

# Entwicklung von Mischbeständen mit komplexer Struktur im Klimawandel

Harald Bugmann Professur Waldökologie, ETH Zürich (CH)\*

Nica Huber Professur Waldökologie, ETH Zürich, und Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, WSL (CH)

## Entwicklung von Mischbeständen mit komplexer Struktur im Klimawandel

Im naturnahen Waldbau liegt der Schwerpunkt auf Beständen mit mehreren Baumarten und einer stufigen Struktur. Um deren zukünftige Entwicklung abzuschätzen, sind dynamische Modelle nützlich. Mit der Familie der Gap-Modelle, die ursprünglich aus der Ökologie stammen, sind solche Analysen möglich. Am Beispiel des Modells ForClim wird aufgezeigt, wie diese Modelle strukturiert sind, wie sie eingesetzt werden können und wo ihre Grenzen liegen. Anhand einer Stratifizierung der schweizerischen Waldfläche nach Standortregion, Höhenstufe, Struktur und Baumartenzusammensetzung wurden 71 typische Bestände (Straten) hergeleitet. Für jedes Stratum wurden Simulationen mit vier Klimaszenarien, zwei verschiedenen Annahmen über die Bodeneigenschaften sowie acht Modellvarianten durchgeführt. Letzteres erfolgte, weil bisher weitgehend unbekannt war, wie stark sich die Unsicherheiten in den Modellformulierungen auf die Simulationsergebnisse auswirken. Die Simulationsergebnisse zeigen ein regional und nach Höhenstufen differenziertes Bild, mit teils starken Veränderungen der Bestandesgrundfläche und der Artenzusammensetzung. Je nach Stratum waren bei den einzelnen Arten Abnahmen oder Zunahmen zu verzeichnen. Die Bodeneigenschaften erwiesen sich als sehr wichtig, überraschenderweise auch in der subalpinen und der ober-subalpinen Stufe. Die Unsicherheiten in den Modellformulierungen beeinflussen die Simulationsergebnisse nicht wesentlich, d.h., das Modellverhalten ist robust. Die Ergebnisse der einzelnen Straten können für die waldbauliche Planung auf der betrieblichen oder überbetrieblichen Ebene verwendet werden. Sie liefern zwar keine handfesten Empfehlungen für die zukünftige Bewirtschaftung der konkreten Bestände (d.h., sie sollen nicht wörtlich genommen werden), verdienen es aber, ernst genommen zu werden, da sie Trends in der zukünftigen Entwicklung aufzuzeigen vermögen.

**Keywords:** ForClim, stand model, mixed stands, species diversity, forest management, climate change  
**doi:** 10.3188/szf.2020.0133

\* Universitätstrasse 16, CH-8092 Zürich, E-Mail harald.bugmann@env.ethz.ch

Am Anfang war alles einfach: Das Normalwaldmodell – entwickelt von Hundeshagen (1826) basierend auf Ideen von Carlowitz (1713) – geht davon aus, dass der Wald aus Beständen verschiedenen Alters einer einzigen Art besteht, wobei jeder Bestand einschichtig ist, weil er aus Pflanzung hervorgeht. Den in solchen Plantagen zu erwartenden Holztertrag kann man mit einfachen empirischen Modellen wie Ertragstabeln (Badoux 1967) vorhersagen, wenn die Bonität bekannt ist. In den letzten 30 Jahren wurde es aber vor allem in Anbetracht der Stickstoffdeposition und des Klimawandels nötig, flexiblere, «prozessbasierte» Modelle für einschichtige Bestände einer Art zu entwickeln (z.B. 3-PG, Landsberg & Waring 1997; Hung et al 2019; Forrester et al 2020, dieses Heft).

Seit den Zeiten von Carlowitz hat sich die forstliche Perspektive gewandelt. Basierend auf den

Arbeiten von Visionären wie Gayer (1886) wurde der «naturnahe» Waldbau entwickelt (BAFU 2010). Die heutigen Zielbestände umfassen oft mehrere Baumarten und sind mehrschichtig. Es ist sehr wichtig, aber ungemein schwieriger, die Entwicklung von reich strukturierten Mischbeständen vorherzusagen, sowohl unter einem konstanten Klima als auch unter der vom Menschen verursachten Klimaveränderung.

Um diese Aufgabe zu unterstützen, wurden in den Forstwissenschaften neue dynamische Modelle entwickelt, zum Beispiel SILVA (Pretzsch et al 2002), die wie die Ertragstabeln auf den Daten ertragskundlicher Versuchsbestände basieren, diese aber für die Modellierung der Entwicklung von Einzelbäumen anstatt des Gesamtbestandes verwenden. Die Modellierung erfolgt manchmal mit, manchmal ohne Berücksichtigung der lokalen Nachbarschaft des Ein-

zelbaums (sog. distanzabhängige bzw. distanzunabhängige Modellierung). Solche Modelle weisen meist eine lokal sehr hohe Genauigkeit auf, weil sie mit vielen Messdaten kalibriert worden sind. Ihre Anwendbarkeit über den Bereich der Kalibrationsdaten hinaus ist aber nicht immer gegeben (vgl. Schmid et al 2006). Zell et al (2020, dieses Heft) stellen die Struktur und Anwendung eines derartigen Modells vor.

Ausserdem wurde eine Entwicklungslinie von dynamischen Modellen aus der Ökologie interessant, die sogenannten Gap-Modelle (Botkin et al 1972). Diese kommen aus der Sukzessionsforschung und beschäftigten sich ursprünglich mit der Entwicklung unbewirtschafteter Bestände («potenzielle natürliche Vegetation»), die durch eine hohe strukturelle Komplexität und hohe Artenvielfalt charakterisiert sind (z.B. Shugart & West 1977). In den letzten 20 Jahren wurden vermehrt auch bewirtschaftete Bestände zum Gegenstand der Forschung mit Gap-Modellen (z.B. Glauner et al 2003, Seidl et al 2007, Rasche et al 2011).

Gap-Modelle haben den Vorteil, dass sie in der Regel einen sehr breiten Anwendungsbereich haben, weil die Prozessformulierungen auf allgemeinen ökologischen Kenntnissen und Zusammenhängen basieren. Ihre Aussagen sind aber für lokale Anwendungen oft zu wenig präzise, weil die Modellergebnisse (z.B. die Artanteile oder die Bestandesgrundfläche) nicht anhand von empirischen Daten kalibriert werden, sondern sich aus dem Zusammenspiel der ökologischen Prozesse ergeben (sog. emergente Eigenschaften). Der vorliegende Artikel illustriert die Funktionsweise der Gap-Modelle anhand von ForClim (Bugmann 2001).

Die hier vorgestellte Anwendung von ForClim (Bugmann 1996, Rasche et al 2011) baut auf der Studie von Bircher et al (2015b) auf, geht aber in zwei Beziehungen darüber hinaus (Huber et al, in Revision<sup>1</sup>): Erstens betrachtet sie den Einfluss verschiedener Bodeneigenschaften auf die Walddynamik. Zweitens quantifiziert sie die in den meisten anderen Studien ignorierte Unsicherheit, die durch die unterschiedliche Formulierung der Prozesse (z.B. Verjüngung, Zuwachs, Mortalität) bedingt ist. Wir präsentieren generelle Trends der Waldentwicklung entlang der Höhenstufen und zoomen in ein einzelnes Fallbeispiel hinein.

