

DISS. ETH NO. 26061

**Towards robust projections of future forest dynamics:
why there is no silver bullet to cope with complexity**

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

presented by
NICA HUBER

M.Sc. Environmental Sciences,
ETH Zurich

born on 23. 10. 1984
citizen of Kilchberg (ZH)

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Harald Bugmann, examiner

Dr. Valentine Lafond, co-examiner

Prof. Dr. Anja Rammig, co-examiner

2019

All models are wrong,
but some are useful.
(Box, 1979)

Summary

Forest ecosystems are of key importance for providing a broad range of ecosystem goods and services. Yet, forest ecosystems are subject to manifold pressures and considered to be particularly sensitive to rapid climate change. A particular uncertainty remains in larger scale assessments (i.e., regional to national scale) due to the effects of local-scale drivers of climate change impacts (e.g., related to site-, species- and stand-specific responses), which is particularly important for forest management and planning.

Multiple dynamic vegetation models (DVMs) have been developed to analyze forest ecosystems and their dynamics. Among the various types of DVMs, forest gap models (FGMs) have been introduced to represent stand-scale dynamics as upscaled from individual tree behavior, thus allowing to represent uneven-aged, mixed-species stands. This renders them principally suitable to assess the future development of today's forest stands under changing environmental conditions while accounting for site-specific factors.

Even though many ecological models strive for generality and realism, so far few FGMs have been applied across large areas (e.g., the national to continental scale). This may be due to parameterization problems and insufficient representation of underlying mechanisms. To overcome these issues, many models are (re-)calibrated locally or adapted structurally to reflect local conditions. Yet, such strategies tend not to increase a model's general applicability across a broad range of conditions. Furthermore, model developments aiming at structural improvements typically focus on one single process. However, due to unaccounted process interactions, such efforts are at risk of 'getting the right patterns for the wrong reason' (i.e., missing ecological reality). Thus, recent pleas have been made to jointly revisit the ecological processes at the core of DVMs to increase the consistency of process interactions.

Using the state-of-the-art FGM ForClim, this PhD thesis aims to enhance the robustness of the projections for various fields of FGM applications (e.g., natural and managed forest stand dynamics) across a range of spatial and temporal scales. A particular focus was on the consistency of the simulated processes and their interactions. Specifically, these efforts were geared towards providing locally accurate climate impact assessments over large areas, representing a current research frontier in FGMs and DVMs in general.

In *Chapter 1*, I conducted a sensitivity analysis of the ForClim model to analyze model behavior and identify model components that deserve particular attention for reducing uncertainties of parameter estimates and/or improving process representation. Since the relative parameter influence may not be constant over time and likely varies with site conditions, stand structure and species composition, I analyzed the model's parameter sensitivity at 30 representative sites across Europe and compared results for monospecific and mixed stands at two system states in time (i.e., early and late succession). Key parameters causing the largest variability in model outputs were related to tree establishment, the water and light regimes, growth and temperature, whereby the relative parameter influence of the latter strongly varied with local climate conditions. Moreover, model sensitivity differed between monospecific and mixed stands as well as between early and late successional stages, reflecting the differential influence of ecological processes with stand structure. In addition, model application at a European scale (i.e., far beyond the geographical range ForClim was originally developed for) pointed at model shortcomings.

Since ForClim proved to be highly sensitive to water-related parameters across most of the European continent (*Chapter 1*) and accurately representing water limitations in DVMs is of utmost importance in view of climate change, I revisited ForClim's water module in *Chapter 2*. Most DVMs explicitly model water availability based on a water balance with potential evapotranspiration (PET) as the main driver. I assessed the performance of ForClim's water module, which includes the PET formulation by Thornthwaite and Mather (1957), by confronting simulated with observed monthly AET at forested FLUXNET sites. Further, I included alternative PET formulations in the comparison, particularly the one by Priestley and Taylor (1972) featuring a higher degree of mechanistic detail. The performance of the water module as applied in ForClim depended primarily on climate type independent of the PET formulation applied. I thus conclude that increasing the complexity of the PET formulation will hardly improve the estimates of water deficiencies at an annual scale in ForClim. Rather, more attention should be paid to forest-specific features in the context of the water balance, such as the representation of belowground and phenological processes, because most water balance models have been developed for agricultural applications.

