

# Forschung zu Wald und Klimawandel in Mitteleuropa: eine Werkschau

Thomas Wohlgemuth	Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (CH)*
Peter Brang	Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (CH)
Harald Bugmann	Waldökologie, Institut für Terrestrische Ökosysteme, ETH Zürich (CH)
Andreas Rigling	Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (CH)
Niklaus E. Zimmermann	Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (CH)

## Research on forests and climate change in Central Europe: state of the art

How are trees in Central European forests affected by climate change, yesterday, today and tomorrow? To answer this question, 250 researchers met for the international conference "ClimTree 2013" that took place in Zurich in September 2013. The answers are manifold and confirm that knowledge on this subject is not fully consolidated yet. Nevertheless, there is agreement on the two most important factors causing marked changes: aggravated water shortage during the growing season leading to growth and regeneration changes and inducing mortality, and rising temperatures that accelerate both biotic and abiotic processes, in particular pest outbreaks and forest fires. The question which tree species will dominate under future climatic conditions is lively debated due to novel results from experiments and dendroecological studies that have only partially been considered in forest succession models to date. Thus, the discussion on a next generation of such models has started. The present conference report summarizes the state of the art as well as new research questions in this field.

**Keywords:** dendroecology, drought, experimental studies, forest succession models, pests, tree physiology  
**doi:** 10.3188/szf.2014.0027

\* Zürcherstrasse 111, CH-8903 Birmensdorf, E-Mail thomas.wohlgemuth@wsl.ch

Zum Forschungsthema «Wald und Klimawandel» wurde in den letzten zwei Jahrzehnten viel Wissen erarbeitet. Während neue Zusammenhänge betreffend die Reaktion von Bäumen auf Umwelteinflüsse gefunden werden, offenbart sich immer mehr die Komplexität der Materie. Auf der einen Seite mehren sich weltweit Beispiele von durch Trockenheit oder Schädlinge induzierter Waldmortalität (Allen et al 2010), auf der anderen Seite belegen verschiedene Studien eine erstaunliche Anpassungsfähigkeit oder Plastizität vieler Baumarten gegenüber den aktuellen Witterungsanomalien, aber auch gegenüber experimentell veränderten Klimata (z.B. Nicotra et al 2010). Im Hinblick auf die langfristige Erhaltung der Waldleistungen gilt es, aus dem heutigen Wissen Anpassungsstrategien zu erarbeiten, welche die ökologischen und ökonomischen Unsicherheiten und Risiken der Waldbewirtschaftung so gering wie möglich halten. Dieses Ziel haben sich das Bundesamt für Umwelt (BAFU) und die Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) im Rahmen des laufenden Forschungsprogramms «Wald und Klimawandel» auf nationaler Ebene gesteckt. Einen Beitrag hierzu leistete zudem

die internationale Konferenz «ClimTree 2013», die vom 1. bis 5. September 2013 an der ETH Zürich stattfand und von der WSL organisiert wurde. Ziel dieser Konferenz war es, die grosse Palette von Forschungsresultaten zur Reaktion von Bäumen auf den Klimawandel in den Wäldern Mitteleuropas aufzuzeigen und den gegenseitigen Austausch zu fördern (Abbildung 1). Rund 250 Forschende besuchten die 8 Plenar- und 112 Fachvorträge, die im Rahmen von 14 Sessionen stattfanden.<sup>1</sup> Der vorliegende Bericht fasst wichtige und aktuelle Forschungsresultate zusammen und folgt dabei den drei Fragen: Was ist wissenschaftlich erwiesen? Was ist nach wie vor unklar? An welchen Fragen wird derzeit geforscht?

## Klimaänderung als Ausgangspunkt

Seit dem frühen 19. Jahrhundert sind die Temperaturen weltweit angestiegen, was in den Alpen durch den Rückzug der Gletscher eindrücklich do-

<sup>1</sup> Programm und Abstracts als PDF: [www.wsl.ch/climtree2013/climtree2013\\_abstracts \(2.1.2014\)](http://www.wsl.ch/climtree2013/climtree2013_abstracts (2.1.2014))



**Abb 1** Exkursion auf den Stillberg am 5. September 2013. Rund 100 Personen beteiligten sich an den vier Exkursionen ins Bündnerland und ins Wallis. Foto: Peter Bebi

kumentiert ist. Dem langsamen Temperaturanstieg bis in die 1960er-Jahre folgte in den letzten 40 Jahren eine starke Erwärmung, in der Schweiz von durchschnittlich 1.5 °C.

In der Waldforschung folgte die Beschäftigung mit den Auswirkungen des Klimawandels bald auf jene mit dem «Waldsterben», das eine Verstärkung der Wald-Langzeitbeobachtung in der Schweiz und in ganz Europa ausgelöst hatte und zum Ausbau der waldökologischen Forschung führte. Parallel dazu wurden immer leistungsfähigere Computer entwickelt, welche heute komplexe Analysen mit grossen Datensätzen erlauben. Als Grundlage dafür dienen digital verfügbare, umfangreiche Datensammlungen zum Baumwachstum, zur Waldzusammensetzung oder zum räumlich standardisierten Klima.

Die neusten Klimaprognosen gehen für die Schweiz aufgrund der Emissionsszenarien des Weltklimarates (IPCC; Stocker & Qin 2013) für die nächsten 90 Jahre von einem weiteren Anstieg der Temperaturen von durchschnittlich 3.5 °C aus, begleitet von einer Reduktion der Sommerniederschläge um 10–15% und einem Anstieg der Winterniederschläge um ebenfalls 10–15% (C2SM 2011). Gegen den Mittelmeerraum hin dürften die Niederschläge eher abnehmen, gegen Skandinavien hin hingegen deutlich zunehmen. Im Vergleich zu den Prognosen aus den frühen 1990er-Jahren sind die Mittelwerte kaum verändert, doch sind die Prognoseunsicherheiten besser quantifiziert. Während Temperaturanstieg und veränderte Niederschlagsverhältnisse als konsolidierte Prognosegrössen vermittelt werden, besteht nach wie vor grosse Unsicherheit in der Vorhersage von Extremereignissen wie Trockenperioden, Starkregen und Orkanen.

