

KOMPLEXES WALD - GRENZSCHICHT EXPERIMENT WALDATEM-2003

C. THOMAS¹, J. RUPPERT¹, J. LÜERS¹, J. OLESCH¹, T. BERTOLINI², J.C. MAYER¹,
J. SCHRÖTER¹, A.C. DELANY³, TH. FOKEN¹,

¹*Abteilung Mikrometeorologie, Universität Bayreuth, Deutschland*

²*Department of Environmental Sciences, 2nd University of Napoli, Italien*

³*National Center for Atmospheric Research, NCAR, Boulder, USA*

1 EINLEITUNG

Das Ziel des gekoppelten Wald-Grenzschicht Experimentes WALDATEM-2003 war die intensive Untersuchung von kohärenten Strukturen und von Energie- und Stoffflüssen in und über einem hohen Fichtenwald. Der Name des Experimentes leitet sich von den verwendeten Mess- und Analysetechniken ab, wobei WALD für WAveLet Detection und ATEM für Atmospheric Turbulence Exchange Measurements steht. In dem Zeitraum von Mai bis Juli 2003 wurden an der FLUXNET Station GE1 Weidenbrunnen (50°08'53" Nord und 11°52'00" Ost, 775 m ü. NN) nahe des Grossen Waldsteines im Fichtelgebirge intensive Turmmessungen und akustische Fernsondierungen in einem 19 m hohem Fichtenbestand durchgeführt. Durch die Kombination bodengestützter und fernerkundlicher Messsysteme war es möglich, die atmosphärischen Flüsse und die Dynamik des Austausches zwischen Wald und atmosphärischer Grenzschicht übergreifend zu beobachten. Durch die Verwendung von schnellen und mittleren Messtechniken konnten Austauschprozesse auf verschiedenen zeitlichen Skalen erfasst, analysiert und verglichen werden. Die vorliegende Arbeit beschreibt den messtechnischen Aufbau und die verwendeten Analysetechniken.

Die Vorbereitung des Experimentes beruht auf langjährigen Erfahrungen in der Messung turbulenter Flüsse über hoher Vegetation. Hinweise über Rampen- und kohärenten Strukturen und deren Bearbeitung wurden von Collineau und Brunet (1993a; 1993b) gegeben. Die methodischen Arbeiten wurden u. a. bei Untersuchungen zu stabilen Schichtungen in der Antarktis weitergeführt (Handorf und Foken 1997). Entsprechende eigene Untersuchungen in und über Wäldern wurden erstmals beim BEMA Experiment 1993 in Italien realisiert (Schween *et al.* 1997; Seufert 1997). Damit werden bei der Flussbestimmung, z.B. Kohlenstoffflüsse im FLUXNET Programm (Baldochi *et al.* 2001), nicht nur der Fluss oberhalb des Bestandes oder advective Terme (Aubinet *et al.* 2003; Lee 1998) bestimmt, sondern auch Flussbeiträge, die aus der Turbulenzstruktur herrühren. Von wesentlicher Bedeutung ist auch die Separation von Assimilations- und Respirationsflüssen (Lloyd *et al.* 1996; Wichura *et al.* 2004). Die Anlage des WALDATEM-2003 Experimentes trägt allen diesen Gesichtspunkten Rechnung.

2 MITTLERE METEOROLOGISCHE MESSUNGEN

Während des gesamten Experimentes wurden Messungen durchgeführt, die den mittleren Verlauf wichtiger meteorologischer Parameter widerspiegeln. Dabei wurden neben Vertikalprofilen am Hauptturm (siehe Abbildung 1) auch ein Horizontalprofil aus weiteren zusätzlichen Türmen im Stammraum installiert, um Horizontaladvektion und katabatische Luftbewegungen erfassen zu können. Die abgeleiteten Informationen lieferten wichtige Beiträge zur Interpretation der atmosphärischen Flüsse und zur pflanzenphysiologischen Heterogenität des Unterwuchses, da parallel zu den Luftströmungen auch Horizontalgradienten der Kohlendioxidkonzentration gemessen wurden.

