

DISS. ETH NO. 22775

**To die or not to die:
Forest dynamics in Switzerland under climate change**

A thesis submitted to attain the degree of
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by
NICOLAS BIRCHER

M.Sc. Environmental Sciences, ETH Zurich

born on 08.09.1985
citizen of Küttigen (AG)

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Harald Bugmann, examiner
Dr. Maxime Cailleret, co-examiner
Prof. Dr. Rupert Seidl, co-examiner

2015

Summary

A high diversity of forest ecosystems is found around the globe providing various ecosystem services to humans. Responses of forests to recent increases of drought events have given rise to serious concerns about future forest development. Since anthropogenic climate change is proceeding at an unprecedented rate, the forestry sector is challenged to swiftly develop and plan adaptive management measures that guarantee the sustainable provision of forest ecosystem services in the future. The planning of management strategies is strongly dependent on reliable knowledge on future forest dynamics. To this end, the Swiss government has launched an extensive research program to examine the impact of climate change on Swiss forests. One aim among others is to assess the sensitivity of common forest types of Switzerland to climate change.

Dynamic vegetation models (DVMs) are suitable to provide quantitative assessments of forest sensitivity to climate change, as their flexibility allows considering dynamic vegetation transitions under conditions that do not represent a steady state. Among DVMs, forest gap models portray long-term forest dynamics at the stand scale taking biotic interactions such as competition into account. Recent integration of sophisticated management techniques has substantially extended their range of application from unmanaged to complex mixed-species forests under management, thus making them interesting tools for the assessment of climate change impacts on forest ecosystems. However, forest gap models integrate a large number of ecological processes that still lack an empirical base. This is particularly true for tree mortality – a key demographic process in forest dynamics – where increasing empirical research has been followed by little action in DVMs. Thus, although it is widely acknowledged that empirical functions should be integrated into DVMs to enhance ecological realism, little is known about whether this approach leads to an increased robustness of model projections.

Given this background, my thesis includes two major objectives: 1) to examine the potential of empirical mortality functions in dynamic vegetation models and 2) to assess the sensitivity of common Swiss forests to climate change.

In *Chapter 1* of this thesis, I implemented an inventory- and a tree-ring based mortality function in the forest gap model ForClim and combined them with a stochastic and a deterministic approach for the determination of tree status (alive vs. dead). These four new model versions were tested for two Norway spruces stands, one of which was managed (inventory time series of 72 years) and the other was unmanaged (41 years). Furthermore, I ran long-term simulations (~400 years) into the future to test model behavior under three climate scenarios. I showed that three out of the four model versions showed good agreement for stand basal area and stem numbers when compared against inventory data of both forest sites. Due to very similar model behavior, an unambiguous choice of a “best” model version was, however, not possible. In contrast, long-term simulations revealed very different behavior of the mortality models, indicating that the choice of the mortality function is crucial for simulated forest dynamics. Based on these results, I concluded that 1) empirical mortality functions are valuable replacements for current theoretical mortality algorithms in dynamic vegetation models 2) but further tests would be needed to rigorously assess their potential and to better understand interactions of the mortality function with other model processes.

Enhanced use of empirical data in dynamic vegetation models is widely advocated. However, it is largely unknown whether empirically derived functions are compatible with the wide range of processes and interactions that are usually found in DVMs and thus, whether they lead to a better model performance. In *Chapter 2*, I addressed this question with the focus on the inventory-based mortality function that has already been used in *Chapter 1*. I used Bayesian methods to recalibrate its mortality parameters within ForClim. I compared its performance with the ForClim version containing the original, empirically fitted mortality parameters and with the current ForClim v3.3 that included a theoretical mortality function. Calibration and subsequent validation was based on inventory data of 30 Swiss natural forest reserves. Similarities between the calibrated and the empirically fitted mortality parameters suggest that the general structure of ForClim is appropriate to integrate empirical mortality functions. However, I found some discrepancies that indicate necessary improvements regarding the role of species’ shade tolerance in growth-mortality relationships and an optimal balance between growth and mortality. Bayesian calibration led to best performance both at calibration and validation sites. Furthermore, it revealed that the sensitivity of ForClim to parametric uncertainty is particularly high for trees in low dbh classes but surprisingly small for standard model outputs such as basal area.

