

CO₂- UND ¹³C-ISOTOPENFLÜSSE FÜR DIE UNTERSUCHUNG DER DYNAMIK DES CO₂ AUSTAUSCHES ZWISCHEN ÖKOSYSTEM UND ATMOSPHERE

J. RUPPERT¹, C. THOMAS¹, T. FOKEN¹

¹*Abteilung Mikrometeorologie, Universität Bayreuth, Deutschland*

1 EINLEITUNG

Über einem Nadelwald im Fichtelgebirge (Messfläche Waldstein/Weidenbrunnen, FLUXNET GE1 des BITÖK) wurden während des Experimentes WALDATEM-2003 (Wavelet Detection and Atmospheric Turbulent Exchange Measurements) zusätzlich zu der Messung der CO₂-Flüsse mit der Eddy Covariance Methode die Flüsse des stabile Isotops ¹³C mit einem Relaxed Eddy Accumulation (REA) System bestimmt.

Die gemeinsame Auswertung der CO₂-Flüsse mit den aus der REA ermittelten ¹³C-Isotopenflüssen erlaubt die Aufstellung unterschiedlicher Massenbilanzen für gesamt CO₂- und ¹³C-Isotopenaustausch, die unter einfachen Bedingungen (Grasland) eine Trennung von Assimilation und Respiration über die unterschiedliche Isotopensignatur dieser Teilflüsse erlaubt (Bowling et al. 2003). Die Isotopensignatur der Assimilation kann über die Isotopenverhältnisse der Kohlehydrate in Biomasseproben bestimmt werden. Die Isotopensignatur der Respiration kann aus Keeling-Plots von nächtlichen CO₂- und ¹³C-Profilmessungen ermittelt werden.

In Waldökosystemen kann die Isotopensignatur der Assimilation nur indirekt abgeleitet werden. ¹³C-Profilmessungen und ¹³C-Flüsse liefern aber wertvolle Informationen für die genauere Untersuchung der Dynamik der Austauschprozesse in und über dem Bestand. Die unterschiedlichen Isotopensignaturen der Assimilation und Respiration können insbesondere die Kopplungszustände von Stammraum und Kronenraum mit der Atmosphäre aufdecken. Während des WALDATEM-2003 Experimentes im Sommer 2003 zeichnete sich in den CO₂-Profilmessungen eine täglich wechselnde und, vor allem in den Morgenstunden, sehr spontane Dynamik ab.

2 METHODEN

In dem verwendeten Whole-air Relaxed Eddy Accumulation (REA) System werden die Proben nicht wie üblich in einer chemischen oder Kältefalle akkumuliert (Wichura et al. 2004), sondern unverändert gesammelt und in Glasflaschen abgefüllt, so daß sie anschließend mit hoher Präzision an einem Massenspektrometer im Labor analysiert werden konnten. Diese Methode erlaubt es, die Konzentrationsunterschiede zwischen auf- und abwärts transportierter Luft (Updrafts ↑ und Downdrafts ↓) verschiedener nicht reaktiver Spurengase aus ein und derselben Probenahme gleichzeitig und mit hoher Genauigkeit zu bestimmen (CO₂, ¹³C(CO₂), ¹⁸O(CO₂), CH₄, N₂O).

Parallele CO₂ Flussmessungen mit einem Eddy Covariance System, erlaubten es, den *b*-Faktor für die Bestimmung der Spurengasflüsse nach der REA Methode (Businger und Oncley 1990) für jeden Probenahmezeitpunkt so zu bestimmen (Gleichung 2), dass sich etwaige Einflüsse kleiner Ungenauigkeiten im Probenahmeprozess, z.B. bei der Ventilsteuerung, in der Flussberechnung (Gleichung 1) weitestgehend aufheben ($F_{CO_2} = CO_2$ Fluss, $F_{\delta^{13}C} = ^{13}C$ Isoflux, $\sigma_w =$ Standardabweichung der Vertikalwindfluktuationen, $\delta^{13}C =$ Isotopenverhältnis in δ -Notation, $\rho =$ molare Dichte der trockenen Luft). Die bei dieser Parametrisierung in der REA Methode angenommene skalare Ähnlichkeit (Scalar Similarity) ist zwar ohne schnelle Detektionsverfahren (10 Hz) für den zu messenden Skalar (¹³C und ¹⁸O) nicht direkt überprüfbar, kann aber für gesamt CO₂ und seine stabilen Isotope ¹³C und ¹⁸O als besonders gut angenommen werden.

