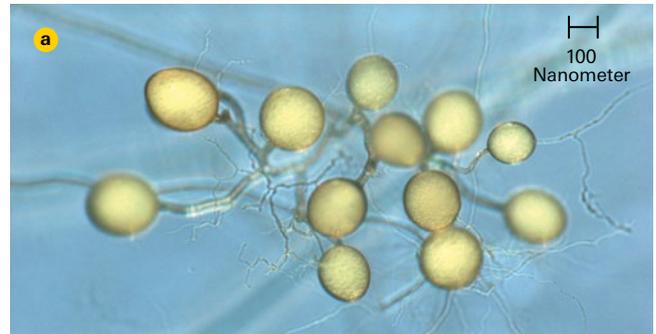
Lange herrschte die Ansicht, dass sich die Interaktion zwischen Pilz und Pflanze jeweils nur auf die beiden Partner auswirkt. Durch die Symbiose ändert sich aber auch die von den Wurzeln abgesonderte Flüssigkeit, und das beeinflusst die sich davon ernärende Mikroflora im Boden insgesamt. In der Umgebung der Wurzeln und in ihnen selbst entwickelt sich eine spezifische Mikrobe-population, die so genannte Mykorrhizosphäre. Sie enthält insbesondere Stickstoff bindende Bakterien, unter anderem der Gattung *Azospirillum*: Diese leben im Zellinneren der Pflanzen, deren Wachstum sie fördern, weshalb man von Endosymbiose spricht. Eine solche Lebensgemeinschaft mit Mikroorganismen bilden Hülsenfrüchtler wie Klee, Bohnen und Linsen oder bestimmte Bäume wie Erlen.

Mykorrhiza-Symbiosen fördern das Pflanzenwachstum, ohne die Böden auszulaugen

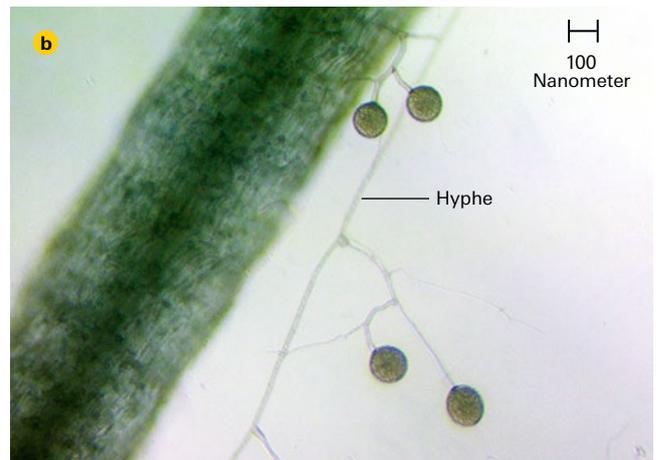
Landwirtschaftliche Praktiken, die Mykorrhiza-Symbiosen begünstigen, fördern das Wachstum der Pflanzen, ohne die Böden auszulaugen. Insofern tragen sie zur nachhaltigen Nutzung der Ackerflächen bei. Sie würden auch die Lösung für einen scheinbaren Widerspruch bieten: Die Pflanzen leiden an Phosphormangel, obwohl dieses Element in großer Menge im Erdreich vorkommt. Es liegt jedoch meist in Form wasserunlöslicher Verbindungen mit Metallen vor – etwa als Aluminium- oder Eisenphosphat. Pflanzen können es deshalb nicht nutzen. Die Mykorrhizapilze sind dazu hingegen in der Lage. So setzen sie organische Säuren frei, welche die chemischen Verbindungen aufbrechen und den Phosphor herauslösen. Diesen übertragen sie dann mittels ihrer langen Filamente, die teils in die Wurzelzellen eindringen, auf die Wirtspflanze.

Es gibt mehrere recht einfache Methoden, das Vorkommen der Mykorrhiza zu fördern. Leider sind sie in Afrika nur wenig verbreitet. Man kann zum Beispiel hypermykorrhische Pflanzen – etwa Hülsenfrüchte – anbauen, die bereitwillig eine Symbiose mit dem Pilz eingehen und seine Vermehrung begünstigen. So reichert sich der Boden dauerhaft mit den Pilzsporen an, von denen künftige Pflanzenkulturen profitieren. In der freien Natur sind hypermykorrhische Pflanzen die ersten, die sich nach einem Kahlschlag im Wald ansiedeln.

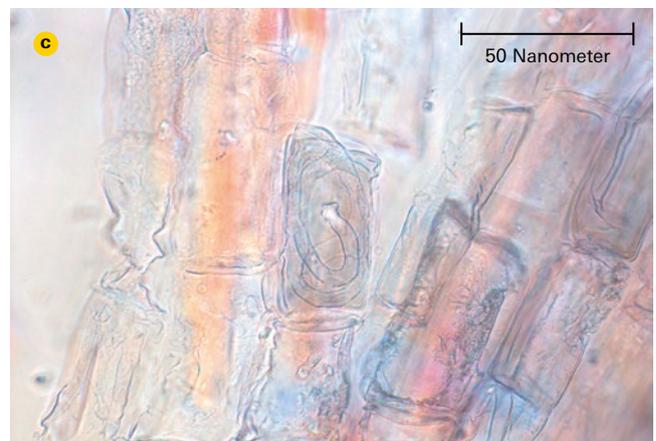
Mykorrhizapilze (a) sind Mikroorganismen im Boden, die Symbiosen mit Pflanzen eingehen. Sie fördern deren Wachstum, indem sie ihnen Wasser und Mineralien liefern, die sie über ihre langen Filamente aufnehmen (b). Einige dieser so genannten Hyphen dringen dazu in Wurzelzellen ein (c, in Blau). Im Gegenzug versorgen die Pflanzen die Pilze mit organischer Materie. Wie sehr ihnen die Symbiose nutzt, zeigt der Vergleich zwischen Setzlingen, die ohne und mit Mykorrhiza gewachsen sind (d).



YVES PRIN / CIRAD



ALEXANDRA HADJY / UPS-CHRS



YVES PRIN / CIRAD



YVES PRIN / CIRAD

Man kann die Pilze aber auch direkt in den Boden einbringen. Das verträgt sich bestens mit traditionellen landwirtschaftlichen Praktiken wie dem Zaï. Die Mikroorganismen würden dann gezielt in den Vertiefungen angesiedelt. Dadurch käme man mit kleineren Mengen aus.

Auch in den Baumschulen kann man mit Pilzen angereicherte Wurzeln in die Topferde geben. Das wurde erstmals im Juni 2012 bei Jujube-Bäumen praktiziert. Nach den üblichen vier Monaten Wachstum im Topf waren die Setzlinge wesentlich größer als ohne Pilze gezüchtete Vergleichsexemplare (Bild S. 55 unten). Auch nach einem Jahr lagen sie bei der Größe sowie der Überlebensrate vorn. Der Einfluss auf den Ertrag – die Bäume beginnen etwa ab dem vierten Jahr Früchte zu bilden – ließ sich noch nicht ermitteln.

Pflanzungen von mit Pilzen besiedelten Bäumen – und pilzfremen zum Vergleich – sind auch im Senegal, in Mali und in Burkina Faso geplant. Sie sollen der örtlichen Bevölkerung die Vorteile der Mykorrhiza-Symbiosen demonstrieren. So will man diese Praktiken bekannt machen und weiterverbreiten.

Mikroorganismen im Boden könnten auch beim Kampf gegen Phytoparasiten helfen. Solche Schmarotzerpflanzen schädigen in der Subsahararegion Getreide, das dort als Nahrungsgrundlage dient. Am schlimmsten wütet die Art *Striga hermonthica*, die sich an die Getreidewurzeln heftet und von ihnen mit Nährstoffen versorgen lässt, so dass die Nutzpflanze verkümmert und abstirbt (Bild unten). Dieser Phytoparasit kommt sehr häufig in den ausgelaugten Böden der halbtrockenen Regionen vor, wo er beträchtliche Ernteeinbußen verursacht, vor allem bei der Mohrenhirse, der Hirse, dem Mais, dem Reis und der Foniohirse. Die Verluste schwanken zwischen 10 und 90 Prozent und betragen im Durchschnitt etwa 40 Prozent. In der Subsahararegion entspricht das ungefähr 8 300 000 Tonnen Getreide. Auf diese Weise werden mehr als 300 Millionen Menschen mit Hungersnot bedroht.

Diverse Methoden zur Bekämpfung der parasitären Pflanze wurden erprobt: das Herausreißen der jungen Sprosse, die Züchtung resistenter Kultursorten und der Einsatz von Herbiziden. Doch die Ergebnisse enttäuschten. *S. hermonthica* ist schwer auszurotten; denn selbst wenn

Warum die Wüsten auf dem Vormarsch sind

Von Desertifikation bedroht sind vor allem trockene und halbtrockene Regionen. Sie machen 41 Prozent der irdischen Landfläche aus. Auslöser sind teils natürliche Faktoren wie geringe Niederschläge, hohe Temperaturen und starke Sonneneinstrahlung. Manchmal kommen außergewöhnliche Ereignisse hinzu – wenn etwa Überschwemmungen durch Meerwasser bei Sturmfluten küstennahe Böden versalzen.

Auch der Mensch trägt zur Desertifikation bei – vor allem durch übermäßige landwirtschaftliche Nutzung von Anbauflächen. Der Bedarf an Brennholz, Feldern und Weideland führt zur fortschreitenden Rodung von Wäldern. Monokulturen lassen den Boden verarmen, weil sie immer den gleichen Typ an Nährstoffen verbrauchen. Außerdem bieten sie günstige Bedingungen für die Verbreitung von Schädlingen und Parasiten. Die angebauten Pflanzen und Bäume können ihnen umso weniger Widerstand leisten, je mehr es den Böden an Nährstoffen mangelt.

Einer der schlimmsten Parasiten in der Sahelzone ist die Pflanze *Striga hermonthica* (Bild). Sie führt bei verschiedenen Getreidearten zu Ernteeinbußen zwischen 10 und 90 Prozent. Die befallenen Felder können ihre Besitzer nicht mehr ernähren und werden aufgegeben. Ausgelaugt und ohne Vegetation, die den fruchtbaren Oberboden festhält, wird die Erde dann vom Wind davongeweht oder von Regenfällen weggeschwemmt. Die zurückbleibende nackte, verödete Landfläche entwickelt sich zur Wüste.

Trockene Regionen sind am anfälligsten für die Desertifikation, weil die natürliche Regeneration des Pflanzenwuchses und der Böden hier fünf- bis zehnmal so lange dauert wie in Gebieten mit häufigen, ergiebigen Niederschlägen. Außerdem liegt das Bruttoinlandsprodukt der betreffenden Länder meist mehr als 50 Prozent unter dem von klimatisch günstigeren Regionen, so dass es sich die Bauern nicht leisten können, teure moderne Anbaumethoden zu verwenden. Und nicht zuletzt hat ein Bevölkerungswachstum um 18,5 Prozent in den von Desertifikation bedrohten Gebieten während der 1990er Jahre den Druck auf die natürlichen Ressourcen dramatisch verstärkt.

Der Phytoparasit *Striga hermonthica* verursacht beträchtliche Ernteeinbußen in der Sahelzone, indem er Getreidewurzeln anzapft und ihnen Nährstoffe entzieht.



man die Pflanzen ausmerzt, überleben die Samen noch jahrzehntelang im Boden.

Schon seit Langem wird deshalb in etlichen Forschungsprogrammen nach besseren Ansätzen zur Bekämpfung gesucht. Dazu gehört, die Samen am Keimen oder die Keimlinge am Wachsen zu hindern. Besonders aussichtsreich scheint, ein Keimen ohne Wirtspflanze auszulösen, was dem Schmarotzer keine Überlebenschance lässt. Dadurch könnten die im Erdreich schlummernenden Samen vernichtet werden. Bestimmte Pilze und Bakterien der einheimischen Mikroflora im Boden produzieren Substanzen mit ähnlichem Ergebnis. Wie einer von uns (Bally) schon vor mehr als einem Jahrzehnt entdeckt hat, synthetisieren etwa Bakterien der Art *Azospirillum* ein Molekül, das die Keimung von *S. hermonthica* in einem frühen Stadium blockiert und den Samen absterben lässt.

Angepasst an örtliche Umweltbedingungen

Die Nutzung solcher Mikroben hat den Vorteil, dass sie bereits an die örtlichen Umweltbedingungen angepasst sind. Inzwischen wurde damit begonnen, sie als Bestandteil von Biopestiziden zu verwenden. So entsteht in Ouagadougou eine neue technische Anlage zur groß angelegten Nutzung von Bakterien der Gattung *Azospirillum*. Vertreter führen bei Demonstrationen in kleineren landwirtschaftlichen Betrieben die Wirksamkeit ihres Produkts vor. Der Einsatz solcher Biopestizide ist kurzfristig möglich und sehr einfach in die herkömmlichen Anbaumethoden vor Ort zu integrieren. Gemeinsam mit den Mykorrhizapilzen dürfte sich auf diese Weise die landwirtschaftliche Produktion beträchtlich steigern lassen – und das ohne die hier zu Lande üblichen synthetischen Dünger und Pestizide.

Das bedrohliche Ausmaß der Desertifikation in Afrika hat die politischen Entscheidungsträger und die Wissenschaftler gleichermaßen aufgerüttelt. Die Große Grüne Mauer bietet eine Plattform zur Entwicklung, Erprobung und Demonstration unterschiedlichster Gegenmaßnahmen. Hauptziel muss es sein, die vorliegenden wissenschaftlichen Erkenntnisse in die Praxis umzusetzen, um die verödeten Regionen am südlichen Sahararand wieder zu begrünen und die Lebensbedingungen der Bewohner zu verbessern. Sogar Länder außerhalb Afrikas interessieren sich schon für das Vorhaben. So will sich Brasilien an der Finanzierung der Großen Grünen Mauer beteiligen, weil es hofft, dadurch Anregungen für den eigenen Kampf gegen die Desertifikation in den trockenen Regionen im Nordosten des Landes zu erhalten. ◀

QUELLEN

Boëtsch, G.: La Grande Muraille Verte: Des arbres contre le désert. Éditions Privat, Toulouse 2013

Dia, A., Duponnois, R.: La Grande Muraille Verte: Capitalisation des recherches et valorisation des savoirs locaux. Éditions IRD, Marseille 2012.

Dia, A., Duponnois, R.: Le projet majeur africain de La Grande Muraille Verte: Concepts et mise en œuvre. Éditions IRD, Marseille 2010

Spektrum der Wissenschaft

Chefredakteur: Prof. Dr. phil. Dipl.-Phys. Carsten Könneker M.A. (v.i.S.d.P.)

Redaktionsleiter: Dr. Hartwig Hanser

Redaktion: Mike Beckers (stellvertr. Redaktionsleiter), Robert Gast, Dr. Andreas Jahn, Dr. Tim Kalvelage, Dr. Klaus-Dieter Linsmeier (Koordinator Archäologie/Geschichte), Dr. Christoph Pöppe, Dr. Frank Schubert,
E-Mail: redaktion@spektrum.de

Art Direction: Karsten Kramarczik

Layout dieses Hefts: Anke Heinzelmann

Schlussredaktion: Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle

Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe

Assistenz des Chefredakteurs: Lena Baunacke

Redaktionsassistent: Andrea Roth

Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 104840, 69038 Heidelberg, Hausanschrift: Tiergartenstraße 15–17, 69121 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax -751; Amtsgericht Mannheim, HRB 338114

Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck

Herstellung: Natalie Schäfer

Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741,

E-Mail: service@spektrum.de

Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744

Übersetzer für dieses Heft: Dr. Eva Gottfried, Dr. Ingrid Horn, Christine Kemmet, Dr. Susanne Lipps-Breda, Dr. Ursula Loos, Dr. Michael Springer.

Leser- und Bestellservice: Helga Emmerich, Sabine Häusser, Ilona Keith, Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.de

Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 810680, 70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de

Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn

Die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH ist Kooperationspartner der Nationales Institut für Wissenschaftskommunikation gGmbH (NaWik).

Bezugspreise: Einzelheft »Spezial«: € 8,90 / sFr. 17,40 / Österreich € 9,70 / Luxemburg € 10,- zzgl. Versandkosten.