## Wirkung einzelner Faktoren des Klimawandels auf Bäume und Wälder

### Höhere Temperaturen und höherer CO<sub>2</sub>-Gehalt Baumwachstum

Im Vergleich zu 1960 sind die mittleren Temperaturen in der Schweiz heute um etwa 1.5 °C höher, und der CO<sub>2</sub>-Gehalt in der Luft ist um 25%, d.h. von 315 auf 395 ppm, angestiegen. Der erwartete positive Einfluss des höheren CO<sub>2</sub>-Gehalts auf das Baumwachstum konnte bisher nicht nachgewiesen werden (Bader et al 2013). Dagegen wurde in einem Vortrag gezeigt, dass sich das Wachstum mehrerer Baumarten in Mitteleuropa seit 1980 verlangsamt, was auf den zeitweiligen Wassermangel infolge höherer Temperaturen zurückgeführt wird. Mögliche Düngungseffekte infolge des steigenden CO<sub>2</sub>-Gehalts können offenbar die negativen Temperatureffekte nicht aufwiegen (Lévesque et al, in Vorbereitung). In welcher Weise sich generell höhere Temperaturen und ein höherer CO<sub>2</sub>-Gehalt auf die CO<sub>2</sub>-Speicherung in Bäumen auswirken, wird mittels der Eddy-Kovarianzmethode in einem weltweiten Netzwerk kontinuierlich gemessen. In der Schweiz erfolgen solche Messungen unter anderem auf zwei im Waldbestand stehenden Türmen an der Lägern (Kanton Aargau) und bei Davos (Kanton Graubünden). Bedeutend scheint, dass neben der Langzeiteinwirkung des Klimas die Witterung des Vorjahres die CO<sub>2</sub>-Fixierung in Bäumen stark beeinflusst (Buchmann, in Vorbereitung).

### Jahrringe

Für die weltweite Rekonstruktion des Klimas während der letzten Jahrtausende spielen Jahrringe von Bäumen eine zentrale Rolle. Die immer umfangreicherer Jahrringsammlungen erlauben es, die Klimasignale von anderen Umwelteinflüssen laufend besser abzugrenzen. David Frank von der WSL wies in seinem Hauptvortrag auf das europäische Jahrringnetzwerk hin, das umfangreiche Rohdaten zusammenbringt und umfassende Auswertungen zu den wichtigsten Baumarten ermöglicht.

Aus der Breite und der Dichte einzelner Jahrringe können die Effekte wiederholter Trockenheit auf Bäume abgelesen werden. Mittels Analyse von verschiedenen schweren Sauerstoffisotopen (<sup>16</sup>O, <sup>18</sup>O), die während des Wachstums in der Zellulose der Jahrringe eingelagert werden, kann auf die Niederschlagsmenge im langjährigen Vergleich geschlossen und die Veränderung im Bodenwasser aufgezeigt werden.

### Phänologie

Die Phänologie von Pflanzen, also die im Jahresverlauf periodisch eintretenden Entwicklungsschritte wie Blattaustrieb, Blüte und Blattfall, ist ein ausgezeichneter Bioindikator der Klimaerwärmung.

Die Untersuchung vieler Pflanzenarten in Amerika und Europa zeigt, dass eine Klimaerwärmung um ein Grad Celsius einen um fünf bis sechs Tage früheren Blattaustrieb zur Folge hat (Wolkovich et al, in Vorbereitung), wobei der Zusammenhang bei weiter steigender Temperatur an Deutlichkeit verliert (Jochner et al, in Vorbereitung), da dann weitere Faktoren limitierend werden, zum Beispiel die Tageslänge. In einer Untersuchung mit Satellitenbildern wurde die Verfrühung des Blattaustriebs um 0.5 Tage pro Jahr von 1982 bis 2011 bestätigt (Fu, in Vorbereitung). Dies belegt eindrücklich die Anpassung von Bäumen an klimatische Veränderungen.

Für Laubbaumarten wie Buche (*Fagus sylvatica*) und Eiche (*Quercus sp.*) wurde gezeigt, dass nicht tiefe Wintertemperaturen, sondern Spätfröste während der Knospentwicklung limitierend sind für deren Verbreitung in der Höhe und entlang der Breitengrade (Kollas et al 2013). Insbesondere bei der Buche wurde eine grosse Plastizität bezüglich der Anpassung an Winterkälte nachgewiesen. So führte die wiederholte Kältebehandlung von Buchenzweigen, die von Bäumen aus verschiedenen Höhenlagen stammten, rasch zur Anpassung an die Kälte, eine Eigenschaft, welche die Bäume bei Kälteinbrüchen in wärmeren Wintern vor dem Erfrieren schützt.

In einer Untersuchung zu 36 europäischen Baumarten wurden die Rolle der Winterruhe und der Einfluss der Temperatur auf dieselbe erforscht. Eine lange Winterruhe fördert den frühen Blattaustrieb bei fast allen Arten, kaum aber bei Pionierbaumarten (z.B. Waldföhre; *Pinus sylvestris*) und verschiedenen nicht heimischen und zum Teil invasiven Arten (z.B. Robinie; *Robinia pseudoacacia*). Diese treiben daher in milden Wintern rascher aus, ein Phänomen, das längerfristig die Bestandesstruktur verändern könnte (Laube et al 2014). Unter anderem kann man erwarten, dass bei einer längeren Vegetationsperiode mehr Biomasse gebildet würde. In einem Experiment mit verschiedenen Eichenarten (*Quercus sp.*) hatte ein früheres Austreiben bei wärmeren Temperaturen allerdings keine Auswirkungen auf die Biomasse am Ende der Saison, da die Triebe ihr Wachstum auch früher einstellten (Kuster et al, in Vorbereitung).

#### *Waldgesellschaften*

Die Zusammensetzung der Waldvegetation wird durch viele Faktoren bestimmt. Der gegenwärtige Klimawandel ist dabei nur eine von mehreren wichtigen Größen wie die frühere Bestandesstruktur, die Präsenz/Absenz von Bewirtschaftung sowie Störungen wie Windwurf, Waldbrand und Borkenkäferbefall.

Untersuchungen in Frankreich, Deutschland und in der Schweiz bestätigen den Einfluss des bisherigen Klimawandels auf die Waldvegetation (Le-noir et al 2008; Fischer et al, in Vorbereitung; Küchler et al, in Vorbereitung), doch die Artenzusammen-

setzung änderte sich wesentlich langsamer als das Klima. Die Klimaparameter wirken dabei nicht unabhängig, sondern im Zusammenspiel mit anderen sich ändernden Umweltfaktoren: Ein immer dichteres Kronendach mildert den direkten Einfluss höherer Temperaturen auf die Krautschicht, und auch die Stickstoffdeposition wirkt sich deutlich auf die Artenzusammensetzung aus. Im Unterschied zur Krautschicht sind klimabedingte Veränderungen in der Strauch- und Baumschicht noch nicht gut sichtbar, die Gehölze reagieren also träge. Das belegt indirekt, dass die Baumartenzusammensetzung nicht nur vom Klima, sondern ebenso oder stärker von den Faktoren Sukzession (inklusive Bestandesalter), Verdichtung des Kronendachs und Waldbewirtschaftung abhängt. Deutlich wurde dies anhand einer umfangreichen Analyse von Waldveränderungen in ganz Spanien, wo Steineichen (*Quercus ilex*) nicht nur infolge höherer Temperaturen, sondern auch im Zuge der normalen Sukzession in Föhrenwäldern (*Pinus sp.*) nachwachsen (Carnicer et al 2013).

