

# HORIZONTALE ADVEKTIVE EINFLÜSSE AUF DEN CO<sub>2</sub>-AUSTAUSCH EINES FICHTENBESTANDES

J. SCHRÖTER<sup>1</sup>, J. RUPPERT<sup>1</sup>, A.C. DELANY<sup>2</sup>, T. FOKEN<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Abteilung Mikrometeorologie, Universität Bayreuth, Deutschland*

<sup>2</sup>*National Center for Atmospheric Research, NCAR, Boulder, USA*

## 1 EINLEITUNG

Ein zentrales Thema der mikrometeorologischen Forschung ist der Stoffaustausch zwischen Ökosystem und Atmosphäre. Wichtiges Forschungsziel hierbei ist es, den Nettoökosystemaustausch (net ecosystem exchange, NEE) von Kohlenstoff durch geeignete mikrometeorologische Langzeitmessungen möglichst vollständig zu bilanzieren. Im Allgemeinen werden hierzu die durch Eddy-Kovarianz-Messungen ermittelten turbulenten Flüsse herangezogen. Dies geschieht unter der Annahme, dass advective Flüsse (Stofftransport mit dem mittleren Windfeld) generell oder zumindest über längere Mittelungsintervalle zu vernachlässigen sind. Für ebene, homogene Standorte über niedriger Vegetation hat sich dieses Verfahren auch bewährt.

Daten, die an Standorten in heterogenem oder bewaldetem Gelände erhoben wurden, zeigen jedoch häufig deutliche Hinweise auf starke advective Einflüsse (Baldochi *et al.*, 2000). Insbesondere der für Wald typische Vegetationsaufbau, bei welchem die Krone den Stammraum als eine Art Pufferbereich mehr oder weniger deutlich von der darüber liegenden Atmosphäre abtrennt, scheint advective Prozesse beim Stoffaustausch zwischen Vegetation, Boden und Atmosphäre zu begünstigen. Lee (1998) schlug deshalb ein einfaches Verfahren vor, um Advektion in die Flussbilanzierung mit einzubeziehen. Über die Gültigkeit dieses mittlerweile auch als ‚Lee-Korrektur‘ (Finnigan, 1999) bezeichneten Verfahrens wird noch diskutiert. Nach den Einschätzungen von Baldochi *et al.* (2000), Finnigan (1999) und Paw U *et al.* (2000) erfasst es jedoch nur unter sehr eingeschränkten Bedingungen die Advektion plausibel. Daher kann man bei der Lee-Korrektur nicht von einer allgemein anwendbaren „Advektions-Korrektur“ sprechen, insbesondere deshalb nicht, da nur ein vertikaler Advektionsterm in die Berechnung einfließt. Von großem Vorteil ist allerdings, dass für die Advektionsermittlung nach Lee (1998) nur Daten nötig sind, die wie bisher üblich an einem einzelnen Turm gemessen werden können.

Einen messtechnisch aufwendigeren Ansatz um auch horizontale Advektion im Stammraum zu direkt zu erfassen verfolgen spezielle Advektionsexperimente (z.B. Aubinet *et al.*, 2003). Ein ähnliches Experiment wurde auch im Rahmen des Experimentes WALDATEM-2003 durchgeführt. Erklärtes Ziel war es, festzustellen, inwieweit die Kohlenstoffbilanz am Messstandort Weidenbrunnen durch systematische advective CO<sub>2</sub>-Flüsse beeinflusst wird, und wie diese potentiellen Einflüsse zu verstehen und am besten zu quantifizieren sind.

## 2 METHODEN UND MESSAUFBAU

Kern des Geräteaufbaus für das Experiment WALDATEM-2003 (Thomas *et al.*, 2004) in einem circa 19 m hohen Fichtenbestand am Standort Waldstein Weidenbrunnen im Fichtelgebirge, ist der 32 m hohe Hauptmessturm, an welchem kontinuierlich Windrichtungen und -stärke, vertikale turbulente Feuchte- und CO<sub>2</sub>-Flüsse mittels Eddy-Kovarianz-Methode und außerdem ein Vertikalprofil der absoluten CO<sub>2</sub>-Konzentrationen mit einem Closed-Path-Infrarotanalysator über 8 Höhen gemessen wurden. Die Qualität der Messergebnisse des CO<sub>2</sub>-Vertikalprofils wurde durch den Vergleich mit der stündlichen Messung zweier Standardgase und mit Luftproben in Flaschen, die anschließend im Labor analysiert wurden, überprüft. Zur Abschätzung möglicher horizontaler advectiver Einflüsse auf die Kohlenstoffbilanz des

