Aktueller Forschungsschwerpunkt

Quellen und Senken des atmosphärischen Kohlendioxid

Einleitung

Das Kohlendioxid (CO_2) ist neben dem Wasserdampf das wichtigste Treibhausgas in der Atmosphäre und beeinflußt damit entscheidend die Oberflächentemperatur der Erde. Aus Analysen an Eiskernen sowie direkten Messungen seit 1958 läßt sich zeigen, daß die atmosphärische CO_2-Konzentration seit Beginn der industriellen Revolution in den letzten 200 Jahren von etwa 280 ppmv (1 ppmv = 1 CO_2-Molekül pro 10^6 Luftmoleküle) auf heute über 350 ppmv, d.h. um mehr als 25% zugenommen hat. Diese Zunahme läßt sich eindeutig auf menschliche Aktivitäten zurückführen, insbesondere auf die Verbrennung von Kohle, Öl und Erdgas. Zudem wird CO_2 bei Änderungen der Landnutzung freigesetzt, wie z.B. bei Brandrodungen in den Tropen. Da diese CO_2 Emissionen auch in nächster Zukunft weiter anhalten werden, ist mit einer weiteren Erhöhung der CO_2 Konzentration und einer daraus resultierenden Klimaänderung im nächsten Jahrhundert zu rechnen. Um die zukünftige Entwicklung des atmosphärischen CO_2 Gehalts und die Auswirkungen auf das Klima der Erde genauer abzuschätzen, muß der globale Kohlenstoffkreislauf betrachtet werden. Das Kohlendioxid wird kontinuierlich zwischen der Atmosphäre und den beiden auf Zeitskalen bis zu einigen 100 Jahren wichtigsten Kohlenstoffspeichern der Erde, dem Ozean und der terrestrischen Biosphäre, ausgetauscht. Auf der Landoberfläche geschieht dies durch Photosynthese der Vegetation, welche der Atmosphäre CO_2 entzieht und durch Respiration der Atmosphäre wieder zuführt. Im marinen Bereich diffundiert CO_2 durch die Luft-Wasser Grenzschicht und wird im Ozean durch chemische, physikalische und biologische Prozesse umgewandelt und in die Tiefe verfrachtet. Diese Austauschvorgänge im globalen Kohlenstoffkreislauf bewirken, daß zur Zeit nur etwa die Hälfte des vom Menschen freigesetzten CO_2 in der Atmosphäre verbleibt und der Rest durch Ozean und Landbiosphäre aufgenommen wird. Es ist jedoch zu erwarten, daß sich in Zukunft vergleichsweise mehr CO_2 in der Atmosphäre akkumulieren wird, da verschiedene der terrestrischen und ozeanischen Kohlenstoffspeicher zunehmend gesättigt werden. Da die Austauschprozesse zudem auch von Umgebungsbedingungen (Temperatur, Feuchte, Einstrahlung, Salzgehalt etc.) abhängen, kann eine durch veränderte Treibhausgaskonzentrationen induzierte Klimaänderung zudem Rückwirkungen im globalen Kohlenstoffkreislauf auslösen und damit den atmosphärischen CO_2 Anstieg verstärken oder auch abschwächen.

Die Klimaforschung, in Deutschland u.a. das Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg sowie das neu gegründete Max-Planck-Institut für Biogeochemie in Jena, versucht, diese Austauschvorgänge im globalen Kohlenstoffkreislauf zu identifizieren und auf regionaler und globaler Skala zu quantifizieren. Basierend auf diesem Prozeßwissen lassen sich dann Modelle des globalen Kohlenstoffkreislaufs entwickeln, mit welchen die atmosphärische CO_2 Konzentration in Abhängigkeit von vorgeschriebenen anthropogenen Emissionsszenarien berechnet werden kann. Fernziel ist, die Kohlenstoffmodelle an globale Klimamodelle anzukoppeln, um die Rückkopplungseffekte zwischen Klimasystem und Kohlenstoffkreislauf zu untersuchen.

