

Chancen und Risiken biologischer Kohlenstoffsinken – Was und wieviel wissen wir?

Eine interdisziplinäre Tagung der ETH Zürich und ProClim- für Praxis, Politik und Wissenschaft

Montag, 29. Juni 2004, 8:45 – 16:45

Auditorium Maximum, Hauptgebäude, ETH-Zentrum, Rämistr. 101, 8092 Zürich

Tagungsprogramm:

- 8:45 Öffnung Tagungsbüro
Vorsitz: **Christian Körner**, Universität Basel
- 9:15 **Andreas Fischlin**, *ETHZ*
Begrüssung, Ziele der Tagung
- 9:20 **Hans Thierstein**, *ETHZ*
Ursachen, Amplituden und Raten langfristiger, natürlicher CO₂-Schwankungen
- 10:00 **Fortunat Joos**, *Universität Bern*
Terrestrische Senken und der globale Kohlenstoffkreislauf
- 10:40 Pause
- 11:20 **Jürg Fuhrer**, *FAL*
Senken und Quellen landwirtschaftlicher Flächen und Böden
- 12:00 **Werner Hediger**, *ETHZ*
Kohlenstoff-Sequestrierung in landwirtschaftlichen Böden: Eine ökonomische Beurteilung
- 12:40 Mittagspause
- 14:20 **Rolf Siegwolf**, *Paul Scherrer Institut*
C-Flüsse in Ökosystemen aus experimenteller Sicht
- 15:00 Pause
- 15:30 **Martin Heimann**, *Max-Planck Institut Biogeochemie, Jena*
Atmosphäre und Ökosysteme - können wir ihre Wechselwirkung beobachten?
- 16:10 **Andreas Fischlin**, *ETHZ*
Wissen wir genug?
- 16:45 Schluss

Ursachen, Amplituden und Raten langfristiger, natürlicher CO₂-Schwankungen

Hans Thierstein, Geologisches Institut, ETH Zürich, thierstein@erdw.ethz.ch

Die Erde ist ein Spezialfall unter allen bekannten Himmelskörpern wegen ihres geringen CO₂-Gehalts der Atmosphäre und der Anwesenheit von Wasser, freiem Sauerstoff und Lebewesen. Der Übergang von einer ursprünglich sauerstofffreien und kohlenstoffreichen Atmosphäre zum heutigen Zustand ist ohne die Katalyse durch Organismen nicht erklärbar. Die chemische Entwicklung der Atmosphäre kann aus den geologischen Ablagerungen der letzten ca. 4 Milliarden Jahren, dem gegenwärtigen Verständnis globaler Stoffkreisläufe und der sich entwickelnden geochemischen Analytik einigermassen rekonstruiert werden.

Die in Eisbohrkernen bestimmten atmosphärischen CO₂-Schwankungen bewegten sich in den letzten 0.7 Ma (Millionen Jahre vor heute) zwischen 180 und 290 ppm (1, 2). Veränderungen in der kohlenstoffisotopischen Zusammensetzung der Karbonat- und organischen Kohlenstoff-Ablagerungen, kombiniert mit C-Kreislaufmodellen, deuten darauf hin, dass der atmosphärische CO₂-Gehalt im Phanerozoikum (0-550 Ma) wiederholt geschwankt hat und meist viel höher gewesen ist (mit Maxima von 3000-7500 ppm) als heute (3). Das Paradox zwischen der über Milliarden von Jahren wachsenden Strahlungsintensität unserer Sonne und der frühen Entwicklung von Leben auf einer kalten Erde ist lösbar durch das plausible Modell eines graduellen Abbaus der kohlenstoffhaltigen Treibhausgase der frühen Atmosphäre durch Photosynthese und langfristige Ablagerung von Kohlenstoff (4). Dieser findet sich heute als Kalksteine, Kohle und andere kohlewasserstoffreiche Reservoirs in der Erdkruste. Eine interessante Auswirkung dieses Gaia-Modells ist, dass in vergleichsweise naher Zukunft (d.h. in ca. 100 Millionen Jahren) der Abkühlungseffekt der Erde durch biologisch vermittelten Treibhausgasabbau in der Atmosphäre wegen CO₂-Mangels nicht mehr möglich sein wird. Die Erde wird sich ab dann mit der zunehmenden Sonnenstrahlung langsam über den Temperaturtoleranzbereich der meisten lebenden Organismen hinaus erwärmen.

