



Doctoral Thesis

Carbon budget of Swiss forests Evaluation and application of process models for assessing the future impact of management and environmental change

Author(s):

Schmid, Stéphanie

Publication Date:

2005

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005068907> →

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](#).

**Carbon budget of Swiss forests: Evaluation and application of
process models for assessing the future impact of management
and environmental change**

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH
For the degree of
DOCTOR OF NATURAL SCIENCES

Presented by
Stéphanie Schmid
Dipl. Natw. ETH
Born 31st October, 1974
Citizen of Zürich (ZH) and Tamins (GR)

Accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Harald Bugmann, examiner
Dr. Bärbel Zierl, co-examiner
Dr. Peter Biber, co-examiner

Summary

Forests play an important role in the global carbon cycle. Particularly during the last decades, the global carbon cycle has been strongly affected by the anthropogenic accumulation of carbon dioxide (CO₂) in the atmosphere. These changes in the carbon cycle are likely to lead to changes in the global climate. Therefore, the Kyoto Protocol was put into force, which aims at reducing the atmospheric concentration of CO₂ and other greenhouse gases. One of the measures for this reduction is the sequestration of CO₂ in terrestrial ecosystems, such as managed forests. The present study addresses the potential of Swiss forests to sequester and store carbon, and thereby focuses on the impact of forest management and environmental changes on these carbon pools in the future.

The objectives of this thesis were (1) to evaluate and apply two dynamic forest growth models to estimate the long-term (100 years, 1996-2095) above- and belowground carbon pools and fluxes of four representative Swiss forest types, (2) to assess the effect of different forest management regimes on the carbon budget of these forests, (3) to estimate the impact of changes in climate and atmospheric CO₂ concentration on the above- and belowground carbon pools in these forests in combination with changes in the management regime, and (4) to compare the carbon pools and fluxes of the 21st century that result from the different models.

For the quantitative assessment of future carbon pools and fluxes, the distance-dependent, individual-based model SILVA (only aboveground processes) and the process-based, biogeochemical model Biome-BGC (above- and belowground processes) were used. Both models have specific advantages for assessing different aspects of the future carbon budget considered in this study. Since SILVA has a high level of detail regarding forest structure, this model is most useful for simulating the impact of specific management activities. The advantage of Biome-BGC is that the modeled processes are based on detailed knowledge about the underlying biological and ecological processes, which is ideal for assessing the carbon budget of forests under varying environmental conditions.

Model validations showed that both models provide reliable results regarding forest growth in Switzerland. However, SILVA as well as Biome-BGC tended to underestimate forest growth at lower elevations, and they slightly overestimated growth at higher elevations (above 1500 m a.s.l.). Growth underestimation of stands with very high site quality, as often found in low-elevation regions, had already been observed in SILVA, and improving this deficiency would require a model re-parameterization that weights the data from stands with high site quality and under the favorable climate conditions of the last few decades stronger than the current parameterization. The growth underestimation of Biome-BGC, however, could have been adjusted by directly changing (“tuning”) one or several model parameters. Since Biome-BGC is a fairly complex model, in which changing one parameter can have unexpected effects on many other parts of the simulated ecosystem, I refrained from adjusting the Biome-BGC model to the specific conditions of the present study.

To assess the effect of different forest management regimes on the carbon budget of forests, simulations with SILVA, Biome-BGC, and MASSIMO (a model from the partner PhD thesis by Esther Thürig) were performed. SILVA and MASSIMO were linked to the soil carbon model YASSO (also a model used in Esther Thürig's thesis). The models provided comparable qualitative results regarding the temporal and spatial dynamics of future carbon fluxes, which enhanced our confidence in the projections of these models. However, the model results were quantitatively different concerning future carbon pools and fluxes. These differences can be attributed to model-specific assumptions regarding the structure and the processes in forest ecosystems, and to different climate sensitivities. According to the model simulations, in the absence of large-scale disturbances forest biomass and soil carbon could be increased above current levels for approximately the next 80 to 100 years, and therefore Swiss forests could be used as carbon sinks. The four different management regimes applied in this study had a strong impact on the time period during which carbon sequestration was increased: carbon sequestration was maximized either in the short (30-40 years) or in the longer term (100 years or more). The results also showed that the management regime most suitable for maximizing forest carbon pools strongly depends on site conditions. In the case of low growth rates such as in the Alps, harvest may need to be reduced to maintain the current carbon pool. Under more favorable growth conditions as in the Plateau, however, it may be advisable to keep the forest at a maximum growth rate and to use the harvested wood for long-lived wood products or to substitute fossil fuels.

