

# Wasser als Regulator des Erdklimas

Aaron Bufer<sup>1,2</sup>, Friedhelm von Blanckenburg<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

<sup>2</sup> Ludwig-Maximilians-Universität München, Department für Geo- und Umweltwissenschaften, München

<sup>3</sup> Freie Universität Berlin, Fachbereich Geowissenschaften, Berlin

Treffen Regenwasser und kleine Mengen darin gelöster Kohlensäure auf Gestein, erfolgt eine chemische Reaktion, bei der ein Teil des Gesteins in Boden umgewandelt und ein anderer Teil im Regenwasser gelöst wird. In der Folge wird gelöster Kohlenstoff über Flüsse in das Meer gespült, wo er zusammen mit ebenso gelöstem Calcium und Magnesium zu Kalkstein wird. Dieser Prozess bindet Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) über sehr lange Zeiträume. Am GFZ erforschen wir, wie dieser Mechanismus das Erdklima seit Milliarden Jahren reguliert und auf Veränderungen im Wasserkreislauf reagiert.

Jedes Jahr liefern Flüsse rund 40 000 km<sup>3</sup> Wasser in die Ozeane und mit ihnen etwa 2 Milliarden Tonnen gelöster Stoffe. Diese stammen aus der Verwitterung der Gesteine auf der Landoberfläche. Unter den häufigsten gelösten Stoffen befinden sich die Elemente Ca (Calcium) und Mg (Magnesium) sowie das Molekül HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (Hydrogenkarbonat). Um HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> zu bilden, wird der Atmosphäre CO<sub>2</sub> entzogen. Da CO<sub>2</sub> ein wichtiges Treibhausgas ist, hat sein Entzug aus der Atmosphäre eine Klimawirksamkeit. Der globale Wasserkreislauf ist somit nicht nur ein Resultat des Erdklimas. Über die Gesteinsverwitterung bestimmt der Wasserkreislauf das Erdklima und hat dazu beigetragen, das Klima der Erde über Milliarden Jahre auf einem Niveau zu halten, welches Leben ermöglichte.

## Der Verwitterungsprozess und Wasserfluss im Boden

Wenn Niederschlag auf den Boden trifft, fließt nur knapp 15 % des Wassers über die Landoberfläche ab. Über die Hälfte

## Kernaussagen

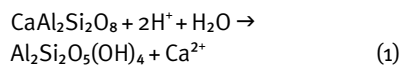
- Die Wasserverfügbarkeit ist nicht nur ein Resultat des Erdklimas, sondern das Wasser selbst reguliert über die Verwitterung und das dabei gebundene CO<sub>2</sub> das Erdklima.
- Der globale Wasserkreislauf ist dabei ein Schlüsselement für einen Rückkopplungsmechanismus, der das Erdklima über Millionen Jahre stabilisiert.
- Auswirkungen menschlichen Handelns bringen die natürlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen und -Senken aus dem Gleichgewicht. Mittels Ausbringens von Gesteinspulver auf Acker- und Waldflächen könnte künstlich beschleunigte Verwitterung einen Teil der überschüssigen Mengen von anthropogenem CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre entziehen.

des Wassers verdunstet oder wird über Pflanzen transpiert. Der Rest sickert durch Poren und Risse durch den Untergrund, bis es aus Quellen in Flüssen wieder an die Erdoberfläche gelangt (Abb. 2). 10 000 bis 30 000 km<sup>3</sup> Wasser fließen so pro Jahr im Untergrund und kommen dabei in Kontakt mit verschiedenen Boden- und Gesteinsschichten.

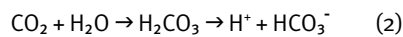
Als Folge des Wasserflusses reagieren Minerale im Gestein chemisch. Salz- (z. B. Halit) und Karbonatminerale (z. B. Calcit, Dolomit) lösen sich komplett auf, während Silikatminerale (z. B. Feldspat, Biotit, Hornblende) in Tonminerale (z. B. Kaolinit, Smektit) umgewandelt werden. Ein Beispiel dafür ist die Umwandlung von Ca-Feldspat zu Kaolinit.



