

# Die Kastanie im Engadin – oder was halten Baumarten von modellierten Potenzialgebieten?

Niklaus E. Zimmermann Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (CH)\*  
Harald Bugmann Waldökologie, Institut für Terrestrische Ökosysteme, ETH Zürich (CH)

## Chestnut in the Engadine – what do tree species think about model predictions?

New IPCC climate projections suggest drastic changes in future climate. We discuss two commonly used modeling approaches, statistical distribution models and dynamic forest succession models, as they are suitable for assessing expected effects of climate change on the tree species distribution in Switzerland and for assisting management decisions in forestry. We discuss the basic assumptions and the strengths and weaknesses of the two approaches, without an understanding of which it is impossible to fully judge the outcome of modeling exercises. We give an overview of results from applying these two modeling approaches in Switzerland and in the Alps and discuss their appropriate use.

We believe that these models are an important basis for decision making in the face of highly uncertain development of future climate. Nonetheless, models do not represent an exact copy of reality. Plausibility analyses are necessary in order to assess the results' usefulness and precision. Sensitivity analyses and a critical comparison of model results with expert knowledge of current forests, long measurement time series and other data are important. Also, dialog with practitioners and managers is not only important for checking the plausibility of model predictions under current conditions, but may also serve to improve the evaluation of future projections. We propose to apply models to the whole of Switzerland and to many tree species. Such a concerted national analysis may serve the adaptive management of forests and may strengthen dialog between researchers and practitioners.

**Keywords:** global climate change, forest succession, fundamental and realized niche, future distribution, model prediction, sensitivity analyses, vulnerability

**doi:** 10.3188/szf.2008.0326

\* Zürcherstrasse 111, CH-8903 Birmensdorf, E-Mail niklaus.zimmermann@wsl.ch

Das Klima ändert sich, und die Szenarien für seine Entwicklung im 21. Jahrhundert sind zum Teil drastisch (Solomon et al 2007). Die Klimamodelle und Szenarien unterscheiden sich aber stark, was die regionale Ausprägung des Klimawandels angeht. Der kürzlich erschienene vierte Zustandsbericht des Uno-Klimarates geht je nach Szenario von einer globalen mittleren Erwärmung um 1.4 bis 5.8 °C bis ins Jahr 2100 aus. Für die Schweiz (wie für die meisten Landflächen) wird eine etwas höhere Erwärmung erwartet, wobei die Sommertemperaturen stärker ansteigen und die Sommerniederschläge deutlich abnehmen im Vergleich mit dem Klima im Winter.

In der Forstwirtschaft ist eine langfristige Planung besonders wichtig, in erster Linie wegen des relativ langsamen Wachstums und der Langlebigkeit von Waldbäumen. Der Klimawandel stellt deshalb eine besondere Herausforderung dar, denn man muss ihm früh mit angemessenen Massnahmen (Ad-

aptation) begegnen, darf aber nicht übereilt handeln. Eine derartige Planung ist schwierig, weil der Wandel unvergleichlich rasch ablaufen dürfte. Auch können wir kaum Analogieschlüsse aus der Vergangenheit oder aus anderen Gebieten ziehen, weil sich das Klima in einer noch nie da gewesenen Art ändert. Folgende Fragen an die Wissenschaft stehen deshalb im Vordergrund: 1) Wie verändert sich in den kommenden Jahrzehnten das Anbaupotenzial für einzelne Baumarten? 2) Wie stark ändert sich das Risiko von Mortalität und Ernteausschlag für Baumarten in einem Betrieb? 3) Wie verändert sich der Zuwachs wegen des sich abzeichnenden Klimawandels?

In solchen Situationen helfen Experimente oft weiter. Sie können aber nicht alle nötigen Antworten innert nützlicher Frist liefern, da sie insbesondere mit ausgewachsenen Bäumen sehr aufwendig sind. Modelle sind daher ein geeignetes zusätzliches Mittel, um evaluieren zu können, wie sich das System Wald in den nächsten Jahrzehnten bis Jahr-

hunderterten verhalten dürfte. Welche Modellansätze sollen nun verwendet werden? Ist ein Modell grundsätzlich falsch und unbrauchbar, wenn es unter dem Klimawandel beispielsweise Kastanien im Engadin simuliert?

Jedes Modell stellt eine bewusste Vereinfachung der Realität dar; es hat also nicht nur Stärken, sondern auch Schwächen. Solange die Schwächen des Modells bei einer konkreten Anwendung von untergeordneter Bedeutung sind, stellt ein Modell ein nützliches Hilfsmittel für die Beantwortung von praxisrelevanten Fragen dar. Bei der Analyse von Resultaten ist es aber wichtig, die spezifischen Stärken und Schwächen der Modelle zu berücksichtigen und sich zu vergegenwärtigen, von welchen Annahmen die Modellierung ausgegangen ist.

In diesem Beitrag stellen wir zwei weitverbreitete Modellansätze – die statistischen Potenzialmodelle und die dynamischen Waldsukzessionsmodelle – vor, diskutieren ihre Vor- und Nachteile und versuchen, Hilfen zur Interpretation von Modellresultaten zu geben. Beide Ansätze können Ökosystemeigenschaften unter einem weiten Bereich von Klimabedingungen erfassen, was eine wichtige Voraussetzung für ihre Anwendung unter dem Klimawandel ist.

Die Fähigkeit, neue Bedingungen vorherzusagen, beruht bei den hier vorgestellten Modelltypen auf a) der Abbildung der wichtigsten ökologischen Mechanismen, b) der Integration zahlreicher Beobachtungen unter verschiedensten (heutigen) Klimabedingungen und c) der Annahme, dass sich in Zukunft ähnliche ökologische Prozesse abspielen werden und dass deren Zusammenwirken sich nicht verändert. Dies mag nicht immer zutreffen, stellt aber eine wesentliche Grundannahme vieler Modelle dar. Vor allem die dynamischen Modelle besitzen aber auch die Fähigkeit, die Konsequenzen einer neuen Kombination von Klimavariablen wiederzugeben, für die es heute keine analogen Bedingungen gibt. Ob diese Aussagen auch korrekt sind, kann man aber natürlich nicht nachprüfen.

### Statistische Potenzialmodelle

Dieser auch als statistische Verbreitungsmodellierung bezeichnete Ansatz geht davon aus, dass die Gesamtheit der heute zu beobachtenden Bedingungen für eine Baumart ein gutes Indiz dafür ist, wie sich die Art in Zukunft verhalten wird. Dort, wo in Zukunft dieselben Bedingungen auftreten wie heute, wird die Baumart auch vorkommen können. Man bezeichnet daher das Resultat einer solchen Modellierung auch als das «Potenzialgebiet», was in etwa dem potenziellen Anbauggebiet einer Baumart entspricht. Der Ansatz geht zudem davon aus, dass sich die Art im Gleichgewicht mit den heutigen kli-

matischen Bedingungen befindet (was nicht immer zutreffen mag) und dass das zukünftige Potenzialgebiet nur dann erreicht wird, wenn das neue Klima konstant ist. Dies liegt daran, dass dieser Ansatz keine dynamischen Mechanismen abbildet, um die Wanderung von Baumarten zu simulieren. Wenn wir also mit diesem Ansatz eine Prognose für das Jahr 2080 machen, dann sagen wir aus, wie das Potenzialgebiet einer Baumart im Raum verteilt sein wird. Das Modell sagt aber nicht aus, bis wann eine Baumart dieses Potenzial erreicht haben wird. Es ist davon auszugehen, dass – je nach konkreten topografischen Hindernissen und den erforderlichen Wanderungsdistanzen – dafür nicht nur etliche weitere Jahrzehnte, sondern manchmal sogar Jahrhunderte vergehen dürften. Als weitere Randbedingungen sind die folgenden Annahmen zu berücksichtigen:

