Flußmessungen des Kohlenstoffisotops ^{13}C über Pflanzenbeständen mit Hilfe der Eddy-Akkumulationsmethode

B. Wichura[1], N. Buchmann[2], A. Mangold[1], C. Rebmann[2], Th. Foken[1]

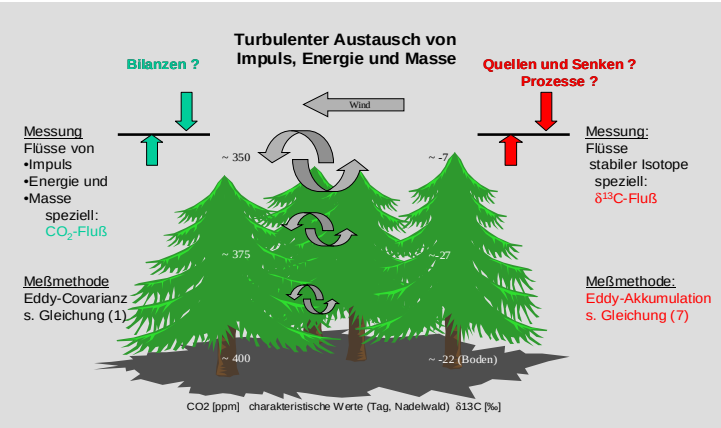
Universität Bayreuth

[1]Abteilung Mikrometeorologie

[2]Lehrstuhl für Pflanzenökologie

Problemstellung

Soll über einem Pflanzenbestand (z.B. Nadelwald) nicht nur der turbulente CO_2-Austausch bilanziert, sondern auch die Quellen des im Bestand fixierten oder aus dem Bestand ausgetragenen Kohlenstoffs identifiziert werden, dann bieten sich Untersuchungen zum Austausch des Kohlenstoffisotops ^{13}C an, da diese Flüsse eine unterschiedliche Anreicherung des ^{13}C Isotops aufweisen. Allerdings erlaubt nur die Kombination von CO_2-Flußmessungen (Eddy-Covarianzmethode) mit denen des stabilen Kohlenstoffisotops ^{13}C (Eddy-Akkumulationsmethode) sowohl die Quantifizierung des CO_2-Austauschs eines Pflanzenbestandes als auch die Bestimmung der Quellen und Senken des CO_2 im Bestand. Auch der Frage nach dem "CO_2-Recycling", dem Anteil der erneuten photosynthetischen Nutzung des im Bestand veratmeten CO_2, kann mit dieser kombinierten Messung nachgegangen werden. So stehen detaillierte Prozeßinformationen über den CO_2-Austausch des Ökosystems zur Verfügung, die im Rahmen der Global Change-Problematik dringend benötigt werden (s. z.B. Buchmann et al., 1997; Buchmann und Ehleringer, 1998).



Meßmethode

Eddy-Akkumulation

Der turbulente Fluß einer Beimengung c ist definiert mit

$$F = \overline{w'c'} \tag{1}$$

Er ergibt sich aus der Berechnung der Kovarianz von Fluktuationen w' und c' des Vertikalwindes w und der Beimengung c, die aus hochaufgelösten Zeitreihen (Abtastrate ≥ 10 Hz) unter Anwendung der Reynoldt'schen Zerlegung

$$w = \overline{w} + w' \tag{2}$$

bestimmt werden. Meßgeräte für Beimengungen mit einer hohen zeitlichen Auflösung sind häufig nicht verfügbar. Auch die Bestimmung von turbulenten Flüssen des Kohlenstoffisotops ^{13}C kann nicht auf direktem Weg erfolgen, da zur Analyse der Luftproben ein Massenspektrometer benötigt wird.