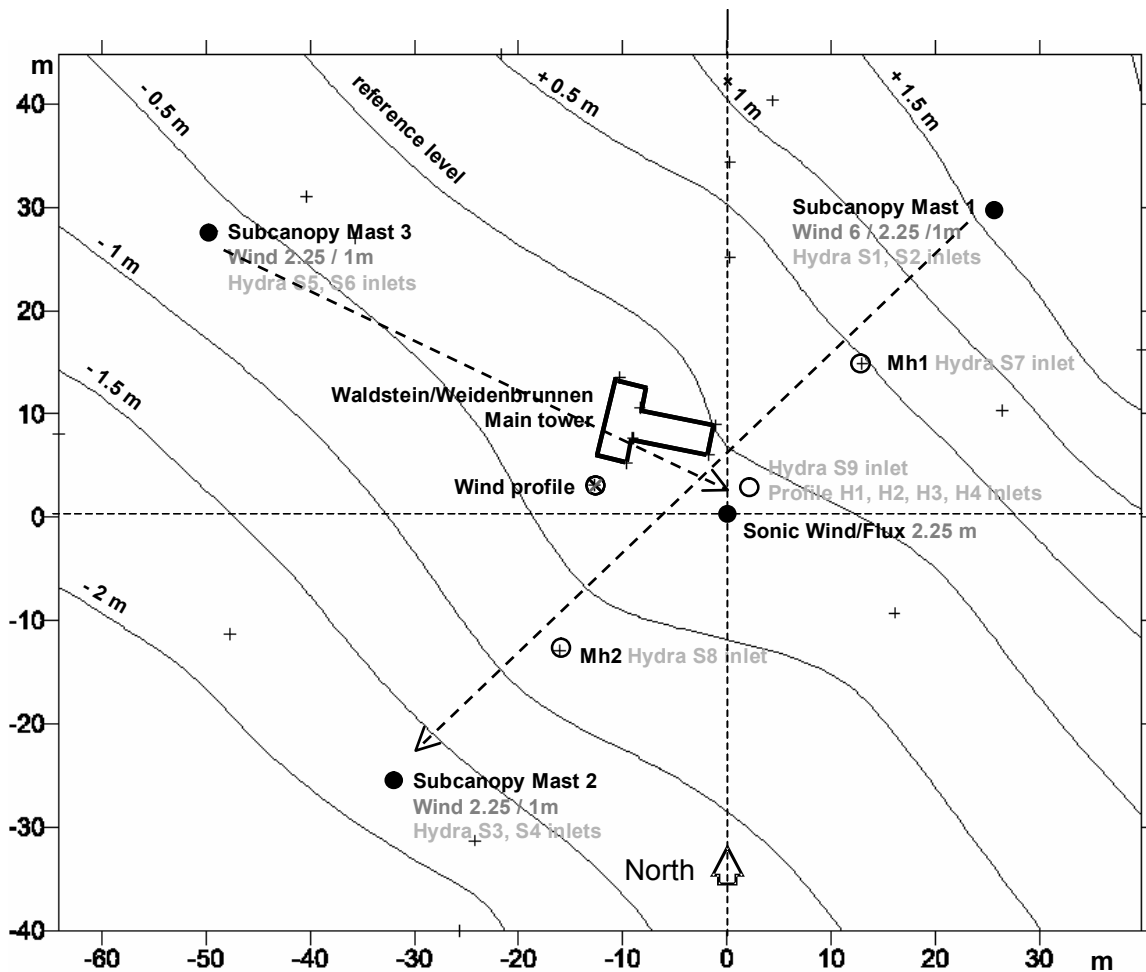


Abbildung 1: Schematische Skizze des Messstandorts Waldstein Weidenbrunnen. H1 bis H4 bezeichnen die Probennahmepunkte des vertikalen CO<sub>2</sub>-Profilsystems am Hauptmast, S1 bis S9 die Probennahmepunkte des horizontalen CO<sub>2</sub>-Profilsystems HYDRA. Die gestrichelten Pfeile veranschaulichen die Ausrichtung der beiden horizontalen Transekte.

