

LEISTUNGSFÄHIGE BIOSPHÄRE

ANDREAS FISCHLIN UND NINA BUCHMANN

Dem Gas CO₂ fällt als lebenswichtiges Bindeglied zwischen Mensch, Tier, Pflanze und Mikroorganismen im globalen Kohlenstoffhaushalt eine aussergewöhnliche Rolle zu. Die Vegetation der Kontinente und die Meere tauschen mit der Atmosphäre riesige Mengen CO₂ aus. Die Menschheit belastet den Kreislauf jährlich mit etwa 8 Gigatonnen Kohlenstoff (1 Gt = 10¹⁵ g), wovon die Vegetation der Kontinente und die Meere je ein Viertel wieder aufnehmen. Der Rest trägt zum Anstieg der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre bei. Welche Rolle die Ökosysteme genau spielen, ist ein hochaktuelles Forschungsthema.

Bei jedem Atemzug atmen wir Luft aus, die 3 bis 4% CO₂ enthält. Enthielte sie 5 bis 6%, wirkte die Luft beim Einatmen toxisch. Bei einer Verdoppelung auf 8% stellte sich innerhalb weniger Minuten der Tod ein. An diesem einfachen Sachverhalt lässt sich erkennen, dass wir mit anderen Lebewesen unauflösbar verquickt sind: Die C-autotrophen Pflanzen benötigen für ihre Photosynthese CO₂ und geben netto O₂ ab. Demgegenüber benötigen die C-heterotrophen Organismen (Tiere, Mikroorganismen, Pilze) O₂ und geben bei der Veratmung energiereicher C-Verbindungen CO₂ ab. Alle Lebewesen sind existenziell darauf angewiesen, dass die beteiligten Gase in ausreichender Menge und zu ungefähr gleichen Teilen ausgetauscht werden. Wir Menschen stellen diesbezüglich keine Ausnahme dar: Auch unsere Existenz ist untrennbar mit derjenigen funktionierender Stoffkreisläufe verbunden, die durch intakte Ökosysteme reguliert werden.

Der globale C-Kreislauf

Trotz engem Lebensbezug wird CO₂ als anorganische Verbindung definiert. In der Atmosphäre liegt Kohlenstoff überwiegend in dieser oxidierten Form vor. Einmal durch die Biosphäre aufgenommen, «durchwandert» der Kohlenstoff in reduzierter Form eine Vielzahl organischer Verbindungen, bevor er wieder in die oxidierende Atmosphäre zurückgelangt. Die atmosphärische Zirkulation bewirkt, dass sich die regelmässigen, grösstenteils biologisch bedingten Schwankungen in den Gaskonzentrationen

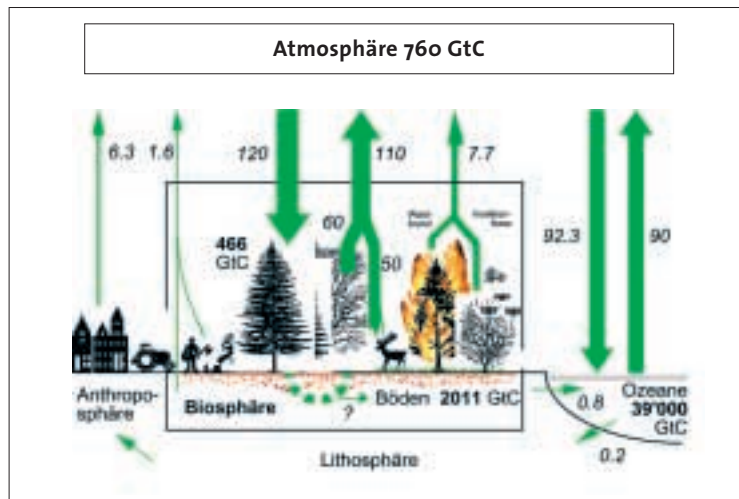


Abb. 1: Der globale Kohlenstoffkreislauf unter menschlichem Einfluss. Es sind die CO₂-Flüsse in Gt C pro Jahr und die C-Vorräte in Gt C dargestellt (aus Fischlin et al., 2003¹, nach IPCC 2001²).