The combined impact of changes in climate, atmospheric CO₂ concentration, and forest management on the carbon budget of forests was assessed using the model Biome-BGC. The simulations based on five climate scenarios and four management scenarios (the same as those used in the above study) showed that environmental changes (climate and CO₂) have a relatively small impact on the forest carbon budget across the 21st century compared to changes in forest management. Generally, forests showed increased growth under environmental change compared to current conditions. However, this increase tended to decline after about 50 years because the high temperatures that were reached after some decades of climate change had a stronger positive impact on respiration than on photosynthesis. In contrast, increasing CO₂ concentrations always had a positive effect on forest growth. Generally, the results of these simulations indicate that carbon sequestration in forests during the 21st century is favoured most strongly under a moderate change in climate (i.e., under the "medium" SRES scenarios B2 and A2). However, qualitative assessments with the succession model FORCLIM showed that coniferous forests in the Plateau and even more so in the Alps may be ill-adapted to future climate changes after about the middle of the 21st century. This could have an additional negative impact on their carbon sequestration during the second half of the 21st century.

The application of different model types for forest carbon estimates in this thesis proved to be successful. The various approaches allowed for a detailed consideration of how changes in forest management, in climate, and in atmospheric CO₂ concentration affect forest growth. However, this analysis was restricted to four representative Swiss forest types, and the

findings are not necessarily applicable to other regions. Moreover, only carbon pools in forests were considered, but not carbon stored in wood products. Also potential effects of natural disturbances, such as wildfires and insect damages that may increase with climate changes were not considered in this thesis.

Although this thesis showed that forests in Switzerland are likely to be carbon sinks during the 21st century, it should be kept in mind that such a sink will always be limited in size and duration. Therefore, the primary objective in terms of reducing the atmospheric CO₂ concentration should be the direct reduction of anthropogenic CO₂ emissions.

Zusammenfassung

Wälder spielen eine wichtige Rolle im globalen Kohlenstoffkreislauf. Vor allem während der letzten Jahrzehnte wurde der globale Kohlenstoffkreislauf durch die anthropogen bedingte Akkumulation von Kohlenstoffdioxid (CO₂) in der Atmosphäre stark beeinflusst. Diese Veränderungen im Kohlenstoffkreislauf dürften zu Veränderungen im globalen Klima führen. Diese Entwicklung war der Anstoss für das Kyoto-Protokoll, welches zum Ziel hat, die atmosphärische Konzentration von CO₂ sowie anderer Treibhausgase zu reduzieren. Eine Massnahme für diese Reduktion stellt die Kohlenstoffspeicherung in terrestrischen Ökosystemen dar, insbesondere in bewirtschafteten Wäldern. Die vorliegende Arbeit untersucht das Potenzial der Kohlenstoffaufnahme und Kohlenstoffspeicherung von Schweizer Wäldern und schätzt zukünftige Auswirkungen der Waldbewirtschaftung sowie der zu erwartenden Umweltveränderungen auf diese Kohlenstoffspeicher ab.

Ziel dieser Dissertation war es, (1) zwei dynamische Waldwachstumsmodelle zu evaluieren und für die Abschätzung der langfristigen (100 Jahre, 1996-2095) Entwicklung der ober- und unterirdischen Kohlenstoffspeicher sowie der Kohlenstoffflüsse von vier repräsentativen schweizerischen Waldtypen anzuwenden, (2) den Einfluss unterschiedlicher Bewirtschaftungsarten auf den Kohlenstoffhaushalt dieser Waldtypen zu untersuchen, (3) die Auswirkungen der Klimaveränderung und der Zunahme der atmosphärischen CO₂-Konzentration in Kombination mit unterschiedlichen Bewirtschaftungsarten auf die ober- und unterirdischen Kohlenstoffspeicher zu eruieren, und (4) die Kohlenstoffspeicher und Kohlenstoffflüsse der verschiedenen Modelle für das 21. Jahrhundert zu vergleichen.