Die Möglichkeit einer durch die zunehmenden Treibhausgaskonzentrationen ausgelösten zukünftigen Klimaänderung hat in den letzten Jahren weltweit zu Anstrengungen geführt, den Ausstoß der wichtigsten Treibhausgase zu begrenzen. Angestoßen von den UN-Klimakonferenzen von Rio und Berlin, wurden auf der dritten Vertragsstaatenkonferenz zur UN-Klimarahmenkonvention (UNFCC) in Kyoto 1997 verbindliche Reduktionsziele für einzelne Ländergruppen festgelegt („Kyoto-Protokoll“). Auch wenn diese Reduktionsziele aus wissenschaftlicher Sicht noch relativ bescheiden sind (Reduktion von 5-10% der Emissionen im Verpflichtungszeitraum 2008-2012 bezogen auf die Emissionen im Jahre 1990, stellen sie dennoch einen wichtigen Schritt in Richtung einer globalen Klimaschutzpolitik dar. Insbesondere wurde mit dem Vertragswerk ein weltweites Instrumentarium zur Ermittlung der Treibhausgasemissionen geschaffen, welches es erlaubt, in einheitlicher Form die nationalen Emissionen zu erfassen. Für die Wissenschaft stellt sich hier die Frage, ob und wie sich die aus nationalen Erhebungen ermittelten Emissionsangaben überprüfen lassen.

Tabelle 1: Atmosphärische Kohlenstoffbilanz 1980-89
Einheit: GtC a^{-1} (Pg Kohlenstoff pro Jahr)

(1)	Emissionen aus Verbrennung von Gas, Kohle und Öl	5,5±0,5
(2)	Beobachtete atmosphärische Zunahme	3,2±0,2
(3)	CO_2-Aufnahme durch den Ozean	2,0±0,8
(4)	Nettobilanz der terrestrischen Biosphäre = (1)-((2)+(3))	0,3±1,0
(5)	Emissionen verursacht durch Landnutzungsänderungen (u.a. Brandrodungen in den Tropen)	1,6±1,0
(6)	CO_2-Aufnahme durch andere Prozesse (u.a. Nachwachsende Wälder, CO_2-Düngungseffekt, Stickstoffdüngung, Klimavariabilität) = (4) + (5)	1,9±1,4

Tabelle 1 stellt die globale Bilanz des atmosphärischen CO_2 für den Zeitraum 1980-1989 dar, wie sie im letzten Bericht des „Intergovernmental Panel of Climate Change“ (IPCC) ermittelt wurde. Entsprechend standen den Emissionen aus dem Verbrauch von fossilen Brennstoffen (5,5 GtC a^{-1}; 1 GtC = 10^{15}g C oder 1 Pg C) eine Zunahme in der Atmosphäre von 3,2 GtC a^{-1} und eine Aufnahme durch den Ozean von ca. 2 GtC a^{-1} gegenüber. Damit ergibt sich eine Nettoaufnahme der terrestrischen Biosphäre von 0,3 GtC a^{-1}. Berücksichtigt man jedoch zudem die Emissionen aus Änderungen der Landnutzung (1,6 GtC a^{-1}), die aus Statistiken der Landwirtschaftsflächen und Annahmen über Kohlenstoffgehalt in Vegetation und Böden von natürlichen und landwirtschaftlich genutzten Flächen abgeschätzt werden können, dann sind weitere Senkenprozesse mit einem Beitrag von insgesamt 1,9 GtC a^{-1} zu suchen (sogenannte „unbekannte Senke“ od. „missing sink“), um die Bilanz der terrestrischen Biosphäre zu schließen. Kontrovers diskutiert werden insbesondere die „Düngung“ der Vegetation durch die Zunahme des atmosphärischen CO_2 oder durch anthropogenen Stickstoffeintrag, aber auch durch in der Vergangenheit stärker bewirtschaftete Wälder, welche heute nachwachsen und damit zusätzlichen Kohlenstoff binden können. Es ist aber auch möglich, daß natürliche Klimaschwankungen (z.B. Änderungen der Ozeanzirkulation, Dürreperioden, Erwärmung in mittleren und hohen Breiten der Nordhemisphäre und damit Verlängerung der Vegetationsperiode) Variationen der atmosphärischen CO_2 Konzentration verursachen können.