rasch, das heisst in etwa zwei Jahren, überall ausgleichen. So ergibt sich ein weltumspannender globaler C-Kreislauf, der Kontinente und Meere verbindet (Abb. 1). Wäre man vermessen, liesse sich sagen, dass wir «dank» einem gross angelegten «Experiment» das Funktionieren des globalen C-Kreislaufes besser verstehen: Durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe und die Zementproduktion (6,3 Gt) sowie durch Rodungen und Degradierung von Wäldern (1,6 Gt) wird die Atmosphäre jährlich mit insgesamt 7,9 Gt C in Form von so genannten anthropogenen CO₂-Emissionen belastet (Abb. 1). Dies entspricht übrigens nur 1,9% des natürlichen Gesamtflusses (etwa 420 Gt C/a)! Die verlässlichen Messungen der atmosphärischen Spurengaskonzentrationen zeigen aber, dass damit die Regula-

tionskräfte des C-Kreislaufes überfordert sind. Von den 7,9 Gt verbleiben 52% in der Atmosphäre. Weniger gut verstehen wir, wohin die restlichen 48% gehen. Gemäss Messungen und Modellrechnungen müssen die Ozeane und Kontinente beteiligt sein. Für die Vegetation der Kontinente gilt eine stöchiometrische Beziehung zwischen CO₂- und O₂-Flüssen. Dadurch gelang es beispielsweise, mit neuen, exakten O₂-Messungen die vormals nur mittels Modellen abgeschätzte Aufnahme durch die Ozeane und Kontinente aufzuschlüsseln. Die Modellrechnungen liessen sich dadurch bestätigen. Gestützt auf diese Ergebnisse ist heute davon auszugehen, dass je etwa hälftig die Ozeane und die Vegetation der Kontinente dieses CO₂ aufnehmen.



Abb. 2: Messmethoden zur Bestimmung des CO₂-Austauschs zwischen Atmosphäre und Ökosystem. a) Messung des Stammumfangs, um über die Holzvorräte den Kohlenstoffgehalt zu ermitteln. b) Messturm mit Sensoren, die es erlauben, die CO₂-Flüsse mit der Eddy-Kovarianz-Methode zu bestimmen.

Die Rolle terrestrischer Ökosysteme

Noch bis vor etwa zehn Jahren ging man davon aus, dass über den Kontinenten Photosynthese und Respiration etwa ausgeglichen seien und nur die Ozeane mithilfe, den CO₂-Anstieg in der Atmosphäre zu bremsen. So blieb aber unerklärlich, warum die atmosphärische CO₂-Konzentration bislang nicht schneller angestiegen ist, beziehungsweise man müsste eine unbekannte Senke, den so genannten «missing sink», postulieren. Um dieser unbefriedigenden Situation ein Ende zu setzen, hat man im letzten Jahrzehnt begonnen, die CO₂-Sequestrierung von terrestrischen Ökosystemen möglichst genau und direkt im Feld als Netto-CO₂-Bilanz («net ecosystem exchange», NEE) punktuell zu messen und mittels neuer Modellansätze langfristig und grossräumig abzuschätzen. Dabei gibt es prinzipiell zwei Messmöglichkeiten: (i) die Differenz des C-Vorrats, der zu verschiedenen Zeitpunkten bestimmt wurde (Abb. 2a), und (ii) die direkte Flussmessung mittels der Eddy-Kovarianz-Methode (Abb. 2b). Letztere Methode ermöglicht zudem, die zugrunde liegenden ökophysiologischen Prozesse zu erforschen, um so ein mechanistisches Verständnis des C-Haushalts ganzer Ökosysteme zu erlangen.

