



TREIBHAUS ERDE

Wie **Kohlendioxid und Co** das Klima anheizen

Geochemie

Der Thermostat der Erde

Permafrost

Die Zeitbombe im hohen Norden

Amazonien

Von der Senke zur Quelle?



Daniel Lingenhöhl
E-Mail: lingenhoehl@spektrum.de

Liebe Leserin, lieber Leser,
das Jahr 2020 ist weltweit betrachtet eines der heißesten seit Beginn moderner Aufzeichnungen, der Arktische Ozean begann so spät zuzufrieren wie kaum einmal zuvor, seit Menschen dies überwachen. Und weltweit brennen riesige Waldflächen, angeheizt durch ausufernde Dürren, die selbst Feuchtgebiete wie das südamerikanische Pantanal austrocknen. Die Menschheit ist unterwegs in ihr bislang nicht gekannte Klimabedingungen – und wenig deutet darauf hin, dass wir das Ruder herumreißen und unsere Emissionen schnell genug senken, um die Erderwärmung zumindest zu bremsen. Es ist an der Zeit für eine neue Bestandsaufnahme: Was droht dem hohen Norden und den Tropen? Welche Treibhausgasquellen sollten wir schnellstmöglich verschließen? Und wie finden wir diese? Es ist Zeit, endlich auf die Bremse zu treten!

Dennoch noch optimistisch grüßt

Erscheinungsdatum dieser Ausgabe: 30.11.2020

Folgen Sie uns:



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

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

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2020 (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. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

SEITE
04

GEOLOGIE
Der Thermostat der Erde

KAPULYA / GETTY IMAGES / ISTOCK

SEITE
33

PERMAFROST
Die Zeitbombe im
hohen Norden

DIETERMEYER / GETTY IMAGES / ISTOCK

TROPEN
Wälder verlieren ihre
Senkenfunktion

SEITE
49

PETMAL / GETTY IMAGES / ISTOCK

ILLEGALEN EMISSIONEN AUF DER SPUR
Die FCKW-Detektive

SEITE
62

MOE / GETTY IMAGES / ISTOCK

- 19 KLIMAREKONSTRUKTIONEN
Heute erwärmt sich
die ganze Erde auf einmal
- 25 KLIMAKRISE
Frühe Modelle lieferten bereits
exakte Prognosen
- 29 POLARGEBIETE
Die Arktis brennt wie nie zuvor
- 43 ÖKOLOGIE
Mikroorganismen im Boden
setzen mehr CO₂ frei
- 47 BINNENGEWÄSSER
Seen lagern mehr Kohlenstoff
ein als vor 100 Jahren
- 54 METHAN
Gefährlicher Rekord
- 57 FOSSILE BRENNSTOFFE
Die Methan-Rechnung geht nicht auf
- 60 ZYANOBAKTERIEN
Unerwartete Produzenten
- 70 DISTICKSTOFFMONOXID
Gar nicht zum Lachen
- 73 REZENSION
Klimawandel kompakt



GEOLOGIE

DER THERMOSTAT DER ERDE

von Friedhelm von Blanckenburg

Ein faszinierender Regelkreislauf hält natürliche Emissionen von CO_2 aus Vulkanismus und dessen Verbrauch durch Gesteinsverwitterung in einer Balance. Damit reguliert er das Erdklima. Modernste Isotopenmessungen verraten, wieso sich die Erde trotzdem in den letzten 15 Millionen Jahren bis zur Eiszeit abkühlte.

Die Erde ist ein ganz besonderer Planet: Schon fast seit Beginn ihrer Geschichte vor viereinhalb Milliarden Jahren enthält sie flüssiges Wasser. Ein Glück, denn wäre alles davon gefroren – wie derzeit auf unserem eiskalten Nachbarplaneten Mars –, hätte sich kein Leben entwickelt. Befände sich andererseits alles Wasser als Dampf in der Atmosphäre, gäbe es ebenfalls keine Lebewesen, denn dann würde durch Ultraviolettstrahlung von der Sonne der Wasserdampf in Wasserstoff und Sauerstoff gespalten, die in das Weltall entweichen würden. Das gesamte Wasser wäre längst verschwunden, wie auf unserer 470 Grad heißen Nachbarin Venus. Hingegen befindet sich die Oberfläche der Erde schon lange in dem für Leben geeigneten Temperaturintervall zwischen 0 und 100 Grad Celsius.

Anhand eines einfachen Wärmebudgets für die Erde sieht man schnell, dass

Friedhelm von Blanckenburg forscht am GFZ Deutsches GeoForschungsZentrum Potsdam zur Geochemie der Erdoberfläche und lehrt als Professor an der Freien Universität Berlin.

die hier herrschenden lebenserhaltenden Temperaturen keineswegs selbstverständlich sind. An der Erdoberfläche ist die hauptsächliche Wärmequelle die Sonnenstrahlung. Angenommen, die Erde wäre ein perfekter Schwarzkörper, der alles Licht absorbiert, dann läge die Temperatur an der Erdoberfläche bei fünf Grad Celsius. Unser Planet ist allerdings kein perfekter Schwarzkörper, denn weiße Wolken, Gletscher und helle Wüstenböden reflektieren Sonnenlicht zurück in das Weltall. Diese hellen Flächen bezeichnet man zusammengenommen als die Albedo der Erde. Berechnet man diese Wärmerückstrahlung mit ein, kommt man auf eine Erdtemperatur von minus 18 Grad Celsius, bei der alles Wasser gefroren und Leben unmöglich wäre.

Dass auf der Erde heute jedoch eine angenehme Durchschnittstemperatur von rund 15 Grad herrscht, verdanken wir dem natürlichen Treibhauseffekt. Denn die Wärmestrahlung, die ursprünglich von der Sonne stammt und die Erdoberfläche erwärmt, wird nicht direkt in den Weltraum zurückgestrahlt, sondern trifft in der Atmosphäre auf Moleküle, welche sie zurück zur Erdoberfläche reflektie-

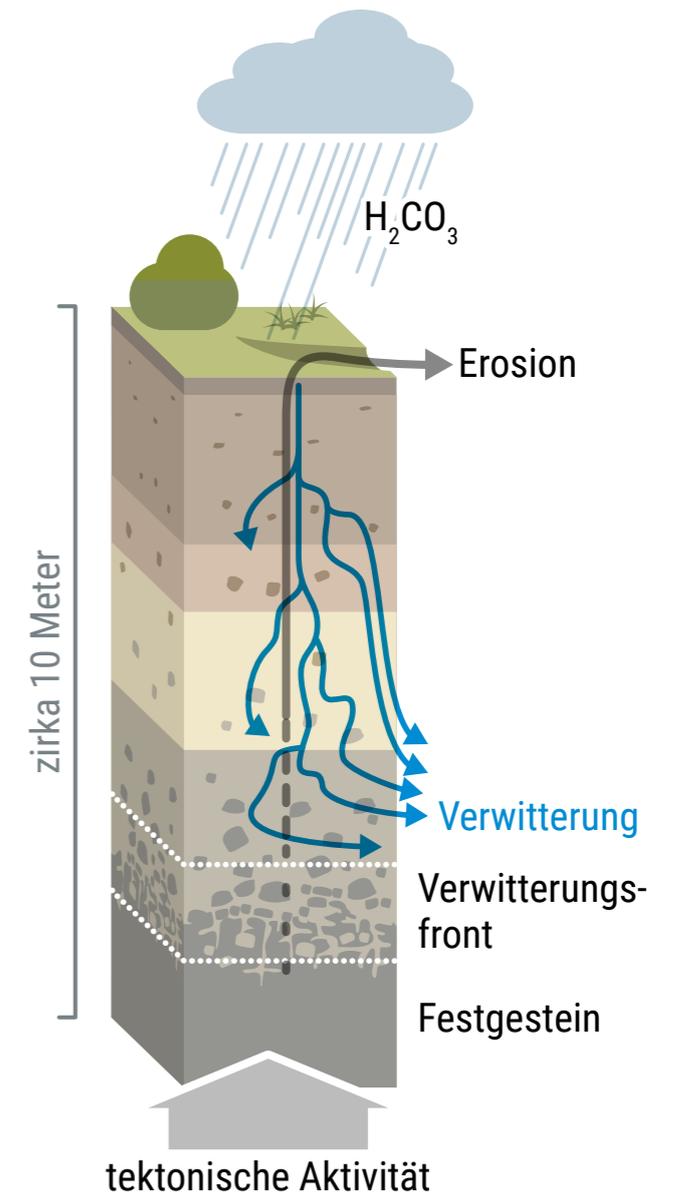
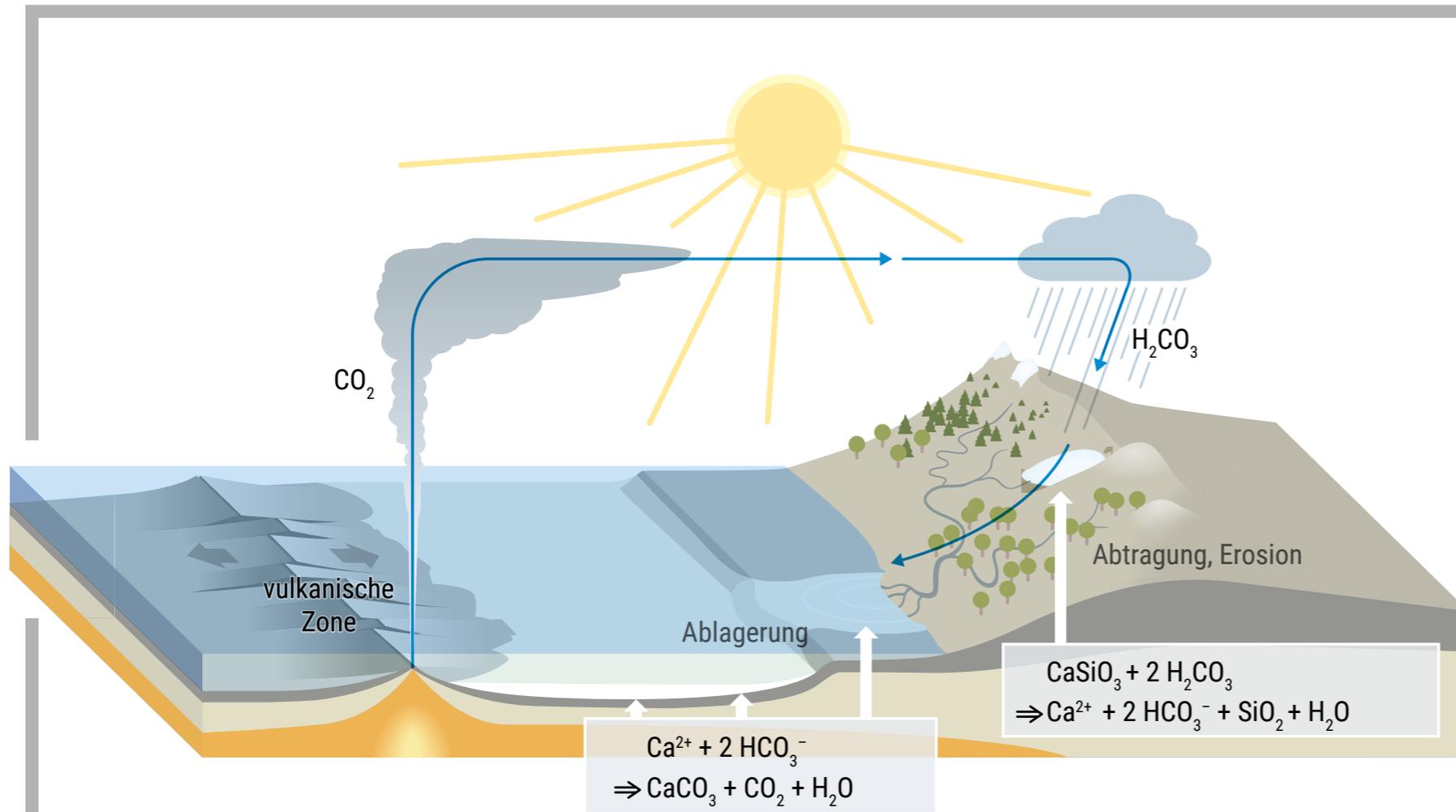
AUF EINEN BLICK

Empfindliches Gleichgewicht

01 Durch Prozesse an der Landoberfläche reguliert die Erde seit Milliarden Jahren den CO₂-Gehalt der Atmosphäre und somit ihre Temperatur, ähnlich einem Thermostat.

02 Erdgeschichtliche Rekonstruktionen aus neuen Isotopenmessungen zeigen, dass sich dieses Gleichgewicht in den letzten 15 Millionen Jahren verschoben hat.

03 Eine drastische Verschiebung steht bevor, denn der Mensch greift massiv in die empfindliche Balance ein.



Verwitterung verbraucht CO₂

Vulkanische CO₂-Emissionen werden mit CO₂-Verbrauch in der Verwitterungszone balanciert. Ein Silikatmineral der Formel CaSiO₃ wird mit Kohlensäure (H₂CO₃) zersetzt. Das durch Flüsse transportierte Ca²⁺ wird mit Hydrogencarbonat HCO₃⁻ im Ozean als Kalzitmineral CaCO₃ ausgefällt und dann in Kalkstein umgewandelt. Die Bodensäule rechts zeigt die »kritische Zone« für den Teil der globalen Erdoberfläche, in dem in Gebirgen Gestein von unten durch tektonische Kräfte ständig hochgehoben wird. Das Gestein verwittert gleichzeitig mit Wasser und Kohlensäure in der Zone, und der dabei entstehende Boden wird an der Oberfläche durch Erosion laufend abgetragen.

ren – wie etwa Wasser, Kohlenstoffdioxid (CO_2), Methan oder Ozon. Die Atmosphäre erwärmt sich also stärker, je mehr dieser Treibhausgase sie enthält. Der Schlüssel für die natürliche Temperaturregulation der Erde ist, dass der Planet schon immer über einen mal stärkeren, mal schwächeren Treibhauseffekt verfügte – und dieser wird vor allem durch den CO_2 -Gehalt der Atmosphäre reguliert. Bevor der Mensch in großem Maß eingriff, stammte das CO_2 hauptsächlich aus vulkanischen Gasemissionen.

Schon seit Beginn der Erdgeschichte entlassen Vulkane das Treibhausgas CO_2 in die Atmosphäre. Heute sind dies ungefähr 0,55 Milliarden Tonnen pro Jahr (weit weniger, als der Mensch durch industrielle Aktivitäten aktuell ausstößt: 37 Milliarden Tonnen CO_2 im Jahr 2019). Warum hat das CO_2 sich inzwischen also nicht so stark angereichert, dass auf der Erde eine Wärmehölle wie auf der Venus herrscht? Was uns vor diesem Schicksal bewahrt, ist die Gesteinsverwitterung. Denn sie bindet CO_2 und reduziert damit dessen Konzentration in der Atmosphäre, obwohl Vulkane ihr ständig neues CO_2 hinzufügen.

Das Kohlenstoffdioxid in der Luft bildet mit dem Wasser geringe Mengen an Kohlensäure, H_2CO_3 . Regnet es, trifft die Kohlensäure zusammen mit dem Regenwasser auf die Erdoberfläche. Kommen dort harte Silikatgesteine vor, löst sie die darin enthaltenen Minerale wie Feldspat und Glimmer teilweise auf; dies geschieht sehr langsam, mit nur 5 bis 100 Millimetern in 1000 Jahren. Bei dieser chemischen Reaktion werden aus dem Gestein Kalzium- und Magnesiumionen (Ca^{2+} und Mg^{2+}) freigesetzt, die ebenso wie das aus der Kohlensäure umgewandelte Hydrogencarbonat (HCO_3^-) über die Flüsse in die Ozeane gelangen. Dort verbindet sich Kalzium mit Karbonat zu Kalzit (CaCO_3), und über Hunderttausende von Jahren werden diese Kalzitkristalle zu Kalkgestein am Meeresboden. Der Prozess entsorgt das durch die Gesteinsverwitterung gebundene CO_2 langfristig: Im Kalkgestein verweilt es Hunderte von Millionen Jahren fernab der Atmosphäre. Sind Vulkane also die natürliche CO_2 -Quelle, so ist die Gesteinsverwitterung der Reaktor, und Kalkablagerungen in den Ozeanen bilden die CO_2 -Senke.

Seit der frühen Erdgeschichte sind die vulkanischen CO_2 -Emissionen immer mit der »Verwitterungs-Ozean-Senke« im Gleichgewicht. Allein das gewährleistet, dass sich die Atmosphäre – und damit das Klima – nicht aus der lebenswerten Zone herausbewegt. Nun muss sich diese Balance nicht jedes Jahr exakt einstellen. Es genügt, wenn sie über einen bestimmten Zeitraum besteht, und zwar ungefähr so lange, wie sich ein CO_2 -Molekül im Mittel in der Atmosphäre aufhält, nachdem es aus einem Vulkan dorthin gelangt ist und bevor es durch die Verwitterung wieder aus ihr verschwindet. Diese Zeitspanne betrug im Holozän vor der Industrialisierung etwa 250 000 Jahre. Das ist immer noch ziemlich kurz, wenn man bedenkt, dass die Erde über Hunderte von Millionen Jahren ihren CO_2 -Gehalt und damit das Klima stabil gehalten hat. Wenn der Zyklus eines CO_2 -Teilchens aber so kurz ist, würde dann nicht eine Verdoppelung der Verwitterung alles Kohlenstoffdioxid in ein paar hunderttausend Jahren entzogen haben? Oder hätte umgekehrt eine dauerhafte Zunahme der vulkanischen Emissionen nicht die Erde in eine Wärmehölle verwandeln müssen?

Der geologische CO₂-Kreislauf

Links die Quelle: vulkanische Emissionen. Oben rechts der Reaktor: die Verwitterungszone (hier im chilenischen Küstengebirge). Der Boden ist bereits stark verwittert, aber Granitblöcke verbleiben und können chemisch reagieren. Unten rechts die Senke: Korallenriffe.



UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY



FRIEDHELM VON BLANKENBURG, GFZ POTSDAM

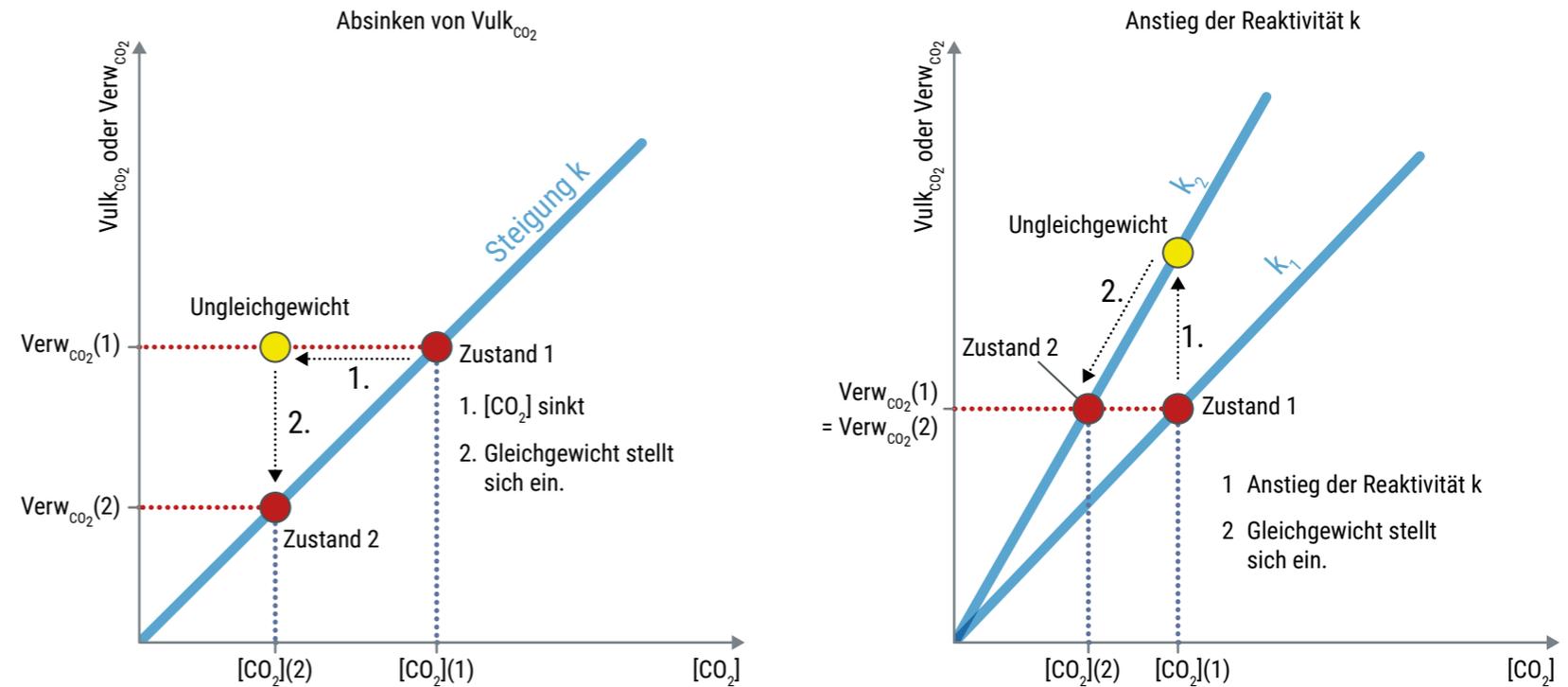


MIHTIANDER / GETTY IMAGES / ISTOCK

Ein Feedback-Prozess wie in einem Kühlschrankschrank reguliert die Erdtemperatur

Der Mechanismus, der Entzug und Emissionen von CO_2 balanciert, ist eine Rückkopplung, ein Feedback. Solche Regelungskreisläufe kennt man aus technischen Systemen, beispielsweise in einem Kühlschrank: Entnimmt jemand ein Getränk, wird es im Inneren des Geräts durch die eindringende Außenluft wärmer. Das elektronische Thermometer teilt daraufhin dem Kompressor mit, die Kühlflüssigkeit zu kühlen. Dieser bleibt so lange in Aktion, bis der Innenraum wieder kalt ist, worauf sich der Kompressor ausschaltet.

