

Dynamik der Austauschprozesse von CO₂ und ²²²Radon zwischen Waldboden, Waldbestand und Atmosphäre

Profilmessung der Kohlendioxidkonzentration im Waldbestand und Messung der Radon-Isotop-Konzentration in Bodennähe als Tracer am Standort Waldstein, WALDATEM 2006

Johannes Lüers¹, Johanna Smaczny¹, Antoine Kies² und Jörg Bareiss³

¹Universität Bayreuth, Abteilung Mikrometeorologie

²Université du Luxembourg, Laboratoire Physique des Radiations

³Universität Trier, Fach Umweltmeteorologie

Zusammenfassung

Das Einrichten einer Dauermessstation zur Messung von Vertikalprofilen der Kohlendioxid- und ²²²Radon-Konzentration an der Station Waldstein Weidenbrunnen im oberfränkischen Fichtelgebirge (50°09' Nord und 11°52' Ost, 775 m ü. NN) gehörte zum Ziel der Messkampagne WALDATEM 2006, die von Juni 2006 bis März 2007 stattgefunden hat. Die CO₂-Profilmessungen in einem 19 m hohen Fichtenbestand erfolgen am dortigen Turm in acht verschiedenen Messhöhen zwischen 3 cm und 33 m und dienen der Untersuchung von Assimilations- und Respirationprozessen sowie des Netto-Ökosystem-Austauschs (Net Ecosystem Exchange, NEE) von Kohlendioxid in einem Fichtenbestand. Zum Verständnis mikrometeorologischer Austauschprozesse (Entkopplung, Inversion und Counter Gradienten) werden neben Kohlendioxid auch ²²²Radon-Isotope als Tracer im Boden und in Bodennähe erfasst. Es werden erste Ergebnisse der kontinuierlichen Messungen beider Spurengase hinsichtlich saisonaler Variation der Austauschbedingungen zwischen Sommer- und Winterhalbjahr in einem Fichtenbestand einer höheren Mittelgebirgslage präsentiert.

Dynamics of exchange processes of CO₂ and ²²²Radon between forest floor, forest canopy and atmosphere

Abstract

The implementation of a long-term observation station to measure vertical profiles of the carbon dioxide and ²²²Radon concentration at the international FLUXNET site Waldstein Weidenbrunnen (Germany, 50°09' N, 11°52' E, 775 m a.s.l.) was part of the measurement campaign WALDATEM-2006 during June 2006 and March 2007. The new developed CO₂-profile-system attached to the 32 m tall main flux-tower is designed to measure at eight different heights above ground level (0.03 m up to 32 m) within and above a 19 m tall spruce forest simultaneously and to serve for the investigation of assimilation and respiration processes as well as the Net Ecosystem Exchange (NEE) of carbon dioxide in a tall canopy. For a better understanding of micrometeorological exchange processes (decoupling, inversion, counter gradients) ongoing extensive measurements of the ²²²Rn isotope as a tracer in the soil air and the near surface atmosphere in the sub-canopy layer are realized. First results are presented of the ongoing measurements of both trace gases regarding seasonal variation of exchange conditions between summer and winter half year in a European spruce forest of a mid altitude mountain area.

1. Theoretischer Hintergrund

Der granitische Untergrund des Fichtelgebirges begünstigt wegen seiner geologischen Beschaffenheit und Bodenporosität das Vorkommen erhöhter Radonkonzentrationen (²²²Rn). Die Nutzung von Radon als Tracergas bei der Untersuchung bodennaher Grenzschichten oder der Bestimmung des NEE fand bereits in Arbeiten über tropischen Regenwäldern (Brasilien) Anwendung (MARTENS, 2004). Die Zerfallsreihe des Urans im Gestein und der Bodenschicht