Abb. 1: Jedes Jahr werden rund 100 Mio. Tonnen gelöster anorganischer Kohlenstoff in die Ozeane transportiert, wie hier durch die Amazonas­mündung. (Satellitenaufnahme: NASA)



Wie bei dem Entkalken eines Wasserkochers ist für diese Lösungsprozesse eine Säure nötig, die freie Protonen ( $\text{H}^+$ ) bereitstellt. Die wichtigste natürliche Säure für die Verwitterung von Mineralen an der Erdoberfläche ist Kohlensäure ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ), die entsteht, wenn  $\text{CO}_2$  im Regenwasser gelöst wird.



Mit der Verwitterung von Silikatmineralen durch Kohlensäure wird also  $\text{CO}_2$  aus der Atmosphäre in Hydrogencarbonat  $\text{HCO}_3^-$  umgewandelt. In dieser Form fließt der Kohlenstoff in die Ozeane, wo er in Kalkschalen mariner Lebewesen eingebaut wird und nach deren Absinken auf den Meeresboden für Jahr­millionen in Sedimentschichten verschwindet: So wird die Silikatverwitterung zu einem natürlichen Mechanismus, um  $\text{CO}_2$  aus der Atmosphäre zu ziehen.

Zusätzlich zur Kohlensäure tragen auch andere Säuren und Minerale zur Verwitterung bei. So enthält saures Bodenwasser auch Schwefelsäure ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), die auf die Zersetzung von Schwefelmineralen wie Pyrit zurückzuführen ist. Mit dieser Säure kann durch Verwitterung von Karbonatmineralen auch  $\text{CO}_2$  in die Atmosphäre freigesetzt werden. In diesem Beitrag betrachten wir allerdings lediglich die schon besser verstandene Silikatverwitterung.

Über die Zeit führen Lösungsvorgänge zum Schwund von primären Mineralen an der Erdoberfläche und zu deren Ersatz durch Tonminerale. Die aktive Verwitterung verlagert sich immer tiefer in den Untergrund und führt zur Bildung einer Zone, in der die Intensität der Verwitterung nach unten abnimmt (Abb. 2). Eine Zentimeter bis Meter dicke Verwitterungsschicht (sogenannter Saprolith) trennt das unverwitterte Primärgestein von verwittertem, darüber liegendem Material.

Diese chemischen Reaktionen laufen nur so lange, bis entweder die Lösung gesättigt und die Säure neutralisiert ist oder bis keine Primärminerale mehr in Kontakt mit der Säure sind. Für fortwährende Verwitterung ist es also essenziell, dass die gelösten Ionen im Untergrund durch ausreichenden Grundwasserfluss weitergetragen und durch frisches, säurehaltiges Wasser ersetzt werden. Das Grundwasser trägt das gelöste Material zudem durch den Boden bis in Flüsse. Ebenso ist es wichtig, dass die entstandenen Tonminerale durch Bodenerosion an der Oberfläche abgetragen werden und durch neue, verwitterbare Primärminerale von unten ersetzt werden. Sonst würde die Verwitterung nicht fortschreiten.

Neben der Regulierung des Erdklimas sind solche Verwitterungsprozesse auch die Ursache für die Bildung von Böden und die Freisetzung mineralischer Nährstoffe. Am Deutschen GeoForschungs-Zentrum GFZ erforschen wir, wie diese

Verwitterung mit klimatischen und tektonischen Veränderungen zusammenhängt.

### Verwitterung nicht überall gleich

Je nach Region können sich Verwitterungsflüsse (also die gelöste Masse pro Fläche pro Zeit) um mehrere Größenordnungen unterscheiden. Die wichtigsten Faktoren für diese Unterschiede sind der Durchfluss von säurehaltigem Wasser durch den Untergrund und die Verfügbarkeit von Primärmineralen.

Im Hochgebirge liegt nahezu unverwittertes Gestein an der Erdoberfläche. Die Erosion der Berge durch steiles Relief, Wasser und Eis führt zu einer ständigen Abtragung der Oberfläche und der Auflösung von Primärmineralen. Dort wo sich Böden bilden, finden sich reichlich frische Oberflächen für Lösungsprozesse, was zu hohen Verwitterungsflüssen führt (obere Kurve in Abb. 3). In flacheren Regionen der Erde, die über Millionen Jahre nur sehr langsam abgetragen werden, sind Gesteine hingegen stark verwittert. Dort ist der Verwitterungsfluss niedrig. Etwa die Hälfte der globalen Verwitterung findet auf den steilsten 15 % der Erde statt.

