

Zeitschrift: Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen = Swiss forestry journal = Journal forestier suisse

Herausgeber: Schweizerischer Forstverein

Band: 153 (2002)

Heft: 5

Artikel: Schweizer Wälder und Klimaveränderungen : Vergleich von Simulationen quantitativer Vegetationsmodelle

Autor: Bolliger, Janine

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1098230>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 01.05.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Schweizer Wälder und Klimaveränderungen: Vergleich von Simulationen quantitativer Vegetationsmodelle

JANINE BOLLIGER

Keywords: Climate change; vegetation change; simulation models; forests in Switzerland. FDK: 111.83 : 181.2 : 182.2

Abstract: Using simulation models various climate change scenarios are described and the possible consequences to forests in Switzerland are discussed. Consequences to be reckoned with range from less acute to serious, e.g., with displacement of species and timberline and, in the long term, with desertification of already dry areas.

Abstract: Mit Hilfe von Simulationsmodellen werden verschiedene Klimaveränderungsszenarien beschrieben und die möglichen Auswirkungen von Klimaveränderungen auf die Wälder der Schweiz diskutiert. Gerechnet werden muss mit wenig ausgeprägten bis gravierenden Folgen, z.B. mit Verschiebungen der Artenareale wie der Waldgrenzen und langfristig mit Versteppung von gegenwärtig bereits trockenen Gebieten.

Einleitung

Kontext und Ziel

Klimatisch ist die Schweiz stark von den Alpen geprägt. Innerhalb kurzer geographischer Distanzen weisen die Alpen klimatische Veränderungen auf, die vergleichbar sind mit Klimagradienten zwischen weit auseinander liegenden Breitengraden (z.B. BENISTON *et al.* 1997; BADER 1998). Z.B. erstreckt sich eine Temperaturabnahme von etwa 0,5 °C im Breitengradienten über etwa 1000 km, entlang eines Höhengradienten jedoch nur über etwa 100 m. Diese durch topographische Komplexität generierte, kleinräumige Klimavariabilität lässt entlang eines Höhengradienten differenzierte Vegetationsstufen entstehen: die kolline Stufe (etwa <800 m ü.M.) ist natürlicherweise vor allem durch Laubbäume (z.B. Buche, Eiche) geprägt; die montane Stufe (etwa 800 bis 1100 m ü.M.) wird vor allem von Tannen, Fichten und Buchen dominiert; die subalpine Stufe (1800 m, 2000 bis 2100 m ü.M.) wird in den niederschlagsreicheren Nordalpen vor allem von Fichten charakterisiert, während Lärchen und Arven die kontinentaleren Gebiete der Zentralalpen dominieren.

Zusätzlich zu der Höhengradientenvariabilität kann auch ein differenzierter Nord-Südgradient unterschieden werden, da der Alpenbogen als Klimaschranke wirkt (BADER 1998). Klimabedingungen reichen von ozeanisch (kühle Sommer, milde und feuchte Winter) nördlich der Alpen zu inneralpin kontinentalen Bedingungen (strahlungsreiche Sommer, kalte Winter) bis zu insubrischen Bedingungen (warme Sommer, milde und feuchte Winter) im südlichen Teil der Alpen.

Diese vertikal und horizontal kleinräumige Klimadiversität, die innerhalb kurzer Distanzen grosse Umweltunterschiede und dadurch bedingt Vegetationsunterschiede schafft, macht die Alpenvegetation ganz besonders empfindlich gegenüber möglichen Änderungen des Klimas (z.B. BENISTON 1994). Diese Empfindlichkeit kann mit Modellen erfasst werden, die das mögliche zukünftige Verhalten der Vegetation unter sich ändernden Klimabedingungen simulieren. Ziel dieser Studie ist es, die Empfindlichkeit der Wälder auf mögliche Veränderungen des Klimas, basierend auf für die Schweiz publizierten Simulationsmodellen, abzuschätzen und zu diskutieren.

In einem ersten Teil des Aufsatzes wird das Problem, die möglichen Klimaveränderungen, vorgestellt. Im zweiten Teil werden Vegetationsmodelle als Methode zur Analyse der Einflüsse beschrieben, welche die Klimaveränderungen auf die Vegetation haben können. Im dritten Teil werden die simulierten Vegetationsveränderungen vorgestellt, und im vierten

Teil werden Vegetationsmodelle als Methoden hinsichtlich ihrer Limitationen, Verlässlichkeit und zeitlicher Variablenentwicklung diskutiert.

Klimaveränderungen

Die globale Oberflächentemperatur (Mittelwert nahe der Oberflächentemperatur über Land und Meer) hat sich im 20. Jahrhundert um 0,6 °C ($\pm 0,2$ °C Abweichung) erhöht (IPCC 2001). Für diese Veränderung werden steigende Treibhausgaskonzentrationen (Kohlendioxid, Methan und Stickstoffverbindungen) in der Atmosphäre verantwortlich gemacht. Die Treibhausgase kommen natürlicherweise vor, sind jedoch seit Beginn der Industrialisierung anthropogen bedingt (vornehmlich durch Verbrennung fossiler Brennstoffe) stark im Ansteigen begriffen. Ein Zusammenhang zwischen dieser Erhöhung der Treibhausgaskonzentration und dem weltweiten Trend zu Klimaveränderungen wird von zunehmend verlässlicheren Klimamodellen erhärtet (z.B. IPCC 1996; 2001).

Eine umfassende raum-zeitliche Analyse des Klimas ist jedoch schwierig, da Klimasysteme sehr komplex sind. Zusätzlich limitieren messtechnische Hindernisse wie z.B. kurze Messperioden (etwa 100 Jahre) im Fall der Alpen. Trotz dieser Einschränkungen lassen sich für die Schweiz langfristige Trends erkennen, die sich mit der weltweit beobachteten systematischen Klimaveränderung in Übereinstimmung bringen lassen. Z.B. hat sich die Tagestemperatur-Amplitude während der letzten fünfzig Jahre im Mittel um 2,4 °C verschmälert (BENISTON & REBETZ 1996; BENISTON 1994). Vor allem im Herbst sind Abende wärmer geworden (BADER 1998), und die Minimumtemperaturen der Wintermonate sind zwischen 1900 und 1993 um etwa 2 °C angestiegen (BADER 1998; BENISTON 1994; BENISTON *et al.* 1997).

Diese Veränderungen lassen die Frage nach dem zukünftig zu erwartenden Klima aufkommen. Eine Schätzung (Projektion) der zwischenstaatlichen Sachverständigenkommission Klimaveränderung IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) von 1990 lag bei einer mittleren globalen Erwärmung von 1,8 °C ($\pm 0,8$ °C Abweichung) bis zum Jahr 2050 (IPCC 1990). Fünf Jahre später stellte sich heraus, dass die Oberflächenerwärmung etwas langsamer vonstatten geht – bis zum Jahr 2050 soll sich die mittlere Jahrestemperatur um 1 °C erwärmen (IPCC 1996). Gründe für diesen Rückgang der veranschlagten zukünftigen mittleren Oberflächentemperatur schliessen höhere Sättigungswerte der Ozeane und terrestrischer Ökosysteme für Kohlendioxid (CO₂) mit ein wie auch erwärmungshemmende Sulfat-Aerosole (Sulfat-Aerosole strahlen Sonnen-

strahlung in den Weltraum zurück und sind vor allem in stark industrialisierten Regionen wirksam). Im aktuellsten IPCC-Bericht von 2001 werden bis zum Jahr 2100 die zukünftigen Oberflächentemperaturen erneut höher veranschlagt (+1 bis +3 °C), da die erwärmungsbegünstigenden Faktoren weit längerlebig sind (Jahrzehnte, Jahrhunderte) als die erwärmungshemmenden (Tage bis Wochen).

Der Einfluss erwärmungsbegünstigender und -hemmender Faktoren auf das zukünftige Klima wird in komplexen gekoppelten Atmosphären-Ozean-Modellen (GCM) errechnet, deren Klimaprojektionen für die Zukunft auf Regionen wie die der Schweiz angepasst werden können. Anpassungsmethoden sind z.B. in FISCHLIN & GYALISTRAS (1997), GYALISTRAS *et al.* (1998) diskutiert. GYALISTRAS *et al.* (1994) und FISCHLIN *et al.* (1995) veranschlagen für Zentraleuropa eine mittlere jährliche Temperaturerhöhung im Bereich von 2 bis 3 °C, wobei Hochlagen einen proportional höheren Erwärmungseffekt erfahren werden als Tieflagen (BENISTON & REBETZ 1996; BENISTON *et al.* 1997).