Im Abonnement € 29,60 für 4 Hefte, für Studenten gegen Studiennachweis € 25,60. Bei Versand ins Ausland werden die Mehrkosten berechnet. Alle Preise verstehen sich inkl. Umsatzsteuer. Zahlung sofort nach Rechnungserhalt.

Postbank Stuttgart, IBAN DE52600100700022706708, BIC PBNKDEFF

Anzeigen: iq media marketing gmbh, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Gesamtanzeigenleitung: Michael Zehentmeier, Tel. 040 3280-310, Fax 0211 887-97-8550; Anzeigenleitung: Anja Väterlein, Speersort 1, 20095 Hamburg, Tel. 040 3280-189

Druckunterlagen an: iq media marketing gmbh, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686

Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 39 vom 1.1. 2018

Gesamtherstellung: L. N. Schaffrath Druckmedien GmbH & Co. KG, Marktweg 42–50, 47608 Geldern

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: © 2018 (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.

Artikelnachweise: Meereswelt im Würgegriff SdW 1/2018 · Wellen als arktische Eisbrecher SdW 10/2015 · Ozean in Aufruhr SdW 6/2017 · Das Sturmmonster SdW 5/2016 · Das Wolkenparadox SdW 5/2018 · Tauende Tundra SdW 4/2017 · Klimafaktor Indien SdW 10/2017 · Die Große Grüne Mauer SdW 12/2014 · Rettung für Afrikas Erde SdW 9/2016 · Dem Wandel gewachsen SdW 12/2015 · Überschwemmte Felder gegen die nächste Dürre SdW 6/2018 · Darf man bedrohte Arten umsiedeln? SdW 1/2017

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.

Auslassungen in Zitaten werden generell nicht kenntlich gemacht.

ISSN 2193-4452 / ISBN 978-3-95892-222-8

SCIENTIFIC AMERICAN

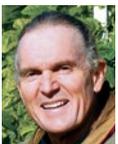
1 New York Plaza, Suite 4500, New York, NY 10004-1562,
Editor in Chief: Mariette DiChristina, President: Dean Sanderson,
Executive Vice President: Michael Florek



JIM RICHARDSON

NACHHALTIGKEIT RETTUNG FÜR AFRIKAS ERDE

Wie lassen sich ausgelaugte Ackerböden regenerieren, damit sie wieder gute Erträge liefern? Indem die Bauern zwischen die Nutzpflanzen Bäume, Sträucher und andere ausdauernde Gewächse setzen!



John P. Reganold (links) ist Professor für Bodenkunde und Agrarökologie an der Washington State University in Pullman. **Jerry D. Glover** ist leitender Berater für nachhaltige Landwirtschaft an der United States Agency for International Development (USAID) in Washington.

► spektrum.de/artikel/1417453



JIM RICHARDSON

Pflanzenzüchter Albert Chamango in Mali zeigt stolz den Erfolg seiner Arbeit: Die Erdnüsse gedeihen gut neben den höher wachsenden Straucherbsen, welche die Ackererde zusätzlich anreichern.

ab, selbst wenn sie Kunstdünger benutzen. Der Ertrag von Mais, einem Grundnahrungsmittel, liegt im Durchschnitt bei einer Tonne pro Hektar – kaum ein Zehntel dessen, was Farmer im mittleren Westen der USA erzielen. Das hat einen simplen Grund: Ein Großteil der Böden der Subsahara ist ausgelaugt, es mangelt an organischem Material und Nährstoffen für Pflanzen. Oft vermag zusätzlicher Kunstdünger die Erträge kaum zu steigern – manchmal schädigt er den Boden sogar noch mehr. Die Bodendegradation schreitet alarmierend schnell fort, und die ohnedies kümmerlichen Erträge stagnieren oder sinken immer weiter.

Die Situation ist deshalb so dramatisch, weil von den weltweit 800 Millionen unterernährten Menschen mehr als ein Viertel in Afrika südlich der Sahara lebt. Neueren Studien zufolge wird sich die dortige Bevölkerung, derzeit rund eine Milliarde Menschen, bis 2050 verdoppeln und stark vom Klimawandel betroffen sein (siehe **Spektrum** Juni 2016, S. 66). Ohne eine entscheidende Stärkung der Landwirtschaft werden Hungersnöte unweigerlich häufiger auftreten. Forscher sind sich einig darin, dass eine Erholung der Böden die wichtigste Voraussetzung für höhere landwirtschaftliche Produktivität ist.

Im Prinzip ist die Lösung einfach: Die Böden müssen mit zersetzten pflanzlichen und tierischen Substanzen versorgt werden. Solches organische Material liefert Stickstoff und Kohlenstoff, speichert Wasser und ernährt die für den Bodenertrag wichtigen Mikroorganismen. Doch das ist leicht gesagt. Die meisten afrikanischen Kleinbauern können nicht genug Kompost oder Mist produzieren oder erwerben, um die Erde anzureichern. Außerdem darf die Bodenverbesserung den Ackerbau nicht stören; die Familien können mit dem Anbau nicht warten, bis sich das Land erholt hat. So stehen die Bauern vor einer fast unlösbaren Aufgabe. Sie sollen die Erträge steigern, ohne Wasser und Chemikalien zu verschwenden, und gleichzeitig genug verdienen, um ihre Familie und die Dorfgemeinschaft über die Runden zu bringen.

Die von Majoni gewählte Lösung beruht auf einer Anbaumethode, die Perennierung (englisch: perenniation) heißt, weil sie sich auf perennierende (mehrjährige, ausdauernde) Pflanzen stützt. Man setzt bestimmte Bäume, Sträucher oder mehrjährige Gräser zwischen die Kulturpflanzen, was die Böden verbessert, die Erträge steigert und die langfristige Nachhaltigkeit der Nahrungsmittelproduktion gewährleistet. Die zusätzlichen Pflanzen versorgen den Boden mit Kohlenstoff und Stickstoff, speichern Wasser, hemmen die Erosion, bekämpfen Schädlinge und unterstützen obendrein die Aufnahme von Kunstdünger. Die Perennierung ergänzt gut den pfluglosen Ackerbau und die

► Mariko Majoni aus Malawi hat seine Anbaumethode drastisch verändert. Wie die meisten Kleinbauern in Afrika konnte er sich keine Düngemittel leisten und erntete von Jahr zu Jahr immer weniger Mais. Als er von Bäumen hörte, die der Luft Stickstoff entnehmen und damit den Boden auf natürliche Weise düngen, pflanzte er solche Setzlinge zwischen seine Maisreihen. Sechs Jahre später erntet er zehnfach so viel wie vorher – genug, um seine Familie zu ernähren und den Überschuss zu verkaufen. Die Nachbarn hielten ihn zuerst für verrückt; inzwischen folgen viele seinem Beispiel.

Südlich der Sahara ist es meist warm, und die Tage sind lang und sonnig. Eigentlich sollten Kulturpflanzen gut gedeihen, doch viele Landwirte rackern sich über die Maßen

biologische Landwirtschaft sowie speziell gezüchtete Pflanzensorten, die Trockenheit vertragen und resistent gegen Krankheiten und Schädlinge sind. Außerdem liefern die mehrjährigen Pflanzen den Bauern zusätzlich Viehfutter und Feuerholz.

Drei Perennierungsvarianten zeigen, auf welche Weise Bauern die Erträge von wichtigen Grundnahrungsmitteln wie Mais oder Sorghum nachhaltig steigern und gleichzeitig die Böden anreichern können. Die drei Ansätze haben sich im subsaharischen Afrika als besonders erfolgreich erwiesen. Im Verlauf von mehreren Jahren lassen sich damit die Erträge von einer Tonne auf drei Tonnen pro Hektar anheben. Von solchen Erfahrungen könnten auch Regionen mit nährstoffarmen tropischen und subtropischen Böden in Südasien und Südamerika profitieren.

Die von Majoni und anderen afrikanischen Bauern am häufigsten angewandte Perennierungsstrategie ist die immergrüne Landwirtschaft. Man pflanzt dazu auf den Feldern der einjährigen Erntepflanzen zusätzlich bestimmte Baumarten an. Die stickstoffreichen Blätter fallen ab und düngen die Oberfläche; die tiefen Wurzeln führen dem Boden mehr Stickstoff und Kohlenstoff zu. Oft verwenden die Bauern den Anabaum, *Faidherbia albida*, eine afrikanische Akazienart. Da der Baum hauptsächlich in der Zeit zwischen Ernte und Aussaat der Nutzpflanzen wächst, wetteifert er nicht mit ihnen um Wasser, Nährstoffe oder Sonnenlicht. Wo die Bauern die Kulturpflanzen von Hand ernten, können sie die Bäume zufällig platzieren; sie können sie aber auch regelmäßig und in größeren Abständen anordnen, um Raum für Traktoren und Mähdrescher zu schaffen. In den letzten Jahrzehnten haben mehr als 100 000 Bauern in Sambia diese »Düngebäume« in ihre Maisfelder integriert. In Niger und Mali ließen sie auf Hirse- und Sorghumfeldern mit einer Gesamtfläche von mehr als fünf Millionen Hektar wild wachsende Bäume stehen und schufen so halb natürliche Parklandschaften.

Die bis zu 30 Meter hohen Bäume reichern Phosphor und Kalium an, die sie aus tieferen Bodenschichten gewinnen, welche die Kulturpflanzen nicht erreichen können.

Sich zersetzende Baumblätter und Wurzelaktivität machen all diese Nährstoffe dann den angebauten Nutzpflanzen zugänglich. Außerdem schützen die Bäume die Kulturpflanzen vor heißen, trockenen Winden und reduzieren deren Wasserverdunstung. Diese Vorteile können die Erträge auf das Doppelte oder – wenn man sie mit modernen Pflanzensorten und Dünger kombiniert – sogar auf das Dreifache steigern.

In Ostafrika wenden mehr als 30 000 Bauern einen weiteren Typ der Perennierung an, das Push-Pull-System. Man lässt zwischen den Maisfeldern und an deren Rändern bestimmte perennierende Pflanzen wachsen, damit sie Schadinsekten und Unkräuter vertreiben (»push«) oder weglocken (»pull«); nebenbei mildern sie die Erosion, produzieren Viehfutter und sparen Düngemittel. Mit Push-Pull-Systemen bekämpfen die ostafrikanischen Bauern sowohl den Stängelbohrer, dessen Larven sich gierig in die Maisstängel fressen, als auch das Strigakraut, das den Maiswurzeln Nährstoffe raubt. Die Bauern setzen zwischen den Maisreihen *Desmodium uncinatum*, eine mehrjährige Hülsenpflanze, die sie normalerweise dem Vieh verfüttern und hier einen doppelten Push-Effekt ausübt: Oberirdisch vertreibt *Desmodium* mit seinem Geruch die Motten des Stängelbohrers und hindert sie daran, ihre Eier im Mais abzulegen; unterirdisch bekämpft eine von den Wurzeln erzeugte Substanz das Strigakraut.

Düngebäume und Insektenfallen

Um den Insektenbefall weiter zu reduzieren, umgeben die Bauern die Felder mit perennierendem Napierras (*Pennisetum purpureum*), das nicht nur wertvolles Viehfutter ist, sondern auch einen Pull-Effekt ausübt: Das Gras lockt die von *Desmodium* vertriebenen Stängelbohrer an und produziert ein klebriges Harz, das die Larven festhält.

Wo der Mais sowohl vom Stängelbohrer als auch vom Strigakraut bedroht ist, können Push-Pull-Systeme den Ernteertrag glatt verdoppeln; sind nur Stängelbohrer das Problem, lassen sich die Erträge immerhin um 25 bis 30 Prozent steigern. Mehr Viehfutter und erhöhter Stickstoffgehalt des Bodens sind ein zusätzlicher Bonus.

Der dritte, von Forschern aus Malawi und den USA entwickelte und von mehr als 8000 malawischen Bauern genutzte Ansatz ist das Doppel-Hülsenfrucht-System: Der Bauer pflanzt eine niedrig und schnell wachsende Hülsenfrucht wie Erdnuss oder Sojabohne zusammen mit der Straucherbse, einer tiefer wurzelnden sowie höher und deutlich langsamer wachsenden Hülsenfrucht. Erdnuss oder Soja sind nach wenigen Monaten reif, noch bevor die Straucherbsen sie überragen und ihnen das Sonnenlicht nehmen können. Nachdem Erstere abgeerntet wurden, fallen ihre Blätter ab und reichern den Boden an. Die Straucherbsen reifen ein bis zwei Monate später; nach der Ernte werfen die Pflanzen ebenfalls ihre Blätter ab und liefern der Erde weitere Nährstoffe.

Da die beiden Pflanzentypen verschieden schnell wachsen und unterschiedlich tief wurzeln, konkurrieren sie kaum um Nährstoffe oder Wasser. Das Doppelfruchtsystem steigert den jährlichen Ernteertrag an proteinreichen Pflanzen, verbessert die Böden und erfordert weniger Arbeit als

AUF EINEN BLICK TRICKREICHE ANBAUMETHODEN

- 1** In vielen Gebieten Afrikas südlich der Sahara sind die Äcker erschöpft. Düngemittel allein helfen hier wenig, ja können sogar schaden.
- 2** Durch den Anbau perennierender – mehrjähriger – Bäume und Sträucher zwischen den Kulturpflanzen lässt sich die Bodenqualität verbessern und der Ernteertrag steigern.
- 3** Mehr als eine Million Afrikaner nutzen bereits solche Perennierungsstrategien – aber weitere Millionen Bauern brauchen technische und finanzielle Unterstützung dafür.



Die Bäuerin Rhoda Mang'anya hat den Ertrag auf ihrem Acker in Malawi enorm gesteigert, seit sie zwischen den Maisstauden Bäume pflanzt, deren Laub und Wurzeln den Boden erneuern.

zwei separat angebaute Früchte. Außerdem bereichert diese Form des Anbaus den Speiseplan der Familie.

Da die Straucherbse nach ihrer Ernte erneut Früchte bildet, können Bauern zwischen die wieder austreibenden Pflanzen Mais setzen und anschließend Mais und ein zweites Mal Straucherbsen ernten. In zwei Anbauphasen liefert dieses System drei Ernten von Hülsenfrüchten sowie eine Maisernte – und damit 50 Prozent mehr Eiweiß als der traditionelle Fruchtwechsel zwischen Mais und Hülsenfrüchten.

Mehr als eine Million subsaharischer Bauern profitiert von Perennierungsstrategien, doch Millionen andere haben noch nie davon gehört, oder es mangelt an technischer und finanzieller Unterstützung. Nachhaltige Verfahren sind nicht so leicht anzuwenden wie Düngemittel oder Pestizide. Die Bauern müssen erst lernen, mehrjährige und einjährige Pflanzen gemeinsam anzubauen, ausgedehnte Fruchtwechselferioden zu organisieren und die unterschiedlichen Ernten zu vermarkten. Da viele Bauern das bewirtschaftete

Land nicht selbst besitzen oder nicht dauerhaft pachten können, scheuen sie aber oft solche längerfristigen Anbaupläne.

Daher muss die internationale Gemeinschaft verstärkt mithelfen, bereits bewährte Methoden zu verbreiten und neue auszuprobieren. Das World Agroforestry Center, ein internationales Forschungsinstitut zur Entwicklung der immergrünen Landwirtschaft, schließt ein Vierjahresprojekt namens Trees for Food Security ab; Partner sind die Regierungen von Äthiopien, Ruanda, Burundi und Uganda. Das Program for Sustainable Intensification der US-Behörde USAID (United States Agency for International Development) unterstützt alle drei im Artikel beschriebenen Techniken.

Forscher am International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics sowie an der Universität von Malawi in Zomba und der Michigan State University in East Lansing helfen ostafrikanischen Bauern, das Doppel-Hülsenfrucht-System zu verbessern. Sie entwickeln dafür Sorten von Straucherbsen, die an unterschiedliche klimatische Bedingungen und lokale Anbaumethoden angepasst sind. Andere Experten haben perennierende Varianten der traditionell einjährigen Kulturpflanzen Sorghum, Weizen und Reis entwickelt und versuchen nun, mehr Ertrag zu erzielen und weitere wünschenswerte Eigenschaften der neuen Sorten zu verstärken. Und an der Washington State University in Pullman, an der Michigan State University sowie am gemeinnützigen Land Institute in Salina (Kansas) wird perennierendes Getreide gezüchtet, das in unterschiedlichen Böden gedeihen kann.

