



# 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](mailto: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

**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](mailto: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](mailto: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.

Folgen Sie uns:



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

PETMAL / GETTY IMAGES / ISTOCK

ILLEGALEN EMISSIONEN AUF DER SPUR  
Die FCKW-Detektive

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 CO<sub>2</sub> 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  $\text{CO}_2$  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.

**D**ie 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-

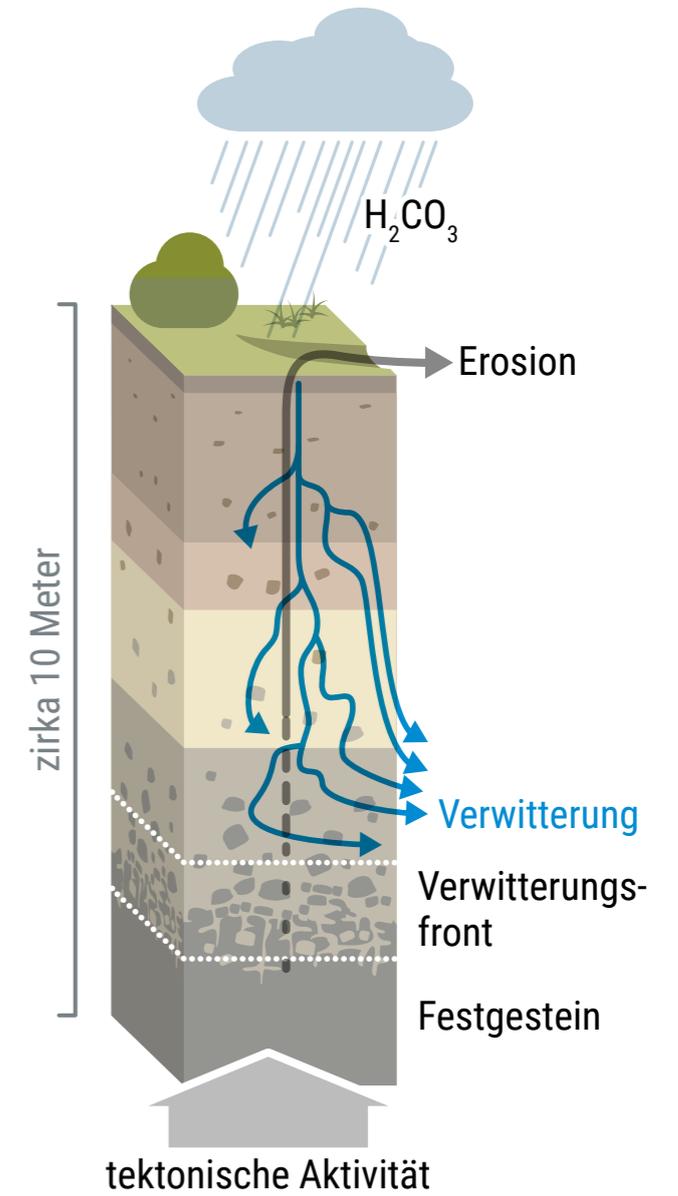
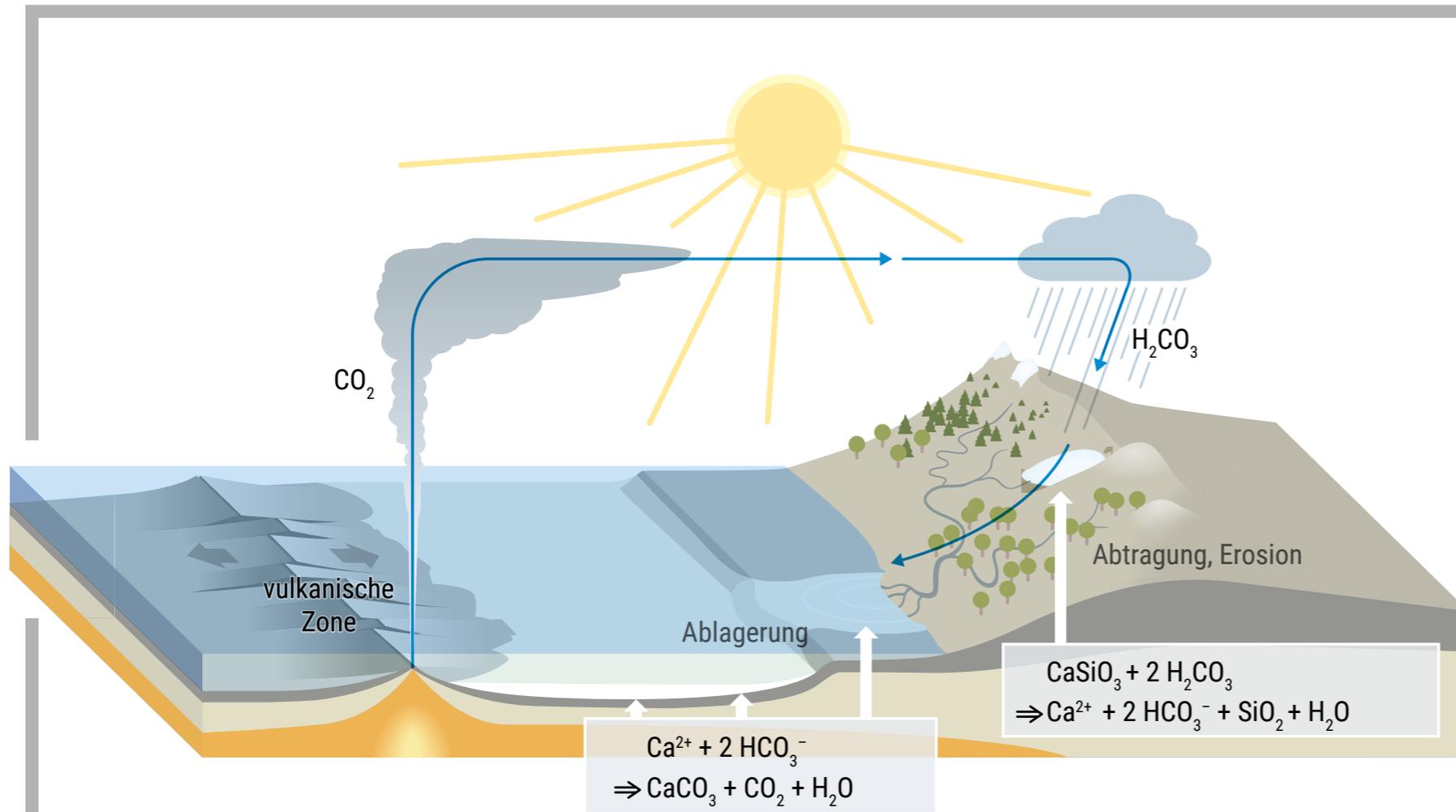
AUF EINEN BLICK

