

# Wo wachsen die Bäume in 100 Jahren?

Niklaus E. Zimmermann<sup>1</sup>, Janine Bolliger<sup>1</sup>, Jacqueline Gehrig-Fasel<sup>1</sup>, Antoine Guisan<sup>2</sup>, Felix Kienast<sup>1</sup>, Heike Lischke<sup>1</sup>, Sophie Rickebusch<sup>1</sup> und Thomas Wohlgemuth<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Zürcherstrasse 111, CH-8903 Birmensdorf

<sup>2</sup> Universität Lausanne, CH-1015 Lausanne

niklaus.zimmermann@wsl.ch, janine.bolliger@wsl.ch, jacqueline.gehrig@wsl.ch, antoine.guisan@unil.ch, felix.kienast@wsl.ch, heike.lischke@wsl.ch, sophie.rickebusch@wsl.ch, thomas.wohlgemuth@wsl.ch

**Die Verbreitung der Baumarten in der Schweiz wird sich mit den für die nächsten Jahrzehnte erwarteten Klimaänderungen stark verändern. Generell werden die meisten Arten in höhere Lagen vordringen. Weil laut Prognosen auch mit einer Abnahme der Sommerniederschläge gerechnet werden muss, werden nicht trockenheitstolerante Laubbölder benachteiligt. Die Anpassungen der Bäume werden wohl langsamer ablaufen als der Klimawandel selber. Einerseits können Bäume nicht selber wandern, sie bewegen sich nur via Samenausbreitung über Generationen fort; ein langsamer Prozess. Andererseits verhindert die Landnutzung durch den Menschen teilweise ein rascheres Ausdehnen von Baumarten in neue Gebiete, vor allem an der oberen Waldgrenze. Artenreiche Wälder mit einem hohen Mischungsgrad werden derzeit als geeignetes Mittel angesehen, um die Risiken zu minimieren, die ein starker Klimawandel für die Waldbewirtschaftung mit sich bringt.**

## 1 Einleitende Bemerkungen

Das Klima hat sich in den letzten 100 Jahren verändert. Klimaforscher gehen von weltweit durchschnittlich 0,6°C ( $\pm 0,2^\circ\text{C}$ ) Erwärmung aus in den letzten 100 Jahren (IPCC 2001a). Diese Erwärmung mag im ersten Moment moderat wirken, entspricht allerdings schon in etwa einer Verschiebung der Höhenzonen um 100 m. Wenn man aber regionale Veränderungsdaten genauer betrachtet, dann erscheinen die heute gemessenen Veränderungen in einem etwas anderen Licht. So hat sich das Tessin im selben Zeitraum um 1,0°C und die Alpennordseite um 1,3 bis 1,7°C erwärmt (REBETEZ 2006). Dies ist eine wesentlich stärkere Erwärmung, obschon sie mit denselben durchschnittlichen globalen Trends einhergeht. Wir stellen als erstes fest, dass bei uns die tatsächliche Änderung deutlich vom globalen Durchschnitt abweichen kann, sowohl nach oben wie auch nach unten.

In den letzten Jahren häuften sich starke saisonale Anomalien, d.h. Abweichungen von langjährigen Mittelwerten. Der Juli 2006 war sehr heiss, und der Sommer 2003 war deutlich trockener und etwa 5°C wärmer als im langjährigen Mittel. Die Sommertem-

peratur 2003 entspricht etwa der mittleren Sommertemperatur von Rom. Eine Klimaprognose, z. B. für die nächsten 100 Jahre, muss daher auch noch extreme Anomalien einbeziehen, denn eine Verschiebung der Mittelwerte hat auch eine Verschiebung der Extremwerte zur Folge (BENISTON und REBETEZ 1996; BENISTON *et al.* 1997). Modellrechnungen besagen, dass der heute als 400-jähriger Extremwert angesehene Sommer 2003 in der Periode 2071 bis 2100 durchaus ein Mittelwert der Sommertemperaturen sein könnte (SCHÄR *et al.* 2004). Die Extremwerte würden demzufolge dann noch wesentlich heisser und trockener sein als das, was wir uns heute für das Gebiet der Schweiz vorstellen können. Wir entnehmen als zweites, dass sich in Zukunft die Temperaturen wohl rascher ändern werden, und dass die jährlichen Schwankungen noch zunehmen werden.

Das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) berichtet periodisch über die Bemühungen der Wissenschaft, Klimaprognosen für die Zukunft zu entwickeln (IPCC 2001a), und die Folgen der sich abzeichnenden Veränderungen für die Natur und den Menschen aufzuzeigen (IPCC 2001b). Aus einer Vielzahl von Modellen und

unterschiedlichen Emissions-Szenarien (IPCC 2000) leiten die Experten verschiedene Klima-Szenarien ab, welche die Bandbreite der zu erwartenden klimatischen Änderungen aufzeigen. Die momentan gültigen Annahmen gehen von einem Anstieg der jährlichen globalen Mitteltemperatur um zwischen 1,4°C und 5,8°C aus (IPCC 2001a). Eine Vielzahl von Studien versucht, die sich daraus ableitenden Folgen für die Natur abzuschätzen. In diesem Beitrag sollen neuere Untersuchungen aus der Schweiz zusammengefasst und vorgestellt werden. Wir konzentrieren uns dabei hauptsächlich auf die Reaktion der Bäume.

Jede Baumart weist eine ökologische Nische auf, innerhalb der die Art angegriffen werden kann (ELLENBERG 1986). Diese Nische ist bestimmt durch ökologische Faktoren wie Temperatur oder Bodenfeuchtigkeit und durch Bestandeskonkurrenz. Verändern sich die äusseren Bedingungen über ein gewisses Mass, dann kommt es zu Anpassungen: Arten verschieben sich im Raum, oder sie verschwinden (RIGLING *et al.* 2006; WOHLGEMUTH *et al.* 2006). Bevor es soweit kommt, werden sie sich aber im Wachstumsverhalten (DOBBERTIN und GIUGGIOLA 2006) und in der Phänologie (MENZEL 2006) anpassen. Im folgenden Beitrag diskutieren wir erwartete räumliche Anpassungen von Baumarten in der Schweiz als Folge von Klima- und Landnutzungswandel.

Um Vorhersagen machen zu können, kann man Experimente durchführen oder Modelle entwickeln. Beides sind wichtige Ansätze, um mögliche Reaktionen von Bäumen zu quantifizieren. Wo es um längerfristige Anpassungen von Baumarten über ihren Lebenszyklus hinaus geht, sind Modelle für das Entwickeln von realistischen Prognosen der zu erwartenden Reaktionsmu-

ster unabdingbar. Für Bäume können relativ gute Prognosen gemacht werden, weil über diese Pflanzengruppe vieles bekannt ist und weil gute Datengrundlagen bestehen.

## 2 Fragestellung

Angesichts des zu erwartenden Klimawandels stellt sich die Frage: Wo werden die uns bekannten Bäume in 100 Jahren wachsen, bzw. was wird dann an einem beliebigen Ort in der Schweiz wachsen? Die wichtigsten Teilfragen hierzu können wie folgt zusammengefasst werden:

- Wo liegt das potenzielle Verbreitungsgebiet der Baumarten in der Zukunft?
- Wie schnell werden die Bäume auf einen Klimawandel reagieren?
- Reagieren Bäume verzögert auf den Klimawandel?
- Haben die Arealveränderungen von Baumarten infolge Klimawandel schon begonnen?

