

Forschungsprogramm Wald und Klimawandel. Synthese der ersten Programmphase 2009 - 2011

Peter Brang, Julia Born, Sabine Augustin, Christian K uchli, Bernhard Pauli, Esther Thürig,
Beat Wermelinger, Thomas Wohlgemuth, Niklaus E. Zimmermann

November 2011



Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft
WSL, Birmensdorf



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Umwelt BAFU,
Abteilung Wald, Ittigen

Bundesamt für Umwelt BAFU

Autoren

Peter Brang¹, Julia Born¹, Sabine Augustin², Christian K uchli², Bernhard Pauli³, Esther Th urig¹, Beat Wermelinger¹, Thomas Wohlgemuth¹, Niklaus E. Zimmermann¹

¹ Eidg. Forschungsanstalt WSL, Zürcherstrasse 111, CH-8903 Birmensdorf

² Bundesamt für Umwelt, CH-3003 Bern

³ Schweizerische Hochschule für Landwirtschaft, CH-3052 Zollikofen

Ein Bericht aus dem Forschungsprogramm «Wald und Klimawandel»
(www.wsl.ch/info/organisation/fpo/wald_klima)

Zitierung

Brang, P.; Born, J.; Augustin, S.; K uchli, C.; Pauli, B.; Thürig, E.; Wermelinger, B.; Wohlgemuth, T.; Zimmermann, N. E. 2011. Forschungsprogramm Wald und Klimawandel. Synthese der ersten Programmphase 2009 - 2011. Birmensdorf, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL; Bern, Bundesamt für Umwelt. 51 S.

Im pdf-Format zu beziehen über www.wsl.ch/info/organisation/fpo/wald_klima

Dank

Allen Projektleitenden und Mitarbeitenden im Forschungsprogramm danken wir für die Projektberichte, den fachlichen Austausch sowie für viele Verbesserungsvorschläge zu diesem Bericht. Dem Steuerungsausschuss des Forschungsprogramms sind wir für die umsichtige Leitung des Programms und den Mitgliedern des Advisory Boards für wertvolle Hinweise dankbar. Unser Dank geht auch an Reto Hefti als Mitglied der Programmleitung für seine wertvollen Beiträge zu diesem Bericht.

Inhalt

Zusammenfassung	4
Résumé	5
Summary	6
1. Einleitung	7
1.1 Der Klimawandel stellt Waldleistungen in Frage	7
1.2 Das Forschungsprogramm «Wald und Klimawandel» erarbeitet Grundlagenwissen und Entscheidungshilfen	7
2. Inhaltliche Gliederung und Organisation des Forschungsprogramms	9
2.1 Inhaltliche Gliederung	9
2.2 Organisation und Ablauf der ersten Programmphase	11
3. Kenntnisstand zu Wald und Klimawandel	13
3.1 Gliederung dieses Kapitels.....	13
3.2 Grundlagen: Wie sich das Klima und der Wasserhaushalt von Waldstandorten ändern.....	14
3.3 Auswirkungen des Klimawandels auf den Wald: Verbreitung der Baumarten, Wachstum, Mortalität, Verjüngung	22
3.4 Auswirkungen des Klimawandels auf den Wald: abiotische und biotische Störungen	27
3.5 Auswirkungen des Klimawandels auf Waldprodukte und -leistungen	29
3.6 Waldmanagement zur Milderung und Anpassung und dessen ökonomische Bewertung	33
3.7 Fazit: Kenntnisstand und Kenntnislücken.....	36
4. Folgerungen für das Waldmanagement.....	39
4.1 Nationale Ebene	39
4.2 Entwicklung von Anpassungsstrategien in anderen Ländern	40
4.3 Wissensbedarf zu Anpassungsstrategien.....	41
5. Folgerungen für die 2. Phase des Forschungsprogramms	42
5.1 Generelle Ausrichtung der 2. Programmphase	42
5.2 Forschungsthemen der 2. Programmphase.....	42
5.3 Umsetzung der Resultate des Forschungsprogramms in seiner 2. und 3. Phase.....	43
5.4 Organisation des Forschungsprogramms	44
6. Literatur	46
7. Anhang	51

Zusammenfassung

Der Klimawandel stellt langfristig wichtige Waldleistungen in Frage. Zu einer qualifizierten Beurteilung fehlt es aber an Grundlagenwissen. Um diese Wissenslücken zu füllen und Entscheidungshilfen zu erarbeiten, haben BAFU und WSL im Jahr 2009 das Forschungsprogramm «Wald und Klimawandel» lanciert. Die vorliegende Zwischensynthese fasst die Ergebnisse der ersten Programmphase (2009-2011) zusammen und skizziert die Inhalte der zweiten Programmphase (2012-2015).

Die meisten der 25 Forschungsprojekte im Forschungsprogramm sind noch nicht abgeschlossen, aber erste Resultate liegen vor und ermöglichen es, in Kombination mit Resultaten aus anderen Quellen, einzuschätzen, wie sich der Klimawandel auf den Wald und die Waldleistungen auswirken dürfte und wie wirksam Massnahmen zur Anpassung an ihn (Adaptationsmassnahmen) sind.

Eine Erwärmung findet statt und ist in der Schweiz im globalen Vergleich überdurchschnittlich ausgeprägt, da die ausgleichenden Effekte der Ozeane fehlen. Nach neuesten Klimaszenarien ist von einer Erwärmung um 2 bis 7 °C bis 2100 auszugehen. Bei der Verteilung der Niederschläge sind die Prognosen weniger sicher; ab etwa 2050 ist mit vermehrten und stärker ausgeprägten sommerlichen Trockenperioden zu rechnen.

Für den Wald ist die durchschnittliche Entwicklung von Temperatur und Niederschlag wahrscheinlich nicht entscheidend; stärker dürften sich vorerst extreme Witterungsereignisse wie Hitze- und Trockenperioden auswirken, wobei die Wälder und Standorte darauf unterschiedlich anfällig sind. Da sich der Klimawandel auf Verjüngung, Wachstum und Mortalität der Bäume auswirkt, dürfte es langfristig zu einer Umgestaltung des Waldes kommen. Die Auswirkungen auf die Waldleistungen hängen voraussichtlich stark von der Art und Häufigkeit von Störungsereignissen ab und sind räumlich und zeitlich stark unterschiedlich.

Massnahmen zur Anpassung an den Klimawandel sind aufgrund der bisherigen Resultate des Forschungsprogramms und der anderen verwendeten Quellen noch nicht konsolidiert. Vorläufig kann weiterhin der naturnahe Waldbau empfohlen werden, da er die Anpassungsfähigkeit des Waldes an den Klimawandel erhalten oder erhöhen dürfte. Spezifische Anpassungsmassnahmen dürften aber erforderlich werden, vor allem um die Risiken eines starken und raschen Klimawandels auffangen zu können. Der Wissensbedarf der Praxis ist erheblich. Neben einer besseren und differenzierten Abschätzung der Auswirkungen braucht die Praxis auch Bewertungen von Adaptationsstrategien. Dabei sind insbesondere der naturnahe Waldbau bzw. die einzelnen Massnahmen, mit denen er implementiert wird, zu überprüfen.

Die 2. Phase des Forschungsprogramms von 2012 bis 2015 soll wichtige verbleibende Wissenslücken schliessen. Die Abschätzung der Risiken des Klimawandels soll verfeinert und Adaptationsstrategien sollen entwickelt werden. Die Umsetzung der Resultate in die Praxis bekommt gegen Ende der 2. Programmphase grosses Gewicht. Es ist eine breite Palette von Produkten geplant, die sich an spezifische Zielgruppen richten.

Résumé

Les changements climatiques remettent en question certaines prestations forestières majeures, mais faute de connaissances élémentaires, il est impossible de faire une évaluation qualifiée. Pour combler ces lacunes et préparer des aides décisionnelles, l'OFEV et le WSL ont lancé en 2009 le programme de recherche intitulé « Forêt et changements climatiques ». La présente synthèse résume les résultats de la première phase (2009-2011) et trace les grandes lignes de la seconde (2012-2015).

Les 25 projets que compte le programme de recherche sont loin d'être tous achevés, mais les premiers résultats, combinés aux résultats d'autres sources, permettent d'estimer l'impact des changements climatiques sur la forêt et sur ses prestations ainsi que l'efficacité des mesures d'adaptation.

Le réchauffement est un fait avéré et il est nettement plus marqué en Suisse que dans d'autres pays qui bénéficient de l'effet équilibrant des océans. Les récents scénarios climatiques prévoient un réchauffement de 2 à 7 °C d'ici à 2100. Les prévisions sont toutefois moins certaines en ce qui concerne la répartition des précipitations; ainsi à partir de 2050 environ, il faut s'attendre à des périodes de sécheresse plus nombreuses et plus marquées en été.

Pour la forêt, cette évolution moyennes des températures et des précipitations ne sera vraisemblablement pas déterminante. Ce sont plutôt les événements extrêmes, comme les périodes de canicule et de sécheresse, qui devraient avoir les répercussions les plus importantes, toutefois les forêts et les stations ne sont pas toutes pareillement vulnérables. Comme les changements climatiques ont un impact sur le rajeunissement, la croissance et la mortalité des arbres, il faut s'attendre à long terme à une transformation de la forêt. L'impact sur les prestations forestières dépend probablement beaucoup du type des perturbations et de leur fréquence et varie fortement selon l'époque et le lieu.

Les mesures d'adaptation aux changements climatiques ne sont pas encore consolidées vu les résultats du programme de recherche et des autres sources utilisées. Il est possible pour le moment de continuer à recommander une sylviculture proche de la nature, car elle devrait maintenir voire accroître la capacité de la forêt à s'adapter aux changements climatiques. Des mesures d'adaptation spécifiques devraient toutefois être nécessaires, surtout pour réduire les risques de changements climatiques forts et rapides. Les besoins de connaissances sont énormes chez les praticiens. Il leur faut non seulement faire une estimation précise et différenciée des conséquences, mais aussi évaluer les stratégies d'adaptation, tout en vérifiant notamment les bienfaits de la sylviculture proche de la nature et des différentes mesures qui permettent de la pratiquer.

La seconde phase du programme de recherche, de 2012 à 2015, entend combler les importantes lacunes qui subsistent dans les connaissances. L'estimation des risques de changements climatiques sera affinée et les stratégies d'adaptation seront développées. La mise en pratique des résultats sera prépondérante vers la fin de cette phase du programme. Un large éventail de produits est prévu à l'intention des groupes cibles spécifiques.

Summary

Climate change puts critical forest services at risk over the long term. We lack, however, the information that would be necessary for a qualified assessment. To close these knowledge gaps and develop decision support tools, in 2009 the Federal Office for the Environment (FOEN) and the Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research (WSL) launched the joint research program 'Forests and climate change'. This progress report summarizes the conclusions of the first program phase (2009-2011) and outlines the content of the second phase (2012-2015).

Most of the 25 research projects in the research program are still ongoing, but initial results have already been obtained. These, together with findings from other sources, allow a preliminary assessment of how climate change will affect forests and forest services, and how effective adaptation measures are.

Global warming is an ongoing process, and is taking place in Switzerland at a rate considerably above the global average because the dampening effects of the oceans are absent. Based on the newest climate change scenarios one must assume that a warming of 2 to 7 °C will occur by 2100. The distribution of precipitation is less predictable, but more frequent and more severe summer droughts are expected to occur by roughly 2050.

The trends in average temperature and precipitation will probably be less decisive for forests than extreme weather conditions such as hot spells and summer droughts will be, although the vulnerability of particular forests and sites will differ. Because climate change affects the growth, mortality and regeneration of trees, it is likely to alter the composition of forests in the long term. Impacts on forest services are expected to strongly depend on the nature and frequency of disturbance events, and to vary greatly in space and time.

Measures for adapting to climate change have not yet been fully defined, either from the initial results of the research program or from other sources. For the time being, close-to-nature silviculture can be recommended because it is likely to maintain or enhance the forests' adaptive capacity in the face of climate change. However specific adaptation measures will probably become necessary, particularly to compensate for the risks of severe and rapid climate change. Forest practitioners' need for information is substantial. Practitioners need a better and more differentiated assessment of climate impacts and an assessment of adaptation strategies. Particular attention should be paid to a re-assessment of close-to-nature silviculture, and the individual measures with which it is implemented.

The second phase of the research program from 2012 to 2015 aims to close some of the relevant remaining knowledge gaps. Assessments of climate change risks need to be refined and adaptation strategies developed. Knowledge transfer will become more important towards the end of the second program phase. A broad variety of products, directed at particular target audiences, are planned.

Translation: S. Dingwall

1 Einleitung

Fazit

- Der Klimawandel stellt langfristig wichtige Waldleistungen in Frage. Zu einer qualifizierten Beurteilung fehlt es aber an Grundlagenwissen.
- Um diese Wissenslücken zu füllen, Ressourcen in der Forschung zu bündeln und Entscheidungshilfen zu erarbeiten, haben BAFU und WSL im Jahr 2009 gemeinsam das Forschungsprogramm «Wald und Klimawandel» lanciert.
- Die vorliegende Zwischensynthese fasst die Ergebnisse der ersten Programmphase (2009-2011) zusammen und skizziert die Inhalte der zweiten Programmphase (2012-2015).

1.1 Der Klimawandel stellt Waldleistungen in Frage

Seit 1970 hat sich die mittlere Lufttemperatur in der Schweiz um 1,5 °C erhöht, während die Menge der Niederschläge bisher unverändert blieb (OcCC 2008). Hauptgrund dafür ist mit grosser Wahrscheinlichkeit die zunehmende Konzentration von Treibhausgasen in der Erdatmosphäre (IPCC 2007). Die Erwärmung dürfte sich in den nächsten Jahrzehnten fortsetzen. Bis 2100 ist mit einer Zunahme der Sommertemperaturen von 2 bis 7 °C zu rechnen, und Hitzesommer wie derjenige von 2003 werden von der Ausnahme zur Regel (OcCC 2008). Zudem dürfte im Sommer deutlich weniger Niederschlag fallen, im Winter hingegen mehr (OcCC 2008). Neueste Schweizer Klimaszenarien bestätigen diese Trends im Wesentlichen (CH2011 2011).

Die Geschwindigkeit der Klimaänderung und die Geschwindigkeit natürlicher Anpassungsprozesse im Wald klaffen auseinander. Viele Lebewesen sind zwar an erhebliche Schwankungen der Umweltbedingungen angepasst. Die Anpassungsfähigkeit langlebiger Organismen – und damit auch der Waldbäume – an rasche Veränderungen könnte jedoch überfordert sein. Extremereignisse wie ausgeprägte Hitzeperioden bedeuten Stress für den Wald. Der Klimawandel könnte daher wichtige Waldleistungen in Frage stellen; zum Beispiel könnten die nutzbaren Holzvorräte und der Holzzuwachs insgesamt abnehmen. Solche Entwicklungen gilt es zu verhindern oder wenigstens einzudämmen. Es stellen sich Fragen wie: Was könnte passieren? Wie wahrscheinlich sind diese Entwicklungen? Was darf passieren, und wo sind Gegenmassnahmen nötig?

1.2 Das Forschungsprogramm «Wald und Klimawandel» erarbeitet Grundlagenwissen und Entscheidungshilfen

Das Waldmanagement des 21. Jahrhunderts steht vor der Herausforderung, die mit dem Klimawandel verbundenen Risiken einzuschätzen, die Anpassungsfähigkeit der Wälder wo nötig zu erhöhen und damit die Waldleistungen zu sichern. Dazu benötigen die Akteure fundiertes Grundlagenwissen und praxistaugliche Entscheidungshilfen. Vor diesem Hintergrund haben das Bundesamt für Umwelt (BAFU) und die Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL 2009 das Forschungsprogramm «Wald und Klimawandel» lanciert. Das Programm wird wichtige Grundlagen für die Teilstrategie Wald und Waldwirtschaft des Bundes

im Rahmen der Nationalen Adaptationsstrategie an den Klimawandel liefern und ist auch ein wichtiger Baustein der «Waldpolitik 2020» (BAFU 2011)¹.

Heute beschäftigen sich viele Forschende mit der Thematik «Wald und Klimawandel». Das Forschungsprogramm will dazu beitragen, dass vorhandene Ressourcen für Forschung zu «Wald und Klimawandel» genutzt und aktuelle Methoden verwendet werden, die Forschenden laufende Aktivitäten anderer Gruppen kennen sowie Doppelspurigkeiten vermieden und Möglichkeiten zu Folgeprojekten genutzt werden. Das Programm ist deshalb einzigartig, weil es sich interdisziplinär und schweizweit damit befasst. Erkenntnisse aus anderen nationalen und internationalen Forschungsprojekten werden mit einbezogen. Das Forschungsprogramm ist über die Mitarbeitenden in der nationalen und internationalen Forschungslandschaft vernetzt. Synergien und Wissensaustausch ergeben sich u.a. bei den in Tab. 1.2-1 genannten, ausserhalb des Programms durchgeführten Projekten.

Das Forschungsprogramm «Wald und Klimawandel» ist in Phasen gegliedert: Die in der ersten Phase (2009-2011) gestarteten Projekte sollen Grundlagenwissen erarbeiten. In der zweiten Phase (2012-2015) sollen verbleibende Wissenslücken geschlossen, Entscheidungshilfen erarbeitet und politische Folgerungen gezogen werden. Dazu gehören differenzierte Anpassungsstrategien, mit welchen sich alle gesellschaftlich wichtigen Waldleistungen dauerhaft mit vertretbaren Risiken sicherstellen lassen. Die dritte Phase (ab 2016) sieht den Abschluss letzter Forschungsarbeiten und die Umsetzung z.B. im Rahmen der NFA²-Programmvereinbarungen Jungwaldpflege vor.

Die vorliegende Zwischensynthese fasst die Ergebnisse der ersten Programmphase zusammen, identifiziert die verbleibenden Wissenslücken und zeigt auf, welche Fragen in der zweiten Phase von 2012 bis 2015 zu beantworten sind.