Auf der Erde bewirkt die Gesteinsverwitterung das Feedback. Angenommen, erhöhte tektonische Aktivität führt zu mehr Vulkanismus an den Plattengrenzen. Dadurch gelangt mehr CO_2 in die Atmosphäre. Über den Treibhauseffekt steigt die Erdtemperatur, und die Böden erwärmen sich. Außerdem verdunstet in den Ozeanen mehr Wasser, und es regnet demnach mehr auf die Kontinente. Diese drei Effekte beschleunigen die Gesteinsverwitterung. Dadurch wird der Atmosphäre wiederum mehr CO_2 entzogen, und der Treibhauseffekt verringert sich,



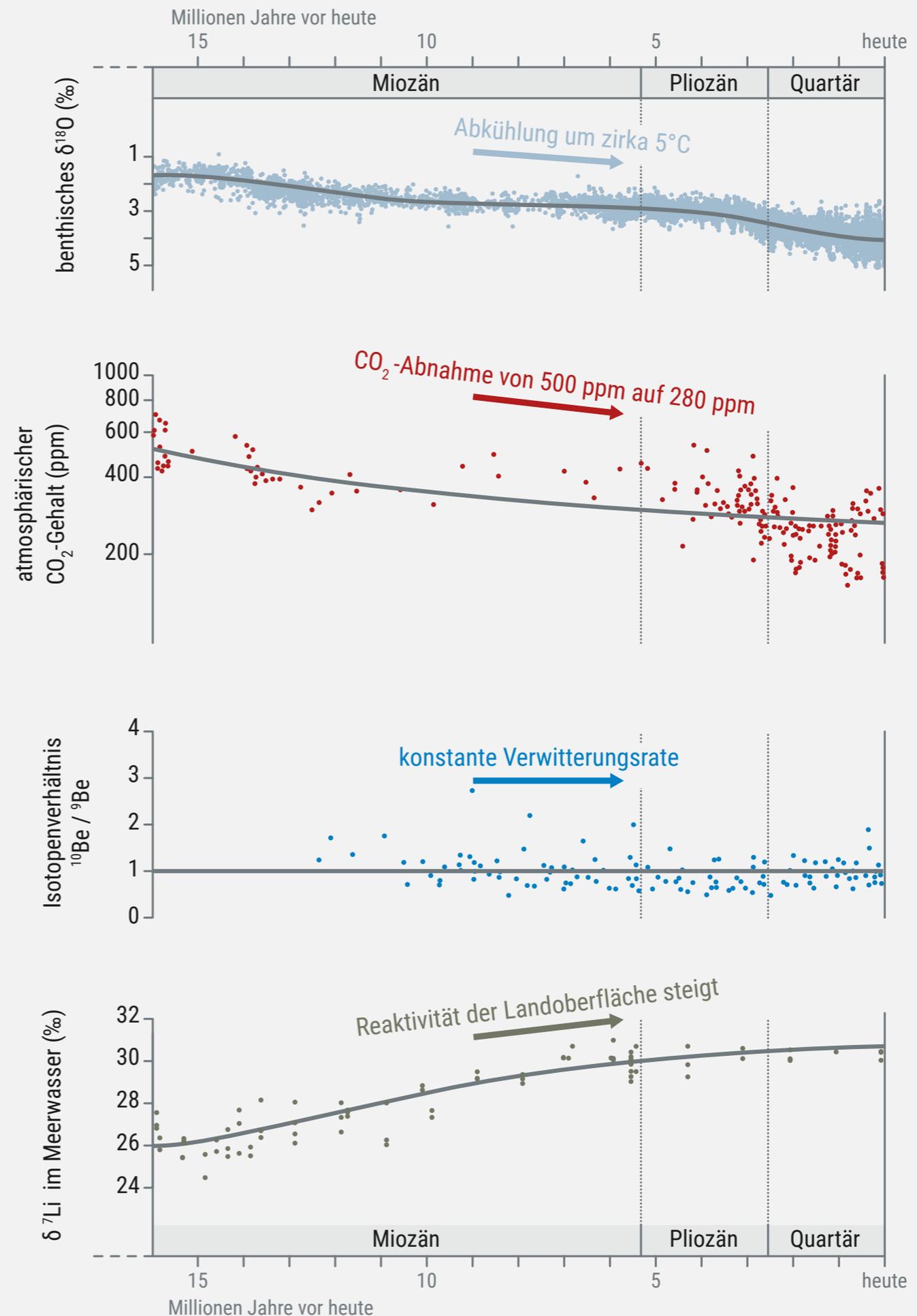
SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / EMDE-GRAFIK, NACH: F. VON BLANCKENBURG, GFZ POTSDAM

Rückkopplung im Koordinatensystem

Die mathematische Darstellung des Feedbacks zeigt, wie eine bestimmte vulkanische Emission durch die Verwitterungsreaktionskonstante k die atmosphärische CO_2 -Konzentration $[\text{CO}_2]$ beeinflusst, und der Verbrauch von CO_2 durch Verwitterung werden beide auf der y-Achse gezeigt. Sind vulkanische CO_2 -Emissionen und der CO_2 -Entzug durch Verwitterung im Gleichgewicht, sind beide Größen auf der y-Achse zudem identisch. Im linken Diagramm sehen wir einen Abfall von (1 auf 2). Vorübergehend ist damit der Kreislauf aus der Balance (gelber Punkt). Die Verwitterung nimmt durch das Feedback ab, bis sich das System erneut im Gleichgewicht befindet (Position 2), jedoch bei niedrigerer $[\text{CO}_2]$. Rechts sehen wir, was geschieht, wenn die Reaktionskonstante k ansteigt, etwa durch erhöhte Gebirgserosion (1 auf 2). Dann ist vorübergehend höher als (gelber Punkt). Doch die Balance wird auch hier wiederhergestellt, weil $[\text{CO}_2]$ fällt, so dass zum Schluss die gleiche Verwitterungsrate wie vorher herrscht, allerdings bei niedrigerer $[\text{CO}_2]$

Zeichen der Veränderung

In den letzten 15 Millionen Jahren der Erdgeschichte hat sich die Klimaregulierung durch ein stärkeres Feedback verändert. 1. Es wurde kälter (dies wissen wir aus stabilen Sauerstoffisotopen). 2. Die atmosphärische CO₂-Konzentration nahm ab (dies wissen wir aus stabilen Borisotopen). 3. Die Verwitterungsrate blieb trotzdem konstant (dies wissen wir aus dem Verhältnis des kosmogenen ¹⁰Be und des stabilen ⁹Be-Isotops im Vergleich zum heutigen ¹⁰Be/⁹Be-Verhältnis im Ozeanwasser von 0,2 bis 1,4 × 10⁻⁷). 4. Dennoch hat sich die chemische Reaktivität der Landoberfläche erhöht (dies wissen wir aus stabilen Lithiumisotopen).



so dass sich die Erde wieder abkühlt. Der Temperaturregler funktioniert aber auch andersherum: Wachsen zum Beispiel die Eisschilde auf den Polkappen, erhöht sich die Albedo der Erde, und es wird kälter. Weil Wasserverdunstung und Niederschlag abnehmen, verlangsamt sich jedoch gleichzeitig die Gesteinsverwitterung. Weniger CO₂ wird der Atmosphäre entzogen, und die Erde erwärmt sich wieder. Dieser natürliche Regelungskreislauf ist der faszinierende geologische Thermostat der Erde.

Doch das bedeutet keineswegs, dass die CO₂-Menge in der Atmosphäre, und damit die Erdtemperatur, stets gleichförmig war. Im Gegenteil, die Antriebskräfte des Thermostats haben sich ständig geändert: Durch Anstieg und Abfall vulkanischer Emissionen oder aber durch die Bildung von Gebirgen, welche die Verwitterung erhöhen, hat der Kohlenstoffdioxidgehalt fortlaufend variiert. Wie CO₂ zwischen Quellen und Senken balanciert wird, lässt sich in einer einfachen Raten-gleichung darstellen:

$$\begin{aligned} d\text{CO}_2/\text{dt} &= \text{Vulk}_{\text{CO}_2} - \text{Verw}_{\text{CO}_2} \\ &= \text{Vulk}_{\text{CO}_2} - k \cdot [\text{CO}_2] \end{aligned}$$

In dieser Gleichung steht $d\text{CO}_2/\text{dt}$ für die Änderung der Menge des atmosphärischen CO₂ mit der Zeit. $\text{Vulk}_{\text{CO}_2}$ gibt die Menge an CO₂ an, die der Atmosphäre pro Zeiteinheit durch Vulkanausbrüche zugeführt wird, während $\text{Verw}_{\text{CO}_2}$ das CO₂ bezeichnet, das ihr durch Verwitterung entzogen wird. $[\text{CO}_2]$ steht für die Konzentration von Kohlenstoffdioxid in der Atmosphäre, und die Reaktionskonstante k beschreibt die Wahrscheinlichkeit, mit der die Atmosphäre ein CO₂-Molekül durch die Gesteinsverwitterung verliert.

Scheinbare Balance

Wenn CO₂-Emissionen und CO₂-Senken, also $\text{Vulk}_{\text{CO}_2}$ und $\text{Verw}_{\text{CO}_2}$ in Balance sind – und das müssen sie über den genannten Zeitraum von rund 250 000 Jahren innerhalb weniger Prozent gewesen sein, um eine lebenswerte Erdtemperatur zu gewährleisten –, ist $d\text{CO}_2/\text{dt}$ gleich null. Diesen Zustand bezeichnet man als das »stationäre Gleichgewicht«: Obwohl CO₂ zwischen Vulkanen, Atmosphäre und Verwitterung ständig ausgetauscht wird, bleibt seine Konzentration in der Atmosphäre $[\text{CO}_2]$ annähernd konstant.

Zwei Faktoren können diese Balance stören, so dass sich die mittlere Konzentration von CO₂ ändert: ein plötzlicher Anstieg oder Abfall der vulkanischen Emissionen oder eine Veränderung der Verwitterung. Sinken beispielsweise die vulkanischen Emissionen, stellt sich $[\text{CO}_2]$ auf ein niedrigeres Niveau ein. Durch das Feedback wird daraufhin aber das Gleichgewicht wiederhergestellt: Die Verwitterung nimmt so lange ab, bis das Gleichgewicht erreicht ist – nun ist jedoch die atmosphärische CO₂-Konzentration geringer. Die Dauer des »Ungleichgewichtszustands« beträgt die besagten 250 000 Jahre.

Die Erdgeschichte kennt solche Ereignisse. Beispielsweise wissen wir, dass es im frühen Eozän, vor 52 Millionen Jahren, auf der Erde um etwa zehn Grad Celsius wärmer war als im späten Eozän vor 35 Millionen Jahren und dass die Atmosphäre zu ersterem Zeitpunkt rund 3000 ppm (millionstel Teile) Kohlenstoffdioxid enthielt. In vorindustrieller Zeit war das CO₂-Niveau hingegen niedrig: bei 280 ppm.

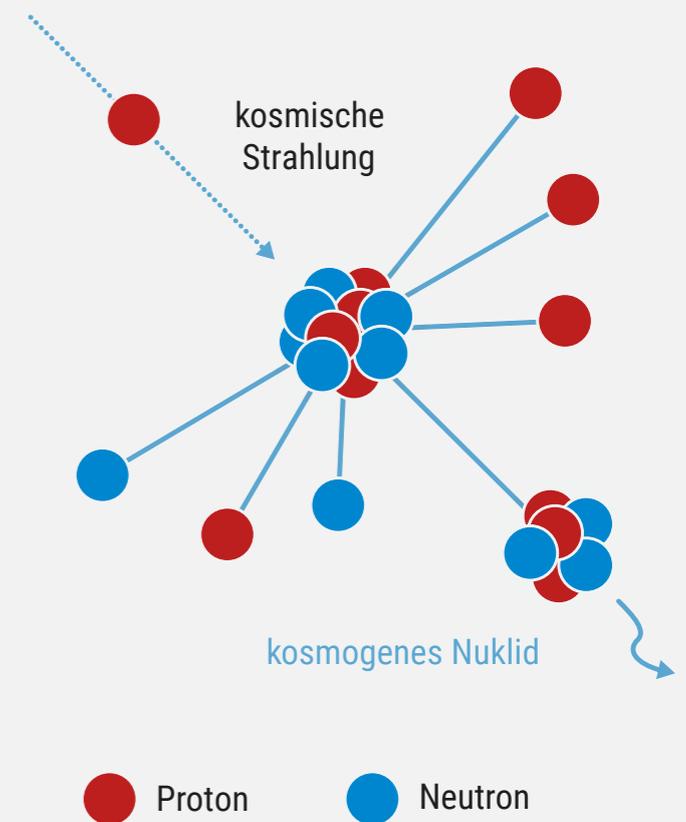
In den letzten 15 Millionen Jahren hat die globale Jahrestemperatur stetig abgenommen – allein in den vergangenen 5

$^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ als Anzeiger für die Verwitterungsrate: Beryllium (Be) kommt in der Erde als seltenes Spurenelement mit eigentlich nur einem Isotop vor: ^9Be . Das schwerere ^{10}Be hingegen ist ein »kosmogenes« Isotop, das in der Atmosphäre und an der Erdoberfläche ständig in sehr geringen Mengen durch kosmische Strahlung entsteht. Weil ^{10}Be außerdem radioaktiv ist und eine Halbwertszeit von 1,4 Millionen Jahren besitzt, gibt es dieses Isotop innerhalb der inneren Erde nicht, da die Erde viel älter ist. Fällt jedoch Regen auf die Ozeane oder die Kontinente, sammelt sich dort frisches ^{10}Be an. Wir kennen die Anzahl der ^{10}Be -Atome, die pro Jahr auf der Erdoberfläche ankommen, ziemlich genau. Das stabile Isotop ^9Be hingegen wird bei der Verwitterung von Gestein freigesetzt und gelangt über Flüsse in geringen Mengen in die Ozeane, wo es sich mit ^{10}Be mischt. Je höher die globale Verwitterungsrate, desto niedriger ist das $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ -Verhältnis im Ozeanwasser, aus dem beide Isotope in Sedimente der Tiefsee eingelagert werden. Löst man sie daraus wieder auf und korrigiert das ^{10}Be für radioaktiven Zerfall, erhält man die kontinentale Verwitterungsrate aus der Zeit der Sedimentablagerung. Diese Methode zur Bestimmung der Verwitterungsrate haben wir in unserem Geochemielaboratorium kürzlich entwickelt.

$^7\text{Li}/^6\text{Li}$ als Anzeiger für die Reaktivität der Landoberfläche: Löst sich Gestein durch Verwitterung auf, gelangen die darin enthaltenen stabilen Lithiumisotope ^7Li und ^6Li in das Wasser der Poren des verwitternden Gesteins. Aus diesem Porenwasser bilden sich Tonminerale, die ein wichtiger Bestandteil aller Böden sind. Dabei nehmen sie durch die Isotopenfraktionierung bevorzugt ^6Li auf, und zwar 15 Tausendstel mehr als ^7Li . Das Porenwasser ist also verarmt an ^6Li . Je mehr ursprüngliche Minerale bei der Verwitterung noch vorhanden sind, desto mehr Tonminerale können sich bilden und desto höher wird das $^7\text{Li}/^6\text{Li}$ -Verhältnis des Porenwassers. Ist der Grad der Verwitterung hingegen sehr hoch (ist die Erdoberfläche also unreaktiv), werden Tonminerale wieder aufgelöst, so dass das $^7\text{Li}/^6\text{Li}$ -Verhältnis des Porenwassers niedrig ist. Über Grundwasser gelangt dieses Lithium in die Flüsse und von dort in die Ozeane, wo es sich mit dem Lithium mischt, das durch heiße Lösungen an Mittelozeanischen Rücken freigesetzt wird. Auch dieses Element wird in kleinsten Mengen in marine Kalkschalen eingebaut. Je höher das $^7\text{Li}/^6\text{Li}$ -Verhältnis in den Kalkschalen, desto höher war demnach die Reaktivität der Landoberfläche in der Vergangenheit.

Messtechnik: Isotopenverhältnisse werden am Massenspektrometer gemessen. Für die Bestimmung von $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ löst man dazu Kalkschalen direkt am Gasmassenspektrometer auf und bestimmt das freigesetzte CO_2 . $^{11}\text{B}/^{10}\text{B}$ und $^7\text{Li}/^6\text{Li}$ werden an einem speziellen Massenspektrometer, dem so genannten Multikollektor induktiv gekoppelten Massenspektrometer (ICP-MS) nach Auflösen der Probe und chemischer Separation als Ionen (B^+ und Li^+) gemessen. Da ^{10}Be nur in geringen Mengen vorhanden ist, ermittelt man es nach Auflösen und chemischer Abtrennung an einem hochempfindlichen Beschleuniger-Massenspektrometer, während stabiles ^9Be mit einem optischen ICP-Spektrometer oder ICP-MS separat bestimmt wird.

Produktion aus kosmischer Strahlung



Millionen Jahren um etwa 3 Grad Celsius. Infolgedessen bildeten sich vor 2,5 Millionen Jahren riesige Eisschilde auf der nördlichen Hemisphäre aus, ein Prozess, der als quartäre Vereisung bekannt ist.

Über die Gründe für diese Abkühlung tobt in den Geowissenschaften seit mehr als 20 Jahren eine lebhafte Debatte: Eine beliebte Hypothese besagt, dass durch das Aufsteigen der großen Gebirge wie des Himalaja, der Anden oder der Alpen die Erosion und damit auch die Verwitterungsrate global zugenommen hat. Dadurch habe auch der Gehalt an CO_2 in der Atmosphäre abgenommen, so dass es kälter wurde.

Der Haken an einer beliebten Hypothese

Der berühmte Geochemiker Bob Berner (1935–2015) von der Yale University und sein Kollege Ken Caldeira von der Stanford University haben 1997 allerdings auf einen großen Haken an dieser Hypothese aufmerksam gemacht: Solche beträchtlichen Änderungen in der Verwitterung hätten bei gleich bleibenden vulkanischen Emissionen die empfindliche CO_2 -Balance sehr schnell völlig aus dem Gleichgewicht geworfen, so dass kaum

noch CO_2 übrig geblieben wäre. Eine total vereiste Erde wäre die Folge gewesen. Dies war jedoch nicht der Fall.

Um herauszufinden, wo der Fehler bei der Hypothese liegt, müssen wir genauer wissen, was in den letzten 15 Millionen Jahren in der Atmosphäre und an der Landoberfläche passiert ist. Solche Kenntnisse über die Geschichte des Erdklimas gewinnen Geologen aus so genannten Sedimentarchiven. Indem sie Ablagerungen bekannten Alters analysieren, erhalten sie Aufschluss über verschiedene Parameter wie die Temperatur der Erdoberfläche oder die Zusammensetzung der Atmosphäre. So lässt sich beispielsweise aus Messungen der stabilen Sauerstoffisotope in Kalkschalen am Meeresgrund ermitteln, wie groß die Eismassen waren, die die Erde zu einem bestimmten Zeitpunkt bedeckten. Das wiederum lässt Rückschlüsse auf die Temperatur zu: Sie ist kontinuierlich gesunken.

Aus Messungen der stabilen Borisotope in Ozeansediment wissen wir indes, dass die Konzentration von Kohlendioxid in der Atmosphäre in den letzten 15 Millionen Jahren in der Tat abgenommen hat: von rund 550 ppm auf

280 ppm in der Holozänzeit, wo sie von vor 10000 Jahren bis zu Beginn der Industrialisierung Mitte des 18. Jahrhunderts relativ konstant blieb. Diese Reduktion reichte aus, um die Erde deutlich abzukühlen. Ein großes Rätsel aber gab in den vergangenen Jahren ein neuer Isotopenindikator auf, den ich mit meiner Forschungsgruppe im Jahr 2014 entwickelt habe: das Verhältnis der Berylliumisotope $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ in Ozeansediment. Es zeigt die Geschwindigkeit der vergangenen Gesteinsverwitterung an. Die Verwitterung war gemäß diesem Indikator über den Zeitraum, in dem die Abkühlung stattfand, konstant. Wir wissen außerdem aus plattentektonischen Rekonstruktionen, dass die vulkanischen Emissionen in der betreffenden Zeit nicht abgenommen haben.

Wie können jedoch die CO_2 -Konzentration und die Temperatur abnehmen, wenn sich weder Verwitterung noch vulkanische Emissionen verändert haben? Jeremy Caves von der ETH Zürich, Dan Ibarra von der Stanford University und ich haben das Feedback-Konzept genutzt, um eine Hypothese zu liefern: k , die Reaktionskonstante, muss sich erhöht ha-

ben. Nimmt k bei einer gegebenen CO_2 -Konzentration zu, so steigt dadurch vorübergehend auch die Verwitterungsrate, und das System gerät aus dem Gleichgewicht. Doch weil die vulkanische Aktivität nicht gleichzeitig zunimmt, wird nicht genügend CO_2 nachgeliefert, so dass sich die Verwitterung wieder verlangsamt. Das Gleichgewicht pendelt sich bei der vorherigen Verwitterungsrate ein – nun ist jedoch der CO_2 -Gehalt niedriger. Die Balance hat sich also bei den gleichen Umsätzen, aber geringerem Kohlenstoffdioxidgehalt eingestellt. Wegen Letzterem kühlt es sich ab, obwohl die Verwitterungsrate gleich groß ist wie zuvor. Das erklärt auch die Befunde aus den Berylliumisotopen, die eine konstante Verwitterungsrate während der Abkühlung anzeigen. Es bleibt die Frage: Was hat die Reaktionskonstante k geändert?

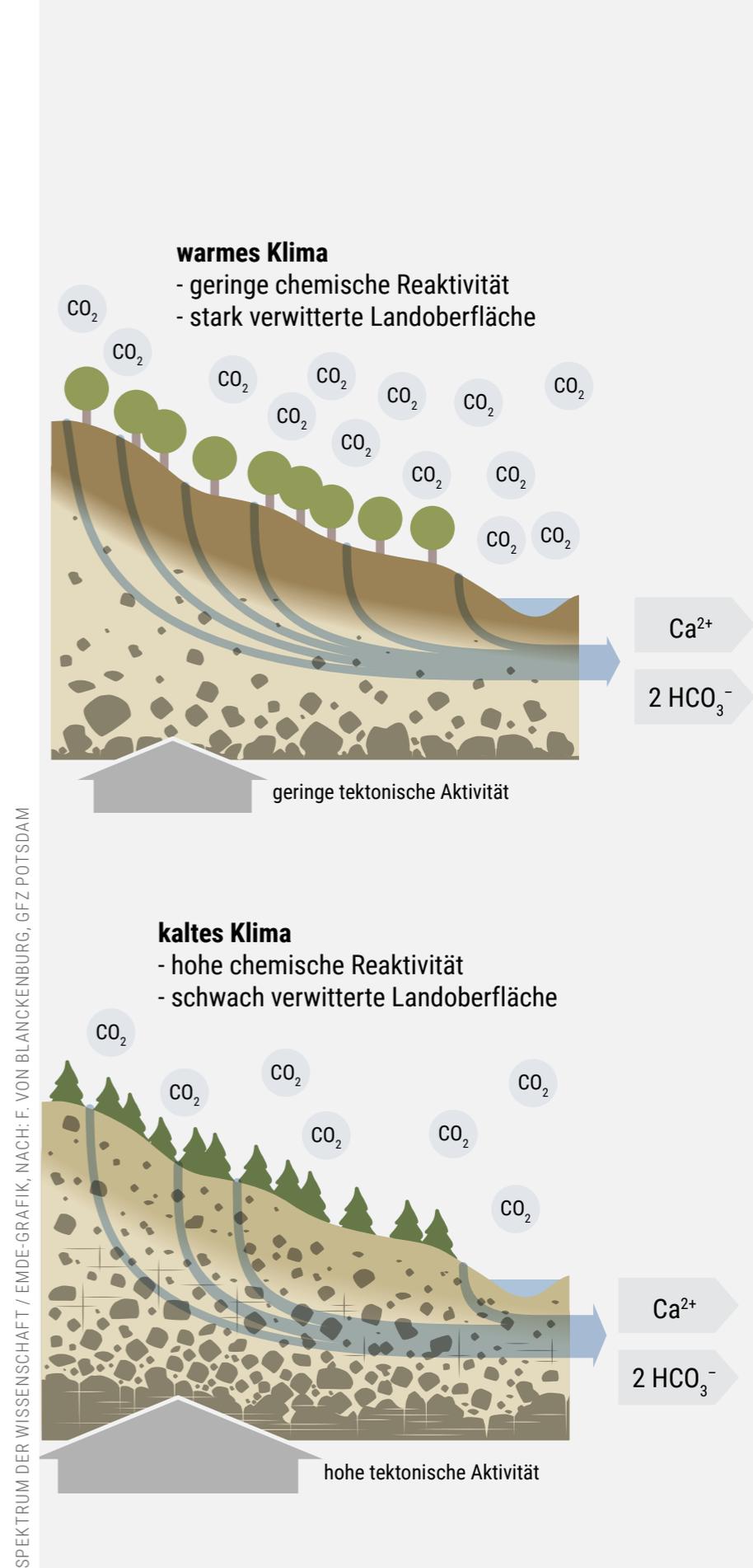
Die Landoberfläche kann mehr oder weniger bereitwillig mit CO_2 reagieren

Auf der Suche nach einer Erklärung kommt die Landoberfläche ins Spiel. Diese Zone reicht bis einige Dutzend Meter tief und wird auch als »kritische Zone« der Erde bezeichnet. In ihr laufen die

wichtigen Umwandlungen von Gestein in Boden ab. Abhängig von den Mineralen, die in diesem Bereich vorhanden sind, unterscheidet man mehr und weniger reaktive Verwitterungszonen. Erstere können CO_2 schon bei einem geringen Gehalt in der Atmosphäre effizient binden, und die Reaktionskonstante k ist hoch. Eine wenig reaktive Verwitterungszone hingegen hat ein niedriges k und somit eine geringere Wahrscheinlichkeit, mit CO_2 zu reagieren.

Ganz praktisch bestimmt die Menge der vorhandenen »primären« Minerale die Reaktivität. Dies sind solche, die schon im ursprünglich gebildeten Gestein enthalten waren, wie Feldspat, Bio-

DIE »REAKTIVITÄT« DER LANDOBERFLÄCHE | Befinden sich mehr unverwitterte silikatische Mineralkörner wie Feldspat oder Glimmer im Boden, kann dieser mit wenig CO_2 in der Atmosphäre ebenso gut chemisch reagieren wie ein bereits stark verwitterter Boden mit viel CO_2 in der Atmosphäre. Die Verwitterungsrate und somit die Menge an CO_2 , die der Atmosphäre pro Zeitintervall entzogen wird, bleibt jedoch gleich.



AMA-DABLAM-PANORAMA | Die mächtigen Gipfel des Himalajagebirges ragen teils über 8000 Meter in die Höhe. Innerhalb von Jahr-millionsen verwittert das Gestein, wird zu Boden und durch Erosion abgetragen. Bei der Verwitterung wird CO₂ gebunden – allerdings sehr langsam.



tit-Glimmer, Hornblende oder Pyroxen. In einer reaktiven Landoberfläche befinden sich so viele dieser Silikatminerale, dass bereits wenige Mengen an CO_2 mit ihnen effizient reagieren können: Das Gestein verwittert. In der Folge entstehen so genannte Sekundärminerale und mit ihnen der Boden. Reaktive Landoberflächen befinden sich heute in den Hoch- und Mittelgebirgen, wie im Himalaja, den Alpen, dem Schwarzwald oder in ehemals vereisten Gebieten etwa in Nordeuropa oder Amerika. Tektonische Bewegungen und eine mittelhohe Erosionsrate reichen aus, um die Landschaft laufend so zu verjüngen, dass stets genügend frische Primärminerale zur Reaktion zur Verfügung stehen und die nicht reaktiven Sekundärminerale oben abgetragen werden.

In einer wenig reaktiven Verwitterungszone hingegen sind die »frischen« Primärminerale bereits verbraucht. An ihrer Stelle befinden sich vor allem sekundäre, die sich im Lauf der Verwitterung gebildet haben, wie Tonminerale (Kaolinit, Illit) oder Eisenoxide. Um diese noch weiter zu verwittern, sind viel Wasser, Wärme und CO_2 vonnöten. Solche

stark verwitterten Landoberflächen findet man in den tropischen und tektonisch inaktiven Gebieten Afrikas, Brasiliens oder Australiens. Sie dominierten die Erde anscheinend vor 15 Millionen Jahren.