Diese Fragen werden in mehreren Fallstudien beantwortet. Abschliessend fassen wir die wichtigsten Aussagen aus diesen Fallstudien zusammen.

## 3 Methodische Ansätze

Es gibt verschiedene methodische Ansätze, um Reaktionsmuster von Bäumen vorauszusagen. Zwei unterschiedliche Ansätze werden dabei häufig benutzt (KORZUKHIN *et al.* 1996). Der erste Ansatz formuliert anhand von Beobachtungen ein statistisches Modell, um die Beziehung zwischen dem ökologischen Standort und der Verbreitung von Organismen, z.B. eben Baumarten, aufzuzeigen und daraus Aussagen für die zukünftige Entwicklung abzuleiten (siehe v.a. Fallstudie 1). Der Ansatz wird als empirisch bezeichnet. Ein zweiter Ansatz beschreibt die dynamischen Reaktionen von Baumarten mit einem mathematischen Modell. Dabei werden das Wachstum, die Regeneration oder die Mortalität in Abhängigkeit von Konkurrenz und Umweltfaktoren modelliert, um Aussagen über mögliche zukünftige Entwicklungen abzuleiten. Der Ansatz wird als prozess-orientiert bezeichnet. Schliess-

lich kann aber auch eine Kombination der beiden Ansätze verwendet werden.

Je nach Frage eignet sich der eine oder andere Ansatz besser. In vier Fallstudien zeigen wir mögliche Reaktionsmuster auf, um eine Abschätzung über die Dimension der zu erwartenden Veränderungen zu erhalten. Wir gehen in den Fallstudien nicht auf Details der wissenschaftlichen Methoden ein, sondern verweisen auf die entsprechenden Fachpublikationen.

## 4 Frühere Resultate

Mehrere Studien zur potentiellen Verbreitung von Arten oder Vegetationstypen wurden bereits durchgeführt, die teils drastische mögliche Veränderungen voraussagen (THULLER 2003; THULLER *et al.* 2004, 2005). So ergab sich für den Alpenraum ein grosses Risiko, dass Arten verschwinden. Für die Schweiz gibt es mehrere Studien mit empirischen, statistischen Modellen, v.a. die Arbeiten von BRZEZIECKI *et al.* (1995) für Waldgesellschaften und von BOLLIGER (2002) und BOLLIGER *et al.* (2000) für Baumarten. In den Prognosen von Brzeziecki wurde nur die Temperatur erhöht, um 1,1 bis 1,4°C für Szenario 1 und 2,2 bis 2,8°C für Szenario 2, je nach Region der Schweiz. Das zweite Szenario sagt eine Ausdehnung der wärmetoleranten Eichen- und Eichen-Buchenformationen im Mittelland voraus, 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. In der Arbeit von BOLLIGER *et al.* (2000) wurden die Anzahl Gradtage erhöht (+100–400 Gradtage). Gradtage sind ein Mass für die Wärmesumme, welche den Pflanzen in einem Jahr für das Wachstum zur Verfügung stehen, gemessen in Anzahl Tagen, an denen die Temperatur einen Schwellenwert überschreitet. In dieser Studie wurde nebst einer Verschiebung der Vegetationszonen in grössere Höhen auch eine Veränderung der Biomasse vorausgesagt.

Bei den dynamischen Waldmodellen sind v.a. die Arbeiten von BUGMANN und FISCHLIN (1996), KIENAST (1991), FISCHLIN und GYALISTRAS (1997), sowie LISCHKE und ZIERL (2002) zu er-

wähnen. Diese Arbeiten zeigen eine ähnliche Vegetationsveränderung, begleitet von starken Verschiebungen der Vegetationszonen. Sie zeigen aber auch auf, dass die vorhergesagten Veränderungen nicht von heute auf morgen, sondern über Jahrzehnte bis Jahrhunderte geschehen.

## 5 Fallstudien

### 5.1 Veränderung im Potentialgebiet wichtiger Baumarten unter Klimawandel

Prädiktive ökologische Modellierung – auch Nischen-Modellierung oder Habitat-Modellierung genannt – ist eine einfache Methode, die relativ robuste Resultate liefert (GUISAN und ZIMMERMANN 2000). Hierzu werden zuerst statistische Modelle zwischen Verbreitungsdaten von Organismen und den dort wirkenden Umweltfaktoren kalibriert (GUISAN und ZIMMERMANN 2000; ELITH *et al.* 2006). Wenn die erklärenden Variablen in der Form von digitalen Karten vorliegen, dann kann die Verbreitung in einem Geographischen Informationssystem (GIS) räumlich simuliert werden. Anhand von GIS-Analysen können Standortskarten mit Informationen aus Klimamodellen so angepasst werden, dass sie den Standort bei zukünftig verändertem Klima räumlich darstellen. Wenn wir davon ausgehen, dass Pflanzen ihre Standortsansprüche auf evolutive Art über Jahrtausende und nicht über Jahrhunderte ändern, dann kann dasselbe Pflanzen-Standort-Modell nun auf die neuen GIS-Karten übertragen werden und man erhält so Aussagen, wie die Baumverteilung in der Zukunft aussehen könnte.

Die hier vorgestellten Resultate basieren auf einer verbesserten Kalibrierung des Klimaeinflusses und neueren Modellrechnungen bezüglich zu erwartender Klimaänderungen. Hierzu wurden Modell-Resultate der University of East Anglia verwendet, welche für Temperatur und Niederschlag Monatsmittelwerte für 2080 vorhersagen. Diese basieren auf dem HadCM3 Modell, einem verbreiteten, globalen Zirkulationsmodell (GCM). Dieses liefert auch Klimakarten für etwa 1990. Die 1990er und die zukünftigen Klimakarten sind

als 10'-Rasterkarten für ganz Europa gerechnet<sup>1</sup>. Für vier verschiedene GCM-Szenarien wurde in jeder GCM-Rasterzelle (10') die Differenz zwischen 2080 und 1990 von monatlichen Temperaturmitteln und Niederschlagssummen berechnet und dann zu hochaufgelösten (100 m) Karten (ZIMMERMANN und KIENAST 1999) des heutigen Klimas addiert. Anschliessend wurden Standortmodelle für Baumarten kalibriert. Hierzu wurden mehrere Klimafaktoren aus den Monatsdaten abgeleitet und in den Modellen verwendet. Anschliessend wurden Klimawandel-Szenarien für die wichtigsten Baumarten berechnet, um den Effekt der prognostizierten Veränderungen auf Bäume abzuschätzen (Abb. 1). Hier sollen nur die beiden Szenarien B2 (+3,3°C ± 0,25°C) und A1 (+6,0°C ± 0,29°C) für die Schweiz vorgestellt werden. Diese Szenarien entstammen dem Special Report on Emission Scenarios (= SRES) welcher von IPCC herausgegeben wurde (IPCC 2000). Die Niederschläge weichen für beide Szenarien im Jahrestotal nicht stark von den heutigen Bedingungen ab, die Sommer- und Herbstmonate werden aber in den Alpen deutlich trockener, die Winter- und Frühlingsmonate deutlich feuchter.