Bei der Eddy-Kovarianz-Methode werden hochfrequent (bei 10 Hz) Windrichtung, Windgeschwindigkeit und die CO₂-Konzentration, insbesondere über der Vegetationsdecke, gemessen. So lassen sich die vertikalen CO₂-Flüsse in das Ökosystem hinein beziehungsweise aus ihm heraus mit einer Kovarianzanalyse abschätzen. NEE-Flussmessungen werden weltweit in verschiedenen tropischen, gemässigten und borealen Ökosystemen durchgeführt (z. B. EU-

Projekt CarboEurope³). Auch in der Schweiz gibt es Versuchsflächen, welche verschiedene Landnutzungstypen, das heisst Wald, Gras- und Ackerland, abdecken.

Photosynthese und Respiration

An einem typischen Sommertag ergibt sich folgendes Bild: Nachts bis in die frühen Morgenstunden überwiegt die Respiration durch Vegetation und Böden. Mit zunehmender Sonneneinstrahlung setzt Turbulenz und Photosynthese ein. Mittags wird meist die grösste C-Aufnahme beobachtet, so lange die Verfügbarkeit des Bodenwassers die Photosynthese nicht limitiert. Mit abnehmender Einstrahlung am Nachmittag und in den frühen Abendstunden nehmen die Photosyntheseraten allmählich ab, bis die Respiration wieder dominiert. Innerhalb eines einzigen Tages ändert das Vorzeichen der NEE also zweimal! Betrachtet man ein ganzes Jahr, so ergibt sich für Wälder in gemässigten Zonen folgendes Bild: Im Frühjahr und Sommer wird netto CO₂

aufgenommen, im Winter überwiegen jedoch die Verluste (Abb. 3).

Im Allgemeinen stellen gesunde Wälder übers Jahr gemittelt C-Senken dar, das heisst, sie fixieren mehr C (oft zwischen 300 und 500 g C m⁻² a⁻¹) als sie durch Atmung verlieren. Ausnahmen sind sehr junge Wälder, die in den ersten fünf bis zehn Jahren häufig noch C-Quellen sind, da ihr Kronendach noch nicht geschlossen ist. Hohe Bodentemperaturen führen zu hoher Bodenatmung durch Wurzeln und Mikroorganismen. Diese CO₂-Verluste kann der noch geringe oberirdische Zuwachs der jungen Bäume nicht kompensieren. Hingegen sequestrieren ältere Wälder meist erhebliche Mengen an C und speichern ihn im Holz oder im Boden. So fixierte ein bis 250 Jahre alter, heterogener Mischwald in Thüringen in den Jahren 2000 bis 2002 zwischen 470 und 490 g C m⁻² a⁻¹ (Abb. 3). Auf globalem Massstab zeigt sich, dass die Senkenstärke von Laubwäldern mit zunehmender Länge der Vegetationsperiode zunimmt.

Prozessverständnis durch Modelle

Will man die Reaktion terrestrischer Ökosysteme auf sich ändernde Umweltbedingungen verstehen, sind Messdaten weiter aufzuschlüsseln. Nur so ist ein mechanistisches Verständnis möglich. Aufgrund ihrer höheren Masse werden die schweren Isotope (¹³C und ¹⁸O) gegenüber den hauptsächlich vorkommenden Isotopen (¹²C und ¹⁶O) bei Prozessen wie z. B. der Photosynthese «abgereichert», also in einem geringeren Mass in die Biomasse eingebaut als ihrem Anteil in der Luft entspricht. Diese Eigenschaft erlaubt es, zwischen den Prozessen im beziehungsweise über dem Boden oder zwischen Assimilation und Respiration zu unterscheiden. Ferner können die oberirdischen Atombombenversuche der 50er- und

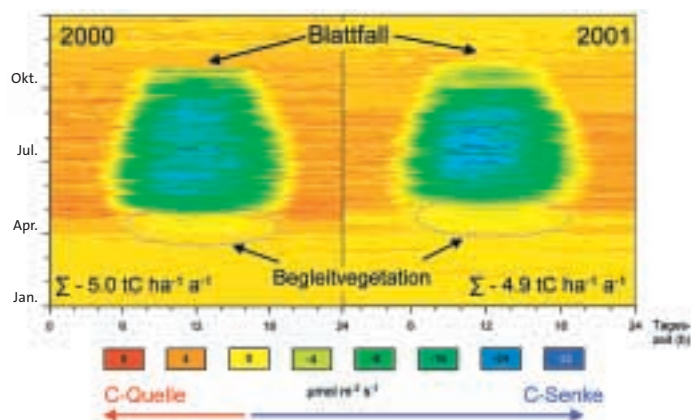


Abb. 3: Typische Tages- und Jahresgänge des Netto-CO₂-Austauschs von Wäldern (nach Knohl et al., 2003⁴).