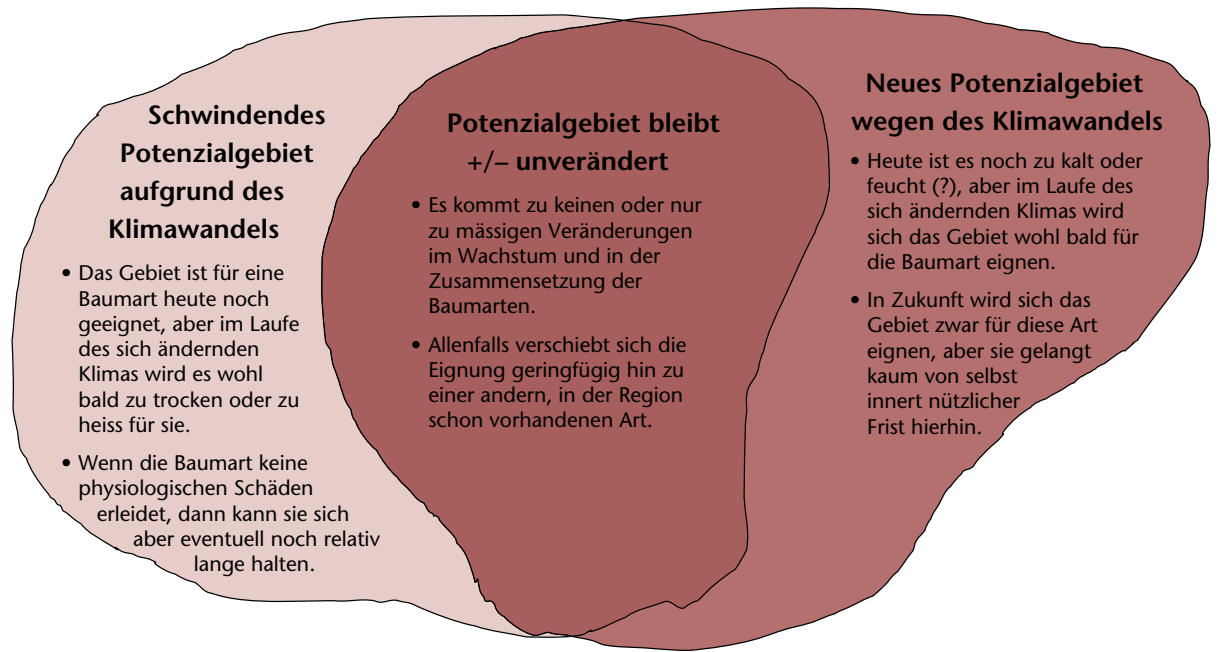
- Da die künftige Landnutzung schwer abzuschätzen ist, werden häufig nur Klimagrößen kalibriert. Man berechnet also in erster Linie das klimatische Potenzialgebiet.
- Die Veränderung der Bodenbedingungen über die Zeit ist ebenfalls schwer abzuschätzen. Sie ist vermutlich langsamer als jene der klimatischen Bedingungen. Oft werden die Modelle mit heutigen Bodendaten kalibriert, das Modell ist dann sensitiv gegenüber unterschiedlichen Böden. Man kann das Modell so aber nur schlecht auf die Zukunft übertragen, falls rasche Bodenbildung oder rasche Bodendegradation auftreten sollte.
- Statistische Potenzialmodelle gehen davon aus, dass in Zukunft dieselben Arten als Konkurrenten auftreten wie heute. Wenn eine Art also zum Beispiel auf frischen und nährstoffreichen Böden heute immer verdrängt wird (z.B. Waldföhre bei guter Gründigkeit), dann wird das Potenzialgebiet der Art im Modell auch in Zukunft keine derartigen Standorte einschliessen. Der Ansatz geht also davon aus, dass die Konkurrenzsymmetrie auf lange Sicht erhalten bleibt. Ferner ist zu berücksichtigen, dass eine Art lokal auch fehlen kann, obschon das Potenzial als hoch simuliert wird. Dies beispielsweise deshalb, weil das lokale Samenangebot fehlt (die Art also noch nicht eingewandert ist), weil lokal andere Bedingungen herrschen (die in den verfügbaren grossräumigen Daten nicht oder falsch erfasst sind) oder weil ein starker Konkurrent vorhanden ist, der das Aufkommen der neuen Art (noch) verhindert.

Mit dem Potenzialgebiet wird also jenes grossflächige Areal charakterisiert, in welchem die Baumart grundsätzlich gedeihen kann. Welche Aussagen lassen sich nun anhand von heutigen und zukünftigen Potenzialgebieten machen? Potenzialmodelle integrieren anhand von modernen Regressionsverfahren eine beschränkte Anzahl klimatischer Erklärungsgrößen. Zum Teil werden auch pedologische Faktoren und Größen, die die Landnutzung erklä-

**Abb 1** Bedeutung und Interpretation von räumlichen Veränderungen der Potenzialgebiete.

**Potenzialgebiete und Klimawandel**

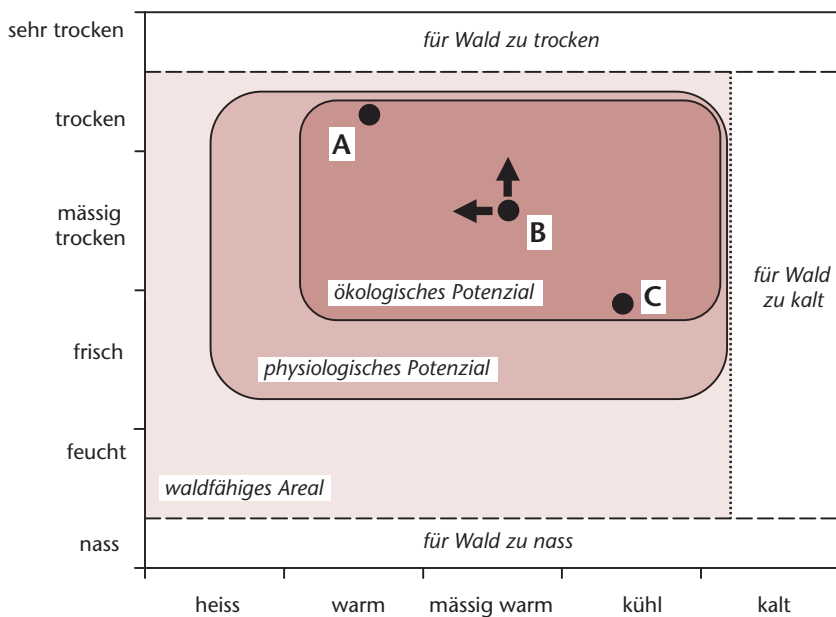
- Schwindend
- Unverändert
- Neu



ren, berücksichtigt. Ein künftig stark geändertes Potenzial kann wie folgt interpretiert werden (Abbildung 1): Dort, wo eine Baumart in Zukunft nicht mehr simuliert wird, werden sich längerfristig andere Arten etablieren. Je nachdem, welche Klimagrössen für diese Potenzialänderung verantwortlich sind (Kälte, Wärme, Feuchtigkeit, Trockenheit), kann dieser Wechsel eher rasch geschehen, oder es kann Jahrzehnte bis Jahrhunderte dauern, bis eine Änderung eintritt. Beispielsweise kann trockenheitsbedingte Mortalität relativ rasch eintreten (vgl. das

grossflächige, trockenheitsbedingte Absterben von Kiefernarten in den südwestlichen USA zwischen 1999 und 2003), während das Aufkommen von Arten tieferer Lagen in der heutigen subalpinen Stufe ein langsamer Prozess sein dürfte, welcher Jahrzehnte bis Jahrhunderte dauern kann (Gehrig-Fasel et al 2007), sofern keine grossflächigen Störungen (z.B. Windwürfe) auftreten.