Die Bestimmung der Geschwindigkeiten, mit der vergangene, natürliche CO₂-Schwankungen der Atmosphäre abgelaufen sind, hängt stark von der möglichen zeitlichen Auflösung der geologischen Klimaarchive ab. Die wenigen datierten, kurzfristigen Schwankungsereignisse am Ende von quartären Eiszeiten, sowie bei einem dramatischen Methanaustritt vor 55 Millionen Jahren, deuten darauf hin, dass die gegenwärtige Zunahme der atmosphärischen CO₂-Gehalte 30-50 Mal schneller verläuft als die in der Vergangenheit natürlich aufgetretenen Veränderungen (2). Und jene waren bereits verbunden mit dramatischen Veränderungen in der regionalen und globalen Zusammensetzung der damaligen Organismenvergesellschaftungen.

Referenzen:

- IPCC, 2001: Climate Change 2001: Technical Summary (IPCC, Geneva, 2001)
- EPICA, 2004: Eight glacial cycles from an Antarctic ice core. *Nature* 429: 623-627.
- Berner R, 2003: The long-term carbon cycle, fossil fuels and atmospheric composition. *Nature* 426: 323-326.
- Lovelock JE & Whitfield M, 1982: Life span of the biosphere. *Nature* 296: 561-563.

Terrestrische Senken und der globale Kohlenstoffkreislauf

Fortunat Joos, Klima- und Umweltphysik, Physikalisches Institut, Universität Bern,
Sidlerstr. 5, CH-30012 Bern, joos@climate.unibe.ch

Der kontinuierliche Anstieg der atmosphärischen Konzentration von CO₂ und anderen Treibhausgasen und die beobachtete globale Erwärmung führen zu Befürchtungen über negative Auswirkungen der anthropogenen Klimaänderungen auf die Gesellschaft. Der gegenwärtige CO₂ Anstieg wird vor allem durch die Nutzung fossiler Brennstoffe und ferner durch die Abholzungen in den Tropen verursacht. Die Analyse von polarem Eis zeigt, dass die heutige CO₂ Konzentration höher ist als je während den letzten 420'000 Jahren beobachtet. Die lange Aufenthaltszeit von CO₂ im Klimasystem und die heutigen Emissionstrends implizieren einen fortgesetzten CO₂ Anstieg über die nächsten Jahrzehnte. Die CO₂ Emissionen müssen deutlich unterhalb des heutigen Niveaus abgesenkt werden, um atmosphärisches CO₂ zu stabilisieren und die globale Erwärmung zu verlangsamen. Die Senkenwirkung von Wiederaufforstungsmassnahmen bleibt sowohl zeitlich wie mengenmässig beschränkt. Die Menge der fossilen Emissionen bestimmt im Wesentlichen die zukünftige CO₂ Konzentration.

Der Vortrag wird eine Übersicht über den globalen Kohlenstoffkreislauf und dessen anthropogene Störung geben. Globale Quellen und Senken und mögliche Entwicklungen werden diskutiert.

Senken und Quellen landwirtschaftlicher Böden und Flächen

Jürg Fuhrer und Jens Leifeld, Agroscope FAL Reckenholz, Eidg. Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau, Lufthygiene/Klima, 8046 Zürich, juerg.fuhrer@fal.admin.ch

Die Böden landwirtschaftlicher Flächen stellen je nach Landnutzung und Bewirtschaftungsform eine Quelle oder Senke für CO₂ dar. Während das Grasland europaweit um die 100 Tg C a⁻¹ netto bindet verliert das Ackerland etwa 300 Tg C jährlich¹. Damit stellt das Landwirtschaftsland die grösste biosphärische CO₂-Quelle dar, und Massnahmen zu deren Verringerung haben einen hohen Stellenwert.