¹ www.bafu.admin.ch/wald/01152/11490, eingesehen 9.9.2011

² Neuer Finanzausgleich

2 Inhaltliche Gliederung und Organisation des Forschungsprogramms

Fazit

- Im Forschungsprogramm wurden bislang 25 Forschungsprojekte gefördert, die in fünf Workpackages gegliedert sind.
- Der Steuerungsausschuss des Programms ist für dessen strategische Ausrichtung zuständig, ein international besetztes Advisory Board berät ihn dabei. Die Programmleitung bereitet Entscheidungen vor und koordiniert die Arbeiten. Über die Bewilligung von Forschungsprojekten wurde aufgrund von thematischen Projektcalls mit Reviewverfahren entschieden.
- Kooperationen mit anderen Schweizer Projekten und europäischen Programmen ergänzen die Arbeiten.

2.1 Inhaltliche Gliederung

Das Programm ist in vier thematische Workpackages (WP 1 bis WP 4) und ein transversales Workpackage (WP 5) gegliedert.

WP 1: Grundlagen und Entwicklungsszenarien

Aufgrund von aktuellen Klimaszenarien wird die Klimaentwicklung mit einer räumlichen Auflösung von mindestens 100 m abgeschätzt, weil dies die für den Waldbau relevante räumliche Ebene ist. Auf der Grundlage von Klimaszenarien und deren Auswirkungen auf die Standorte (Wasserverfügbarkeit, Deposition) und auf die Bäume werden Waldentwicklungsszenarien berechnet. Für die Waldplanung besonders wichtig ist die Ausscheidung klimasensitiver Standorte und Bestände. Hierzu zählen sog. Grenzstandorte, durch Immissionen belastete Bestände, Bestände mit hohen Fichtenanteilen etc.

WP 2: Auswirkungen auf Waldleistungen und Ressourcen

Ziel ist die Abschätzung der Waldleistungen unter veränderten Umweltbedingungen. Hierzu zählen Fragen nach der künftigen Produktivität des Waldes und der Verfügbarkeit der Holzressourcen, seiner Schutzwirkung gegen Naturgefahren, der Waldbiodiversität sowie dem Grundwasserschutz und der Kohlenstoff-Senkenleistung.

WP 3: Störungen und Frühwarnung

Die Auswirkungen des Klimawandels auf biotische Störungen (Insekten und Pilze) sowie auf abiotische Störungen (Sturm, Waldbrand) werden abgeschätzt. Ziel ist die Klärung der Prozessketten, die zu Kalamitäten führen, und darauf aufbauend die Entwicklung von Frühwarnsystemen.

Tabelle 1.2-1. Auswahl von ausserhalb des Forschungsprogramms durchgeführten Forschungsprojekten zur Thematik «Wald und Klimawandel».

Akronym Laufzeit	Titel	Beteiligte Institutionen; Finanzierung	Fragestellung/Ziel
BACCARA 2009-2012	Biodiversity And Climate Change, A Risk Analysis	15 europäische Part- ner; 7. Forschungs- Rahmen Programm der EU	Entscheidungshilfen für Waldbesitzer und Politiker, um Klimawandel be- dingte Verluste an Waldbiodiversität und -produktivität zu vermeiden
MOTIVE 2009-2013	Models For Adaptive Forest Management	15 europäische Part- ner; 7. Forschungs- Rahmenprogramm der EU	Adaptive Managementstrategien be- züglich Klimawandel und Landnut- zungsänderungen für diverse Wald- produkte und Waldleistungen
ECHOES 2008-2012	Expected Climate Change and Options for European Silviculture	COST-Action FP0703; EU finanziert	Wissen zum Klimawandel für forstpoli- tische Entscheidungsträger nutzbar machen, um Mitigation und Anpassung zu verbessern
ALPFFIRS 2009-2012	Alpine Forest Fire Warning System	Alpine Space Programme; EU finanziert	Verbesserung der Waldbrandpräven- tion im Alpenraum durch ein wetter- basiertes Alarmierungssystem
TREELIM 2009 -	Climatic limits of European broad- leaved tree taxa	European Research Council (ERC)	Ursachen der oberen Verbreitungs- grenze von mitteleuropäischen Laub- baumarten
ECOWAT 2009-2012	Impacts of changing drought conditions on catchment ecolo- gy and water cycle	Swiss National Sci- ence Foundation, NCCR-Climate	Auswirkungen von CO ₂ und Extrem- ereignissen auf den Wasserhaushalt der Waldbäume
MANFRED 2009-2012	Management Strate- gies To Adapt Alpine Space Forests To Climate Change Risk	Interreg Alpine Space Programme, EU finanziert	Anpassungsstrategien zum Umgang mit Auswirkungen des Klimawandels im Wald
EVOL- TREE 2006 -	Evolution of trees as drivers of terrestrial biodiversity	Network of Excellence, 6. Forschungs-Rah- menprogramm der EU	Genetische Variation und Evolution in Wald-Ökosystemen
Mountland 2009-2012	Sustainable land-use practices in mountain regions	CCES ETH	Adaptierte Methoden für eine nach- haltige Landnutzung in Bergregionen inkl. innovativer politischer Lösungen
BüWaK 2009-2011	Bündnerwald im Kli- mawandel	Amt für Wald und Naturgefahren Kanton GR und WSL	Auswirkungen des Klimawandels und insbes. der Trockenheit auf den Wald im Churer Rheintal und Domleschg
Alcotra 2009-2011	Perturbations et sta- bilité des forêts de protection	Interreg IT-CH	Erarbeiten von Grundlagen für die Bewirtschaftung von Schutzwäldern unter Einbezug des Klimawandels
2010-2011	Analyse klimabe- dingter Risiken in der Schweiz	BAFU, Ernst Basler + Partner, SLF/WSL	Analyse klimabedingter Risiken und Chancen in Fallstudien als Grundlage für die nationale Adaptationsstrategie
2003 -	Bewässerungs- experiment im Pfywald	BAFU, HYDRO, Kan- ton VS, Exploitation SA, Bürgergde. Leuk, ETH, Velux, WSL	Waldföhrensterben, mit Fokus auf Wachstums- und Überlebensstrategien der Föhre an einem extremen Troc- kenstandort
2009-2012	Buchen aus dem Mittelmeerraum im Schweizer Wald	SHL Zollikofen, Staats- sekretariat für Bildung und Forschung (SBF)	Trockenresistenz und Etablierung von Buchenprovenienzen aus dem Mittel- meerraum
CASTS 2008-2011	Competitive Ability and Site sensitivity of Tree Species	WSL, BAFU	Wachstumsreaktionen von Haupt- baumarten: Wechselwirkungen zwi- schen Klima und Boden
2008 -	Regendachanlage in Leuk/Susten (Wallis)	WSL	Einfluss des Klimas und der interspe- zifischen Konkurrenz auf die Verjüng- ung von Flaumeiche, Waldföhren- und Schwarzföhren-Provenienzen

WP 4: Adaptationsstrategien

Es werden Adaptationsstrategien entwickelt, mit denen sich klimabedingte Risiken für Waldleistungen vermindern lassen. Diese Strategien sollen räumlich und zeitlich differenziert sein. Sie beinhalten u.a. Baumarten-Portfolios für verschiedene Entwicklungsszenarien.

WP 5: Transversales WP «Experimente»

In WP 5 werden, oft in internationalen Kooperationen, wissenschaftliche Experimente unter Einbezug der Forstpraxis durchgeführt. Sie dienen der Schaffung von Grundlagen für waldbauliche Entscheidungen zur Baumartenwahl.

Assoziierte Projekte

Aufgrund der begrenzten finanziellen Mittel für die vielfältigen Aufgaben wurde von Beginn an die Kooperation mit anderen Einheiten des BAFU gesucht, die nun Projekte fördern, die eher in ihren Zuständigkeitsbereich fallen (Abteilungen «Gefahrenprävention» sowie «Arten, Ökosysteme und Landschaft»). Die Leiter assoziierter Projekte sind in das Forschungsprogramm eingebunden, d.h. sie nehmen an den Veranstaltungen teil und profitieren so vom Wissensaustausch. Im Gegenzug liefern sie Beiträge zur Ergebnissynthese, die dem ganzen Programm zugute kommen.

2.2 Organisation und Ablauf der ersten Programmphase

Die organisatorische Struktur des Forschungsprogramms ist in Abb. 2.2-1 dargestellt. Der Steuerungsausschuss wird vom BAFU geleitet (R. Manser, Chef der Abteilung Wald) und besteht aus Vertretern des BAFU (C. Kächli), der WSL (J. Kirchner, Direktor der WSL) und der Kantone (U. Meier, Präsident der Kantonsoberrforsterkonferenz). Der Steuerungsausschuss bestimmt die Inhalte des Programms, setzt die Programmleitung ein und genehmigt die Projekte. Zudem übernimmt er die übergeordnete politische Interpretation der Ergebnisse sowie die Kommunikation mit Praxis, Politik und Öffentlichkeit. Das international zusammengesetzte Advisory board (M. Lindner, EFI, Joensuu; M. Lexer, BOKU, Wien; K. Butterbach-Bahl, IMK, Karlsruhe Inst. of Technology; Marc Hanewinkel, Universität Freiburg (bis März 2011); J. Bauhus, Universität Freiburg (ab April 2011) steht dem Steuerungsausschuss beratend zur Seite. Der Steuerungsausschuss ist in engem Kontakt mit dem «Wald-Forum», was den Informationsfluss in die Wald- und Holzwirtschaft, Umweltorganisationen sowie Lehre und Forschung gewährleistet.

Die Programmleitung i.e.S. besteht aus je einem Vertreter der WSL (P. Brang) und des BAFU (S. Augustin), zur Programmleitung i.w.S. gehören zusätzlich ein Vertreter der Kantone (R. Hefti) und die Workpackage-Leiter (N. Zimmermann, E. Thürig, T. Wohlgemuth, B. Wermlinger, B. Pauli). Die Assistenz der Programmleitung wird durch J. Born wahrgenommen. Die Programmleitung koordiniert die Forschung zwischen den beteiligten Forschergruppen. Die Programmleitung i.e.S. erarbeitet Vorschläge für die thematischen Calls, organisiert die Evaluation der Projekteingaben durch externe Gutachter, bereitet die Entscheide des Steuerungsausschusses vor, setzt dessen Entscheide operationell um, trägt die Budgetverantwortung und erstattet dem Steuerungsausschuss regelmässig Bericht. Die Workpackage-Leiter sind zuständig für die Koordination der Forschung in ihrem jeweiligen Workpackage.

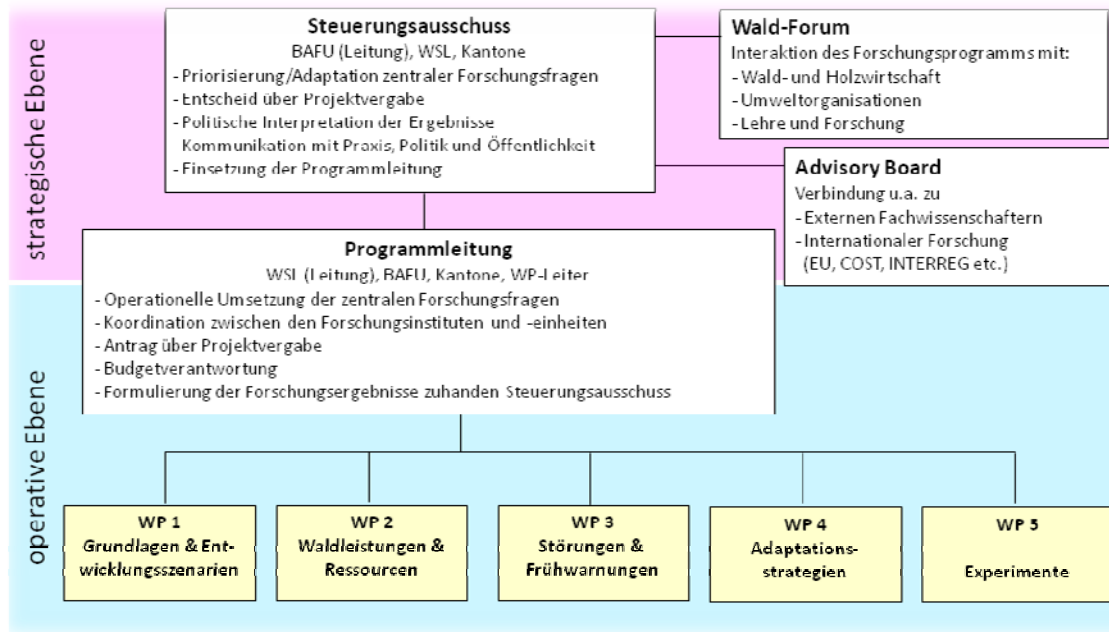


Abbildung 2.2-1. Organigramm des Forschungsprogramms.

Die Zusammenarbeit zwischen BAFU und WSL ist vertraglich geregelt. In der Periode 2009 bis 2011 stellte das BAFU 3,6 Mio. CHF für das Forschungsprogramm bereit. Die Mittel des BAFU stellen eine Teilfinanzierung des Forschungsprogramms dar. Sie werden kombiniert mit Eigenmitteln der WSL (rund 2,2 Mio. CHF) und anderer Forschungsinstitutionen sowie mit weiteren Beiträgen (Kantone, nationale und internationale Forschungsförderung, Stiftungen etc.; rund 3,3 Mio. CHF). Derzeit werden 25 Projekte finanziert (Tab. 7-1 im Anhang), wobei die Beiträge pro Projekt zwischen 50'000 und 310'000 CHF liegen. Die Programmleitung i.e.S. steuert die Einzelprojekte über vertraglich vereinbarte Meilensteine, bei deren Bewilligung vorbestimmte Finanztranchen ausbezahlt werden.

Bislang traf sich der Steuerungsausschuss sieben Mal, die gesamte Programmleitung vier Mal. Zu Spezialthemen wurden mehrere «Runde Tische» mit externen Experten und Projektteams durchgeführt. Zu zwei Projektkalls wurden insgesamt 56 Projektanträge eingereicht, von denen 25 ganz oder teilweise bewilligt wurden.

3 Kenntnisstand zu Wald und Klimawandel

Fazit

- Die meisten Projekte im Forschungsprogramm sind noch nicht abgeschlossen. Dennoch ermöglichen es erste Forschungsergebnisse sowie Ergebnisse aus anderen Quellen einzuschätzen, wie sich der Klimawandel auf den Wald und die Waldleistungen auswirken dürfte sowie wie Anpassungsmassnahmen zu beurteilen sind.
- Eine Erwärmung ist im Gange und in der Schweiz im globalen Vergleich überdurchschnittlich ausgeprägt. Aufgrund mittlerer Klimaszenarien ist gegenüber den letzten 30 Jahren von einer weiteren Erwärmung um 2,7 bis 4,1 °C bis gegen Ende des 21. Jahrhunderts auszugehen. Beim Niederschlag ist die Entwicklung weniger sicher; ab etwa 2050 ist mit vermehrten und stärker ausgeprägten sommerlichen Trockenperioden zu rechnen.
- Für den Wald dürfte nicht nur die durchschnittliche Klimaentwicklung entscheidend sein; einschneidender dürften sich vorerst extreme Witterungsereignisse wie Hitze- und Trockenperioden oder ökologische Störungen auswirken.
- Ein geändertes Klima wirkt sich direkt auf Wachstum, Mortalität und Verjüngung der Bäume aus und dürfte langfristig zu einer Umgestaltung vieler Wälder führen. Störungsereignisse dürften zu abrupten Veränderungen führen, wobei Wälder und Standorte unterschiedlich anfällig sind.
- Die Auswirkungen auf die Waldleistungen dürften stark mit Störungsereignissen zusammenhängen und räumlich und zeitlich sowie je nach Waldleistung stark unterschiedlich sein.
- Anpassungsmassnahmen an den Klimawandel sind noch nicht konsolidiert. Der naturnahe Waldbau dürfte die Anpassungsfähigkeit des Waldes an den Klimawandel erhalten oder erhöhen und kann damit generell weiterhin empfohlen werden. Einzelne Anpassungen dürften aber zur Risikominderung oder zur Erhaltung bestimmter Waldleistungen nötig werden.
- Einige identifizierte Kenntnislücken sollen in Phase 2 des Forschungsprogramms (2012-2015) geschlossen, und es soll mit der Entwicklung von Instrumenten zur Entscheidungsfindung begonnen werden. Themen sind die geostatistische Modellierung von Bodeneigenschaften, die Anfälligkeit von Standorten und Beständen gegenüber Klimawandel inkl. Sturmrisiken, die genetische Variation der Waldbäume und ihrer Anpassungsfähigkeit und differenzierte waldbauliche Anpassungsstrategien.

3.1 Gliederung dieses Kapitels

In diesem Kapitel werden wichtige Erkenntnisse aus den vom Programm geförderten sowie aus weiteren Projekten dargestellt. Nach einem Grundlagenkapitel zu Klima und Böden (Kap. 3.2) behandeln drei Unterkapitel die Auswirkungen des Klimawandels («Impacts», Kap. 3.3 bis 3.5), eines die Abmilderung («Mitigation») und die Anpassung («Adaptation», Kap. 3.6; Abbildung 3.1-1). Danach gewichten wir den Kenntnisstand und die Kenntnislücken (Kap. 3.7). Zu berücksichtigen ist, dass viele Projekte zum Zeitpunkt der Abfassung dieses Berichts etwa bei Halbzeit angelangt sind (Tabelle 7-1).

In jedem der Unterkapitel 3.2 bis 3.6 werden der Kenntnisstand, die im Forschungsprogramm untersuchten Fragen, die wichtigsten Forschungsergebnisse und die bleibenden offenen Fragen dargestellt.