## Material und Methoden

### Struktur des Gap-Modells ForClim

ForClim ist ein klimasensitives Gap-Modell, in dem die Verjüngung, der Zuwachs und die Mortalität von Bäumen auf unabhängigen kleinen Flächen («patches», in der Regel  $n = 200$  mit einer Flächengrösse von 500 bis 1000 m<sup>2</sup>) in jährlichen Zeitschritten basierend auf biotischen und abiotischen Be-

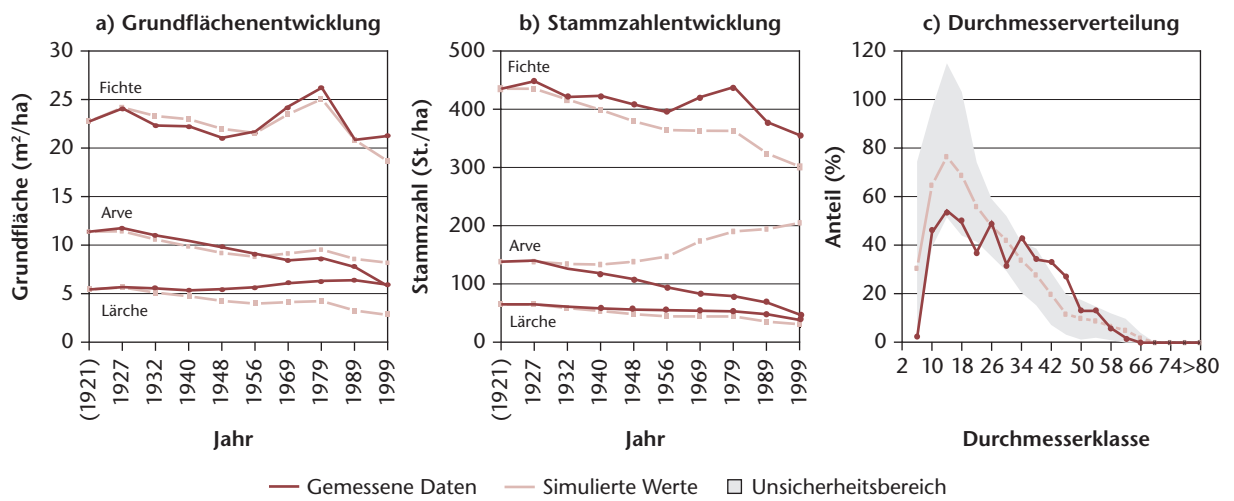
dingungen simuliert werden (Bugmann 1996). Die Flächengrösse ist so gewählt, dass ein Baum oder wenige Bäume die gesamte Fläche dominieren können, sodass anlässlich ihres Absterbens eine Lücke (engl. gap) entsteht, was den Namen dieser Modellfamilie erklärt. ForClim ist für etwas mehr als 30 mittel-europäische Baumarten parametrisiert.

In ForClim tritt Verjüngung mit einem durchschnittlichen Brusthöhendurchmesser (BHD) von 1.27 cm auf. Ein Zufallsexperiment bestimmt anhand eines standortspezifischen Wahrscheinlichkeitsparameters, ob sich in einem bestimmten Jahr Verjüngung etablieren kann. Die Gesamtzahl der neuen Bäume wird aus den Standort- und Bestandeseigenschaften abgeleitet und anschliessend auf diejenigen Arten verteilt, bei denen die artspezifischen Anforderungen an die Lichtverfügbarkeit am Waldboden, die Bodenfeuchtigkeit, die Wintertemperatur, die Länge der Vegetationsperiode und die Verblissintensität erfüllt sind (Bugmann 1996, Risch et al 2005, Didion et al 2009).

Die Zuwachsgleichung basiert auf einer modifizierten Version des Kohlenstoffbilanzmodells von Moore (1989). Der jährliche Volumenzuwachs wird aus dem theoretisch optimalen Zuwachs abgeleitet, wobei Abzüge aufgrund der morphologischen (Kronenlänge) und ökologischen Bedingungen (Lichtverfügbarkeit, Bodenfeuchtigkeit, Länge der Vegetationsperiode und Stickstoffverfügbarkeit) gemacht werden (Bugmann 1996, Didion et al 2009). Der jährliche Volumenzuwachs wird auf den Durchmesser und den Höhenzuwachs umgelegt unter Berücksichtigung der Konkurrenz um Licht und der standortspezifischen klimatischen Bedingungen (Rasche et al 2012).

Die Mortalität wird für jeden Baum individuell als stochastischer Prozess aufgefasst. Sie ergibt sich aus der Kombination von drei Mortalitätsraten: der Hintergrundmortalität, der stressbedingten Mortalität und der störungsbedingten Mortalität. Die Hintergrundmortalität steht für Prozesse, die im Modell nicht explizit berücksichtigt werden wie der Tod einzelner Bäume durch kleinere Störungen (z.B. Blitzeinschlag oder Pilzbefall; Bugmann 1994). Die stressbedingte Mortalität wirkt, wenn der jährliche Durchmesserzuwachs während mindestens dreier aufeinanderfolgender Jahre unter ein absolutes oder relatives Minimum fällt (Solomon 1986, Bircher et al 2015a). Die störungsbedingte Mortalität gibt grossflächige Störungen auf Landschaftsebene wie Kahlschlag, Feuer oder Schädlingsausbrüche wieder, die im Modell nicht explizit berücksichtigt werden, da die einzelnen Patches im Raum nicht verortet werden (siehe dazu Temperli & Bugmann 2020, dieses

<sup>1</sup> HUBER N, BUGMANN H, CAILLERET M, LAFOND V (IN REVISION) Stand-scale climate change impacts on forests over large areas: transient responses and projection uncertainties. Ecol Appl.



**Abb 1** Verhalten von ForClim im Vergleich zu ertragskundlichen Versuchsdaten, hier am Beispiel einer Versuchsfläche in St. Moritz. Das Modell wurde mit den anlässlich der ersten Inventur gemessenen Daten initialisiert. Entwicklung der artspezifischen Grundfläche (a) und der Stammzahl (b) von 1921 bis 1999 sowie Vergleich der simulierten Durchmesserverteilung des Gesamtbestandes (inkl. Unsicherheitsbereich, grau schattiert) mit den Messdaten aus der Ertragskundefläche des Jahres 1999. Die beiden Verteilungen unterscheiden sich statistisch nicht signifikant voneinander. Das Modell ist weder für diesen Standort noch mit diesen Daten kalibriert worden. Aus Rasche et al (2011).

Heft). Darüber hinaus kann ein breites Spektrum an Pflanzungs-, Jungwaldpflege-, Durchforstungs- und Erntetechniken simuliert werden (Rasche et al 2011).