Standortes wurden im Juli 2003 darüber hinaus Messungen von horizontalen CO<sub>2</sub>-Gradienten und Windgeschwindigkeiten im Stammraum durchgeführt. Die Messeinrichtung hierfür bestand aus drei zusätzlichen 6 m hohen Masten, die den Hauptmessturm in einer Entfernung von ca. 40 m umgaben. An allen drei Masten wurden Windgeschwindigkeiten und -richtungen und die CO<sub>2</sub>-Konzentration in 1,00 m und 2,25 m Höhe gemessen. Da für den Standort Weidenbrunnen noch keine genaueren Kenntnisse über das Strömungsverhalten im Stammraum vorlagen, wurde entsprechend der von Aubinet *et al.* (2003) gemachten Erfahrungen die Anordnung der Messpunkte insbesondere daraufhin ausgelegt, den möglichen Einfluss katabatischer Kaltluftabflüsse entlang der Hangneigung bei stabiler Schichtung zu detektieren. Hierfür wurden zwei der Masten, Mast 1 und Mast 2, der Hauptturm und zwei zwischengestellte Hilfsmasten Mh1 und Mh2 entlang eines sich über eine Länge von 80 m von Nordost nach Südwest in Richtung der Hangneigung von 4 % erstreckenden Transekts positioniert (siehe Abbildung 1). Dadurch konnten in dieser Richtung (im Folgenden vereinfacht als Nord-Süd-Richtung „NS“ bezeichnet) in 2,25 m Höhe CO<sub>2</sub>-Gradienten zwischen 5 Punkten und in 1 m Höhe zwischen 3 Punkten bestimmt werden. Der dritte Mast M3 wurde in nordwestlicher Richtung ungefähr hangparallel zum Hauptturm so platziert, dass in dieser Richtung (im Folgenden vereinfacht als West-Ost-Richtung „WE“ bezeichnet) in beiden Messhöhen Gradienten über zwei Punkte gemessen werden konnten.

Die Windmessungen an den Bestandesmasten erfolgten jeweils über Schalensternanemometer (Climatronics F-460) und eine zwischen den beiden Messhöhen positionierte Windfahne (Vector Instruments W200P, bzw. Climatronics F-460).

Für die hochgenaue CO<sub>2</sub>-Konzentrationsmessung entlang der beiden Transekte kam das Closed-Path-Messsystem „HYDRA“ vom National Center of Atmospheric Research (NCAR) in Boulder, USA, zum Einsatz. Kernstück diese Systems ist ein Infrarot-CO<sub>2</sub>-Analysator vom Typ Licor 7000 mit Pumpe und Steuereinheit. PC-gesteuerte Ventilschaltungen ermöglichten es, über lange Schlauchleitungen wechselnd Luftproben von den verschiedenen Probennahmestellen anzusaugen und dem kontinuierlich messenden Analysator zuzuführen. Der gewählte einfache 15-minütige Messzyklus ist in Tabelle 1 dargestellt. Jedes einzelne Messintervall für die Probenentnahmepunkte S1 bis S9 umfasste 100 s. Da bei jedem Probenwechsel eine gewisse Zeit nötig ist, um die internen Volumina des Gerätes ausreichend mit der neuen Probenluft zu spülen und sich zudem der Infrarotanalysator nur mit einer gewisse Reaktions-trägheit auf das Messniveau der neuen Probe einstellt, wurden nach Versuchen nur diejenigen Werte, die zwischen der 40. und 96. Sekunde jedes Messintervalls gemessen wurden als tatsächliche Einzelmesswerte akzeptiert. Somit stehen bei einer Messfrequenz von 2 Hz in jedem Messzyklus für jeden Proben-nahmepunkt ca. 110 Einzelmesswerte für Mittelungen zur Verfügung. Um die angestrebte Messgenauig-keit von deutlich unter 1 ppm zu erreichen, wurde die kontinuierliche Folge der Messzyklen stündlich durch einen 5-minütigen Kalibrationszyklus unterbrochen, in welchem nacheinander drei verschiedene Standardgase gemessen wurden. Damit können langsame Drifts und Schwankungen der Messapparatur erkannt und in der Auswertung berücksichtigt werden. Um eine gute messtechnische Anbindung zwi-schen dem Vertikalprofilssystem und dem Horizontalprofilssystem sicherzustellen, wurden der Probenent-nahmepunkt S9 des Horizontalprofilsystems direkt am Probennahmepunkt H4 des Vertikalprofilsystems platziert. Durch Vergleich der Messwerte beider Systeme für diese Probennahmepunkte kann die Quali-tät der Interkalibration zwischen beiden Systemen jederzeit überprüft und gegebenenfalls korrigiert wer-den.