Einen Hinweis darauf, wie aktiv die Landoberfläche in der Vergangenheit war, liefert eine relativ neue Isotopenmethode: Weil Lithium (Li) in Spuren in Gesteinen vorkommt, wird es bei der Verwitterung freigesetzt und gelangt in das Porenwasser, aus dem sich Tonminerale bilden. Dabei wird in Letztere bevorzugt das leichtere ^6Li eingebaut. Entstehen mehr Tonminerale mit ^6Li , wird verhältnismäßig mehr ^7Li über das Grundwasser in Flüsse und Ozeane transportiert. Aus dem Verhältnis $^7\text{Li}/^6\text{Li}$ in marinen Kalkschalen, die sich aus dem Ozeanwasser bilden, können wir dadurch auf die Reaktivität der Landoberfläche in der Erdgeschichte schließen. Und tatsächlich hat das Verhältnis der Lithiumisotope ($^7\text{Li}/^6\text{Li}$) im Ozeansediment in den letzten 15 Millionen Jahren zugenommen, was bedeutet, dass die Reaktivität der Landoberfläche im globalen Mittel stetig gestiegen ist.

Zwei CO_2 -Zyklen

Bereits 1845 erkannte der französische Bergbauingenieur Jacques-Joseph Ébelmen (1814–1852), dass der im Artikel beschriebene CO_2 -Kreislauf ein geologischer ist, der langsam verläuft, aber wegen seiner ozeanischen Kalkgesteinssenke das Erdklima langfristig stabilisiert. Nur 0,1 Milliarden Tonnen Kohlenstoff entzieht dieser Prozess der Atmosphäre pro Jahr. Viel größer ist hingegen der organische Kohlenstoffzyklus: Landpflanzen entfernen durch Fotosynthese jährlich 60 Milliarden Tonnen Kohlenstoff aus der Atmosphäre, weitere 90 Milliarden Tonnen entziehen ihr Gas-Wasser-Austausch und Kleinstlebewesen im Ozean. Dieser gigantische CO_2 -Kreislauf ist jedoch geschlossen, weil der organische Kohlenstoff mit der gleichen Rate oxidiert wird, wie er durch Fotosynthese fixiert wird. Deshalb betrachten wir ihn hier für die geologische Temperaturregelung nicht. Er kann dennoch das CO_2 -Budget der Atmosphäre beeinflussen, wenn – wie in der Karbonzeit – große Mengen organischen Kohlenstoffs in Sedimente eingelagert werden, die später zu Kohle werden. Mit 10 Milliarden Tonnen Kohlenstoff (sie entsprechen 37 Milliarden Tonnen CO_2) werfen heute allerdings die massiven zusätzlichen CO_2 -Emissionen aus fossilen Brennstoffen auch den organischen CO_2 -Zyklus aus der Balance.

Wir schätzen, dass bei gleich bleibender Verwitterungsrate eine Verdopplung der Erosionsrate genügt haben könnte, um diese erhöhte Reaktivität herzustellen. Das hat die Erde in den letzten 15 Millionen Jahren zunehmend abgekühlt und letztendlich die Vereisung der nördlichen Hemisphäre eingeleitet. Was wiederum die Erosion verändert hat, ist noch offen. Ein guter Kandidat sind nach wie vor die aufsteigenden Hochgebirge. Aber auch die Bildung kleiner Täler an neuen tektonischen Gräben, beispielsweise des ostafrikanischen Rift-Grabens oder des Rheingrabens, und die Freilegung reaktiverer Gesteine sind Möglichkeiten. Ebenso könnten Änderungen in der Vegetation oder beim Anwachsen und Schmelzen von Gletschern eine Rolle gespielt haben – alle Prozesse also, welche die Landoberfläche durchmischt und dabei reaktivere Primärminerale in die Verwitterungszone transportiert haben.

Fest steht, dass der geologische Thermostat sowohl die Stabilität des Erdklimas über die gesamte Erdgeschichte garantiert und gleichzeitig Fluktuationen innerhalb des lebenswerten Bereichs zugelassen hat.

Jenseits der Regulierungsmöglichkeiten

Eine der größten Störungen dieser empfindlichen Balance steht uns unmittelbar bevor. Durch den Verbrauch fossiler Brennstoffe hat der Mensch den CO₂-Anteil in der Atmosphäre etwa seit dem Jahr 1900 bereits von 280 ppm auf mehr als 400 ppm erhöht. Handeln wir nicht sofort, werden wir nach dem pessimistischsten Szenario des Weltklimarats (IPCC) im Jahr 2100 eine Erdatmosphäre mit 1000 und 100 Jahre später sogar mit 2000 ppm CO₂ erleben. Gegen die Menge des CO₂ wie auch die Geschwindigkeit, mit der sie steigt, werden die natürlichen Regulierungsmechanismen nicht schnell genug ankommen. Eine Erde, wie der Mensch sie nie gekannt hat, wird die Folge sein.

Die Enormität dieser Entwicklung wird vielleicht am deutlichsten, wenn man betrachtet, wie lange es dauern wird, bis die Erde den CO₂-Gehalt auf das vorindustrielle Niveau zurückgebracht haben wird. Der Klimawissenschaftler David Archer von der University of Chicago und der Hamburger Klimamodellierer Victor Brovkin vom Max-Planck-Institut für Meteorologie haben das 2008 berechnet: Die Absorption von Kohlenstoffdi-

oxid durch die Ozeane wird dessen Konzentration in der Atmosphäre in rund 3000 Jahren ausgehend von rund 1400 ppm auf 600 ppm reduziert haben. Nach 20000 Jahren wird die Verwitterung von Karbonatgestein den CO₂-Anteil auf 450 ppm gesenkt haben, und erst nach 200000 bis 400000 Jahren wird die hier besprochene Verwitterung von Silikatgestein das ursprüngliche Niveau von 280 ppm wiederhergestellt haben. Ohne Zweifel wäre es besser, wenn der Mensch schnellstmöglich die Finger von diesem unvorstellbaren Experiment ließe. ↪

(Spektrum der Wissenschaft, März 2020)

Archer, D., Brovkin, V.: The millennial atmospheric lifetime of anthropogenic CO. *Climatic Change* 90, 2008

Berner, R. A., Caldeira, K.: The need for mass balance and feedback in the geochemical carbon cycle. *Geology* 25, 1997

Caves Rugenstein, J. K. et al.: Neogene cooling driven by land surface reactivity rather than increased weathering fluxes. *Nature* 571, 2019

Galvez, M. E., Gaillardet, J.: Historical constraints on the origins of the carbon cycle concept. *Comptes Rendus Geoscience* 344, 2012

Von Blanckenburg, F., Bouchez, J.: River fluxes to the sea from the ocean's Be-10/Be-9 ratio. *Earth and Planetary Science Letters* 387, 2014



KLIMAREKONSTRUKTIONEN

HEUTE ERWÄRMT
SICH DIE **GANZE**
ERDE AUF EINMAL

von Scott St. George

Die aktuelle Aufheizung ist fast rund um den Globus zu beobachten. Damit unterscheidet sie sich grundsätzlich von anderen Temperaturschwankungen in den letzten 2000 Jahren, wie Klimarekonstruktionen zeigen.

In der Erdgeschichte gab es immer wieder Epochen, in denen es für längere Zeit wärmer, kälter, feuchter oder trockener wurde. Während der letzten 2000 Jahre waren dies vor allem die mittelalterliche Klimaanomalie, eine warme, trockene Periode etwa von 950 bis 1250 n. Chr., sowie die kleine Eiszeit, eine kühle Phase vom 16. bis zum 19. Jahrhundert. Viele Menschen nehmen an, diese Phasen seien weltweit synchron verlaufen. Doch ein Team um Raphael Neukom von der Universität Bern hat 2019 gezeigt, dass sich diese und frühere Klimaepochen der vergangenen 2000 Jahre wesentlich kleinräumiger bemerkbar machten als die aktuelle, menschengemachte Erwärmung, die fast überall auf der Erde nachweisbar ist.

Scott St. George ist Professor für Geografie und forscht an der University of Minnesota in Minneapolis.

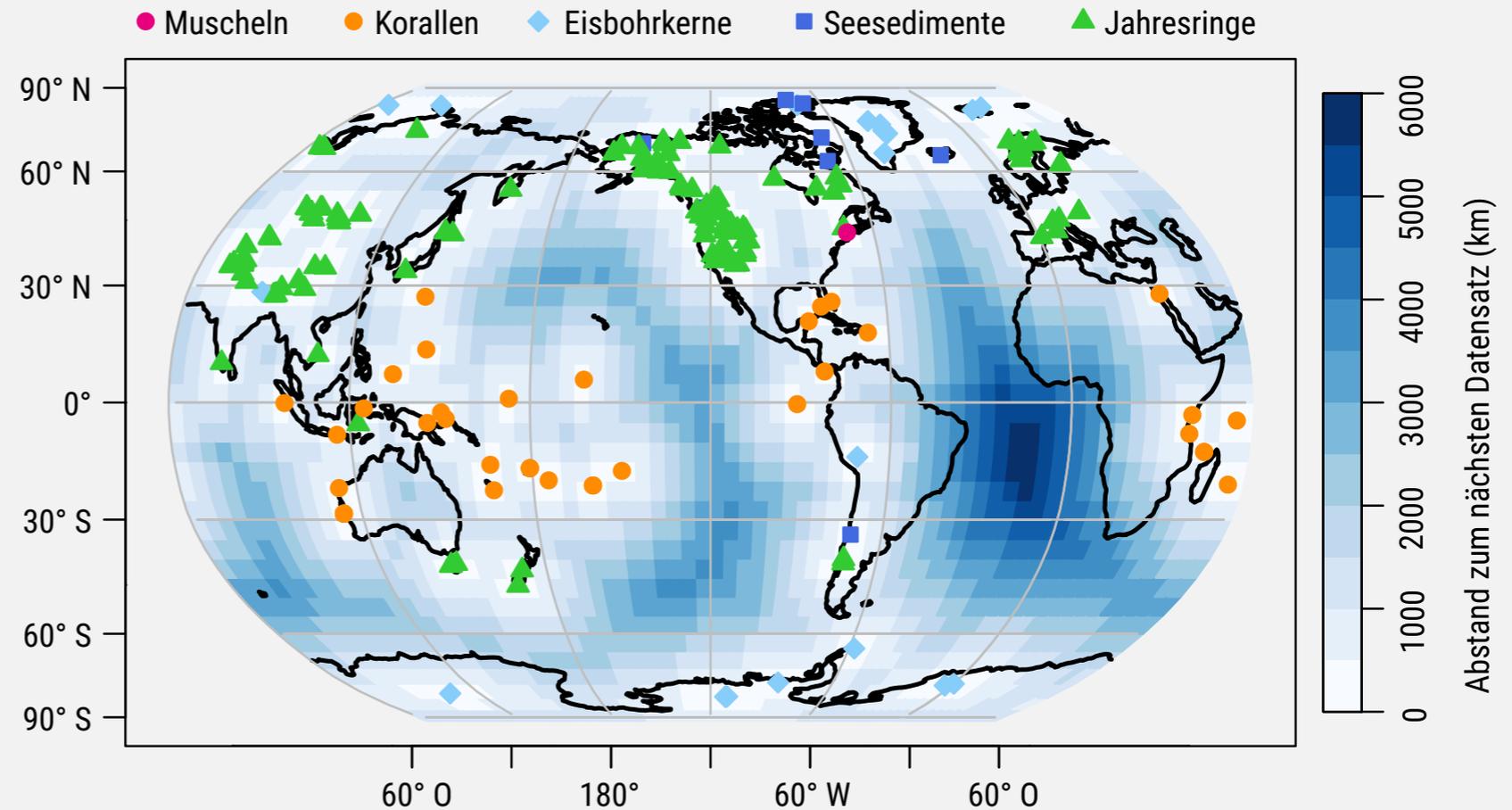
Da instrumentelle Temperaturmessungen für die gesamte Erde erst seit etwa 1850 vorliegen, rekonstruieren Fachleute das Klima in der Zeit davor mit Hilfe anderer Daten. So lässt sich beispielsweise an der Breite und Holzdicke der Jahresringe von Bäumen ablesen, wie die Sommertemperaturen von Jahr zu Jahr schwankten. Insbesondere die Klimabedingungen in kühlen Regionen wie der Arktis oder in Gebirgen lassen sich damit nachvollziehen. Korallen wiederum geben Aufschluss darüber, welche Temperaturen in der Vergangenheit in den Ozeanen herrschten: Denn sie bauen beim Wachsen Spurenelemente aus dem Umgebungswasser in ihre Skelette ein. Da die chemische Zusammensetzung des Meerwassers von seiner Temperatur abhängt, sind Korallen Zeugen für Schwankungen der Ozeantemperatur. Zu weiteren geologischen und biologischen Archiven, deren Material, chemische

Grundlage der Arbeit sind fast 700 Datenreihen aus Klimaarchiven rund um die Welt

Zusammensetzung oder Struktur Informationen über die Temperatur liefern, zählen Sedimente von Seen, Gletschereis und Muscheln. Auch die daraus gewonnenen Datensätze verraten, welche Temperaturen vor Jahrhunderten bis Jahrtausenden herrschten. Weil die so gewonnenen Informationen stellvertretend für Klimadaten stehen, bezeichnen Wissenschaftler sie als Proxydaten (englisch proxy: Stellvertreter).

Die Gruppe um Neukom rekonstruierte anhand dieser Hinweise die Oberflächentemperaturen der letzten 2000 Jahre für den gesamten Erdball im Detail. Grundlage ihrer Arbeit sind Daten über ebendiese indirekten Anzeiger für die Temperatur, die das internationale Forschungskonsortium PAGES (Past Global Changes) zusammengetragen hat. Die von ihnen erstellte PAGES-2k-Datenbank enthält fast 700 Datenreihen, die auf der Analyse von Baumringen, Eisbohrkernen, Sedimenten, Korallen und Höhlenablagerungen basieren, außerdem auf urkundlichen Belegen und weiteren Archiven. Unter anderem dank der Vielzahl an Informationen konnten die Autoren die geografische Verbreitung un-

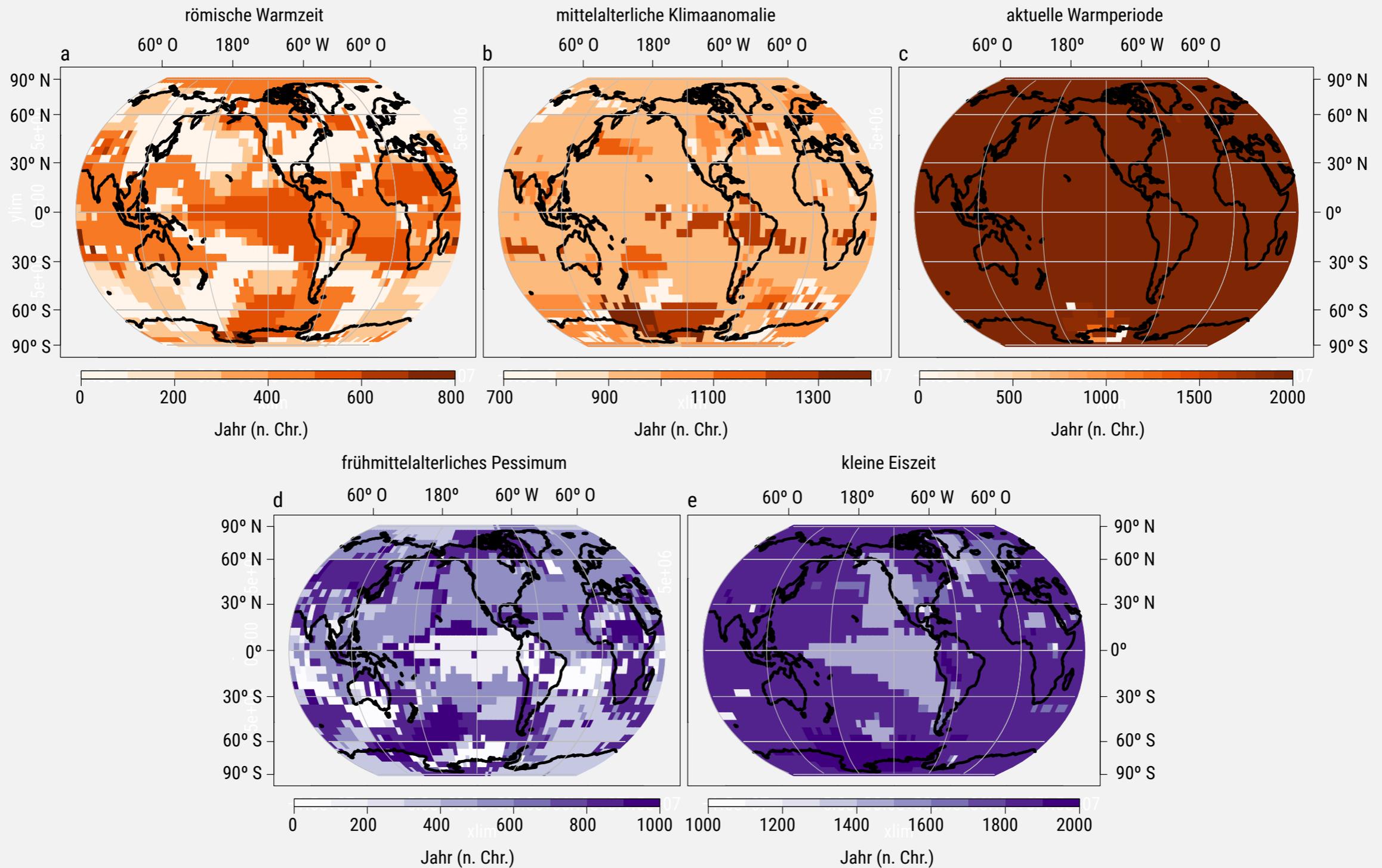
Oberflächentemperaturen



Forscher haben das Erdklima der letzten 2000 Jahre im Detail rekonstruiert. Dazu haben sie fast 700 Datenreihen ausgewertet, die vergangene Temperaturen anzeigen, beispielsweise Korallen und Jahresringe von Bäumen.

NEUKOM, R. ET AL.: NO EVIDENCE FOR GLOBALLY COHERENT WARM AND COLD PERIODS OVER THE PREINDUSTRIAL COMMON ERA. NATURE 571, 2019, FIG. 1; NUTZUNG GENEHMIGT VON SPRINGER NATURE / CCC

Klimageschichte



Für verschiedene Zeiträume haben die Forscher ermittelt, wann wo auf der Erde die höchsten sowie tiefsten Temperaturen herrschten. Vergangene Kalt- und Warmzeiten verliefen demnach nicht weltweit synchron, sondern teils um hunderte Jahre versetzt. Nur die aktuelle Erwärmung ist überall gleichzeitig spürbar.

gewöhnlich warmer und kalter Temperaturen rund um den Globus aufs Jahr genau ermitteln.

Demnach war zwar die kleine Eiszeit die kälteste Epoche des letzten Jahrtausends, die tiefsten Temperaturen traten jedoch an verschiedenen Orten zu unterschiedlichen Zeiten auf. Zwei Fünftel der Erde erlebten die eisigste Kälte um die Mitte des 19. Jahrhunderts, andere Regionen bereits einige Jahrhunderte früher. Und selbst auf dem Höhepunkt der mittelalterlichen Klima-anomalie wurden die Spitzentemperaturen nie auf mehr als 40 Prozent der Erdoberfläche gleichzeitig erreicht. Insofern ist die aktuelle globale Erwärmung einzigartig: Auf 98 Prozent der Erdoberfläche stellte das ausgehende 20. Jahrhundert die wärmste Phase der letzten 2000 Jahre dar. Den weiter fortschreitenden Temperaturanstieg zu Beginn des 21. Jahrhunderts haben die Autoren nicht berücksichtigt, da viele ihrer Proxydaten schon vor über zwei Jahrzehnten erhoben wurden.

Die Paläoklimatologen John Matthews und Keith Briffa warnten bereits 2005 davor, die kleine Eiszeit als »ununterbrochene, weltweit synchrone kalte Periode«

zu begreifen. Neukom und sein Team stützen diese Auffassung mit ihren neuen Erkenntnissen. Unabhängig von der Wahl der statistischen Instrumente, welche die Proxydaten den entsprechenden Temperaturmessungen zuordneten, kamen die Forscher dabei zu den gleichen Ergebnissen – was zeigt, dass ihre Schlussfolgerungen verlässlich sind.

Noch gibt es allerdings Grenzen bei der Interpretation der Proxydaten, die es erschweren, Warm- und Kaltphasen über die gesamten letzten zwei Jahrtausende hinweg miteinander zu vergleichen. Jahresringkalender, das am häufigsten genutzte Klimaproxy-Archiv in der von Neukoms Gruppe genutzten Datensammlung, können sehr langsame Klimaveränderungen über Jahrhunderte hinweg nur sehr unzuverlässig abbilden. Andere Hinweisgeber – vor allem Daten aus Meeres- und Seesedimenten – übertreiben wiederum Schwankungen, die sich innerhalb mehrerer Jahrzehnte bis zu etwa einem Jahrhundert abspielen.

Für wenige zehn Jahre umfassende Zeitrahmen können Fachleute jedoch sicherer beurteilen, wie und warum sich die Erde erwärmt oder abkühlt. In einer

weiteren Veröffentlichung zeigten die Wissenschaftler, dass im vorindustriellen Zeitalter (1300–1800) größere Vulkanausbrüche die Hauptursache für Umschwünge hin zu kalten Temperaturen waren, die dann einige Jahrzehnte lang anhielten. Veränderungen der Treibhausgaskonzentrationen hatten eine geringere, aber immer noch nachweisbare Wirkung. Das Team fand keine Anzeichen dafür, dass die Schwankungen der Sonneneinstrahlung die globale Durchschnittstemperatur über vergleichbare Zeiträume hinweg beeinflusst haben.

Im Allgemeinen bilden Klimamodelle die Schätzungen, die mittels Proxydaten für die Klimageschichte des letzten Jahrtausends gemacht werden, genau nach. Diese Modelle überschätzen jedoch das Ausmaß der Kälteeinbrüche, die auf die größten Vulkaneruptionen unserer Zeitrechnung folgten: die Ausbrüche des Samalas auf der indonesischen Insel Lombok (1257) und des Tambora auf der ebenfalls indonesischen Insel Sumbawa östlich von Java (1815). Daher lässt sich nicht mit Sicherheit sagen, wie heftig eine Kälteperiode ausfiele, die auf eine künftige, vergleichbare Eruption folgen würde.

Spektrum
der Wissenschaft

KOMPAKT

Die bekannte Maxime, dass sich das Klima stetig ändert, stimmt sicherlich. Doch selbst, wenn wir bis in die frühesten Tage des Römischen Reichs zurückblicken, finden wir kein Ereignis, das in Stärke oder geografischer Ausdehnung auch nur annähernd dem Temperaturanstieg der letzten Jahrzehnte entspricht. Dieser ist in seiner weltweiten Synchronizität beispiellos. ↩

(Spektrum der Wissenschaft, Februar 2020)

Neukom, R. et al.: No evidence for globally coherent warm and cold periods over the preindustrial Common Era. *Nature* 571, S. 2019

PAGES 2k Consortium: Consistent multidecadal variability in global temperature reconstructions and simulations over the Common Era. *Nature Geoscience* 12, 2019

nature

© Springer Nature Limited

www.nature.com

Nature 571, S. 483–484, 2019

AUF GROSSER FAHRT

Unterwegs auf
den Weltmeeren

Moby Dick | Die letzte Fahrt der »Essex«
»Polarstern« | Expedition ins arktische Eis
Kaventsmänner | Monsterwellen auf der Spur

FÜR NUR
€ 4,99

HIER DOWNLOADEN

KLIMAKRISE

FRÜHE MODELLE LIEFERTEN BEREITS EXAKTE PROGNOSEN

von Jennifer E. Kay

Schon die zwischen 1970 und 2007 veröffentlichten Klimamodelle haben den später eingetretenen globalen Temperaturanstieg richtig vorhergesagt. Das zeigt den Wert von weltweit gesammelten Beobachtungen für das Feintuning unserer Klimamodelle in Zeiten der Erderwärmung.

Klimamodelle sind von Supercomputern durchgerechnete Gleichungen klimarelevanter Prozesse. Sie sind ein unverzichtbares Hilfsmittel, um wissenschaftliche Hypothesen zu überprüfen, liefern aber auch Prognosen, die für die Entwicklung unserer Gesellschaften wichtig sind. Und das schon seit Langem: Bereits aus den 1970er Jahren stammen die ersten Klimamodelle, die auf einem global umspannenden Raster die Entwicklungen und Wechselwirkungen der Atmosphäre und der Ozean- und Landoberflächen numerisch beschreiben.

Seit dem ist die Oberfläche der Erde wärmer geworden, was zum großen Teil auf den erhöhten Ausstoß von Treibhausgasen zurückzuführen ist. In einer neuen, in »Geophysical Research Letters« erschienenen Studie hat ein Team um Zeke

Jennifer E. Kay forscht im Department of Atmospheric and Oceanic Sciences und am Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences an der University of Colorado.

Hausfather von der University of California in Berkeley gerade die Qualität der Prognosen von zwischen 1970 und 2007 veröffentlichten Klimamodellen im Rückblick bewertet. Die Ergebnisse zeigen, dass jene frühen Modelle die physikalischen Verhältnisse zutreffend eingeschätzt haben – und die später tatsächlich beobachtete globale Oberflächenerwärmung exakt prognostiziert haben.

Die Autoren betonen dabei einen wesentlichen Punkt: Die Prognosefähigkeit von Klimamodellen kann durch zukünftige, nicht vorhersehbare klimabeeinflussende Faktoren eingeschränkt sein. Denn viele wichtige Treiber des Prozesses – etwa eine höhere Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre, die durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe verursacht wird – sind Folge von menschlichen Handlungen und Entscheidungen, die nicht immer leicht vorhergesagt werden können. Tatsächlich haben die frühen Klimamodellierer Schätzungen für zukünftige Klimafaktoren durchaus in ihre Prognosen einbezogen. Sie konnten aber zum Beispiel kaum wissen, wie die

globale Industrialisierung voranschreitet und welche CO₂-Emissionen damit einhergehen werden.