Ein stochastischer Wettergenerator berechnet für jeden Patch monatliche Wetterdaten für die Mitteltemperatur und die Niederschlagssumme, entweder aufgrund von Langzeit-Beobachtungsreihen (hier: Referenzzeitraum 1980–2009) oder aufgrund des Outputs von globalen Klimamodellen (Klimaszenarien für die Zukunft; hier Emissionsszenario A2 gemäss CH2011 2011). Basierend auf diesen Wetterdaten werden für jedes Simulationsjahr drei bioklimatische Indizes – die minimale Wintertemperatur, die Summe der Tagesgrade sowie ein Trockenheitsindex – abgeleitet, die die Verjüngung, den Zuwachs und indirekt über den Zuwachs auch die Mortalität beeinflussen.

#### Modellevaluation und Unsicherheiten in der Modellstruktur

ForClim ist unter einer Vielzahl von Umweltbedingungen in Europa evaluiert worden (z.B. Rasche et al 2011, Mina et al 2017; Abbildung 1). Darüber hinaus wurden das Verhalten und die Parameterempfindlichkeit der Modellversion 3.3 mit einer Sensitivitätsanalyse bewertet (Huber et al 2018). Im Rahmen eines umfangreichen Prozesses zur Verbesserung des Modells wurden alternative Formulierungen der ökologischen Kernprozesse verglichen. Basierend auf diesen Ergebnissen wurde die neue Modellversion 4.0 erstellt (Huber et al 2020). Beide Analysen beziehen sich auf einen sehr breiten ökologischen Gradienten in Europa und zeigten eine erhebliche Sensitivität der Modellprojektionen gegenüber den getroffenen Annahmen bezüglich Verjüngung, Wachstum und Mortalität. Aus diesen

Gründen wurden für die Simulationen acht Modellvarianten ausgewählt. Diese weisen einerseits eine ökologisch plausible Struktur auf und zeigen andererseits ein hinreichend genaues Verhalten bezüglich eines umfangreichen Satzes von empirischen Daten aus ertragskundlichen Versuchsbeständen (Kurzzeitsimulationen), aber auch bezüglich der Attribute von Naturwäldern (Langzeitsimulationen, Huber et al 2020). In diesen acht Modellvarianten sind unterschiedliche Formulierungen der Verjüngungsprozesse, der Zuwachsaufteilung und der Hintergrundmortalität kombiniert.

#### Stratifizierung der schweizerischen Waldfläche und der Standortparameter

Um die zukünftige Entwicklung typischer Waldbestände in der Schweiz zu analysieren, wurden die von Bircher et al (2015b) aus 6838 Probeflächen des 3. Landesforstinventars (LFI3) abgeleiteten 71 Straten verwendet. Für jedes Stratum wurden die Einzelbaumdaten aller zugehörigen LFI-Probeflächen zu einem in Bezug auf Durchmesserstruktur und Artenzusammensetzung künstlichen Waldbestand zusammengefasst. Somit stellen diese Straten repräsentative, aber virtuelle Bestände für die jeweilige Standortregion und Höhenstufe dar (Frehner et al 2005, Bircher et al 2015b).

Für jedes Stratum wurden die Wasserspeicherkapazität, der verfügbare Stickstoff und ein Korrekturfaktor für Exposition und Neigung als Mittelwert über die Werte der zugehörigen LFI-Probeflächen abgeleitet. Für die Wasserspeicherkapazität wurden zwei verschiedene Werte verwendet, die eher tiefgründige bzw. eher flachgründige Böden repräsentieren. Für erstere wurden räumlich explizite Daten von Meteotest (Remund et al 2016) verwendet. Für

letztere wurden die Werte von Meteotest in Abhängigkeit der Höhenlage reduziert (Schwörer et al 2014, Wohlgemuth & Moser 2018), und zwar um 50% für die subalpine und oberalpine Höhenstufe und um 25% für die übrigen Höhenstufen. Weil Informationen über den an den einzelnen Standorten verfügbaren Stickstoff fehlten, wurde dieser Parameter in Abhängigkeit der Wasserspeicherfähigkeit zwischen 40 und 100 kg/(ha×Jahr) variiert.

### Aufbau der Simulationsstudie

Das Modell wurde für das Jahr 2006 mit den Einzelbaumdaten der Stratifizierung initialisiert. Bewirtschaftungsmassnahmen wurden so simuliert, dass sie die Best-Practice-Bewirtschaftung in der Schweiz abbilden. Sie wurden pro Höhenstufe und Bestandestyp (gleichaltrig/ungleichaltrig; Plenterung/Z-Baum-Auslese) definiert (für eine detaillierte Beschreibung siehe Bircher et al 2015b). Die Bewirtschaftung wurde auf alle Baumarten des Bestandes angewendet. Alle Simulationen gingen von Naturverjüngung aus. Grossflächige Störungen (auf Landschaftsebene; siehe Temperli & Bugmann 2020, dieses Heft) wurden nicht berücksichtigt.

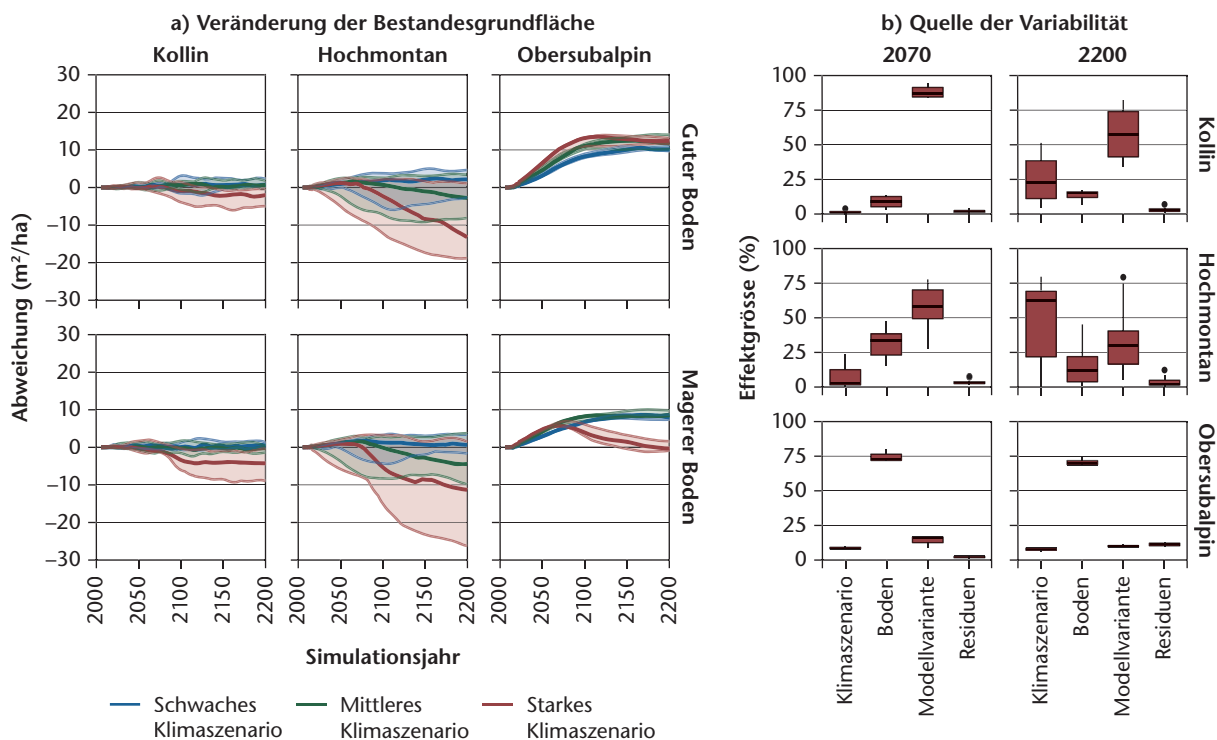
Es wurden zwei Arten von Simulationen durchgeführt, nämlich «Basispool bezüglich Arten» und «Immigration». Für die Basispoolsimulationen wurde die Artengarnitur auf jene Baumarten beschränkt, die 2006 mindestens 5% zur Bestandesgrundfläche eines Stratums beitrugen. Somit war das Aufkommen nicht bereits etablierter, neuer Arten auch unter Klimawandelsimulationen nicht mög-