Einen besonders großen Einfluss auf den Verwitterungsfluss hat die Verfügbarkeit von Wasser. So steigt in Gebirgen der Verwitterungsfluss nahezu linear mit der Abflussmenge (obere Kurve in Abb. 3).



Kontakt: Aaron Bufe  
(a.bufe@lmu.de)

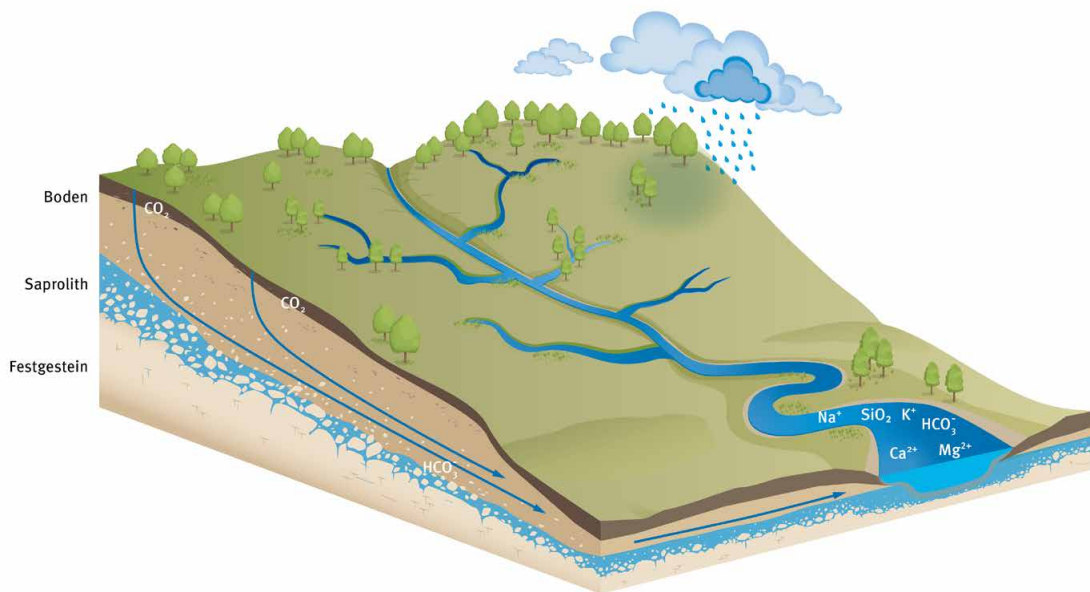


Abb. 2: Regnet es auf die Erdoberfläche, infiltriert Wasser das Gestein. Vom Wasser transportierte Kohlensäure ( $H_2CO_3$ ) löst Primärminerale in den Steinen. Dabei werden Hydrogenkarbonat  $HCO_3^-$  und Kationen wie  $Mg^{2+}$  und  $Ca^{2+}$  in die Flüsse transportiert. Doch die Menge an gelösten Stoffen hängt vom Fließpfad ab. Fließt das Wasser durch viel Gestein, ist es an gelösten Stoffen chemisch gesättigt. In diesem Fall hängt der Entzug von  $CO_2$  aus der Atmosphäre direkt von der Wasserflussrate ab. Fließt das Wasser hingegen oberflächennah durch chemisch bereits abgereicherte Böden, ist es untersättigt und weiterer Wasserfluss kann die Verwitterungsrate nicht wesentlich anheben. In diesem Fall hängt der Entzug von  $CO_2$  aus der Atmosphäre von der Erosionsrate des Bodens ab. (Grafik: P. Klinghammer, GFZ)

Der Huanghe (Gelbe Fluss) in China ist einer der längsten Flüsse der Erde. Ein großer Teil seines Einzugsgebiets liegt in eher trockenen Regionen am nordöstlichen Rand des tibetischen Plateaus. Verglichen zum ähnlich großen Irrawaddy weist der Gelbe Fluss einen zwanzigfach geringeren Abfluss und gleichzeitig einen zwanzigfach geringeren Verwitterungsfluss auf (Abb. 3). Dies ist nur ein Beispiel dafür, dass in trockenen Regionen Verwitterungsreaktionen nur langsam voranschreiten können. Die optimalen „Hotspots“ mit den höchsten Verwitterungsflüssen sind (sub-)tropische Gebirgsregionen wie z. B. Taiwan (Abb. 3). Hier sind sowohl der Wasserfluss als auch die Versorgung mit Primärmineralen durch Erosion hoch.