Die natürliche Einwanderung in neue Potenzialgebiete geschieht daher wohl sehr langsam (Lischke et al 2006), vor allem in Kulturlandschaften (Rickebusch et al 2007). Schneller geht es nur, wenn Samenbäume in unmittelbarer Nähe existieren oder wenn Bäume gepflanzt werden. Wichtig für das Abschätzen der Reaktionsgeschwindigkeit ist, welche Auswirkungen Klimaänderungen lokal auf das physiologische Verhalten einer Baumart haben (Abbildung 2). Wenn sich ein Standort lokal so verändert, dass das physiologische Potenzial einer Baumart überschritten ist, dann kann es zu raschen Veränderungen (z.B. durch Absterben) kommen (Standort A in Abbildung 2). Es kann aber auch nur zu geringfügig schlechterem (Standort B) oder sogar zu besserem Wachstum kommen (Standort C). Dies illustriert, dass die beobachtete Verbreitung einer Baumart das «ökologische Potenzial» (Ellenberg 1953) oder die «realisierte Nische» (Hutchinson 1957) darstellt und keine direkten Rückschlüsse auf das «physiologische Potenzial» gemäss Ellenberg (1953) oder die «fundamentale Nische» nach Hutchinson (1957) erlaubt. Unter Konkurrenz können nicht alle Baumarten nahe an ihrem physiologischen Potenzial gedeihen, weil sie von andern Arten verdrängt werden. Die Vor- und Nachteile der statistischen Potenzialmodelle sind in Tabelle 1 zusammengefasst.



**Abb 2** Physiologische und ökologische Begrenzung der Pflanzenverbreitung entlang von ökologischen Gradienten (nach Ellenberg 1986, abgeändert). Standorte werden tendenziell wärmer und trockener. Dies hat für Bäume, welche an den Standorten A, B und C stehen, sehr unterschiedliche Auswirkungen.

## Dynamische Waldsukzessionsmodelle

Dieser Ansatz geht davon aus, dass unsere Kenntnisse ausreichen, um den gemeinsamen Einfluss der wichtigsten limitierenden Faktoren auf das Baumwachstum (Licht, Wasser, Nährstoffe, Temperatur) zu quantifizieren und somit den Wachstumsgang von Baumindividuen im Waldbestand mit genügender Genauigkeit zu modellieren. Ausserdem enthalten die Modelle Annahmen darüber, welche Faktoren für die Verjüngung und die Mortalität von Bäumen wesentlich sind. Hierzu gibt es aber viel weniger brauchbare Daten.

Die meisten dynamischen Waldsukzessionsmodelle (auch Gap-Modelle genannt) betrachten die Bilanz von Fotosynthese und Respiration eines hypothetischen, unter optimalen Bedingungen aufwachsenden Baumes. Dann werden jährliche Indikatoren für das Ausmass der Zuwachslimitierung durch die vier erwähnten Faktoren errechnet, miteinander kombiniert und schliesslich benützt, um aus dem optimalen Durchmesserzuwachs den reali-

sierten Zuwachs zu bestimmen (Abbildung 3). Damit wird die Konkurrenz um Ressourcen berücksichtigt, während jene um Raum nur indirekt (über die Lichtkonkurrenz) eingeht.

Bäume verschwinden aus dem Bestand aufgrund verschiedener Prozesse. In Waldsukzessionsmodellen werden meist drei Mortalitätsprozesse unterschieden. Erstens können Bäume absterben, wenn sie stark gestresst sind und daher einen zu geringen Zuwachs haben oder einen starken Zuwachseinbruch erleiden (zuwachsabhängige Mortalität). Zweitens können sie aber auch aufgrund von Ereignissen absterben, die keinen Bezug zum Zuwachs haben. Da es eine Vielzahl derartiger Mortalitätsprozesse gibt, welche nicht explizit berücksichtigt werden können (z.B. Blitzschlag), nimmt man hier eine konstante jährliche Zufallsmortalität an, welche diese Einflüsse implizit enthält. Drittens können Bäume auch flächig absterben aufgrund von Störungsereignissen wie Windwurf oder Waldbrand (störungsbedingte Mortalität).

Die Verjüngung wird in den meisten Waldsukzessionsmodellen nur grob wiedergegeben. Da die Konkurrenz unter den kleinen Bäumen sehr hoch ist und ihr Zuwachs unter Schirm meist klein, ist die Mortalität in der Verjüngung sehr gross, sodass ein Zuviel an Verjüngung im Modell weniger tragisch ist als ein Zuwenig. Aus diesem Grund wird die Verjüngung in den Modellen tendenziell «zu liberal» modelliert, d.h., sie findet in den Modellen häufiger statt als in der Realität. Neben den Faktoren, die für das Wachstum berücksichtigt werden, werden meist auch weitere Faktoren wie Wildverbiss (Abbildung 3) oder das Vorhandensein von Mineralerde berücksichtigt. In den meisten Modellen wird zudem davon ausgegangen, dass die Samenverfügbarkeit nicht limitierend ist, d.h., sobald die klimatischen Bedingungen für eine Art geeignet sind, kann sie in der Verjüngung auch auftreten (vgl. aber z.B. das Modell TreeMig, welches die Geschwindigkeit der Migration explizit berücksichtigt; Lischke et al 2007).

Trotz dieser starken Vereinfachungen sind Waldsukzessionsmodelle immer noch ziemlich kompliziert. Im Modell ForClim beispielsweise (Bugmann & Solomon 2000) ist jede Baumart «nur» durch 14 Eigenschaften (Parameter) charakterisiert; bei ungefähr 30 Baumarten, die in Mitteleuropa bestandesbildend sein können, müssen somit aber 420 Zahlen eruiert werden, bevor das Modell angewendet werden kann. Ein grösserer Detailliertheitsgrad der Modelle wäre somit mit einem kaum zu bewältigenden Aufwand für die Parameterschätzung verbunden.

Verschiedenste Studien haben gezeigt, dass dynamische Waldsukzessionsmodelle gut in der Lage sind, über einen weiten Bereich von Umweltbedingungen plausible Artenzusammensetzungen für

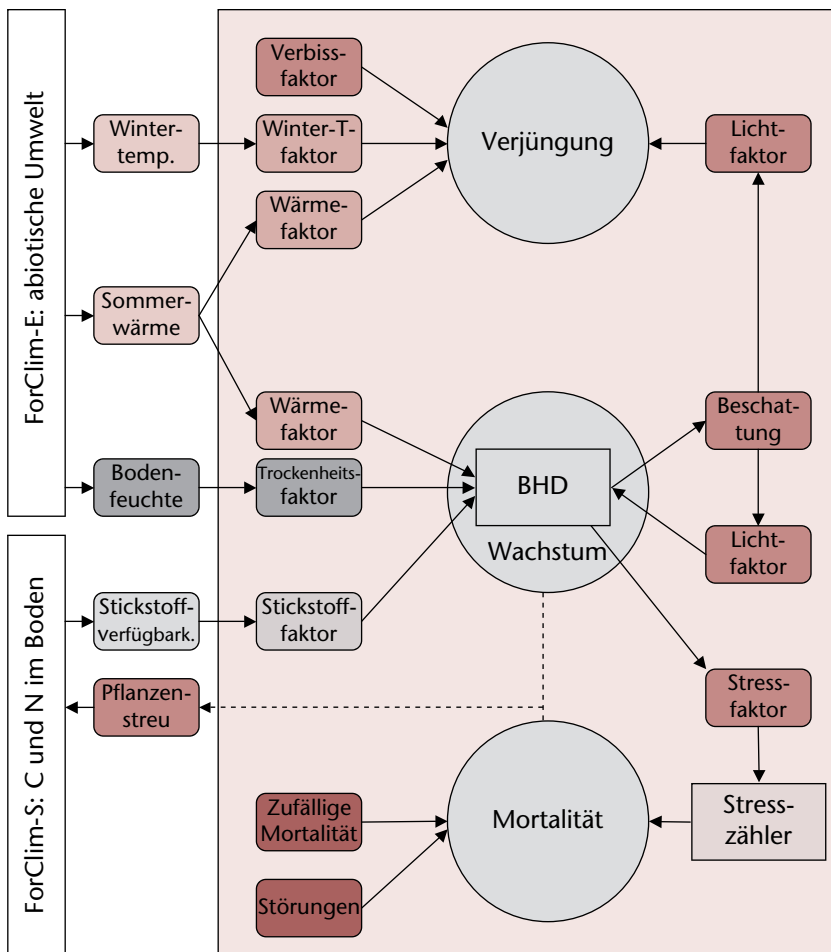


Abb 3 Strukturdiagramm des Sukzessionsmodells ForClim (modifiziert nach Bugmann 1996). Das Modell arbeitet mit zwei Zustandsvariablen pro Baum: (1) dem Brusthöhendurchmesser (BHD), dessen Zuwachs durch verschiedene wachstumslimitierende Faktoren bestimmt wird, und (2) einem Zähler für Jahre mit geringem BHD-Zuwachs, wobei eine bestimmte Anzahl solcher Stressjahre erforderlich ist, damit eine stressbedingte Mortalität einsetzt.