lich. In den Simulationen mit Immigration wurden hingegen ab dem Jahr 2056 (d.h. 50 Jahre nach Beginn der Simulation) alle heute einheimischen Baumarten für die Verjüngung zugelassen. Die Naturverjüngung von heute am Standort sehr seltenen Baumarten wie auch die Einwanderung neuer Baumarten (aus tieferen Höhenstufen) ist in diesen Simulationen somit möglich. Die Verzögerung von 50 Jahren trägt der Tatsache Rechnung, dass neue Arten lokal, d.h. in einem bestimmten Bestand, zuerst verfügbar sein müssen. Dies kann entweder durch natürliche Aufwärtswanderung aufgrund des Klimawandels oder neue Bewirtschaftungsstrategien, zum Beispiel die Pflege von Samenbäumen oder eine gezielte Pflanzung («Assisted Migration»), geschehen.

Um die Sensitivität der Modellprojektionen auf Unsicherheiten in 1) den Klimaszenarien, 2) den Bodenparametern und 3) den Modellvarianten zu analysieren, wurde ein faktorielles Simulationsexperiment durchgeführt, das vier Klimaszenarien (historisches Klima und drei zukünftige Szenarien), zwei Bodentypen (reich und mager) und die bereits erwähnten acht Modellvarianten umfasst.

### Resultate

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass typische Reaktionsmuster pro Höhenstufe auftreten. In gewissen Höhenstufen sind nur sehr geringe Veränderungen in der Bestandesgrundfläche zu erwarten, beispielsweise in der kollinen Stufe (Abbildung 2a).



**Abb 2** a) Beispielhafte absolute Veränderungen in der Bestandesgrundfläche unter dem Szenario «Basispool bezüglich Arten» (nur heutige Baumarten zugelassen) für drei Höhenstufen und zwei Bodenqualitäten. b) Zuordnung der simulierten Variabilität zu den Unsicherheitsquellen in der Simulation für zwei Zeitpunkte und die in a) gezeigten Höhenstufen.

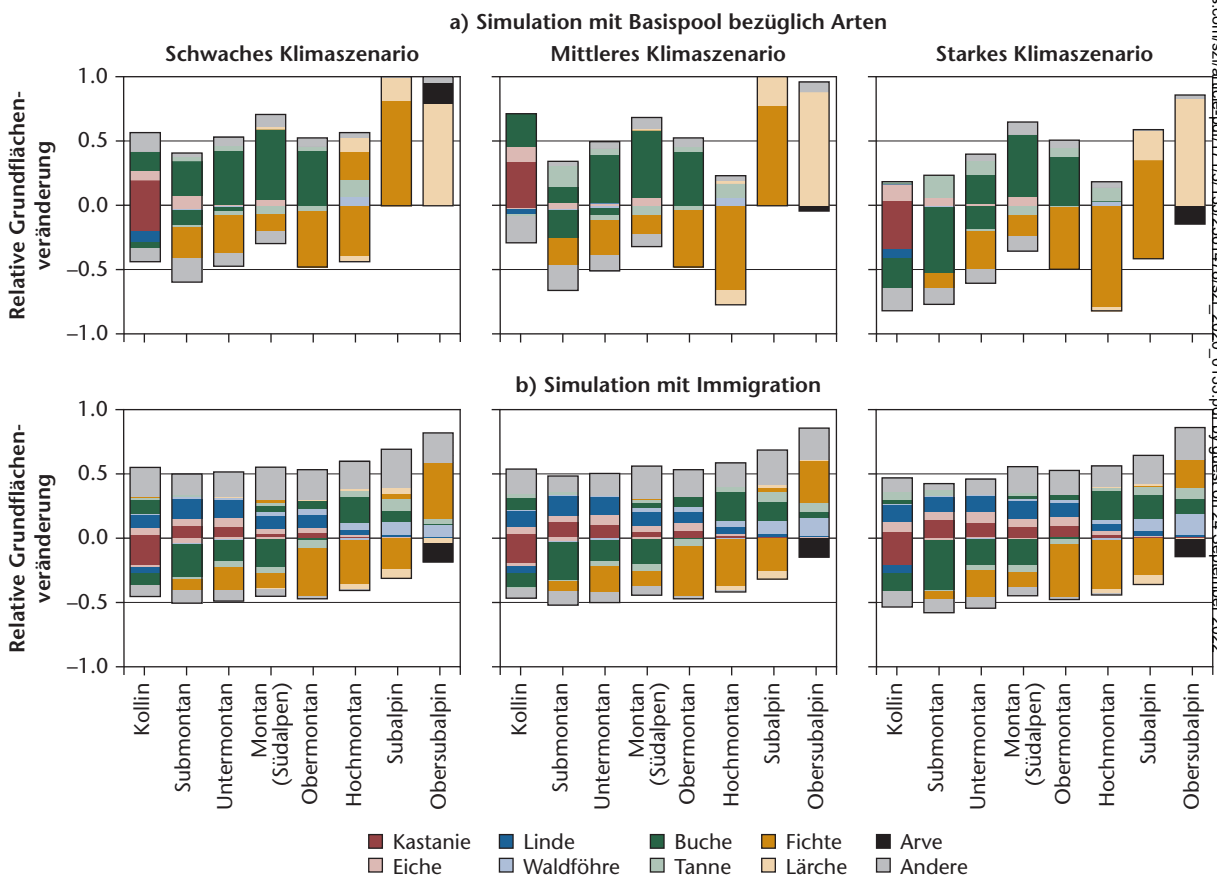


In diesen tiefen Lagen löst eine Temperaturerhöhung keine Wachstumssteigerung aus. Der Grund liegt darin, dass mit dem Temperaturanstieg auch die Verdunstung steigt, was zusammen mit den abnehmenden Sommerniederschlägen zu erheblicher Trockenheit führt. Die Bestandesgrundfläche nimmt aber auch unter einem starken Klimaszenario kaum ab, weil die Artenzusammensetzung bereits heute trockenheitsadaptiert ist. In der hochmontanen Stufe hingegen hat das erhöhte Trockenheitssignal im starken Klimaszenario erhebliche Auswirkungen auf die Grundfläche. Je nach Stratum wird ein Rückgang von bis zu 25 m<sup>2</sup>/ha simuliert, was das Waldbild stark verändern würde. In den obersten Lagen, zum Beispiel in der obersubalpinen Stufe, wirkt sich in erster Linie die Temperaturerhöhung auf die Bestandesgrundfläche aus, da in diesen Lagen die Temperatur heute ein entscheidender Minimumfaktor ist. Überraschenderweise reagieren die obersubalpinen Bestände unter dem starken Klimawandelszenario und auf mageren Böden zuerst mit einer Zunahme, danach aber wieder mit einem Rückgang der Bestandesgrundfläche bis ins Jahr 2200.