In *Chapter 3*, I scrutinized the representation of ForClim's core processes and the consistency of their interplay. I developed a set of alternative process and parameter representations for the core processes light availability, tree establishment, growth and mortality, based on ecological

theory and diverse sources of empirical data. I applied a pattern-oriented modeling (POM) approach to test all combinations of the standard and alternative formulations (yielding 504 model versions) against a comprehensive set of empirical patterns for diverse model applications and a wide range of site conditions. I found that adapting one process in isolation can improve model performance for one specific application. However, the best model versions typically included more than one alternative process or parameter formulation. Thus, simultaneously considering multiple core processes is key for revealing internal inconsistencies in the model framework and model improvements. In this context, POM proved to be highly suitable to bridge various fields of model application and to compare model outputs with a broad set of patterns comprising diverse forest characteristics at different temporal and spatial scales. I conclude that the forest ecology community should make good use of the ever-increasing data availability and the POM framework to challenge the core processes of DVMs in a holistic manner.

Finally, the increasing impacts of climate change on forest ecosystems have triggered multiple model-based impact assessments for the future, which however feature considerable uncertainty regarding local impacts over larger areas (i.e., regional to national scales). In *Chapter 4*, I aimed at bridging this gap by analyzing the climate change sensitivity until the end of the 22nd century for 71 typical managed Swiss forests. To account for various sources of uncertainty in the projections, the effect of eight different model versions (developed in *Chapter 3*) as well as alternative soil types and climate change scenarios were considered. The simulations showed substantial changes in basal area and species composition, with dissimilar responses to climate change across and within elevation zones. I identified the following stands as being most prone to negative climate-induced impacts: (1) stands in the sub-montane and low montane elevations zones and (2) stands located on poor soils in the high montane and subalpine elevation zones. The introduction of additional, more climatically adapted species partly mitigated the negative impacts of climate change, suggesting that admixing drought-tolerant species is advisable across all elevations to increase the resistance and resilience of forest stands to climate change. Yet, the large influence of site conditions and the choice of the forest model on some of the projections indicates that uncertainty sources other than the climate change scenarios need to be considered in impact assessments. By considering diverse sources of uncertainty, including structural and parameter-related uncertainties of the model, I was thus able to demonstrate their

key relevance for an improved, evidence-based decision support in forest management under climate change.

Throughout the thesis, I presented an approach to improve the robustness, accuracy and generality of FGMs, and demonstrated how to upscale climate-change impact assessments from the local to the national scale, which I believe are important steps in advancing the frontier of large-scale applications of FGMs. The insights from this thesis are furthermore relevant for other DVMs, especially for those that feature strong structural similarity with ForClim.

Zusammenfassung

Waldökosysteme stellen dem Menschen eine Reihe essentieller Ökosystemdienstleistungen zur Verfügung. Zugleich sind Wälder jedoch vielfältigen Belastungen ausgesetzt und stehen in Zeiten des fortschreitenden Klimawandels einer unsicheren Zukunft gegenüber. Insbesondere die Geschwindigkeit des anthropogenen Klimawandels stellt die Forstwirtschaft vor grosse Herausforderungen. Für die waldbauliche Planung sind wissenschaftlich fundierte Grundlagen zu den möglichen Auswirkungen des Klimawandels daher unabdingbar. Diese sollten sowohl lokale Gegebenheiten berücksichtigen, wie z.B. die aktuelle Baumartenzusammensetzung heutiger Bestände, als auch Informationen auf grösseren räumlichen Skalen (d.h. auf regionaler bzw. nationaler Ebene) bieten, welche für die waldbauliche Planung relevant sind.

Mögliche zukünftige Entwicklungen von Waldökosystemen lassen sich mit Hilfe dynamischer Vegetationsmodelle (sog. DVMs) vorhersagen. Insbesondere Waldsukzessionsmodelle, sog. *'Forest gap models'*, sind dafür besonders geeignet, da sie die Dynamik auf der Bestandesebene abbilden und standortspezifische Faktoren berücksichtigen. Obwohl solche Modelle auf einen möglichst hohen Grad an Allgemeingültigkeit und Realismus abzielen, gibt es bisher nur wenige Anwendungen von Waldsukzessionsmodellen auf grossen Skalen (z.B. auf kontinentaler Ebene). Dies ist hauptsächlich auf zwei Probleme zurückzuführen. Einerseits stellt die Parametrisierung dieser Modelle eine grosse Herausforderung dar. Andererseits ist es möglich, dass entscheidende ökologische Prozesse unzureichend abgebildet sind. Daher werden viele Modelle für lokale Anwendungen neu kalibriert oder in ihrer Struktur angepasst. Solche Vorgehensweisen führen in der Regel jedoch nicht zu einer verbesserten Allgemeingültigkeit des Modells. Zudem konzentrieren sich Verbesserungen von Prozessrepräsentationen typischerweise auf einen einzigen Prozess (z.B. auf das Einzelbaumwachstum). Da bei einem solchen Vorgehen Prozessinteraktionen in der Regel nicht berücksichtigt werden, besteht die Gefahr, dass Interaktionen zwischen den Prozessen (z.B. zwischen Wachstum und Mortalität) nicht adäquat abgebildet werden. Deshalb wurde in jüngster Zeit wiederholt gefordert, die zentralen Prozesse innerhalb von DVMs gleichzeitig zu überprüfen.