Die Effekte dieser Klimaszenarien auf die potentielle Verbreitung der Bäume sind enorm. Da die durchschnittliche Jahrestemperatur etwa 0,5°C pro 100 Höhenmeter abnimmt, bewirkt eine Zunahme der Jahresmitteltemperatur um 6°C bis zum Jahr 2080 (IPCC 2000, SRES A1) einen theoretischen Waldgrenzanstieg von etwa 1200 m. Dies stellt eine enorme Veränderung dar: Sie bedeutet zum Beispiel, dass der Gornergrat bei Zermatt etwa 400 m unter der Waldgrenze zu liegen käme, oder dass sich der alpine Furkapass (2340 m ü.M.) im Übergangsbereich der obermontanen zur subalpinen Stufe befände. Die simulierten Karten für die Traubeneiche (*Quercus petraea*) zeigen eine massive Verschiebung des Hauptverbreitungsgebietes hin zu den Voralpen (Abb. 1). Im Mittelland wäre es nach Szenario A1 (Abb. 1c) gar zu warm für die Traubeneiche; so warm, dass hier mit

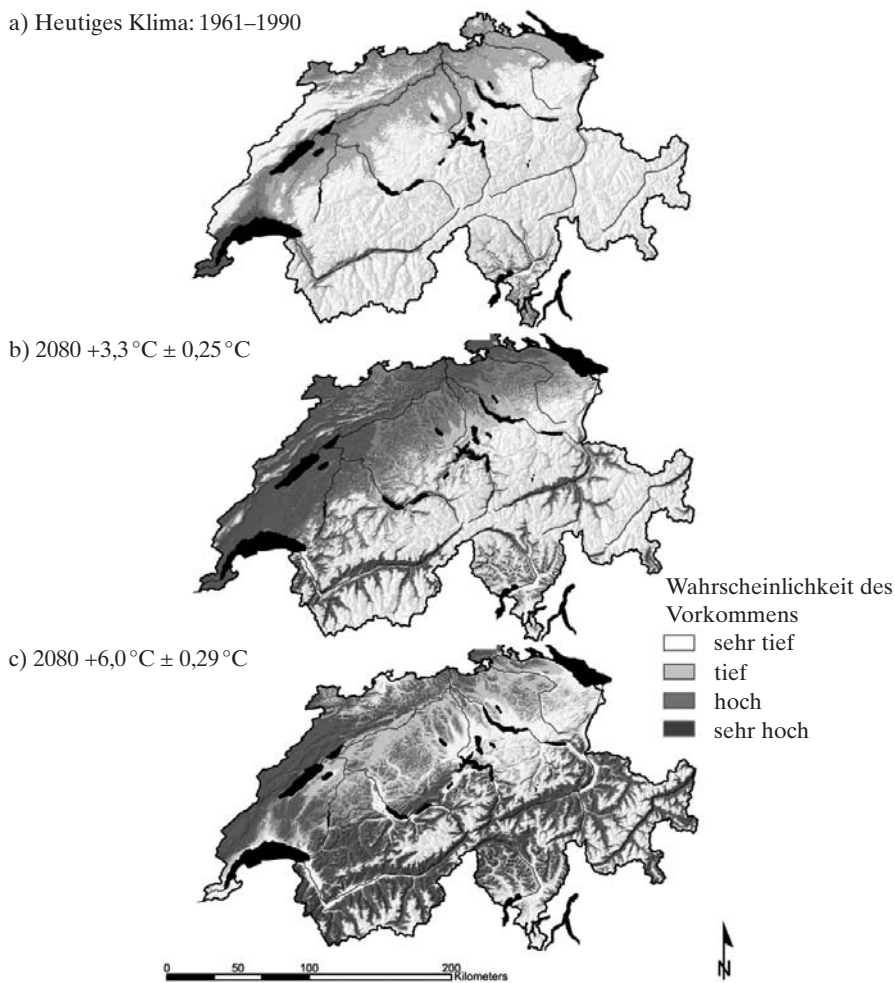


Abb. 1. Simulierte Veränderung der Baumverbreitung anhand eines Beispiels mit Traubeneiche (*Quercus petraea*), wobei die dunkle Färbung eine hohe Wahrscheinlichkeit darstellt, diesen Baum zu finden. (a) Heutige Verbreitung; (b) Verbreitung nach SRES Szenario B2; (c) Verbreitung nach SRES Szenario A1.

Baumartenmustern gerechnet werden muss, die wir heute in der Schweiz gar nicht beobachten. Die Inneralpen werden demnach bis in grosse Höhen zunehmend von Flaum- und Traubeneiche, sowie v.a. auch von der Waldföhre besiedelt. Die Buche zieht sich in den Randalpen ebenfalls in höhere Lagen zurück und verliert im A1 Szenario massiv an Fläche weil die tieferen Lagen und die Inneralpen zu trocken für diese Art sind.

### 5.2 Walddynamik und Klimawandel

Die in Fallstudie 1 aufgezeigten, möglichen Veränderungen sind enorm. Sie bedeuten sowohl eine starke Änderung in der Zusammensetzung der Baumarten als auch ein Vorkommen

dieser Bäume an Lokalitäten, wo die Wachstumsbedingungen ihren Ansprüchen entsprechen. Wie rasch sich Bäume aber an neue Bedingungen anpassen, wird am besten mit komplexeren, dynamischen Modellen untersucht. Das Modell DisCForM – ein dynamisches Waldsukzessions-Modell – ist in der Lage, solche Veränderungen über viele hundert Jahre hin zu simulieren (LISCHKE *et al.* 1998). Das Modell simuliert die Anzahl von Bäumen in verschiedenen Höhenklassen. Die unterschiedlichen Lichtverhältnisse im Bestand, die sich aus den räumlich und zeitlich variierenden Dichten des Bestandes ergeben, werden ebenfalls nachgebildet. Dabei wird die Bestandesdynamik modellhaft abgebildet, inklusive Wachstum, Konkurrenz um Licht, Mortalität, Verjüngung, die alle

<sup>1</sup> <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/hrq.htm>

von sich möglicherweise ändernden Standortseigenschaften (Licht, Temperatur, Trockenheit) abhängen. Ebenso können stochastische Prozesse wie Insektenbefall, Windwurf oder Trockenperioden simuliert werden. Das Modell wurde aus sogenannten Gap-Modellen, FORECE (KIENAST und KUHN 1989) und ForClim (BUGMANN 1996), entwickelt.

In der zweiten Fallstudie wurden vier Klimaregionen ausgewählt, welche in etwa die folgenden regionalen Charakteristika aufweisen: (1) mässig warm-feucht wie im Schweizerischen Mittel-

land; (2) kühl-feucht wie in höheren Nordalpenlagen, etwa Grindelwald; (3) mässig warm-trocken wie in tieferen Lagen im Wallis; und (4) kühl-trocken, wie in den höheren Lagen in Inneralpinen Trockentälern. In der Simulation wurde zuerst ausgehend von vegetationsfreien Flächen die Bestandesdynamik während 700 Jahren initialisiert. Die Bäume konkurrieren dabei um Licht, Wasser und Nährstoffe. Sie verändern v.a. das Lichtregime, was zu entsprechenden Anpassungen in der Baumartenzusammensetzung führt. Nach 700 Jahren wurde über einen

Zeitraum von 100 Jahren die mittlere Jahrestemperatur um total 2,5°C angehoben. Diese deutliche Temperaturzunahme ist immer noch leicht geringer als das niedrigste, simulierte SRES Szenario für die Schweiz (etwa B2 mit +3,3°C). Anschliessend wurde das Klima wieder stabilisiert, und das Modell rechnete weitere 700 Jahre, um die Entwicklung eines neuen dynamischen Gleichgewichts zu demonstrieren.