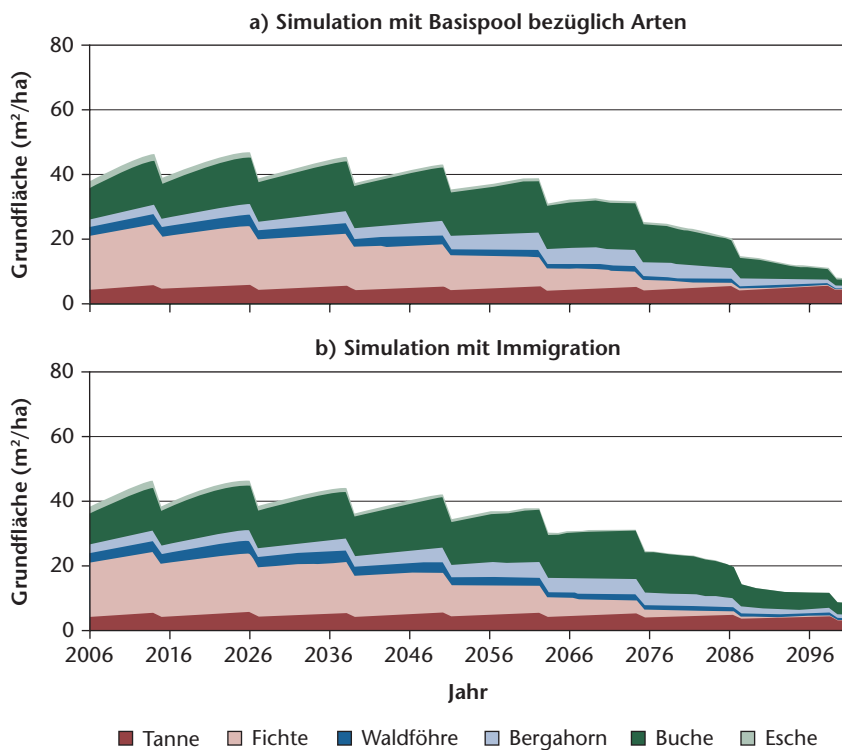
Die Analyse der Quellen der simulierten Variabilität (Abbildung 2b) zeigt, dass die Unterschiede

in den Klimaszenarien bis ins Jahr 2070 zu praktisch keiner Differenzierung der Simulationsergebnisse führen. Die Bodeneigenschaften sind in den ersten Jahrzehnten wesentlich wichtiger (hochmontan und v.a. obersubalpin), während die Modellvariante vor allem kollin und hochmontan wichtig ist. Dieses Bild verändert sich bis ins Jahr 2200, indem nun vor allem das Klimaszenario die Simulationsergebnisse bestimmt. Die scheinbar grosse Bedeutung der Modellvarianten für die kolline Stufe im Jahr 2200 muss relativiert werden, denn die simulierten Veränderungen in der Grundfläche sind in dieser Höhenstufe sehr gering (Abbildung 2a).

Bezüglich der Baumartenmischung (Abbildung 3) ist bereits unter dem schwachen Klimaszenario mit grösseren Veränderungen zu rechnen, indem in den tieferen Lagen die Laubbäume zulegen und die Fichte trockenheitsbedingt zurückgeht. Betrachtet man nur die heute vorkommenden Arten (Abbildung 3a), so nimmt in diesen Höhenstufen vor allem die Buche stark zu. Wenn alle einheimischen Arten sich etablieren können (Abbildung 3b), ergibt sich ein sehr diverser Mix an Baumarten bis in die hochmontane Stufe, und auch subalpin und obersubalpin steigt die Baumartendiversität stark an.



**Abb 3** Relative Veränderung der Artenzusammensetzung im Jahr 2200 für die Simulation mit Basispool bezüglich Arten (a) und mit Immigration aller einheimischen Arten (b) pro Höhenstufe für drei Klimaszenarien. Werte >0 stellen einen Anstieg, Werte <0 einen Rückgang der Grundfläche der jeweiligen Art dar. Die Summe aller absoluten Veränderungen pro Höhenstufe beträgt immer 1.0. Es ist zu beachten, dass die gleiche Art innerhalb einer Höhenstufe Veränderungen in beide Richtungen zeigen kann, sofern sie in einigen Straten zu- und in anderen Straten abnimmt. Die Ergebnisse beziehen sich auf einen guten Boden (für Details siehe Huber et al, in Revision).



**Abb 4** Entwicklung der Bestandesgrundfläche im Stratum Jura, submontan, guter Boden, mehrschichtiger Bestand (bestehend aus 17 LFI-Probeflächen, durchschnittliche Höhe 552 m ü.M.), starkes Klimaszenario, heutige Best-Practice-Bewirtschaftung für die Simulation mit Basispool bezüglich Arten (a) und Immigration aller einheimischen Arten (b).

Diese Trends sind unter dem mittleren und starken Klimaszenario noch ausgeprägter, wobei beim starken Klimaszenario auch in der subalpinen und ober-subalpinen Stufe in gewissen Straten Rückgänge der Grundfläche oder des Anteils einzelner Arten auftreten (siehe auch Abbildung 2).

Aus einer derartig groben Übersicht über die Simulationsergebnisse (Abbildungen 2 und 3) lässt sich für einen Forstkreis oder gar einen Forstbetrieb wenig Konkretes für die Ausgestaltung der zukünftigen Bewirtschaftung ableiten. Es muss stattdessen auf die Ergebnisse einzelner Straten fokussiert werden.