das heutige Klima zu simulieren (z.B. Solomon 1986, Bugmann 1996, 1999, Bugmann & Solomon 2000). Eine Stärke dieser Modelle liegt darin, dass Informationen über die Dominanz und Verbreitung der Arten an bestimmten Standorten bei der Formulierung der Modelle nicht direkt berücksichtigt werden. Die korrekte Simulation von Dominanz und Verbreitung der Baumarten entlang von Umweltgradienten ist deshalb keineswegs selbstverständlich (dies im Gegensatz zur oben vorgestellten statistischen Potenzialmodellierung, welche anhand von Verbreitungsdaten kalibriert wird).

Da es sich um dynamische Modelle handelt, ist es im Prinzip möglich, Angaben über die Geschwindigkeit der zu erwartenden Veränderungen zu machen. Allerdings wurden die Modelle diesbezüglich bisher nur wenig überprüft. In den letzten Jahren wurde aber vermehrt versucht, anhand von ertragskundlichen (z.B. Lindner et al 1997, Risch et al 2005, Wehrli et al 2005) oder paläoökologischen

Daten (z.B. Heiri et al 2006) sowie neuerdings auch anhand von Daten aus ETH-Waldreservaten die Präzision der Modelle entlang der Zeitachse zu untersuchen. Die Vor- und Nachteile der dynamischen Waldsukzessionsmodelle sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

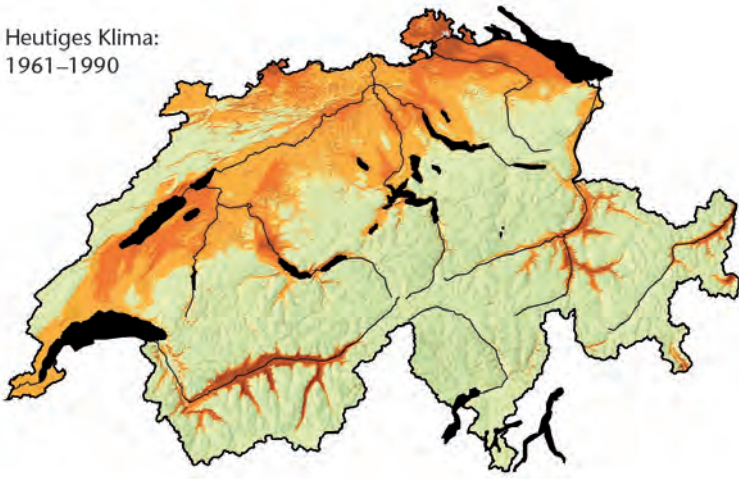
### Bisherige Resultate betreffend erwartete Effekte der Klimaänderung

Es gibt verschiedene Studien zur potenziellen Verbreitung von Arten oder Vegetationstypen, die oft drastische Veränderungen voraussagen, mit teilweise grossem Risiko von lokalem Artenschwund (Thuiller 2003, Thuiller et al 2004, 2005). Bezüglich der Schweiz sind die Arbeiten von Brzeziecki et al (1995) für Waldgesellschaften sowie von Bolliger (2002, Bolliger et al 2000) und Zimmermann et al (2006) für Baumarten wichtig. In den ersten Ab-

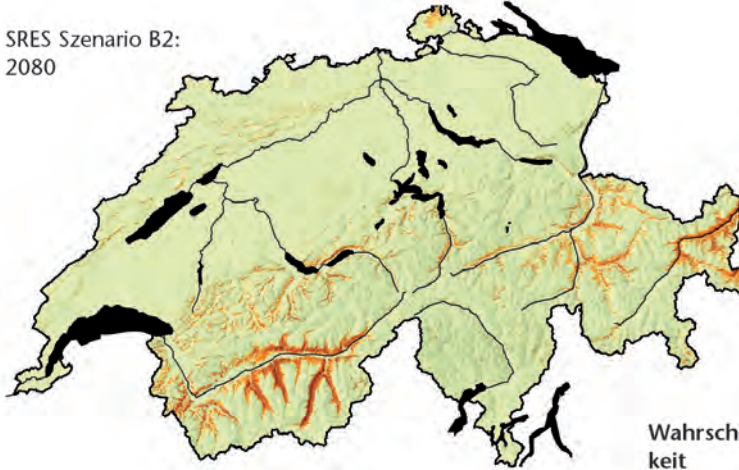
|           | Statistische Potenzialmodelle   | Dynamische Waldsukzessionsmodelle  |
|-----------|---|--|
| Vorteile  | <ul style="list-style-type: none"> <li>(1) Das Modell kann relativ rasch erstellt werden (Guisan &amp; Zimmermann 2000).</li> <li>(2) Es existieren viele statistische Methoden, um mit qualitativ unterschiedlichen Daten zuverlässige Aussagen zu machen (Elith et al 2006; Guisan et al 2007).</li> <li>(3) Der Ansatz ist vergleichend, es können Aussagen über die Zukunft gemacht werden, die plausibilisiert werden können.</li> <li>(4) Bei sich stabilisierenden klimatischen Bedingungen besteht eine gute Chance auf genaue Prognosen, zumindest für dominante Baumarten (z.B. Pearman et al 2008).</li> <li>(5) Die Datenbasis ist vergleichsweise gut, da es sehr viele punktgenaue Verbreitungsdaten für wichtige Baumarten gibt (z.B. Walddatenbank der WSL, Landesforstinventar, kantonale Waldinventare, Vegetationsaufnahmen aus Waldkartierungen etc.).</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>(1) Das Verhalten von Waldbeständen wird aus dem Verhalten des Einzelbaums hergeleitet. Die Plausibilität von Simulationen kann deshalb z.B. anhand des simulierten Wachstums der Einzelbäume überprüft werden.</li> <li>(2) Die Modelle sind grundsätzlich in der Lage, Auswirkungen neuartiger Klimaverhältnisse auf die Waldvegetation wiederzugeben, da sie nicht anhand heutiger Faktorenkombinationen kalibriert werden, sondern anhand einer separaten Betrachtung der einzelnen Faktoren.</li> <li>(3) Die Effekte von Konkurrenz und sich ändernden Konkurrenzverhältnissen werden im Modell abgebildet.</li> <li>(4) Die Modelle können eingesetzt werden, um Aussagen über die zu erwartende Walddynamik zu machen.</li> <li>(5) Das Modellverhalten kann anhand vielfältiger Daten überprüft werden (potenzielle natürliche Vegetation, Zeitreihen aus der Ertragskunde, bisher noch wenig genutzte Daten aus Waldreservaten, Paläoökologie etc.).</li> </ul> |
| Nachteile | <ul style="list-style-type: none"> <li>(1) Es ist nicht möglich, Aussagen über die Geschwindigkeit der natürlichen Anpassungen zu machen.</li> <li>(2) Falls neuartige Kombinationen von Klima- und andern Standortfaktoren auftreten, sind die Aussagen allenfalls unzuverlässig.</li> <li>(3) Modelle sind nicht dafür gerüstet, Aussagen über die Wirkung von zufälligen Effekten (z.B. Störungsregimes) auf die Baumartenverbreitung zu machen.</li> <li>(4) Die Modelle gehen davon aus, dass sich die Konkurrenzverhältnisse nicht ändern und dass in den nächsten 100 bis 200 Jahren keine evolutiven Anpassungen stattfinden werden.</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>(1) Das komplexe Faktorengefüge in Waldbeständen wird auf wenige Indikatoren reduziert. Ob die gleichen Faktoren den Zuwachs auch in Zukunft bestimmen werden, ist unsicher.</li> <li>(2) Es ist recht schwierig, die Migration gut abzubilden. Die Modelle simulieren tendenziell eine zu rasche Besiedlung der Wälder durch neue Arten (z.B. Invasion montaner Arten in die subalpine Stufe innerhalb weniger Jahrzehnte).</li> <li>(3) Die Unsicherheiten über die Geschwindigkeit der zu erwartenden Veränderungen sind noch gross. Sie werden aber aufgrund laufender Bemühungen kleiner werden.</li> </ul>  |