Für die quantitative Abschätzung zukünftiger Kohlenstoffspeicherung und Kohlenstoffflüsse wurden das distanzabhängige Einzelbaummodell SILVA, welches nur oberirdische Prozesse abbildet, sowie das prozessbasierte, biogeochemische Modell Biome-BGC, welches sowohl ober- als auch unterirdische Prozesse beinhaltet, verwendet. Beide Modelle haben gewisse Vorteile bezüglich der Abschätzung der verschiedenen hier betrachteten Aspekte des Kohlenstoffhaushaltes. Da SILVA Waldstrukturen hochaufgelöst betrachtet, ist es sehr geeignet, spezifische Bewirtschaftungsarten zu simulieren. Biome-BGC dagegen hat den Vorteil, dass die simulierten Prozesse auf biologischem und ökologischem Wissen basieren. Das Modell ist daher vor allem für die Abschätzungen des Kohlenstoffhaushaltes unter verschiedenen Umweltbedingungen geeignet.

Die Modellvalidierungen ergaben, dass sowohl SILVA als auch Biome-BGC das Waldwachstum in der Schweiz verlässlich abzubilden vermögen. Beide Modelle neigen allerdings dazu, den Biomassezuwachs in tieferen Lagen zu unterschätzen, in höheren Lagen (über 1500 m.ü.M.) dagegen zu überschätzen. Zuwachsunterschätzungen an Standorten hoher Bonität, oft in tiefen Lagen lokalisiert, sind bei SILVA bekannt. Um dies zu ändern, wäre eine Neuparametrisierung des Modells erforderlich, welche die Daten von Standorten hoher Bonität und unter den – bezogen auf das Waldwachstum – vorteilhaften Klimabedingungen der letzten Jahrzehnte stärker gewichtet als die aktuelle Parametrisierung. Die

Zuwachsunterschätzung des Modells Biome-BGC dagegen liesse sich direkt mittels Veränderung einzelner oder mehrerer Modellparameter justieren (“tuning”). Da Biome-BGC aber ein sehr komplexes Modell ist, in welchem die Veränderung eines Parameters zu unerwarteten Auswirkungen in anderen Modellbereichen führen kann, wurde auf eine Justierung an die spezifischen Untersuchungsbedingungen verzichtet.

Um die Auswirkungen verschiedener Bewirtschaftungsarten auf den Kohlenstoffhaushalt der Wälder abzuschätzen, wurden Simulationen mit SILVA, Biome-BGC sowie MASSIMO (einem Modell aus der Partner-Dissertation von Esther Thürig) durchgeführt. Die Modelle SILVA und MASSIMO wurden dabei durch das Bodenkohlenstoff-Modell YASSO (ebenfalls ein in Esther Thürig’s Dissertation verwendetes Modell) ergänzt. Die Modelle lieferten bezüglich zeitlicher und räumlicher Dynamik der zukünftigen Kohlenstoffflüsse vergleichbare Resultate, was unser Vertrauen in die Aussagekraft dieser Modelle stärkte. Die Modellresultate unterschieden sich hingegen bezüglich der Grösse der zukünftigen Kohlenstoffspeicher und -flüsse. Diese Unterschiede haben ihre Ursache in modell-spezifischen Annahmen bezüglich der Struktur und der Prozesse von Waldökosystemen sowie in den unterschiedlichen Klimasensitivitäten. Gemäss dieser Simulationen, nimmt, verglichen mit der heute gespeicherten Kohlenstoffmenge und unter Vernachlässigung weiträumiger Störungen, sowohl der in der Biomasse (ober- und unterirdisch) als auch der im Boden gespeicherte Kohlenstoff in den kommenden 80 bis 100 Jahren zu. Die Schweizer Waldökosysteme können folglich als Kohlenstoffsinken verwendet werden. Die vier in dieser Arbeit verwendeten Bewirtschaftungsarten beeinflussten den Zeitraum der Kohlenstoffaufnahme erheblich. Die Kohlenstoffaufnahme wurde entweder kurzfristig (30-40 Jahre) oder längerfristig (100 Jahre oder mehr) maximiert. Weiter zeigen die Resultate, dass die Bewirtschaftungsart, die am besten geeignet ist für eine Maximierung der Kohlenstoffaufnahme, stark von den Standortsbedingungen abhängt. Bei niedrigen Biomassezuwachsrate, wie beispielweise in den Alpen, dürfte eine Verringerung des Holzeinschlages notwendig sein, um die heute gespeicherte Kohlenstoffmenge erhalten zu können. Unter besseren Standortsbedingungen, wie beispielsweise im Mittelland, scheint es jedoch ratsam, die Wälder so zu bewirtschaften, dass diese eine maximale Biomassezuwachsrate aufweisen. Das dadurch anfallende Holz sollte dabei zu langlebigen Holzprodukten verarbeitet oder zur Substitution von Erdöl verwendet werden.