Die für die Messung notwendige Trocknung der Probenluft erfolgte äußerst wirkungsvoll über einen dem Infrarotanalysator vorgeschalteten aus einer H<sub>2</sub>O-diffusionspermeablen Membrane bestehenden Schlauchabschnitt, der kontinuierlich mit trockener Flaschenluft gespült wurde.

Aufgrund technischer Limitierungen konnten qualitativ hochwertige Daten nur vom 24. Juli bis zum 29. Juli gemessen werden.

Probenahmestelle	Position	Höhe[m]	Dauer [s]	Zeit[s]
S1	M1	1,00	100	0-100
S2	M1	2,25	100	100-200
...	...	...	...	...
S9	Interkal. mit H4 des Vertikalpro- fils	2,25	100	800-900

Tabelle 1: Schema eines Messzyklus des Horizontalsystems HYDRA.

### 3 ERGEBNISSE

Die Ergebnisse der CO<sub>2</sub>-Konzentrationsmessungen zeigen eine hohe räumliche und zeitliche Variabilität, sowohl in Bezug auf die absoluten Konzentrationen als auch auf die räumlichen Gradienten (letzteres siehe Abbildung 3). Es zeigte sich im Mittel das erwartete Muster von deutlicher ausgeprägten und zeitlich beständigeren horizontalen Gradienten bei stabiler Schichtung und vermindertem turbulenten Aus-tausch, und schwächeren Gradienten unter neutralen und labilen Bedingungen mit ausgeprägter Turbu-lenz. Dies veranschaulicht die in Abbildung 2 in der rechten Spalte dargestellten Relationen, zwischen  $z/L$  ( $z$ : Messhöhe [m],  $L$ : Obukhov-Länge [m]) und den Beträgen der räumlichen CO<sub>2</sub>-Differenzen, die eine deutliche positive Korrelation erkennen lassen. Im Gegensatz zu Aubinet *et al* (2003), der bei stabiler Schichtung ausgeprägte horizontale CO<sub>2</sub>-Advektion durch katabatische Schwereflüsse feststellen konnte, lassen sich hier jedoch derart typische Strömungs- und Gradienten Muster nicht erkennen. Wenn man die Richtung der