Der Kohlenstoff (C) in der organischen Bodensubstanz (SOM) stammt direkt aus der Pflanzenbiomasse, ferner aus organischen Düngern und anderen Zugaben, und aus Ernterückständen. Die Stabilisierung erfolgt über physikalische und biochemische Prozesse. Durch die Bodenbearbeitung können geschützte C-Fractionen freigelegt und abgebaut werden. Infolge der fehlenden mechanischen Bodenbearbeitung enthält das Grasland die grössere C-Dichte als das Ackerland. Die C-Dichte untersteht aber auch dem Einfluss von Bodeneigenschaften, Klima und anderer Faktoren. Am grössten ist sie in organischen Böden, welche infolge der Kultivierung über Jahrzehnte grössere Mengen an C freisetzen. Berücksichtigt man die Flächenanteile der verschiedenen Landnutzungstypen so beträgt der landwirtschaftliche C-Vorrat bis 1 m Tiefe (organische Böden bis 2 m) in der Schweiz heute ca. 170 Mio t².

Eine Umstellung der Bewirtschaftung oder der Landnutzung kann den C-Vorrat im Boden erhöhen oder verkleinern bis ein neues Gleichgewicht erreicht ist. Dieser Prozess kann Jahre bis Jahrzehnte dauern, und die Änderungen sind aufgrund der Messungenauigkeit und natürlicher Schwankungen in Zeit und Raum experimentell nur schwer feststellbar. Umstellung auf reduzierte Bodenbearbeitung zum Schutz des Gefügebau führt tendenziell zu einer Zunahme, ebenso wie die Umwandlung von Acker- in Grünland. Besonders wirksam ist der Schutz organischer Böden bis zur Renaturierung von Feuchtgebieten, da dadurch CO₂ Emissionen eingespart werden können. Die theoretisch maximal mögliche C-Sequestrierung und -Einsparung wird in der Schweiz auf jährlich 1,1 Mio t CO₂ geschätzt (ca. 27% der Kyoto Verpflichtung). Realistisch möglich wären allerdings nur etwa 10% davon. Im internationalen Vergleich (EU-15, USA) erscheint dies gering, was hauptsächlich auf die bodenschonende Anbaumethoden zurückzuführen ist, welche in der Schweiz seit längerer Zeit übliche Praxis darstellen. Als Alternative und wirkungsvollen Beitrag dürfte sich der Anbau von Energiepflanzen zur Substitution fossiler Energie anbieten.

Bei jeder Massnahme im Landwirtschaftsbereich gilt es auch deren Wirkung auch auf andere Treibhausgase wie Lachgas (N₂O) oder Methan (CH₄) zu berücksichtigen; nur bei einer anhaltenden Verbesserung der gesamten Bilanz (in CO₂-Äquivalenten) kann von einem positiven Beitrag an den Klimaschutz gesprochen werden.

Trotz des bescheidenen Potenzials ist auch in der Schweiz der C-Sequestrierung weiter Beachtung zu schenken, da dadurch einerseits ein Teil der landwirtschaftlichen Treibhausgasemissionen sowie der C-Verlust durch Überbauung kompensiert werden kann, und andererseits die Schonung des Bodens gefördert wird. Dazu kommt, dass bei anhaltender Klimaerwärmung durch Abbau der organischen Substanz und Erosion Boden-C potentiell verloren geht, und Massnahmen zu dessen Schutz verstärkt nötig sind.

¹ Janssens I.A. et al. (2003) Europe's terrestrial biosphere absorbs 7 to 12% of European anthropogenic CO₂ emissions. *Science* 300: 1538-1542

² Leifeld, J., Bassin, S. & Fuhrer, J. (2003) Carbon stocks and carbon sequestration potentials in agricultural soils in Switzerland. *Schriftenreihe der FAL* 44.