All das sind gute Ansätze, aber noch fehlt eine umfassende Antwort auf die Frage: Welche Perennierung eignet sich am besten für welche Umwelt? Um sie beantworten zu können, möchten Forscher an der Rutgers University in New Brunswick (New Jersey) in Zusammenarbeit mit chinesischen Agrar- und Bioenergie-Firmen ein weltumspannendes Netzwerk von 27 bis 45 Stationen aufbauen. Es soll die Tauglichkeit von Bäumen, Büschen und anderen mehrjährigen Pflanzen für die lokalen Klima-, Umwelt- und Kulturbedingungen untersuchen. Die Kosten des Projekts werden auf 450 Millionen bis 1,8 Milliarden Dollar geschätzt.

Das ist viel Geld, doch die Investition lohnt sich, wenn man bedenkt, dass allein den Anbauflächen Subsahara-Afrikas Jahr für Jahr Stickstoff, Phosphor und Kalium im Wert von rund 4 Milliarden Dollar verloren gehen. Lokal angepasste Perennierungsstrategien würden diese enormen Verluste entscheidend mindern – und damit helfen, die Ernährung der afrikanischen Bevölkerung langfristig sicherzustellen. ◀

QUELLEN

Garrity, D. P. et al.: Evergreen Agriculture: A Robust Approach to Sustainable Food Security in Africa. In: Food Security 2, S. 197–214, 2010

Glover, J. D. et al.: Plant Perennials to Save Africa's Soils. In: Nature 489, S. 359–361, 2012

Sánchez, P.A.: Tripling Crop Yields in Tropical Africa. In: Nature Geoscience 3, S. 299–300, 2010



Die Sitka-Fichten in der kanadischen Provinz British Columbia müssen vermutlich Gene von Bäumen aus wärmeren Regionen übernehmen, um sich in Zeiten des Klimawandels zu behaupten.

FORST- WIRTSCHAFT DEM WANDEL GEWACHSEN

Die Klimaerwärmung bedroht Kanadas Wälder. Um sie fit zu machen für höhere Temperaturen, wollen Forscher Bäume aus südlicheren Gefilden einführen, die den heimischen Beständen ihre Gene für Hitzetoleranz vererben.



Hillary Rosner ist Journalistin in Colorado. Sie schreibt unter anderem für »National Geographic«, »New York Times« und »Wired«.

► spektrum.de/artikel/1372765

► Auf einem Feld in Vancouver, am Straßenrand direkt gegenüber einer Häuserreihe, stehen ungefähr 500 Sitka-Fichten dicht an dicht und recken ihr dunkelgrünes Nadelkleid der Sonne entgegen. Obwohl alle vor sieben Jahren gleichzeitig gepflanzt wurden, variiert ihre Größe dramatisch. Die kleinsten sind nur ungefähr 60 Zentimeter hoch und stammen von der Kodiak-Insel in Alaska; die größten dagegen bringen es auf rund zwei Meter und kommen aus Oregon. Die Größe ist allerdings nicht der einzige augenfällige Unterschied. Obwohl die Fichten aus Alaska zur selben Art gehören wie diejenigen aus Oregon, knospen sie volle drei Monate früher. Zudem bleiben sie üppig grün, egal wie tief die Temperaturen fallen.

Die Pflanzung am Rand des weitläufigen Campus der University of British Columbia ist Teil eines Experiments mit dem Ziel, die kanadischen Wälder vor den Folgen des drohenden Klimawandels zu schützen. Bäume sind an ihren Lebensraum angepasst. Doch der verändert sich in dem Maß, wie die Erde sich erwärmt. Nun können Bäume nicht einfach losmarschieren und sich ein neues Habitat suchen. Wenn sie es nicht schaffen, mit dem Klimawandel Schritt zu halten, sind sie dem Untergang geweiht.

Da die Bäume selbst ortsgebunden sind, erproben Wissenschaftler eine neue Lösung: Sie wollen den Genen

die Chance geben, zu wandern – und den Pflanzen so dabei helfen, sich genetisch den veränderten Umweltbedingungen anzupassen. Für dieses Experiment hat Sally N. Aitken die Fichtenschonung in Vancouver gepflanzt. Sie ist Direktorin des Centre for Forest Conservation Genetics an der örtlichen Universität. Ihrer Ansicht nach könnte die Rettung der Wälder in British Columbia – und andernorts – von einem Verfahren abhängen, das »assisted gene flow« heißt. Wissenschaftler verpflanzen dabei Organismen mit vorteilhaften Eigenschaften von einer Stelle ihres Verbreitungsgebiets an eine andere, wo sie ihre besonderen Erbanlagen an die angestammte Flora weitergeben können. So besitzen die Bäume aus Oregon und die aus Alaska vielleicht wechselseitig nützliche Gene. Doch ohne menschliches Zutun kommen beide niemals zusammen.

Förster können hier nachhelfen, indem sie beispielsweise Setzlinge von Fichten oder Küstentkiefen aus niedrigen Breitengraden nehmen und sie bei etwas höheren einpflanzen. Wenn dort dann im Zuge der globalen Erwärmung die Durchschnittstemperatur steigt, sollten die Bäume am neuen Standort problemlos gedeihen, sich mit verwandten Arten vor Ort kreuzen und so ihre auf die Wärme zugeschnittenen Gene verbreiten. Der Wald insgesamt würde sich dadurch anpassen. Insofern bildet der »assisted gene flow« ein Mittel, der Evolution behutsam auf die Sprünge zu helfen.

Ganz so simpel ist die Sache aber nicht. Man kann nicht einfach einen Baum aus Oregon 1000 Meilen weiter nördlich in British Columbia einpflanzen und darauf warten, dass es dort wärmer wird. Der Grund sind genau jene lokalen Anpassungen, die den »assisted gene flow« attraktiv erscheinen lassen. Küstentkiefen zum Beispiel wachsen in sehr verschiedenen Regionen Kanadas und haben je nach ihrem Standort besondere Gene, die ihnen helfen, Hitze, Kälte oder Trockenheit zu ertragen oder lokal vorkommende Krankheiten oder Schädlinge abzuwehren. Wenn dann eine arktische Kaltfront durch Vancouver zieht und auf Setzlinge aus wärmeren Regionen trifft, bekommt

das denen nicht gut. Denn ihnen fehlen die speziellen genetischen Anpassungen für das Gedeihen in ihrem neuen Lebensraum. »Wir müssen die Sache in ganz kleinen Schritten angehen«, meint Aitken. »Obwohl die in einigen Jahrzehnten zu erwartenden Veränderungen erheblich sind, ist bis dahin noch mit wochen-, monate- oder jahrelangen Unterbrechungen des allgemeinen Erwärmungstrends zu rechnen, die diese Bäume überleben müssen.«

250 Millionen Setzlinge jährlich

Herauszufinden, wie man die heutigen Wälder am besten für das Klima von morgen rüsten kann, ist keine leichte Aufgabe. Doch in British Columbia, wo die Forstwirtschaft für ein Drittel aller Exporte aufkommt und die Hälfte des Baumbestands kommerziell verwertet wird, kommt ihr große Bedeutung zu. Gesetze schreiben eine Wiederaufforstung nach dem Fällen vor, um den Holznachschub und gesunde Ökosysteme zu gewährleisten. Ungefähr 250 Millionen Setzlinge werden jährlich gepflanzt. Woher sollten sie kommen, und wie weit entfernt von ihrem Ursprungsort kann man sie einpflanzen? Das sind ebenso knifflige wie drängende Fragen. Eine falsche Entscheidung könnte die Wälder für Jahrzehnte ruinieren.

In dem kleinen Experiment mit den Sitka-Fichten untersucht Aitken Bäume von 14 unterschiedlichen Standorten zwischen Kalifornien und Alaska. So will sie Erfahrungen sammeln, um massive Fehler bei Projekten größeren Ausmaßes zu vermeiden. Ihr Team konnte 35 DNA-Segmente identifizieren, die einen Einfluss darauf haben, wie kälteempfindlich die Fichten sind und wann sie austreiben. Mittlerweile durchmustern die Forscher das Erbgut der Bäume auch nach Genen, die mit der Beständigkeit gegen andere Umwelteinflüsse zusammenhängen. Derartige günstige Versionen sollen sich dann in Populationen verbreiten, die genau solche Eigenschaften benötigen – und zwar so schnell, dass die Veränderungen mit dem Klimawandel Schritt halten.

Dieses größere Projekt namens AdapTree könnte wegweisend sein für ähnliche Vorhaben auf der ganzen Welt. Langfristig profitieren vielleicht sogar andere Biotope davon – zum Beispiel Korallenriffe, die ebenfalls durch den Klimawandel bedroht sind. Forscher in den Vereinigten Staaten, Abu Dhabi, Katar und Australien haben vorgeschlagen, Korallen aus dem Persischen Golf in den Indopazifik zu verpflanzen, wo sie ihre Gene für Hitzetoleranz weitergeben könnten. Ebenso gibt es Versuche, mit Samen aus vielerlei Lebensräumen das Grasland im Mittleren Westen der USA wiederherzustellen.

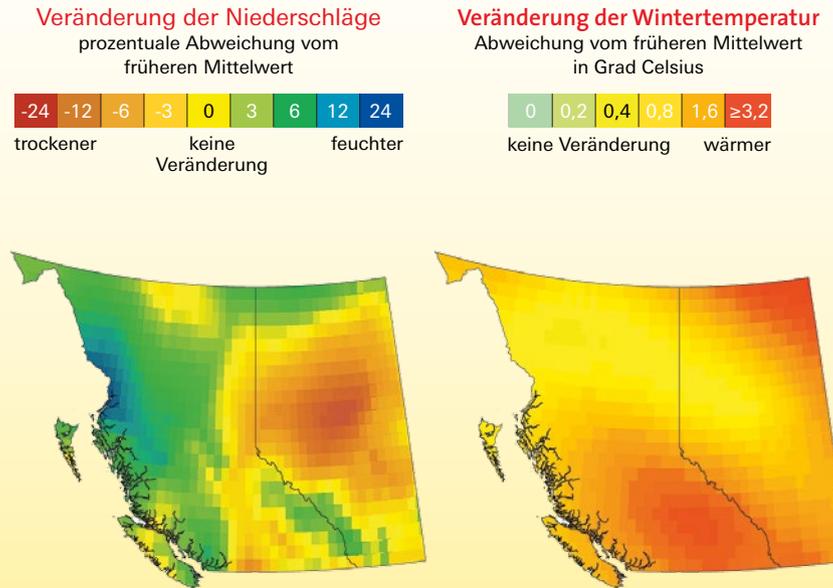
Aitken und Michael C. Whitlock, Populationsgenetiker am Zoologischen Institut der University of British Columbia, haben den Begriff »assisted gene flow« in einer Publikation aus dem Jahr 2013 geprägt. Schon länger verfolgen Wissenschaftler und Umweltschützer eine noch kühnere Idee, nämlich die assistierte Migration. Hierbei werden Arten weit entfernt von ihrem Herkunftsort und außerhalb ihres natürlichen Verbreitungsgebiets angesiedelt. »Assisted gene flow« ist ein gemäßigerer Ansatz, der vor allem auf die Übertragung der Gene zielt. Nach dem erfolgrei-

AUF EINEN BLICK BÄUME FÜR DEN KLIMASCHOCK RÜSTEN

- 1 Wälder passen sich genetisch an die lokalen Umweltbedingungen an; der heutige Klimawandel vollzieht sich jedoch so schnell, dass sie nicht mithalten können.
- 2 Deshalb versuchen Wissenschaftler die Evolution zu beschleunigen, indem sie Bäume mit Genen für Hitzetoleranz und geringen Wasserbedarf neben solche setzen, die diese Gene beziehungsweise Eigenschaften künftig benötigen; dann können sich beide miteinander kreuzen.
- 3 Diese neue Strategie – »assisted gene flow« (AGF) – wird in verschiedenen Klimazonen in British Columbia getestet.

Wettertrends für Bäume

Wie stark sich das Klima im Westen Kanadas bereits gewandelt hat, zeigt der Vergleich der gemittelten Wetterdaten in den Zeitspannen von 1961 bis 1990 und 1997 bis 2006. Im Durchschnitt haben die Niederschläge entlang der Pazifikküste stark zugenommen, wodurch es inzwischen immer öfter zur früher seltenen Kieferschütte durch Pilzbefall der Nadeln kommt. Weiter im Landesinneren ist das Klima dagegen trockener geworden, was erklären könnte, warum dort vermehrt Fichten und Espen eingehen. Dass es im Winter heute überall wärmer ist, begünstigt zudem die Ausbreitung des schädlichen Bergkieferkäfers. (Die Methoden für diese Analysen wurden 2009 in der Fachzeitschrift »Agricultural and Forest Meteorology« publiziert.)



chen Abschluss von AdapTree in ein paar Jahren werden DNA-Sequenz-Daten für 12 000 Kiefern und Fichten vorliegen, die von mehr als 250 Populationen aus British Columbia und Alberta stammen.

Diese Bäume spüren die Folgen des Klimawandels bereits. In den 1970er Jahren ließ die Regierung von British Columbia eine Karte mit den verschiedenen biogeoklimatischen Zonen in der Provinz erstellen. 40 Jahre lang bildete diese Karte die Grundlage für die waldbaulichen Planungen im westlichen Kanada und gab Auskunft darüber, welche Setzlinge wo zu pflanzen sind. Inzwischen ist sie aber durch den Klimawandel zu großen Teilen überholt. Einige Zonen haben sich verschoben, andere sind dramatisch geschrumpft. Manche Lebensräume in höheren Regionen und auf einigen Hochebenen sind schon zur Hälfte verloren gegangen und dürften bis 2100 zu 80 Prozent verschwunden sein. Setzlinge von Bäumen, die einst in einer bestimmten Region gediehen, gehen dort heute ein. Die Lebensräume verwandeln sich und bringen Ökosysteme hervor, die sich von den früheren völlig unterscheiden – wobei freilich umstritten ist, ab wann ein Ökosystem als »völlig verändert« gelten kann.

Logenplatz im Drama der globalen Erwärmung

Die Anpassungsfähigkeit einer bestimmten Population hängt entscheidend davon ab, wie schnell sich die Individuen fortpflanzen. In jeder Generation können neue nützliche Eigenschaften aufkommen. Ein Käfer, der sich rasch vermehrt, hat wesentlich bessere Aussichten, sich anzupassen, als ein Baum, der sehr lange lebt und sich nur langsam fortpflanzt. In seiner kurzen Lebensspanne spürt das einzelne Insekt keine nennenswerte Veränderung. Ein Baum dagegen sitzt im Drama der globalen Erwärmung gleichsam auf einem Logenplatz.

Frisch gepflanzte Bäume sind vor allem in den ersten 20 Jahren gefährdet, dann werden sie widerstandsfähiger und »können ungünstige Umstände eine Weile verkraften«, wie Brad St. Claire, Genetiker am U.S. Forest Service in Corvallis in Oregon, es ausdrückt. In Zeiten der globalen Erwärmung steht allerdings zu befürchten, dass sich die lokalen Bedingungen bereits in den kritischen ersten Dekaden beträchtlich verändern.

»Wenn man Pflanzen in höhere Breiten bringt, damit sie an das künftige Klima angepasst sind, dann müssen sie mit der jetzt noch herrschenden Kälte dort zurechtkommen«, erklärt St. Clair. »Wir haben ein bewegliches Ziel«, räumt auch Aitken ein. »In welchem Entwicklungsstadium sollen die Bäume optimal an das Klima angepasst sein? Schon als Setzlinge, im Alter von 10 oder gar erst von 30 Jahren?« Eine naheliegende Möglichkeit, das Risiko zu minimieren, besteht darin, die Biodiversität zu erhöhen, indem man lokale Varietäten zusammen mit fremden anpflanzt. »Dabei wollen wir nicht auf jedem Hektar das Gleiche machen; denn man sollte nicht nur für ein einziges Klimawandelszenario planen«, so Aitken.

»Assisted gene flow« erscheint jedenfalls als probates Mittel, um für mehr genetische Vielfalt zu sorgen. Das Ziel muss dabei sein, den Genpool der Wälder mit Elementen anzureichern, die ihre Widerstandskraft stärken. Während sich die Umwelt verändert, leiden einige Bäume vielleicht zunächst, andere aber verfügen über Erbmaterial, das ihnen durch raue Zeiten hilft. »Da sich bevorzugt diejenigen Bäume fortpflanzen, die robuster sind«, sagt Aitken, »erwarten wir Populationen, die zunehmend besser mit den herrschenden Bedingungen fertigwerden.« Am wichtigsten sei es, in der Anpassungsphase genug gesunde Bäume zu erhalten, die überleben und sich vermehren.

