

DISS. ETH NO. 23149

# **Toward using atmospheric carbon dioxide observations to estimate the biospheric carbon flux of the Swiss Plateau**

A dissertation submitted to

ETH ZURICH

for the degree of

Doctor of Sciences

presented by

BRIAN JOHANNES ONEY

MSc. Global Change Ecology., Uni. Bayreuth

born November 9, 1984

citizen of USA

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Nicolas Gruber, examiner

Dr. Dominik Brunner, co-examiner

Dr. Christoph Gerbig, co-examiner

2016

# Abstract

The lack of knowledge of the terrestrial carbon cycle translates into uncertain climate change projections due to the strong, yet uncertain relationship between terrestrial carbon fluxes and climate. Atmospheric carbon observations (defined here as the sum of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and CO) integrate information on carbon fluxes on Earth's surface, which can be used to assess the understanding of these processes through inverse carbon flux modeling. Due to the high spatial and temporal variability of terrestrial carbon fluxes, atmospheric observations representative of the regional scale ( $\sim$ 10–1000 km) are necessary to better understand these fluxes. My contributions have aided the goal of development of a comprehensive carbon observation and modeling system. This system aims to better quantify and understand natural fluxes and anthropogenic emissions over the Swiss Plateau, as part of the CarboCount project, using observations from its newly established network of four sites: Beromünster, Früebüel, Gimmiz, and Lägern-Hochwacht.

The accurate measurement of atmospheric carbon is a prerequisite of inverse carbon flux modeling. Therefore, reference gas cylinders were prepared, their mixing ratios referenced to the respective international scales, and distributed to the observation sites, in order to complete site construction. The simple measurement system at Lägern-Hochwacht has, except for a single pump failure and an extended failure to store data, successfully operated since August 2012 and delivered data sets with a temporal coverage of more than 97%. Therefore, a detailed description of its instrumentation is presented. The measurements of all four sites were repeatedly evaluated for quality with the reference gases. The uncertainty assessment of these measurements and their temporal aggregation are presented and discussed. Finally, gathered experience is offered for the future long-term, cost-effective monitoring efforts of atmospheric carbon.

The value of an atmospheric carbon monitoring site to regional-scale studies depends on the information contained in its observations. The seasonal and diurnal meteorological variability of the lower troposphere play an important role in determining this information. Therefore, the characteristics relevant to forthcoming regional scale modeling studies of the established observation sites were investigated, and strengths and weaknesses of the site's data sets as well as the employed atmospheric transport models are discussed. Due to local topography, tower characteristics, and site elevation, among others, observations differ between sites, especially during nighttime. However, these observations differ much less during daytime, owing to intense daytime vertical mixing. From the analysis of simulated surface sensitivity, it is likely that atmospheric carbon observations consistently representative of the Swiss Plateau are provided by Beromünster and Lägern-Hochwacht. On the other hand, temporal filtering of the observations from Gimmiz and Früebüel is likely necessary to remove local influence, due likely to the model's inability to accurately represent transport in the lower troposphere. Furthermore, due to the complex terrain directly surrounding Lägern-Hochwacht, similar filtering of its observations may be also necessary. These observations contain much information reflecting the complexity of the Swiss Plateau landscape, and will assuredly provide a challenge for future inverse modeling studies.

To constrain biospheric carbon fluxes with carbon dioxide CO<sub>2</sub> observations, it is necessary to first isolate the biospheric component of these observations. The standard procedure to accomplish this entails using an

atmospheric transport model to simulate the anthropogenic CO<sub>2</sub> component and the initial or background CO<sub>2</sub> mixing ratios. However, this introduces considerable uncertainty into the biospheric component and thereby the inverted biospheric carbon fluxes. With this in mind, a method to isolate the biospheric portion of CO<sub>2</sub> observations using carbon monoxide (CO) observations is developed, presented, and evaluated using observations from the Beromünster and Lägern-Hochwacht sites. Basically, this method scales CO observations above background CO mixing ratios to anthropogenic CO<sub>2</sub> using the observed wintertime CO<sub>2</sub>/CO regional signal relationship. The evaluation suggests that the proposed method substantially improves our ability to determine the biospheric CO<sub>2</sub> signal. Performance of the method decreased when anomalously CO-enriched air masses were brought by northeasterly winds. Qualitative interpretation of the resulting biospheric signals confirms the expectation that the Swiss Plateau acted as a carbon sink during the major growing season of 2013 (May to August). Furthermore, the biospheric signals and related carbon fluxes are sensitive to solar radiation, precipitation, and ambient air temperature. Here, higher air temperatures (> 20°C) likely correlate with a diminished strength of the Swiss Plateau carbon sink.