Die Resultate unterscheiden sich deutlich zwischen den vier Regionen (Abb. 2). Während Region 3 in den 100 Jahren mit Klimaänderung einen dra-

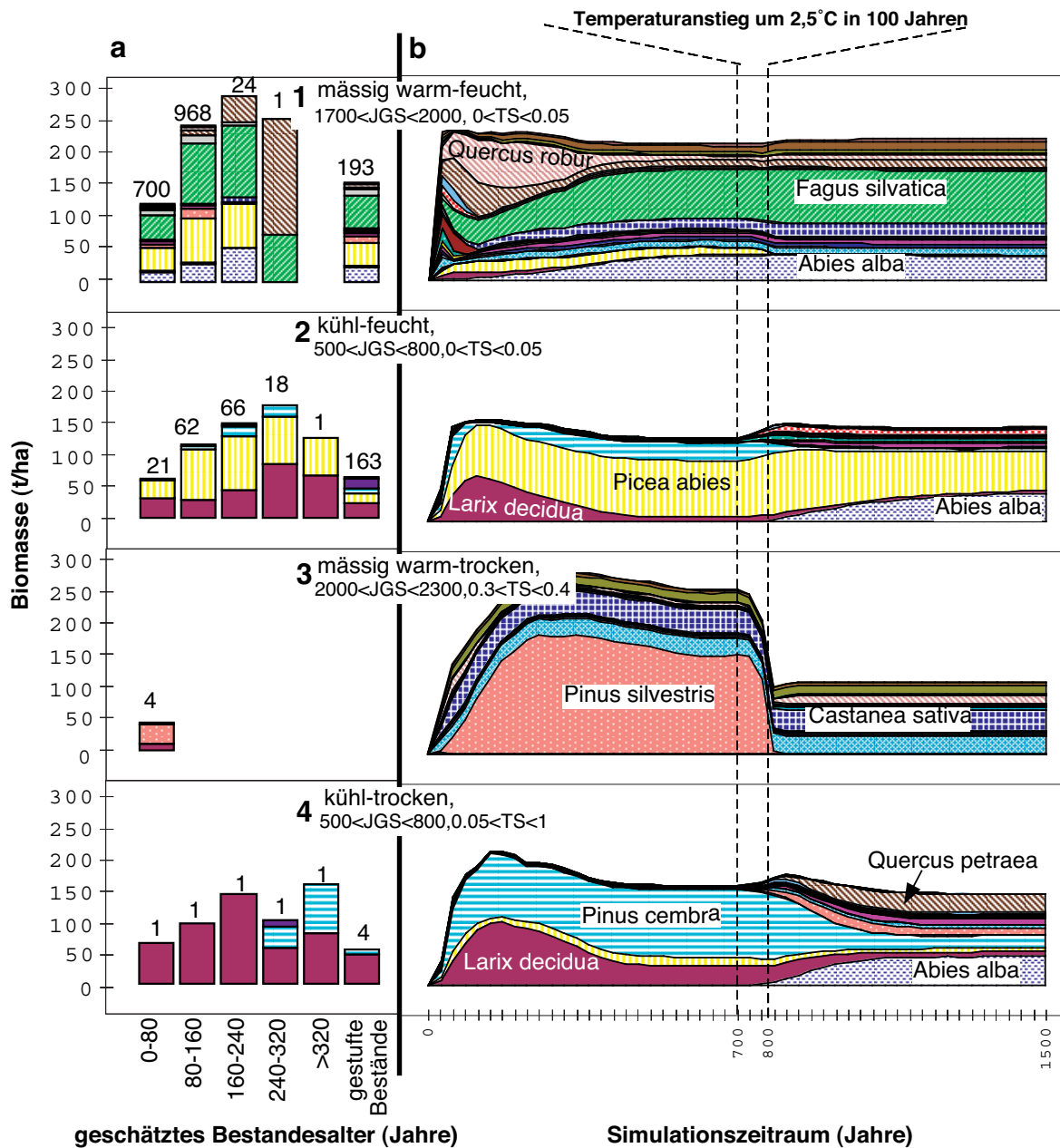


Abb. 2. a1–a4) Baumartenzusammensetzungen von Probeständen des ersten Landesforstinventars (EAFV 1988) in vier von insgesamt 37 bioklimatischen Klassen; Zahlen auf den Säulen: Anzahl Stichprobenflächen; JGS: Jahresgradsummen; TS: Trockenheitsstress. b1–b4) Simulierte Artenzusammensetzung und Biomasse nach moderater Klimaänderung in den vier bioklimatischen Klassen. Die Waldentwicklungen nach der Erwärmung stabilisieren sich je nach Klasse erst nach mehreren 100 Jahren.

matischen Wandel in der Zusammensetzung und in der Bestandes-Biomasse aufweist, bleibt in Region 1 die Zusammensetzung unverändert. Ein weiteres interessantes Resultat ist, dass sich in den kühlen Lagen die Veränderung erst kurz vor Ablauf der 100 Jahre mit Klimaänderung auszuwirken beginnt. Dann dauert es aber mehrere hundert Jahre, bis sich ein neues Gleichgewicht einpendelt. Im Gegensatz dazu stellt sich in den wärmeren Lagen das neue Gleichgewicht wesentlich rascher ein.

**5.3 Gibt es bereits Anzeichen von klimabedingten Anpassungen?**

In den Arbeiten von Walther (WALTHER *et al.* 2002; WALTHER 2006), Menzel (MENZEL 2000; MENZEL und FABIAN 1999; MENZEL 2006) oder Dobbertin (DOBBERTIN *et al.* 2005) wird aufgezeigt, dass die Vegetation schon begonnen hat auf rezente Klimaänderungen zu reagieren. Zuerst einmal ändern sich die Phänologie und das Wachstum. Erst bei stärkerem Klimawechsel verändern Pflanzen ihre räumliche Verbreitung. Die alpine Waldgrenze ist eine der besten Lokalitäten, um solche räumlichen Veränderungen zu verfolgen. GEHRIG-FASEL *et al.* (Mskr. eingereicht) haben mittels GIS Analysen herausgefunden, dass die

obere Waldgrenze in den letzten 12 Jahren in Bewegung geraten ist. Anhand von Arealstatistikdaten der Jahre 1979 bis 85 und 1992 bis 97 konnte gezeigt werden, dass die lokal grössten Waldgrenze-Anstiege im Schnitt 39,7 m betragen (Abb. 3a). Die Verteilung ist aber sehr schief, und die meisten Flächen weisen nur sehr geringe maximale Waldgrenzänderungen auf. Mit zunehmender Meereshöhe steigt der Anteil an kürzlich entstandener Waldfläche an (Abb. 3b). Im Höhenband von 2350 bis 2450 m sind über 80 Prozent der Waldflächen erst kürzlich zu Wald geworden.

Etwa 10 Prozent der lokal angestiegenen Waldflächen lagen 1997 höher als die regional höchsten Waldflächen aus der 1985er Erhebung (Abb. 4). Alle andern Flächen liegen zwar lokal höher als 12 Jahre zuvor, sie liegen aber immer noch unterhalb der 1985 regional höchsten Waldflächen. Was verbirgt sich hinter diesem Muster? Die meisten Waldgrenzänderungen stellen primär eine Reaktion auf die sich ebenfalls ändernde Landnutzung dar. Alpweiden werden aufgelassen und der Wald nimmt sein ehemaliges Wuchsgebiet wieder ein. Wenn der Wald aber über die regional höchsten früheren Vorkommen im Umkreis von 10 km ansteigt, dann muss es sich um Anstiege über die frühere klimatische Waldgrenze hinaus handeln. Dies deshalb,

weil die Waldgrenze nicht auf der ganzen Fläche durch menschliche Aktivitäten abgesenkt worden ist (EGGENBERG 2002). Wenn eine Fläche angestiegen ist, aber immer noch unterhalb der regionalen klimatischen Waldgrenze liegt, dann ist Landnutzungsänderung der wahrscheinlichste Grund. Klimaänderung kann aber als Ursache nicht einfach ausgeschlossen werden, denn aufgrund von ungünstigeren Bedingungen (z.B. lange Schneebedeckung) können lokal immer niedrigere Waldgrenzen auftreten.