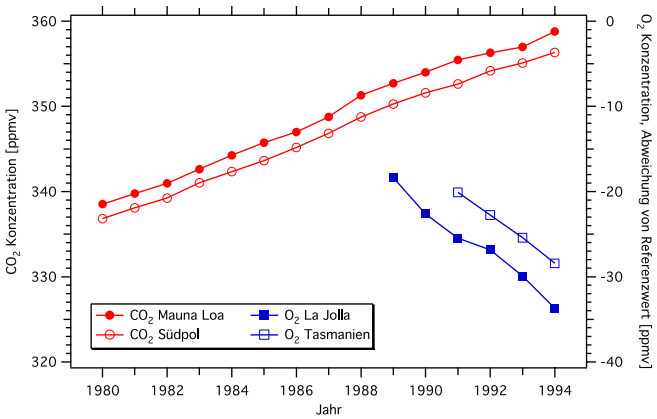

Abbildung 1: Jahreszeitlich gemittelter zeitlicher Verlauf der Konzentration von Kohlendioxid und Sauerstoff, beobachtet an Stationen der Nord- (Mauna Loa auf Hawaii, La Jolla in Kalifornien) und Südhemisphäre (Südpol, Tasmanien). Die Sauerstoffkonzentration ist angegeben als Abweichung von einem Referenzwert. Man erkennt das gegenläufige Verhalten von CO_2 und O_2: Zunahme bzw. Abnahme mit der Zeit und umgekehrte Nord-Süd Konzentrationsdifferenz.

Viele Untersuchungen der letzten Jahre zielten darauf ab, die in Tabelle 1 dargestellten Quellen und Senkenprozesse genauer zu lokalisieren und zu quantifizieren. Einer der wichtigsten Fortschritte in dieser Frage beruht dabei auf neuen,

hochpräzisen Messungen des atmosphärischen Sauerstoffgehalts. Bei der Verbrennung von Kohle, Öl und Gas oder von Biomasse wird Sauerstoff in relativ gut bekannten stöchiometrischen Verhältnissen zu CO_2 verbraucht und umgekehrt bei der Photosynthese der Pflanzen erzeugt. Das stöchiometrische Verhältnis bezeichnet hier die Anzal der Sauerstoffmoleküle die beim Umsatz von einem CO_2-Molekül freigesetzt oder absorbiert werden. Im Gegensatz zum CO_2 wird jährlich jedoch nur ein geringer Bruchteil des atmosphärischen Sauerstoffs mit dem im Ozean gelösten Sauerstoff ausgetauscht. Die atmosphärische Sauerstoffkonzentration kann daher im Jahresmittel nur durch Oxidationsprozesse im Kohlenstoffkreislauf wesentlich verändert werden. Aus der atmosphärischen Sauerstoffbilanz lässt sich damit direkt der Nettobeitrag der terrestrischen Biosphäre in der globalen CO_2-Bilanz ermitteln. Die Messungen von amerikanischen Kollegen (Abbildung 1) zeigen in der Tat, daß der Sauerstoffgehalt der Atmosphäre abnimmt, gegenläufig zur CO_2-Zunahme. Gemessen wird dabei nicht die absolute Sauerstoffkonzentration, sondern das Verhältnis von O_2 zu N_2 in Atmosphärenluft mit interferometrischen oder massenspektrometrischen Verfahren. Die Anforderungen an die Messgenauigkeit sind dabei extrem hoch: Die interessanten Schwankungen liegen im Bereich von weniger als einem ppmv, was bei einem atmosphärischen Sauerstoffgehalt von 21% eine Sensitivität der Messung von 10^{-6} erfordert. Die quantitative Analyse der vorliegenden Sauerstoffmessungen im Zeitraum 1989-1994 bestätigt die in Tabelle 1 aufgeführte Ozeanaufnahme von ca. 2 GtC a^{-1}.