Kohlenstoff-Sequestrierung in landwirtschaftlichen Böden: Eine ökonomische Beurteilung

Werner Hediger, Institut für Agrarwirtschaft, ETH Zürich, werner.hediger@iaw.agrl.ethz.ch

Der Nutzung biologischer Senken für die Kohlenstoff-Fixierung sind nicht nur natürliche Grenzen gesetzt. Das effektive Potenzial dieser im Kyoto-Protokoll vorgesehenen und gegenwärtig auf politischer und wissenschaftlicher Ebene thematisierten Option zur Reduktion der atmosphärischen Treibhausgaskonzentration hängt sehr stark von wirtschaftlichen Überlegungen der einzelnen Akteure ab; das heisst vom Vorhandensein ausreichender wirtschaftlicher Anreize, welche die einzelnen Landwirte dazu bewegen, ihre Landnutzungs- und Bewirtschaftungsentscheide derart zu ändern, dass eine zusätzliche Fixierung von Kohlenstoff auf landwirtschaftlich genutzten Flächen (in Böden und Biomasse) resultiert. Dementsprechend gilt es, die Möglichkeiten und Grenzen von Massnahmen zur Kohlenstoff-Fixierung in der Landwirtschaft auch aus ökonomischer Sicht zu beurteilen. Dabei zeigt sich, dass dynamische Aspekte von Landnutzungsänderungen und Sättigungseffekte eine entscheidende Rolle spielen:

Landnutzungsänderungen sind einerseits durch bestehende wirtschaftliche Strukturen und Kapazitäten eingeschränkt, und wirken sich andererseits über induzierte Preisänderungen und Treibhausgasemissionen (z.B. zusätzlicher Methanausstoss von Wiederkäuern bei Umwandlung von Ackerflächen zu Dauergrünland) auf das Gesamtsystem aus. Die ökonomische Beurteilung entsprechender Massnahmen zur Kohlenstoff-Sequestrierung muss dementsprechend aus einer Systemperspektive erfolgen. Dazu ist ein integrierter Modellansatz erforderlich, der neben der Sequestrierung auch die wichtigsten induzierten Effekte und Trade-offs mitberücksichtigt.

Sättigungseffekte bei der Akkumulation von Kohlenstoff in Biomasse und Böden führen dazu, dass es auf der einen Seite für die Gesellschaft (bzw. den Staat) sehr kostspielig wäre, ausreichende wirtschaftliche Anreize zu setzen, um bestehende (gesättigte) Kohlenstoffsinken längerfristig aufrecht zu erhalten. Auf der anderen Seite würden Anreize (Subventionen oder Kompensationszahlungen), welche pro zusätzlich sequestrierter Kohlenstoffmenge gewährt werden, mit dem Erreichen der Sättigungslimite eingestellt. Somit würde für die Landwirte indirekt ein Anreiz entstehen, die erreichte Sequestrierung wieder umzukehren, in dem sie die gepflanzten Bäume fällen oder das Land wieder mit dem Pflug bearbeiten, wodurch der grösste Teil der sequestrierten Kohlenstoffmenge wieder freigesetzt würde.

Insgesamt zeigen bisherige ökonomische Analysen, dass die Sequestrierung von Kohlenstoff in landwirtschaftlichen Böden durch den Übergang zu einer pfluglosen Bodenbearbeitung mit Direktsaatverfahren zwar kurzfristig die günstigste Option zur Treibhausgasreduktion in der Landwirtschaft darstellen dürfte. Allerdings gilt es dabei auch zu berücksichtigen, dass einer langfristigen Fixierung von Kohlenstoff in landwirtschaftlichen Böden sowohl ökologische als auch ökonomische Grenzen gesetzt sind. Die Umwandlung von Ackerflächen in Dauergrünland ist aus gesamtwirtschaftlicher Sicht weniger geeignet, da dabei mit zusätzlich induzierten Methan- und Lachgasemissionen gerechnet werden muss, falls das zusätzlich anfallende Gras nicht anders verwendet würde als zur Fütterung von Wiederkäuern. In diesem Zusammenhang gilt es die Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen (Gras und Holzplantagen) zur Energieproduktion zu erwähnen, wie bereits in einigen Studien

vorgeschlagen wurde. Allerdings gilt es dabei die angesprochenen Grenzen für die Wirtschaftlichkeit der Kohlenstoff-Sequestrierung und für die Energieproduktion zu erwähnen. Hierbei dürften vor allem induzierte Preiseffekte und strukturelle Veränderungen eine entscheidende Rolle spielen. Für eine umfassende Beurteilung gilt es zudem die so genannten *Transaktionskosten* (Vertrags- und Monitoringkosten) zu berücksichtigen. Die Sequestrierung von Kohlenstoff in landwirtschaftlichen Böden dürfte somit aus wirtschaftlicher Sicht bestenfalls eine kurzfristige Option mit mengenmässig eher bescheidenem Beitrag zur Erreichung der Kyoto-Ziele darstellen.

