

TEUFELS KÜCHE IM ERDMANTEL

JAMES CONNOLLY UND CHRISTOPH HEINRICH

Nicht nur auf der Erdoberfläche, sondern auch im Erdinnern wird Kohlenstoff rezykliert. Dieser Stoffkreislauf ist zwar langsam, aber sehr bedeutsam für den globalen CO₂-Haushalt der Atmosphäre.

Der natürliche geologische Kohlenstoff-Kreislauf ist dominiert durch die Aufnahme von CO₂ durch lebende Organismen und dessen Wiederausscheidung und Ablagerung als Karbonatschalen und organische Überreste in Sedimenten. Dieser momentan wichtigste Teil des natürlichen C-Kreislaufs schliesst sich in Gebieten, wo durch Meeresspiegelschwankungen und Gebirgsbildung die kohlenstoffhaltigen Sedimentgesteine erneut der Verwitterung und Auflösung ausgesetzt werden, wobei sich wiederum gasförmiges CO₂ und gelöstes Bikarbonat bilden (vgl. Artikel von Weissert und McKenzie, S. 6). Neben diesem oberflächennahen, durch das Leben auf der Erde dominierten Kreisprozess ist das Kohlenstoffreservoir der Erdatmosphäre aber auch einem viel langsameren und tiefer ins Erdinnere reichenden Recycling unterworfen. Diese tiefe Kohlenstoffzirkulation durchs Erdinnere wird durch die globale Konvektionsbewegung des Mantels, die Plattentektonik, angetrieben. Deren CO₂-Umsatz ist zwar im Durchschnitt viel kleiner als derjenige des oberflächennahen geologischen Kohlenstoffkreislaufs, doch spielt er vielleicht das «Zünglein an der Waage» beim CO₂-Einfluss auf Klimaveränderungen. Dies ist besonders der Fall, wenn in geologisch kurzer Zeit überdurchschnittlich grosse CO₂-Mengen durch grosse Vulkanausbrüche freigesetzt werden¹.

Subduzierte ozeanische Kruste

Am mittelozeanischen Rücken wird durch den Aufstieg und die teilweise Aufschmelzung von heissem Mantelmaterial ständig neue ozeanische Kruste gebildet (Abb. 1). Entlang diesem etwa 60 000 km langen und die ganze Erde umspannenden Bruchsystem

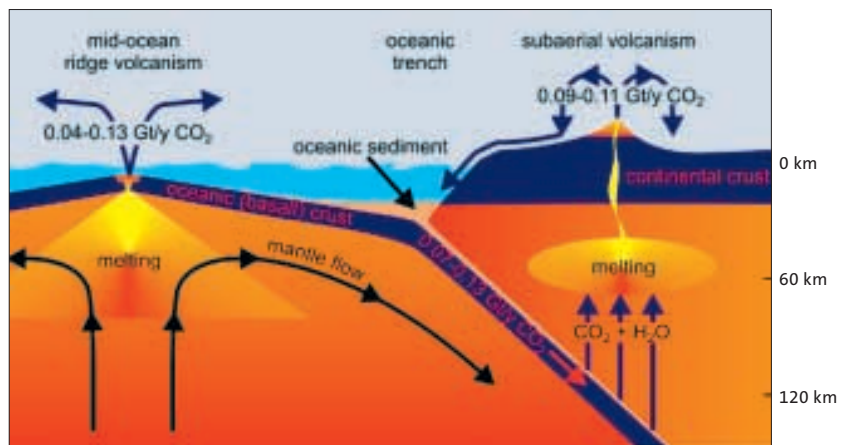


Abb. 1: Der grossräumige und langfristige Kreislauf volatiler Komponenten (v. a. H₂O und CO₂) durch den Erdmantel, mit Angaben der geschätzten CO₂-Flüsse in Gigatonnen pro Jahr (Gt/y).