#### *Schädlingsbefall*

Die sich ändernde Temperatur wirkt sich erheblich auf Baumschädlinge aus, und dies in zweierlei Hinsicht. Bei zunehmenden Temperaturen ist einerseits die Anfälligkeit von Bäumen grösser, sofern der Niederschlag gleich bleibt oder abnimmt (zunehmender Trockenstress); andererseits führen höhere Temperaturen – wärmere Sommer und milder Winter – zur raschen Veränderung von Verbreitungsarealen (Hickling et al 2006). In den USA haben Insektenbefall und Pilzkrankheiten in den letzten Jahren das Feuer als wichtigste Störungsquelle im Wald abgelöst, dies besonders wegen verschiedener Käferarten, welche Föhren (*Pinus sp.*) in den Rocky Mountains, im Süden der USA und in Mexiko sowie Fichten (*Picea sp.*) in Alaska und Kanada befallen. Auch in der Schweiz können sich heute in Tieflagen pro Jahr drei statt zwei Buchdruckergenerationen (*Ips typographus*) und in Hochlagen zwei Generationen anstatt einer entwickeln (Jakoby et al, in Vorbereitung). Ob auch Antagonisten von höheren Temperaturen profitieren, ist unklar. Hervorgehoben wurde in mehreren Vorträgen die latente Gefahr durch eingeführte Arten, die sich bei höheren Temperaturen rascher etablieren können (z.B. Ayres, in Vorbereitung; Battisti et al, in Vorbereitung).

#### *Niederschlagsveränderungen*

Von allen klimatischen Parametern, die sich im Zuge des Klimawandels verändern, wird in den mittleren Breitengraden der Variation der Niederschläge am meisten Einfluss auf die Wachstumsbedingungen der Pflanzen, insbesondere der Bäume, beigemessen. Zahlreiche Studien haben sich in den vergangenen 15 Jahren mit den Folgen verschärfter Wasserknappheit in Trockenperioden für Bäume und Wälder beschäftigt.

### Zwei Fallbeispiele aus den USA

Der Klimawandel wirkt sich in den USA unterschiedlich aus. Aus dem Südwesten, also den Staaten Kalifornien, Arizona, Neumexiko, Utah und Colorado, erreichen uns regelmässig Bilder von verheerenden, meist durch Menschen verursachten Waldbränden, die sich als Folge ausgeprägter Trockenheit rasch ausbreiten und grosse Waldflächen verzehren. Aus dieser Region berichtete Craig Allen (Los Alamos National Laboratory, New Mexico) in seinem Hauptvortrag über Föhren- (*Pinus sp.*) und Douglasienwälder (*Pseudotsuga menziesii*), die durch chronischen und akuten Wasserstress über grosse Gebiete geschwächt sind und damit entweder wegen Wassermangel absterben oder verstärkt und wiederholt Störungen wie Feuer oder Borkenkäfern zum Opfer fallen (Abbildung 2). Im Vergleich zu 1980 haben derart zerstörte Bestände flächenmässig enorm zugenommen. Gemäss lokalen Klimaprognosen werden die Temperaturen weiter zu- und die Niederschläge (heute zwischen 350 und 600 mm jährlich) abnehmen, weshalb Allen die Existenz dieser Wälder mittel- bis langfristig bedroht sieht. Wesentlich weniger Waldveränderungen erwartet Charles D. Canham (Cary Institute of Ecosystem Studies, Millbrook, New York) hingegen für den Osten der USA, wo die Niederschläge (derzeit 850 bis 1500 cm jährlich) als Folge des Klimawandels um rund 10% zunehmen dürften. Canhams Waldentwicklungsmodelle integrieren Faktoren wie Waldbewirtschaftung, Störungen, Pathogene und verändertes Klima. Er erwartet, dass im Zusammenspiel dieser Faktoren die forstlichen Eingriffe und die Störungen die Waldentwicklung stärker beeinflussen werden als die Erhöhung der Temperatur. Eingeschleppte Pathogene dürften allerdings einige Baumarten in ihrem Fortbestehen gefährden.

Zusammengefasst dürften die Wachstumsbedingungen im trockenen Südwesten der USA bei weiter abnehmenden Niederschlägen immer prekärer werden, während sich die Wälder in den östlichen Gebieten, wo in Zukunft mehr Niederschlag erwartet wird, nur wenig verändern dürften.

### Trockenheit und Baumwachstum

Das Baumwachstum und damit die Produktion von Biomasse sind sehr häufig durch Wasserknappheit limitiert. Es wird angenommen, dass infolge des Klimawandels weltweit immer mehr Waldflächen davon betroffen sein werden (Spiecker, in Vorbereitung). Im Zuge dieser veränderten Umweltbedingungen werden sich in diesen Wäldern allerdings nach genügend langer Zeit die bestangepassten Baumarten durchsetzen. Wasserknappheit limitiert nicht nur das Wachstum, sondern löst auch Mortalität aus. Dies dürfte angesichts des markanten Klimawandels, der für die nächsten Jahrzehnte erwartet wird, zunehmend auch Standorte betref-

fen, welche heute nicht als wasserlimitiert gelten. In einer Untersuchung in bulgarischen Buchenwäldern wurde diesbezüglich Trockenheit als mortalitätsauslösender Faktor festgestellt (Panayotov et al, in Vorbereitung).

Physiologisch wirkt sich Trockenheit über zwei Mechanismen in Bäumen aus: 1) Verdursten infolge von Kavitation, also der Bildung von Luftblasen (Embolien) im wasserleitenden Xylem bei Trockenheit, und 2) Verhungern infolge von ungenügender Versorgung der Pflanze mit Kohlehydraten, im Englischen als «carbon starvation» bezeichnet. Gegenwärtig wird das Verdursten durch Kavitation besonders bei Föhrenarten als Hauptgrund für trockenheitsinduziertes Absterben angesehen (Klein et al, in Vorbereitung). Da aber beide Mechanismen je nach Artengruppe wichtig sein dürften, hat die Baumphysiologie als Forschungsfeld in jüngster Zeit stark an Bedeutung gewonnen.

### Störungen

#### Extreme Witterungssereignisse

Gemäss Reto Knutti von der ETH Zürich, einem der Hauptautoren des neusten IPCC-Berichts (Stocker & Qin 2013), sind regionale Langzeitprognosen von extremen Witterungssereignissen wie Hitzewellen im Sommer, lang anhaltender Kälte im Winter, Starkniederschlägen oder Winterstürmen sehr schwierig. Bis 2100 sollen in Europa vermehrt Hitzewellen auftreten (Schär et al 2004), wodurch das Risiko für Waldbrand während der Vegetationszeit ansteigen wird. Die extratropischen Zyklonsysteme, welche in den Wintermonaten in Mittel- und Nordeuropa zu Windwürfen führen, dürften sich bis 2050 stärker gegen den Nordpol bewegen, wodurch Winterstürme die südlichen Teile Mitteleuropas (inkl. der Schweiz) weniger häufig treffen sollten (Stocker & Qin 2013).