Verändert sich das Temperaturregime der Alpen, so ändert sich auch die Niederschlagsintensität und -verteilung. Da Gebirge Schlüsselemente für hydrologische Zyklen sind (Flüsse), können Veränderungen im Temperatur- und Niederschlagsregime einen grossen Einfluss auf die Wasserversorgung haben (BENISTON *et al.* 1997). Projektionen für das Mittelland, den Jura und das Wallis veranschlagen eine mittlere Zunahme der Niederschläge um 20%, lokal sogar um 30 bis 40%, (BADER 1998).

Veränderungen des Klimas bringen zudem möglicherweise Schwankungen von Frequenz und Intensität einiger Extremereignisse (Murgänge, Frost, Dürre, Starkniederschlag) mit sich (z.B. REBETZ *et al.* 1997; REBETZ & BENISTON 1997). Einzelne Ereignisse können jedoch nicht als «Zeichen» für eine Klimaveränderung gewertet werden, da dazu Langzeitbeobachtungen nötig sind (REBETZ 1996).

Die von den globalen Klimamodellen veranschlagten Temperaturveränderungsraten während des 20. Jahrhunderts sind grösser als alle vorangegangenen während der letzten 10 000 Jahre (IPCC 2001). Gegenwärtig werden die höchsten Kohlendioxid- und Methankonzentrationen seit 420 000 Jahren gemessen (IPCC 2001). Von zunehmend verlässlicheren Klimamodellen wird vorhergesagt, dass die anthropogen bedingten Treibhausgase und Aerosole das Klima auch in Zukunft stark beeinflussen werden (IPCC 2001).

Methode

Vegetationsmodelle

Im Hinblick auf die beobachteten Klimaveränderungen und die ausgeprägte Klimasensitivität der Alpenvegetation stellt sich die Frage nach möglichen Konsequenzen. Diese Konsequenzen können auf verschiedenen räumlichen und zeitlichen Skalen

untersucht werden: Es können physiologische Reaktionen auf erhöhte Kohlendioxidkonzentrationen (z.B. KÖRNER 1992; 1995; KRÄUCHI 1993; 1996) auf kleinen Skalen untersucht werden (z.B. Photosynthese auf Blattniveau) oder Artenverteilungen auf grossskaligen Landschaftsebenen (BRZEZIECKI *et al.* 1994; 1995; KRÄUCHI 1996; BOLLIGER *et al.* 2000a). Ich stelle hier grossskalige Vegetationsmodelle vor. Die Modelle schätzen die Konsequenzen einer Klimaveränderung auf Baumartenniveau auf räumlichen Skalen zwischen ha und km² ab, indem sie Vegetationscharakteristika (z.B. Biomasse, Artenverteilung) in mathematische bzw. statistische Beziehung zu vegetationssteuernden Faktoren (z.B. Klima, Boden) setzen. Gegenwärtig gebräuchliche Vegetationsmodelle lassen sich grundsätzlich in zwei Typen einteilen, denen unterschiedliche Konzepte zu Grunde liegen: der statische Gleichgewichts- und der dynamisch-transiente Modelltyp. Beide Modelltypen haben spezifische Vorteile und Einschränkungen, die in KIENAST *et al.* (1998); LISCHKE *et al.* (1998a); BOLLIGER *et al.* (2000b); GUIAN & ZIMMERMANN (2000) und LISCHKE (2001) detailliert beschrieben sind.

Statische Gleichgewichtsmodelle basieren auf der Annahme, dass zwischen *Biota* (z.B. Bäume) und ihrer Umwelt ein Gleichgewichtszustand erreicht ist. Die Populationsdichte des Gleichgewichts verändert sich nicht, obwohl Ein- und Auswanderung sowie Absterben und Neuetablierungen stattfinden (Tabelle 1). Vegetationsmodelle, die solche Gleichgewichtszustände beschreiben, werden als statische Gleichgewichtsmodelle bezeichnet. Dieser Modelltyp simuliert die Vegetation als Funktion grossskaliger Umweltvariablen (z.B. Klima, Boden). Charakteristika des Bestandes (z.B. Konkurrenzverhältnisse, Bewirtschaftungsgeschichte) sind aufgrund der Kalibration mit Feldbeobachtungen implizit integriert.

Dynamisch-transiente Vegetationsmodelle basieren auf dem Konzept, dass sich die Vegetation als Folge von abiotischen und biotischen Umwelteinflüssen laufend verändert (Tabelle 1). Die Modelle haben zum Ziel, eine biotische Einheit mechanistisch und prozessorientiert über einen längeren Zeitraum zu beschreiben, wobei die Beziehung zwischen der biotischen Einheit und der Umwelt mehr oder weniger physiologisch interpretierbar ist. Bei einigen dieser Modelle wird die Vegetation als Mosaik (*gaps*) verstanden, in dem jeder Mosaikteil eine Folge zeit-räumlicher Ereignisse ist. Aufgrund artspezifischer Eigenschaften (z.B. Photosyntheserate) lässt dieser Modelltyp explizites Quantifizieren der Wettbewerbsfähigkeit einer Art zu. Bestandes- und Bewirtschaftungsgeschichte, werden jedoch nicht explizit berücksichtigt.

Modellvariablen und Klimaszenarien

Modellvariablen sind diejenigen Modellelemente, welche Simulationen antreiben (z.B. Umweltbedingungen). Die Wahl und Qualität dieser Variablen ist entscheidend für die Interpretierbarkeit der resultierenden Simulation. Um Regionen, die durch

Tabelle 1: Strukturvergleich zweier vereinfachter Modelle: ein dynamisch-transientes Modell und ein statisches Gleichgewichtsmodell (Regressionsmodell).

Table 1: Structural comparison of two simplified models: a dynamic-transient and a static equilibrium (regression) model.

Modelltyp	Simulationen	Abhängige Variable	Simuliert als Funktion von Klimaparameter	Andere Umweltfaktoren	Artspezifische Eigenschaften
Dynamisch-transient	$dN/dt = rN$	Artspezifische Baumbiomasse (t/ha)	<ul style="list-style-type: none"> • Anzahl Gradtage >5.5 °C • Minimale Wintertemperatur 	<ul style="list-style-type: none"> • Lichtverfügbarkeit • Bodenstickstoff 	<ul style="list-style-type: none"> • Baumetablierung • Sterberaten
Statisch Gleichgewicht	$N = K$	Artspezifische Basalfläche (m ²)	<ul style="list-style-type: none"> • Anzahl Gradtage >3 °C • Wasserbudget (Juli) • Strahlung (Juli) • Sommerfrosthäufigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • Hangneigung 	—

d: Differenz K: Gleichgewichtszustand N: Biotische Einheit r: Wachstumsfaktor t: Zeit

die Alpen geprägt sind, abzubilden, berücksichtigen die vorgestellten Modelle Temperatur und Niederschlag sowie Masse für die Exposition und Hangneigung (Tabelle 2 und 3). Bei einigen Ansätzen fließen zudem Masse für extreme Umweltbedingungen mit in das Modell ein, z.B. Winter-Minimumtemperaturen (BUGMANN 1994; LISCHKE *et al.* 1998b; LÖFFLER & LISCHKE 2001) oder Sommerfrosthäufigkeiten (BOLLIGER *et al.* 2000a).

In Tabellen 2 und 3 sind die verschiedenen Modelle mit den veranschlagten Klimaszenarien zusammengefasst. Die Bandbreite berücksichtigter Erwärmungsszenarien ist gross: schwache Temperaturerhöhungen liegen bei 1,1 °C (BRZEZIECKI *et al.* 1994; 1995; KIENAST *et al.* 1996; 1998), mittlere Temperaturerhöhungen liegen zwischen 2,8 und 3,5 °C (KRÄUCHI & KIENAST 1993; BRZEZIECKI *et al.* 1994; 1995; KIENAST *et al.* 1996;

Tabelle 2: Statische Gleichgewichtsmodelle: Beschreibungen und verwendete Klimaveränderungsszenarien.

Table 2: Static equilibrium models: descriptions and employed climate change scenarios.