In Abbildung 4 ist beispielhaft das Stratum «Jura, submontan, guter Boden mit einem mehrschichtigen Bestand» unter dem Einfluss des starken Klimaszenarios dargestellt. Der Bestand wird heute durch Fichte und Buche geprägt. Beide Baumarten haben an diesem Standort keine gute Zukunft: Die Grundfläche der Buche geht aufgrund der zunehmenden Trockenheit stark zurück (auf Werte unter 20 m<sup>2</sup>/ha), und die Fichte verschwindet vollständig. Es ist fraglich, ob das heutige Best-Practice-Bewirtschaftungsregime unter solchen Umständen unverändert weitergeführt würde. Doch auch wenn anders bewirtschaftet würde, wären die Ergebnisse für diese beiden Hauptbaumarten qualitativ kaum anders. Interessanterweise ist der Einfluss der Trockenheit unter diesem Klimaszenario für dieses Stratum so stark, dass (mindestens bis ins Jahr 2100) keine

neuen einheimischen Baumarten aufkommen können, auch keine trockenheitstoleranteren. Dies wirft die Frage auf, ob und wann neue, weitaus trockenheitstolerantere Baumarten in derartige Bestände eingebracht werden müssten, und ob sie dann zusätzlicher Förderung bedürften.

Um weitere detaillierte Analysen der Ergebnisse einzelner Straten zur ermöglichen, sind sämtliche Simulationsergebnisse dieser Studie auf der Website der Professur für Waldökologie<sup>2</sup> als Kurzberichte pro Stratum im PDF-Format abrufbar, inklusive ausführlicher Erläuterungen und Kommentare.

## Diskussion und Schlussfolgerungen

Wir treffen Entscheidungen immer anhand von Modellen, sei dies in der praktischen Forstwirtschaft oder im Leben überhaupt (Thürig & Bugmann 2020, dieses Heft). Vorstellungen über die mögliche zukünftige Entwicklung von Waldbeständen sind notwendig, um zu entscheiden, ob eine Bewirtschaftung nötig ist und wie sie gegebenenfalls auszusehen hat. Gap-Modelle sind explizite Hypothesen über die Faktoren, die die Walddynamik im Zeitraum von Jahrzehnten bis Jahrhunderten prägen, sowie über ihre Wechselwirkungen (Abbildung 5). In diesem Sinne sind die Modelle falsifizierbar, nicht aber verifizierbar (Popper 1935), wobei Letzteres ohnehin ein Ding der Unmöglichkeit ist, weil wir wissen, dass die Modelle falsch sind beziehungsweise nur einen engen Gültigkeitsbereich haben («all models are wrong, but some models are useful», Box 1976; siehe Thürig & Bugmann 2020, dieses Heft).

In vielen Studien ist aber gezeigt worden, dass Gap-Modelle für eine ganze Reihe von spezifischen Fragestellungen in der Wissenschaft, aber auch in der Praxis nützlich sind (siehe Abbildung 1 bezüglich Evaluation und Abbildungen 2 bis 4 bezüglich einer konkreten Modellanwendung). Dabei ist hervorzuheben, dass diese Studien durchgeführt wurden, ohne dass das Modell für diese spezifischen Bestände kalibriert worden war, was bei empirisch abgestützten Modellen kaum funktioniert (siehe Mette et al 2009; Zell et al 2020, dieses Heft). Gap-Modelle haben sich über die Klimafolgenforschung hinaus in verschiedenen Anwendungsbereichen als hilfreich erwiesen, etwa zur Abschätzung der Auswirkungen der Bewirtschaftung auf ein Portfolio von Ökosystemleistungen (Mina et al 2017), für die Analyse des Zusammenhangs zwischen der Baumartendiversität und der Produktivität von Wäldern (Morin et al 2011) oder zur Untersuchung der Vegetationsdynamik seit der letzten Eiszeit (Heiri et al 2006).

<sup>2</sup> <https://fe.ethz.ch/forschung/stand-and-landscape-dynamics/waldbestaende-im-klimawandel.html> (5.3.2020)





**Abb 5** Die Walddynamik im Buchenwaldreservat Uholka (Ukraine) ist geprägt durch eine kleinflächige Dynamik mit Lücken, die durch die Mortalität weniger Bäume entstehen.

Foto: Harald Bugmann

Die hier vorgestellte Simulationsstudie bestätigt grundsätzlich die weniger detaillierten Ergebnisse früherer Analysen (z.B. Bugmann 1997, Jolly et al 2005, Mina et al 2017). Sie liefert aber ein differenzierteres und schweizweites Bild, da 71 aus dem LFI abgeleitete Straten verwendet wurden. Bereits die summarischen Ergebnisse pro Höhenstufe zeigen die grosse Bedeutung der Bodeneigenschaften auf, was aus früheren Studien nicht in dieser Deutlichkeit hervorgegangen ist (vgl. aber Manusch et al 2014). Dies gilt insbesondere auch für die höheren Lagen (subalpin und oberalpin), für die oft unterstellt wird, dass nur die Temperatur ein entscheidender limitierender Faktor ist (Körner et al 2016).

In der hier vorgestellten Untersuchung ist erstmals detailliert aufgezeigt worden, wie gross die Unsicherheiten sind, die durch unterschiedliche Formulierungen der ökologischen Prozesse in den Simulationsergebnissen verursacht werden. Wir können beispielsweise derzeit nicht allgemeingültig quantifizieren, von welchen Faktoren der Verjüngungserfolg entscheidend abhängt. Ebenso ist es sehr schwierig festzulegen, nach welchen Kriterien die Einzelbaummortalität funktioniert und wie die

entsprechenden Funktionen parametrisiert werden müssen. Diese Unsicherheiten könnten so starke Auswirkungen auf die simulierte Dynamik haben, dass sämtliche Unterschiede zwischen Klimaszenarien und Bodeneigenschaften in den Schatten gestellt würden, woraus man schliessen müsste, dass eine Aussage über die zukünftige Walddynamik grundsätzlich unmöglich ist.

Es ist deshalb sowohl für die Praxis als auch für die Wissenschaft von grosser Bedeutung, dass die vorliegende Studie ergab, dass die Modellunsicherheiten vor allem dort stark zu Buche schlagen, wo die simulierten Auswirkungen des Klimawandels gering sind, und umgekehrt. Dies bedeutet, dass das Modell robuste Aussagen erzeugt, die nicht gleich bei der geringsten Parameter- oder Formulierungsveränderung hinfällig werden. In Anbetracht der Vielzahl von Parametern und der Vielzahl von mathematischen Formulierungen im Modell ist dieses Ergebnis alles andere als selbstverständlich.

Diese Einsichten bezüglich der Robustheit der Modellaussagen sind sehr ermutigend. Trotzdem stellt sich die Frage, wie gross der Nutzen der Simulationsergebnisse in der Praxis ist. Die 71 Straten decken den Schweizer Wald systematisch ab, da die Simulationen mit Daten von 1766 Probeflächen des Landesforstinventars initialisiert worden sind, und pro Standortregion und Höhenstufe in der Regel mehrere Straten zur Verfügung stehen. Trotzdem dürfte es vorkommen, dass die 71 Straten die realen Bestände in einem konkreten Forstbetrieb zu wenig präzise wiedergeben (siehe Thrippleton et al 2020). Auch ist die Genauigkeit der Simulation 100 Jahre in die Zukunft kaum so hoch, dass die Bewirtschafteter die Simulationsergebnisse wörtlich nehmen könnten. Dennoch halten wir die Ergebnisse mindestens qualitativ für relevant für die waldbauliche Planung auf der betrieblichen oder überbetrieblichen Ebene. Sie geben zudem zuverlässige quantitative Hinweise bezüglich des Ausmasses der Veränderungen der Artenzusammensetzung und insbesondere der zu erwartenden Geschwindigkeit der Veränderungen, was mit statistischen Modellen nicht möglich ist (Thürig & Bugmann 2020, dieses Heft). Daraus kann man beispielsweise ableiten, wann und wo bestimmte Arten gefördert oder neu eingebracht werden sollten.