#### Interaktionen mit Schädlingen

Störungen lösen oft Massenvermehrungen von Käfern aus, wie sich in der Schweiz nach den Stürmen Vivian und Lothar deutlich zeigte. Im Rahmen des Klimawandels wird angenommen, dass sowohl die Windwürfe infolge von Orkanen (gegen Nordeuropa hin) als auch Waldbrände als Folge von länger anhaltender Trockenheit beziehungsweise Hitzewellen (besonders gehen Südeuropa hin) zunehmen werden. Vor allem nach Windwurf muss daher vermehrt mit Käferbefall gerechnet werden. Eine Untersuchung aus Schweden mit langen Zeitreihen zeigte, dass Windwurffholz der wichtigste Treiber für den Borkenkäferbefall ist, nicht aber die vorherrschenden Temperaturen (Marini et al, in Vorbereitung).



**Abb 2** Absterbende Gelb-Föhren (*Pinus ponderosa*) in einem Bestand von *Pinus edulis* in Neumexiko, USA, im Herbst 2013.  
Foto: Craig Allen

### Interaktionen mit Wärme, Trockenheit und Bewirtschaftung

Störungen reduzieren die stehende Biomasse und damit die Kronenbedeckung abrupt; im Falle von extremen Witterungseignissen resultieren oft grosse Schäden, die grossräumig und synchron erfolgen. Die Art der Waldbewirtschaftung kann die Wirkung von klimatischen Extremereignissen stark verändern. So nehmen die Waldschäden durch Windwurf bei grösserem Holzvorrat und höherem Nadelholzanteil zu (Seidl et al 2011). Eine österreichische Studie zeigte, dass sowohl ein zunehmendes Bestandesalter (siehe auch Dobbertin et al 2002) als auch das Vorhandensein früherer Störungen in Waldbeständen die wichtigsten Grössen für die Erklärung von neuen störungsbedingten Schäden sind (Pasztor et al, in Vorbereitung). Weitere Untersuchungen, unter anderem jene von Charles Canham im Osten der USA, führen zum Schluss, dass extreme Witterungseignisse und die Waldbewirtschaftung einen stärkeren Einfluss auf die künftige Waldzusammensetzung haben als die im Vergleich dazu doch recht langsame Veränderung der Mittelwerte von Temperatur und Niederschlag im Zuge des Klimawandels. Weil europaweit die Wälder immer älter werden, muss man davon ausgehen, dass die störungsbedingten Schäden zunehmen werden, selbst wenn extreme Witterungseignisse nicht häufiger werden sollten. Entsprechend wurde dafür plädiert, die Bewirtschaftung den Störungsrisiken anzupassen, beispielsweise durch kürzere Umtriebszeiten.

Im Gegensatz zu den vorher erwähnten Beiträgen wurde mit dem grössten Buchenurwald von Europa in den ukrainischen Karpaten ein Gebiet vorgestellt, wo keine Spuren von grösseren Störungen vorhanden sind (Trotsiuk et al 2012). Bleiben Stö-

rungen weiterhin aus und nimmt der Niederschlag nicht stark ab, so wird davon ausgegangen, dass die Buchen (*F. sylvatica*) den veränderten klimatischen Bedingungen trotzen werden (Hobi et al, in Vorbereitung). Ungestörte Buchenbestände können unter bestimmten Bedingungen einem wärmeren Klima offenbar über Jahrhunderte standhalten. Doch wie sieht es mit der Toleranz dieser Baumart gegenüber Störungen aus (Resilienz)? Ein Beitrag hierzu berichtete von Buchenwäldern auf der Alpensüdseite (inklusive Tessin), die durch Brand zerstört wurden. Sofern das Feuer nicht zu intensiv war, wurde ein rasches Einwachsen junger Buchen beobachtet. Nach intensivem Feuer folgte eine Besiedlung mit Pionierbaumarten (Maringer et al, in Vorbereitung).

In mehreren Vorträgen wurden Waldentwicklungsmodelle vorgestellt, die verändertes Klima und unterschiedliche Störungsregimes als Einflussgrössen kombinieren. In den Gebirgswäldern der Region Davos könnte das wärmere Klima zu einer Abnahme von Lawinen infolge geringerer Schneemengen führen. Damit dürften die Wälder noch dichter werden (Zurbriggen et al, in Vorbereitung). Für Wytwieden im Jura zeigte ein Modell, das Klimawandel und Beweidung kombinierte (Peringer et al, in Vorbereitung), eine Ablösung der Fichte (*Picea abies*) durch Buche (*F. sylvatica*) und Waldföhre (*P. sylvestris*).

### Resistenz und Anpassungsfähigkeit

#### Wurzeln und Mykorrhiza

Es ist unbestritten, dass Bodeneigenschaften wie die Wasserspeicherkapazität die Variation von Niederschlägen innerhalb von und zwischen Jahren abpuffern können (z.B. Garcia-Palacios et al 2012).



Abb 3 Zweijährige Waldföhren und Fichten in einem genökologischen Experiment im Bündner Rheintal. Der Standort und die Witterung sind entscheidend für das Überleben von Keimlingen. Foto: Thomas Wohlgemuth



Abb 4 Aleppoföhre (*Pinus halepensis*) in einem Frostresistenzversuch. Foto: Christoph Bachofen

Diese Pufferwirkung ermöglicht es Bäumen, auch ausgeprägte Trockenperioden zu überstehen. Zu diesem Thema gab es keine spezifischen Beiträge, wohl aber zur Reaktion von Wurzeln und Mykorrhiza auf erhöhte CO<sub>2</sub>-Konzentrationen, erhöhte Temperaturen sowie auf Wasserknappheit. Experimentell konnte gezeigt werden, dass ein erhöhter CO<sub>2</sub>-Gehalt in der Atmosphäre das Wachstum von Feinwurzeln fördert (Godbold et al, in Vorbereitung). Das

Wurzelwachstum wird weiter sowohl durch höhere Temperaturen gefördert, was besonders an der oberen Waldgrenze untersucht worden ist (Körner 2012; Ferrari et al, in Vorbereitung), als auch durch zusätzliches Wasser. Letzteres wurde im Bewässerungsexperiment im Pfynwald gezeigt (Herzog et al, in Vorbereitung). Bei Wasserknappheit dagegen können trockenresistente Mykorrhiza-Pilze wie der häufig vorkommende *Cenococcum geophilum* die Wasseraufnahme von Pflanzen während Trockenphasen begünstigen (Kerner et al, in Vorbereitung).