Nord-Süd Gradient

Weitere wichtige Hinweise auf Quellen und Senken des CO_2 ergeben sich aus der räumlichen Struktur der atmosphärischen CO_2 Verteilung. Abbildung 1 zeigt, daß die beobachtete CO_2 Konzentration in der Nordhemisphäre im Jahresmittel etwas höher liegt als in der Südhemisphäre. Der entsprechende Konzentrationsgradient des Sauerstoffs ist dagegen genau umgekehrt, mit höheren Werten in der Südhemisphäre. Dieser meridionale Konzentrationsgradient wird primär erzeugt durch das CO_2 aus fossilen Brennstoffen, welches zu über 90% in den industrialisierten Ländern der Nordhemisphäre emittiert wird. Mit Hilfe eines am MPI für Meteorologie in Hamburg entwickelten, dreidimensionalen Modells des atmosphärischen Transportes, das auf den meteorologischen Daten des europäischen Zentrums für mittelfristige Wettervorhersagen (ECMWF) basiert, läßt sich dieser beobachtete Konzentrationsgradient untersuchen. Dabei zeigt sich der überraschende Befund, daß der beobachtete interhemisphärische Nord-Süd-Gradient von etwa 3 ppmv um etwa 2 ppmv kleiner ist, als in einer Modellsimulation, in welcher nur die fossilen CO_2-Emissionen vorgeschrieben werden. Da das Transportmodell die beobachteten interhemisphärischen Gradienten von anderen gasförmigen Spurenstoffen (FCKW, ^{85}Kr) realistisch berechnet, kann davon ausgegangen werden, daß der großräumige Transport im Modell richtig wiedergegeben wird. Es muß daher in der Nordhemisphäre offenbar neben der fossilen CO_2-Quelle auch CO_2-Senkenprozesse geben, welche den interhemisphärischen Konzentrationsgradienten reduzieren. Untersucht man gleichzeitig den Sauerstoffgradienten, so zeigt sich, jedenfalls für den Zeitraum der Sauerstoffmessungen 1989-1994, daß diese nordhemisphärische CO_2-Senke terrestrischen Ursprungs sein muß. Die Rechnung ergibt, daß eine terrestrische CO_2-Senke in mittleren Breiten der Nordhemisphäre von ca. 2 GtC a^{-1} die Simulation in Übereinstimmung mit den Beobachtungen bringen würde.

Dieser Befund ist inzwischen durch eine Vielzahl von Modellrechnungen verschiedener internationaler Arbeitsgruppen gestützt worden. Eine damit einhergehende fieberhafte Suche nach dem wesentlichen Senkenprozeß war bis heute jedoch wenig erfolgreich, und eine befriedigende Erklärung für die Nordhemisphärensenke steht noch aus.

Inverse Methoden

Im vorhergehenden Abschnitt wurde dargestellt, wie sich aus der großräumigen atmosphärischen CO_2 Konzentrationsverteilung Hinweise auf Lage und Stärke von Quellen- und Senken des CO_2 ableiten lassen. Die CO_2 Konzentration wird inzwischen nicht nur an wenigen Stationen gemessen; heute gibt es ein weltweites Beobachtungsnetzes mit über 100 Reinluftmeßstationen. Damit stellt sich die Frage, wie sich aus den Stationsmessungen die raumzeitliche Verteilung der CO_2 Quellen- und Senken rekonstruieren läßt. Eine genauere Analyse dieses inversen Problems stößt auf drei fundamentale Schwierigkeiten:

1. *Genauigkeit der CO_2 Konzentrationsmessungen*. Wie bereits gezeigt, beträgt der interhemisphärische Nord-Süd-Gradient im Jahresmittel nur wenige ppmv. Intra-hemisphärische, jahreszeitlich gemittelte

Konzentrationsgradienten liegen im Bereich von weniger als 1 ppmv. Diese kleinen Differenzen sind zu sehen relativ zu jahreszeitlichen Schwankungen von 6-20 ppmv in der Nordhemisphäre. Zudem erzeugt die stark heterogene Quellen- und Senkenverteilung an der Erdoberfläche je nach Luftmassengeschichte ein synoptisches Rauschen von mehreren ppmv, aus welchem das „Signal" zu ermitteln ist, d.h. diejenigen Konzentrationssignaturen, welche die großräumigen Quellen und Senken widerspiegeln. Dies erfordert enorme Anforderungen an die Stationsmessungen bezüglich Meßprotokoll, Genauigkeit und Vergleichbarkeit (Kalibration) mit Messungen anderer Stationen. Leider ist das heute vorliegende globale Meßnetz in dieser Hinsicht bei weitem nicht optimal.