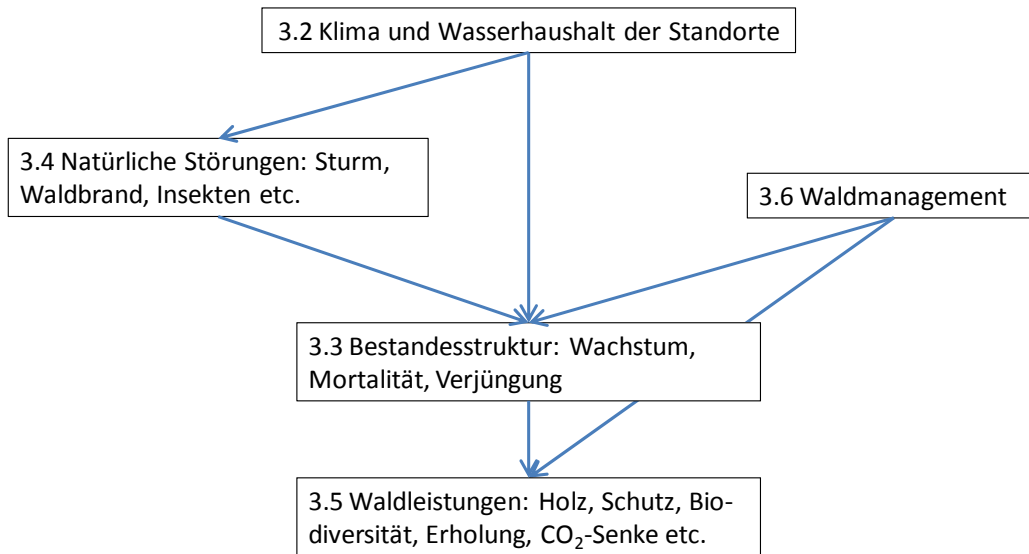


Abbildung 3.1-1. Gliederung der Darstellung des Kenntnisstandes in Kap. 3.

3.2 Grundlagen: Wie sich das Klima und der Wasserhaushalt von Waldstandorten ändern

Kenntnisstand

Bisherige Klimaentwicklung. – Das Klima in der Schweiz ändert sich. Gemäss einer Übersichtspublikation (OcCC 2008) nahm die mittlere Temperatur seit 1970 bis heute um 1,5 °C zu, wenn ein linearer Temperaturtrend angenommen wird. Die Jahresniederschläge hingegen blieben gegenüber der Periode 1961-1990 gesamthaft unverändert (OcCC 2008), wobei es regionale und jahreszeitliche Abweichungen gibt. Für die Messstation Zürich ist seit 1891 eine Zunahme der Spitzen-Windgeschwindigkeiten belegt (Usbeck et al. 2010).

Szenarien sind keine Vorhersagen. – Die folgenden Aussagen zur Klimaentwicklung sind als Szenarien und nicht als exakte Vorhersagen zu verstehen. Sie beruhen auf den besten verfügbaren Klimamodellen. Gegen Ende des 21. Jahrhunderts nimmt die Unsicherheit der Schätzungen zu (CH2011 2011).

Das zukünftige Klima wird sehr wahrscheinlich wärmer, trockener und extremer. – Das zukünftige Klima ist – vor allem in den Sommermonaten – im Vergleich zu heute wärmer, trockener und extremer. Bei Annahme des A1B-Emissionsszenarios ist für die Schweiz im Vergleich zur Periode 1980-2009 bis zur Periode 2020-2049 mit einer weiteren Erwärmung von rund 0,9-1,4 °C, bis 2070-2099 hingegen von bereits 2,7-4,1 °C zu rechnen (CH2011 2011). Die Erwärmung ist konsistent für alle Saisons, Regionen und Emissionsszenarien, und sie hängt bis etwa 2035 auch kaum vom gewählten Emissionsszenario ab. Für die Periode 2070-2099 spielt dann das Emissionsszenario eine grosse Rolle; die mittleren Schätzungen variieren dann zwischen 1,2-1,8 °C (für ein starkes CO₂-Reduktionsszenario) und 3,2-4,8 °C (für das A2-Szenario). Dabei ist von der vorindustriellen Zeit bis zur Periode 1980-2009 bereits von einer Erwärmung um etwa 1,5 °C auszugehen (Begert et al. 2005). Die Niederschlags-Schätzungen sind wesentlich unsicherer als die Temperaturschätzungen, und bis in die Periode 2020-2049 zeigt sich kein klarer Trend. Später ist für die Sommermonate Juni, Juli und August mit einer Abnahme zu rechnen; je nach Region um 10-17% für die Periode 2045-2074 und um 18-24% für die Periode 2070-2099 (CH2011 2011). Extreme Witterungsereignisse dürften insgesamt häufiger werden. Gegen Ende des 21. Jahrhunderts dürften sommerliche Hitzewellen

häufiger und intensiver sein und länger andauern, während tiefe Wintertemperaturen seltener werden. Sommerliche Trockenperioden dürften ebenfalls häufiger werden (CH2011 2011).

Extremereignisse sind folgenschwer. – Auf Waldökosysteme dürften sich die Langfristrends der durchschnittlich zunehmenden Erwärmung und Sommertrockenheit erst sehr langfristig auswirken. Folgenschwerer dürften die zunehmend häufigeren Extremereignisse wie Hitzewellen werden, welche die Wälder unmittelbar unter Stress setzen.

Das Waldinnenklima ist ausgeglichener als das Freilandklima. – An Klimastationen wird standardmässig das Wetter im Freiland gemessen. Im Allgemeinen weicht das Waldinnenklima davon wie folgt ab: Es ist nachts wärmer und tagsüber kühler; es ist generell luftfeuchter, ausser nach langen Trockenperioden; Niederschläge sind wegen der Interzeption³ reduziert (bis 50%) und v.a. in alten Beständen sehr unregelmässig verteilt; der Lichteinfall ist stark reduziert, sehr variabel und der Anteil der diffusen Strahlung nimmt in Bodennähe zu.

Aussagen zum Wasserhaushalt des Bodens sind wichtig. – Trockenheit ist das Ergebnis eines Zusammenwirkens von Niederschlag, Speichervermögen des Bodens, Vegetation sowie von Strahlung und Verdunstung. Aus diesen Grössen kann der Verlauf des Wasserangebotes für Wälder berechnet werden und damit auch das Auftreten von Trockenheit. Trockenperioden lassen sich mit verschiedenen Indizes beschreiben und quantifizieren. Mittels Klimaszenarien sind auch Prognosen künftiger Ereignisse möglich. Für die Landschaftsebene sind oft einfache Angaben zum Bodenspeicher ausreichend, z.B. aus der Bodeneignungskarte (Bundesamt für Statistik & Bundesamt für Landwirtschaft 2000).

Im Forschungsprogramm untersuchte Fragen

Im Projekt «PorTree» (Zimmermann et al.) werden räumlich hoch aufgelöste Klimaszenarien für den Alpenraum und sein Umland sowie Klimahüllen für die wichtigsten Schweizer Baumarten entwickelt. Im Projekt «Below canopy climate» (Rebetez et al.) wird untersucht, wie sich der Klimawandel und die Waldstruktur auf das Mikroklima im Waldinneren auswirken. Im Projekt «Trockenheits-Indizes» (Remund et al.) werden aufgrund von detaillierten Bodendaten von rund 1000 Profilen Indizes getestet und regionalisiert, mit denen sich der Wasserhaushalt von Waldböden grob abbilden lässt. Mit dem Modell ForSAFE (Projekt Kurz et al.) sollen der Wasserhaushalt und die Nährstoffflüsse bei unterschiedlichen Klimaszenarien simuliert und eine Regionalisierung vorbereitet werden. Im Projekt «Nitrate Leaching» (Waldner et al.) werden Indikatoren gesucht, um die Risiken einer Nitratauswaschung abschätzen und regionalisieren zu können.

Wichtigste Forschungsergebnisse

«Downscaling» zur Regionalisierung von Klimaszenarien. – Klimaszenarien basieren auf einer Modellierung der atmosphärischen Zirkulation, bei der die atmosphärischen, wetterbestimmenden Prozesse im globalen Massstab abgebildet werden. In Gebieten mit starken regionalen Klimaunterschieden sind sie sehr ungenau. Seit etwa 2004 wird daher vermehrt versucht, globale Zirkulationsmodelle (GCM) anhand von regionalen Zirkulationsmodellen (RCM) räumlich detaillierter aufzulösen und damit den lokalen, klimarelevanten Unterschieden der Topographie besser Rechnung zu tragen (so genanntes «physikalisches Downscaling»). Derartige Modelle haben eine räumliche Auflösung von 15-30 km, was immer noch sehr grob ist für regionale und lokale Anwendungen. Sie stellen aber zurzeit die einzige Möglichkeit dar,

³ Abfangen bzw. Zurückhalten von Niederschlägen auf der Oberfläche der Vegetation

auf physikalischer Basis die Wetterentwicklung auf die regionale Ebene zu bringen. Um diese Modelle räumlich noch feiner aufzulösen und damit für Analyse und Planung relevante Aussagen zu ermöglichen, werden die Daten der RCMs mittels statistischen Methoden («statistisches Downscaling») auf eine räumliche Auflösung von z.B. 100 m x 100 m oder auf einzelne Punkte heruntergerechnet. Dieses Verfahren wird etwa von MeteoSchweiz verwendet, um regionale Klimaszenarien auf Klimastationen herunterzurechnen. Die weiter unten dargestellten Klimakarten aus dem Projekt «PorTree» wurden ebenfalls auf diese Weise hergeleitet.

Mehrere Modellvarianten für das Szenario A1B. – Für viele Projekte im Programm Wald und Klimawandel sind räumlich hoch aufgelöste Szenarien der langfristigen Klimaentwicklung eine wichtige Grundlage. Es ist allerdings nicht möglich, qualifiziert einzuschätzen, welches Szenario mit welcher Wahrscheinlichkeit eintritt. Man behilft sich daher damit, die langfristigen Trends zu erfassen, inkl. Extremwerten, welche sich auf die Wälder stark auswirken könnten. Im Programm wurde entschieden, von nur einem Szenario (A1B, mit einer mittleren Erwärmung für die Schweiz bis 2100 von rund 3,5 °C) auszugehen, davon aber auf regionaler Ebene drei Modellvarianten mit schwächerer, mittlerer und starker Erwärmung zu verwenden, was auch mit schwächerer, mittlerer und stärkerer Tendenz zu Sommertrockenheit verbunden ist. Die Gründe für die Beschränkung auf das A1B-Szenario waren: (1) Daten von neueren RCMs liegen vorwiegend für das A1B-Szenario vor und kaum für andere Szenarien; (2) die Simulationen einzelner Modelle unterscheiden sich sehr stark voneinander, so dass es kaum einen Unterschied macht, ob man zwei unterschiedliche Modelle oder zwei Szenarien eines Modells rechnet. Zumindest die Resultate des EU-Projekts ENSEMBLE zeigen, dass sich die wenigen zusätzlich gerechneten Szenarien (A2, B1, B2) innerhalb der Bandbreite des A1B-Szenarios, berechnet mit verschiedenen Modellen, bewegen. Die B1- und B2-Szenarien liegen am unteren Rand, das A2-Szenario am oberen Rand der simulierten Temperaturentwicklung. Das A1B-Szenario wird auch in den neuesten Schweizer Klimaszenarien als Berechnungsgrundlage verwendet (CH2011 2011). Für das Forschungsprogramm wurden herunterskalierte Resultate von sieben regionalen Klimamodellen für das globale A1B-Szenario sowie teilweise für ein bis zwei zusätzliche Szenarien berechnet (Tabelle 3.2-1).

Trockenere Sommer und feuchtere Winter. – Winter- und Sommerniederschläge dürften sich in der Schweiz bis ins Jahr 2100 abweichend entwickeln: Während die Winterniederschläge tendenziell zunehmen, gehen die Sommerniederschläge zurück (Abbildung 3.2-1). Diese generellen, europa-weiten Trends (Ausnahme Skandinavien) zeigen sich auch in der Schweiz (Abbil-

Tabelle 3.2-1. Übersicht über die verfügbaren herunterskalierten Klimadaten mit Angabe des zugrunde liegenden regionalen Klimamodells und des Klimaszenarios. Quelle: Projekt Zimmermann et al.

RCM-Modell	GCM-Modell	Szenario			
		A1B	A2	B1	B2
CLM ^a	ECHAM5	x	x	x	
RACMO2 ^b	ECHAM5	x			
HADRN3 ^c	HadCM3	x			
HIRHAM3 ^d	Arpège	x			
RCA30 ^e	CCSM3	x	x		x
RCA30 ^e	HadCM3	x			
RCA30 ^e	ECHAM5	x	x	x	

Die folgenden Institutionen haben die Simulationen durchgeführt: a: MPI (Max-Planck-Institut, Hamburg); b: KNMI (Royal Netherlands Meteorological Institute); c: HC (Hadley Centre); d: DMI (Danish Meteorological Institute); e: SMHI (Swedish Meteorological and Hydrological Institute)

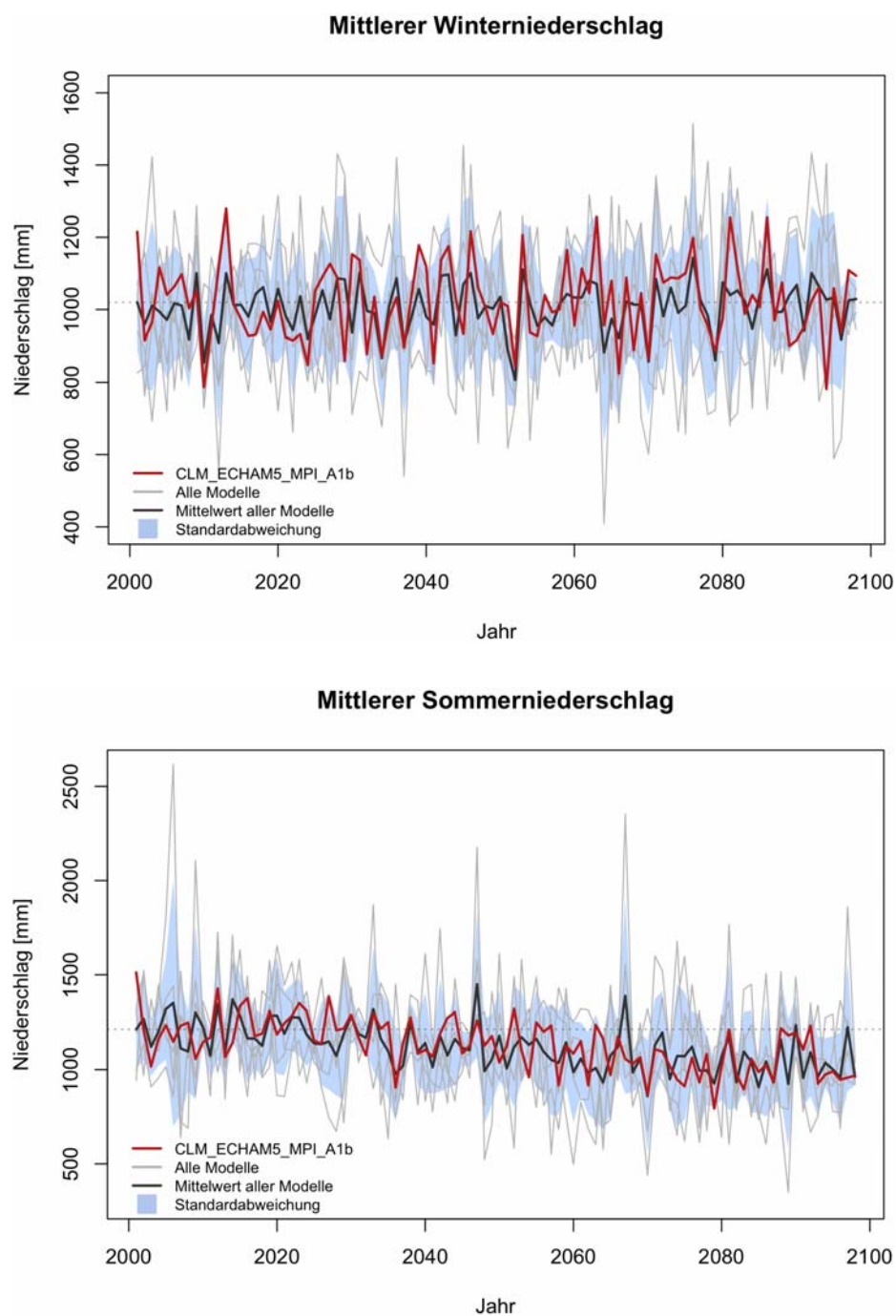


Abbildung 3.2-1. Entwicklung der Winter- (oben) und Sommerniederschläge (unten) in der Schweiz gemäss Simulationen von sechs regionalen Klimamodellen für das A1B-Szenario (graue Linien) für die Jahre 2001-2100. Die rote Linie steht für das CLM-Modell, welches mittels ECHAM5 gerechnet wurde. Dieses Modell wurde als Basismodell ausgewählt, weil es die mittlere zu erwartende Klimaänderung für Temperatur und Niederschlag darstellt. Die schwarze Linie symbolisiert die mittlere Entwicklung über die Zeit, die blaue Schattierung stellt ± 1 Standardabweichung der Niederschlagssummen für Winter und Sommer dar. Die Variabilität bleibt während des 21. Jahrhunderts in etwa gleich, ist aber im Sommer periodisch wesentlich höher als im Winter. Quelle: Projekt Zimmermann et al.

dung 3.2-2). In Europa wird der Norden generell nasser, während der Süden gemäss den meisten Simulationen insbesondere im Sommer wesentlich weniger Niederschläge erhalten wird. Auffallend ist zudem, dass für die Schweiz bereits die Frühjahrsmonate März und April trockener ausfallen können (nicht dargestellt). Dieser Trend variiert allerdings stark von Modell zu Modell. Die aufgrund neuester Berechnungen aktualisierten Klimaszenarien für die Schweiz bestätigen die generellen Trends für Temperatur und Niederschlag (CH2011 2011).