In Lagen zwischen 1200 und 2000 m ü.M. ist die Waldzunahme enorm (GEHRIG-FASEL *et al.* Mskr. eingereicht; GELLRICH und ZIMMERMANN 2006; RUTHERFORD *et al.* Mskr. eingereicht). Hier handelt es sich aber eindeutig um Reaktionen auf die immer stärkere Aufgabe der landwirtschaftlichen Nutzung. In einer Untersuchung zu räumlichen Mustern der Waldausdehnung als Effekt der Aufgabe landwirtschaftlicher Nutzung in der Schweiz (ohne Mittelland und südliches Tessin) haben GELLRICH und ZIMMERMANN (2006) festgestellt, dass sich über 12 Jahre 2,3 Prozent der untersuchten Gras- und Landwirtschaftsflächen zu Wald entwickelt hatten. Dies entspricht einer täglichen Zunahme der Waldfläche von etwa 16 ha – ein gewaltiger, landschaftsverändernder Prozess, der sich vorwiegend in der

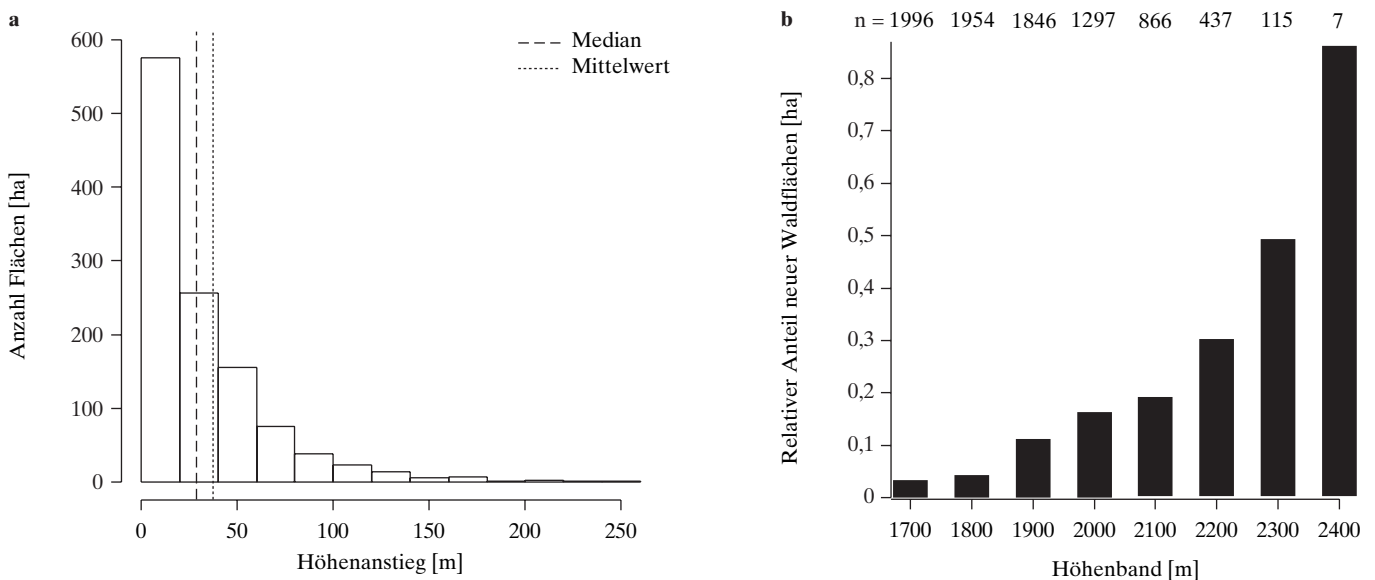


Abb. 3. Waldgrenzanstieg in der Schweiz. a) Waldflächenanstiege in ha in der Periode zwischen 1979/85 und 1992/97, in allen Gebieten zwischen 1650 und 2450 m ü.M., ohne eingewachsene Flächen: Mittelwert 28,4 m, Median 37,9 m. b) Relativer Anteil der neu angestiegenen Flächen an der gesamten neu bewaldeten Waldfläche, pro 100 m-Höhenband.

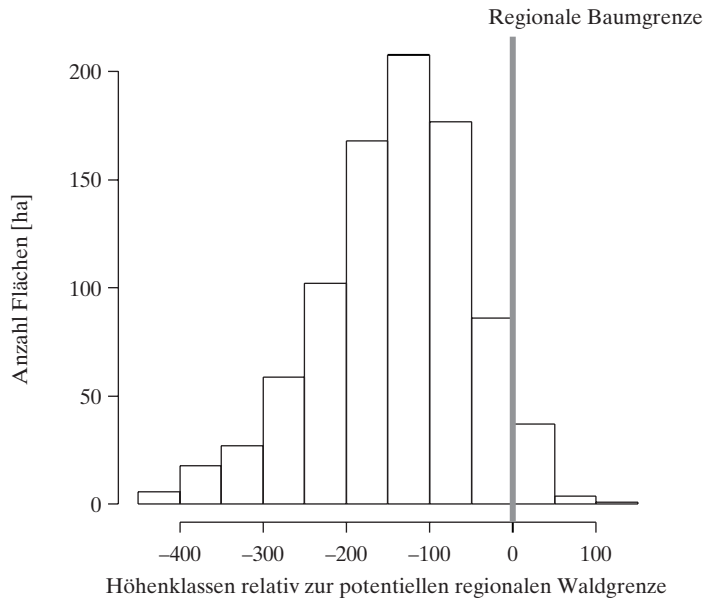


Abb. 4. Waldflächenanstieg zwischen 1650 und 2450 m ü.M. relativ zur regional klimatischen Waldgrenze. Säulen im positiven Bereich bezeichnen Waldflächen, welche 1997 oberhalb der regional höchsten Waldflächen von 1985 angetroffen wurden.

subalpinen und obermontanen Stufe abspielt. An der Waldgrenze ist der Prozess stark verlangsamt und vermischt sich mit klimabedingten Ursachen der Waldausdehnung. Die in Abbildung 3 zusammengefassten Werte für den Waldgrenzanstieg stellen nur die lokal grössten Veränderungen dar. In der beobachteten 12-Jahres-Periode sind über die ganze Waldgrenze gesehen die Anstiegsraten nur sehr gering und machen im Durchschnitt wenige Höhenmeter pro Jahr aus.

#### 5.4 Simulation des Waldgrenzanstieg unter Globalem Wandel

Landnutzungsänderungen sind eine wichtige, treibende Kraft für Veränderungen der Landschaft. Neben dem Klimawandel stellen sie einen der wichtigsten, momentanen Prozesse dar, und werden mit letzterem unter dem Begriff «Globaler Wandel» (engl.: global change) zusammengefasst. Die Landnutzungsänderung verläuft mehr oder weniger zeitlich parallel zur Klimaänderung. Es ist daher oft schwierig, die Auswirkungen der beiden Einflussgrößen auseinander zu halten. In Gebirgsregionen, auf steilen Flächen, fern von Siedlungen oder nahe von Waldändern findet eine starke Extensivie-

rung der landwirtschaftlichen Nutzung statt. Demgegenüber beobachten wir im Mittelland und generell in den tieferen, wenig geneigten Lagen eine Intensivierung, hin zu landwirtschaftlicher und urbaner Nutzung (RUTHERFORD *et al.* Mskr. eingereicht; GELLRICH und ZIMMERMANN 2006).