2.1 WIND

Der mittlere Verlauf der Horizontalwindgeschwindigkeit wurde mit einem Vertikalprofil aus 7 Schalens-ternanemometern (T. Friedrichs GmbH & Co., Windgeschwindigkeitsgeber 4034) gemessen, die in den Höhen 2 m, 10 m, 16 m, 18 m, 21 m, 25 m und 32 m am Hauptturm installiert waren. Im Bereich der Kronenoberkante wurde das mittlere Windprofil besonders hoch aufgelöst, um den entscheidenden Umkehrpunkt im Windprofil optimal auflösen zu können. Eine Windfahne auf der Messhöhe von 32 m lieferte die Anströmrichtung über dem Bestand und diente zur Kontrolle der korrekten horizontalen Ausrichtung

der Ultraschallanemometer. Einige besondere Situationen des Verlaufes des Wind- und Temperaturfeldes werden in Lüers *et al.* (2004) vorgestellt.

2.2 TEMPERATUR UND FEUCHTE

Die Messungen am Hauptturm umfassten ein Vertikalprofil der Temperatur und der Feuchte, das an 5 Messhöhen auf 2.0 m, 5.5 m, 12.5 m, 21.0 m und 32.0 m parallel mit ventilerten Psychrometern (T. Friedrichs GmbH & Co., Psychrometer nach Frankenberger 3010) und kapazitiven Feuchtemessungen (Vaisala GmbH, HMP45a) ausgestattet war. Diese Messungen dienen zur Erfassung des komplexen Stabilitätsregimes in und über dem Wald und ließen somit in Kombination mit den Flussmessungen und den Eigenschaften der kohärenten Strukturen Rückschlüsse auf Kopplung und Entkopplungszuständen zwischen Wald und Atmosphäre zu. Ergänzt wurden die Lufttemperaturmessungen durch Messungen der Bodentemperatur in einem Vertikalprofil von 0.05 m, 0.10 m, 0.20 m und 0.50 m Tiefe und durch Messungen des Bodenwärmestromes mit Hilfe von Bodenwärmestromplatten (RIMCO Instr., HP3).

2.3 KOHLENDIOXID

Kohlendioxid ist ein wichtiger Indikator für physiologische Aktivität im Ökosystem. Neben den Kohlendioxidflussmessungen mittels der Ultraschallanemometer und der hochauflösenden Gasanalytoren (siehe 3.1) wurde ein weiteres Vertikalprofil zur kontinuierlichen Bestimmung und des Verlaufes der mittleren Kohlendioxidkonzentration in und über dem Wald betrieben. Dazu wurden am Hauptturm in den Höhen 0.03 m, 0.30 m, 0.90 m, 2.25 m, 5.25 m, 15.0 m, 21.6 m und 32.6 m Gasansaugleitungen installiert, die an einen zentralen Gasanalysator (Li-Cor Inc., Li-820) angeschlossen wurden. Diese Profilanlage wurde an der Abteilung Mikrometeorologie selbst entwickelt und diente weiterhin zur Bestimmung von mittleren Profilen des stabilen Isotops ^{13}C im atmosphärischen Kohlendioxid. Anschliessend wurden die Proben in Glasflaschen gesammelt und im Isotopenlabor im Max-Planck-Institut für Biogeochemie in Jena analysiert. Erste Ergebnisse der Messungen sind in Ruppert *et al.* (2004) zu finden.

Das Analysesystem 'Hydra' (NCAR, Boulder) wurde eingesetzt, um die horizontalen Gradienten und damit die Heterogenität der Kohlendioxidkonzentration zu ermitteln, aus denen u. a. Rückschlüsse auch auf horizontale Advektion von Kohlenstoff gezogen werden können. Hierbei wurden an den 3 zusätzlichen Masten in den Höhen 1.00 m und 2.25 m Ansaugleitungen angebracht, und die Kohlendioxidkonzentration zentral über einen Analysator (Li-Cor Inc., Li-7000) bestimmt.