This work not only contributed to the successful installation and operation of a new observation network, but also lays the foundations for future inverse carbon flux modeling studies. Accomplishments include: gaining invaluable observation site operation experience, demonstration of the rich information observed at the observation sites, indication which sites are suited to regional-scale carbon studies, and the development of a method to isolate the biospheric signal from CO<sub>2</sub> observations while circumventing problems of the standard approach. All of this sets the stage both for future observation endeavors and provides detailed insight for future carbon flux inversion work.

# Zusammenfassung

Mangelndes Wissen über den terrestrischen Kohlenstoffkreislauf führt zu unsicheren Projektionen des Klimawandels aufgrund der starken, aber unsicheren Beziehung zwischen terrestrischen Kohlenstoffflüssen und dem Klima. Atmosphärische Kohlenstoffmessungen (hier die Summe von CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, und CO) integrieren Informationen über Kohlenstoffflüsse auf der Erdoberfläche, die verwendet werden können, um das Verständnis dieser Prozesse zu beurteilen anhand inverser Modellierung der Kohlenstoffflüsse. Aufgrund der hohen räumlichen und zeitlichen Variabilität terrestrischer Kohlenstoffflüsse, sind CO<sub>2</sub>-Beobachtungen notwendig, die für regionalen Skalen ( $\sim$ 10–1000 km) repräsentativ sind, um diese Flüsse besser zu verstehen. Diese im Rahmen des CarboCount Projekts durchgeführte Arbeit zielt darauf ab, das Verständnis der Kohlenstoffflüssen im Schweizer Mittelland mit Beobachtungen von vier neu etablierten Standorte zu erweitern: Beromünster, Früebüel, Gimmiz und Lägern-Hochwacht.

Die inverse Kohlenstoffflussmodellierung setzt die genaue Messung von atmosphärischem Kohlenstoff voraus. Deshalb wurden Referenzgasflaschen vorbereitet, ihre Mischungsverhältnisse auf internationalen Messskalen bestimmt und auf die Messstationen verteilt, um den Standortaufbau zu vervollständigen. Das Messsystem bei Lägern-Hochwacht hat ausser eines Pumpenausfalls seit August 2012 erfolgreich gemessen und lieferte Datensätze mit einer zeitlichen Abdeckung von mehr als 97 %. Darum wird eine ausführliche Beschreibung der Instrumentierung von diesem Messstandort vorgestellt. Mit den Referenzgasen wurden die Messungen aller vier Standorte laufend auf Qualität geprüft. Die Unsicherheitsabschätzung dieser Messungen und ihre zeitliche Aggregation werden vorgestellt und besprochen. Schlussendlich werden Empfehlungen für die langfristige und kosteneffektive Überwachung von atmosphärischen Kohlenstoff gegeben.