2. *Atmosphärischer Transport.* Transportvorgänge in der Troposphäre vermitteln den Zusammenhang zwischen Quellen und Senken an der Erdoberfläche und den an den Stationen beobachteten Variationen der CO_2 Konzentration. Dieser Transport muß mit Hilfe von dreidimensionalen Simulationsmodellen berechnet werden. Zwar können die heute vorliegenden Modelle den großskaligen und insbesondere den interhemisphärischen Spurenstofftransport relativ realistisch nachbilden, im Bereich von starken kontinentalen Quellen sind jedoch die meteorologischen Transportvorgänge insbesondere in vertikaler Richtung sehr komplex und in dreidimensionalen, globalen Modellen nur in grober, parameterisierter Form darstellbar. Entsprechend zeigen die verschiedenen vorliegenden Modelle über den Kontinenten ein stark unterschiedliches Verhalten. Leider fehlen geeignete Methoden, um die Simulationsmodelle in dieser Hinsicht zu überprüfen.

3. *Unterbestimmte mathematische Natur des Inversionsproblems.* Auch bei genügend genauen Daten und realistischem Transportmodell, zeigt sich, daß die Ermittlung der raumzeitlichen Struktur der CO_2 Quellen- und Senken aus dem globalen Stationsnetz ein hochgradig unterbestimmtes inverse Problem darstellt. Mathematisch gesehen bedeutet dies, daß das Problem „regularisiert" werden muß, d.h. es müssen zusätzliche Anforderungen an die zu ermittelnde Lösung gestellt werden, d.h. Annahmen über die Struktur der Quellen und Senken auf Grund von bereits vorliegendem Wissen. So ist z.B. evident, daß Wüsten und polare Eiskappen keine CO_2-Quellen sind, während andererseits die Verteilung und der Jahresgang der Produktivität der Landvegetation einen wichtigen Hinweis auf Lage wie Intensität von terrestrischen CO_2-Senken darstellen. Die Kunst bei der Lösung des inversen Problems besteht zu einem guten Teil in der realistischen Bewertung und Spezifikation dieses *a priori* Wissens und dessen Unsicherheiten. In der Praxis können Ergebnisse von Simulationsmodellen des ozeanischen und terrestrischen Kohlenstoffkreislaufs als *a priori* Felder benutzt werden; oder aber vorliegende in situ Beobachtungen z.B. des CO_2 Austauschs zwischen Atmosphäre und Ozean. Eine weitere Möglichkeit bietet der Einbezug von Fernerkundungsdaten aus Satellitenmessungen etwa über die Primärproduktion der Pflanzendecke. Unter Verwendung eines Bayes'schen Ansatzes ergibt die Inversionsrechnung zusammen mit den atmosphärischen CO_2 Messungen dann als Lösung eine *a posteriori* Quellen- und Senkenverteilung.

Nach diesem Rezept zur Inversion des atmosphärischen CO_2 Transports sind in den letzten Jahren mehrere Versuche durchgeführt worden. Besonders spektakulär erwies sich das kurz vor der Konferenz von Buenos Aires im November 1998 mitgeteilte Ergebnis einer amerikanischen Arbeitsgruppe, nach welchem im Zeitraum 1988-1992 für den nordamerikanischen Kontinent (und insbesondere die U.S.A.) eine natürliche CO_2-Senke von 1,7 GtC a^{-1} festgestellt wurde, während die Bilanz für Eurasien keine signifikante Senke ergab. Eine Senke dieser Größenordnung würde die Emissionen der U.S.A. aus fossilen Brennstoffen übertreffen und damit bedeuten, daß die U.S.A. in der globalen Bilanz eine Nettosenke darstellen würden. Im Kontext weltweiter Anstrengungen zu weiteren Emissionsreduktionen hätte ein solcher Befund, falls durch weitere Untersuchungen bestätigt, weitreichende Konsequenzen.