Was passiert nun mit der Verwitterung, wenn sich das Klima und somit der Wasserabfluss ändert? Ein Anstieg des Wasserabflusses von 1 auf 2 m<sup>3</sup> pro m<sup>2</sup> pro Jahr verändert den Verwitterungsfluss in kratonischen Regionen, also den sehr alten Kerngebieten der Kontinente, nur

geringfügig (untere Kurve in Abb. 3). Hier besteht ein Mangel an Primärmineralen und das Wasser ist an gelösten Elementen untersättigt. Mehr Wasserfluss verdünnt lediglich die gelösten Stoffe. Stattdessen bestimmt die Versorgung durch neue Primärminerale den Verwitterungsfluss; die Verwitterung ist „Primärmineral-limitiert“ (Englisch: supply limited). Im Gegensatz zu den Kratonen nimmt der Verwitterungsfluss in Gebirgsregionen nahezu linear mit dem Abfluss zu (obere Kurve in Abb. 3). Hier ist das Wasser gesättigt und nur die Zufuhr von weiterem säurehaltigem Wasser kann den Verwitterungsfluss erhöhen; die Verwitterung ist „Sättigungslimitiert“ (Englisch: thermodynamical limit). In Gebirgsregionen mit sehr hohem Wasserfluss kann es dazu kommen, dass trotz verfügbarer Primärminerale der Verwitterungsfluss nicht weiter mit dem Abfluss ansteigt. Dies liegt daran, dass Verwitterung durch die Geschwindigkeit (Kinetik) der chemischen Reaktion eingeschränkt ist. Die Kinetik hängt von der Wassertemperatur, der Präsenz von

Pflanzen und der Art der Minerale ab („Lösungs-kinetisches Limit“, Englisch: kinetically limited).

### Der geologische Thermostat der Erde: Wie verändert der Wasserzyklus das CO<sub>2</sub>?

Über den Wasserkreislauf balanciert ein geologischer Mechanismus die natürlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen aus Vulkanen. Der Mechanismus ist eine Rückkopplung, ein „Feedback“. Wir kennen solche Regelungskreisläufe aus technischen Systemen, z. B. im Kühlschrank. Entnehmen wir ein gekühltes Getränk, wird der Kühlschrank wärmer. Das elektronische Thermometer spürt dies und teilt dem Kompressor mit, die Kühlflüssigkeit zu kühlen. Es wird wieder kälter. Wird es zu kalt, schaltet der Kompressor sich aus, es wird wieder wärmer. Dies ist ein Feedback.

Auf der Erde wirkt ein Feedback zwischen der Gesteinsverwitterung und dem Klima, das durch den Wasserkreislauf gesteuert