Hausfather und Kollegen haben deswegen eine Bewertungsmethode für die Vorhersagen früher Klimamodelle entwickelt, bei der eine womöglich ungenaue Einschätzung unbekannter zukünftiger Klimafaktoren nicht negativ angerechnet wird. Damit untersuchten die Autoren 17 Projektionen der globalen mittleren Oberflächentemperatur (GMST) von 14 Modellen. Zehn der Projektionen sagten die später tatsächlich eingetretenen Klimabeobachtungen korrekt voraus, ohne dass der von Hausfather entworfene Korrekturfaktor überhaupt zum Tragen kam. Vier weitere Projektionen stimmten mit den realen Messwerten überein, als die Forscher die unberücksichtigten Ungenauigkeiten in den Schätzungen der Klimafaktoren einrechneten. Damit blieben drei abweichende Modellvorhersagen: Zwei sagten eine stärkere Erdoberflächenerwärmung voraus, eine eine geringere Erhitzung als die tatsächlich beobachtete.

Es stellt schon eine enorme wissenschaftliche und rechnerische Herausforderung dar, wenn verlässliche Klimamodelle mit Hilfe gut verstandener klimarelevanter Prozesse erstellt und in gut formulierten Gleichungen beschrieben werden sollen. Um Klimaprozesse mathematisch zu fassen, sind komplexe Gleichungen nötig, die nur mit erheblicher Rechenleistung gelöst werden können; und aus diesem Grund wurden Klimamodelle immer auf den schnellsten verfügbaren Supercomputern ausgeführt. In der Hinsicht ist es besonders beeindruckend, dass die frühesten der von Hausfather et al. bewerteten Modelle durchaus genaue GMST-Prognosen lieferten: Denn die damals verfügbare Rechenleistung war, im Vergleich zu heute, extrem limitiert.

Die Ergebnisse der Autoren zeigen, wie genau Klimamodelle Durchschnittswerte wie die GMST vorhersagen können – allerdings reicht das nicht, um Auswirkungen des laufenden Klimawandels einschätzen und sich womöglich darauf vorbereiten zu können. Gerade regionale Klimaveränderungen sind besonders stark von unvorhersehbaren Schwankun-



UNIVAC-1108-COMPUTER | Auf Großrechnern wie diesem Univac-1108 sind in den 1970er Jahren Klimamodelle gerechnet worden. Die Rechenleistung der Geräte war im Vergleich zu heute bescheiden, die physikalischen Umwelteinflüsse und ihre Folgen konnten damit aber recht zutreffend modelliert werden. Die in den letzten fünf Jahrzehnten veröffentlichten Klimamodelle sagen daher die später tatsächlich beobachteten Veränderungen der globalen mittleren Oberflächentemperatur der Erde ziemlich genau voraus.

gen beeinflusst, was das Prognosepotenzial in diesen Fällen deutlich einschränkt – und das gilt selbst dann, wenn die Einflussnehmenden Klimafaktoren bekannt sind und man sich den Wandel nur auf einer eher groben Jahrzehnte-Zeitskala ansieht. Einiges ist ohnehin schwer auf bloßer Grundlage einer GMST-Prognose vorherzusagen: etwa, in welchem Umfang der Meeresspiegel steigen wird; wie die Versauerung der Ozeane durch die Aufnahme von atmosphärischem CO₂ die Meeresökosysteme beeinflussen wird; und wie häufig und wie schwer künftige Brände, Dürren und Überschwemmungen ausfallen. Wissenschaftler müssen die Klimamodellierung weiter verbessern und ihr Verständnis der Auswirkungen des Klimawandels vertiefen. Dabei gilt es, verschiedene Aspekte zu berücksichtigen: Die Modelle sollten immer höher aufgelöst sein und die klimarelevanten Prozesse immer genauer darstellen können, während gleichzeitig immer mehr Simulationen unvorhersehbare Einflüsse immer besser abbilden sollen. Dass die frühen Klimamodelle die GMST gut vorhersagen konnten, ist beeindruckend, es

bleibt aber – Wissenschaftlern, Politikern und Interessenvertretern dürfte das allzu bekannt sein – noch einiges zu tun.

Auf mathematischen Gleichungen basierende numerische Modelle zur Beschreibung der Atmosphäre sind heute Alltag – und wir gründen darauf Entscheidungen, die Leben retten und Geld sparen. Weil unser Klima sich vor allem auf Grund menschlicher Aktivitäten weiter verändert, sind Wissenschaftler aber in der Pflicht, Menschen den Wert numerischer Modelle und der ihnen zu Grunde liegenden Gleichungen immer wieder nahe zu bringen – und ihre Kenntnisse zu nutzen, zu verbessern und zu kommunizieren. Mit Blick auf die physikalischen Vorgänge lagten Klimamodelle bei der Prognose von GMST seit Jahrzehnten richtig – während gleichzeitig immer mehr CO₂ in die Atmosphäre gelangt ist. Vorhersagen wie diese sind nützlich, um die maximale Menge an CO₂ abzuschätzen, die im Lauf der Zeit in die Atmosphäre freigesetzt werden kann, ohne dass die Erwärmung ein bestimmtes Niveau übersteigt.

Die Studie zeigt aber vor allem, dass Unsicherheiten bei GMST-Prognosen zu

einem großen Teil von bestimmten Klimafaktoren ausgehen: Treibern, unter denen vor allem die Treibhausgasemissionen durch den Menschen für die zukünftige Oberflächenerwärmung bestimmend bleiben werden. Die Modellierung der Klimazukunft mit GMST wird, wie die neuen Resultate zeigen, sicher weiter einen Wert haben, auch wenn die Treibhausgasemissionen steigen, und das unabhängig vom Einfluss unbekannter zukünftiger Klimafaktoren. Die Wissenschaft bleibt aber aufgerufen, ihre Klimamodelle weiterzuentwickeln und alle verfügbaren Daten möglichst zu integrieren: Nur so können wir uns auf Zeiten einstellen, in denen das veränderte Klima mehr von uns verlangt, als nur die mittlere Erwärmung der Erdoberfläche verlässlich vorherzusagen. ↪

(Spektrum.de, 05.02.2020)

nature

© Springer Nature Limited

www.nature.com

Nature 578, S. 45–46, 2020

POLARGEBIETE

DIE ARKTIS BRENNT WIE NIE ZUVOR

von Alexandra Witze

Brände am Polarkreis setzen Rekordmengen an Kohlendioxid frei. Auch, weil Torfgebiete großflächig verbrennen. Sind die Kohlenstoffsenken bald Kohlenstoffquellen?

Im Sommer 2020 sind entlang des Polarkreises Brände ausgebrochen, die die Tundra einäscherten und sibirische Städte mit Rauch überzogen. Zum Ende der arktischen Brandsaison im August hatten die Feuer eine Rekordmenge von 244 Megatonnen Kohlendioxid verursacht – das sind 35 Prozent mehr als im Vorjahr. Eine Ursache für die großen Mengen, sagen Wissenschaftler, könnten Torfgebiete sein.

Moore sind kohlenstoffreiche Böden, die durch den langsamen Zerfall wasser gesättigter Pflanzen entstehen, manchmal über Tausende von Jahren hinweg. Sie sind die kohlenstoffdichtesten Ökosysteme der Erde; ein typisches nördliches Torfgebiet enthält etwa zehnmal so viel Kohlenstoff wie ein Wald in einer kaltgemäßigten Klimazone. Wenn Torf brennt, gibt er seinen uralten Kohlenstoff ab. Damit gelangen noch mehr Wärmespeichernde Gase, die den Klimawandel beeinflussen, in die Atmosphäre.

Fast die Hälfte des weltweit im Torf gespeicherten Kohlenstoffs liegt zwischen

60 und 70 Grad nördlich, entlang des Polarkreises. Das Problem ist, dass die gefrorenen, kohlenstoffreichen Böden mit der Erwärmung des Planeten voraussichtlich auftauen werden, was sie noch anfälliger für Brände macht und mit größerer Wahrscheinlichkeit dazu führt, dass große Mengen Kohlenstoff in die Luft gelangen. Es handelt sich um eine Rückkopplungsschleife: Setzen Torfgebiete mehr Kohlenstoff frei, nimmt die globale Erwärmung zu, wodurch mehr Torf auftaut und mehr Brände entstehen (siehe »Brennende Torfgebiete«). Eine im August 2020 veröffentlichte Studie zeigt, dass sich die nördlichen Torfgebiete auf diese Weise von einer Netto-Senke für Kohlenstoff zu einer Netto-Quelle entwickeln könnten, was den Klimawandel weiter beschleunigen würde.

Die beispiellosen Brände in der Arktis der Jahre 2019 und 2020 zeigten, dass die Veränderungen bereits im Gange sind, sagt Thomas Smith, Umweltgeograf an der London School of Economics and Political Science: »Alarmierend ist der richtige Begriff.«

Zombie-Brände schwelen im Winter

Die Brandsaison in der Arktis begann 2020 ungewöhnlich früh: Bereits im Mai gab es nördlich der Baumgrenze in Sibirien Brände; normalerweise treten sie erst um den Juli herum auf. Ein Grund dafür ist, dass die Temperaturen im Winter und Frühling wärmer als üblich waren und die Landschaft zum Brennen brachten. Möglicherweise schwelten Torfbrände den Winter über unter dem Eis und Schnee und tauchten im Frühling, als der Schnee schmolz, dann zombieartig auf. Wissenschaftler haben gezeigt, dass diese Art der flammenlosen Verbrennung bei niedriger Temperatur monate- oder sogar jahrelang in Torf und anderen organischen Stoffen stattfinden kann, beispielsweise in Kohle.

Wegen des frühen Beginns brennen einzelne arktische Gebiete länger als üblich, und »die Brände beginnen viel weiter nördlich als früher – in Landschaften, die wir eher für feuerbeständig als feuergefährdet hielten«, sagt Jessica McCarty, Geografin an der Miami University in Oxford, Ohio.

»Was man für später erwartet hatte, geschieht bereits«

(Amber Soja, Umweltwissenschaftlerin)

Forscher wollen nun herausfinden, wie schlimm diese arktische Feuersaison tatsächlich war. Das russische Fernüberwachungssystem für Waldbrände hat 18 591 einzelne Ereignisse in den beiden östlichsten Bezirken Russlands katalogisiert: Insgesamt sind fast 14 Millionen Hektar verbrannt, sagt Evgeny Shvetsov, ein Brandspezialist am Sukachev-Institut für Forstwirtschaft, das zur Russischen Akademie der Wissenschaften in Krasnojarsk gehört. Die meisten Brände ereigneten sich in Permafrostgebieten, wo der Boden normalerweise das gesamte Jahr über gefroren ist.

Um die rekordverdächtigen Kohlendioxidemissionen möglichst genau zu beziffern, setzten Wissenschaftler des europäischen Erdbeobachtungsprogramms Copernicus Satelliten ein. Damit untersuchten sie Ort und Intensität der Brände. Anschließend berechneten sie, wie viel Material jedes einzelne Feuer vermutlich verbrannt hatte. Die Werte seien wahrscheinlich eine Unterschätzung, sagt Mark Parrington, ein Atmosphärenwissenschaftler am Europäischen Zentrum für Wettervorhersagen in Reading, Großbritannien, der an der Analyse be-

teiligt war. Brände in Torfgebieten können von zu geringer Intensität sein, als dass Satellitensensoren in der Lage sind, sie zu erfassen.

Zahlreiche Torfgebiete sind anfällig, da gefroren und flach

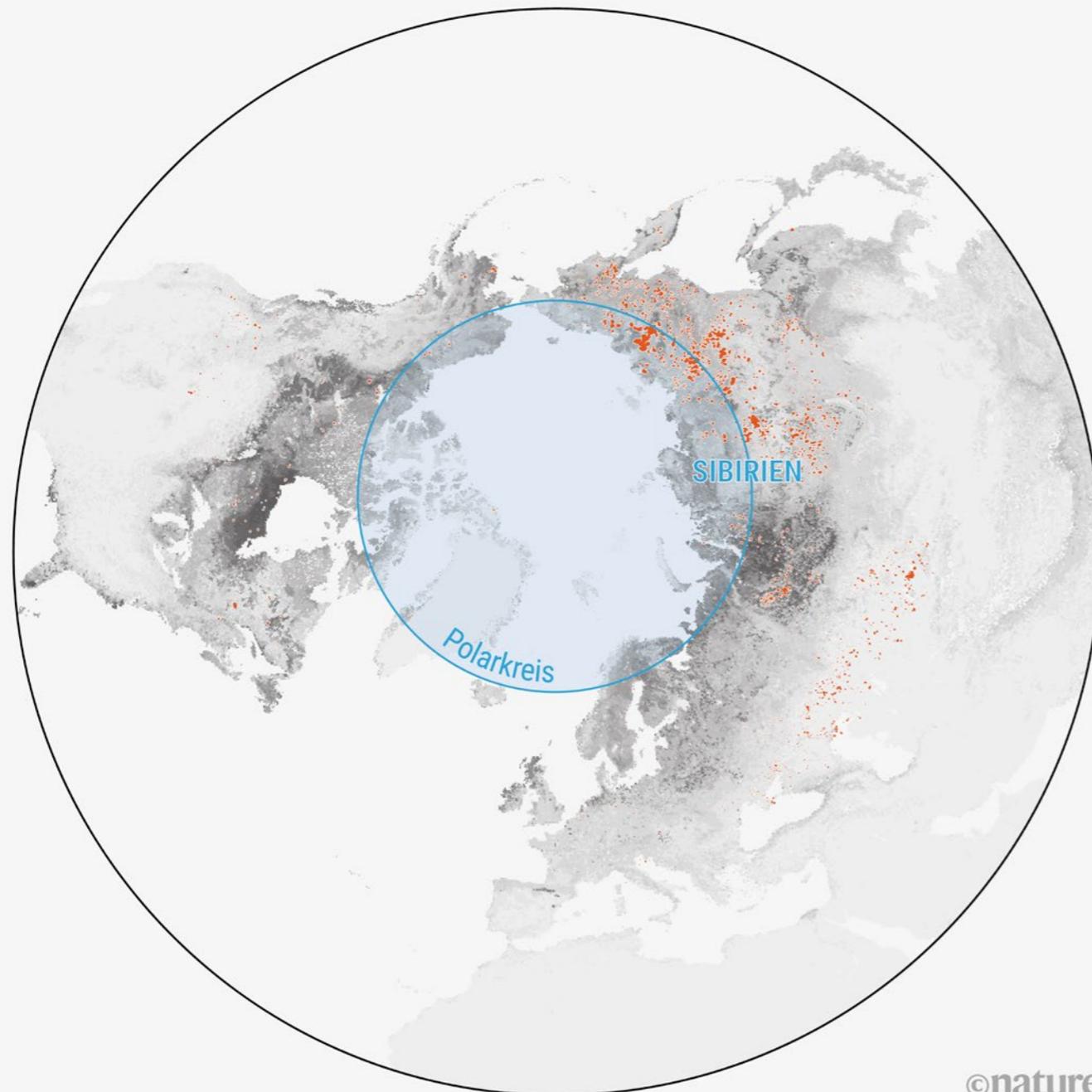
Wie stark die diesjährigen Brände in der Arktis das globale Klima langfristig beeinflussen werden, hängt davon ab, was sie verbrannt haben. Smith hat errechnet, dass etwa die Hälfte der arktischen Brände im Mai und Juni Torfgebiete betrafen und die Brände in vielen Fällen tagelang anhielten. Das deutet darauf hin, dass sie durch dicke Schichten von Torf oder anderen Böden, die reich an organischer Substanz sind, angefacht wurden.

Und die August-Studie ergab, dass es in den nördlichen Breiten fast vier Millionen Quadratkilometer Torfgebiete gibt. Davon ist mehr als bisher angenommen gefroren und flach – und daher anfällig dafür, aufzutauen oder auszutrocknen, sagt Gustaf Hugelius, ein Permafrostwissenschaftler der Universität Stockholm, der die Untersuchung geleitet hat. Hugelius und sein Team fanden auch heraus, dass Torfgebiete zwar seit Tausenden von

BRENNENDE TORFGEBIETE

Waldbrände haben in diesem Sommer eine Millionen Hektar große Fläche entlang des Polarkreises verbrannt und Rekorde für Kohlendioxidemissionen aufgestellt. Oft gingen Regionen mit Torfböden in Flammen auf. Diese Böden sind reich an organischer Substanz. Verbrennen sie, gelangt viel alter Kohlenstoff in die Atmosphäre.

■ Torfgebiete ■ Waldbrände (Juni bis August 2020)



©nature

Jahren zur Abkühlung des Klimas beitragen, sie aber künftig wahrscheinlich zu einer Quelle großer Mengen Kohlenstoff werden, die in die Atmosphäre gelangen. Bis zum Ende des Jahrhunderts könnte das geschehen.

Es gibt Szenarien, denen zufolge die Brandgefahr in Sibirien mit der Erwärmung des Klimas zunehmen wird. Doch die Zukunft sei schon jetzt zu beobachten, sagt Amber Soja, eine Umweltwissenschaftlerin, die am US National Institute of Aerospace in Hampton, Virginia, arktische Brände untersucht. »Was man für später erwartet hatte, geschieht bereits«, sagt sie. »Und in einigen Fällen schneller als gedacht.« ↶

(Spektrum.de, 18.09.2020)

nature

© Springer Nature Limited

www.nature.com

Nature 10.1038/d41586-020-02568-y 2020



PERMAFROST

Die Zeitbombe im hohen Norden

von Roland Knauer

Angesichts des Klimawandels tauen immer mehr Permafrostböden auf. Das setzt Klimagase frei und bringt Berge und Bauten ins Wanken.

Die Gletscher der Eiszeit haben in vielen Regionen der Erde ihr Erbe hinterlassen: Ähnlich wie heute in der Antarktis hatten vor 20000 Jahren riesige Eisschilde große Teile der Nordhalbkugel der Erde unter sich begraben. Auch in den eisfreien Gebieten, etwa im Norden Sibiriens oder in Teilen Alaskas, waren die Temperaturen gesunken. Während über dem Norden Europas und Nordamerikas aber die Eispanzer trotz ihrer Minustemperaturen den unter ihnen liegenden Boden und Fels vor der eisigen Kälte der Luft isolierten, fehlte diese Wärmedecke über weiten Teilen Sibiriens und Alaskas.

Ohne diesen Schutz fraß die Eiseskälte sich immer tiefer in den Boden – und der ist bis heute vielerorts nicht mehr aufgetaut. »Bis in Tiefen von 1500 Metern reicht dieser dauernd gefrorene Permafrost in einigen Gebieten Sibiriens, in anderen sind es einige hundert Meter«, erklärt Hans-Wolfgang Hubberten. Beinahe ein Vierteljahrhundert, seit dem

Jahr 1992, hat der Geochemiker die Permafrost-Forschung des Alfred-Wegener-Instituts (AWI) in Potsdam geleitet und in dieser Zeit jedes Jahr ein paar Monate lang oft unter widrigsten Bedingungen die Dauerfrostböden im Norden Sibiriens, Kanadas, Alaskas und des Tibet-Plateaus unter die Lupe genommen. Häufig steckten die Forscher im Lena-Delta im hohen Norden Sibiriens bis über die Knöchel im Schlamm.

Oben Schlamm, unten Eis

»Im Sommer tauen die obersten Schichten des Dauerfrostbodens nämlich oft einen Meter tief oder noch ein wenig tiefer auf«, erklärt der AWI-Forscher. Weiter unten aber bleibt der Untergrund fest gefroren und erfüllt so die Definition, nach der ein Permafrostboden mindestens in zwei Jahren durchschnittliche Temperaturen unter null Grad Celsius haben muss. Dort hält sich also noch immer die Kälte der Eiszeit. In den Regionen, in denen einst riesige Eiskappen die Erde unter sich begruben, reicht der Dauerfrostboden dagegen deutlich weniger tief in den Untergrund, im Norden Skandinaviens sind es oft nur ein paar Meter.

»Insgesamt sind Dauerfrostböden mit ihrer Vegetation heute immer noch Senken für Kohlendioxid«

(Martin Heimann)

Insgesamt ist so auf der Nordhalbkugel der Erde rund ein Viertel der gesamten Landfläche Permafrost. Meist handelt es sich um die Regionen in hohen Breiten. So ist in Russland gut die Hälfte der Landesfläche Dauerfrostboden, auch große Teile von Alaska und Kanada gehören dazu. Auf der Südhalbkugel der Erde gibt es mangels größerer Gebiete ohne Eispanzer in der Nähe des Südpols nur wenige Dauerfrostböden. Dazu kommen noch die hoch gelegenen Gebirgsregionen. »In den Schweizer Alpen sind ungefähr 3,5 bis 4 Prozent der Fläche Permafrost«, erklärt Marcia Phillips, die am WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung (SLF) in Davos die Permafrost-Gruppe leitet. Auch in den Alpen kann der Dauerfrost einige hundert Meter mächtig sein, hohe Felsgipfel wie das Matterhorn können komplett durchgefroren sein. An Nordhängen reicht der Permafrost bis auf 2400 oder 2500 Meter über dem Meeresspiegel hinunter, während er an sonnigen Südhängen erst in größerer Höhe beginnt.

Jahrtausendealte Permafrostböden

Sammelt sich im Gebirge am Fuß von Hängen der Schnee von Lawinen, bede-



cken oft spätere Felsstürze und Muren diese Schicht mit Geröll und Schlamm. So eine Auflage isoliert die darunterliegenden Schichten wie eine harte Decke von der Sommerwärme. Dadurch können solche Dauerfrostböden auch in viel tieferen Lagen bis in 1200 oder 1300 Metern über dem Meeresspiegel entstehen. Nehmen die Lawinen immer wieder eine ähnliche Bahn, werden diese Permafros-

STIELWAND MIT PERMAFROST | Die Steilwand eines Kraters in Sibirien, der vermutlich von einer geschmolzenen Eislinse übrig blieb. In der Steilwand erkennt man noch die Permafrostschichten.

»Bis zum Ende des Jahrhunderts könnten die durchschnittlichen Temperaturen auf der Erde um zusätzliche 0,1 Grad Celsius steigen«

(Hans-Wolfgang Hubberten)

te, die anders als die steilen Felswände viel Schnee und vor allem Eis enthalten, immer dicker und können oft einige Jahrtausende alt werden.

Aus solchen Schichten ragen oft große Felsblöcke heraus. Fällt im Frühwinter Schnee, bleiben die Blöcke häufig kahl. Während die weiße Decke den Rest der Landschaft isoliert, kann durch die Blöcke die Wärme aus der Erde in die Luft strömen. Dadurch kühlt der Boden dort stärker aus und schützt so den Permafrost.

Da der Klimawandel die Temperaturen auch in der Höhe nach oben treibt, geht er am gefrorenen Fels der Alpengipfel ebenfalls nicht spurlos vorüber. Das Gestein wird wärmer und brüchiger. Im Permafrost mit wenig Eis gibt es daher häufiger Felsstürze, die weiter unten den Schnee vorheriger Lawinen überdecken. Dort wächst darum die isolierende Deckschicht und konserviert so den Permafrost. Dieser wiederum ist im Grunde eine Mischung aus Eis und Geröll und ähnelt damit einem Gletscher, der mit großen Mengen Schutt und Felsbrocken durchsetzt ist.

Was macht der Klimawandel mit dem Dauerfrost?

Daher verhält sich dieser Permafrost ähnlich und beginnt auf Hängen langsam zu fließen. Und weil im Gebirge nur wenig Untergrund eben ist, fließen solche »Block-Gletscher« meist mit einer Geschwindigkeit von einigen Dezimetern bis einigen Metern im Jahr talwärts. Erreichen die eisigen Massen steileres Gelände, beschleunigen sie. »Oft landet das Gestein dann in steilen Rinnen, und ein heftiges Gewitter genügt, um das lockere Material als Mure zu Tal schießen zu lassen«, erklärt SLF-Forscherin Marcia Phillips. Der Klimawandel wärmt diesen Permafrost zusätzlich auf; im Sommer fällt in der Höhe öfter Regen, der in solche Blockgletscher eindringt und sie so letztendlich beschleunigt. Kurzum: Muren werden häufiger.

»Auch der Dauerfrostboden in Sibirien oder im Norden Kanadas verändert sich«, ergänzt Hans-Wolfgang Hubberten. Nur könnte die Reaktion heftiger ausfallen als in anderen Weltgegenden. Schließlich hat der Klimawandel die Lufttemperaturen auf der Erde seit Beginn der Industriali-

sierung um rund ein Grad Celsius steigen lassen, im hohen Norden fiel die Erwärmung jedoch doppelt so groß oder sogar noch stärker aus.

Um herauszubekommen, wie die steigenden Temperaturen den Permafrost beeinflussen, haben die Forscher aus verschiedenen Nationen rund 600 Löcher in den gefrorenen Untergrund gebohrt und mit Temperaturfühlern bestückt. Bis in Tiefen von 10 oder 15 Metern erwärmt

sich der Permafrost fast überall. Dort, wo der Boden einst im Sommer bis in einen Meter Tiefe auftaute, sind es heute eher 1,2 Meter oder mehr.