2.4 STRAHLUNG

Die Strahlung ist ein zentraler Parameter zur Steuerung physiologischer Vorgänge im Ökosystem. Die kurzwelligen und langwelligen Komponenten der Strahlungsbilanz wurden im und über dem Wald mittels Pyradiometern und Pyrgeometern (Kipp & Zonen, CNR1; Thies GmbH & Co. KG, CM14 und CG2) bestimmt, die in den Höhen 4.6 m und 30.0 m am Hauptturm angebracht waren. Durch den Vergleich der beiden unabhängigen Strahlungsmessungen kann der Anteil des innerhalb des Bestandes zur Verfügung stehenden Lichts bestimmt und u.a. Rückschlüsse auf die Intensität assimilatorischer und dissimilatorischer Vorgänge gezogen werden.

2.5 NIEDERSCHLAG UND SICHTWEITE

Der Niederschlag ist der zentrale Parameter für die Verfügbarkeit oberflächennahen Wassers und wirkt sich somit direkt auf Stoffumsätze im Ökosystem aus. Zur Bestimmung der Niederschlagssumme wurde ein Niederschlagssammler (Belfort Instr., OMC212) in ca. 200 m Entfernung vom Hauptturm verwendet. Zusätzlich dazu wurde auch ein Present-Weather-Detector (Vaisala GmbH, PWD 11) zur Bestimmung der Sichtweite eingesetzt, um dem häufigen Auftreten von Nebel am Standort Rechnung zu tragen.

2.6 WIND- UND TEMPERATURPROFILE IN DER GRENZSCHICHT

Das mittlere Windprofil der Schalensternanemometer und das Vertikalprofil der Ultraschallanemometer am Hauptturm wurden in die atmosphärische Grenzschicht durch akustische Fernsondierung mit einem SODAR-RASS System (Metek GmbH, DSDPA90.64 mit 1290-MHz MERAS Erweiterung) fortgesetzt. Auf diese Weise wurden wertvolle Informationen sowohl über die mittleren Strömungsbedingungen, als auch den Turbulenzzustand der Atmosphäre bis in eine Höhe von ca. 1000 m über Grund gesammelt. Der Einsatz der RASS- Komponente erlaubte eine Erweiterung des mittleren Temperaturprofils des Hauptturms bis in eine Höhe von ca. 300 m über Grund. Durch die Kombination der so erhaltenen vertikalen Wind- und Temperaturinformationen und unter Hinzunahme des Turbulenzzustandes konnte der Verlauf der Entwicklung der atmosphärischen Grenzschicht abgeleitet und lokale orographische Effekte der Strömung nachgewiesen werden, die näher in Mayer *et al.* (2004) vorgestellt werden.

2.7 ADVEKTION IM STAMMRAUM

Die Erfassung von Prozessen horizontaler Advektion und katabatischen Strömungen im Stammraum wurde durch die Installation zusätzlicher kleiner Messtürme umgesetzt, die sowohl entlang, als auch quer zur Hangneigung angeordnet waren. Insgesamt wurden 3 Türme mit einer maximalen Messhöhe von 2.3 m bzw. 6 m installiert, die mit Schalensternanemometern (Climatronics Corp., F460) auf den Messniveaus von 1.0 m, 1.6 m und 2.2 m bzw. 1.0 m, 2.3 m und 6.0 m und einer Windfahne (Vector Instr., W200P; Climatronics Corp., F460) ausgestattet waren. Die zusätzlichen Türme wurden weiterhin mit Messeinlässen eines Horizontalprofils der mittleren Kohlendioxidkonzentration versehen, das näher im Abschnitt 2.3 erläutert wird. Die Auswertung der Luftströmung im Stammraum werden in Schröter *et al.* (2004) näher vorgestellt.