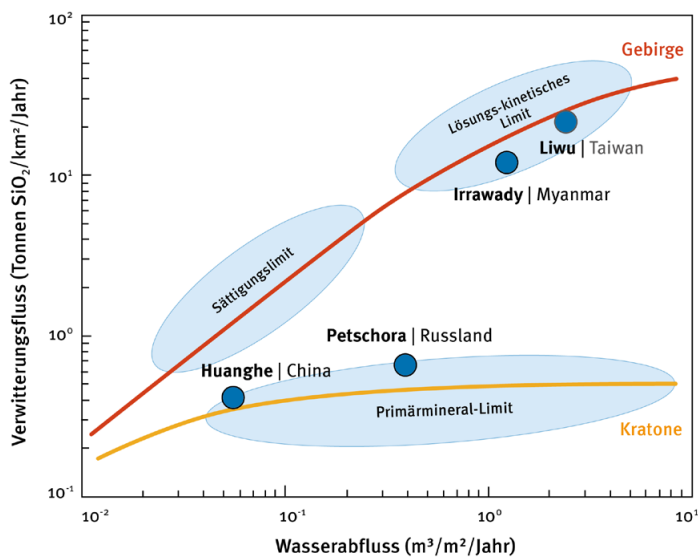


Abb. 3: Der Verwitterungsfluss hängt vom Wasserfluss ab, aber nicht überall. In stabilen geologischen Regionen mit wenig Erosion (Kratone) nimmt er mit steigendem Wasserabfluss kaum zu, weil nicht ausreichend Primärminerale zur Verfügung stehen. In Gebirgsregionen hingegen hängt der Verwitterungsfluss direkt vom Wasserabfluss ab, weil dort die Erosion ausreichend Primärminerale zur Verfügung stellt und das Wasser stets gesättigt ist. Ist allerdings der Wasserabfluss so hoch, dass die Auflösekinetik die Mineralauflösung begrenzt, erhöht auch ein zunehmender Wasserfluss den Verwitterungsfluss nicht weiter. Man nennt diese drei Einflussfaktoren „Limits“, da sie die Verwitterungsrate begrenzen. Nach Maher und Chamberlain, 2014 (Grafik: P. Klinghammer, GFZ)

wird (Abb. 4). Dieses Feedback funktioniert, weil die Verwitterung von Silikatmineralen  $\text{CO}_2$  aus der Atmosphäre entzieht. Ist das Erdklima z. B. kalt, verdunstet wenig Wasser aus den Ozeanen und der Wasserabfluss von den Kontinenten ist niedrig. Die Verwitterung entzieht der Atmosphäre wenig  $\text{CO}_2$  (niedriger Wasserfluss in Abb. 3). So steigt die  $\text{CO}_2$ -Konzentration durch die vulkanischen Emissionen an und es wird wärmer. In der Folge nimmt der Wasserabfluss zu und somit auch die Verwitterung. Mehr  $\text{CO}_2$  wird konsumiert (Abb. 3). Dieser Anstieg dauert so lange, bis die Rate des  $\text{CO}_2$ -Entzugs aus der Atmosphäre gleich groß ist wie die Rate, mit der  $\text{CO}_2$  aus Vulkanen ausgestoßen wird. Das Klima wird also stabilisiert.

Die Temperatur, bei der sich das Klima stabilisiert, hat über die Erdgeschichte hinweg geschwankt. Auch diese Schwankungen lassen sich durch die Rückkopplung von  $\text{CO}_2$ -Ausstoß und -Entzug verstehen. Wenn Vulkanismus zu hohen  $\text{CO}_2$ -Emissionen führt, müssen auch die Verwitterungsraten hoch sein, um das Klima zu stabilisieren. In diesem Fall wärmt sich die Atmosphäre auf und in der Folge verdunstet mehr Wasser, das auch mehr Kohlensäure enthält. Die Gesteinsverwitterung wird beschleunigt, bis sie mit den  $\text{CO}_2$ -Emissionen schritthalten kann (Abb. 5, links). In Zeiten, in

### Infokasten: Die Ratengleichung

Das Feedback zwischen Verwitterung und der Änderungen von  $\text{CO}_2$  in der Atmosphäre kann durch eine vereinfachte Ratengleichung ausgedrückt werden.

$$d\text{CO}_2/dt = \text{Vulk}_{\text{CO}_2} - \text{Verw}_{\text{CO}_2} \quad (1)$$

Laut dieser Gleichung entspricht die Veränderung von  $\text{CO}_2$  in der Atmosphäre über die Zeit,  $d\text{CO}_2/dt$ , der Differenz zwischen der Ausstoßrate von  $\text{CO}_2$  durch Vulkane,  $\text{Vulk}_{\text{CO}_2}$ , und der Entzugsrate von  $\text{CO}_2$  durch Verwitterung und Ablagerung von Karbonat,  $\text{Verw}_{\text{CO}_2}$ .