Modellbeschreibung	Autorin, Autor	Zielvariable	Erklärende Parameter	Klimaszenarien
	BRZEZIECKI (1994)	Waldgemeinschaften	<ol style="list-style-type: none"> Höhe Exposition Neigung Mittlere Jahrestemperatur Mittlerer jährlicher Niederschlag Bodenvariablen Boden-pH Anzahl Bodenpartikel >2 mm Wasserkapazität Nährstoffkapazität Permeabilität Benetzungstendenz 	<p>Starkes Szenario</p> <p>Mittlere Jahrestemperatur landesweit +2 °C.</p>
	BRZEZIECKI <i>et al.</i> (1995)	Waldgemeinschaften	<ol style="list-style-type: none"> Geographische Region Bodeneigenschaften: Unterscheidung zwischen kalkreichen und kalkarmen Gebieten. Exposition (Süd warm/trocken und Nord kalt/feucht). Jahresmitteltemperatur ersetzt. 	<p>Moderates Szenario (°C)</p> <p>Jura +1,1; Mittelland +1; Nord- und Südalpen +1,2; Inneralpen +1,4; westliche Zentralalpen (Wallis) +1,3; östliche Zentralalpen +1,4.</p> <p>Starkes Szenario</p> <p>Für alle Regionen 2x das moderate Szenario.</p>
	KIENAST <i>et al.</i> (1996)	Waldgemeinschaften	<ol style="list-style-type: none"> Geographische Region Mittlerer Jahresniederschlag Boden-pH Exposition – Ellenberg's Index (Modellversion A) – mittlere Jahrestemperatur (Modellversion B). 	<p>Moderates Szenario (°C)</p> <p>Modellversion A: Julitemperatur +1,5, heutiger Niederschlag.</p> <p>Modellversion B: Jura +1,1; Mittelland +1; Nord- und Südalpen +1,2; östliche Zentral- und Zwischenalpen +1,4; westliche Zentralalpen +1,3.</p> <p>Starkes Szenario (°C)</p> <p>Modellversion A: Julitemperatur um 3 °C erhöht, heutige Niederschlagsmenge.</p> <p>Modellversion B: Jura +2,2; Mittelland +2; Nord- und Südalpen +2,4; westliche Zentralalpen +2,6, östliche Zentral- und Inneralpen +2,8.</p>
	KIENAST <i>et al.</i> (1998)	Waldgemeinschaften	<ol style="list-style-type: none"> Geographische Region Mittlerer jährlicher Jahresniederschlag Exposition Boden-pH Temperatur Mittlere Jahrestemperatur (Modellversion B) oder Ellenbergkoeffizient (Julitemperatur/Jahresniederschlagssumme Modellversion A). 	<p>Moderates Szenario (°C)</p> <p>Modellversion A: Julitemperatur +1,5, heutiger Jahresniederschlag.</p> <p>Modellversion B: Jura +1,1; Mittelland +1; Nord- und Südalpen +1,2; Zwischenalpen +1,4; westliche Zentralalpen (Wallis) +1,3; östliche Zentralalpen und Inneralpen +1,4.</p> <p>Starkes Szenario (°C)</p> <p>Modellversion A: Julitemperatur +3, jährlicher Niederschlag: +15%.</p> <p>Modellversion B: Jura +2,2; Mittelland +2; Nord- und Südalpen +2,4; westliche Zentralalpen (Wallis) 2,6; östliche Zentral- und Inneralpen: +2,8.</p>
	BOLLIGER <i>et al.</i> (2000a)	Baumarten	<ol style="list-style-type: none"> Anzahl Gradtage über 3 °C Strahlung Wasserbudget Hangneigung 	<p>Schwaches Szenario: +100 Gradtage</p> <p>Moderates Szenario: +200 Gradtage</p> <p>Starkes Szenario: +400 Gradtage</p>

1998), maximale bei 5 °C (KIENAST 1991) und sogar bei 6,4 °C (BUGMANN & FISCHLIN 1996).

In einigen Arbeiten wurden die Temperaturszenarien regional angepasst und nach geographischer Region unterschieden (BRZEZIECKI *et al.* 1994; 1995; KIENAST *et al.* 1996; 1998). Temperaturszenarien in der Region um den Jura liegen bei +1,1 und +2,2 °C, für das Mittelland zwischen +1 und +2 °C, für die Nordalpen zwischen +1,2 und +2,4 °C, Zentral- und Zwischenalpen zwischen +1,3 und +2,8 °C (Details in *Tabelle 2*).

Niederschlagsszenarien sind generell mit grösseren Unsicherheiten behaftet im Vergleich mit Temperaturszenarien, da die Niederschlagsmenge und -intensität stark variabel sind. In den vorliegend besprochenen Modellen umfassen Niederschlagsszenarien Erhöhungen um 10% (BOLLIGER *et al.* 2000a) oder um 20% (KRÄUCHI & KIENAST 1993; BUGMANN & FISCHLIN 1996) (*Tabellen 2 und 3*).

Resultate

Waldvegetation unter Klimaveränderungen

Die Einflüsse eines sich ändernden Klimas auf die Waldvegetation der Schweiz sind gravierend. Die Modellsimulationen zeigen, dass grundlegende Veränderungen der Waldzusammensetzung zu erwarten sind. In vielen Fällen muss mit einer schwer wiegenden Umgestaltung der Wälder gerechnet werden. Simulationen dynamisch-transienter Modelle zeigen, dass nach einer anfänglichen Wachstumsperiode die Wälder starke Einbrüche in der Gesamtbiomasse aufweisen. Selbst wenn sich langfristig eine stabile Situation einpendelt, muss doch mit negativen Situationen gerechnet werden, die möglicherweise Jahrzehnte andauern können.

Im Folgenden liste ich simulierte Resultate auf, die in einer zukünftigen Gleichgewichtssituation erwartet werden können. Trotz unterschiedlicher Modelltypen, und unterschiedlicher Modellvariablen sind die resultierenden Simulationen in vielen Aspekten vergleichbar. Landesweit sollte sich die Baumartenhäufigkeit in Zukunft nicht stark verändern: häufige Arten (Buche) bleiben häufig, während weniger häufige Arten (Arve) weniger häufig bleiben (BOLLIGER *et al.* 2000a). Entlang der Höhengradienten jedoch muss mit starken Veränderungen gerechnet werden. Modellsimulationen zeigen, dass bereits bei schwacher Erwärmung Waldgesellschaften durch nächst tiefer gelegene ersetzt werden. Unter einem moderaten Erwärmungsszenario sollen sogar nur 33% der Untersuchungsflächen in der heutigen Höhenstufe bleiben, während bei einem starken Erwärmungsszenario fast alle Untersuchungsflächen in eine höher gelegene Vegetationsgesellschaft überwechseln (BRZEZIECKI *et al.* 1995). Die Verschiebungen können in der Grössenordnung von zwei bis zu drei Vegetationszonen liegen (BRZEZIECKI *et al.* 1995; BOLLIGER *et al.* 2000a). Einen Zeitrahmen für solche Verschiebungen in grössere Höhenlagen gibt KIENAST (1991) an. Simulationen nach vierzig Jahren und einer Temperaturerhöhung von 1,5 °C lassen neue Übergangswaldtypen entstehen (KIENAST 1991). Übergangswaldtypen werden auch von BUGMANN & FISCHLIN (1996) bei Temperaturszenarien zwischen +2,9 °C bis +6,9 °C und von FISCHLIN & GYALISTRAS (1997) zwischen +2 °C bis +2,3 °C beobachtet. Solche Übergangswaldtypen sind plausibel, da Baumarten eher individuell auf ihre Umwelt reagieren, als dass ganze Waldgesellschaften zusammen «auswandern». Zudem können durch Einwandern gegenwärtig fremder Arten oder Aussterben gegenwärtiger Waldtypen neue Waldtypen entstehen (FISCHLIN & GYALISTRAS 1997).

Tabelle 3: Dynamisch-transiente Modelle: Beschreibungen und verwendete Klimaveränderungsszenarien.

Table 3: Dynamic-transient models: descriptions and employed climate change scenarios.