Diese Dissertation hatte zum Ziel, die Robustheit der Projektionen des Waldsukzessionsmodells ForClim für verschiedene Anwendungsbereiche zu verbessern. Ein besonderer Schwerpunkt lag dabei auf der Konsistenz von Prozessinteraktionen. Konkret zielten diese Bemühungen darauf ab, robuste Klimafolgenabschätzungen auf regionaler bzw. nationaler Ebene zu ermöglichen und dabei kleinräumige Gegebenheiten zu berücksichtigen.

In *Kapitel 1* habe ich zunächst eine Sensitivitätsanalyse für das DVM ForClim durchgeführt, um das Modellverhalten zu analysieren. Diese Analyse ermöglichte es, Prozesse zu identifizieren, die das Modellverhalten maßgeblich steuern. Modellverbesserungen in diesen Prozessen sind daher besonders effektiv und können z.B. aus einer Verbesserung der Prozessdarstellung oder durch robustere Parameterwerte zustande kommen. Da der relative Einfluss von Parametern im Simulationsverlauf nicht zwingenderweise konstant ist und von den Standortbedingungen, der Bestandsstruktur und der Artenzusammensetzung abhängen kann, habe ich die Parametersensitivität des Modells an 30 repräsentativen Standorten in ganz Europa analysiert. Zudem habe ich die Ergebnisse für Rein- und Mischbestände zu zwei Zeitpunkten (d.h. frühe und späte Sukzessionsphase) miteinander verglichen. Besonders wichtige Parameter stammten aus den Modellbereichen der Baumverjüngung, des Wasser- und Lichtregimes, des Baumwachstums und temperaturbezogener Prozesse. Der Einfluss temperaturbezogener Parameter hing dabei stark von den lokalen Klimabedingungen ab. Darüber hinaus unterschied sich die Modellsensitivität zwischen Rein- und Mischbeständen sowie zwischen frühen und späten Sukzessionsphasen, was den unterschiedlichen Einfluss ökologischer Prozesse auf die Bestandesstruktur widerspiegelt. Die Modellanwendung auf europäischer Ebene (d.h. weit über den geografischen Bereich hinaus, für den ForClim ursprünglich entwickelt worden war) lieferte zudem Hinweise auf strukturelle Mängel und Parametrisierungsprobleme.

Da sich ForClim als sehr sensitiv gegenüber wasserbezogenen Parametern erwies (*Kapitel 1*) und die Darstellung der Wasserbilanz in DVMs im Hinblick auf den Klimawandel von größter Bedeutung ist, habe ich in *Kapitel 2* das Wassermodul von ForClim untersucht. Die meisten DVMs modellieren die Wasserverfügbarkeit auf der Grundlage einer Wasserbilanz, welche von der potentiellen Evapotranspiration (PET) angetrieben wird. Daher beurteilte ich die Genauigkeit des Wassermoduls von ForClim einschließlich der derzeit verwendeten PET-Formulierung, die auf Thornthwaite und Mather (1957) basiert. Dazu verglich ich die monatlich simulierte aktuelle Evapotranspiration (AET) mit gemessenen Werten an

bewaldeten FLUXNET-Standorten aus verschiedensten Klimazonen. Darüber hinaus bezog ich alternative PET-Formulierungen in die Analyse mit ein, insbesondere jene von Priestley und Taylor (1972), die einen höheren Grad an mechanistischem Detail aufweist als die derzeit verwendete Formulierung. Die Genauigkeit des Wassermoduls hing unabhängig von der verwendeten PET-Formulierung hauptsächlich vom Klimatyp ab. Eine komplexere PET-Formulierung wird die Abschätzung des Wassermangels auf jährlicher Basis in ForClim daher kaum verbessern. Vielmehr sollten waldspezifische Besonderheiten in der Wasserbilanz stärker berücksichtigt werden, da die meisten Wasserbilanzen für landwirtschaftliche Anwendungen entwickelt wurden.