Mit der Eddy-Akkumulationsmethode (EA) werden turbulente Flüsse von Beimengungen auch ohne die Verfügbarkeit schneller Analysatoren gemessen. Der Vertikalwind, dessen zeitlich hoch aufgelöste Messung aufgrund verfügbarer Ultraschallanemometer möglich ist, wird in weitere Komponenten (auf- (+) und abwärtsgerichtete (-) Vertikalwindkomponente) zerlegt:

$$w' = w'^{+} + w'^{-}$$

$$\text{wobei} \quad w'^{+} = w'^{+} - \overline{w'^{+}} \quad \text{und} \quad w'^{-} = w'^{-} - \overline{w'^{-}} \tag{3}$$

Nach Einsetzen dieser Zerlegung in die Gleichung zur Flußbestimmung und verschiedenen Umformungen (Anwendung der Reynolds'schen Postulate) ergibt sich die Definitionsgleichung der Eddy-Akkumulationsmethode

$$F = \overline{w'^{+}c'} + \overline{w'^{-}c'} = (\overline{w'^{+}} + \overline{w'^{-}})\overline{c'} \tag{4}$$

Meist wird die Gleichung

$$F = \overline{w'^{+}c'} + \overline{w'^{-}c'} \tag{5}$$

zur Berechnung des Eddy-Akkumulationsflusses genutzt, in der die Einzelterme die Eddy-Akkumulationsnesevoire darstellen, die sich durch das bedingte Sammeln der Beimengung c in verschiedene Proben ergeben. Kritisch für die Aufspltung der Gesamtprobe in Teilproben sind Richtung und Betrag des Vertikalwindes. Die Proben können nach dem Meßzeitraum in (langsamen) Analysatoren vermessen werden. Zu beachten ist, daß bei diesem Meßansatz für das Produkt

$$(\overline{w^{+}} + \overline{w^{-}})\ \overline{c'} = 0 \quad \text{also} \quad \overline{w^{+}} + \overline{w^{-}} = 0 \tag{6}$$

angenommen wird - eine Bedingung, die unter realen Bedingungen nicht zwingend gültig ist (z.B. Auftreten kohärenter Strukturen über hohen Pflanzenbeständen).

Relaxed-Eddy-Akkumulation

Das bedingte Sammeln der Beimengung c bei der EA ist nicht nur von der Richtung des Vertikalwinds w sondern auch von dessen Betrag (Kovarianz) abhängig. Damit werden hohe Anforderungen an die Meßtechnik gestellt, weil nicht nur schnelle Ventile (Steuerung der Probensammlung, schnelle Reaktionszeiten notwendig) sondern auch eine schnelle Durchflußsteuerung zum Einsatz kommen müssen.

Die Relaxed-Eddy-Akkumulationsmethode (REA) ist der Versuch, die technischen Probleme der Eddy-Akkumulationsmethode zu überwinden. Hier erfolgt die Probenahme bei konstantem Durchfluß, d.h. das gesammelte Probevolumen ist nicht mehr abhängig vom Vertikalwindbetrag. Die Probenahme wird nur mit einem Ventilsystem in Abhängkeit von w' und w gesteuert und ist damit meßtechnisch vergleichsweise einfach. Der Fluß F wird berechnet mit

$$\overline{w'c'} = b\sigma_w\left(\overline{c^{+}} - \overline{c^{-}}\right) = b\sigma_w \Delta c \tag{7}$$

Δc ergibt sich aus der Differenz der in Abhängigkeit von der Vertikalwindrichtung gesammelten Proben (c^{+} und c^{-}). σ_w bezeichnet die Standardabweichung des Vertikalwinds. Der Linearitätskoeffizient b(ζ) ist abhängig von der Stabilität ζ=z/L (L Monin-Obuchov-Länge). Die Bestimmung von b(ζ) erfolgt aus REA-Simulationen mit vergleichbaren, zeitlich hoch aufgelösten Zeitreihen von w und c (z.B. Businger and Oncley, 1990) durch den Vergleich der Ergebnisse mit Eddy-Kovarianz Messungen. b(ζ) kann, unter der Annahme ähnlicher Austauscheigenschaften skalarer Größen (z.B. Temperatur T, Feuchte q, Beimengung c. Ähnlichkeitsbedingung ist die Gleichheit der Beiträge der Korelationskoeffizienten r), ebenfalls berechnet werden mit:

$$b(\zeta) = \frac{\overline{w'T'}}{\sigma_w \overline{\Delta T}} \quad \text{bzw.} \quad b(\zeta) = \frac{\overline{w'q'}}{\sigma_w \overline{\Delta q}}$$

$$\text{bei Gültigkeit:} \quad \left|r_{wT}\right| = \left|r_{wq}\right| = \left|r_{wc}\right| \tag{8}$$

Für b(ζ) gilt b(-0.5 ≤ ζ ≤ 0.5) = const. = 0.6 (s. z.B. Businger and Delany, 1990; Businger and Oncley, 1990; Gao, 1995).