Modellbeschreibung Autorin, Autor	Zielvariable	Modellname	Umweltparameter	Klimaszenarien
KIENAST (1987; 1991); KIENAST & KUHN (1989)	Baumarten	FORECE	1. Sommertemperatur 2. Frühjahrsfrost 3. Bodenfeuchtigkeit 4. Literaturwerte über artspezifische Lichtbedingungen, Bodenfeuchtebedürfnisse und Maximalalter	Szenario I (nach 400–600 Jahren erreicht): Wintertemperaturen (Dezember bis Februar): +3,5 °C Übrige Monate +3 °C Niederschlag: +10% Szenario II (nach 500–700 Jahren erreicht): Wintertemperaturen (Dezember bis Februar): +4 °C Frühjahr (März bis Mai): +3,5 °C. Temperaturen der übrigen Monate: +2,5 °C
KRÄUCHI & KIENAST (1993)		FORSUM	1. Sommertemperatur 2. Niederschlag 3. Interzeption (als Funktion von Regenintensität und Kronenstruktur des Bestandes) 4. Frühjahrsfrost 5. Bodenfeuchtigkeit 6. Lichtbedingungen (basierend auf der Kronenstruktur) 7. Herbivorie	Szenarien +3 °C (März bis November) +3,5 °C (Dezember bis März) +10% Niederschlag +20% Niederschlag
BUGMANN (1994); BUGMANN & FISCHLIN (1996)	Baumarten	ForClim Versionen	Modulare Struktur: 1. ForClim-E: Minimum der Wintertemperatur, Trockenstress 2. ForClim-S: Berechnet die N-Verfügbarkeit für Pflanzen 3. ForClim-P: Berechnet die Populationsdynamik (Etablierung, Mortalität und Wachstum basierend auf Alterskohorten) 4. Herbivorie	Szenarien Abhängig von Breitengrad, Längengrad und Meereshöhe liegen die Szenarien zwischen +2,9 °C und +6,4 °C Niederschlag: +5% bis +20%

Modelle, welche mit diskreten Pflanzengemeinschaften kalibriert sind (BRZEZIECKI *et al.* 1994; 1995; KIENAST *et al.* 1996; 1998), können unter Umweltveränderungen keine neuen Pflanzengemeinschaften veranschlagen, da solchen Modellen die Annahme zugrunde liegt, dass alle Arten innerhalb einer Pflanzengesellschaft gemeinsam wandern. Neu einwandernde Arten, z.B. aus dem Mittelmeerraum, oder Neuvergesellschaftungen mit Arten, die bereits anzutreffen sind, können daher in einem solchen Ansatz nicht berücksichtigt werden. Im Gegensatz dazu lassen Einzelartenmodelle (BOLLIGER *et al.* 2000a) mögliche Übergangsvegetationen zu.

Vergleicht man Simulationen der Einzelartenmodelle und der Waldgemeinschaftsmodelle miteinander, so zeigt sich, dass die Simulationen des Waldgemeinschaftsmodells eine grössere Verbreitung einzelner Baumarten aufweisen, da der Waldgemeinschaftsansatz über einen breiten Multi-Artenkomplex integriert. Beim Einzelartenmodell werden hingegen die Artvorkommen schmaler simuliert. Es kann also angenommen werden, dass das Einzelartenmodell den Vorkommensbereich artrelevanter simuliert. Da aber beide Ansätze ungefähr dieselbe Grössenordnung an Vegetationsveränderungen unter verändertem Klima veranschlagen, werden die Simulationsresultate der Waldgemeinschafts- und Einzelartenmodelle im Folgenden nicht separat vorgestellt.

Bei einem wärmeren und zugleich trockeneren Szenario werden die gegenwärtigen kühl-adaptierten Buchengemeinschaften (*Abieti-Fagion* und *Eu-Fagion*) der montanen und kollinen Stufe durch trockenheitsresistentere Eichen-Hagebuchenwälder (*Carpinion betuli*) und Flaumeichenwälder (*Quercion pubescenti-petraeae*, *Quercion rubri-petraeae*) abgelöst (BRZEZIECKI *et al.* 1995; KIENAST *et al.* 1996; 1998). Diese Vegetationsverschiebung kann grosse Bedeutung für naturschützerisch wertvolle Waldbiotope (z.B. KIENAST *et al.* 1996; 1998) haben, da Eichen-Hagebuchen- und Flaumeichenwälder sehr artreich sind.

In den wärmsten Teilen der Schweiz könnte es in Zukunft zu warm und/oder zu trocken sein, sogar für Eichen-Hagebuchen- und Flaumeichenwälder. In solchen Gebieten ist mit einer grossräumigen Versteppung der Landschaft zu rechnen. Dies gilt weniger für die Südalpen, da dieser Teil der Schweiz auch in Zukunft niederschlagsreich bleiben wird (BRZEZIECKI *et al.* 1995). Bei wärmeren und feuchteren Bedingungen sind die Vegetationsverschiebungen nicht sehr ausgeprägt und können sogar den Prognosen unter warmen und trockenen Bedingungen gegenläufig sein (KIENAST *et al.* 1998).

Die Buchengemeinschaften verlieren ihre gegenwärtige Dominanz in tieferen Lagen zwischen 500 und 700 m ü.M. und werden durch trockenheitsresistentere Eichen-Hagebuchenwälder abgelöst (BRZEZIECKI 1994). Buchendominierte Vegetationsgesellschaften könnten jedoch in niederschlagsreichen Gebieten des Mittellands, in den nordöstlichen Teilen der Schweiz und in den Südalpen dominieren (BRZEZIECKI *et al.* 1994; 1995).

In mittleren und subalpinen Höhenlagen wird der Koniferenanteil (vor allem Fichten) stark zugunsten von Laubbaumgesellschaften zurückgehen (KIENAST 1991; KRÄUCHI & KIENAST 1993; BRZEZIECKI *et al.* 1994; 1995; KIENAST *et al.* 1998; BOLLIGER *et al.* 2000a). Nach einem dynamisch-transienten Modell von KIENAST (1991) könnte sich dies bereits bei einer Erwärmung von 3 bis 4 °C ereignen. Fichtengesellschaften verlieren vor allem in mittleren Höhenlagen der Nord-, Zentral- und Südalpen an Dominanz (BRZEZIECKI *et al.* 1994), während buchen- und ahorn-dominierte Vegetationsgürtel (KIENAST 1991) vor allem zwischen 1100 und 2100 m ü.M. zunehmen (BRZEZIECKI *et al.* 1994) und den Fichtengürtel ablösen.

Gebiete, welche gegenwärtig oberhalb der Waldgrenze liegen, können unter wärmeren Temperaturen und geeigne-

ten Samenbankbedingungen waldfähig werden (KIENAST 1991; KRÄUCHI & KIENAST 1993; BUGMANN & FISCHLIN 1996; FISCHLIN & GYALISTRAS 1997). Im kontinentalen Teil der Alpen können vor allem Arven (KIENAST 1991; KRÄUCHI & KIENAST 1993) und Grünerlen (KIENAST 1991) die Waldgrenze ansteigen lassen. Bei wärmeren und zugleich feuchteren Bedingungen spielt wohl die Fichte eine wichtige Rolle bei der Bewaldung von Gebieten oberhalb der gegenwärtigen Waldgrenze (KRÄUCHI & KIENAST 1993).

Diese Vegetationsverschiebungen führen möglicherweise zu einer Veränderung der Waldfläche. In bereits trockenen, inneralpinen Tälern droht Versteppung (BRZEZIECKI *et al.* 1994; 1995), falls sich keine trockenheitsresistentere mediterrane Arten ansiedeln. Im Falle einer starken Temperaturerhöhung (3,5 bis 6 °C) sind etwa 7% dieser Gebiete verstepungsgefährdet. Dieser Waldflächenverlust könnte durch eine mögliche Bewaldung der gegenwärtigen alpinen Stufe kompensiert werden, was die Waldfläche um etwa 10% vergrössern würde (KIENAST 1991; BRZEZIECKI *et al.* 1994; 1995). Unter Berücksichtigung des «Gipfeleffektes» allerdings – das nicht-planimetrische Verhalten der Flächen in Hochlagen im Vergleich mit gleich grossen Flächen in Tieflagen – könnten die Flächen in Hochlagen zu klein sein, um Baumpopulationen zu beherbergen (KIENAST 1998). Ausserdem werden die Auswirkungen einer Klimaveränderung für Waldgrenzhabitate nicht konsistent simuliert. BRZEZIECKI *et al.* (1995) beobachten eine Verschiebung der Waldgrenze in grössere Höhen und finden bei einem moderaten Erwärmungsszenario 7,4% der gegenwärtig unbewaldeten Untersuchungsflächen oberhalb der Waldgrenze bewaldet; bei einem starken Erwärmungsszenario sogar 11% (Tabelle 3). BOLLIGER *et al.* (2000a) finden jedoch nur wenig Hinweise auf ein Ansteigen der Waldgrenze. Historische Untersuchungen für Waldgrenzhabitate aus dem Holozän zeigen, dass Klimaoszillationen nicht unbedingt Waldgrenzschwankungen hervorrufen müssen (z.B. ROCHEFORT *et al.* 1994; GRAUMLICH & BRUBAKER 1995). Bei kleineren zeitlichen Auflösungen haben BUGMANN & PFISTER (2000) jedoch in ihrer Studie der mittelalterlichen Klimageschichte gefunden, dass Waldgrenzökotone sehr empfindlich auf die Klimavariabilität zwischen den Jahren reagiert. Z.B. können aufeinander folgende Jahre mit kalten Sommern zur Stagnation der Waldgrenze führen, während eine Serie nacheinander folgender warmer Sommer die Waldgrenze ansteigen lässt.