Letztlich bleibt es aber dabei, dass kein Modell die Realität «umfassend» abbilden kann. Die Simulationsergebnisse bleiben notwendigerweise unvollständig. In der vorliegenden Studie sind beispielsweise Borkenkäferkalamitäten (Temperli & Bugmann 2020, dieses Heft) oder Windwurf (Schuler et al 2019) nicht berücksichtigt worden, obwohl sie mit Sicherheit im weiteren Verlauf des 21. Jahrhunderts in der Walddynamik eine wichtige Rolle spielen werden. Aus dieser Unvollständigkeit ergibt sich zwingend, dass solche Simulationsstudien Ent-

scheidungen zwar unterstützen können («Decision Support»), dass sie aber nie die Entscheidung bereits enthalten oder vorwegnehmen können. Es gibt immer – und glücklicherweise – Entscheidungsspielraum vor Ort. Wir sollten Simulationsergebnisse von Gap-Modellen also nicht wörtlich nehmen, sie verdienen es aber, ernst genommen zu werden, da sie Trends in der zukünftigen Entwicklung aufzuzeigen vermögen. ■

Eingereicht: 1. November 2019, akzeptiert (mit Review): 5. März 2020

## Literatur

- BADOUX E (1967)** Ertragstafel Buche, Fichte, Tanne. Birmensdorf: Eidgenöss. Forsch. anstalt WSL.
- BIRCHER N, CAILLERET M, HUBER M, BUGMANN H (2015A)** Empfindlichkeit typischer Schweizer Waldbestände auf den Klimawandel. *Schweiz Z Forstwes* 166: 408–419. doi: 10.3188/szf.2015.0408
- BIRCHER N, CAILLERET M, BUGMANN H (2015B)** The agony of choice: different empirical mortality models lead to sharply different future forest dynamics. *Ecol Appl* 25: 1303–1318.
- BOTKIN DB, JANAK JF, WALLIS JR (1972)** Some ecological consequences of a computer model of forest growth. *J Ecol* 60: 849–872.
- BOX GEP (1976)** Science and statistics. *J Am Stat Assoc* 71: 791–799.
- BUGMANN H (1994)** On the ecology of mountainous forests in a changing climate: a simulation study. Zürich: ETH Zürich, PhD Thesis 10638. 258 p.
- BUGMANN H (1996)** A simplified forest model to study species composition along climate gradients. *Ecology* 77: 2055–2074.
- BUGMANN H (1997)** Sensitivity of forests in the European Alps to future climatic change. *Clim Res* 8: 35–44.
- BUGMANN H (2001)** A review of forest gap models. *Clim Change* 51: 259–305.
- CH2011 (2011)** Swiss climate change scenarios CH2011. Zürich: C2SM. 88 p.
- DIDION M, KUPFERSCHMID AD, ZINGG A, FAHSE L, BUGMANN H (2009)** Gaining local accuracy while not losing generality – extending the range of gap model applications. *Can J For Res* 39: 1092–1107.
- FORRESTER DI, TROTSIUK V, MATHYS AS (2020)** 3-PG: ein physiologisches Wachstumsmodell. *Schweiz Z Forstwes* 171: 158–164. doi: 10.3188/szf.2020.0158
- FREHNER M, WASSER B, SCHWITTER R (2005)** Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald. Wegleitung für Pflegemassnahmen im Schutzwald. Bern: Bundesamt Umwelt.
- GAYER K (1886)** Der gemischte Wald, seine Begründung und Pflege, insbesondere die Horst- und Gruppenwirtschaft. Berlin: Paul Parey. 158 p.
- GLAUNER R, DITZER T, HUTH A (2003)** Growth and yield of tropical moist forest for forest planning: an inquiry through modeling. *Can J For Res* 33: 521–535.
- HEIRI C, BUGMANN H, TINNER W, HEIRI O, LISCHKE H (2006)** A model-based reconstruction of Holocene treeline dynamics in the Central Swiss Alps. *J Ecol* 94: 206–216.
- HUBER N, BUGMANN H, LAFOND V (2018)** Global sensitivity analysis of a dynamic vegetation model: Model sensitivity depends on successional time, climate and competitive interactions. *Ecol Model* 368: 377–390.
- HUBER N, BUGMANN H, LAFOND V (2020)** Capturing ecological processes in dynamic forest models: why there is no silver bullet to cope with complexity. *Ecosphere* 11. doi: 10.1002/ecs2.3109
- HUNDESHAGEN JC (1826)** Die Forstabschätzung auf neuen, wissenschaftlichen Grundlagen, nebst einer Charakteristik und Vergleichung aller bisher bestandenen Forsttaxations-Methoden. Tübingen: Heinrich Laupp.
- HUNG TT, ALMEIDA AC, EYLES A, RATKOWSKY D, LAM VT ET AL (2019)** Maximising growth and sawlog production from *Acacia* hybrid plantations in Vietnam. *New For* 50: 785–804.
- JOLLY WM, DOBBERTIN M, ZIMMERMANN NE, REICHSTEIN M (2005)** Divergent vegetation growth responses to the 2003 heat wave in the Swiss Alps. *Geophys Res Lett* 32: L18409.
- KAUFMANN G, STAEDELI M, WASSER B (2010)** Grundanforderungen an den naturnahen Waldbau. Bern: Bundesamt Umwelt. 42 p.
- KÖRNER C, BASLER D, HOCH G, KOLLAS C, LENZ A ET AL (2016)** Where, why and how? Explaining the low-temperature range limits of temperate tree species. *J Ecol* 104: 1076–1088.
- LANDSBERG JJ, WARING RH (1997)** A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. *For Ecol Manage* 95: 209–228.
- MANUSCH C, BUGMANN H, WOLF A (2014)** Sensitivity of simulated productivity to soil characteristics and plant water uptake along drought gradients in the Swiss Alps. *Ecol Model* 282: 25–34.
- METTE T, ALBRECHT A, AMMER C, BIBER P, KOHNLE U ET AL (2009)** Evaluation of the forest growth simulator SILVA on dominant trees in mature mixed Silver fir–Norway spruce stands in South-West Germany. *Ecol Model* 220: 1670–1680.
- MINA M, BUGMANN H, CORDONNIER T, IRAUSCHEK F, KLOPCIC M ET AL (2017)** Future ecosystem services from European mountain forests under climate change. *J Appl Ecol* 54: 389–401.
- MOORE AD (1989)** On the maximum growth equation used in forest gap simulation models. *Ecol Model* 45: 63–67.
- MORIN X, FAHSE L, SCHERER-LORENZEN M, BUGMANN H (2011)** Tree species richness promotes productivity in temperate forests through strong complementarity between species. *Ecol Lett* 14: 1211–1219.
- POPPER KR (1935)** Logik der Forschung. Wien: Springer. 248 p.
- PRETZSCH H, BIBER P, DURSKY J (2002)** The single tree-based stand simulator SILVA: construction, application and evaluation. *For Ecol Manage* 162: 3–21.
- RASCHE L, FAHSE L, ZINGG A, BUGMANN H (2011)** Getting a virtual forester fit for the challenge of climatic change. *J Appl Ecol* 48: 1174–1186.
- RASCHE L, FAHSE L, ZINGG A, BUGMANN H (2012)** Enhancing gap model accuracy by modeling dynamic height growth and dynamic maximum tree height. *Ecol Model* 232: 133–143.
- REMUND J, RIHM B, HUGUENIN-LANDL B (2016)** Klimadaten für die Waldmodellierung für das 20. und 21. Jahrhundert. Bern: Meteotest. 40 p.
- RISCH AC, HEIRI C, BUGMANN H (2005)** Simulating structural forest patterns with a forest gap model: a model evaluation. *Ecol Model* 181: 161–172.
- SCHMID S, ZINGG A, BIBER P, BUGMANN H (2006)** Evaluation of the forest growth model SILVA along an elevational gradient in Switzerland. *Eur J For Res* 125: 43–55.
- SCHULER LJ, BUGMANN H, PETTER G, SNELL RS (2019)** How multiple and interacting disturbances shape tree diversity in European mountain landscapes. *Landsc Ecol* 34: 1279–1294.
- SCHWÖRER C, HENNE PD, TINNER W (2014)** A model-data comparison of Holocene timberline changes in the Swiss Alps reveals past and future drivers of mountain forest dynamics. *Glob Chang Biol* 20: 1512–1526.
- SEIDL R, RAMMER W, JÄGER D, CURRIE WS, LEXER MJ (2007)** Assessing trade-offs between carbon sequestration and timber production within a framework of multi-purpose forestry in Austria. *For Ecol Manage* 248: 64–79.