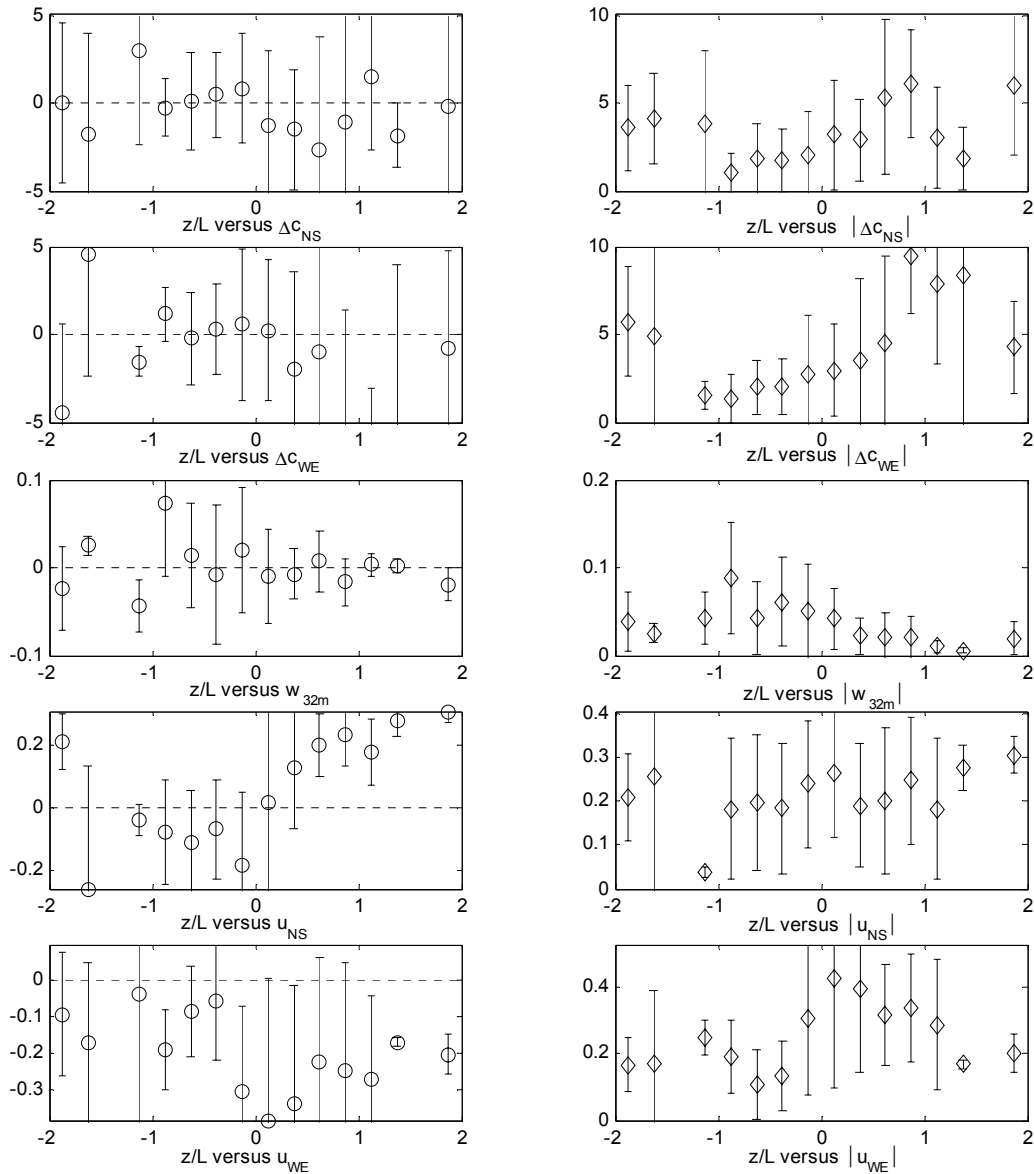


Abbildung 2: Windgeschwindigkeiten und CO<sub>2</sub>-Konzentrationsdifferenzen in Abhängigkeit des dimensionslosen Stabilitätsparameters  $z/L$  in 32 m Höhe ( $z$ : Messhöhe [m],  $L$ : Obukhov-Länge [m]). Die Klassenbreite beträgt 0,25. In der linken Spalte sind von oben nach unten die Klassenmittelwerte folgender Größen aufgetragen: die CO<sub>2</sub>-Konzentrationsdifferenz zwischen M1 und M2 ( $\Delta c_{NS}$ ), die CO<sub>2</sub>-Konzentrationsdifferenz zwischen M3 und dem Probennahmepunkt S9 am Hauptmast ( $\Delta c_{WE}$ ), die Geschwindigkeit des Vertikalwindes in 32 m Höhe ( $w_{32m}$ ) und die Horizontalwindkomponenten in Richtung NS und WE ( $u_{NS}$  und  $u_{WE}$ ). In der rechten Spalte sind korrespondierend die Klassenmittelwerte der jeweiligen Beträge dargestellt. Alle CO<sub>2</sub>-Konzentrationsdifferenzen in ppm. Windgeschwindigkeiten in  $m s^{-1}$ . Die Fehlerbalken bezeichnen die Standardabweichung vom Klassenmittelwert.