Bewährungsprobe für Pinien: Das AdapTree-Experiment

Im Rahmen des AdapTree-Experiments nehmen Wissenschaftler Piniensamen aus unterschiedlichen Lebensräumen (1) und lassen sie im Gewächshaus keimen (2). Anschließend vergleichen sie die Größe und Form der Triebe (3) und prüfen die Nadeln auf ihre Frostbeständigkeit (4).



Aitken ist sehr heimat- und naturverbunden: Sie geht oft wandern und unternimmt gerne Schitouren; außerdem besitzt sie eine kleine Blockhütte in den Wäldern von British Columbia. Allein aus diesem Grund hofft sie, dass ihre Arbeit zu einer neuen, klügeren Strategie in der Forstwirtschaft beiträgt. Ohne »assisted gene flow« käme es, so fürchtet sie, zu einem allmählichen Niedergang der Bäume an den Rändern ihres jeweiligen Verbreitungsgebiets. »Bäume können zwar auch unter widrigen Umständen lange überleben, aber sie verlieren die Fähigkeit, sich fortzupflanzen«, erläutert Aitken. »Das wäre für die Wälder langfristig das Todesurteil. Sie beständen dann gewissermaßen nur noch aus lebenden Leichen.« Und zu allem Übel würden die Baum-Zombies Raum und Sonnenlicht beanspruchen – Ressourcen, welche die Keimlinge dringend benötigen.

Zur Mitte eines Ausbreitungsgebiets hin wäre die Situation nicht ganz so dramatisch. Doch auch dort würden die Bäume wohl langsamer wachsen und sich nur mit Mühe behaupten. Heißt das, dass sie letztlich ebenfalls zu Grunde gingen? »Wahrscheinlich nicht«, vermutet Aitken. »Innerhalb einer Population gibt es viel Variation. Deshalb werden die Arten wohl nicht aussterben, aber unsere Wälder dürften auf Dauer sehr ungesund aussehen.« Das zöge andere Pflanzen und Tiere in Mitleidenschaft, weil sich ganze Ökosysteme um Bäume ranken – bieten diese

völlig fremder Arten, weil diese nicht Teil des angestammten Ökosystems sind – auch wenn sie einige erwünschte Eigenschaften mitbringen.

Der »assisted gene flow« birgt allerdings gleichfalls Risiken. Im schlimmsten Fall könnten etwa zusammen mit den nützlichen Genvarianten auch solche eingeführt werden, welche die Überlebenschance einer größeren Population verschlechtern. »Das Problem sollte sich aber von selbst lösen«, meint Andrew Weeks, Genetiker an der University of Melbourne. »Die natürliche Selektion würde die nachteiligen Varianten mit der Zeit ausmerzen. Indem man den Genpool erweitert, eröffnet man der Population zweifellos die besten Zukunftschancen.«

Die Wälder British Columbias erwirtschaften jährlich zehn Milliarden Dollar und sind auch sonst von vielerlei Nutzen, indem sie beispielsweise Überflutungen und die Bodenerosion verhindern. Sie angesichts des Klimawandels einfach ihrem Schicksal zu überlassen, wäre fahrlässig, zumal sich die Auswirkungen der globalen Erwärmung bereits zu zeigen beginnen. Seit Mitte der 1990er Jahre haben Invasionen von Schädlingen und Waldbrände – die beide mit den erhöhten Temperaturen zusammenhängen – Millionen von Hektar Wald vernichtet und viele Häuser zerstört. »Die Natur hat schon mehrere Warnschüsse in Sachen Erderwärmung abgegeben«, betont Greg O’Neill, Wissenschaftler beim Ministry of Forests, Lands and Natural Resource Operations von British Columbia. Durch die Insekten und Brände ist der Klimawandel ins Bewusstsein der Menschen hier gedrungen: »Es handelt sich nicht um eine abstrakte Gefahr irgendwann in der Zukunft, wir stecken schon mittendrin.«



Mehr Wissen auf Spektrum.de

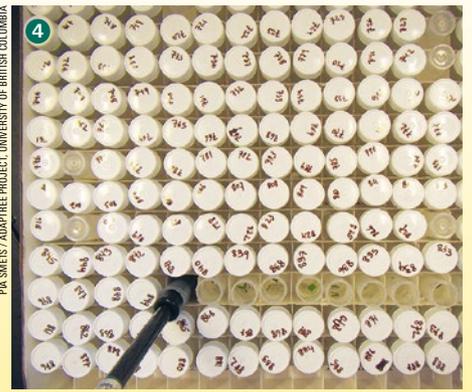
Unser Online-Dossier zum Thema
finden Sie unter
spektrum.de/t/wald

doch vielen anderen Organismen Nahrung und Schutz, regulieren den Wasserhaushalt und verhindern die Bodenerosion.

Mit ihrem Ansatz stößt Aitken in eine Lücke: Bisher ist das Versetzen einzelner Bäume innerhalb ihres normalen Verbreitungsgebiets wenig untersucht worden. Dabei sind die ökologischen Risiken geringer als beim Anpflanzen

Wie hängt das Überleben und Gedeihen der Setzlinge von den lokalen Bedingungen ab?

Die Schäden haben die Regierung zum Handeln bewegt. 2009 begann British Columbia, die Vorschriften für das Ausbringen von Setzlingen zu überarbeiten. Im gleichen Jahr startete O’Neill einen Versuch zur assistierten Migration, um herauszufinden, ob, wo und wie Förster nach dem Holzeinschlag ganz andere Arten als vorher ansiedeln könnten. An 48 verschiedenen Stellen in Kanada und den westlichen Vereinigten Staaten – von Whitehorse bis Sacramento – pflanzten Wissenschaftler 15 Arten wirtschaftlich wichtiger Bäume, die teils von tausende Meilen entfernten Standorten stammten.



Diese extreme Migration dient zunächst einmal rein wissenschaftlichen Zwecken: herauszufinden, wie die Bäume den Ortswechsel vertragen. Es geht nicht um einen generellen Leitfadens für das Verpflanzen über weite Distanzen hinweg. Die Erkenntnisse sind sehr allgemeiner Natur – »etwas in der Art wie »Pflanze diesen Baum nicht in geringerer Höhe oder weiter südlich«, sagt O'Neill. Auf jeder Testfläche gibt es eine Wetterstation, und die Versuchsergebnisse sollen zeigen, wie das Überleben und Gedeihen der Setzlinge von den lokalen Bedingungen abhängt. Dann lässt sich, so der Forscher, die Reaktion der Bäume auf den Klimawandel ebenfalls vorhersagen.

Die genetischen Analysen von AdapTree liefern ähnliche Prognosen auf einem anderen Weg. In dem sich stetig ausweitenden Projekt haben Wissenschaftler das Erbgut von Millionen von Engelmann-Fichten und Küstentannen nach interessanten DNA-Sequenzen durchkämmt und dazu eine schnelle Screening-Methode entwickelt, die derjenigen ähnelt, welche die Firma 23andMe für die Analyse menschlicher Genome einsetzt. Man betrachtet ungefähr 50 000 kurze Abschnitte des genetischen Codes, in denen jeweils ein Basenpaar variiert, weshalb sie Einzelnukleotid-Polymorphismen (single nucleotide polymorphisms, SNPs) heißen, und versucht festzustellen, welche davon mit der Anpassung an den jeweiligen Standort zusammenhängen. Bei den bisherigen Untersuchungen an 600 jungen Bäumen gelang es, genetische Marker zu identifizieren, die viele der beobachteten Unterschiede in der Toleranz gegenüber Kälte, Hitze und Trockenheit erklären.

Die Masse an Rohdaten ist Schwindel erregend. Beidseitig auf Din-A4-Blättern ausgedruckt, ergäben sie einen 150 Kilometer hohen Papierstapel, wie Aitkin veranschaulicht. Und das ist nur ein Teil der Information. Die Wissenschaftler untersuchen, wie die Gene tatsächlich funktionieren, also wie die darin verschlüsselten Instruktionen ausgeführt werden, wenn die Bäume unter Stress durch Hitze oder Trockenheit geraten.

Einige Breitengrade weiter südlich beginnen auch Spezialisten des U.S. Forest Service das Für und Wider des »assisted gene flow« abzuwägen. In den Vereinigten Staaten haben Förster traditionell wenig auf Klimaunterschiede innerhalb der Verbreitungsgebiete von Bäumen geachtet, wenn sie Pflanzungen vornahmen. Die regionale Temperaturvariation erschien einfach zu gering, um sich negativ

auszuwirken. Doch inzwischen ist auch hier das Bewusstsein für die Bedeutung des Mikroklimas gewachsen.

Schon immer haben Menschen Bäume in andere Regionen oder gar Kontinente verpflanzt. »Oft gab es Fehlschläge, weil die Bedingungen für das Gedeihen auf dem fremden Boden nicht ausreichend bekannt waren«, erzählt Glenn Howe, Waldgenetiker an der Oregon State University. Das brachte die Forstverwaltungen mit der Zeit dazu, auf Nummer sicher zu gehen. In den westlichen Vereinigten Staaten sind die ausgewiesenen Pflanzgebiete für Bäume eng umgrenzt. »Das ist in einem stabilen Klima wahrscheinlich sinnvoll«, sagt Howe. »Wenn sich das Klima ändert, könnte allzu restriktives Vorgehen jedoch zum Problem werden.«

Überkommene Vorstellungen und Verhaltensweisen

British Columbia stellt sich der Herausforderung. Die Schwierigkeiten sind dabei nicht nur wissenschaftlicher Art, sondern betreffen ebenso die Verwaltung. So verfügt die zentrale staatliche Samenbank von British Columbia über Saatgut für mehr als sechs Milliarden Bäume. Diesen Bestand kann man nicht über Nacht komplett erneuern. Als zäh erweisen sich auch überkommene Vorstellungen und Verhaltensweisen: Wissenschaftler müssen die Forstverwaltungen dazu bringen, den Ergebnissen der Genanalysen zu vertrauen und nicht nur dem, was sie mit eigenen Augen in der freien Natur sehen. Es kommt entscheidend darauf an, all die Einzelnukleotid-Polymorphismen und Sequenzdaten in »ein Lexikon für Förster zu übersetzen«, betont Aitken.

Denn letztendlich stecken dahinter lebende Bäume, die als unersetzliche Naturschätze unser aller Leben in vielfältiger Weise bereichern. Um unter veränderten Umweltbedingungen überleben zu können, müssen sich manche von ihnen neue Territorien erschließen. Und dafür benötigen sie

QUELLEN

Aitken, S. N., Whitlock, M. C.: Assisted Gene Flow to Facilitate Local Adaptation to Climate Change. In: Annual Reviews of Ecology, Evolution, and Systematics 44, S. 367–388, 2013

Lotterhos, K. E., Whitlock, M. C.: Evaluation of Demographic History and Neutral Parameterization on the Performance of FST Outlier Tests. In: Molecular Ecology 23, S. 2178–2192, 2014

Pedlar, J. H. et al.: Placing Forestry in the Assisted Migration Debate. In: BioScience 62, S. 835–842, 2012

HYDROLOGIE ÜBERSCHWEMMTE FELDER GEGEN DIE NÄCHSTE DÜRRE

Kalifornien erprobt neue Strategien, überschüssiges Wasser für Trockenzeiten unterirdisch zu sammeln. Volle Grundwasserspeicher können der Bevölkerung der USA und anderer Länder das Überleben in Zeiten zunehmender Wetterextreme erleichtern.



Erica Gies ist Journalistin und schreibt für Zeitungen wie die »New York Times«, den »Guardian« oder den »Economist« über Wissenschaft und Umwelt.

» spektrum.de/artikel/1561174



Der Klimawandel beschert Kalifornien vermehrt ausgedehnte Trockenperioden und starke Regenfälle. Wie hier auf einer Mandelplantage im California Central Valley leitet man Hochwasser neuerdings gezielt auf Ackerflächen, damit es versickert und die erschöpften Grundwasservorräte für schlechte Zeiten auffüllt.

Die verheerenden Stürme in Kalifornien hatten im vorletzten Winter viele Hänge dermaßen aufgeweicht, dass sie auf Straßen hinabrutschten und Gemeinden von der Außenwelt abschnitten. Zwischen Oktober 2016 und Februar 2017 fiel in dem Bundesstaat an der amerikanischen Westküste rund doppelt so viel Regen wie sonst üblich. Nördlich von Sacramento mussten fast 200 000 Menschen ihre Häuser verlassen, weil der Oroville-Stausee überlief und das Wasser einen riesigen Krater in die Überlastungsrinne fraß. Eines der größten Wasserreservoirs Kaliforniens drohte sich schlagartig zu entleeren.

Die Situation hatte sich von einem Extrem ins andere gekehrt: In den fünf Jahren zuvor herrschte zeitweise im gesamten Bundesstaat Dürre (siehe **Spektrum** November 2015, S. 68). Die Stauseen waren leer und die Rasenflächen der Vorgärten braun. Der Wassermangel verunsicherte die Bevölkerung spürbar. Viele Menschen fragten sich, ob sie weiter in Kalifornien leben konnten, ob man den stetigen Zuwachs an Neubürgern stemmen könnte und weiterhin im großen Stil Nahrungsmittel für den weltweiten Export produzieren sollte. Die heftigen Regenfälle Ende 2016 sorgten zunächst für allgemeines Aufatmen, angesichts der Schäden schlug die Stimmung jedoch schnell wieder um. Nicht so bei Kaliforniens Wassermanagern, die jahrelang hatten zuschauen müssen, wie die Reserven zur Neige gingen. Sie sahen das plötzliche Überangebot als Chance und überlegten, wie man die Fluten speichern könnte, um für die nächste Trockenperiode vorzusorgen.

Diese Frage ist Sinnbild einer neuen Realität: Obwohl sich Dürren und Überschwemmungen hier schon immer abgewechselt haben, nimmt ihre Intensität laut Wissenschaftlern durch den Klimawandel zu. Zudem schmilzt die

Schneedecke der Sierra Nevada auf Grund der Erwärmung – um geschätzte 90 Prozent wird dieser Wasserspeicher im östlichen Hochgebirge Kaliforniens zurückgehen. Das verheißt nichts Gutes. Denn die Niederschläge fallen vor allem im Winter, während die Sommer für gewöhnlich trocken sind. Der Schnee schmilzt im Lauf des Frühlings und Sommers, wenn der Bedarf am höchsten ist, langsam und deckt den Wasserverbrauch des Bundesstaats zu etwa 30 Prozent. Zukünftig erwartet man, dass der Schnee vermehrt als Regen fällt. Dadurch käme es häufiger zu Überschwemmungen, und in den warmen Monaten wäre weniger Schmelzwasser aus den Bergen verfügbar. Die hohe Zuwanderung in Kalifornien verschärft das Problem: Immer mehr Menschen leben in Gegenden, die von Hochwasser bedroht sind, und strapazieren die ober- und unterirdischen Speicher in Trockenzeiten.

Veränderte Niederschlagsmuster und wachsende Bevölkerungen zwingen Länder weltweit, sich anzupassen. Millionen von Menschen konnten bislang auf das Schmelzwasser von schneebedeckten Bergen und von Gletschern vertrauen – am Fuß des Himalaja, im Alpenraum oder in der Andenregion. Die Wasserwirtschaft muss neue Wege finden, Hochwasser zurückzuhalten, um die Infrastruktur zu schützen und um besser auf Dürreperioden vorbereitet zu sein.

Neue Reservoirs können das Problem in Kalifornien und anderswo nicht lösen. »Wir haben die meisten Flüsse bereits gestaut«, erklärt Felicia Marcus, die Vorsitzende der Kontrollbehörde für Wasserressourcen des Bundesstaats. Unter der Erde jedoch gibt es große Speicherkapazitäten: Poröse Gesteinskörper, die Grundwasser leiten, können zehnmal mehr Wasser aufnehmen als alle

1400 Reservoirs Kaliforniens zusammen. Diese so genannten Aquifere sind jedoch durch immer tiefere Brunnenbohrungen für die Bewässerung landwirtschaftlicher Flächen vielerorts bereits erschöpft. Die unterirdischen Wasserspeicher wieder aufzufüllen, wäre deutlich günstiger als der Bau neuer Staudämme. Man schätzt die Kosten auf etwa ein Fünftel der Summe, die man oberirdisch investieren müsste. Eine Gruppe progressiver Wissenschaftler, Landwirte, Naturschützer und Politiker entwickelt daher Strategien, Wasser in einem noch nie da gewesenen Umfang unterirdisch zu sammeln – um Flutschäden zu mindern und gleichzeitig neue Wasservorräte anzulegen.