- SHUGART HH, WEST DC (1977) Development of an Appalachian deciduous forest succession model and its application to assessment of the impact of the chestnut blight. *J Env Manage* 5: 161–179.
- SOLOMON AM (1986) Transient response of forests to CO<sub>2</sub>-induced climate change: simulation modeling experiments in eastern North America. *Oecologia* 68: 567–579.
- TEMPERLI C, BUGMANN H (2020) Borkenkäferdynamik im Klimawandel: die Bedeutung der Landschaftsebene. *Schweiz Z Forstwes* 171: 142–150. doi: 10.3188/szf.2020.0142
- THRIPPLETON T, LÜSCHER F, BUGMANN H (2020) Climate change impacts across a large forest enterprise in the Northern Pre-Alps: dynamic forest modelling as a tool for decision support. *Eur J Forest Res.* doi: 10.1007/s10342-020-01263-x
- THÜRIG E, BUGMANN H (2020) Modelle? Brauche ich nicht. Modellieren? Tue ich nicht – oder vielleicht doch? *Schweiz Z Forstwes* 171: 110–115. doi: 10.3188/szf.2020.0110
- VON CARLOWITZ HC (1713/2009) *Sylvicultura oeconomica*, oder haußwirthliche Nachricht und Naturmäßige Anweisung zur wilden Baum-Zucht. Remagen-Oberwinter: Kessel, Reprint. 248 p.
- WOHLGEMUTH T, MOSER B (2018) Zehn Jahre Vegetationsdynamik auf der Waldbrandfläche von Leuk (Wallis). *Schweiz Z Forstwes* 169: 279–289. doi: 10.3188/szf.2018.0279
- ZELL J, NITZSCHE J, STADELMANN G, THÜRIG E (2020) SwissStandSim: ein klimasensitives, einzelbaumbasiertes Waldwachstumsmodell. *Schweiz Z Forstwes* 171: 116–123. doi: 10.3188/szf.2020.0116

## Développement de peuplements mixtes à structure complexe suite aux changements climatiques

En sylviculture proche de la nature, l'accent est mis sur les peuplements de plusieurs espèces et d'une structure complexe. Les modèles dynamiques sont utiles pour estimer leur développement futur. Avec la famille des modèles «gap» (modèles des trouées en forêt), qui proviennent de l'écologie, de telles analyses sont possibles. Nous utilisons l'exemple du modèle ForClim pour démontrer la structure de ces modèles, comment ils peuvent être utilisés, et quelles sont leurs limites. Sur la base d'une stratification de la surface forestière suisse, 71 peuplements typiques (strates) ont été dérivés, différenciés selon la région, le niveau d'altitude, la structure et la composition des essences de la forêt. Pour chaque strate, des simulations ont été réalisées avec quatre scénarios climatiques, deux hypothèses différentes sur les propriétés des sols et huit variantes de modèles. Cette approche a été retenue parce que l'on ignorait jusqu'à présent dans quelle mesure les incertitudes dans les formulations du modèle affectent les résultats de la simulation. Les résultats de la simulation rendent une image différenciée selon la région et l'altitude, souvent avec des changements importants de la surface terrière et de la composition des espèces. Selon la strate, des augmentations ou des diminutions ont été constatées. Les caractéristiques du sol se sont révélées très importantes, étonnamment aussi dans les étages subalpins et subalpins supérieurs. Les incertitudes dans les formulations du modèle n'influencent pas de manière significative les résultats de la simulation, c'est-à-dire que le comportement du modèle est robuste. Les résultats des strates individuelles peuvent être utilisés pour la planification sylvicole au niveau triage forestier ou régional. Bien qu'elles ne fournissent pas de recommandations solides pour la gestion future de peuplements concrets (c'est-à-dire qu'elles ne doivent pas être prises littéralement), elles méritent d'être prises au sérieux car elles montrent les tendances du développement futur des forêts.

## Development of mixed stands with complex structure in climate change

Close-to-nature silviculture is emphasizing mixed-species, multi-layered stands. Dynamic models are appropriate tools for estimating their future development. Specifically, the family of gap models, which originate from ecology, renders such analyses possible. We use the example of the ForClim model to illustrate how these models are structured, how they can be used, and where their limits lie. Based on a stratification of the Swiss forest area, 71 typical stands (strata) were derived, differentiated according to location region, elevation, level, structure and tree species composition. For each stratum, simulations were carried out with four climate scenarios, two different assumptions about soil properties and eight model variants. The latter was done because it was largely unknown to what extent the uncertainties in the model formulations affect the simulation results. Simulation results show a regionally and elevationally differentiated picture, partly with strong changes of stand basal area and species composition. Depending on the stratum, increases or decreases were recorded. Soil properties proved to be quite important, surprisingly also in the subalpine and upper subalpine zones. Uncertainties in the model formulations do not considerably influence simulation results, i.e. model behaviour is robust. The results of the individual strata can be used for forest management planning at the operational or regional level. Although they do not provide any firm recommendations for the future management of specific stands (i.e., they should not be taken literally), they deserve to be taken seriously as they are able to show trends of future forest development.