Teufelskreis See

Taut der Permafrost bis in größere Tiefen, entsteht auch mehr Schmelzwasser, was nach unten nicht abfließen kann, weil dort der Dauerfrostboden bestehen bleibt und den Weg versperrt. So wachsen die

Sümpfe und Seen. Das zwar kalte, im Vergleich zum gefrorenen Untergrund aber relativ warme Wasser taut weiteren Permafrost auf. Solche Seen können also wachsen und tiefer werden. Und das kann eine verhängnisvolle Rückkopplung auslösen: Ist das Wasser tiefer als zwei Meter, friert der See im Winter normalerweise nicht mehr bis zum Boden durch. Deshalb kann das flüssige Wasser in der Tiefe auch in der kalten Jahreszeit weiteren Permafrost auftauen, und der See vertieft sich immer weiter.

Wenn der Dauerfrostboden im Sommer bis in immer größere Tiefen auftaut, verschwindet er in den Regionen bald ganz, in denen er nur wenig in die Tiefe reicht. Tatsächlich hat sich die Grenze des Permafrostbodens in Kanada und Russland im Süden bereits um bis zu 100 Kilometer nach Norden zurückgezogen.

STRASSENSCHÄDEN DURCH PERMAFROST-SCHWUND | Für die Infrastruktur ist es katastrophal, wenn der Permafrost taut: Dadurch entstehen schwere Schäden an Straßen – wie hier in Kanada –, Bahnlinien oder Pipelines.



Von sehr verblüffenden Vorgängen berichten russische Forscher in den letzten Jahren: Vor allem auf der Jamal-Halbinsel weit im Nordwesten Sibiriens scheinen sich unter dem Permafrostboden große Gasblasen zu sammeln. In ihnen steigt der Druck offensichtlich stark an. Nach einiger Zeit gibt der gefrorene Boden an einer Schwachstelle nach, und das Gas entweicht in einer riesigen Druckexplosion schlagartig in die Atmosphäre. Bei diesen Ereignissen entstehen Explosionskrater, die einen Durchmesser von 50 bis 100 Metern haben und sich später mit Wasser füllen.

Gasblasen explodieren nach warmen Sommern

Solche runden Seen gibt es auf der Jamal-Halbinsel schon sehr lange. Nur scheinen diese Druckexplosionen in den letzten zehn Jahren zugenommen zu haben. Weil sie anscheinend nach außergewöhnlich langen und warmen Sommern viel häufiger auftreten, sehen russische Forscher einen Zusammenhang mit dem Klimawandel. Eine wichtige Rolle scheinen auch Methanhydrate zu spielen, in denen Wassereis Methangas stabil einschließt,

das zum Beispiel entsteht, wenn Mikroorganismen ohne Sauerstoff im Untergrund Pflanzenreste abbauen.

Solche Methanhydrate bilden sich, wenn der Druck relativ hoch ist und die Temperaturen niedrig sind. Wird es wärmer, werden diese festen Verbindungen instabil, und das in ihnen steckende Methan kann schlagartig entweichen. Findet eine solche Gasblase einen Weg durch den Permafrostboden nach oben, sinkt der Druck. Dadurch wird weiteres Gas aus den restlichen Methanhydraten frei, das schließlich in einer starken Druckexplosion einen Krater in den Permafrostboden sprengt.

Weshalb solche Gasblasen ausgerechnet dort auftreten und sich in anderen Regionen Sibiriens kaum beobachten lassen, erklärt AWI-Forscher Hans-Wolfgang Hubberten mit der einstigen Grenzlage dieser Gegend: In der letzten Eiszeit lag die Jamal-Halbinsel genau zwischen der mächtigen Eiskappe, die sich von Skandinavien bis in die Norddeutsche Tiefebene und eben auch bis zur Jamal-Halbinsel erstreckte, und der eisfreien Kältesteppe, über die damals Mammuts und andere riesige Säugetiere zogen. Darum war die

»Wegen sehr starker Erosion müssen in Kanada und Alaska bereits heute ganze Dörfer umgesiedelt werden«

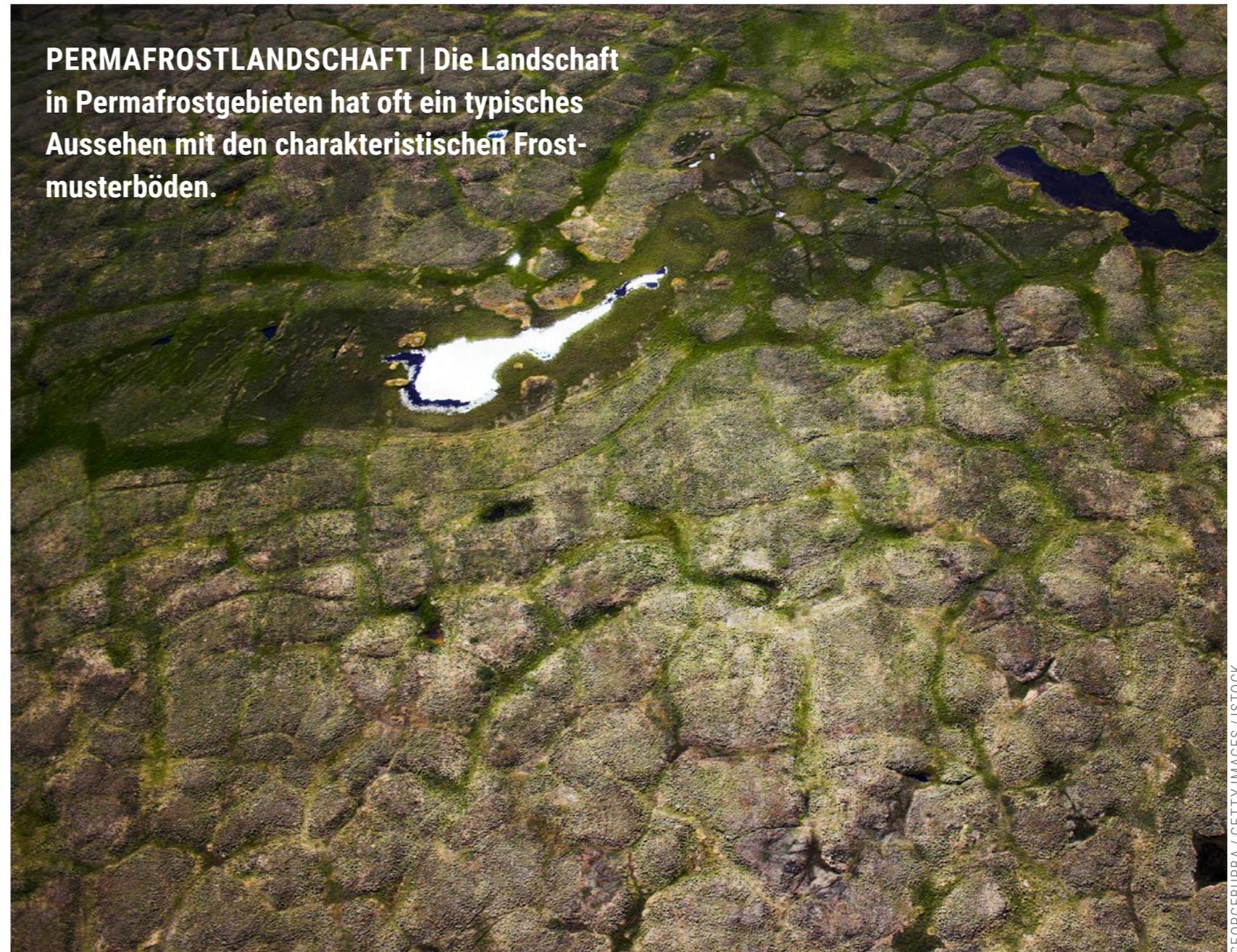
(Hans-Wolfgang Hubberten)

Jamal-Halbinsel teilweise mit Eis bedeckt und teilweise eben nicht. »Dort ist der Permafrost also sozusagen löchriger«, sagt Hans-Wolfgang Hubberten.

Wie viel Methan könnte aus dem Permafrost entweichen?

In solchen Schwächezonen setzen außergewöhnlich lange und warme Sommer, wie sie in den vergangenen Jahren häufiger auftraten, vermehrt Methan aus den Hydraten im Untergrund frei. Ob die Explosionen allerdings wie von den russischen Forschern vermutet tatsächlich mit dem Klimawandel rasant zunehmen, lässt sich bisher kaum klären: Die Beobachtungen reichen allenfalls bis 2014 zurück und sind damit zu kurz für eine zuverlässige Analyse. Auch wenn bei diesen Explosionen erhebliche Mengen des sehr starken Klimagases Methan schlagartig in die Atmosphäre gelangen, vermutet Martin Heimann vom Max-Planck-Institut für Biogeochemie in Jena keinen starken Einfluss auf das Weltklima: »Dazu ist das betroffene Gebiet einfach zu klein.«

Allerdings fragen sich Klimaforscher schon länger, welche Mengen Methan der Permafrostboden im hohen Norden heu-



PERMAFROSTLANDSCHAFT | Die Landschaft in Permafrostgebieten hat oft ein typisches Aussehen mit den charakteristischen Frostmusterböden.

GEORGE BURBA / GETTY IMAGES / ISTOCK

te bereits in die Atmosphäre entlässt und wie stark er damit das Klima anheizt. Vor allem aber interessiert sie die Frage, welche Methanmengen aus dem Dauerfrostboden kommen werden, wenn der Klimawandel die arktischen Gebiete in Zukunft

weiter kräftig aufwärmt. Genau diese Frage versuchen Martin Heimann und seine Kollegen mit 300 Meter hohen Messtürmen und einigen anderen Einrichtungen zu klären, die sie in der Taiga und Tundra Sibiriens und in einigen an-



CNICBC / GETTY IMAGES / ISTOCK

ABSINKENDE GEBÄUDE | Manch kleinere Ortschaft im hohen Norden musste bereits teilweise oder ganz aufgegeben werden: Wenn der Permafrost verschwindet, können Gebäude einsinken und unbewohnbar werden.

deren Regionen aufgebaut haben. Mit diesen Geräten messen die Forscher, welche Mengen der Treibhausgase Kohlendioxid und Methan zwischen Luft und festem Land ausgetauscht werden. Damit bestimmen sie sozusagen den Pulsschlag der Kohlenstoffsinken und -quellen.

Die Forscher haben gute Gründe für ihre aufwändigen Messungen: Die riesi-

gen Flächen der Dauerfrostböden in Sibirien und Nordamerika speichern gigantische Mengen Kohlenstoff. Er stammt aus Pflanzen, die einst dort gewachsen sind und dabei Kohlendioxid aus der Luft gefischt und in Blätter, Holz, Wurzeln und andere Biomasse umgewandelt haben. Die Überreste dieser Pflanzen wurden im Dauerfrostboden gut konserviert. Taut

der Permafrost im Sommer an der Oberfläche auf, zersetzen Mikroorganismen diese Überreste aus vergangenen Zeiten. Unter Wasser entsteht dabei erst einmal das sehr starke Treibhausgas Methan. Taut der Dauerfrostboden durch den Klimawandel länger auf, produziert er in den sumpfigen Gebieten auch mehr Methan.

Permafrostböden setzen Treibhausgas frei

Strömt dieses Methan zum Beispiel durch Schilfhalm rasch aus dem Boden an die Oberfläche, erreicht es wie in einem Aufzug die Atmosphäre und kann dort das Klima aufheizen. Fehlen ein paar Meter entfernt dagegen die Schilfhalm, steigt das Methan nur langsam im Boden nach oben. Unterwegs aber warten schon andere Mikroorganismen, die sich von Methan ernähren und dabei das viel schwächere Treibhausgas Kohlendioxid produzieren. Die Dauerfrostböden Sibiriens bilden also einen schwer überschaubaren, aber riesengroßen Flickenteppich, aus dem jeder Flecken andere Mengen von Treibhausgasen freisetzt.

Steigen die Temperaturen im Klimawandel, haben die Pflanzen auf diesen

Dauerfrostböden im Sommer mehr Zeit zum Wachsen. Zusätzlich beschleunigt der steigende Kohlendioxidgehalt der Luft das Wachstum weiter. Dadurch holt die Vegetation mehr Kohlendioxid aus der Luft. »Insgesamt sind Dauerfrostböden mit ihrer Vegetation daher heute immer noch Senken für Kohlendioxid«, fasst Martin Heimann die Situation zusammen. Bleibt die spannende Frage, ob dieser Effekt in Zukunft die zunehmende Freisetzung von Methan und Kohlendioxid durch den weiter auftauenden Permafrost ausgleichen wird.

Oberdrein kommen weitere Effekte ins Spiel. In der Tundra etwa bilden sich auf dem Permafrostboden so genannte Polygone aus trockenen Flächen, die durch sumpfige Kanäle voneinander getrennt sind. Dabei leiten die trockenen Bereiche weniger Sommerwärme in die Tiefe und schützen damit den Dauerfrostboden. In den Kanälen kurbeln die Mikroorganismen derweil die Produktion von Methan an und beschleunigen so den Klimawandel.

Durch die steigenden Temperaturen dringen auch Gehölze immer weiter nach Norden vor. » Heute wachsen oft Sträu-

cher an Stellen, an denen sie noch vor zwei Jahrzehnten keine Chancen hatten«, schildert Hans-Wolfgang Hubberten die Situation. Unter diesem Gestrüpp wächst häufig eine dicke Mooschicht, die den Dauerfrostboden vor der Sommerwärme schützt. Andererseits verstärkt der Klimawandel die Niederschläge: »Im fernen Osten Sibiriens hatten wir in den Wintern 2017/18 und 2018/19 fast doppelt so viel Schnee wie in früheren Jahren«, berichtet Martin Heimann. Die dickere Schneedecke isoliert im Winter und verhindert, dass Wärme aus dem Boden strömt. Dadurch kühlt der Permafrost weniger aus.

Wie dieser Wettlauf zwischen verschiedenen Prozessen ausgeht, interessiert Klimaforscher vor allem deshalb, weil in den Permafrostböden des hohen Nordens insgesamt zwischen 1100 und 1500 Milliarden Tonnen Kohlenstoff gespeichert sein dürften. Damit steckt im Dauerfrostboden deutlich mehr Kohlenstoff als in der gesamten Atmosphäre der Erde, die rund 800 Milliarden Tonnen Kohlenstoff enthält. Das Klimapotenzial des Permafrostes ist also gewaltig. Insgesamt könnten die sich rasch erwärmen-

den Dauerfrostböden bis zum Jahr 2100 etwa 140 Milliarden Tonnen Kohlenstoff zusätzlich freisetzen, befürchten die AWI-Forscher. »Bis zum Ende des Jahrhunderts steigen die durchschnittlichen Temperaturen auf der Erde dadurch möglicherweise um zusätzliche 0,1 Grad Celsius«, übersetzt Hans-Wolfgang Hubberten diesen Wert.

Dabei verändern der Klimawandel und die stark steigenden Temperaturen bereits heute die Dauerfrostböden enorm. In den Alpen melden Bergführer und Bergwanderer der SLF-Forscherin Marcia Phillips heute viel mehr Risse im Fels oder brüchig werdende Berggrate als noch vor wenigen Jahren. Zudem lässt der tauende Permafrost Felsstürze vermehrt auftreten. Solche Veränderungen machen nicht nur Bergwanderern zu schaffen, sondern auch den Menschen, die in den Permafrostgebieten leben und wirtschaften. So können langsame Bewegungen des Untergrunds durch vermehrtes Auftauen die Fundamente der Pfeiler von Bergbahnen verschieben, damit die Seilführung verändern und so deren Stabilität verringern. Daher werden die Stützen von Bergbahnen inzwischen oft auf

Schienen gebaut, um solche Geländebewegungen auszugleichen.

Beschleunigen die steigenden Temperaturen Blockgletscher und lösen damit häufiger Muren aus, sind die Straßen und Bahnen gefährdet, die in ihrem Weg liegen. Anders als vor Schneelawinen können Zäune vor diesen Gerölllawinen und Muren allerdings nicht schützen. Stattdessen müssen die Verantwortlichen viel teurere Schutzdämme bauen, die die Muren auffangen oder zumindest an gefährdeten Stellen vorbeileiten. Anders als der Schnee einer Lawine, der im Sommer normalerweise von selbst abtaut, bleiben solche Geröllmassen hinter den Dämmen liegen. Um den Schutz zu erhalten, müssen daher nach einer Mure die niedergegangenen Massen abgebaggert werden, was nicht nur teuer ist, sondern auch gefährlich, weil ja eine weitere Mure am gleichen Ort niedergehen könnte. »Außerdem gibt es manchmal Schwierigkeiten, das ausgebaggerte Material irgendwo zu deponieren«, erläutert Marcia Phillips ein weiteres Problem.

Schwierige Situation in der Arktis

Noch schwieriger ist die Situation für die

Menschen auf den tauenden Dauerfrostböden der Arktis. So versumpfen einige Regionen viel stärker als früher. Das behindert die traditionellen Wanderungen der Ureinwohner auf der Jamal-Halbinsel, der Nenzen-Hirten, und ihrer Rentiere im Nordwesten Sibiriens inzwischen enorm, weil die Tiere auf dem tiefen Untergrund ihre Sommerweiden kaum noch erreichen können.

Dazu kommt die Bildung von »Thermokarst«: Taut das Eis im Boden, verringert sich das Volumen, und das Land sinkt ein. Häufig fließt das Schmelzwasser in solche Senken und reißt bei dieser »Thermo-Erosion« viel Boden mit. In den folgenden Jahren wiederholen sich solche Vorgänge häufig. Mit der Zeit verändert sich so die Landschaft sehr stark.

Betroffen dürften weltweit in den kommenden Jahren aber auch mehrere Millionen Menschen sein, die auf den Dauerfrostböden leben. Taut der Permafrost, reißt das Wasser von Meeren und Flüssen viel mehr Land von den Küsten und Ufern weg als früher. »Wegen dieser sehr starken Erosion müssen in Kanada und Alaska bereits heute ganze Dörfer umgesiedelt werden«, erklärt AWI-For-

scher Hans-Wolfgang Hubberten. Im Binnenland bringt das große Tauen ebenfalls riesige Probleme. Damit Häuser oder Pipelines nicht umkippen, wenn im Sommer der Dauerfrostboden auftaut, werden Bauten beispielsweise mit Pfeilern im gefrorenen Untergrund verankert. Nur reichen ältere Pfeiler nicht mehr tief genug, weil der Boden heute bereits viel stärker auftaut. Die Folgen sieht man in Großstädten auf dem Permafrost wie Jakutsk in Zentralsibirien. Dort drohen etliche Häuser umzukippen und Straßen, Flughäfen sowie Pipelines schwer beschädigt oder zerstört zu werden. ↩

(Spektrum.de, 05.09.2019)

ÖKOLOGIE

MIKROORGANISMEN IM BODEN setzen mehr CO₂ frei

von Kiona Ogle

Landökosysteme geben immer mehr Kohlendioxid aus den Böden ab. Das liegt an einer zunehmenden Stoffwechselaktivität von Mikroben. Langfristig könnte dieser Effekt den Klimawandel verschärfen.

Weltweit steigen die Kohlendioxidkonzentrationen in der Atmosphäre sowie die Boden- und Lufttemperaturen. Parallel dazu wächst auch die Stoffwechselaktivität terrestrischer Organismen: Via Fotosynthese nehmen Landpflanzen vermehrt CO_2 auf; andererseits geben sie sowie bodenlebende Mikroorganismen das Gas über ihre Atmung ab.

Wie die Arbeitsgruppe von Ben Bond-Lamberty vom Pacific Northwest National Laboratory in College Park (USA) jetzt herausfand, scheint dabei die CO_2 -Abgabe des Bodens schneller zuzunehmen als die pflanzliche CO_2 -Bindung. Die Forscher schreiben dieses Ungleichgewicht der verstärkten Aktivität von Mikroorganismen zu, die organisches Material im Boden zersetzen. Sollte sich der Trend fortsetzen, könnte die mikrobielle Atmung die globale Klimaerwärmung weiter vorantreiben, da sie das Treibhausgas

CO_2 freisetzt, das zuvor Jahrzehnte bis Jahrtausende lang im Boden lagerte.

Vielfältige Prozesse beeinflussen den CO_2 -Austausch zwischen Landoberfläche und Atmosphäre. Bond-Lamberty und seine Kollegen konzentrierten sich auf die Bodenatmung als einer der mengenmäßig wohl wichtigsten Kohlendioxidflüsse. Die Forscher hatten bereits Daten aus der ganzen Welt gesammelt, so dass ihnen nun Messwerte von einem breiten Spektrum an Ökosystemen, darunter Landwirtschaftsflächen, Wälder und Wüsten, zur Verfügung standen. Daraus schätzten sie für den Zeitraum zwischen 1990 und 2014 jährliche Bodenatmungsraten an den verschiedenen Standorten ab. Anschließend verglichen sie die von ihnen ermittelten Trends der Bodenatmung (CO_2 -Abgabe) mit Daten zur pflanzlichen Produktivität (CO_2 -Aufnahme), die sie wiederum aus unterschiedlichen Quellen wie Satellitenaufnahmen erschlossen. Ihren Berechnungen zufolge nahm im erfassten Zeitraum die Bodenatmung stärker zu als die Pflanzenproduktivität. Der Quotient aus den beiden Werten blieb im Allgemeinen noch unter 1 – es kam also noch zu keiner Nettoabga-

be von CO_2 . An bestimmten Standorten in einzelnen Jahren fanden die Forscher aber auch Ausnahmen, bei denen sich das Verhältnis umkehrte. Unter Umständen kann also mehr CO_2 aus dem Boden in die Atmosphäre entweichen, als die Pflanzen fotosynthetisch binden.

Damit stellt sich die Frage, ob zukünftig der durchschnittliche Quotient weltweit den Wert 1 überschreiten wird – und wenn ja, wann. Dies wäre ein Kipppunkt, von dem an die Landmassen nicht mehr als Kohlenstoffsänke für das durch fossile Treibstoffe freigesetzte CO_2 dienen, sondern sich zur Kohlenstoffquelle entwickeln und damit den Klimawandel beschleunigen.

Komplexe Bilanz über und unter der Erde

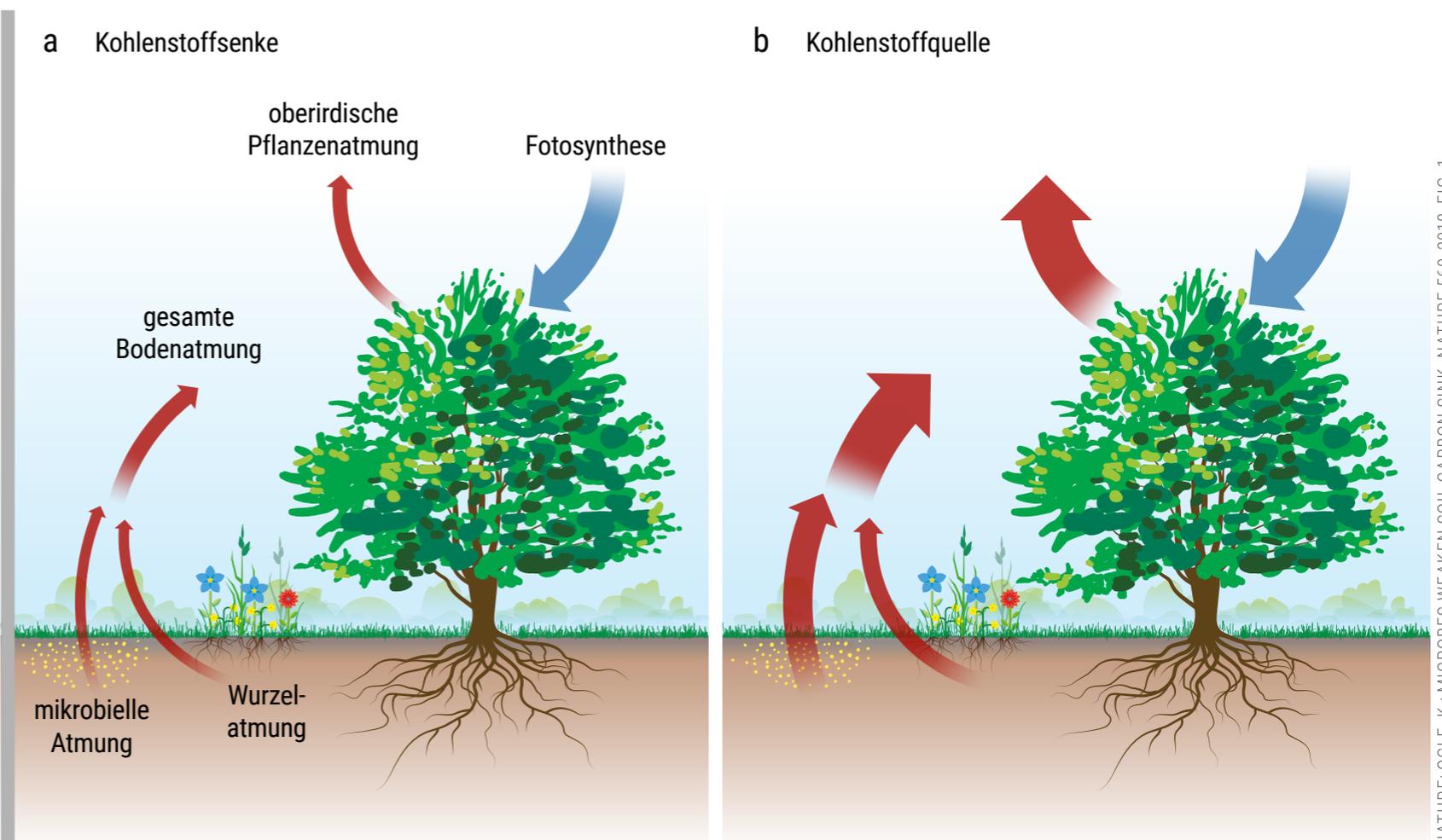
Die Forscher analysierten auch, welchen Beitrag Mikroorganismen einerseits und Pflanzenwurzeln andererseits zur Bodenatmung leisten. Dabei zeigte sich, dass Letztere hauptsächlich wegen mikrobieller Aktivitäten zunimmt. Um zu klären, ob sich die Landoberfläche dadurch tatsächlich zu einer Kohlenstoffquelle wandelt, muss jedoch auch die atmungsbedingte CO_2 -Freisetzung aus

Kiona Ogle ist Biologin und außerordentliche Professorin an der Northern Arizona University sowie der Arizona State University in Flagstaff (USA).

oberirdischen Pflanzenteilen berücksichtigt werden, da sich der gesamte Kohlenstofffluss vom Festland in die Atmosphäre aus ober- und unterirdischer CO₂-Abgabe zusammensetzt.