Dämme, Stauseen und Kanäle kappen den Nachschub

Einst konnten sich die Überschwemmungen im Winter sowie die Schneeschmelze im Frühjahr über das gesamte Central Valley ausbreiten. Das Wasser versickerte langsam im Boden und gelangte in die Aquifere; es ließ Auenwälder gedeihen und schuf Feuchtgebiete, die wandernden Lachsen, Wapitihirschen, Grizzlys und Vögeln einen Lebensraum boten. All das änderte sich im 20. Jahrhundert, als Kalifornien anfang, sich in Sachen Wasserbau zu überschätzen. Riesige Staudämme und Rückhaltebecken, Aquädukte, Kanäle, Deiche und Pumpen veränderten die Wege des Wassers im gesamten Bundesstaat grundlegend – mit zahllosen unbeabsichtigten Folgen: Zwar machte der intensive Ausbau der Wasserinfrastruktur das moderne Kalifornien erst möglich, aber die jüngste Dürre und die anschließenden Überflutungen offenbarten, wie wenig sich dieses System dazu eignet, die heutige Situation zu beherrschen. Der Hauptfehler war es, Flüsse von ihren Überschwemmungsflächen abzuschneiden, um Städte und Ackerland zu schützen. Damit haben die Ingenieure sehr effektiv verhindert, dass sich die angezapften Aquifere regenerieren können.

Nun will man sich den ursprünglichen Verhältnissen wieder ein wenig annähern, indem man Flächen kontrolliert flutet. Damit dieses Vorhaben Realität wird, bedarf es zunächst eines Kulturwandels, weg vom Egoismus, der die Wassernutzung in Kalifornien seit Langem prägt. Und offenbar bewegen sich die Dinge in die richtige Richtung: 2014 wurde für den Bundesstaat ein wegweisendes Gesetz verabschiedet, das den Endverbrauchern mehr Verantwortung für einen sorgsam Umgang mit Wasser überträgt und gleichzeitig größere Flexibilität auf lokaler Ebene erlaubt. Anstatt wie bisher auf wasserbauliche Großunternehmungen zu setzen, verfolgt man die Vision von tausenden kleinen Projekten, in denen sich Bürger für eine Regeneration der Wasservorräte einsetzen.

Es laufen Pilotversuche, in denen Wissenschaftler und Vertreter der lokalen Wasserbehörden untersuchen, welche Maßnahmen mit der Hydrologie, der Art der Landnutzung und der finanziellen Situation eines Orts vereinbar sind. Man sucht gemeinsam nach Lösungen, die möglichst vielen Ansprüchen gerecht werden. Beispielsweise, indem man Felder dann flutet, um Aquifere wieder aufzufüllen, wenn das Hochwasser die landwirtschaftlichen Erträge nicht gefährdet und Wildtiere davon profitieren. So wie Israel die Tröpfchenbewässerung entwickelte und

Australien die Wasserrechte und den Handel damit reformierte, sucht Kalifornien nach innovativen Antworten auf Dürren und die Bedürfnisse von Farmern und Bewohnern der Großstädte an der US-Westküste.

Damit die Projekte Erfolg haben, gilt es zuerst, lange Zeit vorherrschende Missverständnisse in Sachen Hydrologie aus der Welt zu schaffen. Im April 2017 waren nach vier Monaten, in denen heftige Stürme über den Bundesstaat gezogen waren, nur noch neun Prozent der Fläche Kaliforniens von der Dürre gezeichnet. Gouverneur Jerry Brown erklärte diese daraufhin für überstanden. Sandi Matsumoto, Vizedirektorin des Wasserprogramms der Naturschutzorganisation The Nature Conservancy, hält das im wahrsten Sinne des Wortes für eine oberflächliche Sichtweise: »Seen, Flüsse, Bäche und die darunterliegenden Aquifere teilen sich dasselbe Wasser. Sie sind durch die Schwerkraft und den hydraulischen Druck untrennbar miteinander verbunden.« Auch wenn die kalifornischen Oberflächengewässer in diesem Jahr gut gefüllt scheinen,



Wassermangel: Der zweitgrößte Stausee Kaliforniens, Lake Oroville, schrumpfte von März 2015 (links) bis September desselben Jahres (rechts) dramatisch.

seien die Grundwasserpegel nach jahrzehntelanger Plünderung für die Landwirtschaft und die Versorgung der Bevölkerung noch immer extrem niedrig. »Die Aquifere werden Jahrzehnte, wenn nicht gar ein halbes Jahrhundert brauchen, um sich zu erholen«, so Matsumoto.

Grundwasser deckt den Wasserbedarf Kaliforniens in trockenen Jahren zu etwa 60 Prozent und in solchen mit durchschnittlichen Niederschlägen zu ungefähr 30 Prozent. Doch selbst die in feuchten Jahren entnommene Wassermenge ist nicht nachhaltig. Regenwasser, das im Boden versickert, kann das Grundwasser nicht so schnell wieder auffüllen, wie es nach oben gepumpt wird. Damit folgt man einem globalen Trend: Laut einer Studie aus dem Jahr 2015, die auf Satellitendaten der NASA beruht, hat mehr als die Hälfte der größten Grundwasserspeicher

der Erde bereits einen kritischen Schwellenwert unterschritten.

Das ist Besorgnis erregend, denn dieses Wasser dient größtenteils dem Erzeugen von Nahrungsmitteln. Wenn Bauern in jenen Regionen, die auf Grundwasser angewiesen sind, ihre Felder nicht mehr bestellen können, wäre das katastrophal. Vor allem angesichts der Schätzungen der Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation (FAO) der UN, wonach die weltweite Nahrungsmittelproduktion bis 2050 um 70 Prozent wachsen müsste, um die dann gut neun Milliarden Menschen ernähren zu können.

Über ein Jahrhundert lang hat sich Kalifornien nur um das Wasser an der Oberfläche gekümmert. Grundwasser konnten Landbesitzer nach Belieben nutzen: Jeder durfte auf seinem Grund und Boden einen Brunnen graben und so viel Wasser hochpumpen, wie er wollte; ohne Rücksicht auf die Folgen für seine Nachbarn. Flüsse und Seen auf der einen und Grundwasser auf der anderen Seite galten als zwei separate Ressourcen – obwohl ein gut



gefüllter Aquifer einen Fluss bei Trockenheit am Leben erhält und Letzterer umgekehrt als Puffer für erschöpfte Tiefenspeicher dienen kann. »Im San Joaquin Valley ist der Grundwasserspiegel stellenweise so stark gefallen, dass keine Verbindung mehr zu den Flüssen existiert, die ursprünglich mit den unterirdischen Reservoirs im Austausch standen«, beklagt Helen Dahlke, Professorin für integrierte Hydrologie an der University of California in Davis. Der Bruch im Wasserkreislauf lässt Feuchtgebiete und Quellen austrocknen und beeinträchtigt so die aquatische Tier- und Pflanzenwelt. Würden die Grundwasserspeicher wieder aufgefüllt, könnten sich einige Aquifere erneut mit ihren Flüssen verbinden. Das hydrologische System wäre so weniger anfällig für Extremwetter.

Frühere Ansätze zum Speichern von Wasser in Kalifornien hatten die Aquifere als eine Art Wasserbank betrachtet: Dieselbe Menge, die man ihnen zuführt, kann man in Trockenperioden einfach wieder abrufen. Das Wasser wartet jedoch nicht unbedingt geduldig in einem unterirdischen Becken darauf, bei Bedarf hochgepumpt zu werden.

Damit die Vision des Bundesstaats Realität wird, müssen die Menschen anfangen, Wasser als Gemeingut zu betrachten – anstatt es sich gegenseitig streitig zu machen.

Das Ende der rücksichtslosen Wasserentnahme?

Kaliforniens Wasserrechte galten lange als politisch unantastbar. Das panische Anzapfen der Grundwasservorräte während der jüngsten Dürre führte jedoch zu einem Umdenken. 2014 verabschiedete der Bundesstaat ein Gesetz für nachhaltiges Grundwassermanagement: Der Sustainable Groundwater Management Act schreibt vor, Grundwasser auf der Ebene der Einzugsgebiete zu bewirtschaften und dabei sowohl die Oberflächengewässer als auch die darunterliegenden Aquifere zu berücksichtigen. Von den 515 Einzugsgebieten Kaliforniens liefern 127 96 Prozent des Grundwassers und haben daher Priorität. Jede Region muss eine Agentur einrichten, die bis 2022 einen Plan zum nachhaltigen Management des Grundwassers vorlegt und diesen bis spätestens 2040 umsetzt. »Ein ehrgeiziges Ziel, da es für die meisten Gebiete keine belastbaren Daten gibt«, sagt Tara Moran von der Stanford University, die ein Forschungsprojekt zur Wassernutzung im Westen der USA leitet.

Das neue Gesetz soll dafür sorgen, dass Städte und Regionen mit Bewässerungswirtschaft das Grundwasser nicht weiter plündern, damit die unterirdischen Wasserpegel steigen können. »Der Großteil der gegründeten Agenturen würde es bevorzugen, die Aquifere wieder aufzufüllen, anstatt die Entnahme von Grundwasser zu begrenzen«, meint Esther Conrad, die ebenfalls an der Stanford University forscht und lokale Wasserkonferenzen in ganz Kalifornien besucht hat.

Anregungen liefern Gemeinden, die vor Jahrzehnten mit Wassermangel zu kämpfen hatten. Eine davon ist das Santa-Clara-Tal, heute bekannt als Silicon Valley. Im 19. und 20. Jahrhundert nannten es die Leute »Tal der Herzenslust«, weil man dort Aprikosen, Kirschen und Pflaumen in großen Mengen erntete. Damit ihre Bäume

AUF EINEN BLICK DIE RESSOURCE WASSER NACHHALTIG NUTZEN

- 1** Kalifornien könnte Überschwemmungen und Dürren besser überstehen, wenn es seine leer gepumpten Grundwasserspeicher bei Hochwasser auffüllt.
- 2** Es bedarf einer neuen Mentalität, die Flüsse, Seen und Grundwasser als zusammenhängendes System betrachtet und die Ressource Wasser nicht länger als Privateigentum, sondern als Gemeingut.
- 3** Forscher fluten in Pilotprojekten Felder, damit mehr Wasser versickert. Vielerorts steigt dadurch der Grundwasserpegel wieder. Ausgleichszahlungen an die Landwirte erhöhen die Akzeptanz.

die trockenen Sommer gut überstanden, bedienten sich die Obstbauern des Wassers der Aquifere. Die Folge: Zwischen 1890 und 1920 sanken die Grundwasserspiegel dramatisch, und die Böden sackten ab – in der Innenstadt von San Jose um knapp vier Meter.

Die Ortsvorsteher entschieden, die Aquifere wieder aufzufüllen, indem man bei Hochwasserständen Wasser zurückhielt, das sonst einfach gen Ozean rauschte. So wie Biber ein Fließgewässer stauen, um einen Teich entstehen zu lassen, errichteten Ingenieure mit Sandsäcken Dämme an verschiedenen Stellen quer über den Page Creek in Los Gatos. Entlang des kleinen Flusses bildeten sich so Staubecken, die dem Wasser Zeit verschafften, in den Untergrund zu sickern. Später baute man Erdwälle über den Los Gatos Creek wie den gut zehn Meter hohen

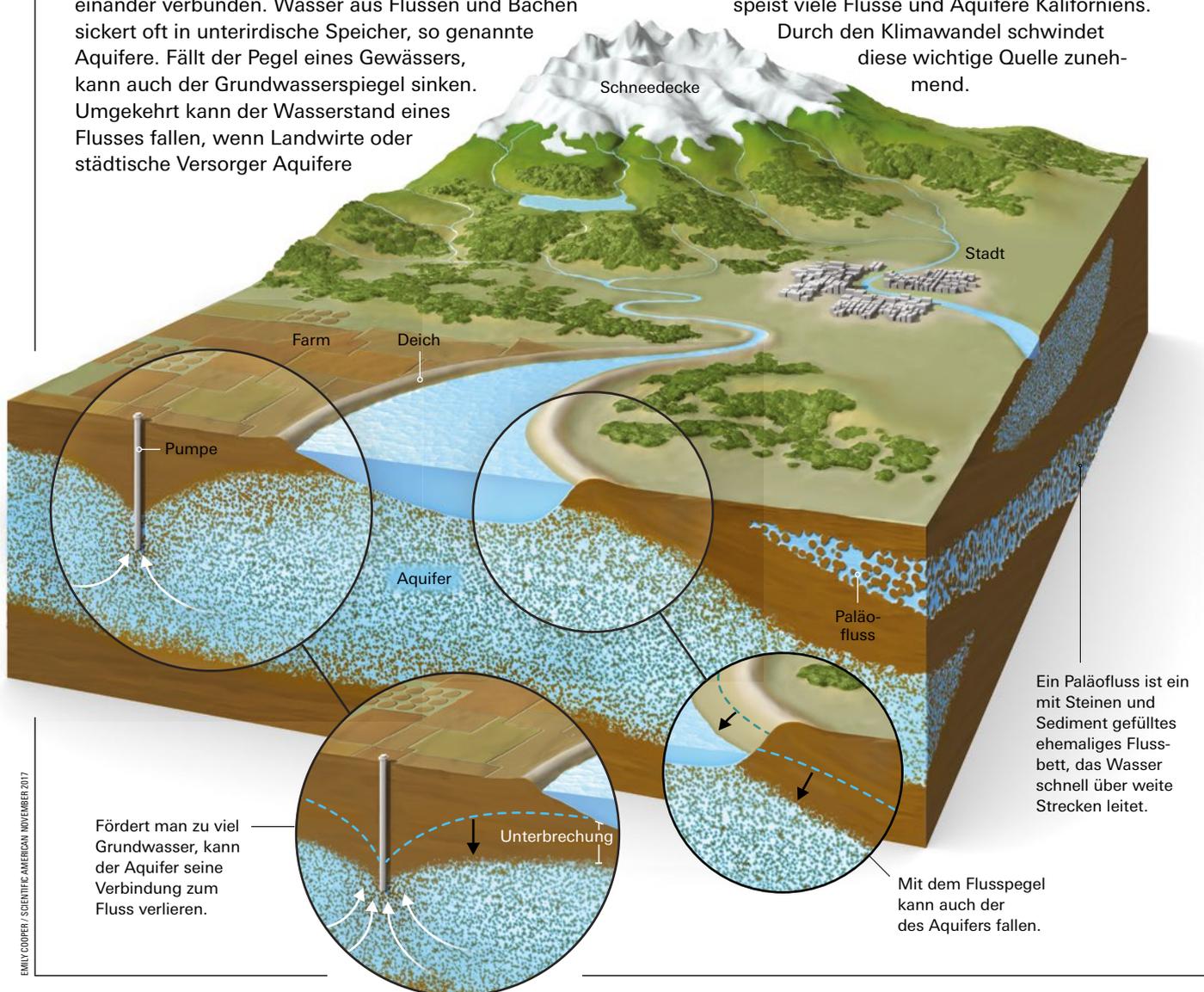
Vasona-Sickerdamm. Heftige Regenfälle überfluteten den Stadtpark rings um den Damm, so dass sich zusätzliches Grundwasser anreichern konnte, ohne Wohn- oder Geschäftshäuser zu gefährden. Die Staumaßnahmen stoppten sowohl das Absacken der Böden als auch das Absinken der Grundwasserpegel. Auf Grund des starken Bevölkerungswachstums im Tal nach dem Zweiten Weltkrieg benötigte man jedoch mehr Wasser, als das Ökosystem natürlicherweise hergab. Die Landes- und Bundesregierung errichtete Rohrleitungen zu den massiven Kanälen, um Wasser aus Nordkalifornien nach Süden umzulenken.

