

# Modeling forest dynamics at their limits under current and changed climatic conditions

**Doctoral Thesis**

**Author(s):**

Manusch, Corina

**Publication date:**

2013

**Permanent link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010019902>

**Rights / license:**

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

DISS. ETH NO. 21400

**Modeling forest dynamics at their limits under  
current and changed climatic conditions**

A dissertation submitted to

ETH ZURICH

for the degree of

Doctor of Sciences

presented by

Corina Manusch

M.Sc. Geoinformatik, Friedrich-Schiller-University Jena

born October 20, 1984

citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Harald Bugmann, examiner

Dr. Annett Wolf, co-examiner

Prof. Dr. Thomas Hickler, co-examiner

2013

# Summary

Forests store large amounts of carbon as biomass. This storage capacity is an important component of the global carbon cycle and thus has a strong impact on climate. We need to understand the processes and dynamics that shape carbon storage to assess its potential future changes and resulting feedback effects on climate. Especially forests close to their climatic limits under current conditions are prone to climate change and thus require particular attention when studying future carbon storage capacities of forests.

Empirical studies shed light on past forest dynamics and underlying physiological processes. However, extrapolating the results of these studies to changing future climatic conditions entails uncertainties such as unconsidered environmental drivers, which are hard to assess. To resolve some of these uncertainties, computer models such as dynamic vegetation models (DVMs) are used. However, particularly at the ecosystem limits not all processes are depicted properly in these models (cf. *Chapter 1*). Therefore, in this thesis I focused on the understanding of processes of forest dynamics at climatic limits; and how to model them in a DVM, namely the widely applied LPJ-GUESS model.

*Chapter 2* deals with forest dynamics, in particular tree mortality and its role for forest properties. Many models relate mortality to maximum tree age. Here, I showed that the ‘upper boundary’ of tree longevity is rather related to maximum tree size (diameter) than age. Using a size-dependent mortality routine also reflected the empirical finding that slow growing trees can become older than fast growing trees, a pattern that the age-dependent mortality model failed to reproduce. A main result was that trees facing climatic limits, e.g. at the cold treeline, were simulated to become older than trees under ‘optimal’ growing conditions. Importantly, both mortality approaches simulated similar growing stock and plant functional type distributions at five study sites in Switzerland. Model performance could only be distinguished in the third pattern (longevity-growth relationship) which indicates the importance of using a high variety of patterns for validating

model results. At four of the five sites, the models performed well, whereas at the water-limited site (Sion, region Valais) growing stock was strongly overestimated.

In the Valais, empirical studies have related increased mortality rates to drought-stress, which is not explicitly reflected in most current DVMs. In *Chapter 3*, I investigated causes and consequences for drought-dependent mortality and how to implement them in a DVM. The underlying mechanisms of drought-dependent mortality have been widely discussed during the last years. Many studies showed that one of the main triggers is hydraulic failure, i.e. xylem vulnerability to cavitation. This process was often described empirically as function of decreasing xylem water potential with hydraulic vulnerability curves. Neither xylem nor the water potential is taken into account in LPJ-GUESS. To minimize the number of new parameters and thus uncertainties but still reflecting the process of hydraulic failure, I modified this approach using sapwood biomass (i.e. water conducting biomass) loss as a proxy for conductivity loss when water is limiting. The sensitivity of this approach and consequences at the stand scale were tested. Although high drought stress led to a decrease in simulated biomass as expected, intermediate drought stress increased biomass to values higher than without drought stress. This was caused by stimulated regeneration due to higher light availability after mortality. I concluded that a revision of plant available water and plant water uptake especially for small saplings is needed to prevent this unanticipated stand-scale effect.