Wie beschrieben, hängen Verwitterungsraten,  $\text{Verw}_{\text{CO}_2}$  – vor allem in Gebirgsregionen – von saurehaltigem Wasserfluss oder von der Lösungskinetik ab (Abb. 2). Da diese beiden Einflussfaktoren wiederum eng mit der  $\text{CO}_2$ -Menge in der Atmosphäre zusammenhängen können wir weiterhin schreiben:

$$d\text{CO}_2/dt = \text{Vulk}_{\text{CO}_2} - f([\text{CO}_2]_{\text{atm}}) \quad (2)$$

Hier steht der Parameter  $f([\text{CO}_2]_{\text{atm}})$  für eine Funktion, die von der  $\text{CO}_2$ -Konzentration in der Atmosphäre abhängt.

Gleichung (2) beschreibt eine Rückkopplung. Nehmen wir ein Gleichgewicht zwischen  $\text{CO}_2$ -Quellen und  $\text{CO}_2$ -Senken an ( $d\text{CO}_2/dt = 0$ ). Durch einen Anstieg in der  $\text{CO}_2$ -Ausstoßrate,  $\text{Vulk}_{\text{CO}_2}$ , steigt die Konzentration von  $\text{CO}_2$  in der Atmosphäre ( $d\text{CO}_2/dt > 0$ ). Die Folge sind erhöhte Temperaturen und ein stärkerer Wasserkreislauf (Abb. 4). Beides führt zu einem Anstieg der Verwitterungsflüsse, bis zu dem Punkt, an dem die Verwitterung den erhöhten Ausstoß ausgleicht ( $\text{Verw}_{\text{CO}_2} = \text{Vulk}_{\text{CO}_2}$ ). So entsteht ein neues Gleichgewicht ( $d\text{CO}_2/dt = 0$ ) bei einer leicht erhöhten  $\text{CO}_2$ -Konzentration.



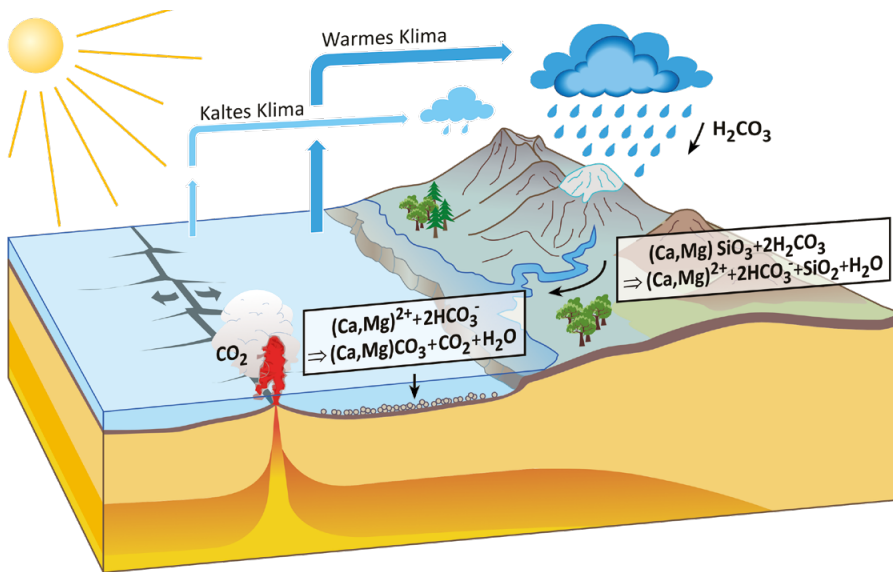


Abb 4: Funktionsweise des geologischen Verwitterungsthermostats. Die Vulkane der Erde emittieren ständig  $\text{CO}_2$ . Doch weil  $\text{CO}_2$  ebenso ständig durch die Verwitterung konsumiert wird, bleibt dessen Konzentration in der Atmosphäre in einer schmalen Bandbreite, ebenso wie das Erdklima. Ist das Erdklima z. B. kalt, verdunstet wenig Wasser aus den Ozeanen und der Wasserabfluss in den Kontinenten ist niedrig. Die Verwitterung entzieht der Atmosphäre wenig  $\text{CO}_2$ , und die Konzentration steigt durch die vulkanischen Emissionen an; es wird wärmer. Dadurch nimmt der Wasserkreislauf und somit die Verwitterung zu; mehr  $\text{CO}_2$  wird konsumiert und es wird wieder kälter. (Grafik: M. Dziggel, GFZ)

denen der natürliche Ausstoß aus Vulkanen niedrig ist, kühlt sich die Erdatmosphäre ab und die Verwitterungsraten verlangsamen sich. In der Folge enthalten die Böden mehr Primärminerale (Abb. 5, rechts).