## Empfindliches Gleichgewicht

**01** Durch Prozesse an der Landoberfläche reguliert die Erde seit Milliarden Jahren den CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>

Vulkanische CO<sub>2</sub>-Emissionen werden mit CO<sub>2</sub>-Verbrauch in der Verwitterungszone balanciert. Ein Silikatmineral der Formel CaSiO<sub>3</sub> wird mit Kohlensäure (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) zersetzt. Das durch Flüsse transportierte Ca<sup>2+</sup> wird mit Hydrogencarbonat HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> im Ozean als Kalzitmineral CaCO<sub>3</sub> 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 ( $\text{CO}_2$ ), 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  $\text{CO}_2$ -Gehalt der Atmosphäre reguliert. Bevor der Mensch in großem Maß eingriff, stammte das  $\text{CO}_2$  hauptsächlich aus vulkanischen Gasemissionen.

Schon seit Beginn der Erdgeschichte entlassen Vulkane das Treibhausgas  $\text{CO}_2$  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  $\text{CO}_2$  im Jahr 2019). Warum hat das  $\text{CO}_2$  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  $\text{CO}_2$  und reduziert damit dessen Konzentration in der Atmosphäre, obwohl Vulkane ihr ständig neues  $\text{CO}_2$  hinzufügen.

Das Kohlenstoffdioxid in der Luft bildet mit dem Wasser geringe Mengen an Kohlensäure,  $\text{H}_2\text{CO}_3$ . 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 ( $\text{Ca}^{2+}$  und  $\text{Mg}^{2+}$ ) freigesetzt, die ebenso wie das aus der Kohlensäure umgewandelte Hydrogencarbonat ( $\text{HCO}_3^-$ ) über die Flüsse in die Ozeane gelangen. Dort verbindet sich Kalzium mit Karbonat zu Kalzit ( $\text{CaCO}_3$ ), und über Hunderttausende von Jahren werden diese Kalzitkristalle zu Kalkgestein am Meeresboden. Der Prozess entsorgt das durch die Gesteinsverwitterung gebundene  $\text{CO}_2$  langfristig: Im Kalkgestein verweilt es Hunderte von Millionen Jahren fernab der Atmosphäre. Sind Vulkane also die natürliche  $\text{CO}_2$ -Quelle, so ist die Gesteinsverwitterung der Reaktor, und Kalkablagerungen in den Ozeanen bilden die  $\text{CO}_2$ -Senke.

Seit der frühen Erdgeschichte sind die vulkanischen  $\text{CO}_2$ -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  $\text{CO}_2$ -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  $\text{CO}_2$ -Gehalt und damit das Klima stabil gehalten hat. Wenn der Zyklus eines  $\text{CO}_2$ -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 CO<sub>2</sub>-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