Assessing the sensitivity of common forest stands in Switzerland with a forest gap model makes it necessary 1) to know which forest stands are common and 2) to have suitable data for model initialization. In *Chapter 3*, I developed a stratification of the Swiss forest area to identify those forest types of Switzerland that, in terms of their stand structure and tree species composition, are most common in different eco-regions and elevation zones. I used plot data from the third Swiss National Forest Inventory (NFI3) that contained both stand attributes and single-tree data. NFI plots were grouped into eco-regions and elevation zones according to the “Guide for sustainability in protection forests” (NaiS). I further segregated NFI plots into more groups based on two forest stand attributes: vertical stand structure and developmental stage. In a last step, I relied on recommendations of silvicultural experts for dividing some groups into more strata to strengthen a realistic tree species composition. The stratification resulted in 71 strata that contained 25% of all NFI forest plots. Single-tree data of all NFI plots associated to one stratum were aggregated. Although the final result is a somewhat “artificial” forest stand, it has the tremendous advantage that NFI plot data can be used directly for stand initialization in the forest gap model ForClim.

In Switzerland, studies on forest sensitivity to climate change often focus on extreme sites where shifts in tree species composition are already visible while less attention is paid to the fate of common forest stands that are most important for Swiss forestry. In *Chapter 4*, I ran simulations for 71 strata that had been identified in the previous chapter using two model versions to examine their development until the end of the 21st century (year 2100). Simulations were run with common Swiss forest management strategies and without management. I considered forest development under current climate (1980-2009) and under 11 different climate change scenarios assuming an A2 greenhouse gas emission scenario. According to these simulation results, shifts in structure and composition of Swiss forests have to be expected for the second half of this century. However, high variability among the strata was found due to drivers of small-scaled forest dynamics such as regional climate, elevation gradients and current species composition. I showed that current management regimes can alleviate the negative impacts of climate change but adaptive measures are necessary to be applied at a site-specific and objective-oriented base. In conclusion, model-based assessments on forest sensitivity can only provide reliable decision-making support for forest managers if small-scaled drivers of forest stand dynamics are taken into consideration.

In the *Synthesis*, I reflect the findings of the previous chapters by discussing the potential of empirical mortality functions in DVMs and the use of forest gap models – as one type of DVM – as tools for decision-support regarding forest management under climate change. I come to the conclusion that empirical mortality functions are capable to further improve the performance of DVMs and to increase our confidence in their projections. However, empirical functions come with limitations, which might constrain a valid applicability. For this reason, I advocate not to focus on one individual function but to aggregate knowledge on mortality mechanism and data from various sources to enhance the validity of the tree mortality mechanism in DVMs beyond individual empirical data sets. Climate change is expected to have strong effects on future development of current Swiss forests at various sites. High variability in forest response to a changing environment underlines the need to plan future forest strategies at the local scale. Forest gap models have limitations that need to be discussed and tackled. Still, I am convinced that they have the potential to play a key role in decision-making processes as they can provide what decision makers need: a comprehensive reflection of essential processes and an adequate spatial resolution.

Zusammenfassung

Rund um den Globus findet sich eine hohe Vielfalt an Waldökosystemen, die dem Menschen zahlreiche Ökosystemleistungen zur Verfügung stellen. Zunahmen von Trockenheitsereignissen in der jüngsten Vergangenheit haben bereits zu Reaktionen in verschiedensten Wäldern geführt und damit ernste Besorgnis über die zukünftige Waldentwicklung ausgelöst. Da der anthropogene Klimawandel mit beispielloser Geschwindigkeit voranschreitet, ist die Forstwirtschaft gefordert, sich möglichst rasch um die Entwicklung und Planung von adaptiven Massnahmen zu bemühen, welche die nachhaltige Sicherstellung von Waldökosystemleistungen auch in Zukunft gewährleisten sollen. Für die waldbauliche Planung sind jedoch zuverlässige Kenntnisse über die zukünftige Walddynamik zwingend erforderlich. Aus diesem Grund hat die Bundesregierung der Schweiz ein umfangreiches Forschungsprogramm lanciert um die Auswirkungen des Klimawandels auf Schweizer Wälder zu untersuchen. Ein wesentliches Ziel dabei ist es, die Empfindlichkeit von häufigen Waldtypen der Schweiz auf den Klimawandel abschätzen zu können.