**Tab 1** Vor- und Nachteile der statistischen Potenzialmodelle (statistische Verbreitungsmodelle) und der dynamischen Waldsukzessionsmodelle (Gap-Modelle).

Heutiges Klima:  
1961–1990

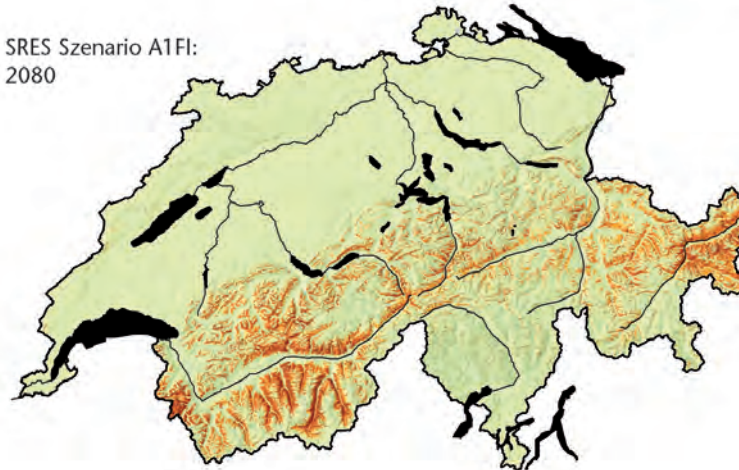


SRES Szenario B2:  
2080



Wahrscheinlichkeit  
 sehr tief  
 tief  
 hoch  
 sehr hoch

SRES Szenario A1FI:  
2080



0 50 100 200  
Kilometers



Abb 4 Heutiges und mögliches zukünftiges Potenzialgebiet der Waldföhre (*Pinus sylvestris*) unter zwei Klimaszenarien gemäss dem dritten Zustandsbericht des Uno-Klimarates (Houghton et al 2001) und gemäss Klimamodell HadCM3. Hohe Potenzialwahrscheinlichkeiten sind dunkel eingefärbt. Die Szenarien B2 und A1FI entsprechen etwa einer mittleren jährlichen Erwärmung von 3.3 °C respektive 6.0 °C sowie einer zunehmenden Sommertrockenheit.

schätzungen von Brzeziecki wurde nur die Temperatur erhöht (+1.1 bis +2.8 °C, je nach Region der Schweiz). Bei stärkerer Erwärmung wurde eine Ausdehnung der wärmetoleranten Eichen- und Eichen-Buchen-Formationen im Mittelland vorausgesagt sowie generell eine Verschiebung der Höhenstufen mit einer Ausdehnung des Buchengürtels in den nördlichen Voralpen. Im Wallis zeigt sich im Modell sogar eine Tendenz zur Versteppung. Erst mit der Arbeit von Zimmermann et al (2006) wurden alle relevanten Klimaparameter angepasst, wobei die geänderten Werte dem 3. Zustandsbericht des Uno-Klimarates (Houghton et al 2001) entnommen wurden. Weitere Resultate bezüglich Klimawandel und Potenziale von Baumarten finden sich in Kölling & Zimmermann (2007), Kölling et al (2007), Lexer (2001), Schröder et al (2007) und Wolff (2002).

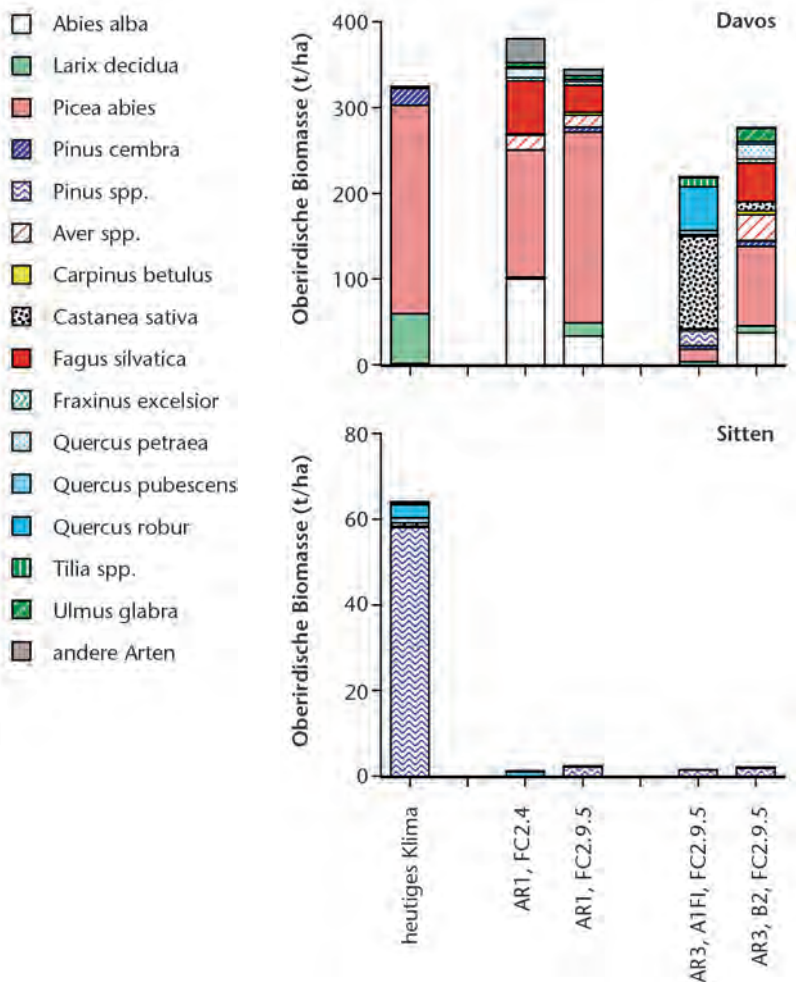
In Abbildung 4 sind für die Waldföhre (*Pinus sylvestris*) das heutige klimatische Potenzialgebiet sowie mögliche zukünftige Potenzialgebiete unter zwei Klimaszenarien, welche auf dem globalen (Klima-) Zirkulationsmodell des britischen Hadley-Zentrums (HadCM3) basieren, dargestellt. A1FI stellt ein eher extremes Klimaszenario dar, welches für die Schweiz um das Jahr 2100 mit Temperaturanstiegen von über +6 °C im Jahresmittel und stark abnehmenden Sommerniederschlägen rechnet. Das B2-Szenario ist demgegenüber moderater mit +3.3 °C und einer geringeren Sommertrockenheit. Als statistisches Modell wurde eine Logit-Regression mit sieben topoklimatischen Variablen verwendet (Zimmermann et al 2006), nämlich: 1) Jahreswärmesumme (DDEG), 2) Jahresniederschlag (PRCP), 3) Sommer-Winter-Niederschlagsdifferenz (PRDD), 4) mittlerer Trockenheitsindex der Monate Juni–August (PRCP minus potenzielle Evapotranspiration), 5) potenzielle Globalstrahlung (SRAD), 6) Neigung (SLP) und 7) topografische Position (TOPO). Die Verschiebung des Potenzialgebietes bis 2080 unter dem moderaten B2-Szenario legt nahe, dass die Baumart im Mittelland sowie in den Tieflagen des Wallis verschwinden würde. Unter dem A1FI-Szenario setzt sich dieser Trend fort, die Art würde sich aufgrund der erwarteten stärkeren Trockenheit in den Alpentälern sogar wieder ausbreiten. Die Klimaschwankungen der letzten 15 Jahre scheinen das B2-Szenario im Wallis bereits vorweggenommen zu haben: Die Waldföhre zeigt eine starke Mortalität in Jahren nach grossem Sommer-Trockenstress (Dobbertin et al 2005, Rigling et al 2006). Im Wallis scheint die Art daher am Rand ihres physiologischen Potenzials zu gedeihen, was sie anfällig für zunehmende Trockenheit macht (vgl. Standort A in Abbildung 2).