Waldgrenzhabitate sind mit Bestimmtheit empfindlich auf das Klima und seine Veränderungen. Es bleibt aber die Frage wie schnell die Bäume auf diese Veränderungen reagieren. Dies ist abhängig von Arteigenschaften, z.B. den Samenverbreitungseigenschaften oder den Keimraten. Die Bewaldung der alpinen Stufe hängt auch von der Geschwindigkeit und Konstanz der Erwärmung ab. Weitere Faktoren, die einen wichtigen Einfluss auf einen möglichen Waldgrenzanstieg haben, sind Forst- und Alpwirtschaft. Wie stark sich eine Klimaveränderung im Vergleich zu den menschlichen Einflüssen im Waldgrenzhabitat auswirkt, bleibt zu untersuchen.

Die möglichen Waldflächenveränderungen lassen die Frage nach «Siegern» und «Verlierern» stellen: Als Sieger in tieferen Höhenlagen könnte man die *Carpion-* und *Quercion-pubescenti-petraeae*-Waldtypen bezeichnen, während die *Fagion*-Waldtypen an Dominanz verlieren (BRZEZIECKI *et al.* 1995). In grösseren Höhen und im subalpinen Gürtel verlieren vor allem Fichtenbestände an Dominanz zugunsten von Laubbaumbeständen, darunter vor allem Buchen (KIENAST 1991; KRÄUCHI & KIENAST 1993; BRZEZIECKI *et al.* 1994; 1995; BOLLIGER *et al.* 2000a). Da die Fläche mit zunehmender Höhe abnimmt, gehen als Sieger die Vegetation der gegenwärtig kollinen

Stufe hervor (*Carpinus betuli*, *Quercion pubescenti-petraeae*, *Quercion robori-petraeae*), die Laubbaumvegetation der montanen Stufe sowie Gemeinschaften und Einzelarten, die gegenwärtig (noch) nicht zur Vegetation gehören (BRZEZIECK *et al.* 1995; KIENAST *et al.* 1996; BOLLIGER *et al.* 2000a).

Diskussion

Das Quantifizieren der Heterogenität natürlicher Systeme in Zeit und Raum ist eine grosse Herausforderung. Schwer quantifizierbare Prozesse (z.B. stochastische) oder fehlende Langzeitbeobachtungen setzen der quantitativen Modellierung als Methode Grenzen. Daher dürfen Modellsimulationen nicht als «Prognosen» verstanden werden, sondern vielmehr als Vorschläge, die innerhalb der Modelllimiten verstanden werden müssen. Sollen Wissenschaft und Politik ihre Entscheidungen nun auf gültige und aussagekräftige Resultate abstützen, müssen die Modellsimulationen innerhalb des Gültigkeitsbereichs des Modells geprüft werden. Erst nach erfolgreichen Tests können die Simulationen basierend auf dem zugrundeliegenden, theoretischen Modellkonzept interpretiert und an die Öffentlichkeit getragen werden.

Im Folgenden gehe ich auf Diskussionspunkte ein, vor deren Hintergrund die präsentierten Modellsimulationen kritisch betrachtet werden müssen. Zu solchen Punkten gehören Diskussionen um die Limiten und Verlässlichkeit der Modelle wie auch eine Beleuchtung der Entwicklung der Modellvariablen, welche zunehmend an Realitätsnähe gewinnen.

Limitationen der Vegetationsmodelle

Limitationen ergeben sich vor allem im Zusammenhang mit schwer quantifizierbaren Langzeitprozessen, Feedbackmechanismen oder zeitlichen Verzögerungen im Ursache-Wirkungsgefüge.

Als ein Beispiel für schwer quantifizierbare Langzeitprozesse gilt der Einfluss des Menschen auf die Vegetation. Die Simulationen der meisten Modelle sind als natürliche Grundlage für das Handeln des Menschen zu verstehen. Aber Fragen nach der relativen Beziehung zwischen Auswirkung des Menschen und Auswirkungen eines sich ändernden Klimas auf die Vegetation sind sehr relevant (z.B. KRÄUCHI 1996), da die Waldfläche der Schweiz zwischen 1985 und 1995 allein durch Bewirtschaftungsaufgabe um 10% zugenommen hat.

Ein Beispiel für Feedbackmechanismen ist die komplexe Wechselwirkung zwischen Vegetation und Boden, die das Tempo der Bodenentwicklung schwer quantifizierbar macht. Klima-induzierte simulierte Vegetationsverschiebungen können daher nur eintreten, wenn die Böden sich schnell genug entwickeln (LISCHKE *et al.* 1998a). Entwickelt sich der Boden zu langsam, könnte die Bewaldung der alpinen Stufe gehemmt werden (FISCHLIN & GYALISTRAS 1997).

In historischen Arbeiten wurde vielfach belegt, dass die Ursache-Wirkungsbeziehung zwischen Klimaveränderungen und Vegetation zeitlich verzögert ist (*time-lags*, DAVIS 1984; MAGNUSSON 1990). Bäume können sich z.B. aufgrund physiologischer Toleranz stark asynchron mit ihrer Umwelt verhalten (BUGMANN & SOLOMON 2000). Solche Toleranzschwellenwerte sind nur schwer in Modelle implementierbar.

Verlässlichkeit der Vegetationsmodelle

Da Modellieren immer auch Generalisieren bedeutet, werden auf verschiedenen Ebenen Unsicherheiten eingeführt. Es ist daher unerlässlich, dass die resultierenden Modellsimulationen auf ihre Plausibilität getestet werden. Methoden zur Modellevaluation beleuchten Unsicherheiten in der Beziehung

zwischen ökologischer Theorie, der Modellstruktur und den Daten. So werden Trends bestätigt oder widerlegt und wichtige Lücken in den Variablenberechnungen oder den Daten aufgezeigt. Idealerweise werden alle Evaluationskriterien gleichzeitig erfüllt. Eine solche Evaluationsmethode wurde von REYNOLDS & FORD (1999) publiziert. In Realität jedoch, besonders im Fall der ausgewählten Modelle, werden meist nur Teilaspekte eines Modells ausgetestet, die als Kriterien für Rückschlüsse über das gesamte Modell verwendet werden. Im Folgenden führe ich einige Testaspekte auf, die zur Modellevaluation dienen können.

- **Generalisierbarkeit:** Modelle werden in den meisten Fällen für klar definierte Untersuchungsgebiete und spezifische Arten entwickelt und mit für das Untersuchungsgebiet relevanten, spezifischen Umweltbedingungen kalibriert. So wird zwar das Modell optimal an die zu untersuchende Region angepasst, aber Anwendbarkeit und Verlässlichkeit von Simulationen müssen auch unter veränderten Umweltbedingungen gültig sein, da gerade Klima und Bodenbedingungen sich bei einer Klimaveränderung über die gegenwärtige Umwelt-Bandbreite des Untersuchungsgebietes hinaus verändern. Wie allgemeingültig ein Modell ist, kann mit Inputdaten anderer Regionen oder anderer Kontinente getestet werden. LASCH & LINDNER (1995) haben die Generalisierbarkeit des für Zentraleuropa kalibrierten Modells FORECE (KIENAST 1987; KIENAST & KUHN 1989; KIENAST 1991) in Norddeutschland ausgetestet. Das ebenfalls für Zentraleuropa aufgesetzte Modell ForClim (BUGMANN 1994) wurde im östlichen Nordamerika (BUGMANN & SOLOMON 1995) sowie im pazifischen Nordwesten der USA (BUGMANN *et al.* 2000) angewandt. Befriedigende Resultate aus dieser vergleichenden Anwendung lassen den Schluss zu, dass diese Modelle eine breite Gültigkeit haben.