Dieser natürliche Regelungskreislauf ist der „geologische Thermostat der Erde“ (siehe Infokasten „Die Ratengleichung“). Er hält die Atmosphärentemperatur der Erde bereits seit Milliarden Jahren in einem Temperaturbereich, der Leben ermöglichte, also in einem Bereich, in dem es flüssiges Wasser auf Planeten gibt. Obwohl Vulkane ständig  $\text{CO}_2$  emittierten, stieg die Konzentration des Gases in der Erdgeschichte nie so hoch, dass alles Wasser verdampfte. Umgekehrt hat die Verwitterung nie alles  $\text{CO}_2$  aus der Atmosphäre entzogen. Wenn die vulkanische Ausstoßrate von  $\text{CO}_2$  um nur 25 % höher oder niedriger wäre als die

Entzugsrate durch Verwitterung, würde die  $\text{CO}_2$ -Konzentration in der Atmosphäre in einigen Millionen Jahren um mehrere Größenordnungen ansteigen oder auf Null abfallen. Solche Schwankungen sind mit Daten aus der Erdgeschichte nicht vereinbar. Das bedeutet im Umkehrschluss, dass das Feedback sehr sensibel auf Veränderungen reagiert, sodass  $\text{CO}_2$ -Quellen und -Senken im Gleichgewicht bleiben.

### Fazit und Ausblick

Eine der größten Störungen dieser empfindlichen  $\text{CO}_2$ -Balance steht unmittelbar bevor. Durch Verbrauch fossiler Brennstoffe hat der Mensch das atmosphärische  $\text{CO}_2$  bereits von 280 ppm auf mehr als 420 ppm erhöht (siehe Infokasten „Zwei  $\text{CO}_2$ -Zyklen“). Handeln wir nicht sofort, werden wir nach dem pessimistischsten Szenario des Weltklimarates

(IPCC) im Jahr 2100 eine Erdatmosphäre mit 1000 und in 2200 sogar mit 2000 ppm  $\text{CO}_2$  erleben. Die enorme Menge  $\text{CO}_2$  und die Geschwindigkeit des Anstiegs des Gases in der Atmosphäre können durch die natürlichen Regulierungsmechanismen nicht schnell genug ausgeglichen werden, um einem dramatischen Klimawandel entgegenzuwirken. Eine Erde, wie der Mensch sie nie gekannt hat, wird die Folge sein. Nach Modellprognosen wird die Verwitterung den atmosphärischen  $\text{CO}_2$ -Gehalt endgültig erst nach 200 000 bis 400 000 Jahren wieder auf das präanthropogene Niveau zurückgeholt haben.