Aufgrund der häufig geringen natürlichen Konzentrationsdifferenzen von Beimengungen c wird versucht, die Konzentrationsdifferenz Δc bei den Messungen zu erhöhen. Ziel ist es, die Nachweisgrenzen chemischer Analysatoren zu überschreiten. Aus diesem Grund werden oft Schwellwerte abweichend von w=0 angewendet. In diesen Fällen werden Proben dann genommen, wenn der Betrag des Vertikalwinds

1. einen fixierten Schwellwert w_0
- updrafts $w > w_0$ (sammeln der Probe für c^{+}),
- downdrafts $w < w_0$ (sammeln der Probe für c^{-}) oder

einen variablen Schwellwert w_{var}.

- updrafts $w > w_{var}$ (sammeln der Probe für c^{+}),
- downdrafts $w < w_{var}$ (sammeln der Probe für c^{-})

überschreitet (s.a. Businger and Oncley, 1990). Der Linearitätskoeffizient b(ζ) ändert sich bei Anwendung eines Schwellwertes w_0:

$$b(\zeta) = b_0 e^{-0.75\frac{w_0}{\sigma_w}}$$

$$\text{mit} \quad b_0 = b(w_0 = 0, -0.5 \le \zeta \le 0.5) = 0.6 \tag{9}$$

Mit der Einführung des empirischen Parameters b(ζ) erfolgte ein Übergang von einer direkten zu einer indirekten Methode. Die Bestimmung von b(ζ) erfordert zusätzliche Untersuchungen (z.B. zum Einfluß der Unterlage auf die Messungen, s.a. Foken et al., 1999). Jedoch kann damit das Meßsystem wesentlich vereinfacht werden (keine aufwendige Durchflußsteuerung).

Hyperbolic-Relaxed-Eddy-Akkumulation

Die Hyperbolic-Relaxed-Eddy-Accumulationsmethode (HREA) stellt eine Weiterentwicklung der REA dar. Sie ist kein neuer methodischer Ansatz im eigentlichen Sinne. Vielmehr wird hier die Idee weitergeführt, daß Schwellwerte abweichend von w=0 eingesetzt werden, um die Konzentrationsdifferenzen Δc bei den Messungen zu erhöhen. Abweichend von den auf w_0 und w_{var} bezogenen Schwellwerten wird bei der HREA ein Schwellwert H eingeführt, der erstmals bei der hyperbolische „Lochz"analyse angewendet wurde. Die hyperbolische „Lochz"analyse geht zurück auf eine Arbeit von Shaw (1985), der mit Hilfe einer Quadrantenanalyse für Flüsse zeigte, daß die turbulente Austausch über Waldbeständen sich über vergleichsweise wenige signifikante Austauscheingnisse manifestiert. Damit tragen Austauscheingnisse innerhalb eines durch Hyperbeln definierten „Lochs" H wenig zum Gesamtfluß bei und können vernachlässigt werden. Flüsse, die außerhalb des „Lochs" liegen, liefern hingegen die wesentlichen Beiträge zum Gesamtfluß. In der Abbildung 1 werden diese Aussagen mit einem Beispiel belegt. Deutlich ist zu sehen, daß es eine Häufung der Austauscheingnisse mit hoher Intensität in den Quadranten 2 und 3 gibt (aufwärts gerichteter Transport CO_2-armer Luft bzw. abwärts gerichteter Transport CO_2-reicher Luft), während in den Quadranten 1 und 4 kaum Austauscheingnisse stattfinden. In Abhängigkeit von w, w', c_s und c' werden nach Bowling et al. (1998) Schwellwerte H definiert:

$$\left|\frac{\overline{w'}}{\sigma_w}\frac{\overline{c'}}{\sigma_c}\right| > H \text{ bei } w > 0 \text{ für updrafts}$$

$$\left|\frac{\overline{w'}}{\sigma_w}\frac{\overline{c'}}{\sigma_c}\right| > H \text{ bei } w < 0 \text{ für downdrafts} \tag{10}$$

In der Abbildung 1 sind die Hyperbeln für H=1 eingetragen. Mit der Anwendung der HREA war es Bowling et al. (1998) erstmals möglich, die Konzentrationsdifferenzen für ^{13}C Messungen so zu gestalten, daß theoretisch ein ^{13}C-Fluß mit Hilfe der HREA bestimmt werden kann.