Gl. 1

$$F\delta_{13C} = b_{CO_2} \cdot \sigma_w (\delta^{13C} \uparrow - \delta^{13C} \downarrow)$$

$$b_{CO_2} = \frac{F_{CO_2}}{\sigma_w \rho(CO_2 \uparrow - CO_2 \downarrow)} \quad \text{Gl. 2}$$

3 ERGEBNISSE

3.1 Messgenauigkeit des REA Systems

Sowohl die im Whole-air REA System als Zwischenreservoir verwendeten Mylar® Ballons als auch das gesamte System zeigten nach einer Reinigung mit getrockneter Luft keine Anzeichen einer Kontamination der Luftproben. Die vorherige Überprüfung des REA Systems ergab als Präzision bei der ¹³C Isotopenbestimmung von Proben aus einem Drucklufttank eine Standardabweichung von 0.014 ‰ VPDB und war damit nur geringfügig höher, als die routinemäßig gefundene Messgenauigkeit für die verwendete Analyseverfahren des Isotopenlabors am Max-Planck-Institut für Biogeochemie in Jena (0.012 ‰ VPDB, Werner et al. 2001).

3.2 REA Luftprobennahme während WALDATEM-2003

Während des WALDATEM-2003 Experimentes über einem Fichtenbestand von 19 m Kronenhöhe wurden ein Eddy Covariance und das Isotopen Whole-air REA System auf 33 m Höhe über Grund und ein Spurengas- und Isotopenprofilssystem parallel betrieben. Einen Überblick über das Experimentdesign gibt der DACH-Beitrag Thomas et al. (2004). Wie erwartet ergaben die Messungen während des Tages in den Updrafts höhere und in den Downdrafts niedrigere ¹³C-Isotopenverhältnisse als in einer mit dem Isotopenprofilssystem gesammelten mittleren Probe von 33 m Höhe (Abb. 1). Hierin zeichnet sich die Anreicherung der ¹³C Isotope im Kronenraum durch die Isotopendiskriminierung während der CO₂ Assimilation ab. Die gute Übereinstimmung der absoluten Werte des ¹³C-Isotopenverhältnisses der beiden unterschiedlichen Messsysteme zeigt, dass beide Systeme auch im Feldeinsatz mit hoher Genauigkeit gearbeitet haben.

Unter Verwendung eines hyperbolischen Deadbands von $H=1.0$ (Hyperbolic REA) während der Luftprobennahme (Bowling et al. 1999) ergaben sich Differenzen der ¹³C-Isotopenverhältnisse in Updrafts und Downdrafts die meistens zwischen 0.07 und 0.14 ‰ PDB lagen. Dies entspricht einem Verhältnis von Signal und Rauschen von etwa 5 bis 10, was einen geschätzten Fehler von 10-20 % für die Bestimmung der Isotopenflüsse über dem Fichtenbestand ergibt.