Wie Bond-Lamberty und seine Kollegen allerdings einräumen, ergaben frühere Langzeitbeobachtungen mit so genannten Eddy-Kovarianz-Türmen, die CO₂-Ströme kontinuierlich messen, dass die Pflanzenproduktivität zumindest an bestimmten Standorten schneller wuchs als die gesamte ober- und unterirdische CO₂-Abgabe. Hier fehlen noch weitere Daten und Analysen, um diesen Widerspruch zu erklären.

Unabhängig davon stellt sich die Frage, wie sich die deutlich erhöhte Atmung der Bodenmikroorganismen im Unterschied zur pflanzlichen Stoffwechselaktivität erklären lässt. Wie Studien der letzten Jahre bereits ergeben hatten, passen Pflanzen ihren Stoffwechsel bei langfristiger Temperaturerhöhung an; bei ihnen nimmt also die Atmung nicht so stark zu wie bei den kurzlebigen Mikroorganismen. In der gemessenen Zunahme der Bodenatmung spiegelt sich somit die angestiegene mikrobielle Aktivität auf



Kipppunkt Boden

Das Kohlendioxid terrestrischer Ökosysteme stammt hauptsächlich aus der mikrobiellen Zersetzung organischen Materials sowie aus der Atmung von ober- und unterirdischen Pflanzenteilen. Andererseits nehmen Pflanzen durch ihre Fotosynthese CO₂ auf. Gegenwärtig absorbieren Landpflanzen mehr CO₂, als durch pflanzliche und mikrobielle Atmung abgegeben wird – die Landoberfläche wirkt als Kohlenstoffsenke (a).

Wie die Arbeitsgruppe von Ben Bond-Lamberty feststellte, nahm in den letzten Jahrzehnten die von Mikroorganismen im Boden erzeugte CO₂-Menge schneller zu als die von Pflanzen photosynthetisch gebundene. Daher besteht die Gefahr, dass die Bodenatmung eines Tages die pflanzliche CO₂-Aufnahme überholt. Damit wäre der Kipppunkt erreicht, bei dem die Landoberfläche nicht mehr als Senke, sondern als Kohlenstoffquelle dient (b). Wann dies passieren könnte, ist allerdings unklar.

Grund der Klimaerwärmung wider, vermuten die Forscher.

Die Ergebnisse lassen sich jedoch nicht verallgemeinern. Denn die meisten Daten stammen aus punktuellen Messungen von zahlreichen Wissenschaftlern, die jeweils unterschiedlichste Methoden verwendeten, um den mikrobiellen Beitrag zur Bodenatmung zu berechnen. Deshalb gelangten wohl auch die einzelnen Arbeitsgruppen zu widersprüchlichen Schlussfolgerungen. Zudem errechnete Bond-Lambertys Team jährliche CO₂-Flüsse aus Momentaufnahmen von nur wenigen Stunden oder Tagen. Ihre Daten erfassen nur bedingt die zeitliche Variabilität an den einzelnen Stellen: Wiederholungsmessungen, mit denen sich langfristige Tendenzen von ortsbedingten Schwankungen sicher unterscheiden lassen, standen den Forschern nur für wenige Standorte zur Verfügung.

Trotzdem verbessert die Studie von Bond-Lamberty und seinen Kollegen unser Verständnis über die Kapazität des Bodens zur langfristigen Kohlenstoffbindung – sowie über die Gefahren, die durch eine beschleunigte mikrobielle Zersetzung organischen Materials drohen. Ihre

Ergebnisse könnten in verbesserte Modelle des globalen Kohlenstoffhaushalts einfließen. Hierzu fehlen aber noch weltweit durchgeführte kontinuierliche Messungen der mikrobiellen Bodenatmung. Langzeitprojekte wie die vom US-amerikanischen National Ecological Observatory Network sollen diese Lücken schließen. Die damit gewonnenen Daten wären von größter Bedeutung, um Strategien zum Begrenzen des Klimawandels zu entwickeln. ↩

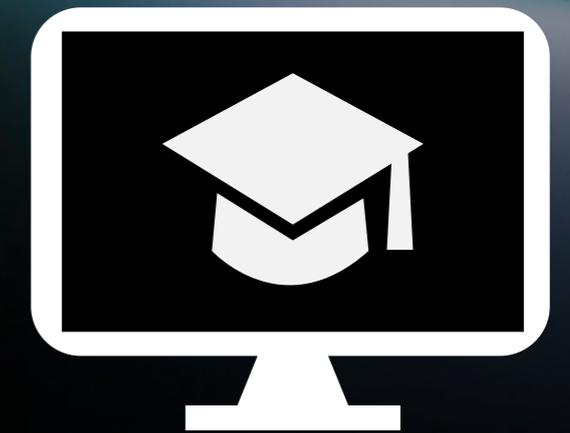
(Spektrum der Wissenschaft, Februar 2019)

Bond-Lamberty, B., Thomson, A.: Temperature-Associated Increases in the Global Soil Respiration Record. In: Nature 464, S. 579-582, 2010

Bond-Lamberty, B. et al.: Globally Rising Soil Heterotrophic Respiration over Recent Decades. In: Nature 560, S. 80-83, 2018

Spektrum

der Wissenschaft



Spektrum eLearningFlat

HIER MEHR ERFAHREN

BINNENGEWÄSSER

Seen lagern mehr Kohlenstoff ein als vor **100 Jahren**

von Robert Gast

Seen sind eigentlich eine Treibhausgasquelle. Aber möglicherweise ist ihre Klimabilanz etwas besser als gedacht.

Seen setzen beträchtliche Mengen Treibhausgase frei, da Mikroorganismen an der Oberfläche laufend organische Materie abbauen. Gleichzeitig binden die Gewässer Kohlenstoff: Tote Pflanzen sinken auf den Grund, daneben löst sich ständig CO₂ aus der Atmosphäre im Wasser. Außerdem beherbergen Seen Algen und andere Pflanzen, die das Treibhausgas aus der Luft fischen.

Eine neue Studie legt nun nahe, dass die Gewässer auf diese Art und Weise heute deutlich mehr Kohlenstoff binden als noch vor 100 Jahren. Das berichtet ein Forscherteam um John Anderson im Fachmagazin »Science Advances«. Die Geografen stützen ihren Befund auf Sedimentproben aus 516 Gewässern, mit denen sie den Kohlenstoffgehalt zu verschiedenen Zeitpunkten in der Vergangenheit rekonstruieren konnten.

Demnach nehmen Seen heute im Durchschnitt dreimal so viel Kohlenstoff auf wie zu Beginn des 20. Jahrhunderts. Dieser Trend zeigte sich in allen Klimazo-

nen, scheint jedoch in den Tropen am stärksten zu sein. Hier vervierfachte sich die jährlich eingelagerte Menge sogar. Insgesamt könne der eingelagerte Kohlenstoff die von Seen ausgehenden CO₂-Emissionen zu etwa 20 Prozent ausgleichen, schreiben die Forscher in ihrem Fachaufsatz.

Dass die Gewässer heute mehr Kohlenstoff binden als in der Vergangenheit, liegt laut Anderson und seinen Kollegen vor allem am Menschen: Durch die auf Dünger basierende Landwirtschaft gelangen mehr Stickstoff und Phosphor in die Gewässer, was autotrophen Lebewesen wie Algen zugutekommt. Rund 70 Prozent des Anstiegs sollen sich dadurch erklären lassen. Die restliche Menge könnte auf Dämme und andere Wasserbauprojekte zurückgehen, die die Landerosion verstärken. ↩

(Spektrum – Die Woche, 17/2020)

Robert Gast ist Physiker und Redakteur bei »Spektrum.de« und »Spektrum der Wissenschaft«.

Spektrum
der Wissenschaft



Spektrum
eBookFlat

Ausgewählte E-Books
von Springer Spektrum

HIER MEHR ERFAHREN

TROPEN

WÄLDER VERLIEREN IHRE **SENKENFUNKTION**

von Anja Rammig

Regenwälder in Südamerika und Afrika entziehen bislang der Atmosphäre mehr CO₂, als sie abgeben. Doch das könnte sich ändern – vor allem in Amazonien.

Weltweit nimmt die Gesamtfläche des tropischen Regenwalds durch Abholzung, Straßenbau und Brände ab – ein Trend, der sich in den letzten Jahren noch verschärft hat. Gleichzeitig beeinflusst der vom Menschen verursachte Klimawandel die Funktionsweise dieser Ökosysteme. Bislang können intakte Wälder der Atmosphäre Kohlenstoff in Form von CO_2 durch Fotosynthese aktiv entziehen und als Biomasse speichern. Etwa die Hälfte der terrestrischen Kohlenstoffbindung beruht auf dieser Leistung. Wie ein internationales Team um den Biologen Wannes Hubau von der belgischen Universität Gent nun berichtet, könnte diese global entscheidende Funktion als Kohlenstoffsенке sowohl in Amazonien als auch in den afrikanischen Regenwäldern schwinden – allerdings in unterschiedlichem Maß.

Anja Rammig ist Biologin und Assistenzprofessorin für »Land Surface-Atmosphere Interactions« an der Technischen Universität München.

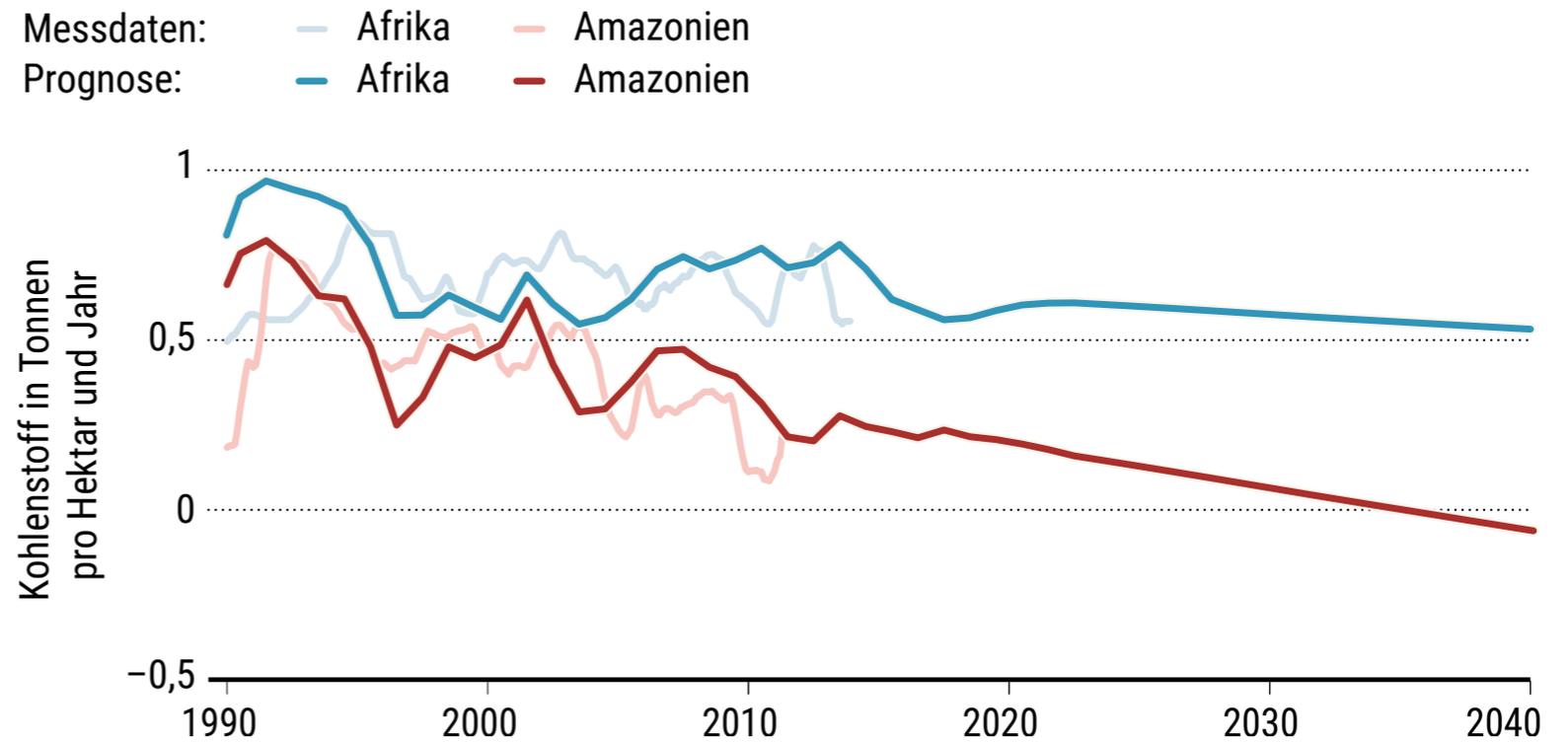


MESSDATEN SAMMELN | Im Amazonasregwald klettert ein Wissenschaftler zwei Meter hoch, um den Umfang eines Baumstamms zu messen. Mit solchen langfristig erhobenen Daten lässt sich die Menge des im Wald gespeicherten Kohlenstoffs abschätzen.

Wälder fungieren als Nettokohlenstoffsenke, wenn die durch das Wachstum der Bäume gebundene Kohlenstoffmenge größer ist als die durch abgestorbene Pflanzen freigegebene. Dann nimmt der in der Biomasse gespeicherte Kohlenstoff mit der Zeit zu. Aus dem Zusammenspiel zwischen Aufnahme und Abgabe ergibt sich die Kohlenstoffverweilzeit, die bestimmt, wie lange der Kohlenstoff im Wald gespeichert wird.

Die Wissenschaftler um Hubau werteten zwischen 1968 und 2015 gewonnene Wachstums- und Mortalitätsdaten von 244 ungestörten Waldstücken in elf afrikanischen Ländern aus und verglichen diese mit ähnlichen Messungen von 321 Parzellen in Amazonien. Wie sie dabei herausfanden, blieb die Kohlenstoffsenke in den afrikanischen Regenwäldern weitgehend stabil, wohingegen in Südamerika die jährliche Nettokohlenstoffaufnahme seit etwa 1990 abnimmt. Woher rühren diese unterschiedlichen Entwicklungen?

Auf Grund des wachsenden Kohlendioxidgehalts der Atmosphäre und des damit einhergehenden Düngungseffekts nehmen die Wälder beider Kontinente langfristig mehr Kohlenstoff auf. Auf der



Nettokohlenstoffaufnahme tropischer Regenwälder

Wissenschaftler um Wannes Hubau schätzten mit Wachstums- und Mortalitätsdaten ab, wie viel Kohlenstoff tropische Wälder in Afrika und Amazonien netto aus der Atmosphäre aufnehmen. Diese Funktion als Kohlenstoffsenke nahm in Südamerika seit den 1990er Jahren ab, während sie in Afrika bis 2015 stabil blieb. Mit Hilfe statistischer Modelle prognostizierten die Wissenschaftler die weitere Entwicklung. Demnach wird sich die Nettokohlenstoffaufnahme auf beiden Kontinenten vermindern, in Amazonien um 2035 sogar die Nulllinie unterschreiten – die dortigen Wälder verwandeln sich dann von einer Senke zu einer Kohlenstoffquelle.

anderen Seite verringerte sich seit der Jahrtausendwende das Pflanzenwachstum durch ansteigende Jahresmitteltemperaturen sowie zunehmende Trockenheit. In Afrika hielt sich die Kohlenstoffaufnahme länger auf einem hohen Niveau, denn hier schritt die Klimaerwärmung langsamer fort, und es traten weniger Dürren auf als in Amazonien. Außerdem herrschen in den meist höher liegenden Wäldern in Afrika generell niedrigere Lufttemperaturen. Dagegen konnten die Forscher durch statistische Analysen belegen, dass der Rückgang der Kohlenstofffixierung in Amazonien eindeutig auf Hitze und wiederholten extremen Dürreereignissen beruht.

Die Wissenschaftler führen somit den Rückgang der Kohlenstoffaufnahme auf klimatische Veränderungen zurück. Unberücksichtigt blieben andere Faktoren wie die Konkurrenz der Bäume um Licht oder Nährstoffe. Dass Einflüsse wie begrenzte Nährstoffverfügbarkeit mit zunehmender Kohlendioxidkonzentration das Pflanzenwachstum beeinträchtigen können, wissen wir aus Freilandexperimenten, bei denen der CO_2 -Gehalt der Luft künstlich angereichert wurde. Al-

lerdings fehlen bislang solche Daten aus alten Tropenwäldern Afrikas und Südamerikas.

Während in Amazonien die Nettokohlenstoffaufnahme bereits in den 1990er Jahren einbrach, blieb die Bilanz in Afrika noch bis vor einem Jahrzehnt ausgeglichen. Dieser Unterschied beruht nach Ansicht der Forscher auf dem schnelleren Pflanzenwachstum und der damit kürzeren Verweildauer des Kohlenstoffs in Südamerika. Die Düngung durch Kohlendioxid sollte die Wachstumsrate und die Kohlenstofffixierung erhöhen, doch sie steigert auch die CO_2 -Abgabe, da rascher wachsende Bäume jünger absterben und damit langfristig wenig zur Kohlenstoffsенке beitragen. Eine erhöhte Baumsterblichkeit in Verbindung mit chronischen Hitze- und Trockenperioden führt zu mehr Kohlenstoffverlusten, wobei dieser Effekt im Amazonasgebiet stärker ausgeprägt ist als in den afrikanischen Wäldern. Messdaten von afrikanischen Flächen weisen darauf hin, dass sich hier solche Kohlenstoffverluste erst seit etwa 2010 andeuten.

Die Wissenschaftler um Hubau wagen mit ihren statistischen Modellen auch ei-

nen Blick in die Zukunft bis zum Jahr 2040. Demnach werden in beiden Erdteilen die tropischen Regenwälder ihre Rolle als Kohlenstoffsенке immer mehr einbüßen. Den Prognosen zufolge wird in Afrika die Kohlenstoffbilanz 2030 um 14 Prozent niedriger liegen als im Zeitraum zwischen 2010 und 2015. Im Amazonasgebiet könnte sie um das Jahr 2035 sogar auf null zurückgehen – es wird dann also keine Nettokohlenstoffaufnahme aus der Atmosphäre mehr stattfinden.

Solche Extrapolationen sind allerdings mit Vorsicht zu genießen, da globale Modelle anderer Forscher eine Verstärkung der Kohlenstoffsенке durch CO_2 -Düngung in intakten Tropenwäldern vorhersagen. Wie meine Arbeitsgruppe in München 2019 feststellte, kann andererseits mangelnde Nährstoffverfügbarkeit, insbesondere von Phosphor, im Boden der Amazonaswälder deren Funktion als Kohlenstoffsенке maßgeblich einschränken. Die aktuellen Ergebnisse von Hubau und seinen Kollegen unterstreichen somit die Dringlichkeit, verschiedene ökologische Faktoren umfassend zu untersuchen, um diese in globale Modelle zur Dynamik tropischer Regenwälder zu integrieren.

Spektrum
der Wissenschaft

KOMPAKT

Was folgt aus den weltweit beobachtbaren Veränderungen in der Kohlenstoffbilanz intakter Tropenwälder? Bisherige Klimamodelle, mit denen die maximal vertretbare Menge an anthropogenen CO₂-Emissionen berechnet werden, um die globale Erwärmung auf deutlich unter zwei Grad Celsius zu begrenzen – das Ziel des Pariser Klimaschutzabkommens von 2015 –, gehen davon aus, dass die Tropen weiterhin als bedeutende Kohlenstoffsenke fungieren. Auf Basis der Ergebnisse der Forscher um Hubau, wonach sich die Tropen sehr bald von einer Senke zur Kohlenstoffquelle verwandeln könnten, müssten neben dem Schutz intakter Regenwälder die anthropogenen Treibhausgasemissionen noch stärker als im Abkommen festgelegt gesenkt werden, um katastrophale Klimaveränderungen zu verhindern. ↩

(Spektrum der Wissenschaft, Juni 2020)

Hubau, W. et al.: Asynchronous carbon sink saturation in African and Amazonian tropical forests. *Nature* 579, 2020

nature

© Springer Nature Limited

www.nature.com

Nature 579, S. 38–39, 2020

KLIMA- WANDEL

FÜR NUR
€ 4,99

Der Einfluss der globalen Erwärmung

Küstenschutz | Wann kommt die Flut?
Atmosphäre | Das Wolkenparadoxon
Extremwetter | Ist das noch normal?

HIER DOWNLOADEN



METHAN

GEFÄHRLICHER **REKORD**

von Janosch Deeg

Der Ausstoß des Treibhausgases Methan hat die höchsten jemals gemessenen Werte erreicht. Der Anstieg seit dem Jahr 2000 ist besonders auf die Zunahme der Emissionen aus dem Kohlebergbau, der Erdöl- und Erdgasförderung sowie der Rinder- und Schafzucht zurückzuführen.

Die globalen Methanemissionen haben die höchsten jemals registrierten Werte erreicht. Wie die Forscher der Stanford University in den Fachmagazinen »Earth System Science Data« und »Environmental Research Letters« berichten, hat die Erdatmosphäre im Jahr 2017 fast 600 Millionen Tonnen des farblosen, geruchlosen Gases absorbiert. Damit sind die jährlichen Methanemissionen seit den frühen 2000er Jahren, als die Methankonzentrationen in der Atmosphäre relativ stabil waren, um neun Prozent oder 50 Millionen Tonnen pro Jahr gestiegen. Für ihre Studie werteten die Wissenschaftler Daten von Satelliten und von bodengestützten Messstationen aus; für die Jahre 2018 und 2019 liegen die Daten noch nicht vor.

Am stärksten war der Anstieg in Afrika und im Nahen Osten, in China sowie in Südasien und Ozeanien, zu dem Australien und viele Pazifikinseln gehören. Jede dieser drei Regionen erhöhte die Emissionen während des Untersuchungszeitraums um schätzungsweise 10 bis 15 Millionen Tonnen pro Jahr. Die Vereinigten Staaten folgten dicht dahinter und erhöhten die Methanemissionen um 4,5 Millionen Tonnen, was hauptsächlich auf mehr Erdgasbohrungen und -verbrauch zurückzuführen ist.

Weltweit sind vor allem fossile Brennstoffquellen und Rinder für die Zunahme verantwortlich. »Die Emissionen von Rindern und anderen Wiederkäuern sind fast so groß wie die der fossilen Brennstoffindustrie für Methan«, sagt einer der Autoren in einer Pressemitteilung der Stanford University. Die Leute würden über rülpsende Kühe scherzen, aber nicht realisieren, wie groß die Quelle tatsäch-

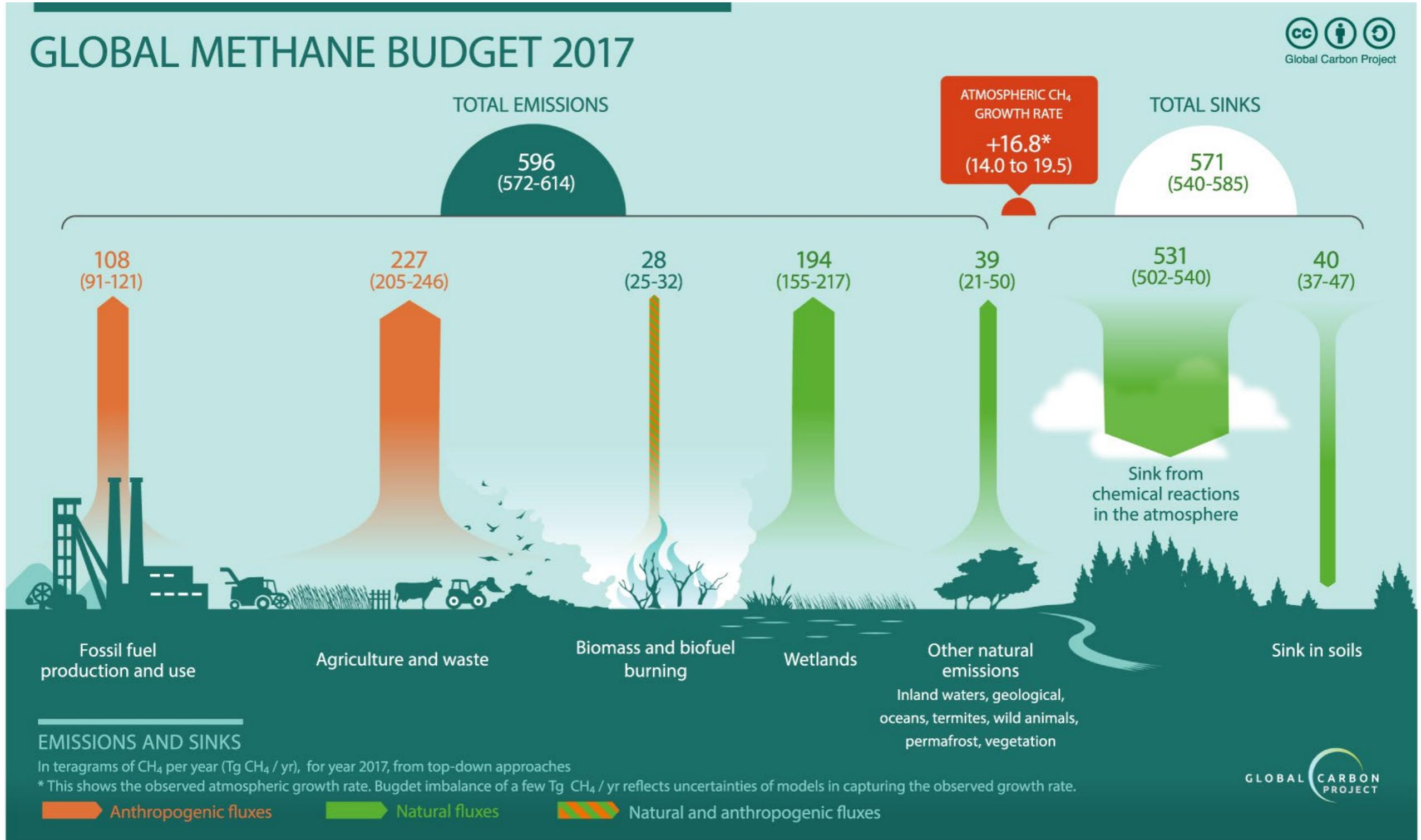
lich ist. Die Forscher fanden hingegen bislang keinen Hinweis auf einen Anstieg der Methanemissionen in der Arktis. Das wird auf Grund des dort auftauenden Permafrostes befürchtet.