Aufgrund der ersten Fallstudie erwarten wir einen ziemlich drastischen Wechsel in der Baumartenzusammensetzung auf den meisten Waldflächen der Schweiz. Zusätzlich erwarten wir aber auch eine starke Ausdehnung der Waldfläche in höhere Lagen. Die Frage, wie rasch Bäume unter den entsprechenden Bedingungen überhaupt wandern können (Klima, Landnutzung, Landmuster) kann nur mittels dynamischer Modelle beantwortet werden (BUGMANN 2001). Das räumlich-dynamische Landschaftsmodell TreeMig (LISCHKE *et al.* 2006) ist geeignet, solche Fragen zu beantworten. Es wurde aus dem Modell DisCForM (LISCHKE *et al.* 1998, siehe Fallstudie 2) entwickelt und stellt ein räumliches, rasterbasiertes Waldsukzessionsmodell dar, bei dem die einzelnen Rasterzellen durch die Ausbreitung der Samen miteinander verbunden sind. Dieses räumliche Modell wurde zusätzlich durch ein Modul zur Simulation von Landnutzungsänderungen erweitert (RICKEBUSCH *et al.* Mskr. eingereicht), basierend auf

den Arbeiten und statistischen Modellen von GELLRICH *et al.* (2006) und RUTHERFORD *et al.* (Mskr. eingereicht).

Erste Szenario-Resultate mit diesem Modell zeigen, dass bei Klimaerwärmung von  $+3,5^{\circ}\text{C}$  die Bäume rasch in höhere Lagen vordringen würden (Abb. 5a); schon nach 100 bis 200 Jahren ist das Höhersteigen aber abgeschlossen, die Kurve verflacht. Wenn hingegen der Temperaturanstieg mit einem Modell der Landnutzungsänderungen gekoppelt wird, dann verläuft der Anstieg sehr viel langsamer (Abb. 5b). Dies, weil nicht alleine das Klima die Baumausbreitung steuert, sondern ebenso der Mensch mit seiner Nutzung. Aber auch der Anstieg ohne menschliche Landnutzung ist nicht beliebig schnell, da sich Bäume vor allem mittels Samenausbreitung über Generationen im Raum fortbewegen können, was ebenfalls zu verzögerter Anpassung führen kann.

## 6 Schlussbemerkungen

Wo wachsen nun die Bäume in 100 Jahren? Diese eher rhetorische Frage können wir auch mit wissenschaftlichen Analysen und Modellen nicht mit Sicherheit beantworten. Dennoch kann anhand der vorgestellten Fallstudien eine Annäherung an das komplexe Problem versucht werden. Wenn wir davon ausgehen, dass die IPCC Szenarien im 21. Jahrhundert höchstwahrscheinlich Tatsache werden, und wenn wir weiter davon ausgehen, dass die Modelle realistische Zusammenhänge aufzeigen, dann können wir die eingangs gestellten Detailfragen wie folgt beantworten:

#### Wo liegt das potenzielle Verbreitungsgebiet der Baumarten in der Zukunft?

Das potenzielle Verbreitungsgebiet liegt gegenüber den heutigen Vorkommen deutlich verschoben. Bereits bei einem mittleren Erwärmungsszenario (B2) kommt es zu starken Arealverschiebungen. Ein extremes Szenario (A1) führt bei vielen Baumarten dazu, dass sich die heutigen Areale und die zukünftigen Verbreitungsgebiete kaum noch überlappen (siehe etwa Abb. 1). Da diese klimatischen Veränderungen bereits in naher Zukunft zu erwarten sind, dürften einzelne Baumarten

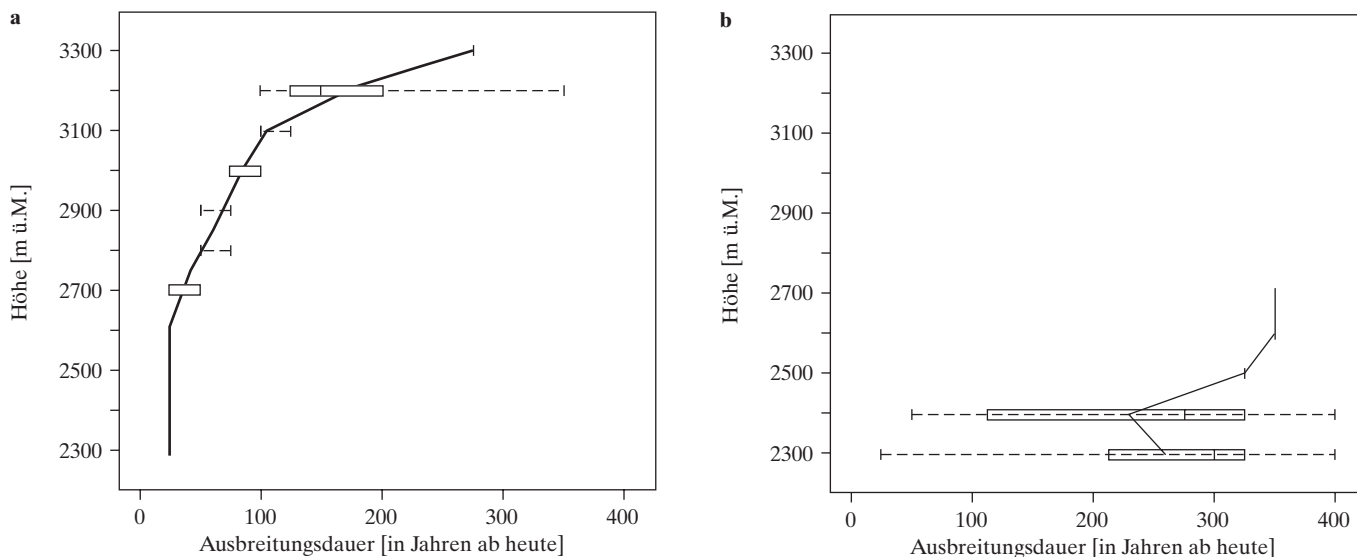


Abb.5. Simulierter Waldgrenzanstieg in der Schweiz. (a) Anstieg unter Annahme von +3.5°C ohne Fremdeinwirkung. (b) Anstieg unter zusätzlicher Landnutzungsänderung.

schon bald in ihrem Wachstum limitiert werden. Der frühe und lokal vollständige Blattverlust einzelner Baumarten im Sommer 2003 ist ein Vorzeichen dafür. Sollten sich solche Effekte wiederholen, dann stellt dies für den Waldbau eine grosse Herausforderung dar. Bäume, welche an ihrem Wuchsort in solchen Trockenperioden die Blätter verlieren, werden den zukünftigen Standortbedingungen wohl nicht gewachsen sein.

**Wie schnell werden die Bäume auf den Klimawandel reagieren?**

Bäume sind in der Lage, sich im Raum mittels Samenverbreitung fortzubewegen. Die Geschwindigkeit dieser Bewegung ist aber limitiert und wird teils durch die menschliche Landnutzung zusätzlich eingeschränkt. Dynamische Modelle zeigen, dass diese Bewegungen mit der Geschwindigkeit der vorhergesagten Klimaänderungen nicht Schritt halten können. Dies ist vielleicht die grösste Herausforderung für den Waldbau der Zukunft. Die Bäume, die morgen (2080) in einem bestimmten Wald standortgerecht sein werden, müssen zuerst dorthin gelangen, z.B. über Ansaat oder Pflanzung. Ob sie die heikle Phase der Keimung und des Anwuchses an neuen Standorten heute schon überstehen würden, hängt von der generellen Vegetationsentwicklung und von Extremereignissen ab (vgl. WOHLGEMUTH *et al.* 2006).