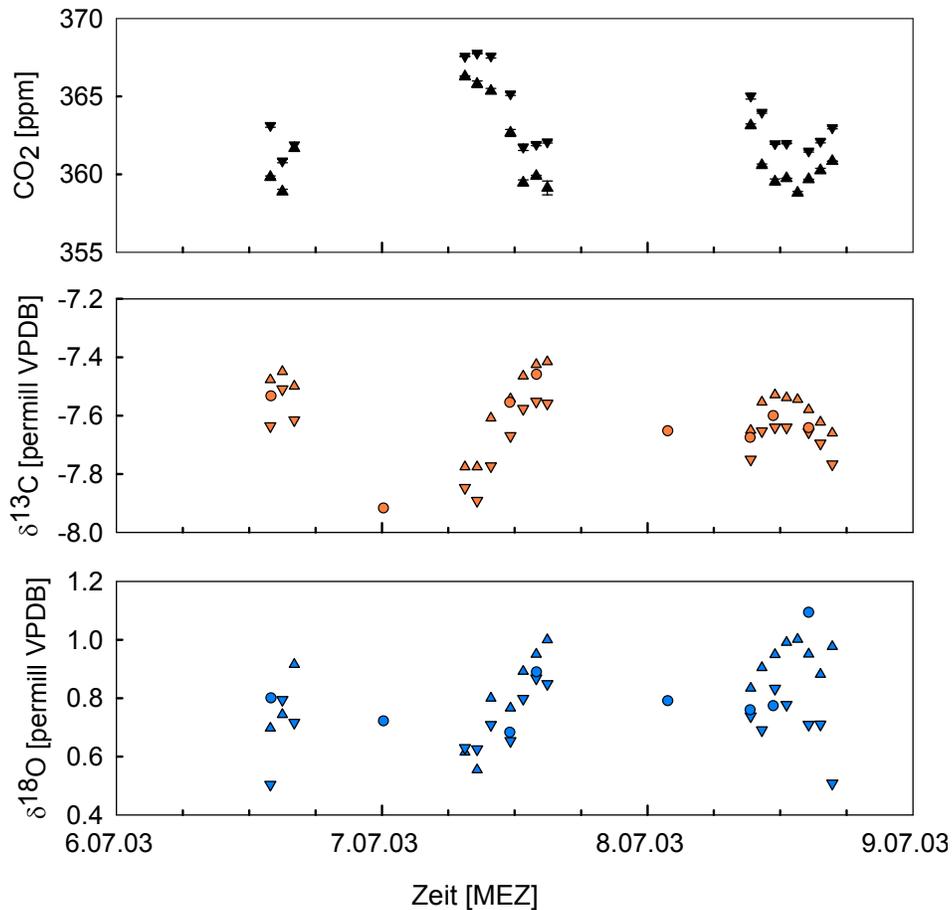


Abb. 1: Ergebnisse der REA Luftprobenahme unter Verwendung eines hyperbolischen Deadbands von $H=1.0$ während des WALDATEM-2003 Experimentes (CO_2 Mischungsverhältnisse, ^{13}C und ^{18}O Isotopenverhältnisse, ▲=REA-Updrafts, ▼= REA-Downdrafts, ●= Proben des Isotopen- und Spurengasprofilsystems von 33 m Höhe.)

3.3 Isotopenflüsse und Diskriminierung

Entsprechend den Ergebnissen aus Abb. 1 korrelieren während des Tages abwärts gerichtete (negative) netto CO_2 Flüsse (Eddy Covariance) mit aufwärts gerichteten (positiven) ^{13}C Flüssen (REA, Isoflux) (Abb. 2). Aus dem Verhältnis des ^{13}C -Isotopenflusses und des gesamt CO_2 -Flusses ergibt sich die Diskriminierung des Ökosystems. Dieses wurde für den Fichtenbestand an drei Tagen mit einem Mittelwert von -25.6 ‰ VPDB in δ -Notation bestimmt. Dawson et al. (2002) geben für C3 Pflanzen eine ^{13}C -Isotopendiskriminierung von -20 bis -35 ‰ (δ -Notation) an. Die aktuelle Isotopendiskriminierung ist u.a. von der Öffnung der Stomata und damit dem Wasserhaushalt der Pflanze und der Luftfeuchte abhängig. Größere Abweichungen der auf 33 Metern ermittelten Ökosystemdiskriminierung von einem Mittelwert können entstehen, wenn z.B. vormittags der Abbau von CO_2 -Pools in der Bestandesluft einen zeitlichen Versatz zwischen den Maxima des turbulenten CO_2 -Flusses und des durch Assimilation bedingten ^{13}C -Flusses hervorruft.

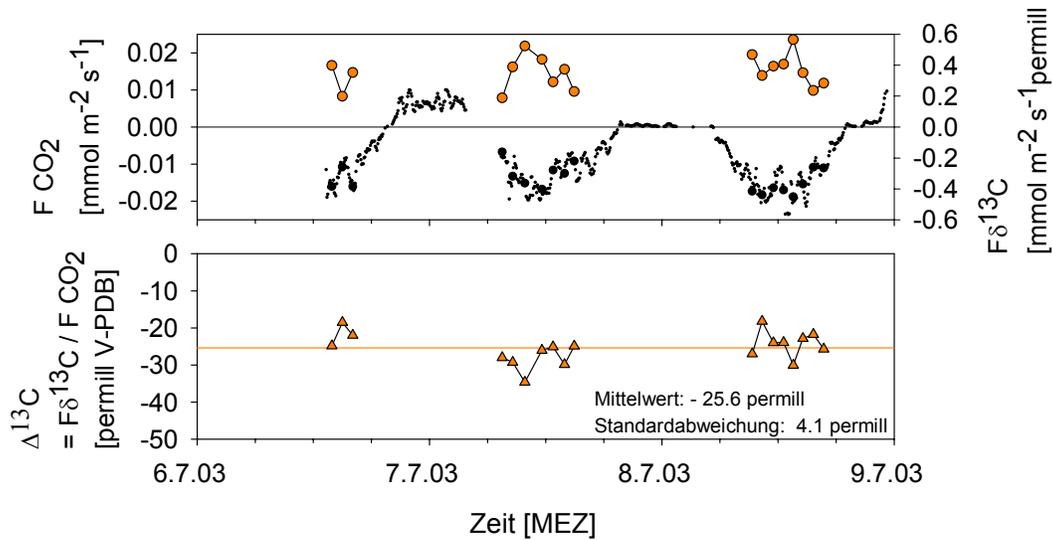


Abb. 2: CO₂-Flüsse (F_{CO_2} , ●, .) der Eddy Covariance Messungen und ¹³C-Isotopenflüsse ($F\delta_{13C}$, ●) der REA Messungen am Standort Waldstein/Weidenbrunnen GE1. Das Verhältnis der beiden Flüsse entspricht der aktuellen ¹³C-Isotopendiskriminierung des Fichtenbestandes ($\Delta^{13}C$, ▲).