Heute profitiert der Santa Clara Valley District von den Staubecken. Die menschengemachten Barrieren an Bächen und Flüssen erstrecken sich über fast 150 Kilometer. Sie sorgen dafür, dass schnell fließendes Wasser sich

Ein großer Wasservorrat

Oberflächengewässer und Grundwasser sind eng miteinander verbunden. Wasser aus Flüssen und Bächen sickert oft in unterirdische Speicher, so genannte Aquifere. Fällt der Pegel eines Gewässers, kann auch der Grundwasserspiegel sinken. Umgekehrt kann der Wasserstand eines Flusses fallen, wenn Landwirte oder städtische Versorger Aquifere

anzapfen. Die Schneeschmelze im Frühjahr speist viele Flüsse und Aquifere Kaliforniens. Durch den Klimawandel schwindet diese wichtige Quelle zunehmend.



Fördert man zu viel Grundwasser, kann der Aquifer seine Verbindung zum Fluss verlieren.

Unterbrechung

Mit dem Flusspegel kann auch der des Aquifers fallen.

Ein Paläofluss ist ein mit Steinen und Sediment gefülltes ehemaliges Flussbett, das Wasser schnell über weite Strecken leitet.

verlangsamt und in den Untergrund sickert. Zudem verfügt der Distrikt über rund 120 Hektar frei stehender Sickerbecken, in die bei Überflutungen Wasser aus nahe gelegenen Orten geleitet wird. Wie wertvoll die Grundwasseranreicherung ist, zeigte sich während der letzten Dürre: 2014 konnten die Regionen trotz akuten Wassermangels 51 Prozent des Bedarfs durch Grundwasser decken.

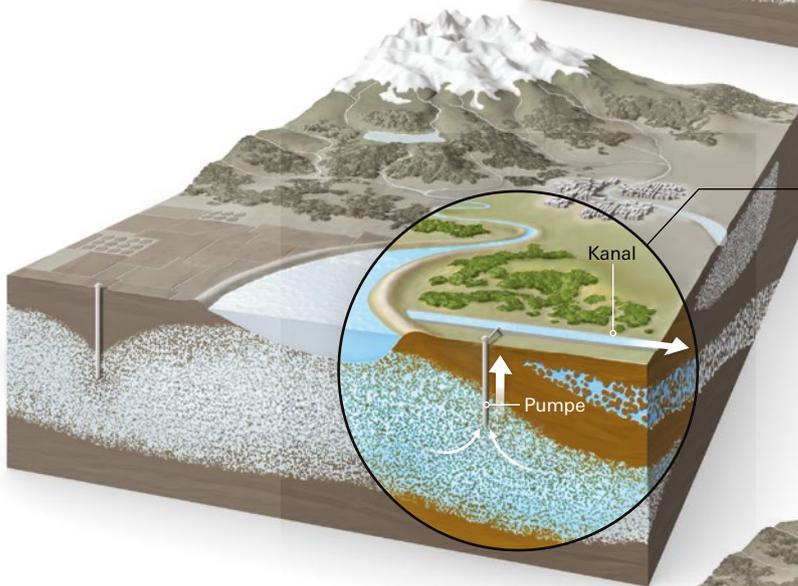
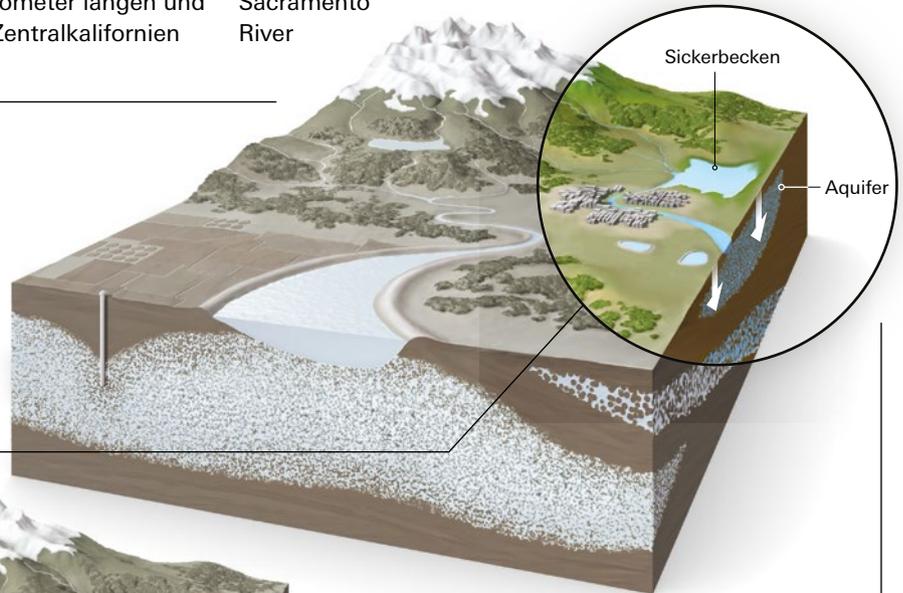
Will man Grundwasser großflächig anreichern, kommt zuallererst die Frage auf, wo das Wasser herkommen soll. »Die Wasserrechte der meisten Leute gelten für die Pflanz- und Wachstumszeit«, erklärt Felicia Marcus. »Im Winter gibt es daher einen großen Überschuss an Wasser.« Eine jüngst veröffentlichte Studie bestätigt, dass dieser ausreichen würde, um die Aquifere im 600 Kilometer langen und bis zu 80 Kilometer breiten Längstal in Zentralkalifornien

(Central Valley) wieder aufzufüllen. Die Herausforderung besteht darin, Regenwasser dorthin zu leiten, wo der Untergrund es aufnehmen kann. Im Norden Kaliforniens fallen mehr Niederschläge während des Winters, der Verbrauch im Süden aber ist während des Sommers am größten. Ein Großteil des Wassers, das Kanäle und Aquädukte von Nord nach Süd bringen, nutzen die Bauern im Winter überhaupt nicht. Anstatt es in den Pazifik fließen zu lassen, könnte man das überschüssige Wasser also auf die südlichen Felder leiten, damit es die Aquifere für den Sommer füllt.

Auch ein Handel in umgekehrter Richtung ist denkbar: Vergleichsweise wasserreiche Regionen wie jene um den Sacramento River

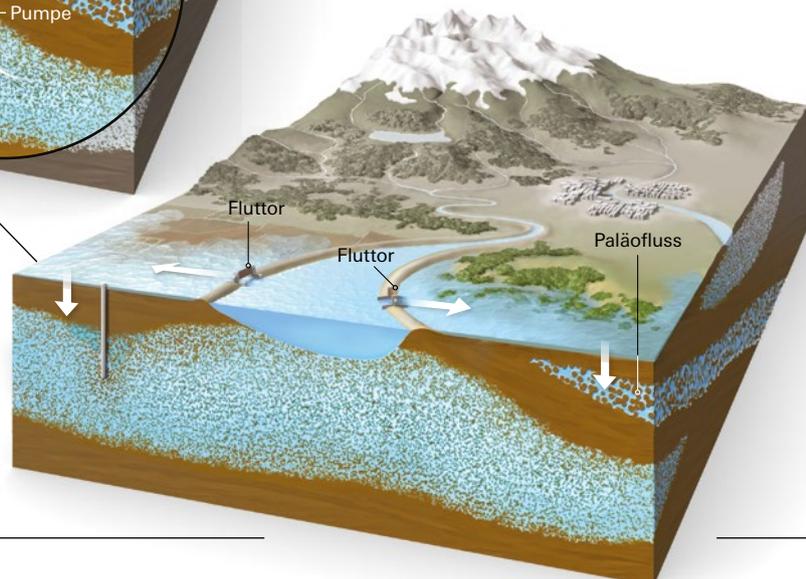
Nachhaltiges Wassermanagement: Sickerbecken, gezieltes Fluten und anderen Maßnahmen helfen, Dürren und Hochwasser zu überstehen.

Bei starken Regenfällen oder wenn Flüsse über die Ufer treten, können tief liegende Becken Entlastung bieten. Und sie erlauben dem Wasser, in den Aquifer zu sickern.



Wenn ein Aquifer gut gefüllt ist, Landwirte aber gerade nicht bewässern müssen, kann man Grundwasser abpumpen und über einen Kanal in andere erschöpfte Aquifere leiten. Auch Flüsse können bei hohen Pegelständen angezapft werden, um Grundwasserspeicher zu füllen.

Bei Hochwasser können offene Fluttore Wasser gezielt auf Felder und andere nicht versiegelte Flächen leiten, so dass dieses versickert und darunterliegende Aquifere auffüllt. Verläuft darunter ein Paläofluss, kann dieser das Grundwasser zu einem weit entfernten Aquifer leiten – wie ein natürlicher, unterirdischer Kanal.



könnten in regenreichen Jahren Grundwasser zur Bewässerung der Felder nutzen und ihr Oberflächenwasser nach Süden leiten, um die dortigen Aquifere zu speisen, so Ellen Hanak, Direktorin des Zentrums für Wasserpolitik am Public Policy Institute of California. Die Bilanzierung sei allerdings nicht ganz einfach, und man müsse noch ein Kompensationsverfahren erarbeiten, bevor sich diese Praxis verbreiten könne. Überschüssiges Wasser im Winter zu speichern, ist zudem schwierig, da die Böden gesättigt und die Reservoirs voll sind, ergänzt Hanak. Aber man habe bereits einige Landgebiete als Entlastungsflächen für Hochwasser ausgewiesen. Zusätzliche Flächen könnten Grundwasser direkt vor Ort anreichern oder als Zwischenspeicher dienen, bis die nötige Infrastruktur vorhanden sei, um das Wasser zu weiter entfernten Speichern zu leiten.

Wie das aussehen könnte, zeigen Maßnahmen im Sacramento-San-Joaquin-Delta, das in die Bucht von San Francisco mündet. Hier verwandelten Landwirte vor über einem Jahrhundert Marschland in Ackerflächen, indem sie Deiche aufschütteten. Im Jahr 2014 bauten Ingenieure diese auf einer Länge von etwa 230 Metern zurück, damit der ebenfalls ins Delta fließende Cosumnes im Winter sein ursprüngliches Überschwemmungsgebiet erreichen kann. Man will die Landschaft in ihren natürlichen Zustand überführen, in der Hoffnung, dass sich die Aquifere so wieder füllen. Im Winter 2016/2017 konnten Hydrogeologen um Graham Fogg vom Zentrum für Wassereinzugsgebiete an der University of California in Davis nachweisen, dass sich während des Hochwassers tatsächlich Grundwasser anreichert: dreimal mehr als normalerweise durch Regen oder Bewässerung. Das Überschwemmungsgebiet ist mit 115 Hektar relativ klein, sammelte aber rund 2,5 Millionen Kubikmeter Wasser (das Volumen von etwa 1000 olympischen Schwimmbecken).

Effektiv und billig: Überschwemmte Ackerflächen sorgen für volle Grundwasserspeicher

Ein Großteil des Central Valley wird heute landwirtschaftlich genutzt. Wissenschaftler beschäftigen sich deshalb damit, wie man Felder ohne Schäden für die Bauern fluten kann. Flächen, die sich zur Anreicherung von Grundwasser eignen, müssen mehrere Kriterien erfüllen, etwa ein geringes Gefälle und eine hohe Durchlässigkeit des Bodens, damit das Wasser schnell versickern kann. Zudem sollte der Boden wenig Salze, Pestizide und Nährstoffe enthalten, die das Grundwasser belasten könnten. Und die Landwirte brauchen die Gewissheit, dass das Fluten brachliegender oder bewirtschafteter Felder zu sorgfältig abgestimmten Zeiten keine Ernteeinbußen nach sich zieht.

Helen Dahlke flutet im Rahmen ihrer Forschung teilweise Felder, um die Gesundheit von Pflanzen und Wurzeln, die Geschwindigkeit, mit der Wasser versickert, sowie Salz- und Nitratkonzentrationen zu erfassen. Im kalifornischen Scott Valley setzte sie Luzerneacker unterschiedlich lange unter Wasser: ein bis zwei Tage pro Woche, drei bis vier Tage pro Woche oder durchgehend von Februar bis April. Während der Testphase im Winter reicherten sich unter den insgesamt sechs Hektar Land knapp 170 000 Kubikmeter Grundwasser an. Mehr als

90 Prozent des Wassers versickerte, ohne dass die Erträge darunter litten. Auch andere Pflanzenarten hat Dahlke getestet, etwa Mandelbäume. Deren Wurzeln stehen angeblich nicht gern in Wasser. Doch hinsichtlich Blütenbildung und des Austreibens der Blätter konnte sie zwischen überfluteten und nicht überfluteten Feldern keine Unterschiede feststellen.

Eine weitere Herausforderung ist es, Nährstoffe und Pestizide nicht ins Grundwasser gelangen zu lassen. Das Überschwemmen der Felder und das Ausbringen von Dünger sowie Pflanzenschutzmitteln muss daher zeitlich weit genug auseinanderliegen, erläutert Thomas Harter, der sich an der University of California in Davis mit Grundwasserverschmutzung beschäftigt.

Ein Landwirt war den Wissenschaftlern bereits voraus: Don Cameron hatte 1983 beobachtet, dass ein benachbar-

Lange wurde der Cosumnes von seinen Schwemmflächen (links) durch Deiche (nicht im Bild) getrennt. Heute kann der Fluss bei Hochwasser wieder über die Ufer treten (rechts) und füllt so die Grundwasserspeicher.



ter Weinberg eine gute Ernte einbrachte, obwohl dieser nach heftigen Regenfällen monatelang unter Wasser gestanden hatte. Er selbst betreibt eine fast 3000 Hektar große Ranch im San Joaquin Valley, auf der er 25 verschiedene Feldfrüchte sowohl konventionell als auch biologisch anbaut und fast ausschließlich mit Grundwasser versorgt. 2011 sowie im Winter 2016/2017 erlaubte ihm die örtliche Kings-River-Wasservereinigung, ungenutztes Hochwasser auf seine Felder umzuleiten. Einige davon lagen brach, auf anderen wuchsen Luzerne, Weintrauben, Walnüsse, Mandeln oder Pistazien. Sein Plan ging auf: Die Pflanzen blieben unbeschädigt, und im Boden installierte Sensoren zeigten, dass mindestens 70 Prozent des Wassers in Tiefen unterhalb der Wurzelzone gelangt war. Mit Hilfe von Landes- und Bundesmitteln kann Cameron nun weitere Kanäle anlegen und Pumpen bauen, um zukünftig all seine Äcker zu fluten – und so die darunterliegenden Aquifere aufzufüllen.

Farmer, die dem Beispiel folgen wollen, könnten es schwerer haben, ungenutztes Wasser im Winter zu verwenden. Vielerorts benötigen sie hierfür eine Erlaubnis, und diese zu erhalten, ist ein langwieriger Prozess. Einer der Gründe: »Daten zu Wasserrechten stecken in zehn Millionen Akten, verteilt auf das kalifornische Wasserwirtschaftsamt und 58 Bezirksgerichte im gesamten Bundesstaat«, sagt Michael Kiparsky, Direktor des Wheeler Institute for Water Law an der University of California in Berkeley. Dass die Wasserrechte im Epizentrum des digitalen Wandels nur auf Papier verfügbar sind, ist kein Zufall. Viele Rechteinhaber glauben, je weniger andere über ihre Wassernutzung wüssten, desto besser. Kiparsky und Richard Roos-Collins von der Arbeitsgruppe für Wasser- und Energierecht in Berkeley arbeiten aktuell mit staatlichen Stellen daran, eine Datenbank zu entwickeln. Die soll es den regionalen Wasserverbänden erleichtern, Informationen zu bereits vergebenen Nutzungsrechten für einen bestimmten Fluss einzuholen.

Manche Farmer brauchen einen stärkeren Anreiz zur Mitwirkung. So bezahlt The Nature Conservancy Landwirte dafür, ihre Felder unter Wasser zu setzen. Ihr geht es



JUDAH GRISMAN, THE NATURE CONSERVANCY

dabei vor allem um Rastplätze für Zugvögel, die ihren Bedarf an Wasser und Nahrung zu 60 Prozent auf überschwemmtem Ackerland decken. Da Zugvögel aber stets auf der Durchreise sind, benötigen sie solche Flächen nur für wenige Wochen im Jahr. Die Umweltschutzorganisation pachtet daher Felder, die auf den Flugrouten der Vögel liegen, und flutet diese für zwei Wochen während der Wanderperioden im Frühjahr und Herbst. Im Rahmen des »BirdReturns« (»Vogel-Rückkehr« oder auch »Vogel-Rendite«)-Programms arbeitet man inzwischen auch vermehrt mit Farmern zusammen, unter deren Ländereien erschöpfte Aquifere liegen. Nach vorsichtigen Schätzungen ließen sich in den vergangenen vier Jahren durch gezieltes Fluten von Äckern etwa 25 Millionen Kubikmeter Grundwasser gewinnen.