ist die einzige Radonquelle; der weitere radioaktive Zerfall (Halbwertszeit 3.825 Tage) die einzige Senke. Zusätzlich verhält sich Radon chemisch inert. Es bietet sich daher als ideales Tracergas bei der Untersuchung bodennaher mikrometeorologischer Austauschprozesse an. Die bodennahe Radonanreicherung unterliegt meteorologisch bedingten jahres- und tageszeitlichen Schwankungen. So behindert Bodenrost oder eine Eis- und Schneeauflage beispielsweise eine Emanation. Kurzzeitige Schwankungen können insbesondere während starker Niederschlagsereignisse auftreten. Dabei werden die Radon-Folgeprodukte (Polonium, Blei, Wismut) bei Regen ausgewaschen oder in Niederschlagstropfen inkorporiert. Zudem kann bei Starkregen die Bodenausgasung erheblich verhindert werden (KAMINSKI, 1999). Einen erheblichen Anteil an der Variation der CO₂- und Rn-Konzentration am Standort Waldstein wird durch typische atmosphärische Austauschbedingungen in einem hohen Pflanzenbestand (Fichtenforst) beeinflusst (REBMAN et al., 2004; WICHURA et al., 2004; THOMAS and FOKEN, 2005; THOMAS and FOKEN, 2007a und 2007b). Unter entkoppelten Bedingungen (stabile Schichtung) wird der vertikale Luftaustausch zwischen Pflanzenbestand und Atmosphäre verhindert, Kohlendioxid und Radon akkumuliert in Bodennähe. Bei labiler Schichtung (gekoppelter Zustand) kommt es durch Turbulenz zur ausreichenden Durchmischung bis zum Waldboden. Radonmessungen und abgeleitete Parametrisierungen wie sie z.B. von MARTENS (2004) anhand von Radon-Bodenausgasung (S) im Bezug zum Verhältnis von CO₂- und Rn-Profilen im Bestand vorgestellt wurden,

$$NEE_{Rn} = S \frac{\Delta(CO_2)}{\Delta(Rn)}$$

können bei der Bestimmung des Netto-Ökosystem-Austausches von Kohlendioxid als zusätzliche Gap-Filling-Strategie dienen, insbesondere dann, wenn Messungen des Kohlendioxidflusses mit Hilfe der Eddy-Kovarianz-Methode aufgrund fehlender atmosphärischer Turbulenz während ruhiger, windstiller Nächte zu einer Unterschätzung der Bilanzierung des NEE_{CO₂} führen (RUPPERT et al., 2006; LEE, 1998; MARTENS, 2004). Auch bei der Quantifizierung advektiver Prozesse im Bestand, die zur Misschätzung v. a. nächtlicher Flusses führen können (AUBINET, 2003), können - durch bodenbiologische Prozesse unbeeinflusste - Radonmessungen hilfreich sein.

2. Gerätetechnik und Methodik

Die Kohlendioxidprofilanlage WACO2P wurde von der Abteilung Mikrometeorologie (RUPPERT, 2005) für das Experiment WALDATEM 2003 (THOMAS et al., 2004) entworfen. Die Steuer-Software wurde in LABVIEW programmiert. Die Messung erfolgt kontinuierlich mit einer Probenahmefrequenz von 2 Hz (LiCor 820). Jede Messhöhe wird eine Minute lang gemessen. Abzüglich einer Spülzeit (Totzeit) von 14.5 Sekunden, ergibt sich pro geschaltetem Ventil ein Datenumfang von 88 Messwerten pro Minute. Durch eine Spülluftpumpe wird über acht einzelne Spülflaschen (2.5 Liter) kontinuierlich Luft im Kreislauf angesaugt und in spezieller an hohe Vegetation angepasste Reihenfolge durch eine elektronische Ventilsteuerung in den Messkreislauf inklusive einer Trocknungsspirale zum Gasanalysator (LiCor 820) geführt. Die Ventilschaltung wird dabei extern durch einen am PC angeschlossenen Mem-IO-Port gesteuert und von einer USV-Anlage vor Stromausfällen gesichert. Als Radon-Messsysteme wurde ein AlphaGuard (Genitron Instruments, Deutschland) in der Messhöhe 20 cm und zwei Radim3a (SMM, Tschechien), Messhöhen 50 cm und 170 cm, eingesetzt. Diese Geräte werden pumpengestützt im Durchflussbetrieb betrieben. Die Messluft wird aufgrund der Feuchtigkeitsanfälligkeit des Verfahrens vorgetrocknet. Die Messung der Radon-Isotop-Konzentration erfolgt bei allen Geräten alphaspektrometrisch. Zur Datenverarbeitung wurden im Vorfeld zwei Programmroutinen (Compaq Visual Fortran) entwickelt, die zum einen eine Messkanaltrennung und Verkettung der Messwerte zu jeweiligen Tagessätzen zulassen und zum anderen minutliche Mittelwerte

und Standardabweichungen berechnen. Für weitere statistische Ausarbeitungen (Tiefpassfilter, Autokorrelation, Regression) wurde auf bewerte ProgrammROUTINEN zurückgegriffen.