Das Waldinnenklima ist ausgeglichener als das Freilandklima. – Für 14 LWF⁴-Flächen wurden Lufttemperatur und -feuchtigkeit im Bestand und im Freiland anhand 14jähriger kontinuierlicher Messreihen verglichen (Projekt «Below canopy climate», Rebetez et al.; von Arx et al. unveröff.). Die Beschirmung dämpfte die Temperaturen im langjährigen Mittel je nach Bestandessituation und Jahreszeit um bis zu 3,4°C bzw. erhöhte die Luftfeuchtigkeit um bis zu 12,4%. Diese ausgleichenden Effekte waren während der Vegetationsperiode am ausgeprägtesten, und hier besonders während warmen und trockenen Perioden. In Hochlagen- und Föhrenwäldern waren die Unterschiede zwischen Wald und Freiland geringer.

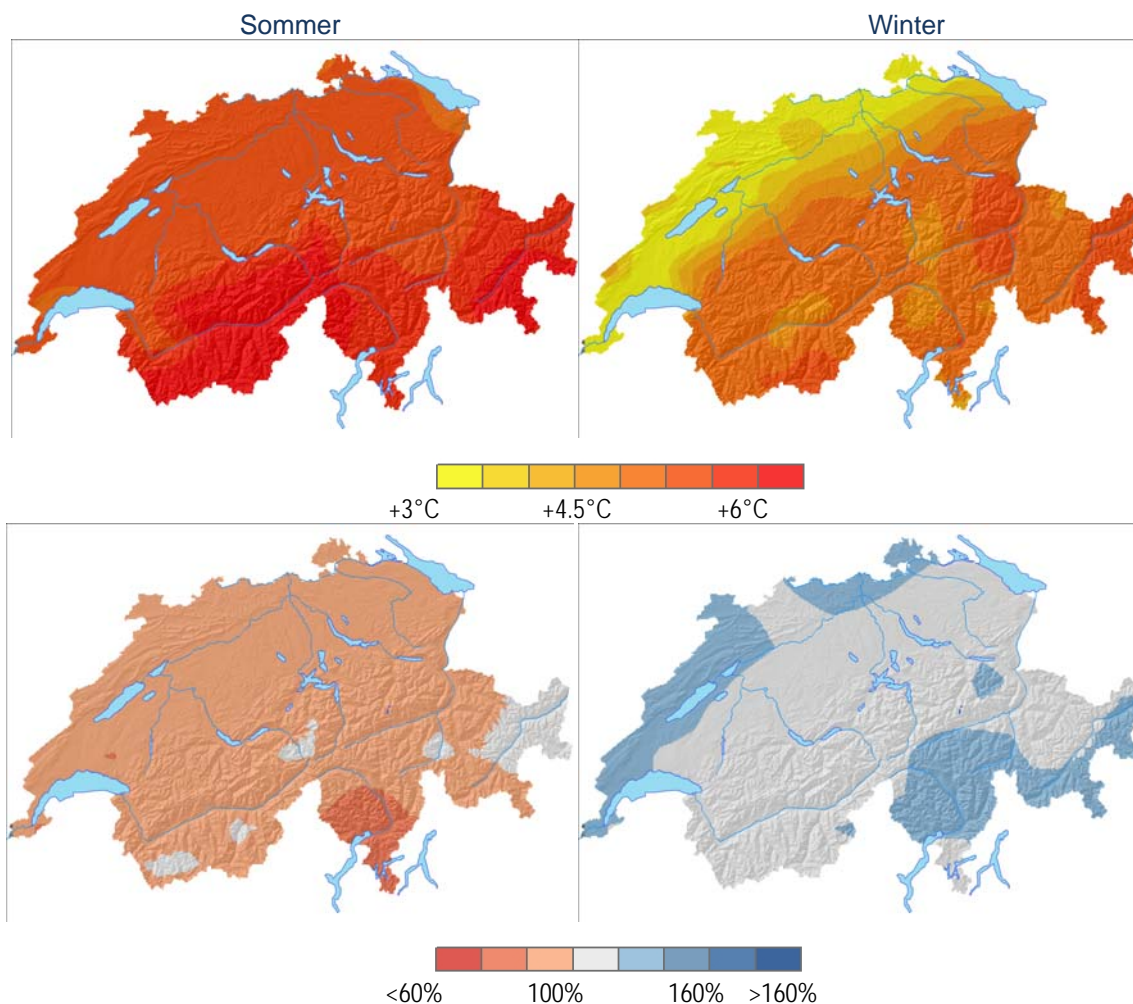


Abbildung 3.2-2. Mittlere Abweichungen der Temperaturen (oben) und Niederschläge (unten) in der Schweiz in der Periode 2091-2100 von der Periode 1961-1990 für Sommer- (April-September) und Winterhalbjahr (Oktober-März). Dargestellt ist das CLM/ECHAM5 Klimamodell mit Klimaszenario A1B, welches als Basismodell für das Programm verwendet wurde.

⁴ Langfristige Waldökosystem-Forschung

Berechnung von Trockenheits-Indizes. – Im Projekt «Trockenheits-Indizes» (Remund et al.) wurde der Trockenstress für Waldstandorte berechnet. Basis der Berechnungen waren Klimadaten der Periode 1975 bis 2010, Angaben zum Boden, Gelände- und Strahlungsmodelle. Die Indizes wurden für die ganze Schweiz in Karten dargestellt (Berechnung auf Grundlage der Bodeneignungskarte). Zudem wurde deren Verteilung in rund 20 Wald-Standortstypen gemäss der NaiS-Klassifikation (Frehner et al. 2005) dargestellt (Berechnung aufgrund von Bodenprofilen). Es wurden mehrere Trockenstress-Indizes berechnet. Als geeignetste Indizes für die weiteren Analysen wurden ausgewählt:

- die relative Evapotranspiration (ET_a/ET_p). Sie ist das Verhältnis der aktuellen (ET_a) zur potentiellen (ET_p) Evapotranspiration. Das Verhältnis ist ein Mass für die Reduktion der Wasserverfügbarkeit bei zunehmender Trockenheit. Der berechnete Index wurde für eine Periode von 36 Jahren berechnet (Tageswerte und Monatsmittel).
- Die klimatische Wasserbilanz mit Bodenmodul (soil water balance = SWB_x), für welche der Ansatz von Grier & Running (1977) modifiziert wurde (Berechnung von ET_p nach Romanenko anstatt Turc). Der Index basiert auf Mittelwerten aller jährlichen Werte.
- ein komplexer Index der relativen Baumverdunstung (T_a/T_p), welcher die potentielle (T_p) und die aktuelle (T_a) Baumverdunstung quantifiziert, basierend auf der Annahme einer Durchwurzelungstiefe von 1 m. Der Index wurde nach der ET_p -Methode von Shuttleworth berechnet und basiert auf einem Mittelwert der jährlichen Tagesminima.

Eine flächenhafte Modellierung von zwei Trockenheits-Indizes zeigt trockene und feuchte Gebiete. – Die zwei am besten geeigneten Indizes sind in Abbildung 3.2-3 für die Schweiz und die Periode 1981-2010 dargestellt, für den trockensten Monat August. Als Grundlage für die Modellierung diente dabei die Bodeneignungskarte, aus der die nutzbare Feldkapazität abgeleitet wurde. Die relative Evapotranspiration (Abb. 3.2-3 oben) wird stark von klimatischen Bedingungen beeinflusst; trocken sind das Wallis, weniger ausgeprägt auch der Jura-Südfuss. Die Karte der Standortwasserbilanz (site water balance – SWB in Abb. 3.2-3 unten) widerspiegelt stark die Wasserspeicherkapazitäten gemäss Bodeneignungskarte. Am trockensten sind die zentralalpiner Täler und der Jura-Südfuss. Zudem sind die Kalkböden der Voralpen sowie die flachgründigen inneralpiner Böden (z.B. Oberhasli) relativ trocken. Die tiefgründigen Böden des Mittellandes weisen dagegen – auch im hier dargestellten August – stark positive Bilanzen von oft über 200 mm auf. Diese Indizes können mit Klimaszenarien auch für die Zukunft berechnet werden.

Mit Standortkartierungen könnte der Trockenstress flächendeckend abgeschätzt werden. – Die zwei Indizes wurden auch für rund 1000 Bodenprofile berechnet und nach NaiS⁵-Standortstypen (Frehner et al. 2005) gruppiert, weil die Profilanzahl für viele Standortstypen ungenügend gewesen wäre. Die Trockenstressindizes unterscheiden sich zwischen den 20 Gruppen von NaiS-Standortstypen deutlich (Abbildung 3.2-4). Die Streuung innerhalb jeder Standortstypengruppe ist allerdings erheblich, was durch die unterschiedlichen Bodenverhältnisse bedingt ist. Eine flächenhafte Regionalisierung der Trockenstressindizes mittels Standortkartierungen, die in den Kantonen AG, AR, BS/BL, FR, GE, LU, SG, SH, SO, TG, ZG, ZH flächendeckend vorliegen, scheint daher grundsätzlich ein gangbarer Weg zu sein, um Trockenheitsrisiken für Wälder einzuschätzen.

Bodenchemismus. – Mit dem Modell ForSAFE (Projekt Kurz et al.; Sverdrup 2008) wurde der jährliche Verlauf des Bodenchemismus simuliert. Die Modell-Resultate wurden mit gemessenen Werten von sechs LWF-Flächen verglichen (Beatenberg, Celerina, Lausanne, Schänis, Novaggio und Vordemwald). Nach gewissen Modellanpassungen kann ForSAFE nun die Kon-

⁵ NaiS = Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald (Frehner et al. 2005)

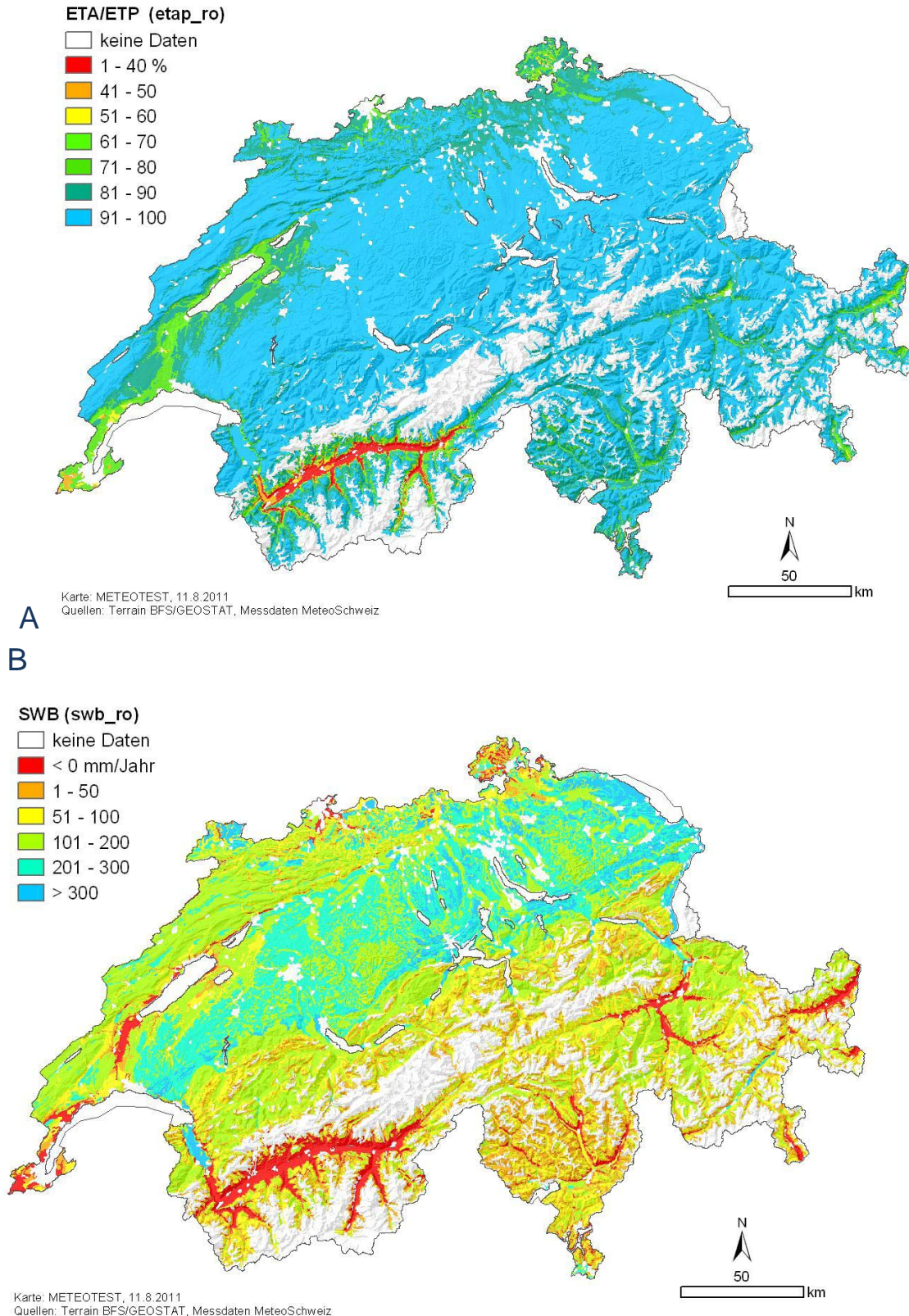


Abbildung 3.2-3. Die zwei am besten geeigneten Trockenstress-Indizes dargestellt für die ganze Schweiz für den Monat August (Durchschnittswert der Zeitperiode 1981-2010). A: Relativer Evapotranspirationsindex (ET_d/ET_p). Werte nahe bei 100% bedeuten, dass der Boden das benötigte Wasser vollständig liefern kann. B: Standortwasserbilanz (site water balance - SWB_x). Der Index gibt Wasserdefizit bzw. -überschuss in l/m^2 ($mm = l/m^2$) an. Quelle: Projekt Remund et al.

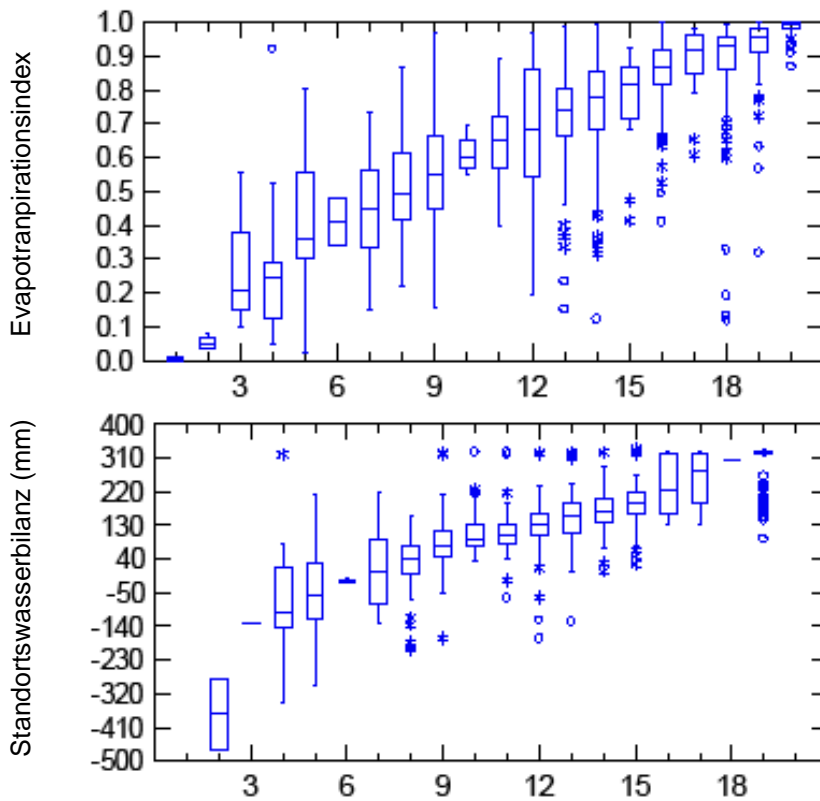


Abbildung 3.2-4. Variabilität der zwei bestgeeigneten Trockenstress-Indizes pro NaiS-Vegetationsgruppe. Oben: Relativer Evapotranspirationsindex (ET_a/ET_p). Unten: Standortswasserbilanz (SWB_x). Quelle: Projekt Remund et al.

zentrationen und Flüsse vieler Ionen so realitätsnah wiedergeben, dass es verwendet werden kann, um den Bodenchemismus unter geänderten Klimabedingungen zu simulieren. Probleme bestehen derzeit noch bei Prozessen des Stickstoff-Umsatzes.

Bleibende offene Fragen

Bei der Berechnung der standortsspezifischen Trockenheitsrisiken wurde im Projekt «Trockenheits-Indizes» ein grosser Fortschritt erzielt, da nun physikalisch basiert das Trockenheitsrisiko für Waldstandorte quantifiziert ist. Mittels Klimaszenarien kann nun das Risiko in die Zukunft projiziert werden. Solche Projektionen können noch verbessert werden, zum Beispiel indem Bodeneigenschaften geostatistisch modelliert, die Variation von Bodeneigenschaften innerhalb desselben Waldstandortstyps eingegrenzt oder die Trockenheits-Indizes mit Hilfe von Standortskarten regionalisiert werden. Auch der Einbezug der Reaktionen verschiedener Baumarten auf Trockenstress kann die Indizes verfeinern und zu besseren Prognosen führen. Zu dieser Fragestellung werden mehrere Projekte Antworten liefern (Kap. 3.3). Grosse Unsicherheiten bestehen noch bezüglich des Einflusses des Klimawandels auf die Nährstoffumsätze von Wäldern.

3.3 Auswirkungen des Klimawandels auf den Wald: Verbreitung der Baumarten, Wachstum, Mortalität, Verjüngung

Kenntnisstand

Wälder sind grundsätzlich klimasensitiv. – Änderungen der klimatischen Verhältnisse können die Phänologie (Menzel et al. 2006) und das Baumwachstum beeinflussen und so langfristig die Artenzusammensetzung und die Struktur von Wäldern verändern (Theurillat & Guisan 2001 und 2002). Die erwarteten höheren Temperaturen und trockeneren Sommer (Frei et al. 2007) dürften das Wachstum und/oder die Mortalität und damit langfristig die Verbreitung von Bäumen beeinflussen, wie schon Modellierungen der 1990er Jahre zeigten (Kräuchi & Kienast 1993, Kienast et al. 1996, Bugmann 1997). Das Adaptationsvermögen von Wäldern an die veränderten Standortbedingungen kann überschritten werden.

