

Diss. ETH No. 12795

On the Applicability of
Relaxed Eddy Accumulation and Common Methods
for Measuring Trace Gas Surface Fluxes

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH

for the degree of
DOCTOR OF NATURAL SCIENCES

presented by

CHRISTOF AMMANN
dipl. natw. ETH

born 22 December 1965

citizen of Kirchberg SG

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. A. Ohmura, examiner
Dr. R. L. Desjardins, co-examiner
Dr. F. X. Meixner, co-examiner
Dr. M. Rotach, co-examiner

Zürich, 1998

Summary

The accurate measurement of the trace gas exchange at the Earth's surface is very important for understanding various problems in current environmental research such as the greenhouse effect, atmospheric chemistry, aerosol and cloud formation, and nutrient cycling. Several techniques have been developed for measuring trace gas exchange at natural surfaces, among which the 'eddy correlation' technique is regarded as the most direct and reliable one. However, it requires trace gas measurements at a high temporal resolution, which are currently not available for most species. In order to overcome this problem, Desjardins (1972) proposed a modification of the eddy correlation technique called 'eddy accumulation', in a somewhat simplified form known as 'relaxed eddy accumulation' (Businger and Oncley, 1990). For this method, the fast response trace gas sensor is replaced by fast response sampling valves combined with accumulative or slow analysis techniques available for many trace gases.

In the present study, the relaxed eddy accumulation technique (REA) was investigated with respect to theoretical, methodological, environmental and instrumental requirements and limitations. For that purpose, a relaxed eddy accumulation system was built and tested during an extended field campaign in direct comparison with common flux measurement techniques, namely the eddy correlation and aerodynamic profile methods. The field experiment was performed in June/July 1995 over a senescent cereal field near Bellheim, Southern Germany. The eddy correlation dataset obtained for the fluxes of four different scalar quantities (temperature, CO₂, H₂O, O₃) allowed comprehensive simulation studies of the REA method for a wide range of environmental conditions. The REA b-factor as well as other REA related quantities in the inertial sublayer were described in a concise way within the framework of the Monin-Obukhov-similarity-theory, i.e. as a function of the dimensionless stability z/L . In good agreement with previous publications, a constant value of about 0.57 was obtained for unstable and near-neutral conditions. For stable conditions, however, a significant increase with stability was observed which could be well described by a logarithmic functional relationship between b and z/L . The systematic variation of the REA b-factor was examined and interpreted in relation to the bivariate joint frequency distribution of the vertical windspeed and the scalar quantity. Additional simulation studies concerning the influence of a deadband and several systematic error effects were also performed. They complement the findings of recent publications which are mostly based on a small sample size and limited to unstable daytime conditions as well as homogenous terrain.

The evaluation of the REA field measurements revealed several practical problems of the setup applied (after Baker et al., 1992). The most crucial effect turned out to be the non-constant sampling flow due to pressure fluctuations in the sampling system. It can be avoided in future experiments by a modification of the system design. The systematic errors were partly compensated by the estimation of effective b-factors based on the temperature data. This procedure yielded satisfying REA results (compared to the reference eddy correlation values) for the CO₂ uptake under unstable daytime conditions. A direct comparison with the profile method under favourable and limited fetch conditions (inhomogenous source areas) was made. In the latter case, the REA tended to give the same flux results like the eddy correlation, whereas the profile method often yielded unrepresentative or even physically implausible values.

Together with the findings of other publications, the results of the present study show that the relaxed eddy accumulation represents a self-standing theoretical concept relying only little on empirical assumptions. The REA method has substantial advantages in theory and practice compared to the profile techniques. It thus represents a useful alternative for the flux measurement of trace gases, for which no fast response sensors but accurate slow response or accumulative analysis techniques are available.