Dynamische Vegetationsmodelle (DVMs) sind gut für solche quantitativen Abschätzungen geeignet. Ihre Flexibilität erlaubt es dynamische Übergänge von Vegetationssystemen auch ausserhalb von konstanten Bedingungen zu berücksichtigen. Innerhalb der DVM-Familie zielen Waldsukzessionsmodelle auf die Abbildung der langfristigen Walddynamik auf Bestandesebene ab. Dabei berücksichtigen sie auch biotische Interaktionen wie die Konkurrenz zwischen den Baumarten. Der jüngste Einbau von komplexeren Bewirtschaftungstechniken hat ihren Anwendungsbereich von unbewirtschafteten Naturwäldern zu Wirtschafts- und Mischwäldern beträchtlich erweitert. Damit sind sie auch zu einem interessanten Werkzeug für die Abschätzung von Auswirkungen des Klimawandels auf heutige Wälder geworden. Viele dieser Sukzessionsmodelle beinhalten jedoch immer noch eine hohe Anzahl an ökologischen Prozessen, denen eine empirische Basis fehlt. Dies trifft vor allem auf die Baummortalität zu, einem demographischen Schlüsselprozess der Walddynamik, welcher zwar zunehmend untersucht wird, empirische Erkenntnis bisher jedoch kaum in Sukzessionsmodelle eingeflossen ist. Es ist zwar weitgehend anerkannt, dass empirische Funktionen vermehrt in DVMs integriert werden sollen, um so deren ökologische

Glaubwürdigkeit zu erhöhen. Hingegen weiss man wenig darüber, ob dies ein sinnvoller Ansatz ist um die Robustheit von Modellprojektionen zu verbessern.

Basierend auf diesem Hintergrund hatte diese Dissertation zum Ziel 1) das Potenzial von empirischen Mortalitätsfunktionen in dynamischen Vegetationsmodellen zu untersuchen und 2) die Empfindlichkeit von häufigen Schweizer Waldbeständen auf den Klimawandel abzuschätzen.

Im *Kapitel 1* dieser Arbeit wurden eine Inventur- und eine Jahrring-basierte Mortalitätsfunktion in das Waldsukzessionsmodell ForClim eingebaut. Weiter wurden diese mit einem stochastischen bzw. deterministischen Ansatz zur Bestimmung des Baumzustands (lebend vs. tot) kombiniert. Diese vier neuen Modellversionen wurden in zwei reinen Fichtenbeständen, einem bewirtschafteten (Inventurzeitreihe von 72 Jahren) und einem unbewirtschafteten (42 Jahre) getestet. Ausserdem wurden Langzeitsimulationen (~400 Jahre) in die Zukunft durchgeführt um das Modellverhalten unter drei verschiedenen Klimaszenarien zu prüfen. Es wurde gezeigt, dass drei von vier Modellversionen gute Übereinstimmung bezüglich totaler Basalfläche und Stammzahl mit den Inventurdaten der beiden Standorte erzielten. Die eindeutige Identifikation einer „besten“ Modellversion war aufgrund sehr ähnlichen Modellverhaltens jedoch nicht möglich. Im Gegensatz zeigten die Langzeitsimulationen ein sehr unterschiedliches Verhalten der Mortalitätsfunktionen auf. Dies weist darauf hin, dass die Wahl der Mortalitätsfunktion massgeblich die simulierte Walddynamik beeinflusst. Anhand dieser Resultate wurden die Schlussfolgerungen gezogen, dass 1) empirische Mortalitätsfunktionen bestehende, theoretische Mortalitätsalgorithmen in DVMS angemessen ersetzen können, 2) es jedoch weiterer Tests gebraucht um ihr Potential gründlich zu prüfen und Interaktionen der Mortalitätsfunktion mit anderen Modellprozessen besser zu verstehen.