Andrew Fisher, Hydrologe an der University of California in Santa Cruz, hat eine andere Lösung gefunden, Landwirte für Grundwasseranreicherung zu kompensieren.

Er leitet ein Pilotprojekt im Pajaro Valley an der Bucht von Monterey, südlich von San Francisco. Hier wachsen Artischocken, Beeren und Blattgemüse für den Export. Da es jedoch an Oberflächenwasser mangelt, müssen die Farmer Wasser aus der Tiefe hochpumpen. Bereits in den 1980er Jahren war die nicht nachhaltige Nutzung ein großes Problem, so dass die Regierung eine Agentur gründete, um das Wasser des Pajaro-Tals besser zu managen. Seitdem werden für das Fördern von Grundwasser Gebühren erhoben, die Maßnahmen zur Verbesserung der Wasserversorgung und der Wasserqualität finanzieren.

Wer Grundwasser sammelt, zahlt später weniger

Fishers Projekt leistet dazu einen wichtigen Beitrag: Es leitet überschüssiges Regenwasser von Feldern und umliegenden Gebieten in ein zirka 1,6 Hektar großes Becken zur Grundwasseranreicherung. Letzten Winter verzeichneten er und sein Team gut 170 000 Kubikmeter Wasser, das in den Boden gesickert war. Dieses wird den Landwirten gutgeschrieben und mit zukünftigen Nutzungsgebühren verrechnet – so wie Stromverbraucher mit Solarpaneelen auf ihren Dächern Guthaben erhalten, wenn sie überschüssigen Strom ins Netz einspeisen. Die Wasserwirtschaftsagentur im Pajaro Valley rechnet den Landwirten die Hälfte des Sickerwassers an. Damit berücksichtigt sie Wasser, das ohnehin in tiefere Bodenschichten gelangt wäre, und solches, das sich im hydrologischen Netzwerk unter der Erde verliert und später nicht zur Verfügung steht.

Anstatt weiter darüber zu streiten, wem das Wasser gehört, entsteht allmählich ein neuer Gemeinsinn. Auch weil die Erfolge der zeitlich begrenzten Überschwemmungen für sich sprechen – und schnell die Runde machen: »Es gibt mehr Bewerbungen für unser Projekt, als wir aufnehmen können«, freut sich Fisher. Ähnlich gut entwickelt sich »BirdReturns«. Nach anfänglicher Zurückhaltung gibt es heute doppelt so viele Angebote von Landwirten, die ihre Felder fluten lassen wollen, wie das Projekt benötigt.

Die neuen Ansätze zeigen, dass Grundwasseranreicherung vielfältigen Nutzen hat, und animieren zur Nachahmung. Zudem verdeutlichen sie, dass man Nachhaltigkeit nur erreicht, wenn man die Verantwortung für die Ressource Wasser in die Hände der lokalen Gemeinschaften legt. »Hydrologische Probleme lassen sich nicht ausschließlich mit den Methoden der Wissenschaft lösen. Ebenso wichtig ist es, die Menschen zu verstehen und einzubinden«, meint Thomas Harter und ergänzt: »Diese stehen neuen Ideen sehr viel aufgeschlossener gegenüber, wenn sie an der Umsetzung beteiligt sind.« ◀

QUELLEN

Kocis, T. N., Dahlke, H. E.: Availability of High-Magnitude Streamflow for Groundwater Banking in the Central Valley, California. In: Environmental Research Letters 12, 084009, 2017

The Nature Conservancy: Sustainable Groundwater Management: What We Can Learn from California's Central Valley Streams. 2016. www.scienceforconservation.org/products/sustainable-groundwater-management-lessons

ARTENSCHUTZ

DARF MAN BEDROHTE ARTEN UMSIEDELN?

Wegen des Klimawandels werden es manche Tiere und Pflanzen in ihrem jetzigen Verbreitungsgebiet bald nicht mehr aushalten. Sollte man sie unterstützen, indem man sie in andere Lebensräume bringt?



Richard Conniff schreibt als Wissenschaftsautor und Kommentator für verschiedene namhafte Zeitungen und Zeitschriften, im Schwerpunkt über Verhalten von Mensch und Tier. Für seine Arbeiten, darunter einige Bücher, erhielt er mehrfach Auszeichnungen.

► spektrum.de/artikel/1430283



KESAWAJ / GETTY IMAGES / ISTOCK

Die urtümlichen Brückenechsen Neuseelands sind vom Aussterben bedroht: Für sie wird es zu warm. Sollte man die Art weiter südlich in kälteren Gefilden ansiedeln?

North Brother Island ist eine kleine, raue Felsinsel in der Cookstraße zwischen der Nord- und der Südinsel Neuseelands. Hier leben einige der letzten der vom Aussterben bedrohten Brückenechsen oder Tuataras, wissenschaftlich *Sphenodon punctatus*. Das Tier gilt als »lebendes Fossil«, denn die Blütezeit dieser Reptilien lag tief im Erdmittelalter. Voraussichtlich wird es aber auf jenem Felsen bald nicht mehr vorkommen. Der Grund: Die Männchen nehmen rapide überhand. Als Biologen das Ungleichgewicht Ende der 1990er Jahre bemerkten, waren 62,4 Prozent des Bestands männlich. Inzwischen sind es schon mehr als 70 Prozent.

Forscher machen den Klimawandel dafür verantwortlich. Bei Tuataras bestimmt die Boden- und somit Bruttemperatur das Geschlecht. Unterhalb von ungefähr 18 bis 20 Grad Celsius entstehen Weibchen, darüber Männchen. Sollte der Anteil Letzterer auf 85 Prozent steigen, wird sich der Bestand nicht mehr lange halten können. Die Weibchen legen dort in so großen Abständen Eier, dass Brutnester schon jetzt sehr selten geworden sind.

Viele Tiere und Pflanzen, denen die globale Erwärmung zu schaffen macht, lassen sich womöglich nur noch retten, indem man sie an Orte umsiedelt, wo diese Arten bisher nicht heimisch waren. Forscher bezeichnen das als begleitete Kolonisation oder assistierte Migration. Zu den Artenschutzexperten, die solche Maßnahmen in die Diskussion brachten, gehört die Ökologin Jessica Hellmann von der University of Minnesota in Minneapolis. Sie spricht auch für ihre Kollegen, wenn sie sagt, dass sie natürlichere Hilfestellungen bei Weitem bevorzugen würde. Es wäre besser, die Arten fänden von allein in andere, für sie nun günstigere Lebensräume, indem sie zum Beispiel über natürliche Korridore dorthin gelangten. Das ist Populationen auf Inseln oder Bergen allerdings oft nicht möglich. In zahlreichen anderen Fällen hat der Mensch geeignete Verbindungswege längst gekappt. Deswegen ziehen manche Naturschützer eine Umsiedlung bedrohter Arten in andere Gebiete inzwischen ernstlich in Erwägung.

Einzelne Projekte haben schon begonnen. Doch einige Forscher hegen dagegen große Bedenken. Schließlich kann eine fremde Art am neuen Ort verheerende ökologische Schäden anrichten. Beispiele dafür gibt es genug. Außerdem ist völlig ungewiss, ob die neu eingebrachten Tiere an dem Standort überhaupt zurechtkommen. Wer in langjähriger Arbeit erlebt, wie schwierig es sein kann, zum Beispiel in den USA Wölfe wieder in den Yellowstonepark einzugliedern oder Bisons in die Prärie, der mag Vorbehalte haben, Tiere in einen ihnen bis dahin völlig fremden Lebensraum zu entlassen.

Doch jetzt, da sich erste Auswirkungen des Klimawandels für die Natur vielerorts deutlich abzuzeichnen beginnen, weicht die ablehnende Haltung gegen Umsiedlungsprojekte langsam einer vorsichtigen Akzeptanz – mit dem Vorbehalt, dass solche Eingriffe strengen Richtlinien folgen. Die amerikanische Onlinezeitschrift »Elementa: Science of the Anthropocene« befragte 2300 Biodiversitätsforscher zu ihrer Einstellung und stellte fest: Unter bestimmten rigiden Vorgaben würden die meisten dieser Experten eine assistierte Kolonisation befürworten. Das erste Kriterium wäre, dass die Art ohne die Maßnahme nicht gerettet werden könnte. Ebenso dürfte die Ansiedlung dem neuen Habitat nicht oder höchstens sehr wenig schaden.

Als hätte man es vorhergesehen: Geglückte Rettung eines Kängurus

Wie überlebensentscheidend solche Programme unter Umständen sein können, erfuhr Australien Ende 2015 mit einem früher häufigen, heute sehr seltenen Beuteltier, das nur noch in einem kleinen Naturschutzgebiet im Südwesten des Kontinents vorkommt. Das Gilbert-Kaninchenkänguru (*Potorous gilbertii*) galt bereits als ausgestorben, doch eine kleine Kolonie wurde 1994 wiederentdeckt. Im November 2015 fielen 15 von den damals schätzungsweise 20 Tieren des Reservats einem Buschbrand zum Opfer. Das zerstörte Habitat hätte auch für die übrigen das Todesurteil bedeutet und damit das Ende der Art. Doch nach der Wiederentdeckung hatte man einige Tiere auf eine nahe, raubtierfreie Insel gebracht, wo sie sich gut vermehrten.

In diesem Fall wurde die neue Kolonie in angestammten Lebensräumen der Art etabliert. Das gilt als viel weniger kritisch als die Umsiedlung in ein völlig neues Gebiet. Auch auf den Florida Keys, der langen Koralleninselnkette im Süden Floridas, versucht man, Populationen vom Key-Weißwedelhirsch, einer kleinen Unterart dieses amerikanischen Hirschs, vor dem Meeresspiegelanstieg zu retten, indem man sie innerhalb ihres Verbreitungsgebiets in höhere Lagen umsiedelt. Ähnlich verfuhr man dort mit dem baumhohen Key-Kaktus. Das soll den beide Arten wenigstens in den nächsten Jahrzehnten eine Überlebenschance geben.

Für die australische Bramble-Cay-Mosaikschwanzratte (*Melomys rubicola*) käme solche Hilfe inzwischen zu spät. Sie fiel den wiederholten Überflutungen ihrer abgelegenen Koralleninsel hoch im Norden des Great-Barrier-Riffs zum Opfer. Im Juni 2016 erklärten Forscher der University of Queensland die Spezies für ausgestorben, nachdem sie über mehrere Jahre kein Tier mehr hatten finden können.

AUF EINEN BLICK UMSTRITTENE UMZUGSHILFE

- 1 Durch die Klimaerwärmung verlieren viele Tier- und Pflanzenarten ihren bisherigen Lebensraum. Wenn sie nicht irgendwohin ausweichen können, drohen sie auszusterben.
- 2 Naturschützer ersinnen Wege, um solche bedrohten Arten an zukünftig besser geeigneten Orten anzusiedeln. Erste Versuche von »assistierter Migration« gibt es bereits.
- 3 Derartige Maßnahmen bergen viele Risiken, nicht nur für die umgesiedelte Art, sondern vor allem für das ausgewählte Ökosystem. Unter strengen Auflagen kann das mitunter dennoch die beste Option sein.



SLOVER/ROE / GETTY IMAGES / ISTOCK



UNIKS. MARTIN / STOCK.ADOBE.COM, RECHTS: HAKODAI / GETTY IMAGES / ISTOCK



Bergbilchbeutel (*Burramys parvus*)

Die Art droht auszusterben, weil sie in den wärmer werdenden Hochgebirgsregionen Südwestaustraliens nirgendwohin ausweichen kann. Bei einer Umsiedlung müsste man ihr bevorzugtes Beutetier, einen Schmetterling, wohl mitnehmen.

Hihī oder Gelbbandhonigfresser (*Notiomystis cincta*)

Die letzten Refugien auf Neuseelands Nordinsel werden der Art bald keinen geeigneten Lebensraum mehr bieten. Wird man sie auf der Südinsel ansiedeln können?

Key-Weißwedelhirsch (*Odocoileus virginianus clavium*)

Auf den Florida Keys leben noch weniger als 1000 Tiere dieser kleinen Unterart des amerikanischen Weißwedelhirschs. Wegen des ansteigenden Meeresspiegels werden sie in höhere Lagen umgesiedelt.

Nach ihrer Einschätzung verzeichnete man hiermit erstmals den Untergang einer Säugetierart durch den vom Menschen verursachten Klimawandel.

Mitunter dürfte eine Verpflanzung in eine andere Gegend tatsächlich die letzte Lösung sein. Die Westliche Sumpfschildkröte – oder Falsche Spitzkopfschildkröte (*Pseudemys umbrina*) –, die nur in Feuchtgebieten in Südwestaustralien bei Perth vorkommt, ist nicht nur vom Klimawandel bedroht, sondern auch von der sich ausdehnenden Großstadt und dadurch, dass der Grundwasserspiegel infolge des hohen Wasserverbrauchs absinkt.

Tracy Rout von der University of Queensland und ihre Kollegen haben mit aufwändigen Rechenprogrammen 13000 Orte der Region daraufhin geprüft, ob sie für eine Umsiedlung der Schildkröte in Frage kämen. Die vielversprechendsten Habitate nahmen sie dann in Augenschein. Übrig blieben einige wenige Standorte mehrere Autostunden südlich von Perth. Diese scheinen die Bedürfnisse der Art auch in einigen Jahrzehnten bei einem wahrscheinlich noch trockeneren Klima erfüllen zu können. Nachdem die Maßnahme offiziell zugelassen worden war, setzten die Forscher dort im August 2016 die ersten Sumpfschildkröten aus, und zwar Zuchttiere aus Gefangenschaft.

Für den Bergbilchbeutel (*Burramys parvus*) ein neues Habitat zu finden, dürfte noch schwieriger sein. Diese stark bedrohte Art, die in alpinen Gebieten Südwestaustraliens vorkommt, war bis 1966 nur von Fossilien bekannt. Ihr karger, schneereicher Lebensraum erwärmt sich heute so schnell, dass man die Tiere nicht mehr einfach vor Ort in noch höhere Lagen bringen kann. Und vermutlich müsste man ihre Hauptnahrung, den Bogong-Falter (*Agrotis infusa*), im neuen Gebiet gleich mitansiedeln.

Der Ansatz, von der Klimaerwärmung betroffene Arten zu verpflanzen, ist nicht völlig neu. Schon seit 1999 erproben ihn die Ökologen Stephen G. Willis von der Durham University in England und Jane K. Hill, die heute an der University of York lehrt. Sie wollten wissen, wie britische Schmetterlingsarten mit dem Wandel zurechtkommen, darunter der recht häufige Schachbrettfalter und der Ockergelbe Braun-Dickkopffalter. In ihren Studien fanden sie durchaus geeignete Habitate nördlich von deren Ver-

breitungsgebiet, wo die Arten aber von allein bisher nicht hingelangt sind.

Offenbar können manche Organismen mit einer klimatischen Veränderung nicht einfach dadurch Schritt halten, dass sie in eine günstigere Umwelt abwandern. Solche Arten verlagern ihr Verbreitungsgebiet nicht so rasch, wie es ihnen gut täte – oft sogar dann nicht, wenn durchaus noch natürliche Korridore dafür existieren. Dass Bäume träge reagieren, hätte man erwartet, doch sogar Vögel und viele Säugetiere verhalten sich ähnlich. Möglicherweise haben sich in den Habitaten, die sich zur Umsiedlung anbieten würden, einige für die Art wichtige ökologische Details noch nicht herausgebildet.

Baldiges Aus für einen beliebten Pfeilgiftfrosch?

