

Matthias J. Zeeman

Environmental processes affecting the
carbon dioxide budget of grasslands
along an elevational gradient in Switzerland

Dissertation for the degree of Doctor of Sciences

February 2005 to December 2008



ISBN 978 3 909386 87 1

DISS. ETH NO. 18138

ENVIRONMENTAL PROCESSES AFFECTING THE
CARBON DIOXIDE BUDGET OF GRASSLANDS
ALONG AN ELEVATIONAL GRADIENT IN SWITZERLAND

A dissertation submitted to

ETH ZURICH

for the degree of

Doctor of Sciences

presented by

MATTHIAS JEROOM ZEEMAN

M.Sc. Environmental Sciences, Vrije Universiteit Amsterdam

Born 16 September 1978

of Dutch nationality

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Nina Buchmann, examiner

Prof. Dr. Torben R. Christensen, co-examiner

Dr. PD Werner Eugster, co-examiner

2008

Abstract

In Switzerland, the traditional three-stage grassland farming system consists of grazed or cut grasslands along a gradient from lowland (400 m) to alpine (2000 m) elevations. The influence of the climatic conditions and differences in farming management on the carbon dioxide (CO₂) exchange of these grasslands need to be studied in an integration along this elevational gradient. This thesis aims at quantifying the net CO₂ exchange, and relating temporal changes in the CO₂ exchange to climatic and management factors. Additionally, methodology is proposed for process studies of the CO₂ exchange of these grasslands by use of stable isotope analysis.

We measured carbon dioxide (CO₂) fluxes at three grassland sites (400, 1000, 2000 m elevation) and estimated carbon sequestration for two years (2006 and 2007). Grasslands at higher elevations (≥ 1000 m), managed at lower intensities, exhibited a larger net CO₂ uptake compared to intensively managed grasslands at lower elevations (400 m). Nevertheless, net CO₂ uptake rates during optimal growth were very similar for all three sites. Taking into account harvest outputs as well as manure inputs, we calculated the carbon stocks and their changes for grasslands at 400 m and 1000 m during two years. Similar to the cumulative net ecosystem CO₂ fluxes, the seasonal course of carbon stock changes were strongly driven by management intensity, in particular by timing and amount of manure applications. Despite differences in environmental and management conditions with elevation, both grassland sites were carbon sinks during 2006 and 2007 (between 60 and 150 g C m⁻² yr⁻¹). This provides also strong evidence that C stock can and must be managed adequately in the future, when climatic conditions not only affect carbon dynamics in soils and vegetation but also adaptive management of Swiss grasslands.

The application of ¹³C/¹²C in ecosystem-scale tracer models for CO₂ in air requires accurate measurements of mixing ratios and stable isotope ratios of CO₂. To increase measurement reliability and data intercomparability as well as to shorten analysis times, we have improved an existing field sampling setup with portable air sampling units and developed a laboratory setup for analysis of $\delta^{13}\text{C}$ of CO₂ in air by isotope ratio mass spectrometry (IRMS). The changes consist of (a) optimization of sample and standard gas flow paths, (b) additional software configuration and (c) automation of liquid nitrogen refilling for the cryogenic trap. We achieved a precision better than 0.1‰ and an accuracy of 0.11 ± 0.04 ‰ for $\delta^{13}\text{C}$ of CO₂ in air and unattended operation of measurement

sequences up to 12 hours. This clearly fulfills the quality criteria necessary to perform gradient measurements of stable isotope ratios of CO₂ in air for the study of atmosphere–biosphere interactions. For studies using the Keeling plot approach, e.g. to determine the signature of the respiration source via a statistical regression approach, the optimizations provide a clear and essential improvement for intercomparability of $\delta^{13}\text{C}$ measurements.