- **Modellvergleiche:** Qualitative oder quantitative Vergleiche innerhalb oder zwischen Modelltypen bieten eine gute Grundlage, um Struktur und Verhalten basierend auf dem konzeptionellen Modellhintergrund zu diskutieren (FISCHLIN *et al.* 1995; BUGMANN 1996; BUGMANN *et al.* 1996; BOLLIGER *et al.* 2000b). Modellvergleiche können so eine wichtige Rolle in Bezug auf Variablenberechnung und Simulationskontrolle spielen.

Ein Vergleich der Simulationen zwischen zwei Modelltypen – einem statischen Gleichgewichts- und einem dynamisch-transienten Modell – haben BOLLIGER *et al.* (2000b) durchgeführt. Resultate zeigen, dass simulierte Unterschiede der Baumartenverteilungen mit der jeweiligen Modellstruktur und dem zugrunde liegenden Modellkonzept interpretiert werden können.

Innerhalb der dynamisch-transienten Modellgruppe wurden Variablen- und Simulationsvergleiche zum Austesten der Modellrobustheit quantifiziert. FISCHLIN *et al.* (1995) haben die Empfindlichkeit von Simulationen für verschiedene Varianten von Klimavariablen quantitativ verglichen. Unter verschiedenen Klimaveränderungsszenarien wiesen die Modellvarianten stark unterschiedliche Resultate auf. Als Folge dessen wurden einige Variablen (Minimum und Maximum des Temperaturfaktors, das Mass für die Vegetationsperiode) neu formuliert, was in robusteren Simulationen gegenüber Variablenvarianten resultierte. Als Beispiel für Simulationsvergleiche innerhalb der dynamisch-transienten Modellgruppe haben BUGMANN (1996) und BUGMANN *et al.* (1996) das Modellverhalten entlang von Klimagradienten verglichen. Dabei wurde die Verlässlichkeit von Simulationen entlang von Vegetationsübergängen ausgetestet, z.B. von subalpinen Koniferenwäldern zu gemischten Laubwäldern in tieferen Lagen.

Zeitliche Entwicklung der Modelle

Im Bestreben, die Realität besser abzubilden und den Rechenprozess effizienter zu gestalten, wurden eine Vielzahl von Veränderungen an den Modellen und ihren Variablen unternommen. In einer Langzeitperspektive ist jedoch nicht klar, wie viele dieser Details in den Variablen enthalten sein sollten, denn eine erhöhte Komplexität der Modelle erhöht nicht unbedingt die «Genauigkeit» eines Modells (BUGMANN & MARTIN 1995). Im Folgenden liste ich wichtige Entwicklungen auf, welche die beiden hier diskutierten Modelltypen erfahren haben ohne Anspruch auf Vollständigkeit erheben zu wollen (Tabelle 2 und 3).

Für beide Modelltypen – denjenigen, des statischen Gleichgewichts und den dynamisch-transienten – findet über die letzten zehn Jahre ein Trend zur Vereinfachung und erhöhter Flexibilität statt. Beim statischen Gleichgewichtstyp werden Modelle, die mit ursprünglich zwölf Variablen gerechnet wurden (BRZEZIECKI *et al.* 1994), neu mit fünf Variablen vorgestellt (BRZEZIECKI *et al.* 1995; KIENAST *et al.* 1996; 1998; BOLLIGER *et al.* 2000a, b). Beim dynamisch-transienten Modelltyp ist eine Entwicklung Richtung flexiblerer, modularer Struktur zu beobachten. BUGMANN (1994) hat, basierend auf dem Modell FORECE (KIENAST 1987; KIENAST & KUHN 1989; KIENAST 1991), das modulare Modell ForClim generiert, das sich aus den Modulen ForClim-E (abiotische Umwelt), ForClim-S (Stickstoffgehalt) und ForClim-P (Populationsdynamik) zusammensetzt. Eine solche modulare Struktur hat den Vorteil, dass einzelne Module ein- und ausgeschaltet werden können, was den Simulationsprozess einfacher und effizienter macht. Grössere Recheneffizienz durch Eliminierung der wiederholten Simulation einzelner *gaps* in ForClim haben LISCHKE *et al.* (1998b); LÖFFLER & LISCHKE (2001) durch Zusammenfassen der *gaps* zu Baumdichtevertellungen ihrem Modell DisCForm erreicht (strukturiertes Populationsmodell).

Neben Effizienz und Vervollständigung der Modelle wurden Bestrebungen zur Verfeinerung der physiologischen Relevanz einzelner Variablen unternommen. Klimavariablen statischer Gleichgewichtsmodelle zeigen einen Trend in Richtung grösserer räumlicher Auflösung (250 m, BRZEZIECKI *et al.* 1994, zu 30 m, BOLLIGER *et al.* 2000a, b) (Tabelle 2). Temperaturvariablen werden mit dem physiologisch relevanteren Mass Anzahl Gradtage (degree days) ausgedrückt (BOLLIGER *et al.* 2000a, b), anstelle der mittleren Jahrestemperatur in °C (BRZEZIECKI *et al.* 1994; 1995; KIENAST *et al.* 1996; 1998). Ein neues Mass für das Wasserbudget, das auf der Differenz zwischen potenzieller Evapotranspiration und dem Monatsniederschlag basiert (BOLLIGER *et al.* 2000a, b), wurde anstelle des mittleren Jahresniederschlags (BRZEZIECKI *et al.* 1994; 1995; KIENAST *et al.* 1996; 1998) errechnet.

Bei den dynamisch-transienten Modellen wurden eine Reihe von Umweltvariablen neu implementiert oder umformuliert. In FORSUM (KRÄUCHI & KIENAST 1993) – das auf FORECE (KIENAST 1991) basiert – wurden Herbivorie und ein Mass für Interzeption eingeführt sowie die meisten Umweltvariablen physiologisch relevanter berechnet. Z.B. berücksichtigt die Bodenfeuchtevariable von FORSUM auch die Wasserextraktion durch die Wurzeln (KRÄUCHI & KIENAST 1993). Bei ForClim (BUGMANN 1994) – ein weiterer Abkömmling von FORECE (KIENAST 1991) – haben BUGMANN & CRAMER (1998) die ursprüngliche klimatologische Feuchtevariable durch eine sich nach Angebot und Nachfrage richtende ersetzt. So konnten realistischere Simulationen entlang von Trockenheitsgradienten erreicht werden. Diese flexible Eigenschaft macht das Modell auf andere geographische Regionen anwendbar (Nordamerika, BUGMANN & SOLOMON 1995; BUGMANN *et al.* 2000). Eine weitere Entwicklung des dynamisch-transienten Modells

ForClim (BUGMANN 1994) ist eine Neudefinierung des Baumwachstums (BUGMANN 1994) und der Wintertemperatur (FISCHLIN *et al.* 1995), da absolute Minimumtemperaturen im Winter allgemein als bestimmender Faktor für die Verbreitung von Arten gelten. FISCHLIN *et al.* (1995) haben ein verbessertes Mass für die Wintertemperatur eingeführt, das sich aus dem kleinsten mittleren Temperaturwert der Monate Dezember bis Februar errechnet.

Weitere wichtige Entwicklungen bei beiden Modelltypen gehen in Richtung Quantifizierung extremer Umweltereignisse. Bei den statischen Gleichgewichtsmodellen wurde die Sommerfrosthäufigkeit (BOLLIGER *et al.* 2000a, b) mit ins Modell einbezogen. Bei den dynamisch-transienten Modellen wurde eine Verbesserung der Trockenstressvariable erreicht (FISCHLIN *et al.* 1995), so dass ein kontinuierlicher Gradient von mesischen bis zu xerischen Klimabedingungen verlässlich simuliert wird (FISCHLIN *et al.* 1995).

Gegenwärtige Entwicklungsbestrebungen in der Vegetationsmodellierung gehen in zwei Richtungen: Einerseits besteht ein Trend zu Modellvereinfachungen. Parsimonische Modellansätze verfolgen die Frage nach Redundanzen bezüglich Modellkomplexität und stellen eine universale Gültigkeit in den Vordergrund. Solche Modelle bedienen sich oft einfachster Regeln und einer geringen Anzahl Variablen, um natürliche Phänomene abzubilden. Diese Modelle wurden mit Erfolg zur Erklärung komplexer natürlicher Phänomene angewandt (DIECKMANN *et al.* 2000; SPOTT *et al.*, in Vorbereitung). Andererseits besteht ein Trend zur Erhöhung der Modellkomplexität. Ein Beispiel ist die Vereinigung von Konzepten und Strukturen dynamisch-transienter und statischer Gleichgewichtsmodelle (HE & MLADENOFF 1999). Solche zeit-räumlichen Modelle produzieren räumlich hoch auflösende und zugleich dynamisch-artspezifische Simulationen mit dem Anspruch, die Prozesse in Zeit und Raum möglichst realitätsnah abzubilden (z.B. Samenausbreitungsmodul, LISCHKE 2001).