Zusammenfassung

Eine möglichst genaue Bestimmung des Spurengasaustausches an der Erdoberfläche ist sehr wichtig für das Verständnis vieler aktueller Probleme der modernen Umweltforschung wie z.B. Treibhauseffekt, Atmosphärenchemie, Aerosol- und Wolkenbildung oder globale Nährstoff-Kreisläufe. Die direkteste und deshalb vertrauenswürdigste Methode zur Flussmessung, die bisher eingesetzt wurde, ist die sogenannte 'Eddy-Korrelation'. Allerdings benötigt sie sehr schnelle Spurengas-Sensoren, die bisher nur für einige wenige Stoffe zur Verfügung stehen. Um dieses Problem zu umgehen, schlug Desjardins (1972) eine Modifizierung der Eddy-Korrelation vor, die später als 'Eddy-Akkumulation' und in einer vereinfachten Version als 'Relaxed-Eddy-Akkumulation' (REA) bekannt wurde. Bei diesen Methoden kann der schnelle Spurengassensor durch schnell reagierende Ventile ersetzt werden, welche den Probeluft-Strom modulieren und so eine langsame Analyse oder akkumulative Sammlung des Spurengases erlauben.

In der vorliegenden Arbeit wurde die REA unter theoretischen wie auch methodologischen Aspekten untersucht und bezüglich ihrer Vorteile und Limitierungen analysiert. Zu diesem Zweck wurde ein REA-System zur Messung des CO₂- und Wasserdampf-Flusses aufgebaut und in einer intensiven Feldmesskampagne getestet, in direktem Vergleich zu herkömmlichen Techniken wie der Eddy-Korrelation und der aerodynamischen Profilmethode. Das Feldexperiment wurde im Juni/Juli 1995 über einem seneszenten Triticale-Feld in der Nähe von Bellheim (Süddeutschland) durchgeführt. Die zeitlich hochaufgelösten Messdaten des Eddy-Korrelations-Systems (für Temperatur, CO₂, H₂O und O₃) erlaubten umfassende Simulationsstudien der REA-Methode für verschiedene Umweltbedingungen. Für die REA-Methode wichtige Größen wie z.B. der Proportionalitätsfaktor b konnten im Rahmen der Monin-Obukhov-Ähnlichkeitstheorie als Funktion des Stabilitätsparameters z/L beschrieben werden. Für instabile und nahe-neutrale Verhältnisse wurde, in Übereinstimmung mit Literaturwerten, ein konstanter b -Faktor von ca. 0.57 gefunden. Im stabilen Bereich wurde dagegen ein signifikanter Anstieg beobachtet, der sich durch eine logarithmische Beziehung zwischen b und z/L beschreiben lässt. Die systematische Variation des b -Faktors konnte durch eine Analyse der bivariaten Verteilung von Vertikalwind und transportierter skalarer Grösse erklärt werden. Weitere Simulationsstudien untersuchten den Einfluss eines Schwellenwertes für den Vertikalwind ('deadband') sowie verschiedener systematischer Fehlerfaktoren. Die gewonnenen Ergebnisse ergänzen die bisher veröffentlichten Resultate anderer Autoren, die meist auf kleinen Datensätzen beruhen und auf instabile Verhältnisse beschränkt sind.

Die Auswertung der REA-Feldmessungen deckte einige praktische Probleme des verwendeten Messsystems (nach Baker et al., 1992) auf. Dabei stellte der variierende Probeluftstrom, der durch Druckschwankungen im System verursacht wurde, die grösste Fehlerquelle dar. Es konnte jedoch eine Lösung für dieses Problem aufgezeigt werden, die in einer Modifikation des Messaufbaus besteht. Der systematische Fehler in den REA-Messungen konnte teilweise kompensiert werden durch die Berechnung effektiver b -Faktoren aus den Temperaturdaten des Eddy-Korrelations-Systems. Dieses Vorgehen lieferte befriedigende Resultate für die CO₂-Aufnahme unter instabilen Bedingungen. Ein direkter Vergleich mit der Profilmethode zeigte, dass die REA insbesondere für inhomogene Oberflächenbedingungen eine deutlich bessere Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Eddy-Korrelation erzielte.

Die vorliegende Untersuchung zeigt, zusammen mit den Resultaten anderer Studien, dass der REA-Methode ein eigenständiges und wohl definiertes Konzept zugrunde liegt, das nur zu einem geringen Grad auf empirischen Annahmen beruht. Im Vergleich zur Profilmethode zeigt die REA erhebliche theoretische wie auch praktische Vorteile. Sie stellt deshalb eine nützliche Alternative zur Flussmessung vieler Spurengase dar, für die keine schnellen Sensoren jedoch langsame Analyseverfahren mit ausreichender Genauigkeit zur Verfügung stehen.