bildet sich so durchschnittlich etwa 2 cm neue Basaltkruste pro Jahr. Diese driftet von den mittelozeanischen Rücken weg und sinkt schliesslich an Subduktionszonen wieder ins Erdinnere ab. Dazwischen belädt sich die ozeanische Kruste mit CO₂ aus zwei Quellen: Erstens werden durch die Bruchbildung und die hohen Temperaturgradienten an den mittelozeanischen Rücken grosse Mengen von CO₂-haltigem Meerwasser durch die ozeanische Kruste hindurchzirkuliert. Dabei bilden sich durch Reaktion mit den magmatischen Gesteinen bis in mehrere Kilometer Tiefe hinunter karbonat- und wasserhaltige Mineralien. Zweitens lagern sich auf dem Ozeanboden, je nach Wassertiefe, Nähe zu Kontinenten und Zeitdauer zwischen Bildung der ozeanischen Kruste und deren Subduktion, mehr oder weniger Sedimente ab, welche ebenfalls karbonat- und wasserhaltige Mineralien enthalten. Die Karbonat- und Wassermengen lassen sich aus Tiefseebohrungen und der Beobachtung von ozeanischen Krustenresten abschätzen, welche etwa durch die

Alpenbildung an Land verfrachtet und durch anschliessende Erosion zugänglich gemacht wurden (Abb. 2): Durch Meerwasser veränderte magmatische Gesteine enthalten je etwa drei Gewichtsprozent CO₂ und H₂O, in den darüber liegenden Sedimenten sind etwa gleich viel CO₂ aber bis zu doppelt so viel Wasser in Mineralien gebunden. So kann man abschätzen, dass an Subduktionszonen weltweit pro Jahr etwa 0,04 Gt (Gigatonnen) Kohlenstoff in den Erdmantel zurückgeführt werden. Dies ist eine kleine Zahl im Vergleich mit der durch die heutige menschliche Zivilisation als CO₂ in die Atmosphäre freigesetzten Kohlenstoffmenge von 7 Gt C pro Jahr. Allerdings ist der scheinbar kleine, geologisch langfristige Durchschnittswert von 0,04 Gt extremen zeitlichen Schwankungen unterworfen. Abweichungen vom Durchschnittswert übersteigen wohl zu bestimmten, vulkanisch besonders aktiven Zeiten in der Erdgeschichte die heute von der Menschheit produzierte CO₂-Freisetzung um ein Vielfaches.



Abb. 2: Magnesit ($MgCO_3$)-Adern in serpentinisiertem Peridotit: ehemals am Meeresboden durch Zirkulation von CO_2 -haltigem Meerwasser ausgefällt, heute dank Alpenaufschiebung aufgeschlossen im Aostatal.

Heisse Quellen, Vulkanausbrüche und Klimakatastrophen

Mit Hochdruck-Hochtemperatur-Experimenten im Labor und thermodynamischen Modellierungen sind Geologen dem komplexen physikalisch-chemischen Verhalten von H_2O und CO_2 im Mantel auf der Spur. Eine direkte Messung, wie viel CO_2 durch Vulkanismus in die Erdatmosphäre zurückgelangt, ist nämlich noch viel schwieriger als die Abschätzung der jährlich subduzierten CO_2 -Menge. Namentlich während der frühen Erdgeschichte war der Ausstoss sicher grösser als das Recycling in den Mantel durch Subduktion ozeanischer Kruste. Wir wissen aber auch, dass der CO_2 -Ausstoss durch vulkanische Tätigkeit zeitlich sehr unregelmässig verlief. Heute wird CO_2 oberhalb von Subduktionszonen und Gebieten aktiver Gebirgsbildung nicht nur in klar erkennbaren Vulkanausbrüchen gefördert, sondern es steigt auch diffus als Gas oder gelöst in geothermale Grundwasser gegen die Erdoberfläche, was die Quantifizierung des CO_2 -Flusses noch mehr erschwert. Für den globalen CO_2 -Haushalt der Atmosphäre vermutlich viel bedeutsamer als Subduktionszonen-Magmatismus sind geologisch relativ kurze Perioden intensiver basaltischer Vulkantätigkeit abseits von Plattengrenzen. Vor 253 und vor 65 Millionen Jahren ergossen sich innert etwa hunderttausend Jahren gewaltige Mengen basaltischer Laven über grosse Teile von Westsibirien beziehungsweise Nordwest-Indien. Diese Magmen stammen vermutlich aus dem tieferen Erdmantel, wo CO_2 zuvor langfristig zwischengelagert worden ist. Der CO_2 -Ausstoss dieser Ergüsse war kurzzeitig um Grössenordnungen höher als der durch Subduktion kontinuierlich versenkte Kohlenstoff-Fluss und trug vermutlich wesentlich zu globalen Klimaveränderungen bei: Die beiden genannten Perioden gingen den beiden grössten Massen-Aussterbereignissen der Erdgeschichte unmittelbar voraus: dem Ende des Paläozoikums (vor 253 Mio. Jahren) beziehungsweise dem Ende des Mesozoikums (vor 65 Mio. Jahren), bevor der Einschlag des Chixculub-Meteoriten wohl den Dinosauriern und vielen anderen mesozoischen Tierarten den Gnadentoss gab...