3.4 Dynamik des CO₂-Austausches

Die komplexe Dynamik des CO₂-Austausches in dem Fichtenbestand zeigt sich in den Messungen des CO₂-Vertikalprofils. Eine Situation mit guter Kopplung der Bestandesluft an die Atmosphäre und nahe neutralen Stabilitätsbedingungen ($z/L \sim 0$, Abb. 3) zeigen sich in der Nacht vom 6.7.2003 auf den 7.7.2003. Die nächtliche Respiration des Ökosystems führt der Bestandesluft CO₂ zu. In den Flussmessungen (Abb. 2) sind bis in die frühen Morgenstunden des 7.7.2003 positive CO₂-Flüsse erkennbar. Die einsetzende Photosynthese zeigt sich um ca. 4:30 Uhr MEZ in stark abfallenden mittleren CO₂ Konzentrationen in dem Bestand (gestrichelte Linie, Abb. 4) und über dem Bestand (durchgezogene Linie).

Im Gegensatz dazu herrschen in der Nacht vom 7.7.2003 auf den 8.7.2003 stabile Bedingungen ($z/L > 0$), die zu einer Entkopplung der Bestandesluft von der Luft über dem Bestand führen und den nächtlichen CO₂-Austausch fast vollständig unterbinden ($F_{CO_2} = 0$, Abb.2). Die große Stabilität beruht auf einem extrem ausgeprägten Temperaturgradienten mit niedrigen Lufttemperaturen im Bestand (Abb.5). In den frühen Morgenstunden führt die beginnende Photosynthese zu einer Erniedrigung der CO₂-Konzentrationen im Bestand, ohne dass die Luft über dem Bestand beeinflusst wird (Abb. 4). Dabei wird der nachts aufgebaute CO₂-Pool in der Bestandesluft abgebaut. Erst um ca. 6 Uhr MEZ erwärmt sich die Bestandesluft, und die CO₂-Konzentrationen in und über dem Bestand gleichen sich durch einsetzenden turbulenten Austausch wieder aus.

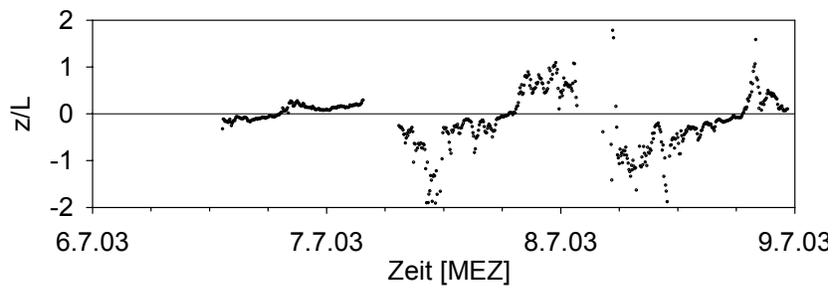


Abb. 3: Stabilitätsbedingungen (z/L , z = Messhöhe, L = Obukhov Länge) gemessen auf 33 m Höhe über Grund.

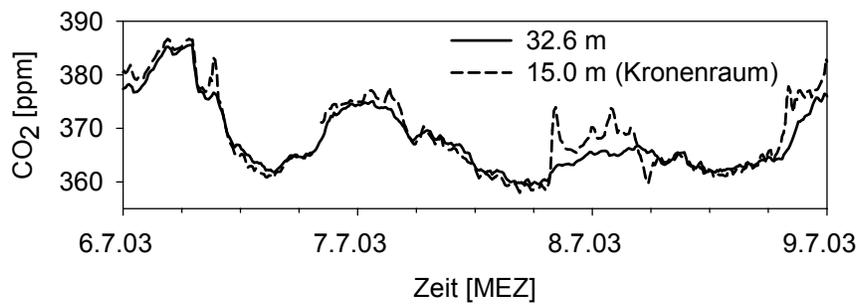


Abb. 4: CO₂ Mischungsverhältnisse im Kronenraum und über dem Bestand.