In *Chapter 4*, I tackled this problem and investigated plant available water and plant water uptake in DVMs. First, I studied the importance of using highly resolved soil data in DVMs. I compared simulation results with global soil data versus measured soil data of app. 100 sites in the two driest regions of Switzerland (Valais and Engadin). The measured soil data were either simplistically aggregated into two soil layers or used with all layers. At sites with low total water holding capacity and annual precipitation sums that do not compensate for small water holding capacities, simulations with the global data set or the aggregated soil data produced higher annual net primary productivity than simulations with the observed soil data. Second, I analyzed the role of vertical root distribution versus variable rooting depths for simulated biomass in the model. Hydrological assumptions in the model were shown to drive simulated water availability more than assumptions regarding roots. Vertical root distribution was of higher importance than absolute rooting depth due to ample water availability in the upper soil layers resulting from simplified hydrological assumptions. In reality, rooting depth should play an important role for plant water availability particularly at juvenile stage and during droughts.

In *Chapter 5*, I used the upgraded version of the model to simulate potential carbon storage capacity under current and prospective climatic con-

ditions in Switzerland. Prospective climate was derived from three climate scenarios each covering a specific uncertainty range. On average, the carbon sink capacity of forests is likely to be retained under future conditions in Switzerland as species shifts will counteract negative climate change effects on carbon storage. The simulated velocity of species shifts depends on the initial climatic conditions, the severity of the climate scenario and its inherent uncertainty. Interestingly, when temperature increase is limited to 2°C compared to preindustrial values as anticipated by international conventions, carbon storage capacity of forests is smaller than under more extreme scenarios. Growth of extant species in this moderate climate scenario is also reduced but not to an extent such that other species may invade.

In *Chapter 6*, I discuss the limitations of the applied model that became evident during these studies. Some of these issues are also relevant for other current DVMs. This points to unanticipated uncertainties in climate impact studies with these models, such as in *Chapter 5*. Nevertheless, I am confident that with the current thesis I could solve some shortcomings in DVMs and went a step towards more process-based representations of vegetation dynamics and climatic constraints in these models and thus enhanced their applicability for assessments of prospective carbon storage.

# Zusammenfassung

Wälder speichern in Form von Biomasse grosse Mengen an Kohlenstoff. Diese Speicherfunktion ist eine wichtige Komponente im globalen Kohlenstoffkreislauf und hat somit einen bedeutenden Einfluss auf das Klima. Nur wenn wir die damit verbundenen Prozesse und die Dynamik verstehen, können zukünftige Änderungen der Wälder und die daraus resultierenden potentiellen Rückkopplungseffekte auf das Klima abgeschätzt werden. Insbesondere Wälder, die im Bereich ihrer klimatischen Grenzen vorkommen, sind sensitiv gegenüber klimatischen Veränderungen. Dementsprechend sind sie von besonderem Interesse, wenn die klimabedingte Veränderung der Kohlenstoffspeicherkapazität von Wäldern quantifiziert werden soll.

Zahlreiche empirische Studien haben vergangene Walddynamik und die zugrunde liegenden physiologischen Prozesse untersucht. Die Ergebnisse dieser Studien können aufgrund von schwer abschätzbaren Unsicherheiten wie z.B. nicht berücksichtigten Umweltfaktoren nicht ohne Weiteres auf sich ändernde Klimabedingungen übertragen werden. Um die Unsicherheiten einer solchen Extrapolation zu reduzieren, werden für die Vorhersage von zukünftigen Walddynamiken Computermodelle wie z.B. dynamische Vegetationsmodelle (DVMs) verwendet. Insbesondere an Ökosystemgrenzen sind jedoch in diesen Modellen nicht alle Prozesse ausreichend abgebildet (siehe *Kapitel 1*). Aus diesem Grund lag der Fokus dieser Arbeit auf dem Verständnis der Walddynamik an abiotischen Grenzen und wie diese in DVMs (hier repräsentiert durch das oft angewendete Modell LPJ-GUESS) dargestellt werden können.