Baumwachstum. – In den gemässigten Breiten wird das Baumwachstum hauptsächlich durch Wasserverfügbarkeit (Zingg 1996, Weber et al. 2007), Temperatur (Kozłowski & Pallardy 1996) und Stickstoffverfügbarkeit während der Wachstumsperiode limitiert. Die Verfügbarkeit dieser Ressourcen für einen Einzelbaum hängt u.a. von der intra- und interspezifischen Konkurrenz ab (Kozłowski & Pallardy 1996), welche wiederum eine Frage der Waldstruktur (Weber et al. 2008) und von deren Veränderung durch Mortalität, waldbauliche Eingriffe und Störungen ist. Wenn sich das Klima ändert, ändern sich auch mehrere dieser Faktoren. Um diese Einflüsse auf das Baumwachstum und ihre Wechselwirkungen abschätzen zu können, sollten Zuwachsdaten eine möglichst hohe zeitliche Auflösung aufweisen sowie lange Zeiträume und die gesamte ökologische Nische einer Baumart abdecken. Soweit uns bekannt ist, wurden die zahlreichen in der Schweiz vorhandenen Zuwachsdaten noch nie gesamthaft in Wert gesetzt, indem sie über verschiedene räumliche und zeitliche Skalen homogenisiert und in Kombination analysiert wurden.

Klima-/Trockenheitssensitivität von Bäumen. – Höhere Temperaturen und damit erhöhte Evapotranspiration, sowie geringere Luftfeuchtigkeit erhöhen den Wasserbedarf der Bäume und damit auch deren Wasserverbrauch, so dass das Wasser im Boden rascher knapp wird. Da Baumarten unterschiedlich tief wurzeln und mit Wasser unterschiedlich sparsam umgehen, dürften wärmere Temperaturen und trockenere Sommer ihre Konkurrenzkraft und damit auch die Baumartenzusammensetzung verändern. Wie sensitiv verschiedene Baumarten auf Trockenstress reagieren, ist für die Waldwirtschaft von grosser Bedeutung (Zimmermann et al. 2006). Weltweit ist in trockenen Regionen das Absterben von Bäumen zu beobachten (Allen et al. 2010); in der Schweiz war es aber bisher auf Föhren auf Trockenstandorten im Wallis beschränkt (Rigling et al. 2006). Während es einfach ist, die Trockenheitssensitivität von kleinen Pflanzen wie Gräsern, Zwergsträuchern und kleinen Bäumchen zu messen, ist dies bei adulten Bäumen eine Herausforderung. Eine Möglichkeit dazu bieten Wärmebildkameras, mit denen sich die kühlende Verdunstung darstellen lässt. Sie wurden bisher vor allem bei Kulturpflanzen eingesetzt und noch kaum bei Bäumen.

Baumausbreitung an der Wachstumsgrenze. – Viele Studien belegen ein Höhersteigen von Pflanzenarten an ihrer oberen Wachstumsgrenze als Folge wärmerer Temperaturen. Das Höhersteigen von Baumarten hinkt dabei der Temperaturentwicklung hinterher, sowohl bei Arten, welche die Waldgrenze erreichen (z. B. Gehrig-Fasel et al. 2007) als auch bei den nicht so weit hinauf steigenden. Welche Faktoren das Wachstum von Bäumen an der Waldgrenze begrenzen, ist zwar gut untersucht (Körner 1998); weniger gut verstanden sind obere Verbreitungsgrenzen von Arten, die nicht die Waldgrenze erreichen. Begrenzungen können in verschiedenen Entwicklungsphasen des Baumes auftreten, von der Keimung über das Überleben von

Jungpflanzen bis zur Samenproduktion. Um herauszufinden, ob Baumarten im Zuge des Klimawandels im Waldgürtel höher steigen, müssen daher unterschiedliche Altersphasen untersucht werden. Vorkommen junger Bäume oberhalb der höchst gelegenen adulten Individuen deuten darauf hin, dass eine Art sich nach oben ausbreitet.

Baumverjüngung an trockenen Standorten. – Keimlinge und Sämlinge reagieren empfindlich auf Trockenperioden, da ihr Wurzelsystem noch wenig ausgebildet ist. Auf bereits heute trockenen Standorten können daher selbst geringe klimatische Änderungen zu grossen Ausfällen bei der Verjüngung führen (Peñuelas et al. 2007, Moser et al. 2010). Zunehmend ausgeprägtere Trockenperioden wie diejenigen im Sommer 2003 und im Frühjahr 2011 könnten daher für die Forstwirtschaft eine grosse Herausforderung werden, besonders an flachgründigen, sonnenexponierten Standorten sowie in stark besonnten Waldblößen.

Phänotypische Plastizität und genetische Variation. – Phänotypische Plastizität ist das Vermögen eines Genotyps, je nach Umweltbedingungen unterschiedliche Phänotypen auszubilden. Waldbäume weisen oft eine hohe phänotypische Plastizität auf. Bei der Buche und Eiche wurde zum Beispiel gezeigt, dass Populationen aus höheren Lagen auf Klimaerwärmung mit einer verlängerten Vegetationsperiode reagieren; Buchenpopulationen aus tieferen Lagen zeigten hingegen eine verkürzte Vegetationsperiode, weil die Blätter schneller alterten (Vitasse et al. 2010). Genetische Unterschiede sind für die Anpassung von Baumarten an ihre Umgebung von grosser Bedeutung. Je grösser die genetische Variation innerhalb einer Population ist, desto grösser sind ihre Anpassungsfähigkeit und damit die Wahrscheinlichkeit, dass ein Teil der Population auch andere Klimaverhältnisse ertragen kann. Merkmale von Waldbäumen variieren entlang von Umweltgradienten unterschiedlich stark. Diese Variation kann teilweise mit unterschiedlichen Temperaturen und Niederschlägen am Herkunftsort erklärt werden und ist als Anpassung an lokale Bedingungen zu verstehen (Aitken et al. 2008), teils aber auch auf die nacheiszeitlichen Wanderungen zurückzuführen. Die Variation drückt sich in der Regel in Unterschieden in Austrieb und Bildung von Knospen aus. Bei einigen Baumarten sind auch provenienzspezifische Trockenstressreaktionen belegt, z.B. bei der Buche (Peuke et al. 2002, Schraml & Rennenberg 2002, Czajkowski & Bolte 2006). Genetische Unterschiede sind bei den meisten Schweizer Waldbäumen erst ansatzweise untersucht.

Im Forschungsprogramm untersuchte Fragen

Im Programm wird mit schweizweiten Inventurdaten untersucht, wie suboptimale Temperaturen und Niederschläge den Durchmesserzuwachs des Einzelbaums limitieren, und wie verbesserte Zuwachsfunktionen in Waldmodelle eingebaut werden können, um klimabeeinflusste Wachstumsänderungen auf die Verfügbarkeit von Holz abschätzen zu können (Projekt «KliWaWa», Thürig et al.). Bei Hauptbaumarten wie der Buche und der Fichte wird auch der Einfluss des Bodenwasserhaushalts und der Nährstoffversorgung des Standorts auf das Wachstum untersucht (Projekt «Klimaanfälligkeit», Weber et al.). Im Projekt «Drought vulnerability» (Siegwolf et al.) wird die Reaktion von einheimischen und exotischen Nadelbaumarten auf Trockenperioden erforscht, im Projekt «Wasserbeziehungen» (Braun et al.) die Wassernutzungseffizienz bei 12 Baumarten sowie bei einigen Baumarten auch die Kavitationsgefährdung bei Trockenheit. Wie empfindlich Laubbaumarten auf Trockenperioden reagieren, wird in einem weiteren Projekt untersucht (Projekt «Matchtree-1», Körner et al.). Des Weiteren wird untersucht, ob sich die Baum mortalität klimabedingt verändert (Projekt «Baummortalität», Dobbertin & Zingg). Im Projekt «RetroPro» möchten Bugmann et al. herausfinden, welche Einflussfaktoren und Faktorkombinationen die Klimaanfälligkeit von Beständen bestimmen, und welche Rolle dabei die Baumart, die Bestandesstruktur, die Wasserspeicherkapazität der Böden und die Exposition spielen.

Zwei Projekte widmen sich der Baumverjüngung: Im ersten wird das Vorkommen junger und adulter Bäume an der oberen Verbreitungsgrenze verglichen und daraus abgeleitet, wie gross das Potential ihres Höhersteigens ist (Projekt «Matchtree-2», Körner et al.). Das zweite beschäftigt sich mit der Frage, wie Trockenperioden und Bodeneigenschaften sich auf Keimung, Mortalität und Wachstum von Keimlingen und Sämlingen einheimischer Waldbaumarten auswirken; hierbei werden auch Herkünfte aus trockenen Regionen des europäischen Verbreitungsgebiets dieser Baumarten untersucht (Projekt «TroLiFa», Wohlgemuth & Moser). Zudem werden für verschiedene Modellvarianten des A1B-Szenarios Verbreitungskarten vieler Baumarten berechnet (Projekt «PorTree, Zimmermann et al.). In einem Projekt wird das Risiko untersucht, dass Schweizer Buchen-, Fichten- und Tannenpopulationen die Klimaänderung nicht bewältigen können (Projekt «Adaptive genetische Variation», Brang et al.). Dabei soll die Anpassung vieler Provenienzen an Klima und Boden beurteilt werden, als Grundlage für die Beurteilung des zukünftigen Potenzials der untersuchten Baumarten in der Schweiz u.a. bezüglich Trockenstress. Das Projekt «Gastbaumarten» (Brang et al.) untersucht das Potenzial von sechs exotischen, noch wenig bekannten Baumarten, die in Mitteleuropa heimischen Baumarten in einem wärmeren und trockeneren Klima zu ergänzen.

Wichtigste Forschungsergebnisse

Buchen auf feuchten Standorten reagieren zunehmend sensitiv auf Trockenstress. – Erste Resultate aus dem Projekt Weber et al. weisen darauf hin, dass Buchen auf trockenen Standorten nur etwa halb so viel wachsen wie Buchen auf feuchteren Standorten (i.e. Jahrringwachstum). In den letzten Jahren scheinen aber die Buchen auf feuchteren Standorten zunehmend sensitiv auf witterungsbedingte Trockenheit zu reagieren. Dies kann dahingehend interpretiert werden, dass die Buchen auf trockeneren Standorten bereits an Trockenjahre angepasst sind, während auf feuchteren Buchenstandorten als Folge der Klimaänderung eine Zuwachsreduktion zu erwarten ist. Resultate vom Projekt Körner et al. (nächster Abschnitt) weisen in dieselbe Richtung.

Eichen und Eschen sind die besseren Wassersparer als Bergahorn, Buche, Sommerlinde und Vogelkirsche. – Mittels Thermalfotografie aus einem Helikopter wurden an schönen Sommertagen höhere Kronentemperaturen für Bergahorn, Buche und Sommerlinde ermittelt als für Esche, Vogelkirsche und Traubeneiche (Projekt «Matchtree-1», Körner et al.; Scherrer et al. in press). Diese Resultate waren über mehrere Standorte und unterschiedliche Bodenwassergehalte konsistent. Zeitgleiche Messungen des Saftflusses an denselben Bäumen ergaben Unterschiede in der zeitlichen Dynamik während Trockenheit: Ringporige Arten wie Eiche und Esche reduzieren die Transpiration aktiv, auch bei hoher Bodenfeuchte, transpirieren aber relativ gesehen mehr, wenn es sehr trocken wird. Andere Baumarten wie Bergahorn, Buche, Sommerlinde und Vogelkirsche gehen mit dem Wasser bei hoher Bodenfeuchte weniger sparsam um, brechen dafür aber bei längerer Trockenheit ein. Demzufolge sind Bergahorn und Buche besonders sensitiv auf Trockenheit, besonders trockentolerant ist der Gaswechsel dagegen bei Esche und Traubeneiche. Da die Sommerlinde besonders zu Kronenüberhitzung neigt (Leuzinger & Körner 2007, Leuzinger et al. 2010, Scherrer et al. in press), dürften ihr heisse Perioden besonders zusetzen. Das Schwächeln von Linden im städtischen Raum seit dem Hitzesommer 2003 hängt möglicherweise damit zusammen (Leuzinger et al. 2010). Die Konkurrenzkraft von Esche und Traubeneiche dürfte bei wiederkehrenden Trockenperioden gegenüber Buche und Bergahorn zunehmen. Diese Ergebnisse sind konsistent mit der natürlichen Verbreitung von Eiche, Buche, Bergahorn und Esche; Widersprüche bestehen allerdings bei Sommerlinde und Vogelkirsche, die auch auf trockenen Standorten verbreitet vorkommen (Mayer 1992, S. 106).

Auch unterhalb der Waldgrenze wandern Baumarten aufwärts. – Entlang von sechs Höhengradienten bei Chur und Martigny wurde das Vorkommen von 10 Baumarten in Höhengritten von 25 m registriert, wobei 6 Grössenklassen unterschieden wurden, von Keimlingen bis zu über 4 m hohen adulten Bäumen (Projekt «Matchtree-2», Körner et al.; Vitasse et al. subm.). Für Hasel, Goldregen, Vogelbeere und Mehlbeere bestanden kaum Unterschiede zwischen dem Vorkommen von Jung- und adulten Bäumen. Diese Arten weisen eine grosse Höhenausdehnung auf und werden auch in der Adultphase im Bergwald nie kronendominant, hatten also immer Schutz durch grössere Bäume (oft die Fichte). Dagegen wurden nicht nur viele Keimpflanzen, sondern auch ansehnliche Jungbäume von Esche, Tanne, Vogelkirsche, Bergahorn, Eiche und Buche deutlich oberhalb der höchst gelegenen adulten Bäume gefunden. Falls die Höhenlimitierung von Bäumen zur Hauptsache durch die Temperatur bedingt ist, dürften diese sechs Baumarten im Zuge der Klimaerwärmung allmählich höher steigen. In welchem Masse Frühjahrsfröste dies behindern, sobald die Bäume adult (kronendominant) werden, wird in einer laufenden Studie untersucht. Die Autoren vermuten, dass im Bergwald für die Grenze adulter Individuen das Klima im Kronenraum massgeblich ist (Prozesse im Kronenraum). Heute produzieren diese Aussenposten der Arten reichlich keimfähige Samen.

Trockenheit lässt Baumkeimlinge verdorren. – Im Raum Domat-Ems/Tamins/Bonaduz wurden Eichen, Buchen, Tannen, Fichten und Waldföhren 2010 an vier Waldstandorten angesät (Projekt «TroLiFa», Wohlgenuth & Moser). Mit Regendächern wurden verschiedene Trockenheitsgrade im Boden simuliert. Leider wurden viele Eichensamen von Mäusen gefressen. Ausgeprägte Trockenheit nach der Aussaat liess viele Eichen- und Buchenkeimlinge verdorren. Bei Tannen, Fichten und Föhren waren die Ausfälle geringer. Die Saat der Nadelbäume wurde 2011 wiederholt. In beiden Jahren verzögerte das trockene Frühjahr die Samenkeimung, wogegen relativ feuchte Sommermonate das Überleben der jungen Keimlinge förderten. Bei extremer Frühjahrstrockenheit und warmen Temperaturen vermögen nur wenige Samen zu keimen. Dagegen überstehen einjährige Sämlinge eine solche Trockenheit bereits. Gute und schlechte Verjüngungsjahre dürften sich witterungsbedingt abwechseln. In guten Jahren treffen zahlreiche Samen und genügend Bodenfeuchtigkeit zur Ansamlungszeit zusammen.

Potenzialverschiebung der Fichte schon um 2050. – Aufgrund der Analyse von klimatischen Potenzialgebieten einiger Baumarten wurden stark divergierende Resultate gefunden (Projekt «PorTree», Zimmermann et al.). So scheint die Buche im schweizerischen Mittelland bis 2050 noch wenig gefährdet, während die Fichte in dieser Region zunehmend weniger an die Standortverhältnisse angepasst ist (Abbildung 3.3-1). Diese Darstellungen wurden aufgrund von Waldinventurdaten des ganzen Alpenraumes unter Verwendung von sechs statistischen Modellen kalibriert. Die Daten umfassen rund 90'000 Inventurpunkte aus Frankreich, Italien, Schweiz, Deutschland (Baden-Württemberg, Bayern), Österreich und Slowenien. Abbildung 3.3-1 stellt die Synthese aus allen sechs statistischen Modellen der Kalibration unter Verwendung aller sechs regionalen Klimamodelle (RCMs) dar. Je dunkler die Farbe, desto stärker stimmen die statistischen Modelle (heute und 2050) und die Klimamodelle (nur 2050) darin überein, dass die Region ein hohes Potenzial für diese Baumart aufweist.