A recently proposed concept for conditional eddy covariance flux analysis was adopted to grasslands, with the aim to identify and quantify daytime sub-canopy respiration fluxes. To verify the concept, eddy covariance measurements of CO₂ and the isotopologues of CO₂ were made during a four days campaign in August 2007, using a novel quantum cascade laser absorption spectrometer, capable of high time resolution stable isotope analysis. The effects of a grass cut during the measurement period could be detected and resulted in a sub-canopy source conditional flux classification, for which the isotope composition of the CO₂ could be confirmed to be of a respiration source. However, the conditional flux method did not work for an undisturbed grassland canopy. We attribute this to the flux measurement height that was chosen well above the roughness sublayer, where the natural isotopic tracer ($\delta^{13}\text{C}$) of respiration was too well mixed with background air.

Zusammenfassung

Das traditionelle dreistufige Landnutzungssystem des Schweizer Alpenraums bringt gemähte Wiesen und beweidete Flächen entlang eines Höhengradienten in einen betrieblichen Zusammenhang. Diese Stufen erstrecken sich im Idealfall vom Talbetrieb im Unterland (um 400 m ü. M.) über die Maiensässe bis zu den Alpweiden auf 2000 m ü. M. und darüber. Um dieser betrieblichen Einheit gerecht zu werden, müssen die Einflüsse des Klimas und der Unterschiede der Bewirtschaftung auf den CO₂-Austausch solcher Landwirtschaftsflächen mit der Atmosphäre integrativ entlang eines entsprechenden Höhengradienten erforscht werden.

Das Ziel der vorliegenden Dissertation war es, entlang eines Höhengradienten den Netto-CO₂-Austausch quantitativ zu erfassen und dessen zeitliche Entwicklung und Variabilität in Bezug zu Witterungsbedingungen (stellvertretend für Klima) und Bewirtschaftungsintensität und -eingriffen zu setzen. Ausserdem wurde eine neue Methode entwickelt, die eine erleichterte und verbesserte Erforschung der am CO₂-Austausch beteiligten Prozesse mittels natürlich vorkommender stabiler Isotope erlaubt.

Es wurden die CO₂-Austauschflüsse an drei Grasland-Standorten auf 400, 1000 und 2000 m ü. M. gemessen, und die Kohlenstoff-Sequestrierungsrate für die zwei Jahre 2006 und 2007 abgeschätzt. Wiesen und Weiden der höheren Stufen (≥ 1000 m ü. M.), die mit geringerer Intensität bewirtschaftet werden als Tallagen, zeigten eine höhere Netto-CO₂-Aufnahmerate als die intensiv genutzte Naturwiese auf 400 m ü. M. Dessen ungeachtet waren die Netto-Assimilationsleistungen während der Periode mit optimalem Pflanzenwachstum auf allen drei Höhenstufen fast gleich. Werden zudem die Kohlenstoffexporte bei der Ernte und die Kohlenstoffeinträge bei der Hofdünger-Ausbringung berücksichtigt, können die Veränderungen der Gesamtkohlenstoffmenge (die Sequestrierung) rechnerisch abgeschätzt werden. Dies war an den beiden Standorten auf 400 m und 1000 m ü. M. möglich, wo ganzjährige CO₂-Austauschmessungen vorliegen. Dabei zeigte sich, dass die saisonalen Export- und Importmengen ähnlich den über die jeweilige Zeitperiode aufsummierten CO₂-Austauschmengen in erster Linie durch die Bewirtschaftungsintensität erklärt werden konnten, speziell durch die Wahl der Zeitpunkte der Hofdünger-Ausbringung und der ausgebrachten Hofdüngermenge. Trotz der beträchtlichen klimatischen Unterschiede der Höhenlagen waren die Wiesen und Weiden beider Höhenlagen Kohlenstoff-Senken während der Jahre 2006 und 2007 mit Aufnahmeraten zwischen 60

und $150 \text{ g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$. Dies zeigt deutlich, dass die Kohlenstoff-Vorräte in derartigen landwirtschaftlichen Böden nachhaltig bewirtschaftet werden können, und in Zukunft auch entsprechend bewirtschaftet werden müssen, wenn sich als Folge des Klimawandels nicht nur die klimatischen Bedingungen die Kohlenstoffdynamik von Grasland-Standorten verändern, sondern auch die Bewirtschaftungsweisen und -termine in der Schweizer Landwirtschaft daran angepasst werden sollten.