3. Erste Vergleiche CO₂- und Rn-Messungen

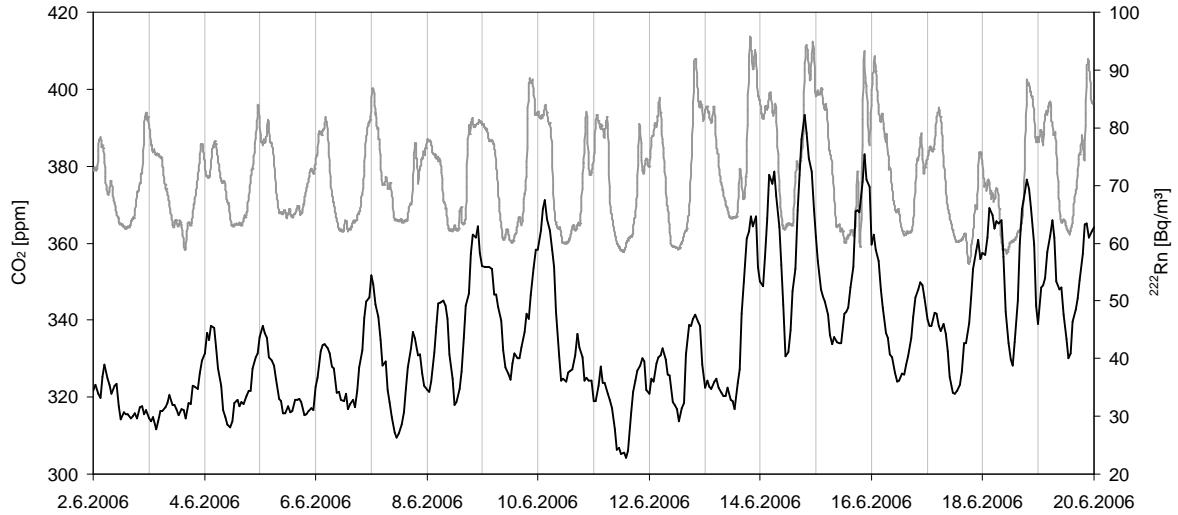


Abb. 1: ²²²Rn (0.20 m, schwarz) und CO₂ (0.25 m, grau) Konzentrationen, Juni 2006, Waldstein-Weidenbrunnen – ²²²Rn (0.20 m, black) and CO₂ (0.25 m, grey) concentrations, June 2006, Waldstein-Weidenbrunnen