**Reagieren Bäume verzögert auf den Klimawandel?**

Sowohl die Modell-Resultate, als auch die beobachteten Veränderungen an der oberen Waldgrenze zeigen, dass der Wald mit einer gewissen Verzögerung neue Areale erobert. Die Waldgrenze ist seit etwa 1900 keinesfalls bereits um etwa 200 bis 300 m angestiegen, wie es dem Temperaturanstieg in den Alpen entsprechen würde. Die räumliche Anpassung an rasche Klimaänderungen erfolgt also mit Verzögerung. Für die meisten Baumarten stellen die Klimaänderungen der letzten 100 Jahre noch keine allzu grossen Probleme dar; sie reagieren mit veränderter Phänologie und mit geändertem – oft erhöhtem – Wachstum (SPIECKER *et al.* 1996). Extreme Wärme und Trockenheit, wie sie im Sommer 2003 beobachtet wurden, haben nun aber das Wachstum in den tieferen Lagen temporär stark reduziert (JOLLY *et al.* 2005). Derartige Reaktionen sind allerdings unmittelbar und treten ohne Verzögerung auf. Sie werden wohl zu einem rascheren Vordringen von wärme- und trockentoleranten Arten führen. Neue und besser angepasste Arten werden sich aber ohne waldbauliche Massnahmen nicht von selbst rasch genug einstellen.

**Haben die Arealveränderungen von Baumarten infolge Klimawandel schon begonnen?**

Die Veränderungen haben eindeutig schon begonnen. Dies kann sehr gut an der oberen Waldgrenze festgestellt werden. Da die Veränderungen aber nur sehr langsam vor sich gehen, können sie nur mit geeigneten Monitoringmethoden beobachtet werden.

**7 Fazit**

Zusammenfassend stellen wir fest, dass viele Szenarien eine sehr starke Veränderung erwarten lassen; dies stellt den Waldbau vor grosse Herausforderungen. Die Unsicherheit liegt einerseits in der zukünftigen Klimaentwicklung selber, und andererseits in der Frage, wie die einheimischen Baumarten auf diese Veränderungen reagieren werden. Patentrezepte im Umgang mit diesen Problemen gibt es zur Zeit wohl nicht. Das Erhalten einer grösseren Baumartenvielfalt im Bestand bzw. das Hinwirken auf einen hohen Mischungsgrad ist aber sicher eine angemessene Antwort auf die sich ändernden Bedingungen. Es ist empfehlenswert regionales Saatgut zu sammeln und an geeigneten Orten auszusäen.

Schliesslich können gezielte Pflanzmassnahmen die Anpassungen beschleunigen. Diese müssen nicht zwingend grossflächig geschehen. Das versuchsweise Einpflanzen von trocken- und wärmetoleranteren Arten dürfte wohl sinnvoll sein, weil der Aufwand gering ist und das Wuchsverhalten im Bestand beobachtet werden kann. Ist die Massnahme erfolgreich, so entstehen kleine Populationen, die sich bei günstigen Bedingungen weiter ausdehnen können. Die offenen Fragen bezüglich Baumartenmischung, Waldentwicklung und Arealverschiebung stellen aber nicht nur für die Praxis sondern auch für die Forschung grosse Herausforderungen dar. Denn die Veränderungen scheinen so schnell fortzuschreiten, dass nur bedingt auf das bestehende Wissen zurückgegriffen werden kann. Da es nicht möglich ist, ganze Ökosysteme experimentell zu untersuchen, und weil dazu die Zeit auch nicht reicht, ist eine gute Zusammenarbeit zwischen Praxis und Forschung unabdingbar, um diese Herausforderung zu meistern.

## 7 Literatur

- BENISTON, M.; DIAZ, H.F.; BRADLEY, R.S., 1997: Climatic change at high elevation sites: an overview. *Clim. Chang.* 26: 233–251.
- BENISTON, M.; REBETETZ, M., 1996: Regional behavior of minimum temperatures in Switzerland for the period 1979–1993. *Theor. Appl. Climatol.* 53: 231–243.
- BOLLIGER, J., 2002: Schweizer Wälder und Klimaveränderungen: Vergleich von Simulationen quantitativer Vegetationsmodelle. *Schweiz. Z. Forstwes.* 153, 5: 167–175.
- BOLLIGER, J.; KIENAST, F.; ZIMMERMANN, N.E., 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: Modelling potential impacts of climate change on the spatial distribution of zonal forest communities in Switzerland. *J. Veg. Sci.* 6, 2: 257–268.
- BUGMANN, H.K.M., 1996: A simplified forest model to study species composition along climate gradients. *Ecology* 77: 2055–2074.
- BUGMANN, H., 2001: A review of forest gap models. *Clim. Chang.* 51, 3–4: 259–305.
- BUGMANN, H.; FISCHLIN, A., 1996: Simulating forest dynamics in a complex topography using gridded climatic data. *Clim. Chang.* 34, 2: 201–211.
- DOBBERTIN, M.; HILKER, N.; REBETEZ, M.; ZIMMERMANN, N.E.; WOHLGEMUTH, T.; RIGLING, A., 2005: The upward shift in altitude of pine mistletoe (*Viscum album* ssp. *austriacum*) in Switzerland – the result of climate warming? *Int. J. Biometeorol.* 50: 40–47.
- DOBBERTIN, M.; GIUGGIOLA, A., 2006: Baumwachstum und erhöhte Temperaturen. *Forum für Wissen* 2006: 35–45.
- EAFV 1988: Schweiz. Landesforstinventar. Ergebnisse der Erstaufnahme 1982–1986. *Eidg. Anst. Forstl. Versuchswes., Ber.* 305. 375 S.
- EGGENBERG, S., 2002: Die Waldgrenzvegetation in unterschiedlichen Klimaregionen der Alpen. *Dissertationes Botanicae* 360. Berlin, Cramer. 157 S.
- ELITH, J.; GRAHAM, C.H.; ANDERSON, R.P.; DUDIK, M.; FERRIER, S.; GUIGAN, A.; HIJMANS, R.J.; HUETTMANN, F.; LEATHWICK, J.; LEHMANN, A.; LI, J.; LOHMANN, L.G.; LOISELLE, B.A.; MANION, G.; MORITZ, C.; NAKAMURA, M.; NAKAZAWA, Y.; OVERTON, J.M.; PETERSON, A.T.; PHILLIPS, S.J.; RICHARDSON, K.; SCACHETTI-PEREIRA, R.; SCHAPIRE, R.; SOBERÓN, J.; WILLIAMS, S.; WISZ, M.S.; ZIMMERMANN, N.E., 2006: Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography* 29: 129–151.
- ELLENBERG, H., 1986: Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen in ökologischer Sicht. Stuttgart, Eugen Ulmer. 989 S.
- FISCHLIN, A.; GYALISTRAS, D., 1997: Assessing impacts of climatic change on forests in the Alps. *Glob. Ecol. Biogeogr. Lett.* 6: 19–37.
- GELLRICH, M.; ZIMMERMANN, N.E., 2006: Land abandonment in the Swiss mountains: A spatial statistical analysis at the regional scale. *Landsc. Urban Plan.* Im Druck.
- GELLRICH, M.; BAUR, P.; KOCH, B.; ZIMMERMANN, N.E., 2006: Agricultural land abandonment and natural regeneration of forest in the Swiss mountains: A spatially explicit economic analysis. *Agric. Ecosyst. Environ.* Im Druck.
- GEHRIG-FASEL, J.; GUIGAN, A.; ZIMMERMANN, N.E.: Treeline shifts in the Swiss Alps: Climate Change or Land Abandonment? *J. Veg. Sci. Mskr.* eingereicht.
- GUIGAN, A.; ZIMMERMANN, N.E., 2000: Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecol. Model.* 135, 2–3: 147–186.
- IPCC, 2000: Special Report on Emissions Scenarios. Cambridge, Cambridge University Press.
- IPCC, 2001a: Climate Change 2001: The Scientific Basis. In: HOUGHTON, J.T.; DING, Y.; GRIGGS, D.J.; NOGUER, M.; VAN DER LINDEN, P.J.; XIAOSU, D. (eds) Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, Cambridge University. 881 S.
- IPCC, 2001b: Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. In: MCCARTHY, J.J.; CANZIANI, O.F.; LEARY, N.A.; DOKKEN, D.J.; WHITE, K.S. (eds) Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, Cambridge University. 1032 S.
- JOLLY, W.M.; DOBBERTIN, M.; ZIMMERMANN, N.E.; REICHSTEIN, M., 2005: Divergent vegetation growth responses to the 2003 heat wave in the Swiss Alps. *Geophys. Res. Lett.* 32: L18409.
- KIENAST, F.; KUHN, N., 1989: Simulating forest succession along ecological gradients in Southern Central-Europe. *Vegetatio* 79, 1–2: 7–20.
- KIENAST, F., 1991: Simulated effects of increasing atmospheric CO<sub>2</sub> and changing climate on the successional characteristics of Alpine forest ecosystems. *Landsc. Ecol.* 5: 225–238.
- KORZUKHIN, M.D.; TER-MIKAEELIAN, M.T.; WAGNER, R.G., 1996: Process versus empirical models: which approach for forest ecosystem management. *Can. J. For. Res.* 26: 879–887.
- LISCHKE, H.; LÖFFLER, T.J.; FISCHLIN, A., 1998: Aggregation of individual trees and patches in forest succession models – Capturing variability with height structured random dispersions. *Theor. Popul. Biol.* 54: 213–226.
- LISCHKE, H.; ZIERL, B., 2002: Feedback between structured vegetation and soil water in a changing climate: a simulation study. In: BENISTON, M. (ed) *Climate Change: Implications for Hydrological Cycle and for Water Management*. Dordrecht, Boston, Kluwer Academic. 349–377.
- LISCHKE, H.; ZIMMERMANN, N.E.; BOLLIGER, J.; RICKEBUSCH, S.; LÖFFLER, T.J., 2006: TreeMig: A forest-landscape model for simulating spatio-temporal patterns from stand to landscape scales. *Ecol. Model.* Im Druck.