Auch wenn die vermehrte Verwendung von empirischen Daten in DVMS propagiert wird, ist es jedoch weitgehend unbekannt, ob empirisch hergeleitete Funktionen mit der breiten Palette an Modellprozessen in DVMS und deren Interaktionen kompatibel sind. Damit verbunden stellt sich die Frage ob sie tatsächlich zu optimalem Modellverhalten führen. Dieser Frage wurde in *Kapitel 2* dieser Arbeit nachgegangen, wobei das Augenmerk auf die Inventur-basierte Mortalitätsfunktion gelegt wurde, die bereits in *Kapitel 1* zum Einsatz kam. Mittels Bayes'scher Statistik wurden deren Parameter in ForClim rekaliibriert. Die Leistung dieser Modellversion wurde mit derjenigen Version, welche die ursprünglichen, empirisch gefitteten Parameter beinhaltet und der gegenwärtigen ForClim-Version (v3.3), welche eine theoretische Mortalitätsfunktion beinhaltet, verglichen. Die Kalibrierung und die anschliessende Validierung beruhten auf Inventurdaten von 30 Schweizer Naturwaldreservaten. Ähnliche Werte für die kalibrierten und die empirische gefitteten Mortalitätsparametern legen den Schluss nahe, dass die generelle Modellstruktur von ForClim angemessen ist um empirische Mortalitätsfunktionen zu integrieren. Es wurde aber auch einige Abweichungen festgestellt, welche auf notwendige Verbesserungen bezüglich der Rolle von Schattentoleranzklassen in Wachstums-Mortalitäts-Beziehungen und bezüglich eines optimalen Gleichgewichts zwischen Baumwachstum und -mortalität im Modell hindeuten. Die Bayes'sche Kalibrierung führte zur besten Modelleistung sowohl an Kalibrierungs- als auch an Validierungsstandorten. Weiter zeigte sich, dass die Empfindlichkeit von ForClim gegenüber Unsicherheiten in der Parametrisierung insbesondere für Bäume in den tieferen Durchmesserklassen deutlich ausgeprägt ist, für Standardergebnisse wie die totale Basalfläche jedoch erstaunlich gering ist.

Die Empfindlichkeit von häufigen Schweizer Waldbeständen mit dem Waldsukzessionsmodell ForClim abschätzen zu können, setzt voraus, einerseits zu wissen welche Waldtypen häufig sind und andererseits hierfür über passende Einzelbaumdaten zu verfügen um damit das Modell zu initialisieren. In *Kapitel 3* wurde eine Stratifizierung der Schweizer Waldfläche durchgeführt um diejenigen Waldtypen zu identifizieren, welche bezüglich ihrer Struktur und Zusammensetzung in verschiedenen Standortsregionen und Höhenstufen der Schweiz am häufigsten vorkommen. Hierfür wurden Untersuchungsflächen (Plots) des dritten Schweizerischen Landesforstinventars (LFI) verwendet, auf welchen nicht nur gängige Bestandesattribute sondern auch Einzelbaumdaten erhoben wurden. Die LFI-Plots wurden gemäss den Standortsregionen und Höhenstufen nach der Wegleitung „Nachhaltigkeit im Schutzwald“ (NaiS) in Gruppen eingeteilt. Diese Gruppen wurden unter Verwendung der Bestandesattribute „vertikale Bestandesstruktur“ und „Entwicklungsstufe“ weiter aufgeteilt. In einem letzten Schritt wurden einige Gruppen basierend auf Empfehlungen von Waldbauexperten zusätzlich getrennt, um eine möglichst realistische Baumartenzusammensetzung zu gewährleisten. Die Stratifizierung ergab 71 Straten, welche insgesamt 25% aller als „Normalwald“ klassifizierten LFI-Plots beinhalteten. Die Einzelbaumdaten aller zu einem Stratum zugehörigen LFI-Plots wurden aggregiert. Obwohl dies eine zu einem gewissen Grad künstliche Waldstruktur ergab, lag der Vorteil darin, dass die Einzelbaumdaten des LFI direkt für die Bestandesinitialisierung in ForClim verwendet werden konnten.