Methan ist ein sehr potentes Treibhausgas und hat eine etwa 25-fach höhere Treibhauswirkung als Kohlendioxid (CO₂). Daher spielt es trotz seines vergleichsweise geringen Anteils in der Atmosphäre eine wichtige Rolle für das Klima der Erde. Geht der Trend für den Methanausstoß so weiter, würde das laut Klimamodellen bis zum Ende dieses Jahrhunderts zu einer Erwärmung von drei bis vier Grad Celsius führen, schreiben die Autoren. Naturkatastrophen wie Waldbrände, Dürren und Überschwemmungen sowie soziale Verwerfungen inklusive Völkerwanderungen und Hungersnöte wären dann alltäglich. ↪

(Spektrum.de, 15.07.2020)

Aufschlüsselung der Methanemissionen für das Jahr 2017

Der globale Methanhaushalt für das Jahr 2017 basiert auf Daten von Satellitensensoren. Quellen, die mit menschlichen Aktivitäten zusammenhängen sind orange; grün zeigt natürliche Quellen und Senken (nehmen Methan auf); Methanquellen, die sowohl mit menschlichen Aktivitäten als auch mit der Natur zusammenhängen, wie etwa Waldbrände und die Verbrennung von Biomasse, sind orange-grün schraffiert.



JACKSON, R.B. ET AL.: INCREASING ANTHROPOGENIC METHANE EMISSIONS ARISE EQUALLY FROM AGRICULTURAL AND FOSSIL FUEL SOURCES. ENVIRONMENTAL RESEARCH LETTERS 15, 2020, FIG. 1 / CC BY 4.0 (CC BY)

FOSSILE BRENNSTOFFE

DIE METHAN- RECHNUNG GEHT NICHT AUF

von Daniela Mocker

Rund ein Drittel des menschengemachten Methanausstoßes wird durch fossile Brennstoffe verursacht – dachte man zumindest. Nun zeigt sich: Dieser Wert liegt offenbar viel zu niedrig.



Methan ist unberechenbar und gefährlich. Über lange Zeiträume ist es nur das zweitwichtigste Treibhausgas, kurzfristig aber ist sein Erwärmungspotenzial um ein Vielfaches höher als jenes des Kohlendioxids. Nicht zuletzt steigt seine Konzentration seit Jahren dramatisch an. Der Grund ist unklar, denn bisher weiß niemand so genau, woher wie viel des Gases in die Umwelt gelangt.

Eine Studie von Wissenschaftlern um Benjamin Hmiel von der University of Rochester legt nun nahe, dass Fachleute sich bei einer bedeutenden Methanquelle deutlich verschätzt haben könnten. Denn Hmiel und seine Kollegen stellten fest, dass offenbar rund zehnmal weniger Methan auf natürliche Weise aus geologischen Quellen austritt als bislang angenommen. Damit hat die Kohle-, Öl- und Gasförderung im Umkehrschluss einen deutlich höheren Anteil am Methanausstoß.

Daniela Mocker ist stellvertretende Redaktionsleiterin von »Spektrum.de«.

Wie viel Methan sich aktuell in der Atmosphäre befindet, können Forscher eigentlich relativ gut ermitteln. Schwieriger ist es hingegen, festzustellen, woher das Treibhausgas genau kommt: Welcher Anteil des Methans ist biologisches Methan, das etwa aus Sümpfen, aus der Landwirtschaft oder aus der Verbrennung von Biomasse stammt? Wie entsteht geologisches Methan – in Folge von vulkanischer Aktivität oder durch die Gewinnung fossiler Brennstoffe? Welcher Anteil wird durch den Menschen verursacht, welcher durch die Natur?

Studien haben in den vergangenen Jahren, je nach verwendeter Methodik, relativ unterschiedliche Zahlen zu diesen Aspekten hervorgebracht. Die meisten Fachleute waren sich allerdings einig, dass rund ein Drittel des menschengemachten Methanausstoßes aus der Gewinnung und Nutzung fossiler Brennstoffe stamme. Tatsächlich ist es wohl deutlich mehr.

Um bis zu 40 Prozent verschätzt

Hmiel und sein Team konzentrierten sich in ihrer Arbeit ausschließlich auf das geologische Methan. Um der Frage nachzu-

gehen, wie viel davon aus natürlichen Quellen und wie viel durch industrielle Prozesse in die Atmosphäre gelangt, untersuchten sie Eisbohrkerne aus Grönland und der Antarktis. In diesen fanden sich unter anderem winzige Luftein-schlüsse aus jener Zeit, in der sich die Eisschicht gebildet hatte, und erlaubten so einen Blick in die Vergangenheit. Die Forscher ließen das Eis in einer speziellen Kammer schmelzen und analysierten anschließend die chemische Zusammensetzung der frei gewordenen Luft. Das im Methan enthaltene Kohlenstoffisotop ^{14}C ermöglichte es ihnen dabei, zwischen biologischem und geologischem Methan zu unterscheiden, da es im Lauf der Zeit zerfällt und deshalb nur in Ersterem enthalten ist.

Auf diese Weise ermittelten die Wissenschaftler, dass die natürlichen geologischen Methanemissionen im frühen 18. Jahrhundert – vor dem Beginn der Industrialisierung – nur bei 1,6 Teragramm pro Jahr lagen (was 1,6 Millionen Tonnen entspricht), maximal bei 5,4 Teragramm. Um 1870 herum stiegen die Emissionen dann sprunghaft an, was zeitlich mit dem Beginn der verstärkten Nutzung fossiler

Brennstoffe zusammenfalle, erklären die Forscher.

In früheren Untersuchungen beziffer-ten Experten den natürlichen Methanausstoß aus geologischen Quellen auf 40 bis 60 Teragramm pro Jahr. Hmiel und sein Team schließen daraus, dass man die menschengemachten Methanemissionen aus fossilen Quellen bisher um rund 25 bis 40 Prozent unterschätzt habe. Statt einem Drittel könnte bald die Hälfte der durch den Menschen verursachten Methanemissionen auf das Konto fossiler Brennstoffgewinnung und -nutzung gehen.

»Die Unsicherheit der älteren Studien war deutlich höher als in der neuen Studie, und damit muss der gefundene Unterschied als sehr wahrscheinlich zutreffend betrachtet werden«, sagt Ralf Sussmann vom Institut für Meteorologie und Klimaforschung – Atmosphärische Umweltforschung am KIT, der nicht an der Untersuchung beteiligt war. »Der Grund für die höhere Unsicherheit der früheren Studien liegt darin, dass diese auf Stichproben an Einzelquellen und deren fehlerbehaftete modellbasierte Extrapolation auf die globale Skala angewiesen waren. Demgegenüber vermisst die neue

Studie direkt die atmosphärischen $^{14}\text{CH}_4$ -Spurengas-Hintergrundkonzentrationen und ist damit frei von derartigen Extrapolationsfehlern.«

Was zunächst wie eine Hiobsbotschaft klingt, habe aber auch seine guten Seiten, sagt Studienautor Hmiel: »Die Einführung strengerer Vorschriften für Methanemissionen in der fossilen Brennstoffindustrie hat das Potenzial, die globale Erderwärmung stärker einzudämmen als bisher angenommen.« Und auch Thomas Kleinen vom Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg kann den Ergebnissen der Studie durchaus etwas Positives abgewinnen: »Für den Klimaschutz ist dies eine gute Nachricht. Die Emissionen von Methan, das aus menschlichen Quellen stammt, können wir Menschen reduzieren, so schwer es uns auch fallen mag. Wenn das Methan dagegen aus geologischen Quellen stammte – was bislang unsere Annahme war – hätten wir keinen Einfluss darauf und müssten an anderer Stelle umso mehr reduzieren.« ↩

(Spektrum – Die Woche, 08/2020)



gymglish
& **Spektrum.de**

Verbessern Sie Ihr Englisch online

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

1 Monat kostenlos



ZYANOBAKTERIEN

Unerwartete Produzenten

von Jan Dönges

ELIF BAYRAKTAR / GETTY IMAGES / ISTOCK

Im Alltag kennt man sie vor allem aus belasteten Badeseen. Doch Zyanobakterien gibt es so gut wie überall. Und überall produzieren sie offenbar das starke Treibhausgas Methan.

Seit Langem rätseln Forscher darüber, woher das Methan stammt, das aus den Ozeanen der Welt entweicht. Normalerweise entsteht Methan, wenn bestimmte Mikroorganismen beispielsweise den Faulschlamm am Grund eines Sees zersetzen. Doch in den sauerstoffreichen oberen Schichten des Meers herrschen die falschen Bedingungen dafür. Woher stammt also das Gas, das noch viel stärker als Kohlendioxid zur Erderwärmung beiträgt?

Wissenschaftler um Mina Bižić vom Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei in Stechlin bringen nun eine unerwartete Quelle ins Gespräch: Zyanobakterien, winzige, Photosynthese betreibende Einzeller, die nahe-

zu überall auf der Welt vorkommen – auch in den obersten Schichten des Meers. Bižić und Kollegen gelang es mit Hilfe aufwändiger Laborexperimente nachzuweisen, dass die Bakterien das Methan offenbar als Teil ihres gewöhnlichen Stoffwechsels produzieren. In ihrer Veröffentlichung im Fachjournal »Science Advances« zeigen sie, dass die Herstellung des Gases mit der Photosynthese zusammenhängt. Wie genau, sei jedoch noch offen.

Warum sich die Bakterien überhaupt »die Mühe machen«, Methan zu produzieren und abzugeben, bleibe rätselhaft, erklärt Hermann Bange vom Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung in Kiel, der an der Studie nicht beteiligt war, dem Science Media Center. Hier seien noch weitere Untersuchungen notwendig. »Auch um zu zeigen, ob die Ergebnisse der hier präsentierten Kulturexperimente auf die Natur übertragbar sind«, so der Forscher.

Die Entdeckung könnte Forschern helfen, den irdischen Methankreislauf besser zu verstehen. Und genauere Klimaprognosen wären möglich. Denn wo immer mehr Meeresgebiete überdüngt sind und die Wassertemperaturen durch den Klimawandel steigen, verbessern sich die Lebensbedingungen für Zyanobakterien. Dadurch sollte sich auch ihr Methanausstoß erhöhen, was dann wiederum den weltweiten Temperaturanstieg vorantreibt. »Es ist aber auch wichtig zu wissen, dass der Ozean keine allzu große Methanquelle im globalen Methanbudget ist. Böden, Sumpfgebiete und zum Teil Seen zum Beispielsind deutlich wichtiger«, schränkt Moritz Lehmann von der Universität Basel, ebenfalls gegenüber dem Science Media Center, ein. Auch Lehmann war an der aktuellen Studie nicht beteiligt. ↩

ILLEGALEN EMISSIONEN AUF DER SPUR

DIE FCKW-DETEKTIVE

von Jane Palmer

Damit hatte keiner gerechnet: dass Firmen tatsächlich heimlich weiter FCKW produzieren würden. Dies ist die Geschichte der Forscher, die ihnen auf die Schliche kamen.



Die Jungfrauoch-Forschungsstation, hoch oben in den Schweizer Alpen, rund 3450 Meter über dem Meeresspiegel, scheint auf ihrem kleinen Felsvorsprung förmlich zu balancieren. Fünf Labore, eine Werkstatt, eine Bibliothek, eine winzige Küche plus zehn Schlafräume stehen der kleinen Besatzung zur Verfügung. Unablässig saugen Pumpen die dünne Bergluft ein, leiten sie durch ein Instrumentarium, das sie auftrennt, misst, analysiert. In der Abgeschiedenheit der Hochalpen fahnden die Forscher nach Abertausenden von unterschiedlichen Molekülen in der Luft. »Ein bisschen so, als würden wir die DNA der Atmosphäre entziffern«, sagt der Atmosphärenchemiker Martin Vollmer.

Sein Spezialgebiet ist es, in den Spurengasen der Atmosphäre nach neu auftretenden Stoffen zu suchen, darunter auch die berüchtigten FCKW, die Fluorchlorkohlenwasserstoffe, die als Kühlmittel und zum Aufschäumen von Kunststoffen zum Einsatz kommen. Die Erkenntnis, dass sie die schützende

Ozonschicht der Erde zerstören, führte 1987 zur Verabschiedung eines Meilensteins des Umweltschutzes: Im so genannten Montreal-Protokoll wurde staatenübergreifend vereinbart, die Substanzen zu regulieren und schließlich gar nicht mehr zu verwenden. Später kamen Ersatzchemikalien, die sich als ebenso gefährlich für Ozonschicht, Klima oder beides erwiesen, ebenfalls auf die schwarze Liste.

Es ist an Forschern wie Vollmer, der als Teil seiner Atmosphärenforschung an der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa) in Dübendorf auch den FCKW nachspürt, darüber zu wachen, ob die Staaten ihren Verpflichtungen aus dem Vertrag nachkommen. »Das ist Detektivarbeit«, sagt Stephen Montzka von der National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) in Boulder, US-Bundesstaat Colorado. »Unser Job ist es festzustellen, ob sich die Dinge so entwickeln, wie sie sich entwickeln sollen.«

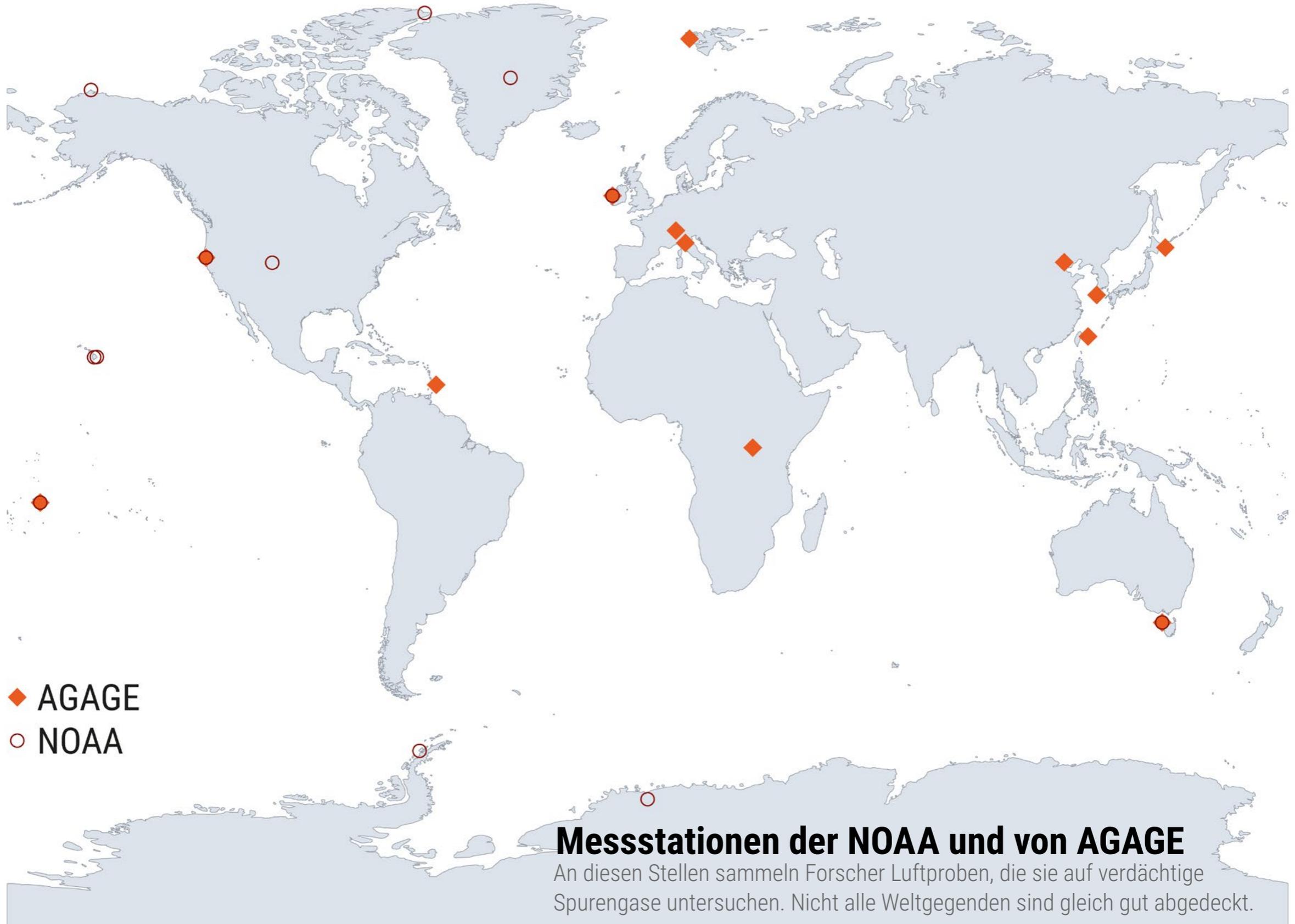
Viele Jahre lang hatten sie nur gute Nachrichten für die Welt. Die Konzentra-

tion der FCKW und anderer gefährlicher Stoffe nahm kontinuierlich ab. Nach Meinung vieler Forscher war es der größte Erfolg einer Umweltschutzmaßnahme, den die Welt je gesehen hat.

Im Mai 2018 aber veröffentlichte Montzka eine merkwürdige Auffälligkeit in seinen Messungen: Die Werte eines der gefährlichsten Ozonkiller, Trichlorfluormethan oder CFC-II, sanken langsamer als erwartet. Konnte es sein, dass Firmen das Verbot unterliefen und doch noch CFC-II produzierten? »Es war das Überraschendste und Schockierendste, was ich in meiner gesamten Berufslaufbahn erlebt habe«, sagt Montzka.

Bergluft in Flaschen

Auch Jen Morse weiß: Ohne einen Gang an die frische Luft geht es nicht. Einmal pro Woche macht sich die wissenschaftliche Mitarbeiterin der University of Colorado zu einer kleinen grünen Hütte in den Bergen Colorados auf. Ihr Ziel ist die Niwot Ridge. Sie liegt in der so genannten Front Range der Rocky Mountains. Im Sommer kann Morse ein Stück des sechs



Kilometer langen Wegs mit dem Auto fahren, nur die letzten 1000 Meter geht sie dann zu Fuß. Im Winter muss sie auf Skiern in eine Höhe von 3523 Metern klettern. Auf ihrem Rücken: vier große Gasflaschen.

Oben angekommen saugt sie Luft aus einem Auffangbehälter in die vier Flaschen. Mit der abgepackten Bergluft im Gepäck geht es dann wieder abwärts zur Global Monitoring Division der NOAA, die, nur 40 Kilometer entfernt, ebenfalls in Boulder angesiedelt ist. Dort leiten dann Montzka und seine Kollegen den Inhalt der Flaschen durch drei Gaschromatografen und ermitteln die Konzentration von 50 Spurengasen. Sie wollen herausfinden, was sich im »atmosphärischen Hintergrund« abspielt, wie es um die Luft bestellt ist, die um den Globus als Ganzes zirkuliert. Das erfährt man am besten dort, wo es keine lokalen Verschmutzungsquellen gibt – etwa in der Umgebung des kleinen grünen Schuppens auf der Niwot Range oder in der Jungfrauoch-Station. Die Abgeschiedenheit dieser Örtlichkeiten ist auch ihr größter Nachteil: Sie sind schwer zu erreichen und teuer in der Unterhaltung, meint Montzka.

Am Südpol gibt es welche, im grönländische Inlandeis und an der Südspitze Tasmaniens. Insgesamt empfängt Montzkas Labor Luftproben von 16 Entnahmestellen. Das Jungfrauoch hingegen ist Teil eines weiteren Messstellennetzwerks namens Advanced Global Atmospheric Gases Experiment (AGAGE), bei dem mit Förderung der NASA an 13 Orten Proben gesammelt werden.

An manchen davon werden seit den 1970er Jahren die Konzentrationen von FCKW und verwandten Verbindungen gemessen. Als man die Substanzen in den 1920er Jahren entwickelte, galten sie als unbedenklich. Erst im Lauf der 1970er Jahre kam man dahinter, dass sie auch in hohe Luftschichten aufsteigen und dort ihr zerstörerisches Werk anrichten. 1985 entdeckte man schließlich das Ozonloch.

NOAA- und AGAGE-Forscher treffen sich regelmäßig, um sich über ihre Ergebnisse auszutauschen und an die Unterzeichnerstaaten weiterzugeben. Von ihnen stammten auch die Hinweise, die zu den Ergänzungen des Protokolls führten, das inzwischen deutlich mehr Substanzen reguliert als noch zu Beginn. »Die Verabschiedung des Protokolls war keine

einmalige Angelegenheit«, sagt David Fahey, Atmosphärenchemiker bei der NOAA und einer der vier Kovorsitzenden des wissenschaftlichen Beirats des Protokolls.

10 000-mal schädlicher als Kohlendioxid

Für die Überwachungsteams ist es wie beim Märchen von Hase und Igel: Kaum haben sie einen verdächtigen Stoff dingfest gemacht, erscheint schon wieder der nächste am Himmel. Bereits vor dem FCKW-Verbot haben Hersteller mit alternativen Kühlmitteln experimentiert, etwa mit teilhalogenierten Kohlenwasserstoffen. Doch auch deren ozonschädigende Wirkung wurde schnell offenbar. Eine 2007 verabschiedete Erweiterung des Protokolls verlangt nun, dass ihre Herstellung und Verwendung bis 2030 ausläuft. Die dritte Generation der Kühlmittel, die teilfluorierten Kohlenwasserstoffe, erwies sich dank eines Verzichts auf Chlor oder Brom endlich als ungefährlich für die Ozonschicht. Aber wie sich bald zeigen sollte, sind sie potente Treibhausgase, deren klimaschädliche Wirkung die von CO₂ um mehr als das 10 000-Fache übersteigen kann.

Ohne Regulierung drohen die teilfluorierten Kohlenwasserstoffe die Erde bis 2100 um ein halbes Grad zu erwärmen. Darum verlangen nun die so genannten Kigali-Änderungen des Montrealer Protokolls, verabschiedet im Jahr 2016, Produktion und Einsatz dieser Stoffe bis Ende der 2040er Jahre um 80 bis 85 Prozent zu reduzieren.

Bei der Überwachung dieser Vereinbarungen stoßen Messstationen wie die auf dem Jungfrauoch immer wieder auf verdächtige Daten. So registrierten Wissenschaftler der Station, dass Norditalien von 2008 bis 2010 jährlich zwischen 26 und 56 Tonnen des äußerst klimaschädlichen Fluoroform (HFC-23) freisetzte. Laut offiziellen Angaben sollten es jedoch eigentlich kaum mehr als zweieinhalb Tonnen im ganzen Land sein.

Insgesamt aber sah es lange danach aus, als würden die Maßnahmen greifen. Auch die Ozonschicht schien aus der Gefahrenzone, da mehrten sich die Anzeichen, dass etwas nicht stimmte.

Im Jahr 2013 sei es gewesen, erzählt Montzka, dass ihm eine merkwürdige Datenreihe auffiel. Die Konzentration von CFC-11 war über Jahre hinweg mit ei-

ner relativ konstanten Rate von 0,8 Prozent pro Jahr gesunken. Im Verlauf der letzten Monate hatte sich der Rückgang dann plötzlich abgeschwächt. »Ich war völlig verblüfft, ich konnte es nicht glauben«, sagt Montzka. Was war der Grund dafür? Die Produktion von CFC-11 war schon Jahre zuvor eingestellt worden. Montzka tat es als Messfehler ab, in der Hoffnung, dass mit den kommenden Messungen die Welt wieder in Ordnung sein würde.