Bezüglich der Verwendung dynamischer Waldsukzessionsmodelle in der Schweiz sind vor allem die Arbeiten von Kienast (1991), Kräuchi (1992, 1993, 1994), Bugmann (1997, 1999, Bugmann & Pfister 2000), Fischlin & Gyalistras (1997) und Lischke

(Lischke & Zierl 2002, Lischke et al 2006) zu erwähnen. Sie zeigen ähnliche Veränderungen, wobei nur teilweise Verschiebungen der Vegetationszonen in grössere Höhen erwartet werden, teilweise wird hingegen mit ganz neuen Artenkombinationen gerechnet. Ausserdem zeigen sie, dass das Ausmass der Veränderungen je nach Standort sehr unterschiedlich sein kann (Abbildung 2) und die Veränderungen nicht von heute auf morgen, sondern über viele Jahrzehnte bis einige Jahrhunderte ablaufen werden. Einige Simulationen legen nahe, dass im Gegensatz etwa zur obersubalpinen Stufe (z.B. Bever) für das Mittelland (z.B. Bern) eher geringe Veränderungen zu erwarten sind, sofern die Temperaturen nicht

extrem stark ansteigen (Bugmann 1997, 1999). Darüber hinaus wurde aber auch gezeigt, dass die zunehmende Klimavariabilität sehr starke Auswirkungen haben dürfte (z.B. Bugmann & Pfister 2000), was in früheren Arbeiten nicht berücksichtigt worden war. Vor allem im Lauf der kommenden Jahrzehnte dürften Veränderungen in der Variabilität des Klimas einen grösseren Einfluss auf die Walddynamik ausüben als schleichende Änderungen in den Mittelwerten. Weitere Resultate bezüglich des Klimawandels und der Wälder im Alpenraum finden sich bei Lexer et al (2000, 2002) sowie Lexer & Seidl (2007).

Für den vorliegenden Beitrag wurden ausführliche Simulationen mit einem Sukzessionsmodell gerechnet, um zwei Fragen nachgehen zu können: 1) Wie stark haben sich die Simulationsergebnisse seit den 1990er-Jahren geändert dank Verbesserungen in den Modellformulierungen? 2) Wie gross sind die Unterschiede, welche zwischen den Aussagen unter älteren (Houghton et al 1990) und neueren Klimaszenarien (Houghton et al 2001) festzustellen sind? In Abbildung 5 sind die Ergebnisse für die zwei Standorte Davos und Sitten beispielhaft dargestellt. Folgendes ist festzustellen: Erstens gibt die neueste Modellversion unter dem heutigen Klima durchaus plausible Artenzusammensetzungen und Vorräte wieder (Abbildung 5, links). Zweitens divergieren die Aussagen zwischen der alten und der neuen Modellversion unter demselben Klimaszenario nicht stark, d.h., die Modelle liefern in beiden Fällen sehr ähnliche Artenzusammensetzungen (Abbildung 5, Mitte). Drittens ergibt das Waldmodell unter den neueren Klimaszenarien (Houghton et al 2001) tendenziell stärkere Veränderungen in der Artenzusammensetzung und grössere Vorratsabnahmen als unter den älteren Szenarien (Houghton et al 1990; Abbildung 5, rechts). Dies ist ganz besonders augenfällig im Fall von Davos, wo unter dem A1FI-Szenario gemäss dem dritten Zustandsbericht des Uno-Klimarates (Houghton et al 2001) ein Kastanien-Eichen-Wald zu erwarten wäre – sofern genügend Zeit zur Verfügung stünde, dass die beiden Gattungen in die Landschaft Davos einwandern könnten, denn es handelt sich um Waldzusammensetzungen, die im langfristigen Gleichgewicht mit dem Klima des Jahres 2080 respektive 2100 simuliert werden. Diese Ergebnisse dürfen also nicht als Aussagen über den Waldzustand im Jahr 2080 interpretiert werden, sie zeigen aber auf, wie weit entfernt von den heutigen Bedingungen die bioklimatischen Verhältnisse im Jahr 2080 bereits sein dürften und wie standortfremd die heutigen Fichtenwälder in der Landschaft Davos unter dem A1FI-Szenario wären.



**Abb 5** Simulationsergebnisse von zwei Versionen des Sukzessionsmodells ForClim (FC) unter verschiedenen Klimaszenarien für die Standorte Davos (oben) und Sitten (unten). In allen Fällen wurde angenommen, dass die Vegetation Zeit hat, sich in ein Gleichgewicht mit dem Klima einzuschwingen. Linke Säule: Ergebnisse unter heutigem Klima, erstellt mit der neuesten Modellversion FC2.9.5. Mittlere Säulen: Waldzusammensetzung entsprechend einem Klimaszenario für das Jahr 2100 gemäss dem ersten Zustandsbericht des Uno-Klimarates (AR1; Houghton et al 1990) mit einer Modellversion aus dem Jahr 1994 (FC2.4) sowie mit der neuesten Modellversion (FC2.9.5). Rechte Säulen: Waldzusammensetzung entsprechend einem Klimaszenario für das Jahr 2080 gemäss dem dritten Zustandsbericht des Uno-Klimarates (AR3; Houghton et al 2001) basierend auf dem Hadley-Klimamodell (HadCM3) und den Szenarien A1FI und B2, jeweils gerechnet mit der neuesten ForClim-I-Version. Die Szenarien A1FI und B2 entsprechen etwa einer mittleren jährlichen Erwärmung von 6.0 °C respektive 3.3 °C sowie einer zunehmenden Sommertrockenheit. 1 t Biomasse entspricht ca. 2 m<sup>3</sup>.

## Forschungsbedarf

Die oben skizzierten Anwendungen beider Modellansätze stellen zweifellos wichtige Grundlagen dar, um die Auswirkungen der Klimaänderung auf das Baumartenportfolio abzuschätzen. Obwohl noch grosse Kenntnislücken bestehen, sollten die Modellergebnisse unseres Erachtens dennoch bereits heute in den Entscheidungsprozess einfließen. Dabei sollten die Modellaussagen ernst, aber nicht wörtlich genommen werden.