#### Bäume in der Jugendphase

Wie Lorena Gómez-Aparicio von der Spanischen Forschungsanstalt CSIC (Sevilla) in ihrem Hauptvortrag ausführte, spielt die Verjüngung gerade in Trockengebieten, wo die Mortalität von Waldbeständen ansteigt, eine entscheidende Rolle, weil bei einem Ausfall der Verjüngung Verbuschung droht. In Wäldern des Mittelmeergebiets werden deshalb Verjüngungsprozesse unter Trockenheit intensiv untersucht.

Experimente mit jungen Bäumen geben Aufschluss über Unterschiede zwischen Baumarten und Provenienzen und über deren Plastizität. In Kanada und in den USA (St. Clair & Howe 2007) wurden grosse genökologische Studien durchgeführt, um die Variabilität zwischen Provenienzen für die Anpassung an den Klimawandel zu nutzen. In Kanada wurde ein System ausgearbeitet, mit welchem unter Verwendung weniger Klimaparameter die für die Anpflanzung in der Zielregion geeignete Provenienz ausgewählt werden kann (O'Neill et al, in Vorbereitung). In einer umfangreichen genökologischen Studie im Rahmen des Forschungsprogramms «Wald und Klimawandel» von BAFU und WSL werden derzeit je 90 Provenienzen von Fichte (*P. abies*), Tanne (*Abies alba*) und Buche (*F. sylvatica*) aus allen Teilen der Schweiz in zwei Pflanzgärten aufgezogen (Frank et al, in Vorbereitung). An den Pflanzen werden laufend Messungen zur Ermittlung der phänotypischen Variation durchgeführt. Das Projekt zielt darauf ab, landesweit gültige Empfehlungen für die Saatgutverwendung zu entwickeln. In Österreich zeigte eine Analyse von rund 380 Fichtenpopulationen (*P. abies*) im Alter von 7 bis 15 Jahren an 29 über das Land verteilten Pflanzorten, dass in Tieflagen angepflanzte Fichten eine geringere Variabilität im Wachstum aufweisen als jene in höheren Lagen (Schüler et al 2013). Die Baumhöhen variierten als Folge der Standortbedingungen am Versuchsort, nicht aber als Folge der Niederschlagsverhältnisse am Herkunftsstandort. In einem genökologischen Experiment im Bündner Rheintal (Abbildung 3) wurden Waldföhren- (*P. sylvestris*) und Fichtenprovenienzen (*P. abies*; Wallis, Chur, Tirol, Wien, Ukraine/Rumänien) verglichen. Die Witterung im jeweiligen Jahr, vor allem aber genügend Niederschlag zur Ansamungszeit, und die

Standortverhältnisse (tief- oder flachgründiger Boden) waren entscheidend für den Anwuchs erfolg, nicht aber die Provenienz (Moser et al, in Vorbereitung). Ein Experiment in Österreich zeigte, dass Bäume fähig sind, sich über die Samenproduktion rasch anzupassen (epigenetischer Prozess). Pflanzen aus Samen, die in einem feuchten Jahr gebildet wurden, waren weniger trockenresistent als solche, die in einem trockenen entstanden sind. Jungpflanzen von Waldföhren (*P. sylvestris*) aus dem Mittelmeerraum, die erhöhte Temperatur und verschärfter Trockenheit ausgesetzt wurden, waren resistenter als ihre nördlichen Verwandten (insgesamt 10 Provenienzen), jedoch auf Kosten eines geringeren Höhenzuwachses (Täger et al 2013). In einem Frostresistenzversuch im Wallis wurden Nadeln von mediterranen und kontinentalen Provenienzen der Wald- (*P. sylvestris*) und der Schwarzföhre (*P. nigra*) von Februar bis Mai unterschiedlicher Kälte ausgesetzt. Die mediterranen Föhrenarten waren nicht durch spät auftretende Fröste limitiert (Bachofen et al, in Vorbereitung; Abbildung 4).

### Mischwälder

Wie Bäume auf den Klimawandel reagieren, wurde bisher vor allem in Reinbeständen gemessen. Die wenigen Untersuchungen über Wechselwirkungen zwischen den Baumarten in Mischwäldern zeigen oft, dass die Produktivität in Mischwäldern größer und die Gefahr von Insektenbefall kleiner ist. Mit Blick auf den Klimawandel stellt sich die Frage, ob Mischwälder eine grössere Resistenz gegenüber Trockenheit aufweisen als Reinbestände.

Das häufigere Absterben von Buchen (*F. sylvatica*) nach Trockenperioden in englischen Mischwäldern mit Buche (*F. sylvatica*) und Eiche (*Quercus petraea*) deutet darauf hin, dass sich in Mischbeständen generell trockenresistente Arten gegenüber anderen Arten durchsetzen könnten (Cavin et al, in Vorbereitung). In einem internationalen Verjüngungsversuch übten Standortverhältnisse beziehungsweise die Diversität der Waldbestände einen positiven Einfluss auf das Überleben und die Wuchsgröße der Jungpflanzen aus (Manzanedo et al, in Vorbereitung). In einem CO<sub>2</sub>-Begasungsexperiment an der Waldgrenze in Davos konnten junge Lärchen (*Larix decidua*) stärker vom höheren CO<sub>2</sub>-Gehalt profitieren als Bergföhren (*P. uncinata*), ein Effekt, der langfristig zu einer Veränderung des Waldgrenzen-Ökotons führen könnte (Dawes et al 2013). In Mischbeständen aus Birke (*Betula pendula*), Waldföhre (*P. sylvestris*) und Fichte (*P. abies*) in borealen Wäldern wurde unter trockenen Bedingungen eine bessere Wassernutzungseffizienz der Bäume festgestellt als in Reinbeständen (Grossiord et al, in Vorbereitung). Auf ertragreichen Standorten im Schwarzwald waren die Bäume in Mischbeständen von Fichte (*P. abies*) und Tanne (*A. alba*) grösser als in Reinbeständen der bei-

den Arten (Forrester et al, in Vorbereitung). Waldentwicklungsmodelle an verschiedenen Standorten in der Schweiz und in Deutschland ergaben, dass unter heutigen und zukünftigen Klimabedingungen Waldbestände mit vielen Baumarten mehr Biomasse produzieren als vergleichsweise artenarme (Morin et al 2011; Morin et al, in Vorbereitung). Die Baumartenvielfalt wirkte sich besonders an periodisch sehr trockenen Standorten positiv aus.