60er-Jahre, welche schubartig den Anteil des radioaktiven Isotops ^{14}C im atmosphärischen CO_2 ansteigen liessen, berücksichtigt werden, was die Verfolgung dieses «Bomben-Kohlenstoff»-Signals in Pflanzen und Böden erlaubt und zu einem vertieften Prozessverständnis verhilft. Die Ergebnisse sind vielversprechend: So konnten über die Bestimmung der Isotopenverhältnisse allgemein verwendbare Modelle erstellt⁵ und z. B. die Bodenatmung quantitativ in mikrobielle Atmung und in Wurzelatmung aufgeteilt werden⁶.

Für Grasland- und Ackerstandorte gibt es weit weniger NEE-Ergebnisse. Neueste Untersuchungen deuten darauf hin, dass europäische Graslandflächen meist Senken, hingegen Ackerflächen meist Quellen sind. Obwohl diese Ergebnisse rund 50% der europäischen Landfläche repräsentieren, sind sie infolge der hohen Variabilität, zum Beispiel zwischen organischen und anorganischen Böden, mit grossen Unsicherheiten verbunden.

Vom «Missing Sink» zur «Missing Source»?

Dank der neuen Messergebnisse lässt sich problemlos der «missing sink» erklären. Eben diese gleichen Resultate geben nun Anlass zu neuen Fragen. Rechnet man nämlich die punktuell erhobenen Flussmessungen auf den globalen Massstab hoch, ergibt sich überraschenderweise das Bild einer viel zu grossen Senkenleistung (bis 10 Gt C a^{-1}). Man muss logischerweise die Messresultate und die Hochrechnungen kritisch hinterfragen oder eine «missing source» postulieren.

Eine mögliche Erklärung für diese Diskrepanz ist in der Wirkung von Störungen zu suchen, die selten, aber umso stärker ein Ökosystem von einer Senke in eine Quelle umschlagen lassen. Betrachtet man Senkenwirkungen längerfristig, so fällt deren

grosse interannuelle Variabilität auf. Sie kommt durch viele von Jahr zu Jahr stark schwankende Faktoren zustande: (i) biotische Faktoren wie Alter, Artenzusammensetzung, Bestandesstruktur, Krankheiten und Insektenbefall; (ii) abiotische Faktoren wie Witterung, El Niño, Wasser- und Nährstoffverfügbarkeit; (iii) anthropogene Faktoren wie Bewirtschaftung und Nutzung. Besonders die anthropogenen Einflüsse auf der Südhemisphäre durch Rodungen und Übernutzungen sind hier wichtig, machen sie doch mit $1,6 \pm 0,8 \text{ Gt C a}^{-1}$ (90% Vertrauensintervall) den grössten Teil der globalen, vor allem aus der Nordhemisphäre stammenden Senkenwirkung von $2,3 \pm 1,3 \text{ Gt C a}^{-1}$ wieder zunichte (Abb. 1).

Ansteigende Senkenwirkung

Fasst man alle diese Wirkungen global zusammen, dann ergibt sich ein Trend, bei dem die gesamte Senkenwirkung der Biosphäre in den letzten Jahrzehnten leicht angestiegen ist. Von einer beinahe ausgeglichenen Phase der 70er-Jahre haben wir in den 90er-Jahren einen Anstieg auf Netto $0,7 \pm 1,0 \text{ Gt C a}^{-1}$ zu verzeichnen! Wird dieser Trend andauern, selbst wenn sich das Klima weiter ändert?