In *Kapitel 2* wurde Mortalität als ein wesentlicher Aspekt der Walddynamik und deren Einfluss auf Waldeigenschaften untersucht. In vielen Modellen ist die Mortalität an ein maximales Baumalter gekoppelt. In diesem Kapitel wurde gezeigt, dass die 'obere Grenze' der Langlebigkeit vielmehr mit der maximalen Baumgrösse (Durchmesser) als mit dem maximalen Baumalter zusammenhängt. Wenn eine grössenabhängige Mortalität verwendet wurde,

konnte die empirische Beobachtung, dass langsam wachsende Bäume älter werden können als schnell wachsende Bäume, abgebildet werden. Dies führte dazu, dass Bäume an ihren abiotischen Grenzen, wie z.B. an der kalten Baumgrenze, älter wurden als unter 'optimalen' Wachstumsbedingungen. Dieses Muster konnte mit der konventionellen altersabhängigen Mortalität nicht abgebildet werden. Unabhängig davon wurden mit beiden Mortalitätsannahmen ähnliche Holzvorräte und Verteilungen 'funktionaler Pflanzentypen' ('plant functional types') an fünf Standorten in der Schweiz simuliert. Die Qualität der Modellergebnisse konnte nur unter Hinzunahme des dritten Musters (Zusammenhang Langlebigkeit - Wachstum) beurteilt werden, was die Bedeutung der Verwendung einer Vielzahl von Mustern für die Modellvalidierung veranschaulicht. An vier von den fünf Standorten wurden mit beiden Mortalitätsannahmen realitätsnahe Holzvorräte simuliert, während der Holzvorrat am wasserlimitierten Standort (Sion, Region Wallis) unabhängig von den verwendeten Mortalitätsannahmen deutlich überschätzt wurde.

Im Wallis haben empirische Studien einen Zusammenhang zwischen erhöhten Mortalitätsraten und Trockenstress gezeigt, den die meisten heute verfügbaren DVMs nicht abbilden. In *Kapitel 3* wurden daher Ursachen und Konsequenzen von trockenheitsbedingter Mortalität und wie diese in ein DVM implementiert werden können untersucht. Die zugrundeliegenden Mechanismen von trockenheitsbedingter Mortalität sind in den letzten Jahren zunehmend diskutiert worden. Viele Studien zeigen, dass eine der Hauptursachen hydraulisches Versagen, das heisst die Verwundbarkeit des Xylems durch Kavitation, ist. Dieser Prozess wurde empirisch oft als Funktion des abnehmenden Xylemwasserpotentials mit hydraulischen Vulnerabilitätskurven beschrieben. In LPJ-GUESS werden weder Xylem noch das Wasserpotential berücksichtigt. Um die Parameterzahl und damit die Modellunsicherheiten gering zu halten und dennoch den Prozess des hydraulischen Versagens abzubilden, wurde hier der trockenheitsbedingte Verlust an Leitfähigkeit vereinfachend mit dem Verlust der Splintholzbiomasse, d.h. der wasserleitenden Holzbiomasse, gleichgesetzt. Die Sensitivität dieses Ansatzes und die Konsequenzen auf Bestandesebene wurden untersucht. Im Vergleich zu dem Modell ohne 'hydraulische' Trockenheitslimitierung führte ein hoher Trockenstress wie erwartet zu einer Abnahme der simulierten Biomasse, während für die Biomasse bei mittlerem Trockenstress eine Zunahme simuliert wurde. Nach Mortalitätsereignissen wird die Verjüngung durch mehr Lichtverfügbarkeit am Boden begünstigt, was zu diesem unerwünschten Effekt auf Bestandesebene führte. Dieser Effekt könnte durch eine Anpassung des pflanzenverfügbaren Wassers insbesondere für Keimlinge und junge Bäume minimiert werden.