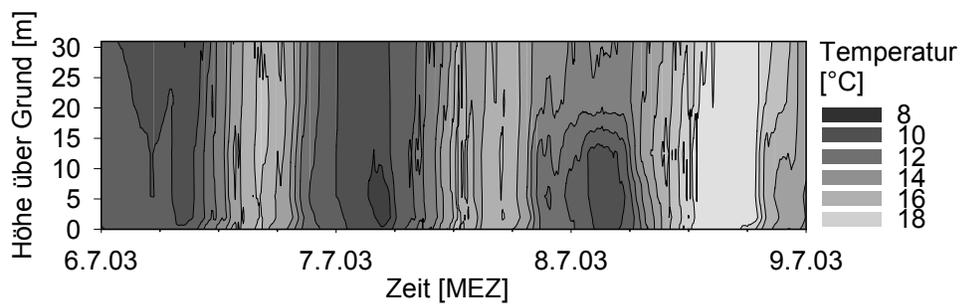


Abb. 5: Temperaturprofile im und über dem Bestand am Standort Waldstein/Weidenbrunnen mit einer Kronenhöhe von 19 m.

4 ZUSAMMENFASSUNG

Die Messung von ^{13}C -Isotopenflüssen mit einem Whole-Air REA System war mit einem geschätzten Fehler von 10-20% möglich. Aus dem Verhältnis von ^{13}C -Isotopenflüssen und gesamt CO_2 -Flüssen kann eine aktuelle Isotopendiskriminierung des Ökosystems bestimmt werden. Diese kann zusätzliche Informationen über die Aktivität des Ökosystems liefern, da die ^{13}C -Anreicherung in der Bestandesluft maßgeblich durch die Isotopendiskriminierung bei der CO_2 -Assimilation bestimmt wird.

Der untersuchte Fichtenbestand zeigt eine komplexe Dynamik des CO_2 -Austausches unter Beteiligung verschiedener CO_2 -Pools, die zu Verzögerungen der Signale von Ökosystemprozessen in den Flussmessungen über dem Bestand führen können.

DANKSAGUNGEN

Wir danken Willi A. Brand, Dave Bowling und Anthony C. Delany für die Beratung bei der Gestaltung des Whole-air REA systems, Johannes Olesch für die Unterstützung bei der technischen Realisierung des Systems, Teresa Bertolini für die Mitarbeit während der Feldexperimente und Michael Rothe und Armin Jordan für die umfangreiche Unterstützung bei der Analyse der Luftproben. Das Projekt wurde gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung, Vertrag PT BEO51-0339476 D.

LITERATUR

- Bowling, D. R., A. C. Delany, et al. 1999. Modification of the relaxed eddy accumulation technique to maximize measured scalar mixing ratio differences in updrafts and downdrafts. *Journal of Geophysical Research D: Atmospheres* 104(D)(8): 9121-9133.
- Bowling D.R., Pataki D.E., Ehleringer, J.R. (2003). Critical evaluation of micrometeorological methods for measuring ecosystem-atmosphere isotopic exchange of CO_2 . *Agricultural and Forest Meteorology*, 116, pp. 159-179.
- Businger, J.A. and Oncley, S.P. 1990. Flux Measurement with Conditional Sampling. *J. Atmosph. Oceanic Technol.*, 7, pp. 349-352.
- Dawson, T.E., Mambelli, S., Plamboeck, A.H., Templer, P.H. and Tu, K.P., 2002. Stable isotopes in plant ecology. *Annu. Rev. Ecol. Syst.*, 33: 507-559.
- Thomas, C., Ruppert, J., Lüers, J., Olesch, J., Bertolini, T., Mayer, J.C., Schröter, J., Delany, A.C. and Foken, T., 2004. Komplexes Wald-Grenzschicht Experiment WALDATEM-2003. Deutsch - Österreichisch - Schweizerische Meteorologen - Tagung (DACH). Karlsruhe, Germany. 7. - 10. Aug. 2004, (Poster, DACH-2004, Session 5).
- Werner, R.A., Rothe, M., Brand, W.A.. 2001. Extraction of CO_2 from air samples for isotopic analysis and limits to ultra high precision $\delta^{18}\text{O}$ determination and CO_2 gas. *Rapid Comm. Massspectrom.*, 15, pp. 2152-2167.
- Wichura, B., Ruppert, J., Delany, A.C., Buchmann, N. and Foken, T., 2004. Structure of carbon dioxide exchange processes above a spruce forest. In: E. Matzner (Editor). *Ecological Studies. Biogeochemistry of forested catchments in a changing environment: a case study in NE-Bavaria, Germany*. Springer, Heidelberg, 172. pp. 161-176.