### Adaptive Waldbewirtschaftung

Der Klimawandel ist eine Herausforderung für die Waldbewirtschaftung. Eine Sichtung der Adaptationsmassnahmen zeigt, dass Praktiker in Europa damit begonnen haben, die Bewirtschaftung anzupassen. Die Gründe dafür liegen einerseits im Akzeptieren des Klimawandels als Prozess und andererseits im Erkennen von Klimawandelleffekten (Hanewinkel et al 2013). Artverbreitungsmodelle leisten dazu einen Beitrag. Sie vermitteln bildlich, wo sich in Zukunft das optimale klimatische Habitat unserer Baumarten befinden dürfte. Seit Kurzem werden die Verbreitungsmodelle für einzelne Arten auch mit deren Wachstumsraten kombiniert, wodurch wuchsfähige Standorte ausserhalb der jetzigen Nischen besser lokalisiert werden können.

Ein wichtiger Schritt in der Umsetzung der oft komplexen wissenschaftlichen Informationen in die Praxis ist der organisierte Informationsaustausch. In Frankreich wurde das nationale Netzwerk «AFORCE» ins Leben gerufen,<sup>2</sup> das Fachleute aus der Forschung, der Praxis und der Ausbildung zusammenbringt. Im Mittelpunkt stehen Fragen zur Baumartenwahl, zu einer Wasserhaushalt-optimierten Waldbewirtschaftung und zur Waldbautechnik vor allem in der Begründungsphase. «AFORCE» liefert den Förstern praktische Werkzeuge, Websites, Daten und Richtlinien. In der Schweiz ist Ähnliches im Rahmen des vom BAFU und von der WSL gemeinsam durchgeführten Forschungsprogramms «Wald und Klimawandel» geplant. Damit die Resultate der Forschung von den Anwendern genutzt werden, bedarf es einer engen Zusammenarbeit zwischen den Forschenden, den Praktikern, der Verwaltung und den politischen Entscheidungsträgern (Brang et al 2011).

### Biodiversität

Die Vorhersage der Verbreitung von Baumarten unter veränderten klimatischen Bedingungen ist mit grossen Unsicherheiten behaftet. Daraus ist abzuleiten, dass Aussagen über die Entwicklung der Biodiversität noch wesentlich schwieriger sein dürfen. Störungen, die für die Erhaltung der Biodiversität so wichtig sind und deren Häufigkeit im Rahmen des Klimawandels zunehmen dürfte, sollten in

<sup>2</sup> www.foreprimefrancaise.com/accueil-161899.html (8.1.2014)

der Waldplanung und -bewirtschaftung proaktiv berücksichtigt werden. Nicht nur Störungen haben einen deutlichen Einfluss auf die Artenvielfalt, sondern auch die Waldzusammensetzung. Der klimabedingte Rückgang der Fichte (*P. abies*) in Deutschland zugunsten der Buche (*F. sylvatica*) wird laut der Modellierung von Gottschalk et al (in Vorbereitung) einen starken Effekt auf die Vogelpopulationen ausüben. Eine Modellstudie zu vier Gebirgsvogelarten in der Schweiz ergab eine deutliche Abnahme der Habitatflächen aller Arten bis 2050 infolge des Klimawandels (Braunisch et al, in Vorbereitung).

## Modelle als Synthesewerkzeuge

Solange Bäume nicht sterben oder gefällt werden, leben sie weiter. Ob die überlebenden, die neu einwachsenden und die neu angepflanzten Bäume die Waldleistungen in Zukunft bei höheren Temperaturen und weniger Sommerniederschlag erbringen können, ist eine zentrale Frage in der Debatte über die Auswirkungen des Klimawandels auf den Wald und dessen Leistungen (Rigling et al 2012). Schreitet der Klimawandel in dem Masse voran, wie dies seit 1990 prognostiziert wird, dann können die Wälder sich kaum genügend rasch anpassen. Rolf Manser vom BAFU forderte deshalb in seinem Hauptvortrag von der Wissenschaft robuste und vertrauenswürdige Informationen, auf deren Basis die heutigen Wälder in für die Zukunft geeignete Wälder überführt werden können (Abbildung 5). Eine Hilfestellung dazu bieten Modellierungen, welche die wichtigsten Erkenntnisse integrieren und auf deren Basis die Vorkommen von Baumarten abgeschätzt werden können.



Abb 5 Buchenunterpflanzung in einem Fichtenbestand zur Anpassung des Waldes an den Klimawandel. Gesehen im Forstbetrieb Wasserburg (Bayerische Staatsforsten).

Foto: Barbara Allgaier Leuch

An der Konferenz wurden unterschiedliche Modelltypen vorgestellt. Am weitesten verbreitet sind seit einigen Jahren statistische Artverbreitungsmodelle, die auf dem Konzept der Klimahüllen basieren. Dabei dient die heutige Präsenz oder Absenz einer Baumart als Grundlage für eine Vorhersage unter klimatisch veränderten Bedingungen. In Karten werden jene Habitate dargestellt, welche im Gleichgewicht beispielsweise mit einem im Jahr 2100 herrschenden Klima von dieser Baumart besiedelt würden. Ob diese Art die neuen Habitate bis dann erreichen kann und ob die neuen Habitate immer noch mit anderen Arten bestockt sind, kann damit aber nicht abgeschätzt werden. Demgegenüber haben dynamische Waldentwicklungsmodelle einen völlig anderen Ansatz: Baumarten mit unterschiedlichen Wuchsmerkmale besiedeln eine Fläche und wachsen um die Wette. Die Modelle simulieren die Waldentwicklung während Hunderten von Jahren, wobei sich im Verlaufe dieser Zeit das Klima ändert und als Folge davon unterlegene Arten wegfallen und dominante Arten sich durchsetzen. Daraus lassen sich ebenfalls Verbreitungskarten für Arten errechnen. An der Konferenz wurde viel darüber diskutiert, wie plausibel die Resultate solcher Modelle sind. In den vergangenen Jahren wurden erhebliche Fortschritte erzielt bezüglich der «Validierung» derselben anhand von langfristigen Daten. Trotzdem plädierte Harald Bugmann (ETH Zürich) in seinem Hauptvortrag dafür, in Waldentwicklungsmodellen die Mortalität als Folge wiederholter Trockenheit besser abzubilden, da dies ein Schlüsselprozess der Walddynamik der kommenden Jahrzehnte sein dürfte. Daten dazu liegen aus dendroökologischen und ökophysiologischen Studien zunehmend vor; ihre Umsetzung in den Modellen stösst aber noch an Grenzen, da die Modelle beispielsweise die holzanatomischen Eigenschaften nur mit größten Schwierigkeiten abbilden könnten.

Mehrere Studien legten besonderes Gewicht auf die Ausbreitung der Baumarten (z.B. Lischke & Schmatz, in Vorbereitung), wobei hier unterschieden wurde zwischen natürlicher Ausbreitung und der Anpflanzung respektive Saat durch den Menschen. So können mediterrane Arten, die besser an Trockenheit angepasst sind, wahrscheinlich nicht rechtzeitig in Gebiete nördlich der Alpen einwandern. Ihre Ausbreitung müsste unterstützt werden (assisted migration).