3 ATMOSPHERISCHE FLUSSMESSUNGEN UND KOHÄRENTE STRUKTUREN

Zur Erfassung der Energie- und Stoffflüsse zwischen Wald und atmosphärischer Grenzschicht wurden hochauflösende Messsysteme in Kombination mit der Eddy-Kovarianz-Methode eingesetzt, die mit einer Probeahmefrequenz von 10 Hz bzw. 20 Hz betrieben wurden. Die aufgezeichneten hochaufgelösten Zeitreihen dienten ebenfalls als Datengrundlage zur Detektion und Analyse der kohärenten Strukturen. Im Falle der Bestimmung von atmosphärischen Flüssen stabiler Isotope, für deren Konzentrationsmessungen keine geeigneten hochfrequenten Messverfahren existieren, wurde auf die Relaxed-Eddy-Accumulation (REA) zurückgegriffen. Im Folgenden sollen die einzelnen Messsysteme und deren Auswerteverfahren kurz beschrieben werden.

3.1 TURBULENTE FLÜSSE

Ein Vertikalprofil bestehend aus 6 Ultraschallanemometern (Gill Instruments Ltd., R3-50, R2; R.M. Young Comp., 81000; Metek GmbH, USA-1-FHN, USA-1-A) und 3 Gasanalysatoren (Li-Cor Inc., Li-7500, Li-6262) wurde zur kontinuierlichen Erfassung der hochaufgelösten Zeitreihen des 3-dimensionalen Windvektors, der virtuellen (akustischen) Temperatur, der Kohlendioxidkonzentration und des Wasserdampfgehaltes am Hauptturm eingesetzt. Das Profil erstreckte sich vom Stamm- und Kronenraum des Fichtenbestandes bis in die Raue Unterschicht. Die genauen Messhöhen der Ultraschallanemometer betragen 2.3 m, 5.5 m, 13.6 m, 17.7 m, 22.4 m und 33.1 m, die der hochauflösenden Gasanalysatoren 2.3 m, 22.4 m und 33.1 m. Die individuellen Zeitreihen wurden in 30 Minuten Intervalle unterteilt. Das Vertikalprofil diente zur Bestimmung des turbulenten Impulsflusses, der fühlbaren und latenten Wärmeströme und des Kohlendioxidflusses nach der Eddy-Kovarianz-Methode. Die Qualitätssicherung zur Bestimmung der turbulenten Flüsse wurde gemäß Foken *et al.* 2004 durchgeführt. Eine detailliertes Schema der angewandten Transformations- und Korrekturverfahren ist in Mauder und Foken (2004) zu finden.