C-Flüsse in Ökosystemen aus experimenteller Sicht

Rolf Siegwolf, Paul Scherrer Institut, 5232-Villigen-PSI, e-mail: rolf.siegwolf@psi.ch

In den letzten beiden Jahrzehnten hat sich die ökologische Forschung von einer weitgehend deskriptiv, beobachtenden zu einer stark analytisch, deterministisch orientierten Disziplin gewandelt. Mit Ansätzen u.a. aus der Chemie, Mathematik und Physik wird versucht, die in-einander verflochtenen Prozesse zu verstehen und zu beschreiben. Im Zusammenhang mit der Frage nach den Auswirkungen der zunehmenden CO₂ Konzentration auf die Ökosysteme stoßen wir an Grenzen und klare Aussagen sind sehr schwierig zu treffen, da wir mit einer enormen Komplexität konfrontiert sind. Was zu Beginn als relativ klar zu beantwortende Fragestellung betrachtet wurde („Mit zunehmender CO₂ - Konzentration erhöht sich die Photosynthese und damit die Biomassenproduktion, ...,es,, kompensiert sich sehr wahrscheinlich...„) erwies sich sehr bald als eine hochkomplexe Herausforderung.

Im kurzfristigen Experiment auf der Einzelblattebene ist die CO₂-Frage einigermaßen zu beantworten, jedoch langfristig gesehen sind diese Erkenntnisse nur mehr bedingt anwendbar. Trotz der Fülle von Ergebnissen, welche in Hoch-CO₂-Untersuchungen auf der Blatt, bzw. Einzelpflanzenebene gewonnen wurden und da auch zutreffen mögen, sind diese auf der Bestandesebene und mit zunehmend heterogener Artenzusammensetzung kaum mehr zutreffend. Die Übertragbarkeit von Resultaten von Einzelpflanzen auf das Ökosystem ist nur noch vereinzelt zulässig. Vereinfachungen werden unumgänglich und Annahmen müssen Wissenslücken füllen um nur schon Teile solcher Systeme überhaupt noch einigermaßen durchschauen zu können.

Anhand von Beispielen zum Kohlenstoffgehalt von Pflanzen wird die Problematik des „Upscalings,, bezüglich a) Komplexität und b) unerwarteter Systemreaktionen dargestellt. Dabei soll diskutiert werden, welcher Komplexitätsgrad für die Extrapolation benötigt wird. Möglichkeiten zur Vereinfachung werden vorgestellt. Anhand eines weiteren Beispiels aus der Isotopenanalytik an Jahrringen soll aufgezeigt werden wie mit rel. einfachem Vorgehen großräumig klimatische und baumphysiologische Zusammenhänge aufgezeigt werden konnten.

Atmosphäre und terrestrische Ökosysteme: Können wir ihre Wechselwirkung beobachten?

Martin Heimann, Max-Planck-Institut für Biogeochemie, PF 100164, D-07701 Jena, Deutschland, martin.heimann@bgc-jena.mpg.de