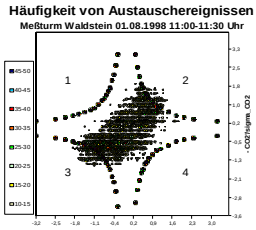


Abbildung 1: Beispiel für die Häufigkeit von Austauscheingnissen unterschiedlicher Intensität über einem Waldbestand Meßstandort Weidenbrunnen (Waldstein, Fichtelgebirge), Meßhöhe 32m, Bestandeshöhe 18m Eingetragen sind weiterhin die Hyperbeln H=1 der hyperbolischen Lochanalyse (s. Gleichung 10)

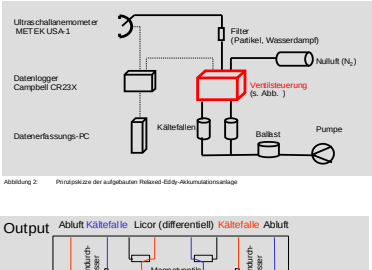


Abbildung 2: Prinzipskizze der aufgebauten Relaxed-Eddy-Akkumulationsanlage

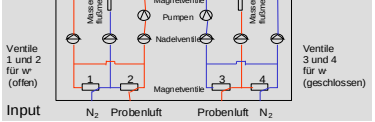


Abbildung 3: Prinzipskizze der Schalt- und Ventilbox der Relaxed-Eddy-Akkumulationsanlage, Es ist ein Beispiel für den Durchfluß von Null- und Probengas für den Fall dargestellt, daß in das Probenreservoir c' gesammelt wird (Schwellwert für H wird überschritten und w<0, s. Gleichung 10)

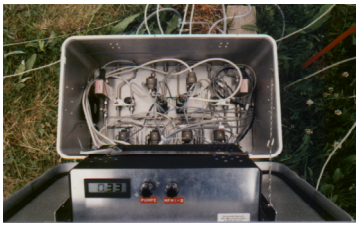


Abbildung 4: Foto der Schalt- und Ventilbox der Relaxed-Eddy-Akkumulationsanlage (Draufsicht)

Messung von Flüssen des Kohlenstoffisotops ^{13}C

Mit einem Massenspektrometer werden die mit Hilfe der Relaxed-Eddy-Akkumulationsmethode gesammelten Luftproben analysiert. Das Verhältnis der stabilen Isotope $^{13}C/^{12}C$ ist das Ergebnis der Analysen. Häufig wird als Ausdruck für $^{13}C/^{12}C$ die δ-Notation verwendet

$$\delta^{13}C = \left(\frac{R_{sample}}{R_{standard}} - 1\right)1000 \tag{11}$$

in der R das Verhältnis von ^{13}C zu ^{12}C darstellt. $\delta^{13}C$ wird in ‰ angegeben.

Um aus den Ergebnissen der massenspektroskopischen Analyse der Proben einen Fluß von $\delta^{13}C$ berechnen zu können, wird Gleichung (7) entsprechend modifiziert

$$F_{\delta^{13}C} = b(\zeta)\ \sigma_w\left(\delta^{13}C^{+}\ \overline{c^{+}} - \delta^{13}C^{-}\ \overline{c^{-}}\right) \tag{12}$$

Gleichung (12) ist gleichbedeutend damit, daß es neben der Probenahme für die $\delta^{13}C$-Analyse notwendig ist, entsprechende Proben für c^{+} und c^{-} verfügbar zu haben (die Probe am Massenspektrometer ist nicht wiederholt nutzbar), um einen Fluß für $\delta^{13}C$ zu berechnen.