Verbreitungspotenzialkarten müssen richtig interpretiert werden. – Es ist zu beachten, dass eine Abnahme des Verbreitungspotenzials einer Baumart im Jahr 2050 nicht zwingend mit hohen waldwirtschaftlichen Risiken verbunden ist. Die Abnahme stellt in erster Linie dar, dass die entsprechende Baumart in der betroffenen Region im Jahr 2050 wahrscheinlich Klimabedingungen vorfinden wird, bei denen sie unter heutigen Bedingungen fehlt. Dies kann bedeuten, dass sie entweder physiologisch nicht in der Lage ist, sich dort zu behaupten (was ein hohes waldwirtschaftliches Risiko darstellen würde), oder dass sie nur deshalb nicht gedeiht, weil sie von anderen Baumarten zu stark konkurrenziert wird. In letzterem Fall kann durch Bewirtschaftungsmassnahmen das Risiko verringert werden. Eine vertiefte Diskussion zur Interpreta-

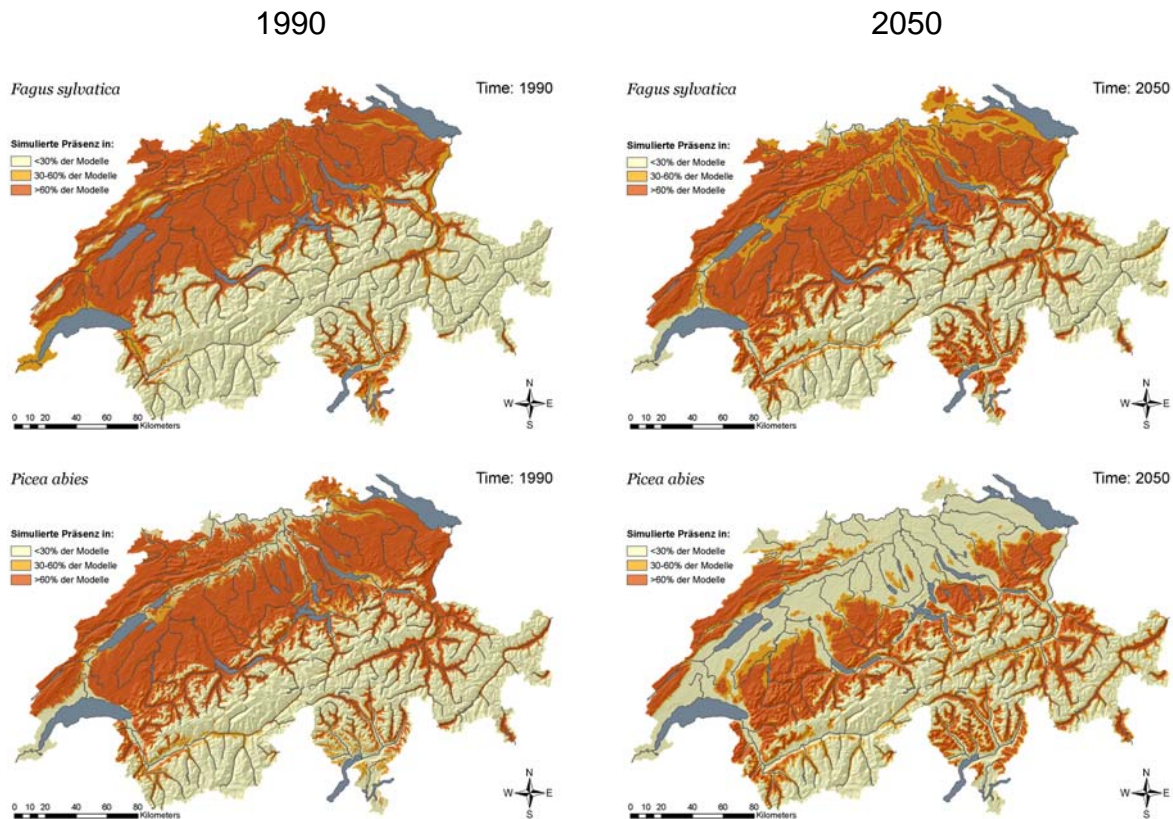


Abbildung 3.3-1. Simulierte Verbreitungspotenziale von Buche (*Fagus sylvatica*) und Fichte (*Picea abies*) unter Klimabedingungen von heute und von 2050. Die Darstellung basiert auf 6 verschiedenen statistischen Modellen. Je dunkler die Farbe, desto mehr Modelle projizieren ein Vorkommen. Bei der Potenzialdarstellung für 2050 wurden die statistischen Modelle für jedes der sechs regionalen Klimamodelle (RCMs) berechnet. Dunklere Farbe symbolisiert eine grössere Anzahl statistischer und Klimamodelle, welche ein hohes Potenzial vorhersagen. Quelle: Projekt Zimmermann et al.

tion von klimatischen Potenzialkarten kann in Zimmermann & Bugmann (2008) nachgeschlagen werden. Auf jeden Fall deutet das Resultat aber auf eine mögliche Gefährdung der Fichte im Mittelland hin, da den Modellen nicht bloss höhere Temperaturen, sondern auch abnehmende Sommerniederschläge zugrunde liegen.

Regionale oder grossräumliche Kalibration von Potenzialmodellen. – Klimatische Potenzialmodelle können nur durch regionale Daten (z.B. nur aus der Schweiz) oder durch Daten aus einem grösseren Raum (z.B. dem ganzen Alpenraum) kalibriert werden. Dies hat Konsequenzen für die Interpretation der Resultate. Wenn Modelle aufgrund aller Daten des Alpenraums kalibriert werden, dann ist eine grössere Anzahl möglicher Klimakombinationen im Modell fixiert. Das Modell ist dann besser in der Lage, die Reaktion der Baumart auf mögliche neue Klimabedingungen abzubilden. Andererseits sind in solchen Modellen dann auch lokale ökologische Anpassungen (z.B. an Trockenheit) abgebildet, welche nicht in allen Regionen effektiv zum Tragen kommen. Ein Vergleich der Modelle «nur Schweiz» und «Alpenraum» hat beispielsweise für Fichte und Buche nur kleine Unterschiede ergeben, welche für die generelle Schlussfolgerung unbedeutend sind. Für lokale Entscheidungen können diese Unterschiede aber relevant sein.

Bleibende offene Fragen

Die Interpretation der Potenzialgebiete von Baumarten im Sinn von Anbauempfehlungen macht heute noch Schwierigkeiten, besonders wenn die Standortunterschiede, wie sie z.B. in Standortkartierungen ausgewiesen sind, berücksichtigt werden sollen. Bei den Baumarten-Verbreitungskarten stellt sich zudem die Frage nach dem Einfluss lokaler Anpassung und phänotypischer Plastizität. Dass Provenienzunterschiede innerhalb von Baumarten bestehen, ist seit rund einem Jahrhundert bekannt; wie relevant sie für die Reaktion der Baumarten auf den Klimawandel sind, ist aber noch weitgehend unbekannt. Das angelaufene Projekt « Adaptive genetische Variation » (Brang et al.) versucht, diese Frage zu beantworten. Herkunftsunterschiede könnten einmal in den Baumarten-Verbreitungskarten für unterschiedliche Klimaszenarien abgebildet werden. Das Projekt « Gastbaumarten » (Brang et al.) wird das Potenzial von sechs exotischen Baumarten aufzeigen, die in Mitteleuropa heimischen Baumarten zu ergänzen. Zum Zusammenspiel von Klima, Boden und Nährstoffversorgung bei der Reaktion von Bäumen auf Trockenheit werden die angelaufenen Projekte « Klimaanfälligkeit » (Weber et al.) und « RetroPro » Antworten liefern. Offen ist auch die Frage, wo in der Schweiz und bei welchen Baumarten mit trockenheitsbedingten Verjüngungsproblemen zu rechnen ist, und wie sich das Mikroklima im Bestand, das vom üblicherweise gemessenen Freilandklima abweicht, auf die Verjüngung auswirkt.

3.4 Auswirkungen des Klimawandels auf den Wald: abiotische und biotische Störungen

Kenntnisstand

Klimawandel führt zu häufigeren und intensiveren Störungen. – Waldbestände entwickeln sich nicht nur kontinuierlich aufgrund standörtlicher Gegebenheiten, sondern werden zuweilen auch von sporadisch auftretenden abiotischen und biotischen Ereignissen getroffen, die als « Störungen » bezeichnet werden und die Waldstruktur oft stark verändern. Das Paradebeispiel dafür ist ein Windwurf. Gemäss den Klimaszenarien (Kap. 3.2) dürften Störungen häufiger und intensiver werden, besonders solche, die durch Feuer und Borkenkäfer verursacht werden (Engesser et al. 2008, Wohlgemuth et al. 2008).

Waldbrände werden vermutlich häufiger und intensiver. – Waldbrände entstehen durch das Zusammenspiel von Zündquelle, Witterung und Brandgut. Das Anzünden besorgt heute meist der Mensch, wobei Unachtsamkeit eine grosse Rolle spielt. Trockenperioden wie der Sommer 2003 begünstigen den Ausbruch und die Ausbreitung von Waldbränden. Brandgut häuft sich beim Absterben von Bäumen an, z.B. nach Sturmereignissen und in nicht mehr bewirtschafteten Wäldern (Conedera et al. 1996, Conedera et al. 2006, Zumbrennen et al. 2009). Der Klimawandel dürfte das Feuerregime in der Schweiz und insbesondere im Alpenraum in Zukunft stark verändern, wobei Waldbrände vermutlich häufiger und intensiver werden, auch auf der Alpennordseite (Schumacher & Bugmann 2006, Schumacher et al. 2006).

Der Klimawandel begünstigt Borkenkäfer. – Unter den biotischen Störungen ist der wichtigste Schadorganismus der Buchdrucker (*Ips typographus*), der v.a. die Fichte befällt, die in Mitteleuropa häufigste Baumart. Die Biologie, Ökologie und Bekämpfung des Buchdruckers sind weitgehend bekannt (Thalenhorst 1958, Christiansen & Bakke 1988, Sauvard 2004, Wermelinger 2004, Forster & Meier 2008). Der Befall durch den Buchdrucker wird durch hohe Temperaturen und reichliches Brutsubstrat gefördert. Die Entwicklung und Vermehrung des Käfers sind über einen grossen Bereich linear von der Temperatur abhängig (Wermelinger & Seifert 1999). Daher entwickeln sich im Mittelland meist zwei Generationen pro Jahr, in höheren La-

gen hingegen nur eine. Der Befall und die anschliessende Larvenentwicklung erfolgen grundsätzlich an Fichten mit reduzierter Widerstandskraft (höherer Disposition). Beispiele dafür sind frisch vom Sturm geworfene Fichten (was oft Massenvermehrungen auslöst) oder durch Trockenheit geschwächte Bäume. Je vitaler eine Fichte ist, in desto grösserer Dichte müssen die Käfer sich einbohren, um einen Baum erfolgreich besiedeln zu können (Christiansen et al. 1987). Natürliche Feinde des Buchdruckers sowie Massnahmen zu seiner Bekämpfung regulieren das Ausmass und den Verlauf eines Befalls (Wermelinger 2004). Die vorausgesagten höheren Temperaturen, trockeneren Sommer und häufigeren Stürme (Kap. 3.2) begünstigen Massenvermehrungen (Engesser et al. 2008). Es sind aber noch viele Fragen offen: Wie stark beeinflussen die einzelnen abiotischen und biotischen Einflussfaktoren den Käferbefall? Wie hängen sie voneinander ab? Wie wirksam sind Bekämpfungsmassnahmen? Diese komplexen Zusammenhänge und deren zeitliche Entwicklung können nur mit Modellen analysiert werden.

Im Forschungsprogramm untersuchte Fragen

Die Zusammenhänge zwischen der Witterung und dem Feuergeschehen in den verschiedenen Gebieten der Schweiz sind das Thema im Projekt «ALPFIRS⁶» (Conedera et al.). In ALPFIRS wird die Eignung verschiedener meteorologischer Feuergefahren-Indizes für Wälder im Tessin und im Wallis geprüft. Zudem wird die Entwicklung dieser Indizes als Folge des Klimawandels abgeschätzt. Im Projekt Wildland-Urban Interface (Projekt «WUI», Conedera et al.) wird eine GIS-basierte, halbautomatische Methode entwickelt, um die Brandgefährdung und deren Entwicklung in der Kontaktzone zwischen Siedlungsgebieten und Wald- bzw. Buschvegetation einzuschätzen, wo die meisten vom Menschen verursachten Feuer ausbrechen. Im Projekt «Borkenkäfer» (Wermelinger et al.) wird angestrebt, Risikoanalysemodelle für kurz- bis langfristigen Borkenkäferbefall zu erstellen. Zentrale Fragen dabei sind die relative Bedeutung der Einflussfaktoren, die den Verlauf einer Massenvermehrung beeinflussen, und die Identifizierung von besonders gefährdeten Gebieten.

Wichtigste Forschungsergebnisse

Die Waldbrandprojekte im Forschungsprogramm haben gezeigt, dass im Alpenraum kein einzelner Gefährdungsindex sowohl mit Feuern im Winter wie auch mit solchen im Sommer eng korreliert, weshalb saisonal unterschiedliche Indizes verwendet werden müssen. Die Waldbrandgefährdung im Siedlungsgebiet hängt stark mit der Distanz zur nächsten Strasse oder zu einem Gebäude zusammen. Je nach Region und Jahreszeit spielen weitere Faktoren noch eine Rolle. Aus dem Borkenkäferprojekt liegen wegen des späten Beginns zwar ein erstes lauffähiges Phänologiemodell, aber noch keine gesicherten Ergebnisse vor.

Bleibende offene Fragen

Bei Waldbrandindizes wird nach Schwellenwerten gesucht, bei deren Erreichen die Feuerwehr-Pikettdienste alarmiert werden müssen bzw. Entwarnung gegeben werden kann. Auch soll die Brandgefährdung bei zukünftigen Klimaszenarien simuliert werden. Was die Siedlungs-Kontaktzonen mit dem Wald betrifft, sind Waldbrandrisiko-Karten für unterschiedliche Klimaszenarien zu erstellen. Das Borkenkäferprojekt ist noch nicht genügend fortgeschritten, um zusätzliche Fragen zu formulieren. Ein wichtiger Fragenkomplex wird aber die Wechselwirkung zwischen Baum und Borkenkäfer bleiben. Es ist auch damit zu rechnen, dass mit dem Einwandern von Neobiota⁷ infolge des Klimawandels und der Globalisierung (Engesser et al. 2008)

⁶ www.alpfirs.eu

⁷ Gebietsfremde Arten

immer wieder neue Fragen zu Schädlingen an Waldbäumen auftauchen. Ein Beispiel ist der gefährliche Asiatische Laubholzbockkäfer (*Anoplophora glabripennis*), der im September 2011 erstmals für die Schweiz im Kanton Freiburg nachgewiesen wurde⁸.

3.5 Auswirkungen des Klimawandels auf Waldprodukte und -leistungen

Kenntnisstand

Der Klimawandel dürfte sich auf Waldprodukte und -leistungen auswirken. – Wälder liefern Holz, bieten Schutz vor Naturgefahren, speichern Kohlenstoff und sind Lebens- und Erholungsraum. All diese Waldprodukte und -leistungen hängen vom Waldstandort und von der Waldstruktur im weitesten Sinn ab, v.a. von der Dichte und Grösse der Bäume und der Baumartenzusammensetzung. Da der Klimawandel die Waldstruktur teils direkt beeinflusst (Kap. 3.3), teils indirekt über Störungen (Kap. 3.4), sind auch Auswirkungen auf Waldprodukte und -leistungen zu erwarten. Bei vielen Waldleistungen und Waldprodukten ist mit einer zumindest zeitweiligen Verminderung zu rechnen; es gibt aber auch positive Effekte.

Der Rückgang der Fichte tangiert die Holzproduktion. – In einer Analyse von Langzeit-Versuchsflächen wurde festgestellt, dass der Grundflächenzuwachs in Tieflagen in Jahrzehnten mit ausgeprägten Trockenperioden bei der Fichte und der Buche deutlich und bei der Tanne leicht vermindert war, während die Eiche keine Reaktion zeigte (Zingg & Bürgi 2008). Nach LFI3 nahm der Fichtenvorrat im Mittelland von 1993/1995 bis 2004/2006 um 23% ab, in der gesamten Schweiz immer noch um 4% (Cioldi et al. 2010). Die Hauptursachen für diese Abnahme waren der Orkan Lothar, Borkenkäfer und der Hitzesommer 2003. Die erwartete Zunahme von Störungsereignissen trifft besonders die Fichte, die holzwirtschaftlich wichtigste Baumart, welche von 1993/1995 bis 2004/2006 einen Anteil von 55% an der Gesamtnutzung hatte (Duc et al. 2010). Vorhersagen der zukünftigen Arealverbreitung zeigen, dass geeignete Fichtenstandorte und damit auch der Zuwachs und die Nutzungspotenziale dieser Baumart stark abnehmen (Kap. 3.3), was durch erhöhte Produktivität der Fichte in höheren Lagen bei weitem nicht kompensiert wird.

Zunehmende Störungen könnten die Wirkung von Schutzwäldern gefährden. – Ein Teil der Schutzwälder ist bereits heute labil und hat teils von Natur aus, teils anthropogen bedingt hohe Anteile an störungsanfälligen Fichten. Stürme und Borkenkäfer sowie Waldbrände dürften in einem wärmeren und sommertrockeneren Klima immer wieder Löcher in die Schutzwälder reissen. Borkenkäfer können in warmen Sommern auch in Hochlagen zwei Generationen ausbilden (Engesser et al. 2008). Störungsereignisse können die Schutzwirkung eines Waldes beeinträchtigen und teure technische Schutzbauten nötig machen (Kupferschmid et al. 2004, Brang et al. 2006).

Der Schweizer Wald dürfte von einer Kohlenstoff-Senke zur Quelle werden. – Bis anhin war der Wald seit Jahrzehnten eine Kohlenstoff-Senke (Bugmann 2008) und hat damit zur Minderung des Klimawandels beigetragen. Durch die energetische und stoffliche Verwendung von Holz wird fossile Energie substituiert, und in verbautem Holz bleibt Kohlenstoff gespeichert. Grossflächige Störungsereignisse können allerdings den Holzvorrat vermindern und CO₂ freisetzen. Je nach Ausmass der Störung kann der Wald lokal bis national von einer Senke zu einer Quelle werden (Nabuurs et al. 2008).

⁸ www.bafu.admin.ch/dokumentation/medieninformation/00962/index.html?lang=de&msg-id=41323, eingesehen 27.9.2011

Bei hohen Stickstoffeinträgen kann die Grundwasserqualität abnehmen. – Auf Kahlflächen, wie sie z. B. infolge von Sturmereignissen entstehen, wird organisches Material beschleunigt abgebaut, was zu hohen Stickstofffrachten im Trinkwasser führen und so dessen Qualität beeinträchtigen kann (Hegg et al. 2004).