- MENZEL, A., 2000: Trends in phenological phases in Europe between 1951 and 1996. *Int. J. Biometeorol.* 44, 2: 76–81.
- MENZEL, A., 2006: Zeitliche Verschiebungen von Austrieb, Blüte, Fruchtreife und Blattverfärbung im Zuge der rezenten Klimaerwärmung. *Forum für Wissen* 2006: 47–53.
- MENZEL, A.; FABIAN, P., 1999: Growing season extended in Europe. *Nature* 397, 6721: 659–659.
- REBETEZ, M., 2006: Die Schweiz im Treibhaus. Bern, Haupt. 149 S.
- RICKEBUSCH, S.; GELLRICH, M.; LISCHKE, H.; GUIBAN, A.; ZIMMERMANN, N.E.: Combining probabilistic land-use change and forest dynamics modelling to simulate global change responses at the Alpine tree-line. *Ecol. Model. Manusk. eingereicht.*
- RIGLING, A.; DOBBERTIN, M.; BÜRGI, M.; FELDMAYER-CHRISTE, E.; GIMMI, U.; GINZLER, C.; GRAF, U.; MAYER, P.; ZWEIFEL, R.; WOHLGEMUTH, T., 2006: Baumartenwechsel in den Walliser Waldföhrenwäldern. *Forum für Wissen* 2006: 23–33.
- RUTHERFORD, G.N.; ZIMMERMANN, N.E.; BEBI, P.; EDWARDS, P.J.: Assessing land-use statistics to model land cover change in a mountainous landscape. *Ecol. Model. Mskr. eingereicht.*
- SCHÄR, C.; VIDALE, P.L.; LÜTHI, D.; FREI, C.; HÄBERLI, C.; LINIGER, M.A.; APPENZELER, C., 2004: The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature* 427, 6972: 332–336.
- SPIECKER, H.; MIELIKKÄINEN, K.; KÖHL, M.; SKOVGAARD, J.P., 1996. Growth trends in European forests. Berlin, Springer.
- THULLER, W., 2003: BIOMOD – optimizing predictions of species distributions and projecting potential future shifts under global change. *Glob. Chang. Biol.* 9, 10: 1353–1362.
- THULLER, W.; LAVOREL, S.; ARAUJO, M.B.; SYKES, M.T.; PRENTICE, I.C., 2005: Climate change threats to plant diversity in Europe. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 102, 23: 8245–8250.
- THULLER, W.; ARAUJO, M.B.; PEARSON, R.G.; WHITTAKER, R.J.; BROTONS, L.; LAVOREL, S., 2004: Biodiversity conservation – Uncertainty in predictions of extinction risk. *Nature* 430, 6995.
- WALTHER, G.R., 2006: Palmen im Wald? Exotische Arten nehmen in Schweizer Wäldern bei wärmeren Temperaturen zu. *Forum für Wissen* 2006: 55–61.
- WALTHER, G.R.; POST, E.; CONVEY, P.; MENZEL, A.; PARMESAN, C.; BEEBEE, T.J.C.; FROMENTIN, J.M.; HOEGH-GULDBERG, O.; BAIRLEIN, F., 2002: Ecological responses to recent climate change. *Nature* 416, 6879: 389–395.
- WOHLGEMUTH, T.; BUGMANN, H.; LISCHKE, H.; TINNER, W., 2006: Wie rasch ändert sich die Waldvegetation als Folge von raschen Klimaveränderungen? *Forum für Wissen* 2006: 7–16.
- ZIMMERMANN, N.E.; KIENAST, F., 1999: Predictive mapping of alpine grasslands in Switzerland: species *versus* community approach. *J. Veg. Sci.* 10, 4: 469–482.

## Abstract

### Where do the trees grow in 100 years?

The expected climatic change during the coming decades will result in a marked change of the distribution patterns of the tree species in Switzerland. In general most of the species will advance to higher elevations. Due to predicted decreases of summer precipitations, deciduous tree species with moderate to high water demands will eventually be handicapped. Trees will probably adapt more slowly than the rate of climate changes and may thus show lagged responses. On the one hand, trees move only by seed dispersal during generations, a slow process. On the other hand, continuous anthropogenic land use slows down the potential spread of trees into new habitats, at least at the alpine treeline. In order to minimise the risks of a strong climate change for forestry, we propose to manage current forests towards mixed and species-rich stands.

**Keywords:** climate change, vegetation distribution, vegetation models, species shift, tree line shift, land use change, lagged response, tree species migration