Statistische Artverbreitungsmodelle resultieren oft in enormen geografischen Habitatverschiebungen, sofern die Eigenschaften einer Art als räumlich und zeitlich konstant angenommen werden. Ein aktueller Forschungsgegenstand ist deshalb, wie die Anpassungsfähigkeit der einzelnen Provenienzen (letztlich die Plastizität einer Baumart) in den Modellen berücksichtigt werden kann (z.B. Kreyling et al, in Vorbereitung). Auch ist in den besprochenen

Modellen der Boden als Standortfaktor nicht oder nur sehr grob abgebildet. Wie Heinz Rennenberg (Universität Freiburg i.Br.) in seinem Hauptvortrag zeigte, lässt sich beispielsweise die Verbreitung der Buche (*F. sylvatica*) besser vorhersagen, wenn im Artverbreitungsmodell die Interaktion zwischen Trockenheit und Stickstoffversorgung über flächig verfügbare Bodenkarten berücksichtigt wird.

## Schlussbetrachtung und Folgerungen

An der Konferenz «ClimTree 2013» wurden wesentliche neue Resultate zum Thema «Wald und Klimawandel» präsentiert. Faszinierend dabei war die Vielfalt der Bereiche, die von klimatischen Veränderungen betroffen sind: von der Baumwurzel bis zur Baumkrone, vom Stofffluss bis zur Artenzusammensetzung, vom Einzelbaum bis zur Region. Die Forschung über die Effekte des Klimawandels ist nun bereits 25 Jahre alt. Einige der hier beschriebenen Resultate belegen die Dynamik in diesem Forschungszweig. So werden heute Experimente in grösserem Umfang und basierend auf sehr viel mehr Erkenntnissen als früher durchgeführt. Monitoringdaten decken eine immer längere und dadurch hoch relevante Zeitspanne ab. Klimamodelle bilden Unsicherheiten besser ab, und auch die Analysen der Folgen des Klimawandels für Bäume und Wälder berechnen zunehmend die auf Klima- und Dateninput, Parameterunschärfe und Modellstruktur basierenden Unsicherheiten. Um den Wald trotz den vielen Bäumen nicht aus den Augen zu verlieren, ist eine regelmässige Aktualisierung der Erkenntnisse nötig. So wurde deutlich, dass es eine intensive Diskussion zwischen Expertinnen und Experten für Modellierung, für ökologische Experimente und für Langzeitmonitoring von Umweltsystemen braucht, um Massnahmen für ein Waldmanagement ableiten zu können, das die klimatischen Veränderungen berücksichtigt und in der Forstpraxis anwendbar ist. Die Konferenz hat diesen Dialog sowie den Austausch über Landesgrenzen hinweg gefördert.

Die Komplexität der Zusammenhänge und die Unsicherheit über das Ausmass des Klimawandels wurden an der Konferenz «ClimTree 2013» manifest; sie erschweren pauschale Aussagen zu Auswirkungen des Klimawandels auf den Wald. Die Herausforderung ist, daraus robuste und zielführende Handlungsanweisungen abzuleiten. Dieser Herausforderung stellt sich das Forschungsprogramm «Wald und Klimawandel» von BAFU und WSL, indem für dessen Abschluss im Jahr 2015 Produkte und Instrumente angestrebt werden, welche in der Praxis direkt verwendet oder einfach weiterentwickelt werden können. Die Erfahrungen aus der Konferenz «ClimTree 2013» sind dafür sehr nützlich. ■

Eingereicht: 31. Dezember 2013, akzeptiert (ohne Review): 8. Januar 2014

## Dank

Wir danken den Organisatoren der 14 Sessions und den Exkursionsleitern, die mit ihrem fachlichen Beitrag zum Gelingen der Konferenz beige tragen haben: Raphaël Arlettaz, Andrea Battisti, Peter Bebi, Damien Bonal, Veronika Braunisch, Ulf Büntgen, Ivano Brunner, Marco Conedera, Nicola Estrella, Jean-Claude Gégout, Marc Hanewinkel, Günter Hoch, Jürgen Kreyling, Frank Krumm, Jonathan Lenoir, Harri Mäkinen, Barbara Moser, Michael Scherer-Lorenzen, Cyrille Rathgeber, Alain Roques, Rupert Seidl, Heinrich Spiecker, Rudi Suchant, Miroslav Svoboda, Konstantin von Teuffel und Yann Vitasse. Unser Dank richtet sich auch an Rolf Manser und Christian Küchli für die Durchsicht sowie an Kathrin Kramer-Priewasser und Susanne Senn-Raschle für die Organisation.

Die Konferenz wurde von der ETH Zürich, der Eva-Mayr-Stihl-Stiftung, Decentlab und der europäischen Cost-Action «STReESS» unterstützt und stand unter dem Patronat der WSL, der ETH Zürich, des BAFU, des Schweizerischen Nationalfonds, der IUFRO, der Universität Freiburg i.Br., der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, des Institut National de la Recherche Agronomique de Nancy und des Central European Regional Office des Europäischen Forstinstituts.

## Literatur

- ALLEN CD, MACALADY AK, CHENCHOUNI H, BACHELET D, MC DOWELL N ET AL (2010) A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *For Ecol Manage* 259: 660–684.
- BADER MKF, LEUZINGER S, KEEL SG, SIEGWOLF RTW, HAGEDORN F ET AL (2013) Central European hardwood trees in a high- $\text{CO}_2$  future: synthesis of an 8-year forest canopy  $\text{CO}_2$  enrichment project. *J Ecol* 101: 1509–1519.
- BRANG P, BORN J, AUGUSTIN S, KÜCHLI C, PAULI B ET AL (2011) Forschungsprogramm Wald und Klimawandel. Synthese der ersten Programmphase 2009–2011. Birmensdorf: Eidgenöss Forsch.anstalt WSL. 51 p.
- C2SM (2011) Swiss climate change scenarios CH2011. Zurich: Eidg Techn Hochschule, Center for Climate Systems Modeling. 88 p.
- CARNICER J, COLL M, PONS X, NINYEROLA M, VAYREDA J ET AL (2013) Large-scale recruitment limitation in Mediterranean pines: the role of *Quercus ilex* and forest successional advance as key regional drivers. *Glob Ecol Biogeogr*. doi: 10.1111/geb.12111
- DAWES MA, HAGEDORN F, HANDA IT, STREIT K, EKBLAD A ET AL (2013) An alpine treeline in a carbon dioxide-rich world: Synthesis of a nine-year free-air carbon dioxide enrichment study. *Oecologia* 171: 623–637.
- DOBBERTIN M, SEIFERT M, SCHWYZER A (2002) Ausmass der Sturmschäden. *Wald Holz* 83 (1): 39–42.
- GARCIA-PALACIOS P, MAESTRE FT, BARDGETT RD, DE KROON H (2012) Plant responses to soil heterogeneity and global environmental change. *J Ecol* 100: 1303–1314.
- HANEWINCKEL M, CULLMANN DA, SCHELHAAS MJ, NABUURS GJ, ZIMMERMANN NE (2013) Climate change may cause severe loss in the economic value of European forest land. *Nat Clim Chang* 3: 203–207.

