



Doctoral Thesis

## **Climatic and biological drivers of temporal dynamics and feedbacks of the carbon balance of forests**

**Author(s):**

Zielis, Sebastian

**Publication Date:**

2014

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010252548> →

**Rights / License:**

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

DISS. ETH NO. 22096

**Climatic and biological drivers of temporal dynamics and  
feedbacks of the carbon balance of forests**

A thesis submitted to attain the degree of

DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH

(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

Sebastian Zielis

Dipl.-Umweltwiss., Trier University

born on April 27, 1984

citizen of

Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Nina Buchmann, examiner

PD Dr. Werner Eugster, co-examiner

Dr. Roman Zweifel, co-examiner

apl. Prof. Dr. Andreas Ibrom, co-examiner

2014

## Abstract

Forest ecosystems, covering a third of the world's land surface, play a major role in the global carbon (C) cycle due to their ability to take up and store large amounts of atmospheric carbon dioxide (CO<sub>2</sub>). Thus, accurate and reliable estimates of annual forest C budgets are needed, e.g. for post-Kyoto agreements on national levels. However, the large inter-annual variability and still existing knowledge gaps on drivers and their underlying ecophysiological mechanisms of C exchange processes result in profound difficulties explaining and calculating annual forest C budgets. Uncertainties of these estimates need to be substantially reduced. Hence, this PhD project investigated climatic and biological drivers of temporal and dynamic feedbacks of the C balance of forest ecosystems, including tree growth as its major component.

The aim of this thesis was addressed by analysing data of eddy covariance (EC) measurements of the CO<sub>2</sub> exchange as well as dendrometer and tree-ring derived data on tree growth of Swiss, European, and North American forests, covering a broad gradient of climatic conditions and strongly varying site characteristics. First, concentrating on Swiss forests, we showed that the C balance of a subalpine coniferous forest was both strongly and positively driven by current and previous year's weather conditions in spring (March, April, May). Explained inter-annual variability of the net ecosystem productivity (NEP) rose from 20 % to 53 %, when the previous year was included into the statistical analysis, indicating delayed responses of forest NEP to previous year's weather. The relevance of (current year) spring weather was also confirmed by tree-ring analysis of the same subalpine forest as well as by analysis of EC data of a mixed deciduous mountain forest in Switzerland. Air and soil temperature in spring were frequently identified as the driving climate variables of NEP.

By expanding our analysis to the European scale and additionally including two North American forest ecosystems, we could confirm both the single-site results of the influence of the previous year on and the importance of spring for the C balance of strongly differing forests. We quantified that on average (eight out of nine sites), explained inter-annual variability of NEP rose from 49 % to 64 % when considering both current and previous year's weather, with weather conditions in current and previous year's spring being highly influential for forest NEP also on this larger

spatial scale. Yet, the response magnitude to previous year's weather varied strongly among sites. The strength of this varying response magnitude was determined by exposure to cold climatic conditions and the productivity of the forest, with stronger exposition to low temperatures and lower productivity leading to a more pronounced delayed response. Overall, we provided strong evidence for a consistent delayed response of NEP in boreal and temperate forests and the importance of spring conditions. Also, the compensation of respiratory losses, usually occurring in spring, were shown to be of special importance for year-end NEP of several European forests, explaining on average 70 % thereof, and thus, further emphasizing the strong weight of this season on the forest C balance.

However, availability of EC-derived forest NEP data, which is used to determine the forest C budget, is often limited due to the small number of EC sites throughout the world. More widely available data on tree-growth, as measured via tree-ring width or dendrometers, bear large potential to explain NEP, however, linking both information has not been done yet on a larger spatial scale. Thus, we analysed the link between EC derived NEP and tree growth, first using tree-ring data of a Swiss subalpine coniferous forests and in a next step dendrometer data of six highly differing European forests. In the first step, we were able to show a close and positive link between NEP and tree-growth on an annual time scale ( $r = 0.661$ ). The link was even more profound within the multi-site study, in which we build a simple regression model base on dendrometer data, which was able to explain on average 85 % of NEP on a daily basis. The only driver in this model was identified as "time to grow", defined as the tree-growth amplitude over time.