Reaktionen im Erdmantel

Wenn ozeanische Kruste mit ihrer Sedi-mentbedeckung an Subduktionen in den Mantel zurücksinkt, werden die Gesteine allmählich aufgeheizt. Dadurch reagieren die wasser- und karbonathaltigen Mineralien und setzen bei Versenkungstiefen zwischen 50 und 150 km einen Grossteil ihres Wassers wieder frei. Dieses Wasser wirkt im Kontakt mit den umgebenden, heisseren Silikatgesteinen des Erdmantels als «Flussmittel», wodurch die Mantelgesteine teilweise aufgeschmolzen werden. Durch Aufstieg dieses Magmas kommt es zur Bildung von Vulkanen an Land, beispielsweise im «Feuergürtel» rund um den Pazifik oder auch im Mittelmeer. Der Wassergehalt solcher Magmen ist für den hochexplosiven Charakter dieser Vulkane verantwortlich. CO_2 begleitet das Wasser in diesen Prozess, doch ist das Verhalten von CO_2 bei der Magmabildung viel weniger gut bekannt. Vermutlich wird ein beträchtlicher Anteil des subduzierten Kohlenstoffs in den tieferen Mantel weiterverfrachtet und kann dort für spätere vulkanische Tätigkeit zwischengelagert werden.

Referenz

¹D. M. Kerrick, Reviews of Geophysics, 39, 565 (2001)

Forschungsinformationen

James Connolly ist Privatdozent am Departement Erdwissenschaften. Seine Forschungsinteressen sind die Entwicklung und Migration von Fluiden innerhalb der Erde, insbesondere die thermodynamischen und mechanischen Aspekte von diesen Vorgängen.

Kontakt und weitere Informationen unter:

james.connolly@erdw.ethz.ch
www.perplex.ethz.ch/connolly.html

Christoph A. Heinrich leitet die «Fluids and Mineral Deposits»-Gruppe, die sich mit geologischen Transportprozessen befasst, welche zur Anreicherung von nutzbaren Spurenelementen in der Erdkruste führen. Von besonderem Interesse sind dabei Erzvorkommen, die sich im Untergrund erloschener Vulkane gebildet haben. Entscheidende Kenntnisse zur chemischen Zusammensetzung der erzbildenden Fluide werden durch laser-basierte Analysen mikroskopischer Einschlüsse in Mineralien gewonnen.

Kontakt und weitere Informationen unter:

christoph.heinrich@erdw.ethz.ch
http://www.erdw.ethz.ch/Institut.cfm?ID-Inst=2705

James Connolly

Institut für Mineralogie und Petrographie, Departement Erdwissenschaften der ETH Zürich

Christoph Heinrich

ordentlicher Professor für Mineralische Rohstoffe und Prozesse des Erdinnern am Departement Erdwissenschaften der ETH Zürich