Die heute vorliegenden Ergebnisse erlauben noch kein befriedigendes Verstehen der biologischen C-Kreisläufe. Hierzu müssen die Unsicherheiten, die relativ zum globalen Gesamtfluss bei etwa 0,3% liegen, noch deutlich weiter gesenkt werden. Eine Klimaschutzpolitik, wie sie durch das Kyoto-Protokoll vorgesehen ist, will sich ungeachtet verbleibender Unsicherheiten in beträchtlichem Ausmass auf die Senkenleistung durch Ökosysteme stützen (siehe Beitrag Fischlin und Fuhrer, S. 32). Hier wird davon ausgegangen, dass menschliches Zutun die C-Bilanzen so zu beeinflussen vermag, dass Senkenwirkungen gesteigert werden. Ob derartige Erwartungen berech-

tigt sind, lässt sich beim heutigen Wissensstand nicht beurteilen. Wir wissen lediglich, dass Ökosysteme bislang wesentlich geholfen haben, den globalen Anstieg der CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre zu bremsen. Ob und in welchem Ausmass die Biosphäre als Ganzes das weiterhin leisten kann, wie von vielen Seiten erhofft wird, muss die Zukunft erst noch zeigen.

Forschungsinformationen

In der Fachgruppe «Terrestrische Systemökologie» werden mit systemtheoretischen Konzepten Ökosysteme, z. B. Wälder, modelliert, um Reaktionen auf eine sich ändernde Umwelt quantitativ abzuschätzen. Hier stehen Auswirkungen von Klimaänderungen im Vordergrund, wobei eine konsistente Einbettung der kleinräumigen Ökosysteme in das globale Klimageschehen eine besondere Herausforderung darstellt.

Mehr Informationen unter:

<http://www.ito.umw.ethz.ch/SysEcol/>
Kontakt: andreas.fischlin@env.ethz.ch
Terrestrische Systemökologie, Departement Umweltwissenschaften ETHZ, Grabenstrasse 3, CH-8952 Schlieren.

Die Untersuchung des C-Haushaltes terrestrischer Ökosysteme stellt einen Forschungsschwerpunkt der Gruppe Graslandwissenschaften dar. Die Auswirkungen anthropogener, klimatischer und biophysikalischer Einflussfaktoren auf die Netto-C-Bilanz und die verschiedenen Teilflüsse werden mit mikrometeorologischen und ökophysiologischen Methoden untersucht. Mit Hilfe stabiler Isotope können die Nettoflüsse in ihre einzelnen Komponenten aufgetrennt werden.

Mehr Informationen unter:

<http://www.gl.ipw.agr.ethz.ch>
Kontakt:
nina.buchmann@ipw.agr.ethz.ch
Institut für Pflanzenwissenschaften,
Departement Agrarwissenschaften,
ETH Zentrum, Universitätsstrasse 2,
CH-8092 Zürich

Literatur

¹Fischlin, A., et al., 2003. Bestandesaufnahme zum Thema Senken in der Schweiz.

Systems Ecology Report No. 29, ITO, ETHZ, ISBN 3-9522686-0-7, 86 pp.

²IPCC, 2001. Climate change 2001. Cambridge Univ. Press, Cambridge.

³<http://www.bgcjena.mpg.de/public/carboeur/>

⁴Knohl, A., Schulze, E.D., Kolle, O., und Buchmann, N., 2003. Large carbon uptake by an unmanaged old deciduous forest in Central Germany. *Agric. For. Met.* 118: 151–167.

⁵Perruchoud, D., Joos, F., Fischlin, A., Hajdas, I., und Bonani, G., 1999. Evaluating time scales of carbon turnover in temperate forest soils with radiocarbon data. *Global Biogeochem. Cycles* 13: 555–573.

⁶Hahn, V. und Buchmann, N., 2004. A new model for soil organic carbon turnover using bomb carbon. *Global Biogeochem. Cycles* 18: GB1019, doi:10.1029/2003GB002115

Andreas Fischlin

Leiter der Gruppe Terrestrische Systemökologie am Departement Umweltwissenschaften der ETH Zürich

Nina Buchmann

ordentliche Professorin für Graslandwissenschaften an der ETH Zürich