Doch dem war nicht so. Zwischen 2002 und 2012 beliefen sich die jährlichen CFC-11-Emissionen auf rund 54 000 Tonnen – das Gas entwich alten Schaumstoffisolierungen und Geräten, die vor der Mitte der 1990er Jahre hergestellt wurden. Aber zwischen 2014 und 2016 schnellten die jährlichen Emissionsmengen plötzlich auf 67 000 Tonnen – ein Zuwachs um fast 25 Prozent.

Luftverschmutzung transportierte das CFC-11 ostwärts

Die Forscher bemerkten außerdem: Immer wenn das hawaiianische Mauna-Loa-Observatorium im Jahr 2013 eine der dort regelmäßig durchziehenden

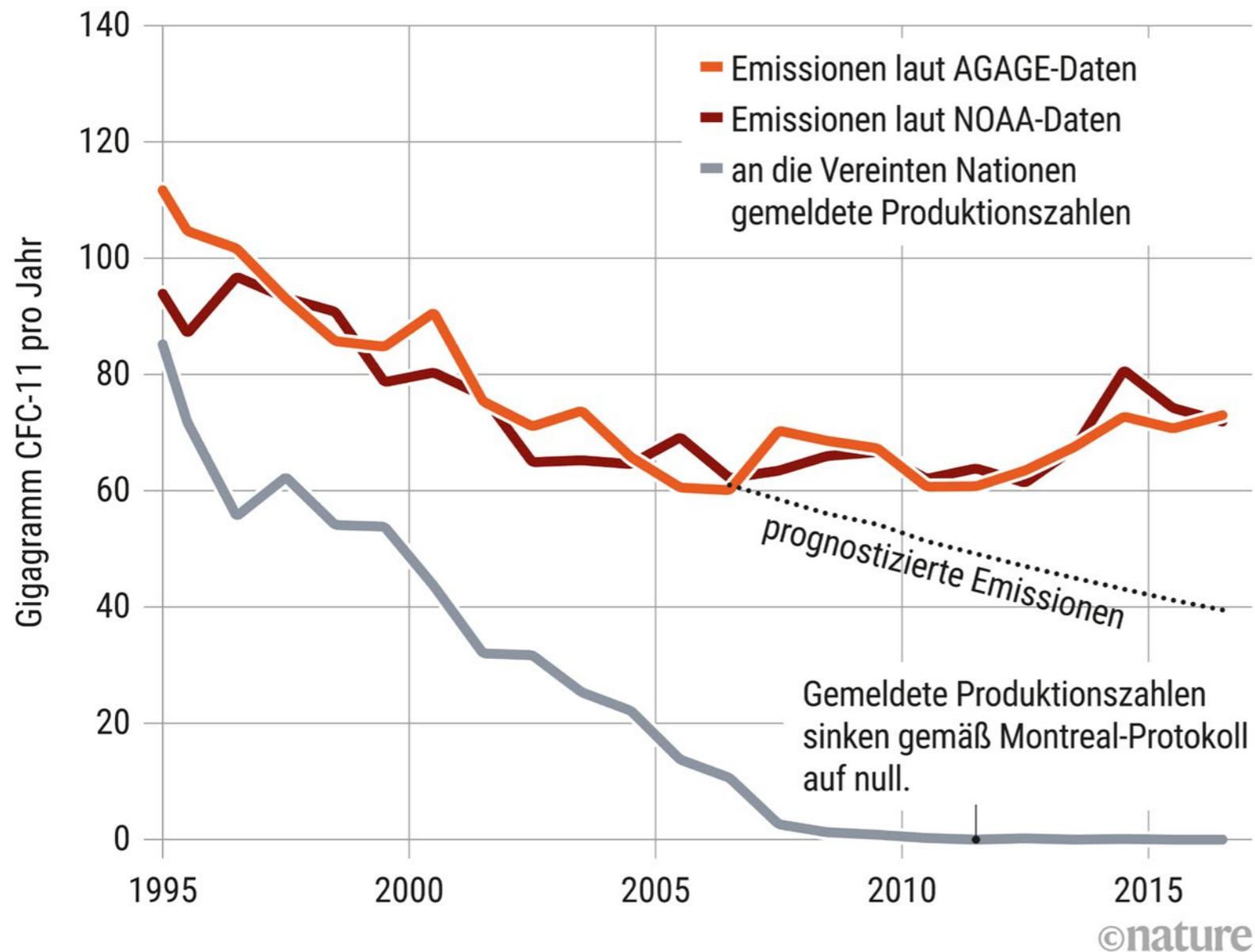


GEORGECLERK / GETTY IMAGES / ISTOCK

»Wenn sie so weitermachen, verzögert sich der Prozess vielleicht um Jahre oder Jahrzehnte«

(Matthew Rigby)

Schmutzwolken erfasst hatte, fanden sich unerwartet hohe CFC-11-Konzentrationen in den Proben. Eine genauere Inspektion legte Ostasien als Quelle der Substanzen nahe.



Rückgang mit Unterbrechung

Die Daten zeigen, wie sich die Konzentration von CFC-11 plötzlich stabilisierte, obwohl sie eigentlich hätte weiter sinken sollen. Die Quelle eines Teils der Emissionen fand sich schließlich in China.

Ein Expertenteam nahm sich der Sache an. Es suchte in unabhängig erhobenen Daten, vor allem jenen, die die Kollegen von AGAGE auf den Inseln Jeju in Südkorea und Hateruma in Japan erhoben hatten, nach Hinweisen auf die Quelle. Auch hier zeigten sich von 2013 an immer stärkere Ausschläge der CFC-11-Konzentration, wenn eine Schmutzwolke durchzog.

Vier Forschergruppen arbeiteten parallel an Computersimulationen der Atmosphäre, die zeigen sollten, woher das FCKW stammte. Und alle erhielten sie die gleiche Antwort: Rund 7000 Tonnen kamen aus den chinesischen Provinzen Shandong und Hebei.

Emissionen in diesem Umfang würden die Erholung der Ozonschicht nicht merklich aufhalten, meint Matthew Rigby, Atmosphärenchemiker von der University of Bristol. »Aber wenn sie so weitermachen, verzögert sich der Prozess vielleicht um Jahre oder Jahrzehnte.«

Bei ihrer Antrittsrede vor der 31. Versammlung der Teilnehmerstaaten des Montreal-Protokolls am 4. November 2019 in Rom lobte die Exekutivsekretärin des Ozon-Sekretariats der Vereinten Nationen Tina Birmpili die Erfolge des Abkom-

mens und insbesondere Chinas schnelles Vorgehen gegen die CFC-II-Emittenten im eigenen Land. Die Volksrepublik richtete beispielsweise ein landesweites Messstellennetzwerk ein und erhöhte die Strafen, die bei einem Verstoß gegen den Produktionsstopp fällig sind.

Setzen weitere Firmen heimlich FCKW frei?

Birmpili wies jedoch auch auf ein offenkundiges Problem hin. Wenn laut neuesten Schätzungen chinesische Firmen für 40 bis 60 Prozent des globalen CFC-II-Anstiegs verantwortlich sind, woher stammen dann die verbleibenden 4000 bis 10000 Tonnen?

Noch sei man nicht in der Lage, zu entscheiden, ob es auf der Welt weitere Quellen für die Ozonkiller gibt oder ob die verbleibenden Schwankungen auf Unsicherheiten im Modell zurückgehen, erläutert der Bristoler Forscher Rigby. Erst in naher Zukunft sollte das möglich werden. Laut Montzka hat die Wissenschaft diesmal einfach Glück gehabt: Die Trendumkehr in den Messdaten wurde früh bemerkt, zudem lagen viele Daten aus genau der Region vor, aus der das CFC-II

stammte. Wäre es in Indien, Russland oder Südamerika produziert worden, hätten die existierenden Netzwerke seine Quelle vermutlich nicht ausfindig machen können, einfach weil es keine Messstellen in der Nähe gibt.

Bei seinem eigenen Vortrag auf der Teilnehmersammlung in Rom präsentierte Montzka neueste Daten aus der weltweiten Überwachung. Demnach scheinen die illegalen Emissionen im Jahr 2018 zurückgegangen zu sein. So beschleunigte sich der Rückgang des Gases in der Atmosphäre wieder, und in den Schmutzwolken, die von den Stationen auf Jeju und Hawaii erfasst wurden, lag der CFC-II-Anteil deutlich unter den auffälligen Werten der Jahre zuvor. Auch wenn die Resultate noch bestätigt werden müssen, sind die Experten zuversichtlich. »Es sieht so aus, als habe sich das Montreal-Protokoll wieder einmal bewährt, diesmal unter unvorhergesehenen Umständen«, sagt Fahey.

Sollten die CFC-II-Konzentrationen weiter zurückgehen, wäre es ein bedeutender Erfolg für die Wissenschaftler und ihre Messstellennetzwerke, deren Existenzberechtigung gern einmal in Frage

gestellt werde, wie Stefan Reimann, ebenfalls von der Empa, erklärt. »Die Geschichte zeigt jedoch: Wir werden noch gebraucht.«

Der Vorfall offenbare allerdings auch Schwächen eines Systems, das eigentlich dazu gedacht war, eine sich wandelnde Atmosphäre zu beobachten, und nicht, um illegalen Emissionen nachzuspüren, erklärt der Geochemiker Ray Weiss von der University of California in San Diego. »Mit einem Verstoß gegen das Protokoll hat niemand gerechnet. Das sollte uns eine Lehre sein.«

Neue Stoffe, neue Fragen

Inzwischen hat die NOAA eine weitere Probensammelstelle an der koreanischen Westküste eingerichtet, die genauere Daten aus Ostasien liefern soll. Laut Birmpili wollen die Staaten weiter an Strategien arbeiten, mit denen ähnlichen Verstößen in Zukunft vorgebeugt werden kann.

Für die Wissenschaftler heißt das zunächst: weiter sammeln, messen und studieren. Auf dem Jungfrauoch nimmt Vollmer die jüngste Generation der Kältemittel ins Visier, die Hydrofluorolefine (HFO). In der Atmosphäre können einige von ih-

nen, wie etwa der Stoff HFO-1234yf, zu Trifluoressigsäure zerfallen, die auf manche Pflanzen und Bodenorganismen giftig wirkt. Die Umweltbehörden Deutschlands und Norwegens fordern darum bereits mehr Forschung zu HFO, zumal die Messungen am Jungfraujoch auf einen vermehrten Einsatz dieser Verbindungen hindeuten. Im Jahr 2011 tauchte HFO-1234yf noch in keiner einzigen Probe auf, im Jahr 2018 lag die Quote bei 71 Prozent.

Derzeit produziert die Industrie nur geringe Mengen von HFO, weil die Auslaufphase der teilfluorierten Kohlenwasserstoffe gerade erst begonnen hat. »Wenn man das aber mal grob überschlägt und sämtliche Verbindungen, die wir in der Vergangenheit genutzt haben, durch HFO ersetzt, sieht man, dass gewaltige Mengen dieses Gases auftreten würden«, sagt Vollmer.

Für ihn bedeutet dies, weiterhin jeden Monat den Gebirgssattel in den Schweizer Alpen zu erklimmen, wo tagein, tagaus die Instrumente der Jungfraujoch-Station brummen. »Wir dürfen nicht aufhören zu beobachten«, betont er. ↩

(Spektrum – Die Woche, 05/2020)

ATMOSPHERE

Schutzhülle unserer Erde

Wolken | Vom lokalen zum globalen Bild
Rayleigh-Streuung | Warum ist der Himmel blau?
Klimazonen | Die Tropen machen sich breit

HIER DOWNLOADEN

FÜR NUR
€ 4,99



DISTICKSTOFFMONOXID Gar nicht zum Lachen

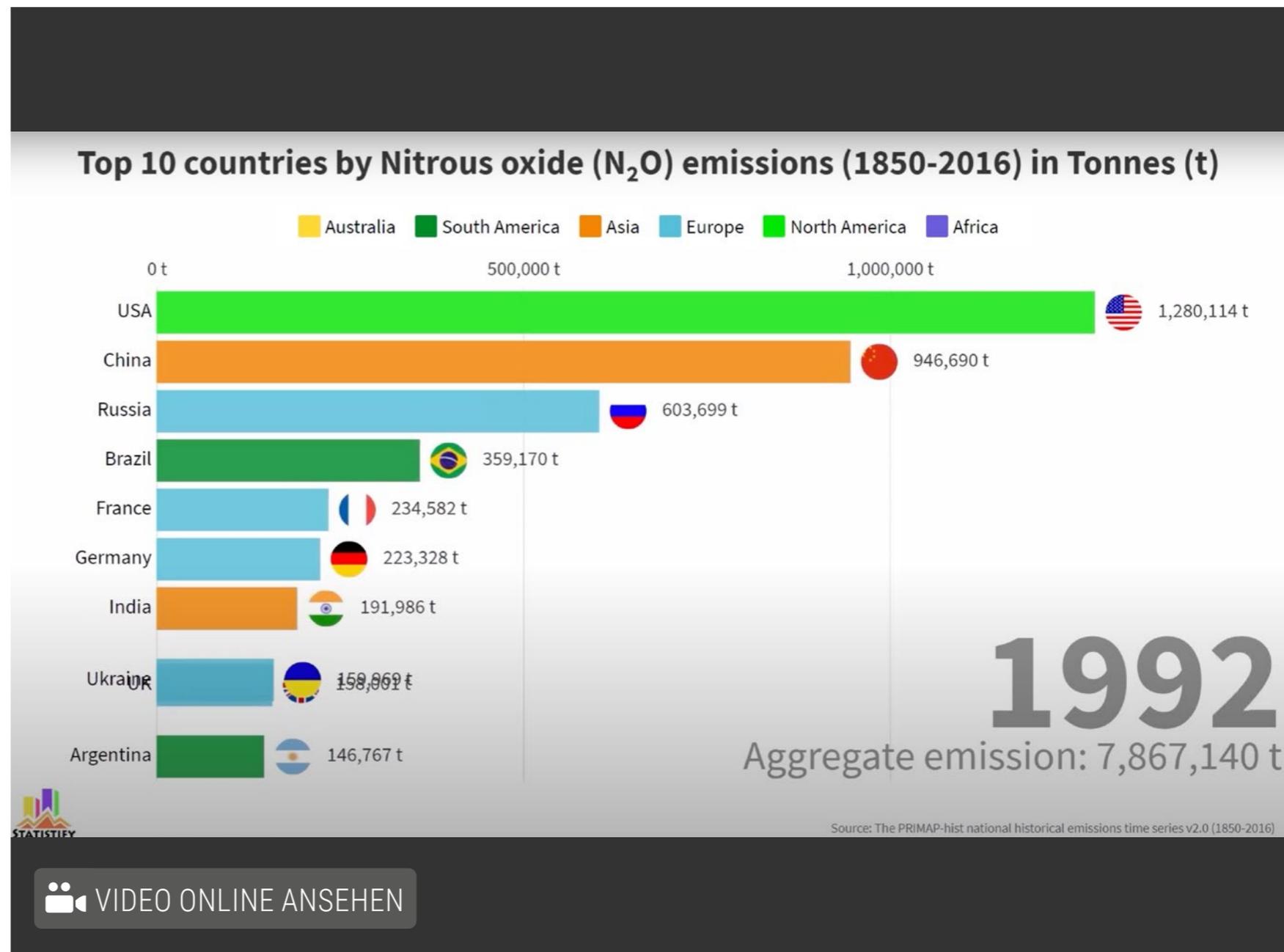
von Thomas Brandstetter

N_2O , auch Lachgas genannt, ist das drittschädlichste Treibhausgas in der Atmosphäre. Neuen Studien zufolge könnte seine Rolle bisher unterschätzt worden sein.

Kohlendioxid gilt als Klimakiller Nummer eins und steht damit völlig zu Recht im Zentrum der Aufmerksamkeit. Auch das Methan, das auf Platz zwei rangiert, einen verheerenden Einfluss auf unser Klima hat, ist den meisten Menschen bewusst. Der drittichtigste Beitrag zum Drama des menschengemachten Klimawandels, Distickstoffmonoxid, scheint dagegen in der öffentlichen Wahrnehmung noch nicht so recht angekommen zu sein. Besser bekannt unter dem Trivialnamen Lachgas, gelangt es vor allem aus überdüngten Böden in die Luft. Zwar beträgt die Konzentration des Gases in der Atmosphäre aktuell weniger als ein Tausendstel der Kohlendioxidkonzentration, seine Wirksamkeit in Bezug auf den Treibhauseffekt ist pro Teilchen allerdings knapp 300-mal höher.

In dem unspektakulären, aber informativen Youtube-Video von Statistify

Thomas Brandstetter ist promovierter Physiker, der im österreichischen Puchenau lebt. Er widmet sich als Wissenschaftsjournalist Themen aus den Bereichen Physik und Technik.



Treibhausgase: Gar nicht zum Lachen
Veröffentlicht am: 27.05.2019
Laufzeit: 0:03:09

werden Daten in Form von Balkendiagrammen präsentiert, die zeigen, wie sich die N₂O-Emissionen in den Jahren zwischen 1850 bis 2016 entwickelt haben. Neben einer allgemeinen, dramatischen Zunahme zeigt die Aufschlüsselung nach Ländern auch, wie der langjährige Topemittent USA um die Jahrtausendwende schließlich von China überholt wird, und wie sich Brasilien im Lauf des 20. Jahrhunderts langsam auf Rang drei »hocharbeitet«.

Wie eine erst kürzlich im Fachjournal »Nature Climate Change« veröffentlichte Studie zeigt, könnten die weltweiten N₂O-Emissionen bisher ohnehin deutlich unterschätzt worden sein. So gehen etwa die Modelle des Weltklimarates (IPCC) davon aus, dass nur ein Prozent der als Düngemittel auf die Äcker aufbrachten Menge an Stickstoff als N₂O in die Atmosphäre gelangt. Im Gegensatz zu solchen »Bottom-up«-Ansätzen, die versuchen, die Emissionen anhand des ausgebrachten Düngers abzuschätzen, verfolgt die neue Studie einen »Top-down«-Ansatz und greift auf direkte Analysen der Atmosphäre zurück. Die Forscher schätzten damit ab, wie stark die Emissionen welt-

weit gewachsen sind. Dabei kamen sie auf doppelt so hohe Werte wie die Modelle, die in den IPCC-Bericht eingeflossen sind. Ein besonders starker Anstieg zeigt sich in China, während die Emissionen in Europa und den USA über die letzten zwei Jahrzehnte halbwegs stabil blieben.

Als Schwachpunkt der bisherigen »Bottom-up«-Ansätze gilt vor allem die Annahme eines linearen Zusammenhangs zwischen Düngermenge und Emission. Es mehren sich nämlich die Hinweise, dass bei übermäßigem Einsatz von Dünger auch ein größerer Prozentsatz des Stickstoffs in die Atmosphäre gelangt, weil die Pflanzen nur eine gewisse Menge davon aufnehmen können. Das könnte dazu führen, dass die IPCC-Modelle die Emissionen bei geringem Düngereinsatz zwar über-, bei hohem Düngereinsatz dafür aber unterschätzen. Letztendlich sind die komplexen Zusammenhänge der Entstehung von Lachgas noch unzureichend erforscht – ein Missstand, der angesichts der Brisanz der aktuellen, klimatischen Veränderungen schleunigst behoben werden sollte. ↩

(Spektrum.de, 21.01.2020)

SPEKTRUM KOMPAKT APP



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





Mojib Latif
Heißzeit

Verlag: Herder, Freiburg im Br. 2020
ISBN: 9783451386848
20,00 €
[bei Amazon.de kaufen](https://www.amazon.de)

REZENSION

Klimawandel kompakt

von Larissa Tetsch

Wegen der Covid-19-Pandemie sind derzeit viele drängende Probleme in den Hintergrund geraten. Zu ihnen gehört der menschengemachte Klimawandel, der bis zum Ausbruch der Epidemie – befeuert von der Bewegung »Fridays for Future« – in den Medien sehr präsent war. Viele befürchten, die pandemiebedingte Wirtschaftskrise könnte mittelfristig zu Ausgabenkürzungen in allen möglichen Bereichen führen, einschließlich des Klimaschutzes. Der unfreiwillige Lockdown, die damit verbundene massive Ausweitung von Homeoffice und Homeschooling sowie die drastisch zurückgegangene Zahl der Flüge und Autofahrten haben andererseits gezeigt, dass es grundsätzlich möglich ist, die anthropogenen CO₂-Emissionen sehr deutlich zu senken. Vielleicht führt dies zu einem Umdenken in Politik und Gesellschaft.

Epochaler Bezug

Der bekannte Meteorologe Mojib Latif vom GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung in Kiel hat nun dieses leicht verständliche Buch zum Thema vorgelegt. Auf 200 Seiten führt er einschlägige Fakten auf mit der Absicht, sie so zu zeigen, »wie sie sind«, ohne zu beschönigen und ohne zu dramatisieren. Als Buchtitel hat er das Wort des Jahres 2018 gewählt: »Heißzeit« – ein Begriff, der nicht nur auf den extrem heißen und trockenen Sommer 2018 anspielt, sondern durch die Ähnlichkeit zu »Eiszeit« einen epochalen Bezug bekommt.

Das Buch thematisiert mehr als nur die Ursachen und Folgen des Klimawandels. Diese nehmen lediglich etwa die Hälfte von »Heißzeit« ein, bevor der Autor im zweiten Teil nach den Gründen fahndet, warum Menschen – von Ausnahmen abgesehen – in Sachen Klimaschutz nur schwer dazu zu bewegen sind, ihr Verhalten zu ändern. Als wesentli-

chen Faktor identifiziert er die Entkoppelung von Ursache und Wirkung. So machen sich die Folgen des anthropogenen Klimawandels bislang vor allem in Regionen bemerkbar, die besonders wenig zu den klimatischen Veränderungen beigetragen haben – allen voran in den Polargebieten und im Südpazifik. In den wohlhabenden, hoch entwickelten Staaten Europas, der USA und China dagegen, die zusammen den weitaus größten Teil der menschengemachten CO₂-Emissionen verantworten, prägen sich die klimatischen Folgen langsam und für viele bisher kaum merklich aus. Gerade solche Länder stehen aber besonders in der Pflicht umzusteuern, zumal sie oft noch historisch am stärksten vom Raubbau an der Natur profitiert haben. In dem Zusammenhang beleuchtet Latif die organisierte Desinformation, um den menschengemachten Klimawandel zu verharmlosen oder zu leugnen – seit Jahrzehnten finanziell üppig unterstützt von der fossilen Brennstoffindustrie – sowie die Rolle, die Politik, Medien und Social Media dabei spielen.

Die Covid-Pandemie, der Latif ein eigenes Kapitel gewidmet hat, sieht er als

Chance, die Weltwirtschaft grundsätzlich umzustellen, um mehr Fairness zwischen entwickelten und Schwellenländern zu erreichen. Dies solle sich, schreibt er, an Nachhaltigkeitskriterien orientieren; Wachstum und Ressourcenverbrauch müssten entkoppelt und die Energieversorgung umgebaut werden. Der Autor betrachtet die Coronakrise als eine Art Testfall für künftige krisenhafte Entwicklungen, die aus klimatischen Veränderungen folgen: Sie zeige etwa, wie verletzlich globale Lieferketten sind, wie schnell es bei stockendem Nachschub zu Verteilungskämpfen komme und wie wichtig internationale Zusammenarbeit sei. Zum Schluss spricht Latif konkrete Handlungsempfehlungen aus. So darf Klimaschutz seiner Ansicht nach nicht mehr als Einschränkung dargestellt werden. Dieser eröffne vielmehr den einzelnen Bürgern wie der Wirtschaft und Gesellschaft insgesamt neue Möglichkeiten.

Mit Blick auf derzeit populistisch regierte Länder wie die USA und Brasilien, aber auch auf China, dem mit einem Anteil von 28 Prozent weltweit größten CO₂-Emittenten, befürwortet Latif eine »Alli-

anz der Willigen«, in der Deutschland vorangehen solle. Seine Empfehlungen fasst der Klimaforscher am Ende des Buchs in einem 10-Punkte-Plan zusammen. »Heißzeit« ist ein Appell, dringend in Richtung Nachhaltigkeit umzusteuern, denn »ein kleines Zeitfenster bleibt der Menschheit noch, um das Ruder herumzureißen und eine Klimakatastrophe zu vermeiden.« ↩

(Spektrum.de, 11.08.2020)

Larissa Tetsch ist promovierte Molekularbiologin und Wissenschaftsautorin bei München.

Spektrum DIE WOCHE



Spektrum
der Wissenschaft
DIE WOCHE

NR. **44** 29.10. 2020

- > Kein Lebenszeichen auf der Venus
- > Wo sich Wasser auf dem Mond versteckt
- > Schnepfe stellt Flugrekord auf
- > Hilft ein Hobby gegen Depression?

TITELTHEMA: SARS-COV-2

Neun wichtige Lehren über die Corona-Pandemie

Einige frühe Annahmen über Covid-19 haben sich als falsch erwiesen – gut so. Nun ist bekannt, dass Sars-CoV-2 jeden treffen kann und dem Sommer trotz. Aber auch: Masken schützen.

STUTT GART-21
Der schwellende Albtraum

NACH HIMMEL
Fahndung nach den Lichtverschmutzern

POSITIVE PSYCHOLOGIE
Sei dankbar!

Mit ausgewählten Inhalten aus **nature**

Das wöchentliche Wissenschaftsmagazin

IM ABO!

Als Kombipaket mit App und PDF

Mit News, Hintergründen, Kommentaren und Bildern aus der Forschung sowie exklusiven Artikeln aus »nature«. **Nur 0,92 € pro Ausgabe** (monatlich kündbar), für Schüler, Studenten und Abonnenten unserer anderen Magazine sogar nur 0,69 €.

Jetzt bestellen!