Our results strongly suggest that including delayed responses of NEP as well as measures integrating over meteorological and biological conditions, such as tree-growth, in forest C budget estimates have great potential to increase their accuracy and reliability as a result of increased process understanding. Moreover, the development of weather conditions in spring under future climate change will be of high importance for the C budget of temperate and boreal forest ecosystems, given the strong determining power of this season as shown in this PhD project.

## Zusammenfassung

Waldökosysteme bedecken ein Drittel der Landoberfläche der Erde und spielen durch ihre Fähigkeit, grosse Mengen an atmosphärischem Kohlenstoffdioxid ( $\text{CO}_2$ ) aufzunehmen und langfristig zu speichern, eine entscheidende Rolle im globalen Kohlenstoffkreislauf. Aus diesem Grund werden genaue und verlässliche Abschätzungen des Kohlenstoffbudgets für Waldökosysteme, beispielsweise für nationale Folgevereinbarungen zum Kyoto-Protokoll, benötigt. Allerdings gestaltet sich die Abschätzung des jährlichen Kohlenstoffbudgets von Waldökosystemen als äusserst schwierig. Dies liegt zum einen an deren grosser zwischenjährlicher Variation, zum anderen bestehen Wissenslücken bezüglich Treibern und den zugrunde liegenden ökophysiologischen Mechanismen des Kohlenstoffaustausches zwischen Atmosphäre und Biosphäre. Es gilt die Unsicherheiten dieser Abschätzungen deutlich zu reduzieren. Das Ziel dieser Doktorarbeit war es daher, klimatische und biologische Treiber und deren zeitliche und dynamische Rückkopplung auf den Kohlenstoffhaushalt von Waldökosystemen, inklusive des Baumwachstums als dessen Hauptkomponente zu untersuchen.

Um dieses Ziel zu erreichen, analysierten wir Daten des  $\text{CO}_2$ -Austausches sowie des Baumwachstums von Schweizer, europäischen und nordamerikanischen Wäldern, die einen breiten Gradienten klimatischer und standorttypischer Bedingungen abdecken. Die Daten stammten dabei aus Eddy-Kovarianz-, Dendrometer- und Baumring-Messungen. Wir zeigten zunächst, dass der Kohlenstoffhaushalt eines Schweizer subalpinen Fichtenwaldes (Davos) sowohl durch Witterungsbedingungen des diesjährigen Frühlings (März, April, Mai) als auch durch die des Vorjahres-Frühlings positiv beeinflusst wurde. Durch die Berücksichtigung der Vorjahres-Witterung stieg der erklärbare Anteil an der zwischenjährliche Variabilität der Netto-Ökosystemproduktivität (NEP) von 20 % auf 53 % und zeigt damit deutlich die Reaktion der NEP des Waldökosystems auf Vorjahreseinflüsse. Die Bedeutung des Frühlings für den Kohlenstoffhaushalt konnten wir ebenfalls durch Analysen von Baumringen des gleichen Standortes sowie durch Analysen des  $\text{CO}_2$ -Austausches über einem Schweizer Berg-Mischwald (Lägeren) bestätigen. Bei diesen Analysen wurden wiederholt Luft- und Bodentemperatur des Frühlings als die entscheidenden Treiber der NEP identifiziert.