In *Kapitel 3* untersuchte ich die Kernprozesse von ForClim sowie die Konsistenz ihres Zusammenspiels. Auf der Grundlage ökologischer Theorien und Erkenntnisse sowie verschiedenster empirischer Daten entwickelte ich eine Reihe alternativer Prozessdarstellungen und Parameterschätzungen für die Kernprozesse Lichtverfügbarkeit, Baumverjüngung, -wachstum und -mortalität. Anschliessend verwendete ich die Methode ‘musterorientiertes Modellieren’ (POM: *Pattern-Oriented Modeling*), um alle Kombinationen der Standard- und Alternativformulierungen (504 Modellversionen) für eine Vielzahl von Modellanwendungen und Standortsbedingungen zu testen. Dabei stellte ich fest, dass sich die Leistung des Modells durch die Anpassung eines einzigen Prozesses für eine bestimmte Anwendung verbessern lässt. Die besten Modellversionen beinhalteten jedoch typischerweise mehr als eine alternative Prozessformulierung oder Parameterschätzung. Bei der Überarbeitung von Modellen ist die gleichzeitige Betrachtung mehrerer Kernprozesse daher von zentraler Bedeutung, da so Inkonsistenzen in den Interaktionen zwischen einzelnen Prozessen aufgedeckt werden können. POM erwies sich in diesem Zusammenhang als geeignete Methode, die es ermöglicht, verschiedene Anwendungsbereiche des Modells gleichzeitig zu analysieren und verschiedenste Modellergebnisse mit einem breiten Spektrum von beobachteten Mustern zu vergleichen, die sich auf unterschiedliche zeitliche und räumliche Skalen beziehen. Ich komme daher zum Schluss, dass die Forschung die ständig wachsende Datenverfügbarkeit und den POM-Ansatz nutzen sollte, um die Kernprozesse dynamischer Modelle ganzheitlich zu überprüfen und zu verbessern.

Die zunehmend negativen Auswirkungen des Klimawandels haben eine Vielzahl modellbasierter Abschätzungen der Empfindlichkeit von Waldökosystemen ausgelöst. Solche Abschätzungen sind jedoch mit erheblichen Unsicherheiten verbunden, insbesondere in Bezug auf die lokalen Auswirkungen des Klimawandels. Daher liegen für grössere Gebiete (d.h. auf regionaler bis nationaler Ebene) kaum verlässliche Vorhersagen über mögliche kleinräumige Auswirkungen vor. Aus diesem Grund analysierte ich in *Kapitel 4* die Klimasensitivität 71 typischer bewirtschafteter Schweizer Waldtypen bis Ende des 22. Jahrhunderts. Dabei wurden die möglichen Einflüsse verschiedener Unsicherheiten auf die Modellprojektionen berücksichtigt, indem Simulationen mit acht verschiedenen Modellversionen (entwickelt in *Kapitel 3*) für zwei verschiedene Bodentypen und drei Klimawandelszenarien gemacht wurden. Gemäss den Resultaten sind erhebliche Veränderungen der Basalfläche und der Artenzusammensetzung für Schweizer Wälder zu erwarten, wobei sich ihre Klimasensitivität zwischen und innerhalb der Höhenstufen teilweise stark unterschied. Als besonders anfällig für negative klimabedingte Veränderungen erwiesen sich folgende Bestände: (1) typische Bestände der submontanen und untermontanen Höhenstufe und (2) Bestände auf armen Böden in der hochmontanen und subalpinen Höhenstufe. Negative Auswirkungen des Klimawandels liessen sich durch die Einführung zusätzlicher, klimatisch besser angepasster Arten teilweise abschwächen. Um die Widerstandsfähigkeit der Waldbestände gegenüber dem Klimawandel zu erhöhen, erscheint es daher ratsam, die Beimischung trockenheitstoleranter Arten in allen Höhenlagen zu fördern. Die Berücksichtigung verschiedenster Unsicherheitsfaktoren verdeutlichte ausserdem, dass Projektionen zur Klimaempfindlichkeit nicht nur Unsicherheiten in den Klimawandelszenarien, sondern auch weitere, bisher vernachlässigte Unsicherheitsfaktoren berücksichtigen sollten, wie zum Beispiel strukturelle und parameterbezogene Unsicherheiten von DVMs. Der Einbezug solcher Unsicherheiten ist von grosser Bedeutung für eine verbesserte und evidenzbasierte Entscheidungsunterstützung für die zukünftige Waldbewirtschaftung.

Die vorliegende Dissertation zeigt auf, wie sich die interne Konsistenz eines Waldsukzessionsmodells und somit die Robustheit seiner Projektionen für verschiedene Anwendungsbereiche verbessern lässt. Zudem zeigte ich auf, wie sich Klimafolgenabschätzungen von der lokalen auf die nationale Ebene hochskalieren lassen, unter Beibehaltung und Berücksichtigung kleinräumiger Gegebenheiten und Prozesse. Diese

Aspekte stellen meiner Ansicht nach wichtige Schritte in Richtung einer grossflächigen Anwendung von Waldsukzessionsmodellen dar. Die Erkenntnisse aus dieser Arbeit sind für andere DVMs relevant, insbesondere für solche, die eine starke strukturelle Ähnlichkeit mit ForClim aufweisen.