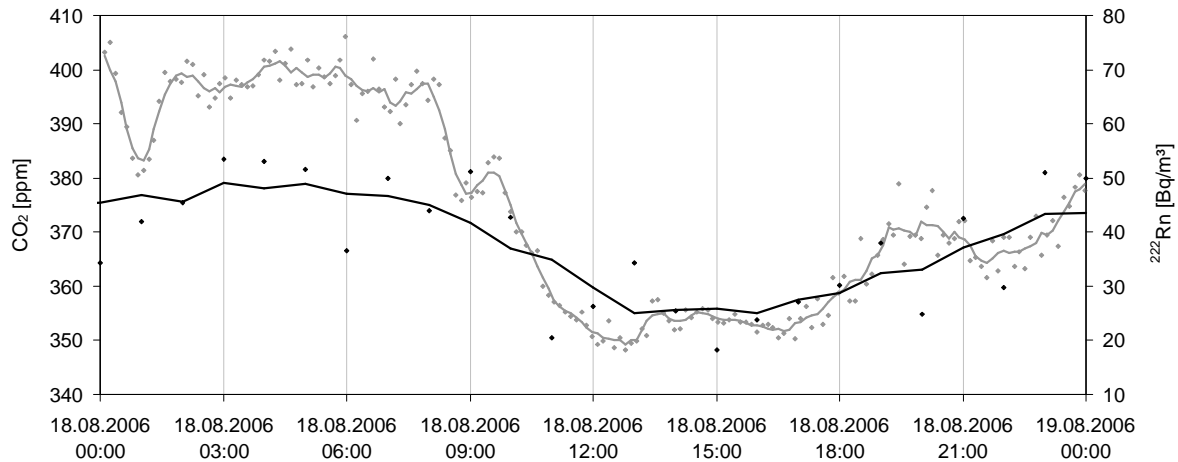


Abb. 2: ²²²Rn (0.20 m, schwarz) und CO₂ (0.25 m, grau) Konzentrationen, Tagesgang, 18.08.06, Waldstein-Weidenbrunnen – ²²²Rn (0.20 m, black) and CO₂ (0.25 m, grey) concentrations, diurnal variation, 2006-08-18, Waldstein-Weidenbrunnen

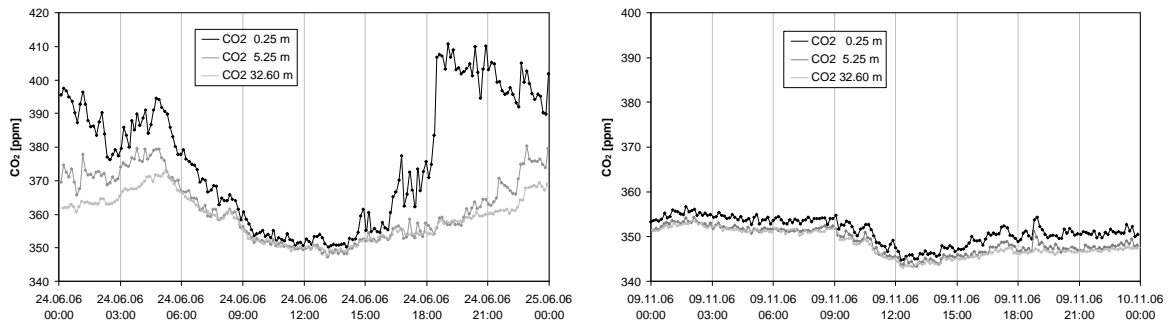


Abb. 3: CO₂-Profilmessungen (0.25 m, schwarz, 5.25 m, grau, 32.60 m hellgrau), Tagesgang, links: Sommer (24.06.06), rechts: Winter (09.11.06), Waldstein-Weidenbrunnen – CO₂ profile measurements (0.25 m, black, 5.25 m, grey, 32.60 m light grey), diurnal variation, left: summer (06-06-24), right: winter (06-11-09), Waldstein-Weidenbrunnen

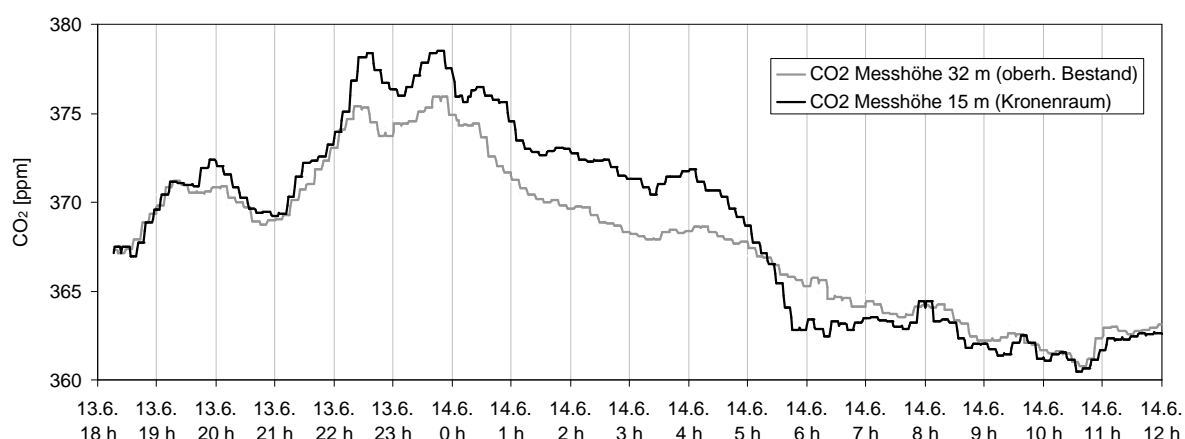


Abb. 4: CO₂-Profilmessungen (15 m, schwarz, Kronenraum; 32 m, grau, oberhalb Bestand) 13./14.06.06 – CO₂-profile measurements (15 m, black, canopy; 32 m, grey, above canopy) 06-06-13/14