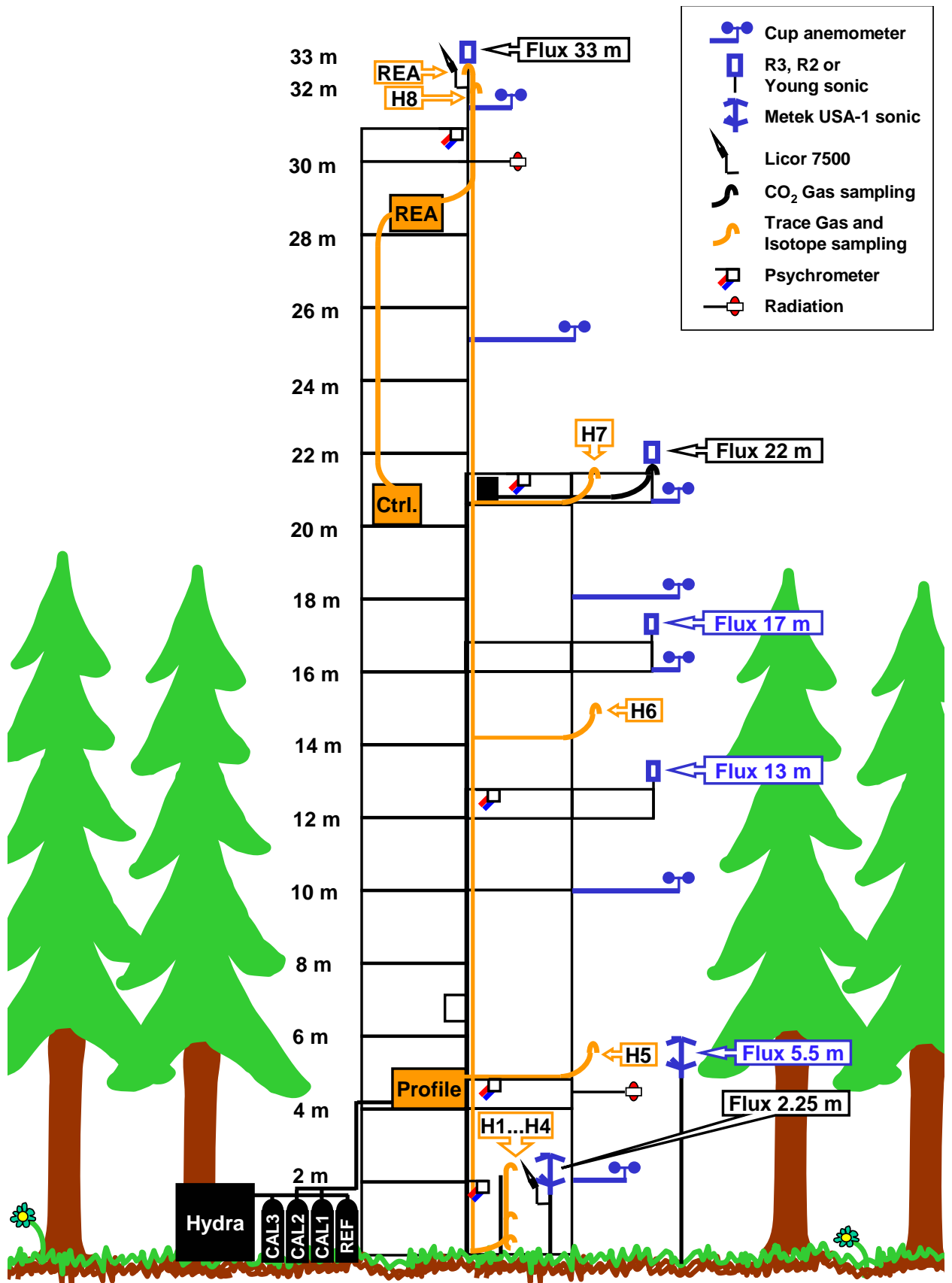


Abbildung 1: Instrumentierung des Hauptturmes während des Wald - Grenzschicht Experimentes WALDATEM-2003

3.2 KOHÄRENTE STRUKTUREN

Die mit dem Vertikalprofil aus Ultraschallanemometern und schnellen Gasanalysatoren (siehe Abschnitt 3.1) aufgezeichneten Zeitreihen dienten auch als Grundlage zur Detektion und Analyse der kohärenten Strukturen. Kohärente Strukturen kontrollieren massgeblich das Austauschverhalten zwischen Wald und Atmosphäre und können einen erheblichen Anteil an den atmosphärischen Flüssen haben. Die Kenntnis ihres Auftretens und Verhaltens ist somit grundlegend für die Interpretation von ökosystemaren Prozessen. Die Detektion der kohärenten Strukturen in den erfassten Zeitreihen erfolgte quasi in Echtzeit, d.h. direkt nach Abschluss eines Messintervalls sowohl für die vektoriellen, als auch die skalaren Größen im Feld. Dadurch war es möglich, die stark variablen Austauschprozesse zwischen Wald und Atmosphäre durch kohärente Strukturen direkt im Feld zu verfolgen und nachzuvollziehen. Aufgrund bergrenzter Rechenkapazität konnte diese quasi-Echtzeit Auswertung nur für die oberste Messhöhe durchgeführt werden, alle weiteren Zeitreihen wurden in einer Nachbearbeitung nach Abschluss der Messungen analysiert. Zusätzlich zu dem Vertikalprofil am Hauptturm wurde zeitweise auch das fernerkundliche akustische Sondierungssystem SODAR-RASS zur Erfassung der kohärenten Strukturen in der Rauen Unterschicht und darüber hinaus bis in eine Messhöhe von 155 m über Grund eingesetzt. Der Einsatz eines speziellen Sondierungsprogrammes mit einer akustischen Schallfrequenz von 2000 Hz erlaubte die Messung von Zeitreihen des Vertikalwindes und der virtuellen Temperatur mit einer Auflösung von 0.4 Hz bei einer vertikalen Auflösung von 10 m.