Zusammenfassung

Vegetationsmodelle sind ein ausserordentlich hilfreiches, wenn nicht das einzige Instrument, um zukünftige Veränderungen der Vegetation über Zeit und Raum zu analysieren. Mögliche Auswirkungen einer Klimaveränderung auf die Vegetation wurden mit zwei strukturell und konzeptionell unterschiedlichen Modelltypen vorgestellt. Beide Modelltypen – der dynamisch-transiente und der statische Gleichgewichtstyp, sind für die Waldvegetation der Schweiz kalibriert worden. Im Bestreben, ökologische Details abzubilden, wurden die Modellvariablen physiologisch verfeinert, neu formuliert oder ergänzt. Extreme Umweltereignisse wie Dürre oder Sommerfrost wurden in den Simulationen berücksichtigt. Alle vorgestellten Simulationen wurden mit verschiedenen Methoden auf Verlässlichkeit, Generalisierbarkeit und Limitationen evaluiert. Die in den Modellen berücksichtigte Vielfalt an Klimaszenarien (Temperaturszenarien +1,1 °C bis +6,4 °C; 10 bis 20% erhöhter Niederschlag) in Kombination mit einer grossen Bandbreite physiologisch wichtiger Umweltfaktoren (z.B. Bodeneigenschaften, extreme Umweltereignisse) lassen auf breit abgestützte Resultate schliessen.

Die simulierten Vegetationsveränderungen unter Klimaveränderungen sind gravierend. Kurz- bis mittelfristig können negative Situationen entstehen, da nach anfänglichen Wachstumsschüben Einbrüche in der Gesamtbiomasse simuliert werden. In bereits trockenen Regionen droht eine Versteppung bei zukünftiger Erwärmung. In vielen Fällen bedeutet eine Klimaveränderung also eine massive Umgestaltung der Wälder. Längerfristig (Jahrhunderte) können sich neue Gleichgewichte einfinden, die folgendermassen charakterisiert werden kön-

nen: In Tieflagen breiten sich Eichen-Hagebuchenwälder und Flaumeichenwälder aus. Im hochmontanen und subalpinen Bereich werden die Fichten zugunsten der Buchen an Dominanz verlieren. Das Entstehen von Übergangsgesellschaften oder neuen Gesellschaften mit mediterranen Arten erscheint als wahrscheinlich. Ob die gegenwärtig waldfreie alpine Stufe bewaldet wird, ist nach wie vor kontrovers.

Summary

Swiss forests and climate change: comparison of simulated quantitative vegetation models

Vegetation models are helpful instruments with which to analyse possible changes in vegetation over time and space. Using two structurally and conceptionally different models, we present possible consequences of a climate change on vegetation. Both model types – the dynamic-transient and the static equilibrium – were calibrated for Swiss forest vegetation. In an attempt to delineate ecological details, variables of the models were physiologically refined, newly formulated and supplemented. Extreme environmental events, such as drought or summer frost, were taken into account in the simulations. Using diverse methods we evaluated all simulations for their dependability, generalisability and limits. The multiple climate scenarios considered in the models (temperatures from +1.1 °C to +6.4 °C; increased rainfall from 10% to 20%), in combination with a wide range of physiologically important environmental factors (e.g. soil character, extreme weather conditions), enable us to conclude with well-founded results.

The simulated changes in vegetation merit serious consideration. Short to medium term, negative situations can arise, which, after initial growth spurts, lead to a collapse in the entire biomass in the simulations. Some already dry regions stand in danger of desertification. In many cases a climate change therefore means a massive re-configuration of the forests. In the long term (centuries) new balances might be achieved that can be characterised in the following manner. In lower regions oak/hornbeam and white oak forests will spread. In higher and subalpine regions spruce will lose its dominance in favour of beech. The formation of interim or new stands with mediterranean species looks possible. Whether the current, forest-free alpine level will remain so is open to question.

Translation: ANGELA RAST-MARGERISON

Résumé

Forêts suisses et changements climatiques: comparaison de simulations de modèles quantitatifs de végétation

Les modèles de végétation sont des instruments extrêmement utiles – sinon les seuls – permettant d'analyser dans le temps et l'espace les changements à venir de la végétation. Les conséquences possibles d'un changement climatique sur la végétation ont été représentés à l'aide de deux types de modèles différant au niveau de la structure et de la conception. Les deux types de modèles – l'un portant sur un équilibre dynamique et l'autre sur un équilibre statique – sont adaptés à la végétation forestière de la Suisse. Afin de mieux reproduire les détails écologiques, on a amélioré, reformulé ou complété les variables physiologiques des modèles. Les simulations tiennent compte de phénomènes environnementaux extrêmes tels que sécheresse ou gelées estivales. Différentes méthodes ont permis d'évaluer la fiabilité, le potentiel de généralisation et les limites des simulations présentées. La diversité des scénarios climatiques pris en compte dans les modèles (hausse de la température de 1,1 à 6,4 °C; augmentation des précipitations de 10

à 20%), combinée avec une large gamme de facteurs environnementaux importants pour la physiologie (propriétés du sol ou phénomènes environnementaux extrêmes, par exemple) permettent d'obtenir des résultats largement étayés.

La simulation des modifications survenant au niveau de la végétation sous l'influence des changements climatiques est lourde de conséquences. Des situations défavorables peuvent se produire à court ou moyen terme, car les simulations montrent qu'aux poussées initiales de croissance de la biomasse totale succèdent des effondrements de la production. Les régions aujourd'hui sèches risquent d'être transformées en steppes si le réchauffement se poursuit. Dans bien des cas, le changement climatique entraînera une transformation massive des forêts. A long terme (siècles), de nouveaux équilibres devraient s'établir, qui pourraient être caractérisés comme suit: propagation des chênaies à charme et des chênaies pubescentes à basse altitude, réduction de la prédominance de l'épicéa au profit du hêtre aux étages montagnard supérieur et subalpin. L'apparition d'associations de transition ou d'associations nouvelles comprenant des espèces méditerranéennes semble plausible. La colonisation de l'étage alpin par des forêts reste une question controversée.

Traduction: CLAUDE GASSMANN

Bibliographie

- BADER S. (1998): Klimarisiken – Herausforderung für die Schweiz. Wissenschaftlicher Schlussbericht, NFP 31. Vdf-Verlag, Zürich, 307 pp.
- BENISTON M. (Ed.) (1994): Mountain environments in changing climates. Routledge Publishing, London, New York, 492 pp.
- BENISTON M., DIAZ H.F., BRADLEY R.S. (1997): Climatic change at high elevation sites: an overview. *Climatic Change* 36: 233–251.
- BENISTON M., REBETZ M. (1996): Regional behavior of minimum temperatures in Switzerland for the period 1979–1993. *Theor. Appl. Clim.* 53: 231–243.
- BOLLIGER J., KIENAST F., ZIMMERMANN N.E. (2000a): Risks of global warming on montane and subalpine forests in Switzerland – a modeling study. *Regional Environmental Change* 1: 99–111.
- BOLLIGER J., KIENAST F., BUGMANN H. (2000b): A comparison of model concepts, structures, and behavior. *Ecological Modelling* 134: 89–102.
- BRZEZIECKI B., KIENAST F., WILDI O. (1994): Potential impacts of a changing climate on the vegetation cover of Switzerland: a simulation experiment using GIS technology. In: Price M.F., Heywood D.I. (Eds.): *Mountain environments & geographic information systems*. Taylor and Francis, London, pp. 263–279.
- BRZEZIECKI B., KIENAST F., WILDI O. (1995): Modelling potential impacts of climate change on the spatial distribution of zonal forest communities in Switzerland. *Journal of Vegetation Science* 6: 257–268.
- BUGMANN H.K. (1994): On the ecology of mountainous forests in a changing climate: A simulation study. Dissertation Nr. 10638, ETH Zürich, 258 pp.
- BUGMANN H.K.M. (1996): A simplified model to study species composition along climate gradients. *Ecology* 77, 7: 2055–2074.
- BUGMANN H., CRAMER W. (1998): Improving the behaviour of forest gap models along drought gradients. *Forest Ecology and Management* 103: 247–263.
- BUGMANN H., FISCHLIN A. (1996): Simulating forest dynamics in a complex topography using gridded climatic data. *Climatic Change* 34: 201–211.
- BUGMANN H., LINDNER M., LASCH P., FLECHSIG M., EBERT B., CRAMER W. (2000): Scaling issues in forest succession modelling. *Climatic Change* 44, 6: 265–289.
- BUGMANN H., MARTIN P. (1995): How physics and biology matter in forest gap models. *Climatic Change* 29: 251–257.
- BUGMANN H., PRISTER C. (2000): Impacts of interannual climate variability on past and future forest composition. *Regional Environmental Change* 1: 112–125.
- BUGMANN H.K.M., SOLOMON A.M. (1995): The use of a European forest model in North America: a study of ecosystem response to climate gradients. *Journal of Biogeography* 22: 447–484.