Mit dem am MPI für Meteorologie in Hamburg entwickelten Modell wurden ähnliche Inversionsrechnungen durchgeführt. Als Besonderheit konnte durch Anwendung eines adjungierten Modells die räumliche Auflösung der durch die Inversion ermittelten Quellenfelder um zwei Größenordnungen gegenüber der oben erwähnten amerikanischen und anderen Studien gesteigert werden. Das Verfahren liefert dabei nicht nur die jahreszeitlich gemittelten CO_2-Quellen und -Senken auf einem globalen Modellgitter mit einer räumlichen Auflösung von 10° Länge und 8° Breite sondern dazu auch den Jahresgang in jeder Gitterzelle, dargestellt durch 12 monatliche Werte. Da mit diesem Verfahren die Unterbestimmtheit des Problems nicht kaschiert wird, läßt sich damit der Einfluß der *a priori* Information

auf die ermittelten CO_2-Quellenfelder gezielt bestimmen, im Gegensatz zu grobauflösenden Verfahren, in welchen die nicht explizit in der Rechnung erfaßten raumzeitlichen Strukturen der Quellenfelder starr vorgeschrieben werden müssen. In der Hamburger Rechnung wurden für die *a priori* Felder Daten über die räumliche Verteilung der Kohlenstoffemissionen aus fossilen Brennstoffen und Änderungen der Landnutzung verwendet, sowie die Ergebnisse aus dem Hamburger Kohlenstoffmodell des Ozeans und aus einem terrestrischen Modell basierend auf Fernerkundungsdaten von Satelliten.

Abbildung 2 zeigt die jahreszeitlich gemittelten CO_2-Quellenfelder für den Zeitraum 1990-1993. Einbezogen wurden für die Rechnung die Beobachtungen von insgesamt 54 Stationen aus dem globalen Messnetz. Dargestellt ist (a) die *a priori* Information über die CO_2-Quellen, welche in die Rechnung einfließt, (b) die aus der Inversionrechnung ermittelten *a posteriori* Quellenfelder und (c) die Differenz *a posteriori – a priori*. Diese Differenz zeigt insbesondere diejenigen Bereiche, in welchen die *a priori* Felder nicht konsistent mit den atmosphärischen Meßdaten sind und weist damit auf nicht hinreichend repräsentierte Prozesse in den Eingangsmodellen, bzw. in den statistischen Eingangsdaten hin.

Das Modell, welches die *a priori* Felder der Landbiosphäre erzeugte, simuliert zwar den Jahresgang der Vegetation aber keine terrestrische Quellen oder Senken im Jahresmittel. Durch die Inversion wird eine Senke in die terrestrische Biosphäre der Nordhemisphäre projiziert, welche sich direkt im Differenzenbild (Abbildung 2c) abzeichnet. Interessant ist ferner, daß die atmosphärischen Daten in hohen nördlichen Breiten auf dem Lande eine CO_2-Quelle induzieren. Dies könnte die in den letzten Jahren beobachtete Zunahme der arktischen Temperaturen widerspiegeln, welche zu einem verstärkten mikrobiellen Abbau des Tundrabodenkohlenstoffs führen könnten. Die atmosphärischen Daten verlangen aber auch Modifikationen der vom ozeanischen Kohlenstoffmodell erzeugten CO_2-Quellen und Senken, insbesondere im Bereich des Nordatlantik und im südlichen Polarmeer.