Der Wert eines atmosphärischen Kohlenstoffmessstandorts für Studien der regionalen Skala ist abhängig von der in den Beobachtungen enthaltenen Information. Die saisonale und tägliche meteorologische Variabilität der unteren Troposphäre bestimmt zu einem grossen Teil diese Informationen. Darum wurden die für bevorstehende Modellstudien relevante Eigenschaften der etablierten Messstandorte untersucht, und die Stärken und Schwächen der dazugehörigen Datensätze sowie die verwendeten atmosphärischen Transportmodelle diskutiert. Durch lokale Topographie und Messstandorteigenschaften wie zum Beispiel die Höhe des Einlasses, waren Beobachtungen zwischen den Standorten unterschiedlich, insbesondere während der Nacht. Aufgrund der intensiven vertikalen Durchmischung unterschieden sie sich tagsüber hingegen nur wenig. Anhand einer Analyse der Sensitivität gegenüber der Landesoberfläche, ist es wahrscheinlich dass die atmosphärische Kohlenstoffmessungen von Beromünster und Lägern-Hochwacht generell repräsentativ für das Schweizer Mittelland sind. Für die Standorte Gimmiz und Früebüel ist andererseits eine zeitliche Filterung notwendig um lokale Einflüsse zu entfernen, da das aktuelle Transportmodell die in der unteren Troposphäre vorhandene meteorologische Variabilität nicht ausreichend akkurat darstellen kann. Weiterhin könnte wegen des unmittelbar an Lägern-Hochwacht angrenzenden räumlich komplexen Geländes eine ähnliche Filterung der Beobachtungen erforderlich sein. Die Datensätze spiegeln die Komplexität des Schweizer Mittellands wieder, die sicher eine Herausforderung für künftige inverse Modellierungsstudien wieder.

Um biosphärische Kohlenstoffflüsse mit Kohlendioxidmessungen (CO<sub>2</sub>) zu bestimmen, ist es notwendig die

biosphärische Komponente von diesen Beobachtungen zu trennen. Das Standardverfahren dazu verwendet ein atmosphärisches Transportmodell für die Simulation der anthropogenen CO<sub>2</sub> Komponente sowie die CO<sub>2</sub> Randbedingungen oder Hintergrundmischungsverhältnissen. Aber dies verursacht in der Regel erhebliche Unsicherheiten in der biosphärische Komponente, und damit in die invertierten biosphärischen Kohlenstoffflüsse. Ein in diesem Projekt entwickeltes Verfahren zur Trennung der biosphärischen Komponente von CO<sub>2</sub>-Beobachtungen unter Verwendung von Kohlenmonoxidmessungen (CO) soll vorgestellt und anhand der Beobachtungen von den Beromünster und Lägern-Hochwacht Messstandorten evaluiert werden. Grundsätzlich skaliert diese Methode CO-Beobachtungen über den Hintergrundmischungsverhältnisse zu der anthropogenen Komponente von CO<sub>2</sub> mit Hilfe der während des Winters beobachteten Verhältnisse zwischen den regionalen CO und CO<sub>2</sub> Signalen. Die Bewertung deutet darauf hin, dass die vorgeschlagene Methode unsere Fähigkeit, das biosphärische CO<sub>2</sub> Signal zu bestimmen, deutlich verbessert. Die Verbesserung fällt aber geringer aus, wenn Luftmassen, die ungewöhnlich hoch mit CO angereichert sind, aus dem Nordosten zur Schweiz fliessen. Qualitative Interpretation der resultierenden biosphärische Signale bestätigen die Erwartung, dass das Schweizer Mittelland als Kohlenstoffsenke während der Hauptvegetationszeit des Jahres 2013 (Mai bis August) fungierte. Weiterhin reagieren die Biosphärensignale und die damit verbundenen Kohlenstoffflüssen wie von der Literatur zu erwarteten auf Sonneneinstrahlung, Niederschlag und Lufttemperatur. Dazu beobachten wir eine positive Korrelation zwischen höheren Lufttemperaturen (> 20°C) und einer weniger starken Kohlenstoffsenke des Schweizer Mittelands.

Zu den wichtigen Leistungen der Arbeit gehört die Sammlung von Betriebserfahrungen auf den Messstandorten, die von unschätzbarem Wert sind, das Erstellen erster Datenanalysen, das Finden von Hinweisen darauf welche Beobachtungen geeignet sind um auf regionalen Skalen Kohlenstoffflussstudien durchzuführen, und die Entwicklung einer Methode zur Trennung des biosphärischen CO<sub>2</sub> Signals ohne Modell- und Inventarunsicherheiten zu übertragen. Alles in allem schafft dies eine fundierte Grundlage für künftige Messkampagnen und stellt einen guten Anknüpfungspunkt für nachfolgende Studien zu Kohlenstoffflussinversionen dar.