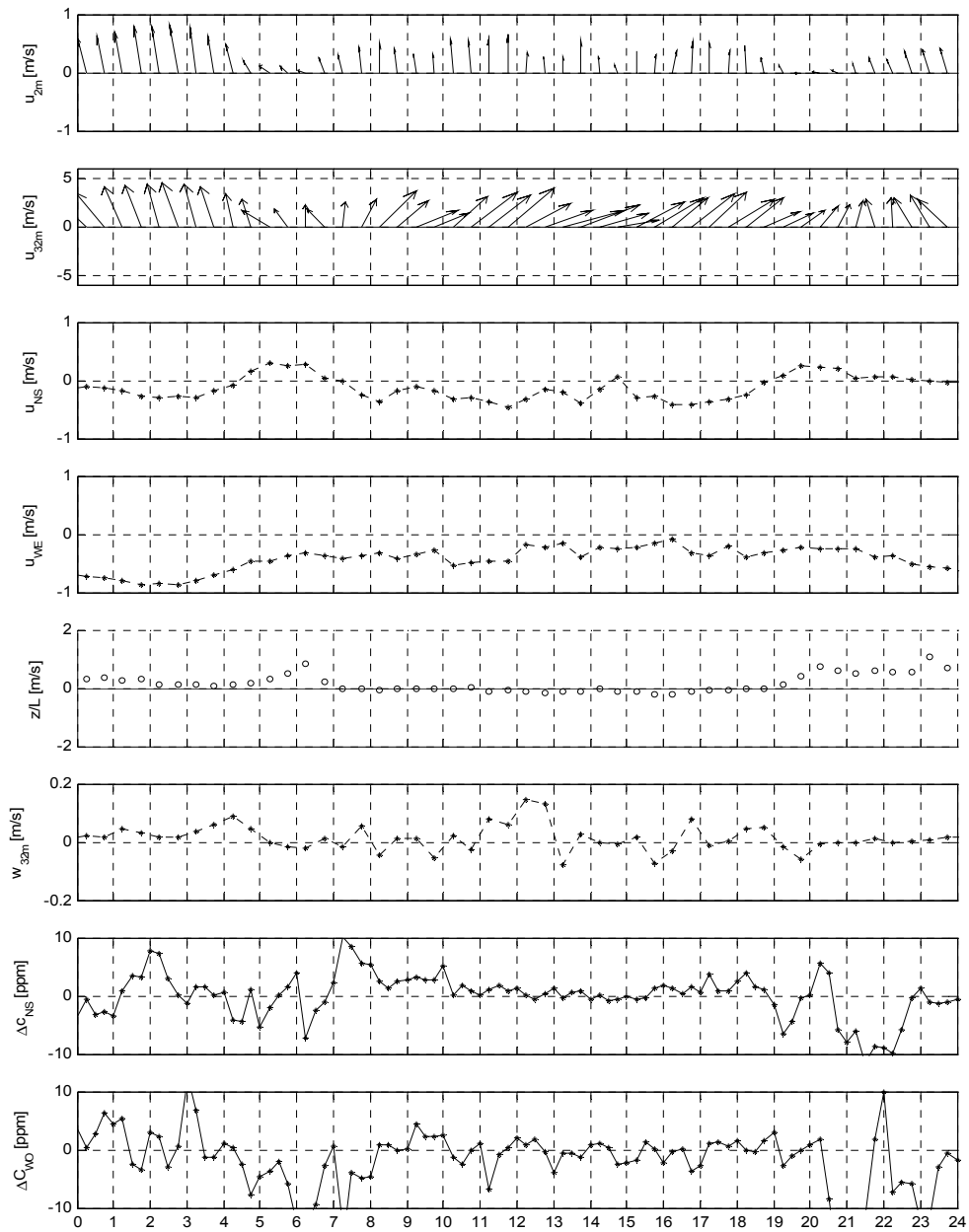


Abbildung 3: Zeitlicher Verlauf folgender Größen am 26. Juli 2003. Von oben nach unten: Mittlerer Horizontalwind in 2,25 m [ $\text{m s}^{-1}$ ], mittlerer Horizontalwind in 32 m [ $\text{m s}^{-1}$ ], dimensionslosen Stabilitätsparameter  $z/L$  ( $z$ : Messhöhe [m],  $L$ : Obukhov-Länge [m]), Windkomponente in Richtung NS ( $u_{\text{NS}}$ ) [ $\text{m s}^{-1}$ ], Windkomponente in Richtung WE ( $u_{\text{WE}}$ ) [ $\text{m s}^{-1}$ ],  $\text{CO}_2$ -Konzentrationsdifferenzen zwischen M1 und M2 ( $\Delta C_{\text{NS}}$ ) [ppm], und die  $\text{CO}_2$ -Konzentrationsdifferenzen zwischen M3 und Probennahmepunkte S9 ( $\Delta C_{\text{WE}}$ ) [ppm]. Die Windvektoren in meteorologischen Koordinaten. Die Zeit ist UTC.

Konzentrationsdifferenzen berücksichtigt ist keine klare Korrelation zur Stabilität zu erkennen (siehe Abbildung 3, linke Spalte). Demnach sind die Gradienten bei stabiler Schichtung zwar stärker ausgeprägt, zeigen aber keine deutlich bevorzugte Richtung. Ähnliches gilt auch für den Vertikalwind über dem Bestand (,Planar Fit'-Rotation der Bezugskordinaten gemäß Wilczak *et al.*, 2001). Eine deutliche allerdings negative Korrelation der Intensität (Betrag) des Vertikalwindes für  $z/L < -1$  spricht auch deutlich gegen ein von Aubinet *et al* (2003) beobachtetes systematisches Entrainment von Luft durch die Krone in den Stammraum bei nächtlicher stabiler Schichtung am Standort Weidenbrunnen.