Der Klimawandel dürfte die Artenzusammensetzung und -vielfalt verändern. – Die Klimaänderung dürfte bis in Jahr 2100 zu wesentlichen Arealverschiebungen von Pflanzen und Tieren führen und dabei auch viele Rote-Liste-Arten gefährden (Thuiller et al. 2005). Besonders gefährdet sind Arten, welche auf kühl-feuchte Restbiotope angewiesen sind (Müller-Kroehling et al. 2007). Störungsereignisse könnten innert einiger Jahrzehnte den Wald anders aussehen lassen: Laubbäume dürften häufiger sein, es könnten ausgedehnte Pionierphasen auftreten, einige Neobiota, darunter auch invasive Neophyten, könnten Fuss gefasst haben und wenige Baumarten infolge Auftreten neuer Schädlinge dezimiert sein. Diese Entwicklungen zeigten sich bereits – in gesamthaft gesehen noch bescheidenem Ausmass – im Gefolge der Orkane Vivian (1990) und Lothar (1999) oder von Waldbränden im Tessin, wo sich teils flächendeckend der Götterbaum verjüngt. Damit ändern sich die Habitats im Wald, darunter auch die Lebensräume seltener Arten. Von Störungsereignissen profitieren dürften Pionierarten sowie von Totholz abhängige Organismen, sofern nicht infolge starker Nachfrage nach Energieholz die Nutzungsintensität massiv zunimmt. All diese Entwicklungen sind naturgemäss schwierig vorherzusagen. Konservierende Naturschutzkonzepte stehen aber grundsätzlich in Konflikt mit den voraussichtlich einschneidenden Umgestaltungen der Habitats. Die grossen Höhengradienten in Schweizer Gebirgswäldern bringen es immerhin mit sich, dass die Organismen die Ersatzhabitats relativ nahe finden und somit nicht weit wandern müssen.

Nur qualitative Aussagen zu Waldleistungen. – Die meisten Studien zur Auswirkung des Klimawandels auf die Entwicklung der Waldprodukte und -leistungen machen bislang nur qualitative Aussagen. Sie beruhen auch stark auf vergangenen Entwicklungen und lassen sich daher, bei sich ändernden Einflussfaktoren, nicht einfach auf zukünftige Klimate extrapolieren. Auch fokussieren sie meistens auf wenige Produkte und Leistungen.

Im Forschungsprogramm untersuchte Fragen

Mehrere vom Forschungsprogramm geförderte Projekte untersuchen Auswirkungen des Klimawandels auf Waldprodukte und -leistungen. Das Projekt «KliWaWa» (Thürig et al.) hat zum Ziel, die Temperaturabhängigkeit des Baumwachstums besser zu erfassen, so dass das Holznutzungspotenzial (Kaufmann 2011) und die Kohlenstoff-Senkenleistung des Waldes (Thürig & Kaufmann 2008) nicht nur für das heutige Klima, sondern für unterschiedliche Klimaszenarien abgeschätzt werden können. In Fallstudien in Gebirgswäldern wird für unterschiedliche Klimaszenarien und Managementstrategien geprüft, wie sich der Klimawandel auf Holzproduktion, gravitative Naturgefahren, Kohlenstoff-Senkenleistung und Baumartenvielfalt auswirkt (Projekt «Ecosystem services», Bugmann & Elkin). In einem Schutzwaldprojekt werden retrospektiv und prospektiv Auswirkungen des Klimawandels auf Leistungen von Lawinenschutzwäldern untersucht (Projekt «Schutzwälder», Bebi et al.). Im Projekt «Wurzeln & Hydrologie» (Lüscher et al.) wird untersucht, wie sich eine Baumartenänderung auf das Wasserspeichervermögen («Schluckvermögen») einiger Böden auswirkt. Im Projekt «Indicator species» (Bollmann et al.) wird die Habitatveränderung in Bergwäldern für vier Leit-Vogelarten, darunter das Auerhuhn, abgeschätzt. Im Projekt «Bestandesentwicklung» (Küchler et al.) wird untersucht, ob sich Pflanzengemeinschaften in Wäldern klimabedingt verändern und welche Rolle dabei Alter und Schlussgrad der Oberschicht spielen.

Wichtigste Forschungsergebnisse

Die Auswirkungen auf Waldleistungen sind regional sehr unterschiedlich und eher abrupt. – Die Auswirkungen des Klimawandels auf Bergwälder zeigen sich nicht nur in linearen Veränderungen, sondern teils abrupt; so dürfte der Klimawandel bis etwa 2030 den Waldzustand erst geringfügig, im letzten Drittel des 21. Jahrhunderts aber stark beeinflussen (Projekt «Ecosystem services», Bugmann & Elkin). Die Auswirkungen sind auch regional unterschiedlich und hängen stark von den Umweltbedingungen ab (z.B. Temperatur und Wasserverfügbarkeit). Deutlich zeigte sich das in einer Fallstudie mit ausgeprägten Höhengradienten im Zentralwallis, in der die Umweltfaktoren stark variieren. So sagen die Waldsimulationsmodelle voraus, dass sich die Baumartenzusammensetzung in Tieflagen des Zentralwallis stark verändert und die Biomasse infolge Trockenperioden stark abnimmt. Weiter oben nehmen hingegen mit dem Klimawandel das Baumwachstum und die Überlebenswahrscheinlichkeit vorerst zu. Weitgehend parallel zur Biomasse verändert sich auch die Schutzwirkung gegenüber Naturgefahren (Abb. 3.5-1). Der Klimawandel beeinflusst die verschiedenen Waldleistungen aber sonst eher in unterschiedlicher Art. Die grossräumige Artenvielfalt dürfte – durch Störungen bedingt – zunehmen, die Schutzwirkung gegen gravitative Naturgefahren hingegen bis ins Jahr 2100 gesamthaft gesehen zurückgehen. Von diesen generellen Trends gibt es aber Ausnahmen, welche für Managemententscheidungen bedeutsam sind. Auch die Waldbewirtschaftung wirkt sich je nach Ausgangslage anders aus. So führen Überführungsdurchforstungen in grösseren Höhenlagen nach einigen Jahrzehnten zu einer erhöhten Biomasse, reduzieren sie aber weiter unten und fördern dort den Baumartenwechsel (Projekt Bugmann & Elkin).

Schutzwälder dehnen sich aus und werden dichter. – Wie Daten des Landesforstinventars und der Arealstatistik zeigen, wuchsen in den letzten 20 Jahren viele neue Waldflächen ein, was die Fläche wirksamer Schutzwälder erhöhte, und die mittlere Bestandesdichte in Gebirgswäldern nahm zu (Projekt «Schutzwälder», Bebi et al.). Gründe für die Flächenzunahme sind vor allem die Extensivierung in der Landwirtschaft; die Klimaerwärmung dürfte dabei und bei der Dichtezunahme der Wälder bereits eine gewisse Rolle spielen. Ihr Einfluss ist allerdings schwierig von anderen Einflussfaktoren zu trennen.

Schutzwälder könnten klimabedingt störungsanfälliger werden. – In Schutzwäldern ist eine Dichtezunahme bezüglich ihrer heutigen Schutzwirkung grundsätzlich positiv. Projiziert man sie jedoch unter Annahme einer weiteren Klimaerwärmung und einer damit verbundenen noch rascheren Verdichtung (besonders in höheren Lagen) in die Zukunft, zeigen sich auch die Gefahren dieser Entwicklung. Ohne waldbauliche Eingriffe dürften in Zukunft viele Schutzwälder anfälliger gegenüber Störungen wie Windwurf, Borkenkäfer und Feuer werden und der Anteil an dichten einschichtigen Beständen mit geringer Störungsresistenz dürfte zunehmen.

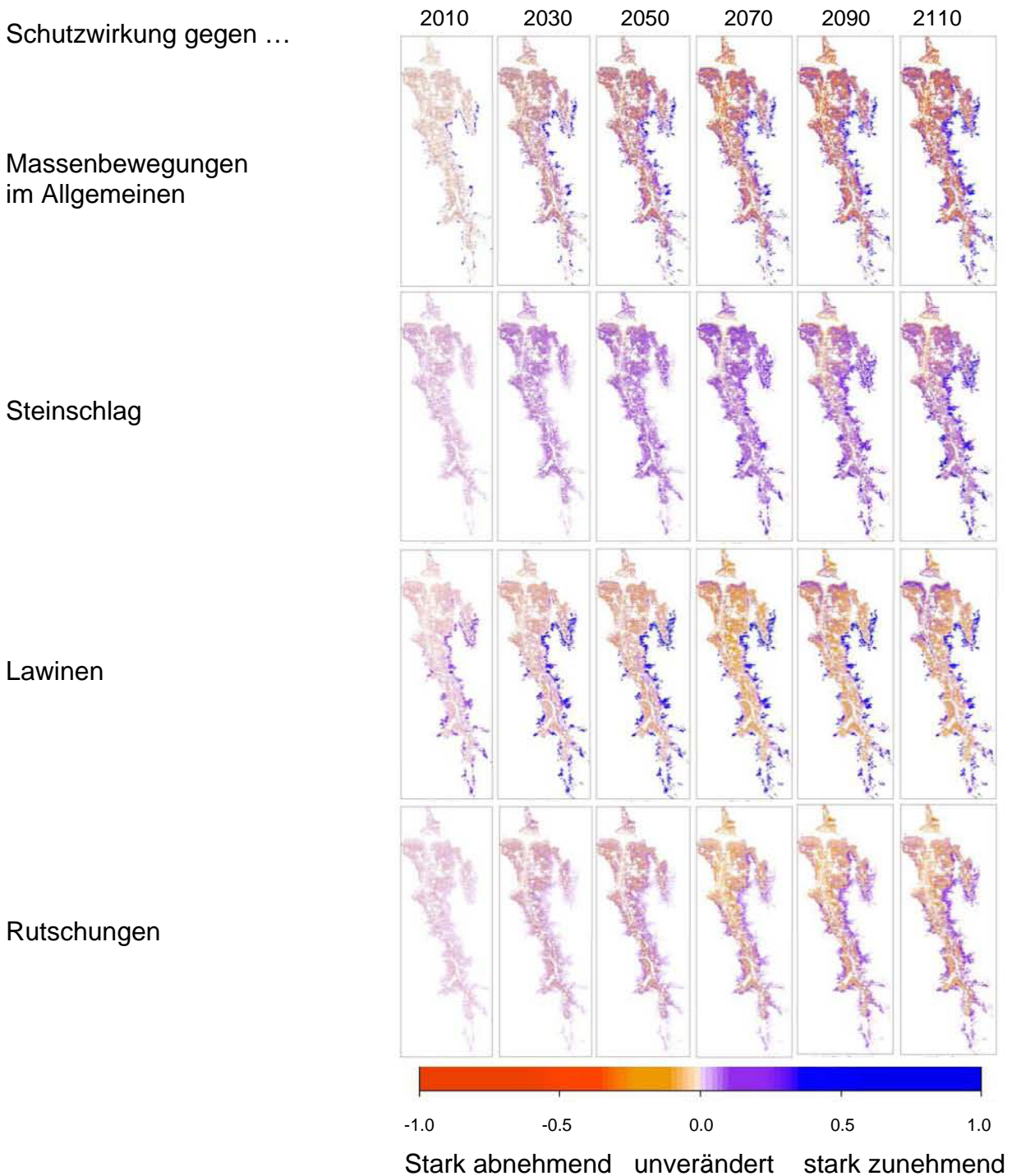


Abbildung 3.5-1. Karten der prognostizierten Entwicklung der Schutzwirkung von 2010 bis 2110 in der Fallstudie Visp-Saastal für verschiedene Naturgefahren. Die Farben geben die relative Veränderung von Indikatoren der Schutzwirkung im Vergleich zum Zustand im Jahr 2000 an. Rot eingefärbt sind Gebiete, in denen die Schutzwirkung abnehmen dürfte, blau eingefärbt solche mit zunehmender Schutzwirkung. Quelle: Projekt Bugmann & Elkin.

Hochwasser-Schutzwirkung nimmt bei Einwachsen von Buchen leicht zu. – Bei einer Erwärmung könnten Buchen in heutigen Fichten-Tannenwäldern mit staunassen Böden (Standortstyp *Bazzanio-Abietetum*) einwachsen. Beregnungsexperimente zeigten nun, dass auf tiefer gelegenen Standorten mit denselben Böden, aber Buchenbestockung das Infiltrationsvermögen etwas grösser ist als in Fichten-Tannenwäldern (Projekt «Wurzeln & Hydrologie», Lüscher et al.).

Ein Einwachsen von Buchen dürfte in diesen Nadelwäldern also die Schutzwirkung gegenüber Hochwasser leicht verbessern. Dieses Resultat kann nicht unbesehen auf andere Waldstandortstypen mit anderen Bodeneigenschaften übertragen werden.

Bleibende offene Fragen

Forschung zu den Auswirkungen des Klimawandels auf Waldprodukte und -leistungen ist komplex, muss viele Annahmen treffen und Aussagen über unsichere Entwicklungen und vage Zusammenhänge machen. Dazu kommt die Schwierigkeit, Auswirkungen unterschiedlicher Art (z.B. auf den Schutz vor Naturgefahren und auf die Biodiversität) oder zu unterschiedlichen Zeiten (heute oder erst in vielen Jahrzehnten) relativ zueinander zu bewerten. Diesen Schwierigkeiten, Auswirkungen zu quantifizieren, steht die Notwendigkeit gegenüber, Handlungsempfehlungen auf fundierte Kenntnisse zu Auswirkungen des Klimawandels auf Waldprodukte und -leistungen zu stützen. Die bereits vorliegenden Abschätzungen der Auswirkungen sind vertieft zu interpretieren, um deren räumliches und zeitliches Auftreten besser zu verstehen, und sie sind relativ zueinander zu bewerten (vgl. Kap. 3.6). Auch das Umfeld ist einzubeziehen; bezüglich langfristiger Schutzwirkung spielen zum Beispiel auch Wildeinflüsse auf die Waldverjüngung eine wesentliche Rolle.

3.6 Waldmanagement zur Milderung und Anpassung und dessen ökonomische Bewertung

Kenntnisstand

Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Natur und die verschiedensten Lebensbereiche der Menschen werden derzeit in den unterschiedlichsten Fachgebieten intensiv untersucht. Die ökonomischen Konsequenzen des Klimawandels wurden in einer Vielzahl von Studien behandelt (z.B. Ecoplan 2007, Kemfert 2007, Ackerman et al. 2009). Für die Schweiz hat Ecoplan (2007) die Kosten der Anpassung an den Klimawandel geschätzt und mit den zu erwartenden Schadenskosten verglichen. Für Wälder wurden allerdings nur qualitative Aussagen gemacht.

Milderung oder Anpassung? – Das Potenzial für Milderung (Mitigation) des Klimawandels ist im Wald beschränkt (Bugmann 2008). Infolge von Störungsereignissen könnte der Wald sogar zu einer Kohlenstoff-Quelle werden. Dies würde die Schweiz finanziell erheblich belasten, weil sie in einem solchen Fall ihre Verpflichtungen im Rahmen der Klimakonvention anderweitig decken müsste. Das Potenzial für Anpassung (Adaptation) ist hingegen relativ gross. Dabei sind die betrachteten Zeithorizonte wichtig: Die Anpassung kann schrittweise erfolgen; die in den vergangenen zehn Jahren behandelten Waldflächen können als Grössenordnung der maximalen Steuerungsmöglichkeiten dienen. Diese liegen gesamtschweizerisch von etwa 1995 bis 2005 bei 44% der Waldfläche, im Mittelland aber bei 74% (Duc et al. 2010). Dabei ist zu beachten, dass der Wald sich in den nächsten Jahrzehnten alleine infolge der geplanten Bewirtschaftung erheblich wandelt; so wird ein erheblicher Teil der heutigen Althölzer in 50 Jahren verjüngt sein.

Resiliente und anpassungsfähige Wälder als Zielvorstellung. – In den letzten gut hundert Jahren hat die Waldwirtschaft in der Schweiz gelernt, mit Risiken umzugehen. Naturnahe Mischwälder gelten zudem als resilient, d.h. sie haben ein grosses Vermögen, sich nach Störungen wie Stürmen wiederum in ihren ursprünglichen Zustand zu entwickeln – wobei dieser Zustand in einem anderen Klima oft nicht mehr erreichbar ist. Daher ist der Begriff «Anpassungsfähigkeit» treffender: Ein anpassungsfähiger Wald kann auch während des Übergangs in ein anderes

Klima gedeihen und Waldleistungen erbringen. Waldbau in Zeiten des Klimawandels muss daher die Wälder nicht nur resilient, sondern auch anpassungsfähig machen. Daher wird im Folgenden das Begriffspaar Resilienz/Anpassungsfähigkeit verwendet.

Waldbauliche Strategien der Anpassung. – Der naturnahe Waldbau, wie er in der Schweiz praktiziert wird, hat die Produktionsrisiken bereits erheblich reduziert, z.B. mit einem zunehmenden Anteil von Mischbeständen, und arbeitet weiterhin in Richtung Risikoreduktion (Brang et al. 2008). So werden die Bestände oft derart verjüngt, dass die Resilienz/Anpassungsfähigkeit später gross ist (Finkeldey & Ziehe 2004, Brang et al. 2008). Zu überdenken ist dabei, ob gewisse Prinzipien des naturnahen Waldbaus situationsbezogen weiter entwickelt werden sollen, weil sie die Diversität der entstehenden Wälder einschränken. Dazu gehören der Verzicht auf vorzeitige Nutzung, die starke Bevorzugung der Naturverjüngung und von standortsheimischen Baumarten sowie die sehr kleinflächige Verjüngung (Brang et al. in prep.).