In den folgenden Bereichen sind unserer Meinung nach weitere Forschungsarbeiten nötig: 1) Die regionale Differenzierung der Aussagen sollte verbessert werden, zum Beispiel durch flächendeckende Simulationen mit Waldsukzessionsmodellen oder durch statistische Potenzialmodellierungen für alle wichtigen Baumarten. 2) Jedes Modell weist Fehler auf. Daher kann der Vergleich von Ergebnissen aus Modellen, welche auf ganz unterschiedlichen Konzepten beruhen, aufzeigen, ob sich diese Fehler in den Simulationsergebnissen bemerkbar machen. Der Beizug von konzeptionell unterschiedlichen Modellen wäre deshalb ein grosser Vorteil. 3) Detaillierte Sensitivitätsanalysen sind nötig, um eine grössere Sicherheit bezüglich der Verlässlichkeit der Modellaussagen zu erreichen. In einer Sensitivitätsanalyse werden die Eingangsbedingungen eines Modells in vielen Wiederholungen geringfügig geändert, um die Robustheit der Resultate prüfen zu können. So wird nicht ein einziges Resultat für die Zukunft simuliert, sondern eine grosse Schar von Resultaten. Dadurch wird die Bandbreite möglicher Entwicklungen abgebildet, was ein besseres Gefühl für die Unsicherheit der Abschätzungen ergibt. 4) Neben den Abschätzungen zum Potenzialgebiet von Baumarten respektive der Zusammensetzung der potenziellen natürlichen Vegetation sollten auch bewirtschaftete Wälder simuliert werden im Hinblick auf die Entwicklung eines adaptiven Waldmanagements. 5) Bisher liegen noch keine Analysen vor, welche auf den Szenarien des 4. Zustandsberichts des Uno-Klimarates (Solomon et al 2007) basieren. Solche wären aber erforderlich, um aktuelle Entscheidungshilfen zu erhalten.

## Schlussfolgerungen

Modelle können wichtige Informationen für die Entscheidungsfindung in der langfristigen Waldplanung liefern; ohne Modelle ist eine adaptive und langfristige Planung unter sich rasch und stark verändernden klimatischen Bedingungen kaum möglich. Wissenschaftlich fundierte Aussagen sind daher für einen grossen Nutzerkreis wichtig. Adaptives Management stellt sich dieser Aufgabe im Dialog und

unter sich laufend ändernden Bedingungen, wie sie mittels Modellen vorausschauend abgeschätzt werden können. Da Modelle kein perfektes Abbild der Natur sind, dürfen ihre Ergebnisse nicht 1:1 umgesetzt werden. Was heisst das? Gute Modelle geben generell richtige Trends wieder. Lokal und im Detail können sie aber durchaus falsche Aussagen machen. Dies zu berücksichtigen und kritisch zu beurteilen, gehört zu einem verantwortungsvollen Umgang mit Modellen. Wenn neue Artenkombinationen (wie z.B. Kastanien-Eichen-Wälder im Oberengadin) oder ungewohnte Verbreitungsmuster projiziert werden, müssen diese nicht grundsätzlich falsch sein. Sie sollten aber kritisch analysiert werden. Es kann durchaus sein, dass die Kastanie im Engadin gedeihen würde. Eine ökologische Plausibilisierung kann hier weiterhelfen: Welche anderen Baumarten werden im Engadin ebenfalls simuliert? Welche Sommer- und Wintertemperaturen, welche Sommerniederschläge liegen der Simulation zugrunde? Welche wichtigen ökologischen Faktoren haben sich in diesem Klima so geändert, dass die Art gedeihen würde? Könnte die Art innerhalb einiger Jahrzehnte tatsächlich ins Engadin gelangen? Die Beantwortung solcher Fragen hilft, die simulierten Muster zu verstehen und die Wahrscheinlichkeit ihres Eintretens besser einschätzen zu können.

Die Forschung bemüht sich, ökologisch gut abgestützte Modelle zu entwickeln und sie laufend zu verbessern. Modellverbesserungen und eine gute Plausibilisierung der Resultate bedingen den Dialog mit der Praxis (vgl. Rigling et al 2008). Die Plausibilisierung von Resultaten aus Simulationen zukünftiger Klimabedingungen kann durch einen guten Dialog zwischen Forschung und Praxis entscheidend verbessert werden: Vielleicht gibt es gesicherte Beobachtungen über Pflanzungen oder Experimente, welche ein Modellresultat als mehr oder weniger wahrscheinlich erscheinen lassen. Plausible Begründungen «exotischer» Modellergebnisse oder ihre Rückweisung an die Modellierer sind entscheidend für die Weiterentwicklung der Modelle respektive die Akzeptanz von Modellresultaten in der Praxis. Wir sind überzeugt, dass Forschung und Praxis gemeinsam viel erreichen können, auch oder gerade im Bereich der abstrakten Modellierung. ■

*Eingereicht: 5. Juni 2008, akzeptiert (mit Review): 27. August 2008*

## Literatur

- BOLLIGER J (2002)** Schweizer Wälder und Klimaveränderungen: Vergleich von Simulationen quantitativer Vegetationsmodelle. Schweiz Z Forstwes 153: 167–175. doi: 10.3188/szf.2002.0167
- BOLLIGER J, KIENAST F, ZIMMERMANN NE (2000)** Risks of global warming on montane and subalpine forests in Switzerland. Reg Environ Change 1: 99–111.

- BRZEZIECKI B, KIENAST F, WILDI O (1995) Modeling potential impacts of climate change on the spatial distribution of zonal forest communities in Switzerland. *J Veg Sci* 6: 257–268.
- 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 (1999) Anthropogene Klimaveränderung, Sukzessionsprozesse und forstwirtschaftliche Optionen. *Schweiz Z Forstwes* 150: 275–287. doi: 10.3188/szf.1999.0275
- BUGMANN H (2001) A review of forest gap models. *Clim Chang* 51: 259–305.
- BUGMANN H, PFISTER C (2000) Impacts of interannual climate variability on past and future forest composition. *Reg Environ Change* 1: 112–125.
- BUGMANN H, SOLOMON AM (2000) Explaining forest composition and biomass across multiple biogeographical regions. *Ecol Appl* 10: 95–114.
- DOBBERTIN M ET AL (2005) The decline of *Pinus sylvestris* L. forests in the Swiss Rhone valley – a result of drought stress? *Phyton Ann Rei Bot* 45: 153–156.
- ELITH ET AL (2006) Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography* 29: 129–151.
- ELLENBERG H (1953) Physiologisches und ökologisches Verhalten derselben Pflanzenarten. *Ber Dtsch bot Ges* 65: 351–362.
- FISCHLIN A, GYALISTRAS D (1997) Assessing impacts of climatic change on forests in the Alps. *Glob Ecol Biogeogr Lett* 6: 19–37.
- GEHRIG-FASEL J, GUISAN A, ZIMMERMANN NE (2007) Tree line shifts in the Swiss Alps: Climate change or land abandonment? *J Veg Sci* 18: 571–582.
- GUISAN A, ZIMMERMANN NE (2000) Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecol Model* 135: 147–186.
- GUISAN ET AL (2007) What matters for predicting the occurrences of trees: techniques, data or species' characteristics? *Ecol Monogr* 77: 615–630.
- 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.
- HOUGHTON JT, JENKINS GJ, EPHRAUMS JJ, EDITORS (1990) Scientific assessment of climate change. Report of Working Group I. Cambridge: Cambridge Univ Press. 365 p.
- HOUGHTON JT ET AL, EDITORS (2001) Climate Change 2001: The scientific basis. Contribution of Working Group I to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge: Cambridge Univ Press. 944 p.
- HUTCHINSON GE (1957) Concluding remarks. *Cold Spring Harb Sym* 22: 415–427.
- KÖLLING C, ZIMMERMANN L (2007) Vulnerability of German forests to climate change. *Gefahrstoffe Reinhaltung der Luft* 67: 259–268.
- KÖLLING C, ZIMMERMANN L, WALENTOWSKI H (2007) Klimawandel: Was geschieht mit Buche und Fichte? *Allg Forst Z Waldwirtsch Umweltvorsorge* 62: 584–588.
- KRÄUCHI N (1992) Szenarien für den Schweizer Wald. *Wald Holz* 73 (5): 10–13.
- KRÄUCHI N (1993) Potential impacts of a climate change on forest ecosystems. *Eur J For Pathol* 23: 28–50.
- KRÄUCHI N (1994) Modelling forest succession as influenced by a changing environment. *Mitt Eidgenöss Forsch.anst Wald Schnee Landsch* 69: 143–271.
- LEXER MJ (2001) Simulation der potentiellen natürlichen Vegetation für Österreichs Wälder. Wien: Univ Bodenkultur, Forstliche Schriftenreihe 16. 166 p.
- LEXER MJ ET AL (2000) The sensitivity of central European mountain forests to scenarios of climatic change: Methodological frame for a large-scale risk assessment. *Silva Fenn* 34: 113–129.
- LEXER MJ ET AL (2002) The sensitivity of Austrian forests to scenarios of climatic change: a large-scale risk assessment based on a modified gap model and forest inventory data. *For Ecol Manage* 162: 53–72.
- LEXER MJ, SEIDL R (2007) Der österreichische Wald im Klimawandel – Auswirkungen auf die Waldbewirtschaftung. *Ländlicher Raum* 2007. 14 p. [www.laendlicher-raum.at/article/articleview/57394/1/10404/](http://www.laendlicher-raum.at/article/articleview/57394/1/10404/) (18.7.2008).
- LINDNER M, SIEVANEN R, PRETZSCH H (1997) Improving the simulation of stand structure in a forest gap model. *For Ecol Manage* 95: 183–195.
- LISCHKE H, ZIERL B (2002) Feedback between structured vegetation and soil water in a changing climate: a simulation study. In: Benniston M, editor. *Climate Change: Implications for hydrological cycle and for water management*. Dordrecht: Kluwer Academic. pp. 349–377.
- LISCHKE H, ZIMMERMANN NE, BOLLIGER J, RICKEBUSCH S, LÖFFLER TJ (2006) TreeMig: A forest-landscape model for simulating spatio-temporal patterns from stand to landscape scale. *Ecol Model* 199: 409–420.
- PEARMAN PB ET AL (2008) Prediction of plant species distributions across six millennia. *Ecol Lett* 11: 357–369.
- RICKEBUSCH S, GELLRICH M, LISCHKE H, GUISAN A, ZIMMERMANN NE (2007) Combining probabilistic land-use change and tree population dynamics modelling to simulate responses in mountain forests. *Ecol Model* 209: 157–168.
- RIGLING A ET AL (2006) Baumartenwechsel in den Walliser Waldföhrenwäldern. In: Wohlgemuth T, editor. *Wald und Klimawandel*. Birmensdorf: Eidgenöss Forsch.anst Wald Schnee Landsch, Forum für Wissen. pp. 23–33.
- RIGLING A ET AL (2008) Klimawandel als Prüfstein für die Waldbewirtschaftung. *Schweiz Z Forstwes* 159: 316–325. doi: 10.3188/szf.2008.0316
- RISCH AC, HEIRI C, BUGMANN H (2005) Simulating structural forest patterns with a forest gap model: a model evaluation. *Ecol Model* 181: 161–172.
- SCHRÖDER W, PESCH R, SCHMIDT G, ENGLERT C (2007) Analysis of climate change affecting German forests by combination of meteorological and phenological data within a GIS environment. *The Scientific World Journal* 7 (Suppl 1): 84–89.
- SOLOMON AM (1986) Transient response of forests to CO<sub>2</sub>-induced climatic change: simulation modelling experiments in eastern North America. *Oecologia* 68: 567–579.
- SOLOMON S ET AL, EDITORS (2007) Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge: Cambridge Univ Press. 996 p.
- THUILLER W (2003) BIOMOD – optimizing predictions of species distributions and projecting potential future shifts under global change. *Glob Change Biol* 9: 1353–1362.