Der Eindruck von sehr wechselhaften mikrometeorologischer Situationen hinsichtlich der horizontalen advektiven Bedingungen im Stammraum soll am Beispiel der Daten vom 26. Juli 2003 vereinfachend illustriert werden (siehe Abbildung 3). Zwischen 1:00 und 3:00 Uhr und 7:00 und 10:00 Uhr morgens zeigen sich in Richtung des NS-Transektes deutlich positive und abends zwischen 20:30 Uhr und 23:00 stark negative Gradienten. Betrachtet man einen durch die CO<sub>2</sub>-Horizontaltransekte und das CO<sub>2</sub>-Vertikalprofil aufgespannten Quader als Kontrollvolumen, so ergäbe sich unter der Annahme horizontaler Homogenität der Gradienten mit der Berücksichtigung der entsprechenden Windkomponenten ( $u_{NS}$ ) ein advektiver Austrag von CO<sub>2</sub> aus dem Kontrollvolumen in der Nacht und am Morgen, und ein Eintrag von CO<sub>2</sub> in der ersten Hälfte der folgenden Nacht. In Richtung des WE-Transektes hingegen müssten die länger anhaltenden negativen Gradienten zwischen 4:30 und 7:30 Uhr und zwischen 20:00 und 24:00 Uhr bei gegebener Windkomponente  $u_{WE}$  jeweils überwiegend CO<sub>2</sub>-Einträge in das Kontrollvolumen mit sich bringen.

#### 4. SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die gemessenen horizontalen CO<sub>2</sub>-Gradienten lassen außer einer direkten Korrelation ihrer Intensität mit  $z/L$  keine einfachen Muster erkennen, die auf eine systematischen advektive Beeinflussung der CO<sub>2</sub>-Bilanz schließen ließen, wie von Aubinet *et al* (2003) gefunden. Erkennbar sind aber eine relativ starke Dynamik und deutliche Einzelereignisse. Weitere Untersuchungen, an deren Ende eine vorsichtige quantitative Abschätzung der advektiven Flüsse stehen soll, werden sich insbesondere mit Korrelationen zwischen Gradienten- und Windfeldern, und mit Betrachtungen der CO<sub>2</sub>-Gesamtbilanz im Kontrollvolumen unter Berücksichtigung der Messwerte des Vertikalprofils und der turbulenten Flüsse beschäftigen.

#### LITERATUR

- Aubinet, M., Heinesch, B., Yernaux, M. (2003). Horizontal and vertical CO<sub>2</sub> advection in a sloping forest, *Boundary-Layer Meteorol.*, 108, 397-417.
- Baldocchi, D., Finnigan, J., Wilson, K., Paw U, K. T., Falge, E. (2000). On measuring Net Carbon Exchange over Tall Vegetation on complex Terrain, *Boundary-Layer Meteorol.*, 96, 257- 291
- Finnigan, J. (1999). A comment on the Paper by Lee (1998). " On Micrometeorological Observation of Surface-Air Exchange over Tall Vegetation", *Agric. For. Meteorol.*, 97, 55-64.
- Lee, X. (1998). On Micrometeorological Observation of Surface-Air Exchange over Tall Vegetation, *Agric. For. Meteorol.*, 91, 39-50.
- Paw U, K. T., Baldocchi, D., Meyers, T., Wilson, K. (2000). Correction of Eddy Covariance Measurement Incorporating Both Advective Effects and Density Fluxes, *Boundary-Layer Meteorol.*, 97, 487- 511.
- Thomas, C., Ruppert, J., Lüers, J., Olesch, J., Bertolini, T., Mayer, J.-C., Schröter, J., Delany, A. C., Foken, T. (2004). Komplexes Wald - Grenzschicht Experiment WALDATEM-2003, *Deutsch-Österreichisch-Schweizerische Meteorologen-Tagung*, Karlsruhe, Germany, 7 - 10 September 2004, (Extended Abstract and pdf-file on CD).
- Wilczak, J., Oncley, S., Stage, S. (2001). Sonic Anemometer Tilt Correction Algorithms, *Boundary-Layer Meteorol.*, 99, 127- 150.