- BUGMANN H.K.M., SOLOMON A.M. (2000): Explaining forest composition and biomass across multiple biogeographical regions. *Ecological Applications* 10, 1: 95–114.
- BUGMANN H.K.M., YAN X., SYKES M.T., MARTIN P., LINDNER M., DESANKER P.V., CUMMING S.G. (1996): A comparison of forest gap models: model structure and behaviour. *Climatic Change* 34: 289–313.
- DAVIS M.B. (1984): Climatic instability, time lags, and community disequilibrium. In: Diamond J., Case T.J. (Eds.): *Community ecology*. Harper & Row, New York, pp. 269–284.
- DIECKMANN U., LAW R., METZ J.A.J. (2000): The geometry of ecological interactions: Simplifying spatial complexity. Cambridge University press, UK, 564 pp.
- FISCHLIN A., BUGMANN H., GYALISTRAS D. (1995): Sensitivity of a forest ecosystem model to climate parameterization schemes. *Environmental Pollution* 87: 267–282.
- FISCHLIN A., GYALISTRAS D. (1997): Assessing impacts of climatic change on forests in the Alps. *Global Ecology and Biogeography Letters* 6: 19–37.
- GRAUMLICH L.J., BRUBAKER L.B. (1995): Long-term growth and distribution of conifers: integration of palaeoecology. In: Smith W.K., Hickley T.M. (Eds.): *Ecophysiology of coniferous forests*. Academic Press, San Diego, pp. 37–62.
- GUISAN A., ZIMMERMANN N.E. (2000): Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling* 135, 2–3: 147–186.
- GYALISTRAS D., SCHÄR C., DAVIES H.C., WANNER H. (1998): Future alpine climate. In: Cebon P. et al. (Eds.): *Views from the Alps: regional perspectives on climate change*. MIT press, Cambridge, MA, pp. 171–223.
- GYALISTRAS D., VON STORCH H., FISCHLIN A., BENISTON M. (1994): Linking GCM-simulated climatic changes to ecosystem models: case studies of statistical downscaling in the Alps. *Climate Research* 4: 167–189.
- HE H.S., MLADENOFF D.J. (1999): Spatially explicit and stochastic simulation of forest landscape fire disturbance and succession. *Ecology* 80: 81–99.
- IPCC (1990): *Scientific Assessment of Climate Change – Report prep. for IPCC by Working Group I*, ed. by Houghton T.J. et al., Cambridge University Press, UK, 365 pp.
- IPCC (1996): *Climate Change 1995: Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analyses*. Contribution of Working Group II to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, ed. by Watson, R.T. et al., Cambridge University Press, UK, 880 pp.
- IPCC (2001): *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability – Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, ed. by McCarthy, J.J. et al., Cambridge University Press, UK, 1032 pp.
- KIENAST F. (1987): FORECE – a forest succession model for Southern Central Europe. Report ORNL/TM-10575. Environmental Sciences Division Publication No. 2989. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee 37831, USA.
- KIENAST F. (1991): Simulated effects of increasing atmospheric CO₂ and changing climate on the successional characteristics of Alpine forest ecosystems. *Landscape Ecology* 5, 4: 225–238.
- KIENAST F., BRZEZIECKI B., WILDI O. (1996): Long-term adaptation potential of Central European mountain forests to climate change: a GIS-assisted sensitivity assessment. *Forest Ecology and Management* 80: 133–153.
- KIENAST F., KUHN, N. (1989): Simulated responses of Alpine forest ecosystems to various environmental changes: application of a forest succession model. In: Sjögren E. (Ed.): *Forests of the World. Studies in Plant Ecology* (Uppsala) 18: 139–140.
- KIENAST F., WILDI O., BRZEZIECKI B. (1998): Potential impacts of climate change on species richness in mountain forests – an ecological risk assessment. *Biological Conservation* 83, 3: 291–305.
- KÖRNER C. (1992): Response of alpine vegetation to global climate change. *Catena* 22 (Supplement) 85: 85–96.
- KÖRNER C. (1995) Impact of atmospheric changes on alpine vegetation: the ecophysiological perspective. In: Guisan A. et al. (Eds.): *Potential ecological impacts of climate change in the Alps and Fennoscandia*; pp. 113–120.
- KRÄUCHI N. (1993): Potential impacts of a climate change on forest ecosystems. *European Journal of Forest Pathology* 23: 28–50.
- KRÄUCHI N. (1996): Climate change effects on forests. In: Korpilathi E. et al. (Eds.): *Caring for the forest: research in a changing world*. Congress Report. XX IUFRO World Congress, Volume II, Tampere, Finland, pp. 34–55.
- KRÄUCHI N., KIENAST F. (1993): Modelling subalpine forest dynamics as influenced by a changing environment. *Water, Air and Soil Pollution* 68: 185–197.
- LASCH P., LINDNER M. (1995): Application of two forest succession models at sites in north east Germany. *Journal of Biogeography* 22: 485–492.
- LISCHKE H. (2001): New developments in forest modeling: convergence between applied and theoretical approaches. *Natural Resources Modeling* 14, 1: 71–102.
- LISCHKE H., GUISAN A., FISCHLIN F., WILLIAMS J., BUGMANN H. (1998a): Vegetation responses to climate change in the Alps: modeling studies. In: Cebon P. et al. (Eds.): *Views from the Alps: regional perspectives on climate change*, pp. 308–350.
- LISCHKE H., LÖFFLER T.J., FISCHLIN A. (1998b): Aggregation to individual trees and patches in forest succession models: capturing variability with height structured, random, spatial distributions. *Theoretical Population Biology* 54: 213–226.
- LÖFFLER T.J., LISCHKE H. (2001): Incorporation and influence of variability in an aggregated forest model. *Natural Resources Modeling* 14, 1: 103–137.
- MAGNUSSON J.J. (1990): Long-term ecological research and the invisible present. *BioScience* 40: 495–501.
- REBETZ M. (1996): Public expectation as an element of human perception of climatic change. *Climatic Change* 32: 495–509.
- REBETZ M., BENISTON M. (1997): Changes in temperature variability in relation to shifts in mean temperatures in the Swiss Alpine region during this century. In: Beniston M., Innes J.L., (Eds.): *The impacts of climate variability on forests*. Springer Verlag, Berlin, pp. 49–58.
- REBETZ M., LUGON R., BÄRISWYL P.-A. (1997): Climatic change and debris flow in high mountain regions: The case study of the Ritigraben torrent (Swiss Alps). In: Diaz H.F. et al. (Eds.): *Climatic change at high elevation sites*. Kluwer Academic Publisher. Dordrecht, pp. 139–157.
- REYNOLDS J.H., FORD E.D. (1999): Multi-criteria assessment of ecological process models. *Ecology* 80, 2: 538–553.
- ROCHFORD R.M., LITTLE R.L., WOODWARD A., PETERSON D.L. (1994): Changes in sub-alpine tree distribution in western North America: a review of climatic and other causal factors. *Holocene* 4: 89–100.
- SPROTT J.C., BOLLIGER J., MLADENOFF D.J. (in Vorbereitung): Self-organized criticality in forest-landscape evolution. *Physics Letters A*, accepted.

Dank

Anton Schuler, Heike Lischke, Esther Thürig und Matthias Bürgi sowie zwei anonyme Reviewer haben mit vielen hilfreichen Kommentaren und anregender Kritik sehr wesentlich zu diesem Artikel beigetragen. Ihnen allen danke ich herzlich.

Autorin

Dr. JANINE BOLLIGER, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL, Zürcherstrasse 111, CH-8903 Birmensdorf. E-Mail: janine.bolliger@wsl.ch.