Die Detektion und Analyse der kohärenten Strukturen wurde mit Hilfe der selbstentwickelten Software WALDSCHRAT (WaveLet Detection Software for CoHerent RAMP paTterns) durchgeführt, die auf der Wavelet Transformation basiert. Die einzelnen Arbeitsschritte sowie Grundlagen zur Wavelettransformation sind in Thomas und Foken (2004a) vorgestellt. Ergebnisse über die dynamischen Eigenschaften der kohärenten Strukturen werden in Thomas und Foken (2004b) vorgestellt.

3.3 ISOTOPENFLÜSSE

Die Messung von ^{13}C Isotopen kann zusätzliche Informationen über die Quellen und Senken des Kohlendioxids und der Austauschprozesse mit der Atmosphäre liefern. Im Rahmen des WALDATEM-2003 Experimentes wurden die ^{13}C -Flüsse mit Hilfe der Relaxed-Eddy-Accumulation (REA) Methode gemessen (Businger und Oncley, 1990). Die REA Technik ist ein indirektes Verfahren zur Flussbestimmung von skalaren Größen, deren Konzentrationsfluktuationen nicht ausreichend schnell gemessen werden können, um die Voraussetzungen der Eddy-Kovarianz-Methode zu erfüllen. Das selbstentwickelte Messsystem wurde oberhalb des Fichtenbestandes parallel zu den schnellen Wind- und Kohlendioxidkonzentrationsmessungen des obersten Messniveaus des Vertikalprofils auf 33.1 m Höhe betrieben. Es handelt sich dabei um ein 'Whole air'-REA-System, in dem die gesammelten Luftproben in einem Zwischenreservoir aufgehoben und anschließend in Glasflaschen abgefüllt wurden. Anschließend wurden sie mit hoher Präzision im Isotopenlabor des Max-Planck-Institutes für Biogeochemie in Jena analysiert. Erste Ergebnisse der durchgeführten Messungen werden in Ruppert *et al.* (2004) vorgestellt.

DANKSAGUNGEN

Wir danken den Mitarbeitern des BITÖK (Bayreuther Institut für terrestrische Ökosystemforschung) der Universität Bayreuth für die tatkräftige Unterstützung der experimentellen Arbeiten. Unser besonderer Dank gilt Prof. Franz Meixner vom Max-Planck-Institut für Chemie in Mainz, der das SODAR-RASS System für das Experiment zur Verfügung stellte. Das Experiment wurde gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung, Vertrag PT BEO51 - 0339476 D.