Meßtechnik

Die Prinzipskizze der für die Flußmessungen des Kohlenstoffisotops ^{13}C verwendeten Relaxed-Eddy-Akkumulationsanlage ist in der Abbildung 2 dargestellt. Die wesentlichen Einzelkomponenten der Anlage sind:

- Das Ultraschallanemometer METEK USA-1, mit dessen Hilfe die Windkomponenten und die akustische Temperatur gemessen werden.
- Im Datenlogger Campbell CR23X werden die Meßwerte der Vertikalwindkomponente genutzt um zu entscheiden, in welches Sammelreservoir die Probenahme erfolgt.
- Der Datenlogger Campbell CR23X gibt die gemessenen Daten an den Datenerfassungs-PC weiter (limitierter Speicherplatz im Datenlogger), auf dem sie zur Sicherung und für anschließende Auswertungen zur Verfügung stehen.
- Ein entsprechendes Steuersignal wird vom Datenlogger an die Ventilsteuerung ausgegeben, in der die Ventile der einzelnen Sammelreservoirs angesteuert und geschaltet werden (s.a. Erläuterungen zu Abbildung 3).
- Die Sammelreservoire sind Kältefallen, in denen das CO_2 der Luftprobe ausgefroren wird. Die Kältefallen werden bei der Probenahme durch flüssigen Stickstoff gekühlt, so daß das CO_2 der Probenluft in den Kältefallen sublimiert. Die Luftprobe wird durch eine Edelstahlröhrkonstruktion gesaugt, die aus zwei Windungen (ähnlich einem "doppelten" Tauchsieder) besteht. Die untere Windung wird mit flüssigem Stickstoff gekühlt. Da das CO_2 der Probeluft vollständig ausgefroren werden soll, wird die Probe in verschiedenen Windungen immer wieder erwärmt und erneut abgekühlt (obere Windung für Erwärmung). Nach dem Ende der Messung wird die Kältefalle verschlossen (hochdichte Membranventile) und die Proben mit Hilfe in einer Umfülleinrichtung in Glasröhrchen abgefüllt, in denen sie bis zur Analyse am Massenspektrometer gelagert werden.
- Der Wasserdampf der Probenluft wird vor den Kältefallen mit Hilfe von Magnesiumperchlorat weitgehend entfernt, um das „Zufrieren" der Fallen zu verhindern. Außerdem werden Partikel >1 µm mit einem entsprechenden Filter aus der Probe entfernt.
- Mit Hilfe einer Pumpe werden Null- und Probenluft durch das System gepumpt. Vor der Pumpe ist ein Gasballast installiert, mit dessen Hilfe Druckschwankungen aufgrund kurzzeitiger Veränderungen der Pumpenleistung ausgeglichen werden.

In der Abbildung 3 ist der Aufbau der Schalt- und Ventilbox dargestellt. Je nach eingesetztem Algorithmus der Eddy-Akkumulationsmethode werden die Ventile bei Überschreiten der Schwellwerte auf Durchgang Probe-Kältefalle (Sammelreservoir) oder Nullluft-Kältefalle (Sammelreservoir) geschaltet. Die Ventilsteuerung erfolgt Schaltimpulse vom Datenlogger und setzt sie auf die Ventile 1 bis 4 um, so daß Luftprobe oder Nullluft zu den verschiedenen Sammelreservoirs geleitet werden. Die Nutzung von Nullluft (N_2) in einer „Bypass"-Linie für jedes der beiden Sammelreservoire erfolgt, um die Druckschwankungen im System beim Umschalten der Ventile so gering wie möglich zu halten. Damit soll eine hohe Qualität der Probenahme gewährleistet werden (keine „Verschmutzung" der Probe aufgrund von Druckschwankungen im System). In der Abbildung 3 ist ein Beispiel für den Durchfluß von Null- und Probengas für den Fall dargestellt, daß in das Probereservoir c' gesammelt wird (z.B. Schwellwert für H wird überschritten und w<0, s. Gleichung 10). Eine sehr genaue Einstellung der Durchflußraten im System ist notwendig (ansonsten Wichtung von Meßwerten!). Aus diesem Grund sind in allen Leitungen Nadelventile eingebaut, mit denen eine sehr feine Dosierung der Durchflußraten erfolgen kann. Die Durchflußmessung des Luftstromes in den Probenahmeleitungen (verbunden mit den Kältefallen) erfolgt mit Hilfe von Massendurchflußmessern, deren Daten direkt vom Datenlogger aufgezeichnet werden. Aus den Abluft- („bypass") Leitungen wird mit Hilfe kleiner Pumpen ein Teil der nicht verwendeten Luft zu einem Infrarot-Gasanalysator (LICOR 6262) abgezweigt. Das aktuelle Mischungsverhältnis der Probe wird bestimmt, so daß gleichzeitig eine Eddy-Akkumulationsmessung für die Flüsse von CO_2 und $\delta^{13}C$ realisiert werden kann.