Die zeitliche Kluft zwischen dem Verlust des alten Lebensraums und dem Finden eines neuen kann auch aus geografischen Gründen unüberbrückbar sein. Der Biologe Joshua J. Lawler von der University of Washington in Seattle glaubt beispielsweise, dass der Gelbgebänderte Baumsteiger (*Dendrobates leucomelas*), ein südamerikanischer Pfeilgiftfrosch des Regenwalds, mehr Trockenheit und Wärme schlecht aushalten wird. Um zu überleben, müsste er Hunderte von Kilometern nach Südwesten gelangen, was völlig unmöglich erscheint.

Bei den britischen Schmetterlingen haben Willis und Hill es geschafft, eine Fallstudie zu erstellen. Die Aktion wurde ihnen genehmigt, zum einen, weil die angezielten Habitate in Steinbrüchen und Stadtgebieten lagen, somit nicht »echte« Wildnis waren, zum anderen, weil sie wussten, dass in den Zielgebieten vorhandene Arten unter den neuen Schmetterlingen nicht leiden würden. Schachbrettfalter ließen sie 65, Dickkopffalter 35 Kilometer nördlich ihres alten Lebensraums frei. Dass solche Programme größte Umsicht und Vorsicht erfordern, ist ihnen durchaus bewusst. Strengste Richtlinien sind ihres Erachtens unverzichtbar. Wie Willis betont: Man wolle auf keinen Fall unwissentlich eine Katastrophe wie die Kaninchenplage in Australien auslösen.

Risiken bringt allerdings jede Umsiedlung mit sich. Anthony Ricciardi von der McGill University in Montreal



**Westliche Sumpfschildkröte
(*Pseudemys umbrina*)**

Der Lebensraum dieser stark bedrohen, kleinsten Australischen Schlangenhalschildkröte wird zu trocken. Tiere aus Gefangenschaftszuchten werden in besser geeigneten, auch zukünftig noch feuchten Gebieten ausgewildert.

**Gelbgebänderter Baumsteiger
(*Dendrobates leucomelas*)**

Der Pfeilgiftfrosch dürfte seinen Lebensraum in den tropischen Wäldern im nördlichen Südamerika verlieren, wenn das Klima wärmer und trockener wird. Pläne zu seiner Rettung gibt es noch keine.

**Schachbrett oder Damenbrett
(*Melanargia galathea*)**

Der in weiten Teil Europas häufige Tagfalter ist nicht bedroht. In England breitet er sich trotz des veränderten Klimas aber nicht von selbst weiter nach Norden aus. Mit etwas Nachhilfe schafft er das hingegen.

und Daniel Simberloff von der University of Tennessee in Knoxville thematisierten das 2009 in einer ausführlichen schriftlichen Stellungnahme. Sie ermahnten die Artenschützer, kein ökologisches Roulette zu spielen. Ihres Erachtens würden die Befürworter von Umsiedlungen völlig unterschätzen, wie schwierig bis unmöglich es selbst mit den differenziertesten Analysen ist, langfristige Auswirkungen auf das Ökosystem vorherzusagen.

Als abschreckendes Beispiel erwähnen sie den Beschluss Neufundlands von 1960, das amerikanische Gemeine Rothörnchen (*Tamiasciurus hudsonicus*) in seinen Schwarzfichtenwäldern auszusetzen, wo es bisher nicht vorkam. Es sollte als Nahrung für den Fichtenmarder (*Martes americana*) erhalten, dessen Bestand zurückging. Nur leider fraßen die Marder keine Rothörnchen. Diese hatten im neuen Umfeld kaum Feinde und lebten wie im Schlaraffenland: Die Bäume hatten sich 9000 Jahre lang nicht an ein so gefräßiges Nagetier adaptieren müssen. Infolgedessen brach nun der Bestand der auf ihre Zapfen spezialisierten neufundländischen Unterart des Fichtenkreuzschnabels (*Loxia curvirostra percna*) zusammen und gilt inzwischen als gefährdet.

Wie sich solche Desaster verhindern lassen, möchten Nathalie Pettorelli von der Zoological Society of London und ihre Kollegen aufzeigen. Das Beispiel in ihren 2013 veröffentlichten Analysen ist der neuseeländische Hihi, auch Gelbbandhonigfresser (*Notiomystis cincta*). 34 Millionen Jahre Evolution trennen diese Art von ihren nächsten lebenden Verwandten. Ursprünglich war der kleine Singvogel mit den schwarz und gelb gefiederten Männchen und dem typischen Schwirrflug vielerorts auf der Nordinsel Neuseelands und einigen kleinen Inseln heimisch. Doch zuletzt lebte nur noch auf einem der Eilande eine winzige Population. Es gelang seit den 1980er Jahren, die Vögel auf weiteren Inseln und an zwei Orten auf dem neuseeländischen Festland mit intensiven Schutzmaßnahmen wieder anzusiedeln – sie werden etwa mit Zuckerrwasser gefüttert, ähnlich wie Kolibris in Nordamerika.

Die Studie der Londoner Forscher ergab, dass die jetzigen Standorte dem Hihi in einigen Jahrzehnten immer

weniger zusagen werden. Für die Art geeignete Habitate dürften dagegen mit dem Klimawandel auf der Südinsel Neuseelands entstehen. Ausdrücklich zielten Pettorelli und ihre Mitarbeiter mit ihren Analysen nicht darauf ab, Empfehlungen zu geben, zu welchem Zeitpunkt eine Umsiedlung geboten, wie sie durchzuführen sei und an welche Orte die Vögel gebracht werden sollen. All das müssten die Verantwortlichen vor Ort entscheiden. Die Studie soll ihnen aber Orientierung bieten.

Unter anderem erörtert die Forschergruppe mögliche Gefahren durch die Umsiedlung für die neue Umwelt und ihre Ressourcen. Dazu zählen: das ökologische Risiko bei einer Gefährdung schon vorhandener Arten; das Krankheitsrisiko durch ins Ökosystem eingeschleppte neue Erreger; das Risiko, dass die neue Art sich über das vorgesehene Gebiet hinaus ausbreitet und mit dortigen Arten konkurriert; das Risiko einer genetischen Vermischung mit ansässigen nahe verwandten Arten; nicht zuletzt auch das sozioökonomische Risiko in Form von ökologischen und anderen Kosten für die dort lebenden Menschen. Außerdem vergleicht die Studie das jetzige und das erwartete Ausmaß diverser Klimafaktoren von altem und neuem Habitat. Sie fragt beispielsweise nach dem Grad der Trockenheit in der trockenen Jahreszeit und nach der Verteilung der Niederschläge im Lauf des Jahres.

Aufruf zur Zusammenarbeit mit der Wissenschaft

Pettorelli weiß auch, dass bei solchen Projekten die Zusammenarbeit zwischen Wissenschaftlern und Entscheidungsträgern sowie Verantwortlichen vor Ort oft noch besser werden müsste. Viele Beteiligte würden sich zwar mehr Kooperation zwischen den verschiedenen Instanzen wünschen, aber die Umsetzung scheitert häufig am ungenügenden Austausch und an fehlenden Kontakten. Daher würden sogar heute noch viele Artenschutzentscheidungen ohne Bezug auf Forschungsergebnisse getroffen. Doch die Untersuchung zu den Hihis trägt Früchte: Neuseeländische Naturschützer befassen sich jetzt damit, ob es sinnvoll wäre, auf der Südinsel eine Population zu begründen.

Unter Umständen müssen die Befürworter von assistierter Migration allerdings damit rechnen, dass sie vorschnell eingreifen. Denn manchmal findet die Natur tatsächlich von selbst einen Ausweg. In den Rocky Mountains setzt die Klimaerwärmung der alpinen Flora nachweislich zu. Dadurch gibt es in Höhenlagen wesentlich weniger Blüten mit sehr tiefem Kelch als noch vor wenigen Jahrzehnten. Doch genau auf solche haben sich bestimmte Hummelarten spezialisiert, indem sie besonders lange Rüssel entwickelt. Wie nun ein Vergleich früherer und heutiger Rüssellängen ergab, haben sich zwei Hummelarten in den letzten 40 Jahren an die neuen Verhältnisse angepasst: Ihre Rüssel sind um ein Viertel kürzer geworden, was diesen Insekten ein breiteres Blütenspektrum eröffnet.

Ein Organismus kann unter Umständen mit veränderten Bedingungen viel besser zurechtkommen als erwartet. In Südaustralien starteten Forscher eines Unternehmens für Hummerfang 2010 einen Test mit dem Südlichen Felsenhummer (*Jasus edwardsii*). 10000 Tiere holten sie aus kühlem, tieferem Wasser und brachten sie nicht etwa in kältere, südlichere Gewässer, sondern in küstennahes, flaches Wasser näher beim Äquator. Die Wissenschaftler wollten erkunden, wie die Art auf die prognostizierte globale Erwärmung reagieren würde. Völlig unerwartet gediehen die Tiere in der Wärme prächtig. Sie wuchsen viermal so schnell wie sonst, und die Weibchen steigerten ihre Eierproduktion erheblich.

Inwieweit lassen sich solche Reaktionen vorhersehen? In einer Studie des Ökologen Chris D. Thomas von der University of York zur Verfassung von 155 britischen Schmetterlingsarten kam heraus, dass ungefähr die Hälfte davon heute besser dasteht, die andere Hälfte schlechter als vor 40 Jahren. Für jede Art zählen dabei andere Faktoren. Hat bei der einen die Sommertemperatur einigen Einfluss, so ist es bei einer anderen eher die Wintertemperatur. Bei manchen Arten hängt viel vom Frühlingsregen ab, und so fort. Fast jede Spezies zeigt ihr eigenes Reaktionsmuster und bewertet anders, wie sehr sich für sie relevante Parameter verändert haben und welche Details für sie günstiger oder schlechter geworden sind.

Welche Schlussfolgerungen ergeben sich damit für die eingangs erwähnte neuseeländische Brückenechse? Weniger als 100000 Exemplare des urtümlichen Reptils dürften derzeit noch auf ein paar Inseln leben, auf North Brother Island sind es höchstens 500. Ein Tuatara-Männchen kann sich im Prinzip jedes Jahr fortpflanzen, ein Weibchen unter anderem wegen der langwierigen Eiproduktion und Bewachung des Nests nur im Abstand mehrerer Jahre. Auf North Brother Island sind es sogar neun Jahre, und die Gelege enthalten dort durchschnittlich nur sechs Eier. Setzte diese Geschlechterdiskrepanz den Weibchen schon früher beträchtlich zu, weil sie sich der deutlich größeren Männchen erwehren und mit ihnen konkurrieren mussten, so verschärft deren Überzahl die Situation noch. Das greift ihre Widerstandskraft und Gesundheit an. Und bis zur Geschlechtsreife verstreichen mindestens zehn Jahre. Weil North Brother Island kaum Schatten bietet, auch wenig dunkle Spalten und dergleichen, zeigt sich hier zuerst, wie die Art die rasche Klimaerwärmung verkraften wird.

Nicola Mitchell von der University of Western Australia in Perth erforscht die Verhältnisse vor Ort seit mehreren Jahren. Zusammen mit Kollegen erörterte sie 2014 in einem Artikel die Optionen, welche Forscher, Politiker und nicht zuletzt die Maoris haben, die Tuataras als Totemtiere ansehen. Es würde sich zum Beispiel empfehlen, auf der sehr kleinen Insel heute nicht mehr benötigte Gebäude abzureißen sowie an vergleichsweise kühlen Stellen Nistgelegenheiten einzurichten. Oder man müsste Gelege suchen, die Eier entnehmen, sie künstlich bei niedriger Temperatur ausbrüten und den Nachwuchs später wieder aussiedeln. So könnte man gezielt junge Weibchen ausbringen und gleichzeitig einen Teil der erwachsenen Männchen entfernen.

Laut Mitchell sind natürliche Gelege inzwischen allerdings selten, außerdem meist bestens versteckt und schwierig zu finden. Die Alternative, die Brückenechsen von

Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema:
spektrum.de/t/artenvielfalt-und-artensterben



FOTOLIA / FRANK WASSERFÜHRER

North Brother Island an einen anderen Ort zu verpflanzen, wäre wiederum sehr aufwändig. Auf einigen nahen Inseln hat man im Übrigen schon Tuataras derselben Unterart, wenn auch einer anderen genetischen Gruppe, als so genannte Sicherungspopulationen angesiedelt. Daher wird jetzt überlegt, ob man den Bestand von North Brother Island unberührt lässt und lediglich abwartet.

Letztlich laufen solche Entscheidungen darauf hinaus, wie Naturschützer und Gesellschaft sich zu der Frage stellen, wann sie eingreifen sollten und wann nicht – was auch bedeuten kann zu entscheiden, manche Arten zu retten und andere ihrem Schicksal zu überlassen. Jessica Hellmann von der University of Minnesota bringt es auf den Punkt: Einige Maßnahmen fühlten sich an, als ob man an natürlichen Prozessen mitwirke, andere eher wie gärtnern. Man könne aber nicht die gesamte Biodiversität wie einen Garten bearbeiten. ◀

QUELLEN

Hannah, L. (Hg.): Saving a Million Species: Extinction Risk from Climate Change. Island Press, Washington D. C. 2011

Root, T. L. et al. (Hg.): Biodiversity in a Changing Climate: Linking Science and Management in Conservation. University of California Press, Berkeley 2015

LITERATURTIPP

Nijhuis, M.: Herren über Leben und Tod, In: Spektrum der Wissenschaft 2/2013, S. 70–75
Eine Erörterung, nach welchen Kriterien sich Artenschützer für und gegen den gezielten Erhalt von Organismen entscheiden

VORSCHAU

FORTSCHRITT DURCH FRAUEN

Im Kampf gegen Armut, Hunger und Krankheit spielen Frauen oft eine entscheidende Rolle. Gleichzeitig verwehren ihnen soziale Normen den gleichberechtigten Zugang zur Arbeitswelt. Doch allmählich zeichnet sich in manchen Ländern ein Umdenken ab: Groß angelegte Programme sorgen für mehr Gerechtigkeit zwischen Mann und Frau – und fördern damit auch den Ausgleich zwischen Arm und Reich.



BARIOSZ HADYNYAK / BETTY IMAGES / ISTOCK

THEMEN SIND UNTER ANDEREM:

DIE LEGENDE VOM WEIBLICHEN GEHIRN

Hartnäckig hält sich die Annahme, Männer und Frauen hätten ein grundlegend verschiedenes Gehirn, das ihnen jeweils ganz eigene Charakterzüge verleiht. Doch jedes Gehirn beinhaltet ein Mosaik aus sowohl »männlichen« als auch »weiblichen« Merkmalen, die sich je nach Situation verändern oder anpassen.

AFRIKAS BEDROHLICHE BEVÖLKERUNGSEXPLSION

Bis 2100 wird die Bevölkerungszahl Afrikas von derzeit einer Milliarde auf das Sechsfache steigen – wenn die Geburtenrate nicht nachhaltig gesenkt wird. Das einzige Mittel dafür ist die Emanzipation der afrikanischen Frauen.

DER VORTEIL SOZIALER VIELFALT

Unterschiede in ethnischer Herkunft, Geschlecht und sexueller Orientierung scheinen vor allem Spannungen und Probleme zu schaffen. Tatsächlich arbeitet eine bunt gemischte Gruppe kreativer, gründlicher und fleißiger zusammen als ein homogenes Team.

NEWSLETTER

Möchten Sie über Themen und Autoren jedes neuen Hefts informiert sein? Wir halten Sie gern auf dem Laufenden: per E-Mail – und natürlich kostenlos.

Registrierung unter:

spektrum.de/newsletter

Jetzt abonnieren!



WAHLWEISE
als Print-,
Digital- oder
Kombiabo

Die **Spektrum Spezial-Reihe BMH** beschäftigt sich mit dem breiten Themenfeld der Lebenswissenschaften. Jahresabo der Reihe (4 Ausgaben pro Jahr): Print € 29,60; Digital € 21,-; Kombiabo Print + Digital € 33,60 (Printpreise inkl. Versandkosten Inland)



Bestellen Sie jetzt Ihr Spezialabo!

service@spektrum.de | Tel.: 06221 9126-743

www.spektrum.de/spezialabo



Sie möchten Lehrstühle oder Gremien besetzen? Sie suchen weibliche Experten, Gutachter oder Redner zum Thema?

Finden Sie die passende Kandidatin in unserer **Datenbank mit über 2.700 Profilen** herausragender Forscherinnen aller Disziplinen.

AcademiaNet – das internationale Rechercheportal hoch qualifizierter Wissenschaftlerinnen

Die Partner