Die Klimaempfindlichkeit von Schweizer Wäldern wird oftmals nur an Extremstandorten untersucht, wo sich Veränderungen der Baumartenzusammensetzung bereits beobachten lassen. Den häufigen Waldstandorten wird weniger Aufmerksamkeit geschenkt, obwohl sie für die Forstwirtschaft von höchster Bedeutung sind. Aus diesem Grund wurden in *Kapitel 4* mittels zweier ForClim-Versionen Simulationen für die 71 im vorherigen Kapitel identifizierten Straten durchgeführt, um so deren Entwicklung bis Ende des 21. Jahrhunderts abzuschätzen. Dabei wurden Simulationen ohne sowie mit Waldbewirtschaftung durchgeführt wobei gängige Schweizer Waldbewirtschaftungspraktiken zur Anwendung kamen. Die zukünftige Waldentwicklung wurde sowohl unter heutigem Klima (1980-2009) als auch unter Anwendung von 11 verschiedenen Klimaszenarien basierend auf einem A2 Emissionsszenario untersucht. Gemäss den Resultaten zeigen Schweizer Wälder klimabedingte Veränderungen insbesondere in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts. Dabei zeigte sich jedoch eine hohe Variabilität zwischen den verschiedenen Straten bedingt durch Faktoren wie regionales Klima, Höhengradienten und Baumartenzusammensetzung, welche die Walddynamik auf kleinräumiger Ebene steuern. Gegenwärtige Bewirtschaftungspraktiken waren in der Lage negative Einflüsse des Klimawandels auf die Bestandesdynamik abzumildern. Gleichzeitig zeigte sich auch, dass es neuer, adaptiver Massnahmen bedarf, welche aber standortsspezifisch und zielorientiert geplant und angewandt werden müssen. Diese Studie zeigt klar, dass modell-basierte Abschätzungen über Auswirkungen des Klimawandels auf Wälder nur dann einen zuverlässigen Beitrag für die Forstwirtschaft leisten können, wenn sie diejenigen Faktoren in Betracht ziehen, welche die Walddynamik auf Bestandesebene steuern.

In der *Synthese* werden die Ergebnisse aus den einzelnen Kapiteln reflektiert und insbesondere bezüglich der Frage nach dem Potential von empirischen Mortalitätsfunktionen in DVMs und nach dem Nutzen von Waldsukzessionsmodellen als Entscheidungsgrundlage für die zukünftige Waldbewirtschaftung diskutiert. Empirische Mortalitätsfunktionen zeigen sich in der Lage die Leistung von DVMs zu verbessern und unser Vertrauen in Modellprojektionen zu erhöhen. Sie sind jedoch auch mit Einschränkungen verbunden, welche ihre Gültigkeit und Zuverlässigkeit in Anwendungen begrenzen. Aus diesem Grund

sollte der Fokus weniger auf eine einzige Funktion gelegt werden sondern vielmehr darauf, das Wissen über Mortalitätsmechanismen und Daten aus verschiedene Quellen zu kombinieren um damit die gültige Abbildung der Baumortalität in DVMs über einzelne Datensätze hinaus zu erweitern. Der Klimawandel wird voraussichtlich an verschiedenen Standorten eine starke Wirkung auf die zukünftige Waldentwicklung heutiger Schweizer Wälder haben. Die hohe Variabilität in der Reaktion auf den Klimawandel unterstreicht die Notwendigkeit zukünftige Waldbaustrategien auf lokaler Ebene zu planen. Waldsukzessionsmodelle beinhalten Unsicherheiten, die diskutiert und angegangen werden müssen, dennoch sind sie in der Lage eine Schlüsselrolle bei der Entscheidungsfindung der waldbaulichen Planung zu übernehmen. Denn sie beinhalten die notwendigen Vorgaben, dies es für die Entscheidungsfindung auf lokaler Ebene braucht: Eine weitgehende Abdeckung der erforderlichen Prozesse und Faktoren sowie eine angemessene räumliche Auflösung.