Erste Messungen mit dem vorgestellten Meßsystem wurden im August 1999 durchgeführt. Die Proben werden derzeit analysiert und die Messungen werden zur Zeit ausgewertet.

Literatur

Bowling, D.R., Delany, A.C., Turnipseed, A.A., Baldocchi, D.D. and Monson, R.K., 1999. Modification of the relaxed eddy accumulation technique to maximize measured scalar mixing ratio differences in updrafts and downdrafts. Journal of Geophysical Research, 104, D8, 9121-9133.

Buchmann, N. and Ehleringer, J.R., 1998. CO_2 concentration profiles, and carbon and oxygen isotopes in C_3 and C_4 crop canopies. Agricultural and Forest Meteorology, 89(1): 45-58.

Buchmann, N., Guehl, J.-M., Barigah, T.S. and Ehleringer, J.R., 1997. Interseasonal comparison of CO_2 concentrations, isotopic composition, and carbon dynamics in an Amazonian rainforest (French Guiana). Oecologia, 110: 120-131.

Businger, J.A. and Delany, A.C., 1990. Chemical Sensor Resolution Required for Measuring Surface Fluxes by Three Common Micrometeorological Techniques. Journal of Atmospheric Chemistry, 10: 399-410.

Businger, J.A. and Oncley, S.P., 1990. Flux Measurement with Conditional Sampling Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 7: 349-352.

DeBruin, A.H.R., Brink, N.J. and Kroon, L.J.M., 1991. Fluxes in the surface layer under advective conditions. In: T.J. Schmugge, André, J. C. (Editor), Workshop on Land Surface Evaporation, Measurement and Parametrization. Springer, New York, pp. 157-169.

Delany, A.C., Oncley, S.P., Businger, J.A. and Sievering, E., 1991. Adapting the conditional sampling concept for a range of different chemical species, Seventh symposium on meteorological observations and instruments. American Meteorological Society, New Orleans, La., pp. 22-25.

Foken, T., Mangold, A., Hertels, M., Wichura, B. and Rebmann, C., 1999. Characterization of the heterogeneity of the terrain by normalized turbulence characteristics. In: AMS (Editor), 13th Symposium on Boundary Layers and Turbulence. AMS, Dallas, pp. 26-27.

Gao, W., 1995. The vertical change of coefficient b, used in the relaxed eddy accumulation method for flux measurement above and within a forest canopy. Atmospheric Environment, 29(17): 2339-2347.

Shaw, R.H., 1985. On diffusive fluxes in forest canopies. In: B.A. Hutchinson and B.B. Hicks (Editors), The Forest-Atmosphere Interaction. Reidel Publishing Company, pp. 407-419.

Danksagung

Die Arbeiten werden durch das BMBF gefördert (BITOK-Projekt A7).

Die Autoren danken Dave Bowling (University of Colorado) und Tony Delany (NCAR) für die fruchtbaren Diskussionen und wertvollen Hinweise zum Aufbau der Relaxed-Eddy-Akkumulationsanlage.

Die Autoren danken Jörg Gerchau (BITOK) für die Unterstützung beim Aufbau der Relaxed-Eddy-Akkumulationsanlage und bei den Messungen.

Anschriften der Autoren

[1] Universität Bayreuth, Abteilung Mikrometeorologie, Universitätsstraße 30, 95447 Bayreuth
e-mail: bodo.wichura@uni-bayreuth.de
[2] jetzt: Max-Planck-Institut für Biogeochemie, Tatzendpromenade 1a, 07701 Jena
e-mail: buchmann@bgc-jena.mpg.de