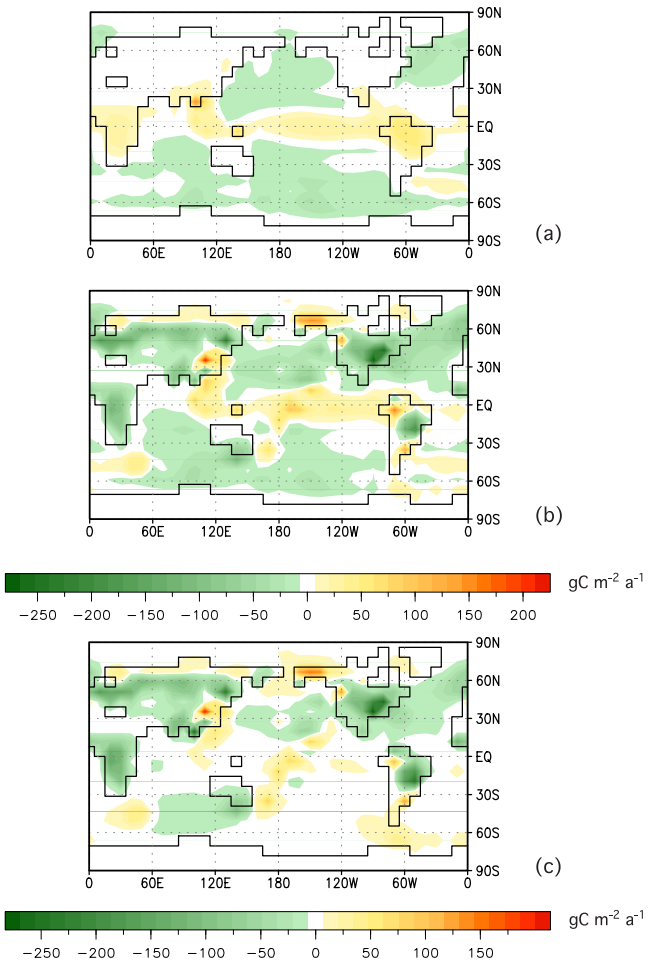

Abbildung 2: Jahreszeitlich gemittelte Verteilung der nicht-fossilen Kohlendioxidquellen an der Erdoberfläche, berechnet für den Zeitraum 1990-93. (a) *A priori* Felder, ermittelt aus Prozeßmodellen des Ozeans und der terrestrischen Biosphäre sowie Statistiken von Landnutzungsänderungen. (b) *a posteriori* Felder, ermittelt durch die Inversion des atmosphärischen Transportes aus atmosphärischen Stationsdaten. (c) Differenz *a posteriori – a priori*.

Die ermittelten Quellen- und Senken aufsummiert über Nordamerika bestätigen nicht den oben erwähnten Befund der amerikanischen Studie. Das Hamburger Modell ergibt für den Zeitraum 1990-1993 in Nordamerika (U.S.A und Kanada) eine Senke von nur 0,8±0,5 GtC a^{-1} und für Europa inklusive der GUS-Staaten 1,1±0,6 GtC a^{-1}. Die Gründe für die Diskrepanzen zwischen den beiden Ergebnissen der beiden Studien liegen in Unterschieden in den zugrunde liegenden atmosphärischen Konzentrationsdaten, der *a priori* Informationen aber auch in den verschiedenen atmosphärischen Transportmodellen. Der Einfluß

unterschiedlicher Transportmodelle auf die Inversionsergebnisse wird zur Zeit in einem internationalen Modellvergleich genauer untersucht. Jedenfalls ist anzumerken, daß belastbare Aussagen über die regionale Verteilung von CO_2-Senken und –Quellen innerhalb der Nordhemisphäre heute noch nicht mit ausreichender Genauigkeit erstellt werden können. Verbesserungen erfordern ein wesentlich dichteres atmosphärisches Meßnetz, das neben Bodenstationen auch auf Flugzeugmessungen und verbesserten Verfahren der Fernerkundung zur Bestimmung der vertikalen CO_2-Konzentrationsverteilung basiert. Zudem muß der atmosphärische Transport auf der regionalen Skala besser und höher aufgelöst werden, was auch höhere Anforderungen an die notwendige Rechnerleistung stellt. Im neu aufgelegten 5. Rahmenprogramm der Europäischen Union ist geplant, eine derartiges regionales Beobachtungssystem im Rahmen einer Pilotstudie zu entwickeln.

(*M. Heimann, Th. Kaminski*)