Während der letzten 20 Jahre hat sich die Erkenntnis gefestigt, dass die terrestrischen Ökosysteme als integraler Bestandteil des Klimasystems zu sehen sind und über mehrere Rückkopplungsketten dieses auch im globalen Maßstab beeinflussen können. Hierzu gehört die Aufnahme und Abgabe des wichtigen Treibhausgases CO₂ durch Landvegetation und Ozean. Erste Modellsimulationen des globalen Wandels mit gekoppelten Kohlenstoffkreislauf-Klimamodellen zeigen bei Berücksichtigung dieser Wechselwirkung eine potentiell enorme Verstärkung der Temperaturerhöhung, da z.B. bei Temperaturzunahme die terrestrischen Kohlenstoffspeicher durch verstärkten mikrobiellen Abbau CO₂ an die Atmosphäre abgeben und damit den Treibhauseffekt verstärken. Damit stellt sich die wissenschaftliche Frage der Belastbarkeit dieses Befundes: Können wir diese Wechselwirkung bereits heute beobachten und quantifizieren oder handelt es sich nur um einen Artefakt der numerischen Simulationsmodelle? Eine Möglichkeit bilden langfristige *in situ* Messungen (z.B. Flussmessungen) in einzelnen Ökosystemen, oder Untersuchungen an manipulierten Ökosystemen, z.B. unter verändertem CO₂ Gehalt oder erhöhter Temperatur. Dabei stellt sich natürlich die Frage der Repräsentativität der untersuchten Ökosysteme in Hinblick auf die Vielfalt der terrestrischen Vegetation. Ein komplementäres Verfahren bildet die inverse Modellierung des atmosphärischen CO₂ welches die enorme Heterogenität von Kohlenstoffquellen und -Senken integriert. Dabei werden aus Beobachtungen der raumzeitlichen Variationen der CO₂ Konzentration von einem weltweit verteilten Messnetz mit Hilfe eines atmosphärischen Transportmodelles die Quellen und Senken ermittelt. Die zurzeit vorliegende geringe raumzeitliche Auflösung des globalen Messnetzes erlaubt allerdings nur eine sehr grobe Lokalisierung der terrestrischen Quellen- und Senkenmuster. Durch Vergleich mit Klimaanomalien (z.B. Temperatur, Niederschlag) lassen sich in einigen Regionen der Erde die wichtigsten Antriebsfaktoren für die interannuale Variabilität der CO₂-Quellen und Senken empirisch ermitteln. Die Inversionsrechnung über die letzten 20 Jahre zeigt, dass, ausgelöst durch El Nino Ereignisse, relative Trockenheit in der Amazonasregion die anomalen CO₂ Quellen global dominieren. Eine hohe Korrelation der aus der Inversion bestimmten Quellenmuster mit aus Fernerkundung ermittelten Emissionsschätzungen von Vegetationsfeuer zeigt, dass diese bis zu 50% zur beobachteten interannualen Variabilität der anomalen terrestrischen CO₂ Quellen beitragen. Die Biomassenverbrennung bildet offensichtlich ein wichtiger Prozess im terrestrischen Kohlenstoff, der in den heutigen globalen Modellen nur unvollständig dargestellt ist. Eine Verbesserung der atmosphärischen Inversionsmethode erfordert einerseits die Entwicklung eines langfristig angelegten regionalen und globalen Messnetzes mit hochpräzisen Beobachtungen atmosphärischer biogeochemischer Spurenstoffe, und andererseits die Entwicklung neuer Sensoren um mit Hilfe der Fernerkundung vom Weltall aus die Konzentration dieser Stoffe mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung zu bestimmen.

Wissen wir genug?

Andreas Fischlin, Terrestrische Systemökologie ETH Zürich, andreas.fischlin@env.ethz.ch

Das Argument, dass die Wissenschaft, was die biologischen Senken anbetrifft, überfordert sei, hört man oft. Die Wissenslücken und verbleibenden Unsicherheiten seien zu gross, als dass sich eine Anrechnung an die nationalen Treibhausgasbilanzen gemäss Kyoto-Protokoll rechtfertigen liesse. In der Tat gibt es aus wissenschaftlicher Sicht stichhaltige Gründe, dass trotz der vielen Fortschritte, die gerade in den letzten Jahren erzielt worden sind, unser Wissen noch unbefriedigend ist. Andererseits ist dem entgegenzuhalten, dass langjährige Erfahrungen aus dem Bereich der Bewirtschaftung natürlich erneuerbarer Ressourcen und Ökosysteme zeigen, dass eine abwartende Haltung ebenfalls fraglich ist. Auch sind die Anforderungen der Wissenschaft nicht identisch mit denjenigen der Klimapolitik. In diesem Spannungsfeld werden im Vortrag denkbare Antworten auf die Frage "Wissen wir genug?" diskutiert.