Der kombinierte Einfluss von Veränderungen im Klima, in der atmosphärischen CO₂-Konzentration sowie in der Waldbewirtschaftung auf den Kohlenstoffhaushalt von Waldökosystemen wurde mittels des Modells Biome-BGC geschätzt. Diese Simulationen basierten auf fünf Klimaszenarien und vier unterschiedlichen Bewirtschaftungsszenarien (den selben wie in der vorherigen Studie). Es zeigte sich, dass Umweltveränderungen (Klima und CO₂) im Gegensatz zur Waldbewirtschaftung eine verhältnismässig geringe Auswirkung auf den Kohlenstoffhaushalt von Waldökosystemen haben. In der Regel wiesen die Wälder unter veränderten Umweltbedingungen einen höheren Biomassezuwachs auf als unter heutigen Bedingungen. Jedoch nahm dieser nach ungefähr 50 Jahren eher wieder ab. Die Ursache hierfür lag darin, dass die hohen Temperaturen, welche nach einigen Jahrzehnten des

Klimawandels erreicht wurden, die Respiration stärker förderten als die Photosynthese. In Gegensatz dazu hatten die zunehmenden atmosphärischen CO₂-Konzentrationen einen konstanten positiven Einfluss auf den Biomassezuwachs. Allgemein zeigen die Ergebnisse dieser Simulationen, dass die Kohlenstoffaufnahme in Waldökosysteme während des 21. Jahrhunderts bei einem gemässigten Klimawandel (d.h. unter den "mittleren" SRES Szenarien B2 und A2) am meisten begünstigt wird. Dabei gilt es jedoch zu beachten, dass gemäss qualitativer Abschätzungen mit dem Sukzessionsmodell FORCLIM die Nadelwälder im Mittelland und noch ausgeprägter diejenigen in den Alpen schlecht an das zukünftige Klima ab Mitte des 21. Jahrhundert angepasst sein dürften. Dies könnte in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts zu zusätzlichen negativen Auswirkungen auf die Kohlenstoffaufnahme durch Waldökosysteme führen.

Die Verwendung unterschiedlicher Modelle zur Abschätzung der Kohlenstoffspeicherung in Waldökosystemen hat sich als erfolgsversprechend erwiesen. Durch die Verwendung unterschiedlicher Modelle konnte der Einfluss von Änderungen in der Waldbewirtschaftung, im Klima sowie in der atmosphärischen CO₂-Konzentration auf das Waldwachstum detailliert abgeschätzt werden. Die Untersuchung wurde jedoch auf vier für die Schweiz repräsentative Waldtypen beschränkt. Die Ergebnisse können somit nur begrenzt auf andere Waldtypen respektive Regionen übertragen werden. Ausserdem wurde lediglich die Kohlenstoffspeicherung in Waldökosystemen, jedoch nicht diejenige in Holzprodukten betrachtet. Ebenso wurden potenzielle Auswirkungen von natürlichen Störungen, wie zum Beispiel Waldbränden und Insektenkalamitäten, welche infolge des Klimawandels zunehmen dürften, in dieser Arbeit nicht berücksichtigt.

Insgesamt zeigte diese Arbeit, dass Schweizer Waldökosysteme im 21. Jahrhundert Kohlenstoffsinken darstellen dürften. Dabei ist jedoch zu beachten, dass Senken generell mengenmässig und zeitlich limitiert sind. Die Reduktion der atmosphärischen CO₂-Konzentration sollte daher in erster Linie durch eine direkte Senkung der anthropogenen CO₂-Emissionen erfolgen.