Die Verwendung des natürlichen $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnisses als Tracer für atmosphärisches CO_2 in Ökosystem-Modellen bedingt die exakte Messung der Mischungsverhältnisse und der Verhältnisse der stabilen Isotope ^{13}C und ^{12}C in CO_2 . Damit die Verlässlichkeit solcher empirischer Untersuchungen und zudem die Vergleichbarkeit mit Messungen anderer Laboratorien verbessert werden kann, bei gleichzeitiger Verkürzung des Zeitaufwandes für die Analyse, wurden die vorhandenen Probenahme-Einrichtungen und deren Einbindung in die automatisierte Laboranalyse weiterentwickelt. Diese Weiterentwicklung betrifft die tragbaren Luft-Probenahmegeräte sowie die $\delta^{13}\text{C}$ -Analyse des Ionen-Verhältnis-Massenspektrometers (IRMS). Die erreichten Verbesserungen sind: (a) die Optimierung des Einlass-Systems für Proben- und Standardgase, (b) die Anpassung der Prozess-Steuerungs-Software und (c) die Automatisierung der Nachfüllung der für die Proben-Vorbereitung nötigen Kühlfälle mit Flüssig-Stickstoff. Mit diesen Verbesserungen konnte eine Analysepräzision besser als 0.1‰ und eine absolute Genauigkeit von $0.11 \pm 0.04\text{‰}$ für $\delta^{13}\text{C}$ in Luft- CO_2 , sowie der unbemannte Analysebetrieb während 12 Stunden erreicht werden. Damit erfüllt das nun zur Verfügung stehende System die Qualitätskriterien bestens, die nötig sind, um Gradienten-Messungen in Umgebungsluft durchzuführen, wie sie für die Erforschung des Austauschs von stabilen Isotopen in CO_2 zwischen Biosphäre und Atmosphäre angestrebt werden. Zudem führen die so realisierten Weiterentwicklungen zu einer Verbesserung der Vergleichbarkeit zwischen unterschiedlichen Labors und Untersuchungen hinsichtlich der $\delta^{13}\text{C}$ -Signaturen, die aus dem Keeling-Plot-Ansatz ermittelt werden. Dieser Ansatz erlaubt es, aus Isotopen-Messungen in der Luft auf die Herkunft des CO_2 – typischerweise der Boden-Respiration – zu schliessen.

Schliesslich wurde ein neuartiges Konzept der konditionalen Analyse von Eddy-Kovarianz-Flussmessungen an die Bedingungen von Grasland-Ökosystemen angepasst. Ziel war es, Hinweise auf Respirationprozesse im und unter dem Pflanzenbestand zu finden, und deren Bedeutung innerhalb des Netto- CO_2 -Austausch des Ökosystems zu quantifizieren. Um dieses Konzept zu testen, wurde während einer Feldkampagne von vier Tagen im August 2007 mittels eines neuartigen Quantum-Kaskaden Laser-Absorptions-Spektrometers die Konzentration von CO_2 und dessen Isotopologe mit hoher zeitlicher Auflösung gemessen. Der Effekt eines Grasschnitts konnte eindeutig in den Messungen festgestellt werden, und die Isotopenverhältnisse in der Luft, die aus dem Pflanzenbestand aufsteigt, deuteten darauf hin, dass es sich um CO_2 aus heterotro-

pher Respiration handeln muss. Allerdings versagte diese Methode ihre Dienste vor dem Grasschnitt. Es wird vermutet, dass die Messhöhe über dem Bestand ein entscheidender Faktor ist: es wurde deutlich über der bodennahen Rauigkeitschicht gemessen, in einer Höhe, wo der natürliche $\delta^{13}\text{C}$ Tracer aus Respirationsquellen bereits fast vollständig mit der Atmosphärenluft vermischt ist. In Zukunft dürfte deshalb eine tiefere Messhöhe nötig sein, um auch bei dichtem Pflanzenbestand mit dieser neuartigen Methode erfolgreich zu sein.