Durch die Ausdehnung unserer Analysen auf sieben europäische und zwei nordamerikanische Waldökosysteme konnten wir die vorherigen Resultate bezüglich des Einflusses der Vorjahreswitterung sowie der Bedeutung von Witterungsbedingungen im Frühling auf die NEP auch für eine grössere räumlicher Skala und stark unterschiedliche Wälder bestätigen. Im Durchschnitt stieg der erklärbare Anteil an der zwischenjährliche Variabilität der NEP unter Berücksichtigung von acht der neun Waldstandorte von 49 % auf 64 %, wenn neben der diesjährigen Witterung auch die des Vorjahres berücksichtigt wurde. Hierbei zeigte sich der Frühling wiederum als die Jahreszeit mit dem grössten Einfluss. Die Reaktion auf die Vorjahreswitterung variierte aber beträchtlich zwischen den untersuchten Standorten. Wir konnten zeigen, dass Wälder, die häufig kalten Witterungsbedingungen ausgesetzt sind sowie eine geringe Produktivität aufweisen, stärker auf Vorjahreseinflüsse reagieren. Zusammenfassend liefern wir somit einen deutlichen Hinweis, dass die verzögerte Reaktion der NEP auf Vorjahresbedingungen ein generelles Phänomen von Wäldern der borealen und gemässigten Klimazone ist. Darüber hinaus konnten wir über den Zeitpunkt der Kompensation von Respirationsverlusten im Frühling 70 % der NEP zum Jahresende erklären. Da diese Kompensation häufig im Frühling erfolgt, zeigt dies einmal mehr die Bedeutung dieser Jahreszeit für den Kohlenstoffhaushalt von Waldökosystemen.

Die Verfügbarkeit von NEP-Daten für Waldökosysteme, gemessen mittels der Eddy-Kovarianz-Methode, ist jedoch aufgrund der weltweit begrenzten Anzahl von Messstandorten limitiert. Das durch weit verbreitete Dendrometer-Messungen oder Baumring-Analysen bestimmte Baumwachstum hingegen birgt ein grosses Potential einen Grossteil der NEP zu erklären. Der Zusammenhang beider Variablen wurde aber bis jetzt noch nicht auf grösserer räumlicher Ebene bestätigt. Aus diesem Grund analysierten wir diesen Zusammenhang in einem ersten Schritt mittels Baumring- und NEP-Daten eines Schweizer subalpinen Nadelwaldes (Davos), gefolgt von einer Analyse auf sechs sich stark unterscheidenden europäischen Waldstandorten. Für letztere Analyse verwendeten wir zeitlich hochaufgelöste Dendrometer-Daten anstelle der Baumringe. Die erste Analyse ergab einen engen positiven Zusammenhang zwischen NEP und Baumwachstum auf jährlicher Basis ( $r = 0.661$ ). Dieser Zusammenhang zeigte sich noch ausgeprägter auf den sechs europäischen Standorten, für die wir mit Hilfe von Dendrometer-Daten und einem einfachen linearen Regressionsmodell 85 % der täglichen NEP erklären konnten. Den

einzigsten Treiber in diesem Modell identifizierten wir als “time to grow”, definiert als die Amplitude des Baumwachstums über die Zeit.

Die Ergebnisse dieser Doktorarbeit lassen den Schluss zu, dass die Berücksichtigung von witterungsbedingten Vorjahreseinflüssen auf die diesjährige Netto-Ökosystemproduktivität von Wäldern und das gleichzeitig gewonnene Prozessverständnis ein grosses Potential in sich tragen, die Qualität und Verlässlichkeit von Abschätzungen des Kohlenstoffbudgets von Waldökosystemen deutlich zu erhöhen. Dies trifft auch auf die Berücksichtigung des Baumwachstums zu, welches sich als integrierendes Mass für biologische und meteorologische Bedingungen im gesamten Waldökosystem herausgestellt hat. Zudem wird die zukünftige Entwicklung der Witterungsbedingungen im Frühling unter dem Einfluss des Klimawandels eine entscheidende Rolle für das Kohlenstoffbudget von Wäldern der gemässigten und borealen Klimazone spielen, bedenkt man die hier gezeigte starke Einflussnahme dieser Jahreszeit auf deren Kohlenstoffhaushalt.