Die Wasseraufnahme durch Pflanzen und der Einfluss des pflanzenverfügbaren Wassers sowie die Abbildung dieser Prozesse in DVMs wurde in *Kapitel 4* thematisiert. Zunächst wurde die Bedeutung von räumlich hoch aufgelös-

ten Bodeninformationen gezeigt. Zu diesem Zweck wurden Modellergebnisse basierend auf globalen Bodendaten mit Modellergebnissen aus beobachteten Bodendaten von ca. 100 Standorten für die zwei trockensten Regionen der Schweiz (Wallis und Engadin) verglichen. Dabei wurde der beobachtete Datensatz einerseits vereinfachend zu zwei Bodenhorizonten aggregiert und andererseits mit allen Horizonten verwendet. An Standorten mit einer geringen beobachteten absoluten Wasserhaltekapazität und geringen jährlichen Niederschlägen, die diese geringe Wasserspeicherkapazität nicht kompensieren konnten, simulierte das Modell mit den globalen Datensätzen oder den aggregierten Datensätzen eine höhere jährliche Nettoprimärproduktionen als das Modell mit den Beobachtungswerten. Anschliessend wurde der Einfluss von vertikalen Wurzelverteilung und variablen Wurzeltiefen auf die simulierten Biomassen im Modell analysiert. Es wurde gezeigt, dass hydrologische Annahmen im Modell die simulierte Wasserverfügbarkeit mehr beeinflussen als Annahmen über die Wurzeln. Vertikale Wurzelverteilung waren wichtiger als die absoluten Wurzeltiefen, da die Wasserverfügbarkeit für Pflanzen in den oberen Bodenschichten durch die vereinfachten hydrologischen Annahmen stets ausreichend war. In der Realität sollten die Wurzeltiefen eine bedeutende Rolle für die Wasserverfügbarkeit spielen, insbesondere in frühen Entwicklungsstadien und während Trockenheiten.

In *Kapitel 5* wurde die durch die implementierten Routinen verbesserte Modellversion verwendet, um den potentiellen Kohlenstoffspeicher unter bestehenden und möglichen zukünftigen klimatischen Bedingungen in der Schweiz abzuschätzen. Das zukünftige Klima wurde hierbei mit drei regionalen Klimaszenarien abgebildet, wobei jedes einen spezifischen Unsicherheitsbereich angibt. Im Mittel bleibt die Senkenkapazität der Schweizer Wälder wahrscheinlich auch unter künftigen Klimabedingungen erhalten, da Artenwechsel dem negativen klimatischen Effekt auf den Kohlenstoffvorrat entgegenwirken. Die simulierte Geschwindigkeit dieser Artenwechsel hängt von den Ausgangsbedingungen des Klimas sowie der Stärke des Klimaszenarios und der darin enthaltenen Unsicherheit ab. Wenn der Temperaturanstieg entsprechend internationaler Abkommen auf  $2^{\circ}\text{C}$  (gemessen an vorindustriellen Werten) beschränkt werden kann, wird interessanterweise durch das Modell eine geringere Kohlenstoffspeicherkapazität modelliert, als wenn höhere Temperaturanstiege angenommen werden. Obwohl das Baumwachstum auch unter der  $2^{\circ}\text{C}$ -Annahme reduziert wurde, konnten sich andere Arten nicht etablieren.

Im letzten Kapitel (*Kapitel 6*) und im *Appendix* wurden Beschränkungen des angewendeten Modells, die während dieser Arbeit offensichtlich geworden sind, erörtert. Einige dieser Beschränkungen sind ebenso für andere heute verfügbare DVMs relevant. Das verdeutlicht bestehende Unsicherheiten in Studien, die den Einfluss des Klimas auf die Vegetation mit diesen Modellen untersuchen wie z.B. in *Kapitel 5*. Nichtsdestotrotz konnten mit der



vorliegenden Arbeit einige Probleme heutiger DVMs gelöst werden. Die prozessbasierte Repräsentation der Vegetationsdynamik und der klimatischen Beschränkungen in diesen Modellen wurde verbessert. Damit wurde ihre Anwendbarkeit für künftige Studien erhöht.