Die Variation der CO₂- und Rn-Konzentrationen, gemessen in vergleichbaren Höhen über Grund (25 cm bzw. 20 cm) am Standort Waldstein-Weidenbrunnen für eine ausgewählte Sommerperiode (2.6. bis 20.6.2006, Abb. 1) bzw. einen typischen Sommertag (18.8.2006, Abb. 2) zeigt ausgeprägte – zwischen beiden Spurengasen korrespondierende – Tagesgänge, gesteuert durch bodennahe Anreicherung in der Nacht bei stabilen, entkoppelten Austauschbedingungen und fehlender Assimilation und Nivellierung auf den atmosphärischen Hintergrundwert bzw. die Hintergrund-Emanation bei turbulenter, gekoppelter Durchmischung am Tage und aktiver Assimilation des Pflanzenbestandes.

Obwohl die Entkopplung Bestand/Atmosphäre unter autochthonen Witterungsbedingungen insbesondere in der warmen Jahreshälfte extreme vertikale Gradienten der CO₂-Konzentration hervorruft bleibt jedoch bei komplementärer Witterung ein erheblich geringerer, doch erkennbarer Konzentrationsgradient erhalten (Abb. 3).

Der Tagesgang der CO₂-Konzentration wird im Wesentlichen durch Respirations- und Assimilationsprozesse der Vegetation und des Bodens durch Überlagerung unterschiedlicher atmosphärischer Austauschbedingungen innerhalb und oberhalb des Pflanzenbestandes verursacht. Die Rn-Konzentration wird nicht von biologischer Aktivität beeinflusst, die Variationsursachen reduzieren sich auf meteorologische, bodenphysikalische (und auf geologische) Einflussgrößen. Der Einfluss biologischer Aktivität wird in Abb.5 verdeutlicht. Der Verlauf der CO₂-Konzentration in 15 m ü. G. (mittlerer Kronenraum) zeigt beginnend ab ca. 20 Uhr (13.6.) eine Anreicherung von CO₂ im Kronenraum (Entkopplung, fehlende Assimilation) gegenüber die Messhöhe in 32 Metern (rund 13 m ü. Baumhöhe). Mit beginnender Photosynthese kurz nach Sonnenaufgang (4:30 MEZ) fällt die CO₂-Konzentration rasch bis ca. 7 Uhr morgens auf deutlich unter die der Messhöhe oberhalb des Bestandes in 32 Metern, um sich dann bei durchsetzender Turbulenz gegen Mittag zu nivellieren.

4. Schlussfolgerungen

Parallele Messungen der vertikalen Verteilung der CO₂- und Rn-Konzentration in einem Waldbestand im Rahmen einer Langzeitroutine ermöglicht einerseits klimatologische Studien hinsichtlich tageszeitlicher und jahreszeitliche Schwankungen und deren verursachenden Prozesse und andererseits durch die biologisch inerte Radon-Emanation zahlreiche Möglichkeiten Austausch-, Respirations- und Assimilationsprozesse zu trennen. Diese Frage wird Gegenstand weiterer Forschung am Standort Waldstein-Weidenbrunnen sein.