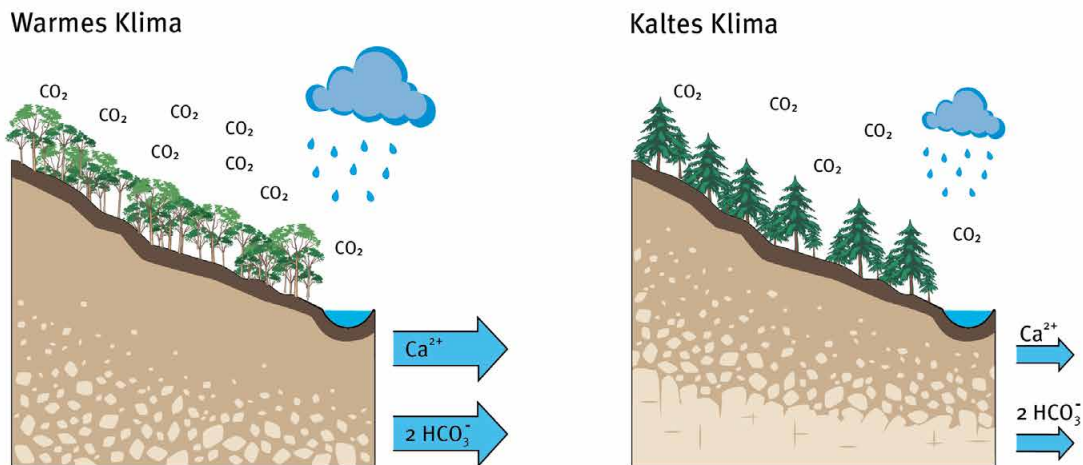


Abb. 5: Wie Wasserzyklus und Klima die Verwitterungszone formen. Links: Hohe CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre und somit warmes Klima. Ein schneller Wasserzyklus führt zu hoher Verwitterung und damit zu hohen Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> und HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>-Flüssen (gezeigt durch die Größe der Pfeile). Die Böden sind abgereichert an Primärmineralen. Rechts: Geringe CO<sub>2</sub>-Konzentration, wenig Wasserfluss, wenig Verwitterung und dadurch mehr Primärminerale in den Böden. Das Erdklima schwankte in seiner Geschichte zwischen diesen beiden Zuständen hin und her. (Grafik: A. Hendrich, GFZ/überarbeitet)



### Infokasten: „Zwei CO<sub>2</sub>-Zyklen“

Bereits 1845 erkannte der französische Bergbauingenieur Jacques-Joseph Ebelmen (1814 bis 1852), dass der hier beschriebene CO<sub>2</sub>-Kreislauf ein „geologischer“ ist, der langsam verläuft, aber wegen seiner ozeanischen Kalkgesteinsenke das Erdklima langfristig stabilisiert (Galvez und Gaillardet, 2012). Nur 100 Mio. Tonnen Kohlenstoff entzieht dieser Prozess der Atmosphäre pro Jahr. Viel größer ist der „organische“ Kohlenstoffzyklus. Durch die Photosynthese der Landpflanzen und Kleinstlebewesen im Ozean werden der Atmosphäre jährlich rund 150 Mrd.

Tonnen Kohlenstoff entzogen. Dieser gigantische CO<sub>2</sub>-Kreislauf ist jedoch ein „geschlossener“, weil organischer Kohlenstoff mit der gleichen Rate oxidiert, wie er durch Photosynthese fixiert wird. Für die geologische Temperaturregulation wird er relevant, wenn, wie in der Karbonzeit, große Mengen organischen Kohlenstoffs in Sedimente eingelagert werden, die später zu Öl oder Kohle werden. Heute gerät der organische CO<sub>2</sub>-Zyklus durch die massiven CO<sub>2</sub>-Emissionen aus fossilen Brennstoffen aus der Balance.

### Literatur

Bufe, A., Hovius, N., Emberson, R., Rugenstein, J. K. C., Galy, A., Hassenruck-Gudipati, H. J., Chang, J.-M. (2021). Co-variation of silicate, carbonate and sulfide weathering drives CO<sub>2</sub> release with erosion. *Nature Geoscience*, 14 (4), 211–216. <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00714-3>

Galvez, M. E., Gaillardet, J. (2012). Historical constraints on the origins of the carbon cycle concept. *Comptes Rendus Geoscience*, 344 (11–12), 549–567. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2012.10.006>

Maher, K., Chamberlain, C. P. (2014). Hydrologic Regulation of Chemical Weathering and the Geologic Carbon Cycle. *Science*, 343 (6178), 1502–1504. <https://doi.org/10.1126/science.1250770>

von Blanckenburg, F. (2020). Der Thermostat der Erde. *Spektrum der Wissenschaft kompakt* (48.20), 48–57. [https://gfzpublic.gfz-potsdam.de/pubman/item/item\\_5004428](https://gfzpublic.gfz-potsdam.de/pubman/item/item_5004428)

von Blanckenburg, F., Schuessler, J. A., Bouchez, J., Frings, P. J., Uhlig, D., Oelze, M., Frick, D. A., Hewawasam, T., Dixon, J., Norton, K. (2021). Rock weathering and nutrient cycling along an erodo- sequence. *American Journal of Science*, 321 (8), 1111–1163. <https://doi.org/10.2475/o8.2021.01>

### Film-Tipp



Mordsache Stein. Was passiert tief unter der Erdoberfläche?

(YouTube-Video von Friedhelm von Blanckenburg)