LITERATUR

- Aubinet, M, Heinesch, B, Yernaux, M (2003). Horizontal and vertical CO₂ advection in a sloping forest. *Boundary-Layer Meteorol*, 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. *Bull Am Meteorol Soc*, 82: 2415-2434
- Businger, JA and Oncley, SP (1990). Flux measurement with conditional sampling. *J. Atmospheric & Oceanic Technol.*, 7, 349-352.
- Collineau, S, Brunet, Y (1993a). Detection of turbulent coherent motions in a forest canopy. Part I: Wavelet analysis. *Boundary-Layer Meteorol*, 65: 357-379
- Collineau, S, Brunet, Y (1993b). Detection of turbulent coherent motions in a forest canopy. Part II: Timescales and conditional averages. *Boundary-Layer Meteorol*, 66: 49-73
- Foken, Th, Göckede, M, Mauder, M, Mahrt, L, Amiro, BD and Munger, JW (2004). Post-field data quality control. In X. Lee (Editor), *Handbook of Micrometeorology: A Guide for Surface Flux Measurements*. Kluwer, Dordrecht, pp. 81-108.
- Handorf, D, Foken, T (1997). Analysis of turbulent structure over an Antarctic ice shelf by means of wavelet transformation. *12th Symposium on Boundary Layer and Turbulence*, Vancouver BC, Canada, 28 July - 1 August 1997, Am. Meteorol. Soc., 245-246.
- Lee, X (1998). On micrometeorological observations of surface-air exchange over tall vegetation. *Agric Forest Meteorol*, 91: 39-49
- Lloyd, J, Kruijt, B, Hollinger, DY, Grace, J, Francey, RJ, Wong, S-C, Kelliher, FM, Miranda, AC, Farquhar, GD, Gash, JHC, Vygodskaya, NN, Wright, IR, Miranda, HS, Schulze, E-D (1996). Vegetation Effects on the Iso-topic Composition of Atmospheric CO₂ at Local and Regional Scales: Theoretical Aspects and a Comparison Between Rain Forest in Amazonia and a Boreal Forest in Siberia. *Austr J Plant Phys*, 23: 371-399
- Lüers, J, Thomas, C, Ruppert, J, Foken, T (2004). Wind, Lufttemperatur und Kohlendioxidprofile in einem Fichtenforst während des WALDATEM-2003 Sommerexperimentes. *Deutsch-Österreichisch-Schweizerische Meteorologen-Tagung*, Karlsruhe, Germany, 7 - 10 September 2004, (Extended Abstract and pdf-file on CD).
- Mauder, M, Foken, T (2004). Qualitätssicherung der Energieflussmessungen für LITFASS-2003. *Deutsch-Österreichisch-Schweizerische Meteorologen-Tagung*, Karlsruhe, Germany, 7 - 10 September 2004, (Extended Abstract and pdf-file on CD).
- Mayer, J-C, Thomas, C, Foken, T (2004). Dynamik des Wind- und Temperaturprofils an einem Mittelgebirgsstandort mittels SODAR-RASS. *Deutsch-Österreichisch-Schweizerische Meteorologen-Tagung*, Karlsruhe, Germany, 7 - 10 September 2004, (Extended Abstract and pdf-file on CD).
- Ruppert, J, Thomas, C, Foken, T (2004). CO₂- und ¹³C-Isotopenfluss für die Untersuchung der Dynamik des CO₂ Austausches zwischen Ökosystem und Atmosphäre. *Deutsch-Österreichisch-Schweizerische Meteorologen-Tagung*, Karlsruhe, Germany, 7 - 10 September 2004, (Extended Abstract and pdf-file on CD).
- Schröter, J, Ruppert, J, Delany, AC, Foken, T (2004). Horizontale advective Einflüsse auf den CO₂-Austausch eines Fichtenbestandes. *Deutsch-Österreichisch-Schweizerische Meteorologen-Tagung*, Karlsruhe, Germany, 7 - 10 September 2004, (Extended Abstract and pdf-file on CD).
- Schween, JH, Zelger, M, Wichura, B, Foken, T, Dlugi, R (1997). Profiles and fluxes of micrometeorological parameters above and within the Mediterranean forest at Castelporziano. *Atmospheric Environm*, 31: 185-197.
- Seufert, G (1997). BEMA: A European Commission project on biogenic emissions in the Mediterranean area. *Atmos Environm*, 31 (S1): 1-255
- Thomas, C and Foken, Th (2004a). Detection of Long-term Coherent Exchange over Spruce Forest Using Wavelet Analysis, *Theor. & Appl. Climatol.*, accepted.
- Thomas, C, Foken, T (2004b). Untersuchung dynamischer Eigenschaften kohärenter Strukturen über einem hohen Fichtenwald mittels Wavelet-Analyse. *Deutsch-Österreichisch-Schweizerische Meteorologen-Tagung*, Karlsruhe, Germany, 7 - 10 September 2004, (Extended Abstract and pdf-file on CD).
- Wichura, B, Ruppert, J, Delany, AC, Buchmann, N, Foken, T (2004). Structure of Carbon Dioxide Exchange Processes above a Spruce Forest. In: E Matzner (Editor), *Temperate Forest Ecosystems Response to Changing Environment: Watershed Studies in Germany. Ecological Studies*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 161-176.