- HICKLING R, ROY DB, HILL JK, FOX R, THOMAS CD (2006) The distributions of a wide range of taxonomic groups are expanding polewards. *Glob Chang Biol* 12: 450–455.
- KOLLAS C, KÖRNER C, RANDIN CF (IN PRESS) Spring frost and growing season length co-control the cold range limits of broad-leaved trees. *J Biogeogr*. doi: 10.1111/jbi.12238
- KÖRNER C (2012) Treelines will be understood once the functional difference between a tree and a shrub is. *Ambio* 41: 197–206.
- LAUBE J, SPARKS TH, ESTRELLA N, HÖFLER J, ANKERST DP ET AL (2014) Chilling outweighs photoperiod in preventing precocious spring development. *Glob Chang Biol* 20: 170–182.
- LENOIR J, GÉGOUT JC, MARQUET PA, DE RUFFRAY P, BRISSE H (2008) A significant upward shift in plant species optimum elevation during the 20<sup>th</sup> century. *Science* 320: 1768–1771.
- MORIN X, FAHSE L, SCHERER-LORENZEN M, BUGMANN H (2011) Tree species richness promotes productivity in temperate forests through strong complementarity between species. *Ecol Lett* 14: 1211–1219.
- NICOTRA AB, ATKIN OK, BONSER SP, DAVIDSON AM, FINNEGAN EJ ET AL (2010) Plant phenotypic plasticity in a changing climate. *Trends Plant Sci* 15: 684–692.
- RIGLING A, ELKIN C, DOBBERTIN M, EILMANN B, GIUGGIOLA A ET AL (2012) Wald und Klimawandel in der inneralpinen Trockenregion Visp. *Schweiz Z Forstwes* 163: 481–492. doi: 10.3188/szf.2011.0481
- SCHÄR C, VIDALE PL, LÜTHI D, FREI C, HÄBERLI C ET AL (2004) The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature* 427: 332–336.
- SCHÜLER S, KAPELLER S, KONRAD H, GEBUREK T, MENGL M ET AL (2013) Adaptive genetic diversity of trees for forest conservation in a future climate: A case study on Norway spruce in Austria. *Biodivers Conserv* 22: 1151–1166.
- SEIDL R, SCHELHAAS MJ, LEXER MJ (2011) Unraveling the drivers of intensifying forest disturbance regimes in Europe. *Glob Chang Biol* 17: 2842–2852.
- ST. CLAIR JB, HOWE GT (2007) Genetic maladaptation of coastal Douglas-fir seedlings to future climates. *Global Chang Biol* 13: 1441–1454.
- STOCKER TF, QIN D, EDITORS (2013) Climate change 2013: The physical science basis. Summary for policymakers. Cambridge: Cambridge Univ Press. 37 p. [www.climatechange2013.org/images/uploads/WGI\\_AR5\\_SPM\\_brochure.pdf](http://www.climatechange2013.org/images/uploads/WGI_AR5_SPM_brochure.pdf) (8.1.2014)
- TÄGER S, ZANG C, LIESEBACH M, SCHNECK V, MENZEL A (2013) Impact of climate and drought events on the growth of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) provenances. *For Ecol Manage* 307: 30–42.
- TROTSIU V, HOBI ML, COMMARMOT B (2012) Age structure and disturbance dynamics of the relic virgin beech forest Uholka (Ukrainian Carpathians). *For Ecol Manage* 265: 181–190.

## Forschung zu Wald und Klimawandel in Mitteleuropa: eine Werkschau

Wie reagieren die Bäume in den Wäldern von Mitteleuropa auf den Klimawandel, gestern, heute und morgen? Anlässlich der internationalen Konferenz «ClimTree 2013» gaben rund 250 Forschende Anfang September 2013 in Zürich Antworten auf diese Frage. Die präsentierten Resultate sind in vielerlei Hinsicht nicht eindeutig, was zeigt, dass das Wissen oft nicht konsolidiert ist. Doch sind die beiden wichtigsten Faktoren, welche zu grossen Änderungen führen werden, klar bezeichnet: verschärzte Trockenheit zur Vegetationszeit, die das Wachstum, die Verjüngung und die Mortalität der Bäume beeinflusst, und steigende Temperaturen, die biotische und abiotische Prozesse beschleunigen, so vor allem die Massenvermehrung von Schädlingen und Waldbrände. Die Frage, bei welchen klimatischen Bedingungen welche Baumarten in ferner Zukunft konkurrenzstark sein werden, wird rege diskutiert, weil es neue Resultate aus Experimenten und dendroökologischen Untersuchungen gibt, die bisher nur unvollständig in die Modellierung der Waldentwicklung eingeflossen sind. Dies gibt aber auch Anlass dazu, über eine neue Generation von Waldentwicklungsmodellen nachzudenken. Der vorliegende, ausführliche Konferenzbericht informiert über den Stand der Kenntnisse und die Forschungsfragen, die neu gestellt werden.

## Recherche sur les forêts et les changements climatiques en Europe centrale: œuvres complètes

Quelle était la réaction des arbres des forêts d'Europe centrale aux changements climatiques hier? Quelle est-elle aujourd'hui et quelle sera-t-elle demain? Près de 250 chercheurs ont tenté de répondre à ces questions à l'occasion de la conférence internationale «ClimTree 2013» à Zurich en septembre 2013. A plusieurs égards, les résultats présentés ne sont pas sans équivoque. Ce qui démontre que ces savoirs ne sont pas toujours consolidés. Toutefois, les deux facteurs cruciaux qui amèneront des changements importants sont identifiés: une plus grande sécheresse lors de la période de végétation, qui influencera la croissance et la mortalité des arbres, ainsi que des températures en hausse qui accéléreront les processus biotiques et abiotiques, notamment la prolifération d'organismes nuisibles et les incendies en forêt. La question de savoir quelle essence sera dans un lointain futur la plus concurrentielle dans des conditions climatiques données est vivement débattue, car il existe de récents résultats d'expériences et d'études dendroécologiques dont il n'a pas encore été suffisamment tenu compte dans les modèles dynamiques de succession forestière. C'est également une bonne occasion pour réfléchir à une nouvelle génération de modèles. Le présent rapport détaillé de cette conférence informe sur l'état actuel des connaissances et des nouvelles questions qui en sont issues.