Literaturverzeichnis

- AUBINET, M., B. HEINESCH, M. YERNAUX, 2002: Horizontal and vertical CO₂ advection in a sloping forest - *Boundary-Layer Meteorology* **108**, 397-417.
- BALDOCCHI, D. et al., 2001: FLUXNET: A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor and energy flux densities - *Bulletin of the American Meteorological Society* **82**, 2415-2434.
- BETTS, A. K., 2004: Coupling between CO₂, water vapor, temperature, and radon and their fluxes in an idealized equilibrium boundary layer over land - *Geophysical Research*, **109**.
- DENMEAD, D. T., E.F. BRADLEY, 1985: Flux-gradient relationships in a forest canopy - The forest-atmosphere interaction, 421-442.
- FOKEN, T., 2006: *Angewandte Meteorologie, Mikrometeorologische Methoden*, 2. überarb. u. erw. Aufl., 326 S.
- KAMINSKI, U., S. GILGE, 1999: Die Bedeutung von Radon als Tracer im luftchemischen Meßprogramm der Gaw Globalstation Zugspitze/Hohenpeißenberg - *Deutscher Wetterdienst, Meteorologisches Observatorium*.
- KLEMM, O., H. LANGE, 1999: Trends of air pollution in the Fichtelgebirge Mountains, Bavaria - Universität Bayreuth, Bayreuther Institut für Terrestrische Ökosystemforschung (BITÖK).
- LEE, X., 1998: On micrometeorological observations of surface-air exchange over tall vegetation - *Agricultural and Forest Meteorology* **91**, 39-49.
- MARTENS, C. S., T.J. SHAY, 2004: Radon fluxes in tropical forest ecosystems of Brazilian Amazonia: night-time CO₂ net ecosystem exchange derived from radon and eddy covariance methods - *Global Change Biology* **10**, 618-629.
- REBMAN, C., P. ANTHONI, E. FALGE, M. GÖCKEDE, M. MANGOLD, J. SUBKE, C. THOMAS, B. WICHURA, E-D. SCHULZE, J.D. TENHUNEN, and T. FOKEN, 2004: Carbon budget of a spruce forest ecosystem - *Ecological Studies*, Springer-Verlag, E. Matzner (Ed.), *Biogeochemistry of Forested Catchments in a Changing Environment* **172**.
- RUPPERT, J; M. MAUDER, C. THOMAS, J. LÜERS: Innovative gap-filling strategy for annual sums of CO₂ net ecosystem exchange - *Agricultural and Forest Meteorology* **138**, 5-18.
- RUPPERT, J., 2005: ATEM Software for Atmospheric Turbulent Exchange Measurements using Eddy Covariance and Relaxed Eddy Accumulation Systems + Bayreuth whole-air REA system setup - University of Bayreuth, Department of Micrometeorology, Arbeitsergebnisse Nr. **28**.
- THOMAS, C., T. FOKEN, 2004: Detection of long-term coherent exchange over spruce forest using wavelet analysis - *Theoretical and Applied Climatology* **80**, 91-104.
- THOMAS, C; T. FOKEN, 2005: Organised motion in a tall spruce canopy: temporal scales, structure spacing and terrain effects - *Boundary-Layer Meteorology* **122**, 123-147.
- THOMAS, C; T. FOKEN, 2005: Flux contribution of coherent structures and its implications for the exchange of energy and matter in a tall spruce canopy - *Boundary-Layer Meteorology*, DOI 10.1007/s10546-006-9144-7.
- THOMAS, C., J. MAYER, 2005: Analysis of the low-frequency turbulence above tall vegetation using a Doppler sodar, *Boundary-Layer Meteorology* **119**, 563-587.
- THOMAS, C., J. RUPPERT, J. LÜERS, J. SCHRÖTER, J-C. MAYER, T. BERTOLINI, 2004: Documentation of the WALDATEM-2003 Experiment, April, 28th to August, 03rd 2003 - University of Bayreuth, Department of Micrometeorology, Arbeitsergebnisse Nr. **24**.
- TRUMBORE, S. E., M. KELLER, S.C. WOFSY, et al., 1990: Measurements of soil and canopy exchange rates in the Amazon rain forest using radon-222 - *Journal of Geophysical Research* **95**, 16865-16873.
- WICHURA, B., J. RUPPERT, A.C. DELANY, N. BUCHMANN and T. FOKEN, 2004: Structure of carbon dioxide exchange processes above a spruce forest - *Ecological Studies*, Springer-Verlag, E. Matzner (Ed.), *Biogeochemistry of Forested Catchments in a Changing Environment* **172**.

Dr. Johannes Lüers, Abt. Mikrometeorologie, Universität Bayreuth, 95440 Bayreuth
johannes.lueers@uni-bayreuth.de

Johanna Smaczny, Abt. Mikrometeorologie, Universität Bayreuth, 95440 Bayreuth
johanna.smaczny@gmx.de