- THUILLER W ET AL (2004) Biodiversity conservation – Uncertainty in predictions of extinction risk. *Nature* 430 (6995).
- THUILLER W, LAVOREL S, ARAUJO MB, SYKES MT, PRENTICE IC (2005) Climate change threats to plant diversity in Europe. *Proc Natl Acad Sci USA*. 102: 8245–8250.
- WEHRLI A, ZINGG A, BUGMANN H, HUTH A (2005) Using a forest patch model to predict the dynamics of stand structure in Swiss mountain forests. *For Ecol Manage* 205: 149–167.
- WOLFF B (2002) Processing forest inventory data to establish a nation-wide database for the estimation of the impacts of climate change on German forests and forestry. *Forstwiss Cent.bl* 121: 18–27.
- ZIMMERMANN NE ET AL (2006) Wo wachsen die Bäume in 100 Jahren? In: Wohlgemuth T, editor. *Wald und Klimawandel*. Birmensdorf: Eidgenöss. Forsch.anst Wald Schnee Landsch, Forum für Wissen. pp. 63–71.

## Die Kastanie im Engadin – oder was halten Baumarten von modellierten Potenzialgebieten?

Gemäss den Klimamodellen des IPCC sind starke Veränderungen im Klima zu erwarten. Wir stellen statistische Potenzialmodelle für Baumarten und dynamische Waldsukzessionsmodelle vor, weil diese Ansätze für die Abschätzung der Auswirkungen auf die Verbreitung von Baumarten in der Schweiz und für forstliche Entscheidungshilfen von Nutzen sind. Die Grundlagen, Annahmen sowie die Vor- und Nachteile der beiden Ansätze werden erläutert. Wir geben sodann einen Überblick über die Ergebnisse, welche mit solchen Modellen für die Wälder der Schweiz erarbeitet wurden, und diskutieren den sinnvollen Umgang mit solchen Resultaten.

Wir sind der Meinung, dass Modelle eine wichtige Grundlage für die Entscheidungsfindung sind angesichts der hohen Unsicherheit bezüglich des zukünftigen Klimas. Modelle stellen aber kein genaues Abbild der Realität dar, was eine Plausibilisierung ihrer Resultate bedingt. Sensitivitätsanalysen und ein kritischer Abgleich der Modellergebnisse mit Daten und Kenntnissen aus den heutigen Wäldern sowie lange Datenreihen aus der Vergangenheit (z.B. ertragskundliche Versuchsflächen, Waldreservate, Paläoökologie) sind in diesem Zusammenhang sehr wichtig. Der Dialog mit der Praxis ist nicht nur wichtig für eine gute Überprüfung der Modellaussagen unter heutigen Bedingungen, sondern auch für die Plausibilisierung der Ergebnisse unter zukünftigen Klimabedingungen. Wir schlagen vor, dass die Modelle flächendeckend und für viele Baumarten in der Schweiz angewendet werden sollten, denn eine derartige nationale Analyse könnte wichtige Beiträge für ein adaptives Waldmanagement liefern und den Dialog zwischen Forschung und Praxis verstärken und längerfristig sichern.

## Le châtaignier de l'Engadine – ou que pensent les essences forestières de la végétation potentielle modélisée?

Les nouvelles prévisions climatiques du GIEC laissent présager pour l'avenir des modifications drastiques du climat. Nous présentons des modèles statistiques de répartition des essences et des modèles dynamiques de succession forestière parce que ces approches sont utiles pour évaluer les répercussions attendues du changement climatique sur la répartition des essences en Suisse, et pour guider la prise de décisions forestières. En outre, les principes de base, de même que les avantages et inconvénients de ces deux approches sont discutés. Pour les forêts suisses, nous donnons un aperçu des résultats obtenus avec ces deux approches, et discutons de la façon pertinente de les utiliser.

Nous pensons que ces modèles constituent une base essentielle pour la prise de décision, vu le degré d'incertitude qui plane sur les futures conditions climatiques. Les modèles ne représentent pas pour autant la copie exacte de la réalité, d'où la nécessité d'effectuer des analyses de plausibilité de leurs résultats. Dans ce contexte, des analyses de sensibilité et la comparaison critique des résultats avec des données et connaissances issues des forêts actuelles et de longues séries de données du passé (placettes de production forestière, réserves forestières, paléoécologie p. ex.) sont très importantes. Le dialogue avec les praticiens importe non seulement pour vérifier la plausibilité des prévisions des modèles dans les conditions actuelles, mais aussi pour améliorer celle des résultats dans des conditions climatiques futures. Nous proposons d'appliquer ces modèles à l'ensemble de la Suisse et pour de nombreuses essences. Une telle analyse nationale concertée pourrait contribuer grandement à une gestion forestière adaptative, mais aussi renforcer et garantir à long terme le dialogue entre chercheurs et praticiens.