Produktionsrisiken dürften zunehmen. – Um die Kostenfolgen des Klimawandels für Wälder abzuschätzen, muss neben der finanziellen Entwicklung (Preise und Kosten) auch die Entwicklung natürlicher Produktionsrisiken geschätzt werden. Die grössten Risiken für mitteleuropäische Wälder stellen abiotische Faktoren wie Wind, Nassschnee und Feuer sowie biotische Faktoren wie Borkenkäfer und andere Pathogene dar (Hanewinkel et al. 2011). Die Prognose dieser Produktionsrisiken ist mit grossen Unsicherheiten behaftet, allerdings wird allgemein davon ausgegangen, dass diese als Folge des Klimawandels zunehmen (z.B. Rigling et al. 2008; Kap. 3.4).

Die Risiken sind vielfältig. – Neben Produktionsrisiken ergeben sich grosse Unsicherheiten hinsichtlich wirtschaftlicher Risiken (Holzpreisverfall, Finanzkrise), künftiger rechtlicher Risiken (Änderung der Gesetzeslage) sowie allgemein gesellschaftlicher und politischer Risiken (geänderte gesellschaftliche Anforderungen mit entsprechenden Regulierungen).

Methoden zur Untersuchung von Produktionsrisiken. – Zur Berücksichtigung sich ändernder Produktionsrisiken gibt es verschiedene Vorgehensweisen: mechanistische Modelle (Seidl et al. 2008) zur Schätzung des Borkenkäferrisikos in Fichtenbeständen, historische Mortalitätsraten (Beinhofer & Knoke 2010, Schelhaas 2008), historische Preise in Verbindung mit einer Monte-Carlo-Simulation (Knoke & Wurm 2006, Beinhofer & Knoke 2010, Höllerl 2009) und die von Markowitz (1952) entwickelte Portfoliotheorie. Eine Möglichkeit, die Bandbreite der Auswirkungen des Klimawandels zu studieren, sind Szenarioanalysen (Lexer & Seidl 2007).

Im Forschungsprogramm untersuchte Fragen

Ziel des Projekts «Ökonomische Konsequenzen» (Pauli et al.) ist es, die Kosten des Klimawandels für die Waldwirtschaft in der Schweiz zu bewerten. Ergänzend hierzu wird im Projekt «Risikomanagement Forstbetriebe» (Holthausen et al.) ein für Forstbetriebe angemessenes Vorgehen für ein Risikomanagement entwickelt.

Wichtigste Forschungsergebnisse

Elemente des Bewertungsmodells. – Das wichtigste Zwischenergebnis im Projekt «Ökonomische Konsequenzen» ist ein Bewertungsmodell. Als wichtigste Kriterien wurden zunächst die natürlichen Produktionsrisiken, Bewirtschaftungsstrategien (Bestockungsziele und Sets von waldbaulichen Eingriffe), die Holzpreise und die Kosten für die waldbaulichen Eingriffe und die Holzernte definiert.

Natürliche Produktionsrisiken. – Für die wirtschaftlich bedeutendsten natürlichen Risiken Sturm, Borkenkäfer und Waldbrand (Schelhaas 2008) wurden aufgrund historischer Daten die erwarteten Schadenflächen unter heutigen Bedingungen (Temperatur und Niederschlag) statistisch geschätzt. Unter Annahme erhöhter Temperaturen und veränderter Niederschläge (Frei 2004) und (als Szenario) erhöhter Häufigkeit starker Stürme (Münchner Rück 2001) wurden anschliessend Schadenflächen für die kommenden Jahrzehnte geschätzt (Abbildungen 3.6-1 und 3.6-2). Diese fliessen als Teil der Produktionsrisiken in das Bewertungsmodell ein. Der Unsicherheit der Eingangsparameter wurde durch die Verwendung der Monte-Carlo Methode Rechnung getragen.

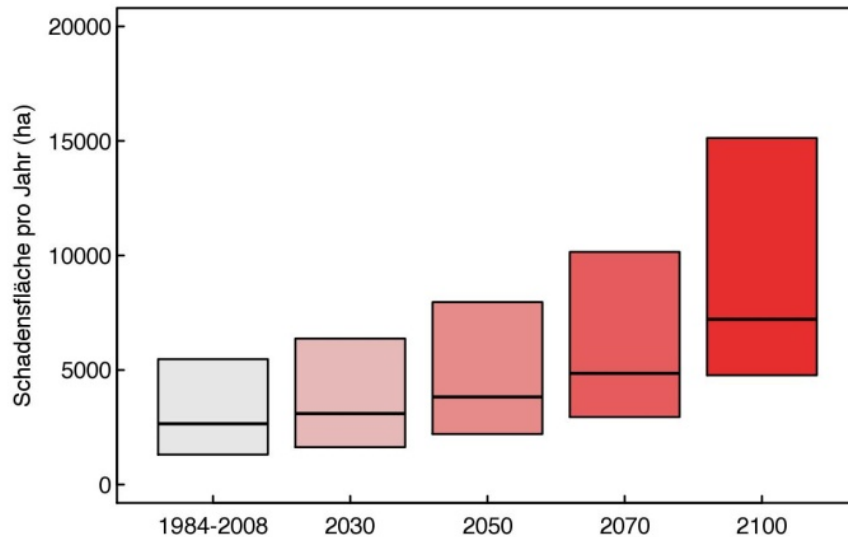


Abbildung 3.6-1. Entwicklungsszenarien von Schadenflächen unter Annahme erhöhter Temperaturen. Quelle: Projekt Pauli et al.

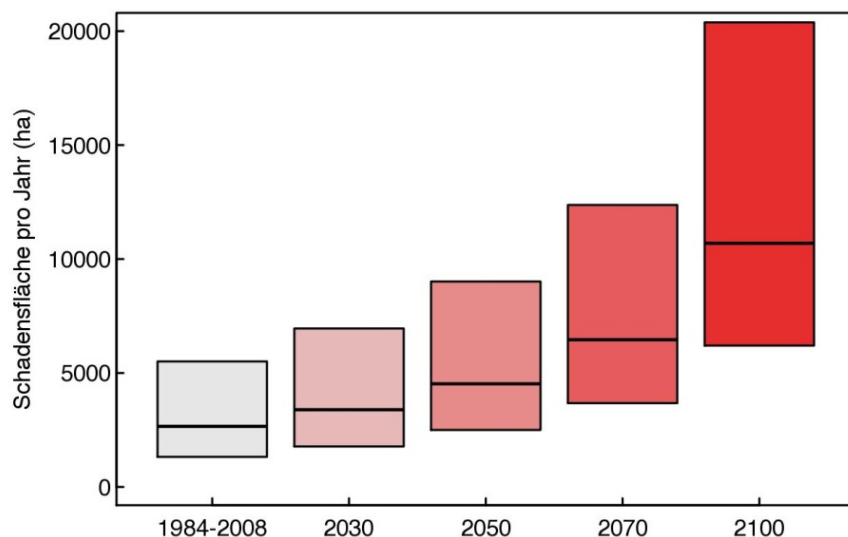


Abbildung 3.6-2. Entwicklungsszenarien von Schadenflächen unter Annahme erhöhter Temperaturen und erhöhter Häufigkeit starker Stürme. Quelle: Projekt Pauli et al.

Waldbaustrategien. – Es wurden eine risikomeidende Strategie (Umbaustategie), eine auf Kostenminderung ausgerichtete «Laisser-faire-Strategie» und eine ertragsorientierte Strategie definiert. Jede Strategie beinhaltet Regeln zur Wahl des Bestockungsziels, u.a. aus Resultaten des Projekts «PorTree» (Zimmermann et al.), sowie der waldbaulichen Eingriffe. Diese Regeln erlauben es, Bestockungsziele automatisiert für jeden Stichprobenpunkt des Landesforstinventars (LFI) herzuleiten. Für das Mittelland ergibt sich auf gut 50% der LFI-Stichprobenflächen als Bestockungsziel ein Laubmischwald ohne Buchen. Erwartungsgemäss wird in der risikomeidenden Strategie die Fichte stark zurückgedrängt, während in der ertragsorientierten Strategie trotz erhöhtem Produktionsrisiko an einem Fichtenanteil zwischen 0 und 30% festgehalten wird.

Ökonomische Bewertung. – Die ökonomische Bewertung erfolgt mit der Methode der dynamischen Investitionsrechnung (Hanewinkel & Navarro 2005). Die Holzpreise als wichtige Eingangsgrössen für die finanzielle Bewertung werden aus historischen Preisreihen gewonnen. Monte-Carlo-Simulationen ermöglichen es, die Volatilität der Preise zu berücksichtigen und damit finanzielle Risiken der Holzproduktion abzuschätzen.

Bleibende offene Fragen

Die finanzielle Bewertung von Massnahmen über so lange Zeiträume, wie sie in der Klimawandeldiskussion genannt werden, ist problematisch, da sie stark durch heutige Präferenzen geprägt ist (Hostettler & Deegen 2009). Die grossen Unsicherheiten bei den Eingangsparametern und die oft bestenfalls qualitativen Beschreibungen zukünftiger Ökosystemzustände verunmöglichen eine präzise Quantifizierung der Folgekosten. Szenarien sind keine Prognosen, aber können immerhin verdeutlichen, welche Konsequenzen politische oder betriebliche Entscheidungen unter ansonsten gleichen Entwicklungen haben (Mantau & Saal 2011). Die Herleitung solcher Szenarien ist ein offener Punkt, den es zu klären gilt.

Zum Vergleich der Produktionsrisiken unterschiedlicher Waldbauziele, also der Bestockungen am Ende des Produktionszeitraumes, werden die laufenden Projekte erste Antworten liefern. Es ist aber zum Beispiel unklar, wie Mischbestände verschiedener Baumarten oder Herkünfte derselben Baumart oder unterschiedliche Vorratshaltungen ökonomisch zu bewerten sind. Viele offene (normative) Fragen bestehen im Zusammenhang mit der Abgrenzung des zu bewertenden Systems, insbesondere bei Ökosystemleistungen, die schwierig zu quantifizieren sind.

Derzeitige Empfehlungen für die Forstpraxis zum Umgang mit Risiken beziehen sich stark auf einzelne Risiken (v.a. Naturrisiken) oder sind auf die konkrete Ereignisbewältigung ausgelegt. Ein unternehmensweites Risikomanagement (Enterprise Risk Management) ist bisher v.a. in grossen Betrieben in anderen Branchen umgesetzt. Es sollte langfristig auch für Forstbetriebe implementiert werden.

3.7 Fazit: Kenntnisstand und Kenntnislücken

Die Klimaveränderung dürfte stark ausfallen. – Bis Ende des 21. Jahrhunderts ist mit einer erheblichen weiteren Erwärmung zu rechnen. Beim Niederschlag ist langfristig von trockeneren Sommern auszugehen; Trockenperioden dürften sich zudem infolge der Erwärmung stärker auf die Vegetation auswirken. Falls eine Erwärmung von + 4 oder + 6 °C eintreffen sollte, bedeutet das, dass die auch bei geringerer Erwärmung erwarteten Veränderungen schneller ablaufen und sich langfristig viel stärker auswirken. Ob sich die Häufigkeit und Intensität von Stürmen verändert, ist unsicher. Für das Waldmanagement bedeutet die Unsicherheit der Klimaentwicklung, dass eine Festlegung auf ein Szenario sehr riskant wäre. Management-

strategien müssen darauf ausgerichtet sein, bei unterschiedlichen Szenarien zu taugen. Für Managemententscheidungen im Wald wäre es hilfreich, das «richtige» Klimaszenario zu kennen. Im Sinn einer genauen Vorhersage ist dies zwar kaum möglich, aber falls sich die Gewissheit über die Klimaentwicklung erhöht, wäre dies bereits nützlich.

Extremereignisse sind für die Waldentwicklung bedeutend. – Auf die Waldentwicklung wirken sich Extremereignisse vorläufig stärker aus als sich langsam ändernde Durchschnittswerte von Klimaparametern; einschneidend dürften vor allem ausgeprägte Trocken- und Hitzeperioden sowie heftige Stürme sein, mit ihren unmittelbaren Folgen (trockenstressbedingte Mortalität, Sturmwurf) und späteren Auswirkungen (Borkenkäfer, Waldbrand). Der Hitzesommer 2003 hat einen Vorgeschmack auf zukünftige Extremereignisse gegeben. Ihn haben die meisten Schweizer Wälder zwar relativ schadlos überstanden. Folgen aber in Zukunft zwei oder mehr solche Ereignisse direkt aufeinander, dürften die Wälder stark betroffen sein. Für einzelne Baumarten kann auch die Einwanderung von Schadorganismen einschneidende Folgen haben, wie die Beispiele des Kastanienrindenkrebsses, der Ulmenwelke und neu der Eschenwelke zeigen. Naturgemäss sind seltene Extremereignisse und die Wanderung bzw. Einschleppung von Schädlingen schwer vorhersagbar.

Bestimmungsfaktoren des Baumartenwechsels. – Der langfristig anzunehmende Baumartenwechsel (s. Kap. 3.3) hängt vom Ausmass der Klimaänderung ab. Trockenheitsbedingte Mortalität könnte junge Bäume zwar besonders treffen, diese haben aber bei natürlicher Verjüngung meist mehrere Chancen, d.h. sie können sich nach einem Fehlschlag in einem witterungsmässig günstigeren Jahr doch noch erfolgreich etablieren. Wie anpassungsfähig Waldbäume aufgrund ihrer genetischen Variation sind, ist noch unklar.

Klimaanfällige Standorte und Bestände. – Die in Kap. 3.2 dargestellten Karten der Trockenheits-Indizes (Projekt Remund et al.) scheinen mit Mortalitätsphänomenen relativ gut überein zu stimmen; dies bleibt aber noch zu verifizieren. Es scheint auch grundsätzlich möglich, zur Identifizierung klimaanfälliger Standorte und Bestände die Standortskartierung zu verwenden; dazu ist allerdings die festgestellte Streuung des Wasserhaushalts innerhalb jeder Standortgruppe noch zu verringern. Die Projekte «Klimaanfälligkeit» (Weber et al.), «Baumortalität» (Dobbertin & Zingg) und «RetroPro» (Bugmann et al.) versprechen hier Fortschritte, indem Bestandesreaktionen untersucht werden. Geostatistische Methoden könnten helfen, lückige Bodeninformationen zu ergänzen.

Waldleistungen. – Die Mortalität von Bäumen kann Waldleistungen unmittelbar beeinträchtigen; ein vermindertes Baumwachstum ist dagegen weniger folgenschwer. Die Auswirkungen des Klimawandels auf Waldleistungen dürften mit fortschreitender Erwärmung zunehmen, hängen aber stark von einzelnen Extremereignissen ab. Die Auswirkungen auf die Holzversorgung und damit auf die Kohlenstoff-Senkenleistung des Waldes dürften erheblich ausfallen. Langfristig droht ein Einbruch der Nadelholzversorgung, der durch erhöhten Zuwachs in höheren Lagen (bei wesentlich höheren Holzerntekosten) nur zum kleinen Teil kompensiert wird. Bezüglich des Schutzes vor Naturgefahren ist die Situation unklar. Zunehmende Störungsereignisse dürften die Schutzwirkung vermindern, v.a. in tieferen Lagen; in höheren Lagen nimmt aber die Waldfläche zu, steigt die Waldgrenze an und wachsen die Wälder besser, was die Schutzwirkung vorläufig verbessert. Die Lebensraumfunktion des Waldes ist stark durch die vergangene Bewirtschaftung geprägt. Positiven Effekten des Klimawandels (erhöhte Konkurrenzkraft gefährdeter Arten auf Trockenstandorten) stehen negative gegenüber (gefährdete Eiszeitrelikte). Bezüglich Walderholung und Grundwasserqualität gibt es kaum Hinweise auf verminderte Waldleistungen.

Kenntnislücken. – Ein Teil der heutigen Kenntnislücken lässt sich im Rahmen des Forschungsprogramms nicht oder nur ansatzweise schliessen. Bei anderen Lücken sind die Aussichten für einen wesentlichen Wissensgewinn besser. Zu den bleibenden Lücken zählen wahrscheinlich die Unsicherheit über die Klimaentwicklung, die lückige Bodeninformation, die Durchwurzelung, die Abschätzung von Wanderungsbewegungen von Neobiota und komplexe Interaktionen zwischen verschiedenen Auswirkungen. Im Rahmen des Forschungsprogramms voraussichtlich beantwortbar sind folgende Fragen: Eine verbesserte Sensitivitätseinschätzung und -kartierung inkl. einer räumlich expliziten Modellierung von Bodeneigenschaften; die Modellierung von Sturmrisiken; die Abschätzung der genetischen Variation der Waldbäume und damit ihrer Anpassungsfähigkeit; die Entwicklung differenzierter Waldbaustrategien unter Berücksichtigung ökonomischer Aspekte und der Unsicherheiten, wozu allerdings ein Waldmanagementmodell, welches Störungen und Eingriffsstrategien gut abbilden kann, nötig ist.

4 Folgerungen für das Waldmanagement

Fazit

- Die bereits erarbeiteten Handlungsempfehlungen zum Umgang mit dem Klimawandel scheinen vernünftig, könnten aber bei starkem und raschem Klimawandel revisionsbedürftig werden.
- Die nationale Adaptationsstrategie priorisiert kritische Schutzwälder, fichtenreiche Bestände in tieferen Lagen und klimasensitive Waldstandorte.
- Der Wissensbedarf auf der operativen Ebene ist erheblich. Neben einer besseren und differenzierten Abschätzung der Auswirkungen geht es um die Bewertung von Anpassungsstrategien, insbesondere des naturnahen Waldbaus mit seinen Einzelmassnahmen.

4.1 Nationale Ebene

Kantonale Handlungsempfehlungen. – In der Schweiz haben bislang die vier Kantone BS/BL, SG, TG und ZH Handlungsanweisungen zum Umgang mit dem Klimawandel entwickelt (Forstamt beider Basel 2006, Forstamt Thurgau 2007, Kantonsforstamt St.Gallen 2008, Amt für Landschaft und Natur 2009), weitere werden derzeit erarbeitet. Es fanden auch mehrere Weiterbildungskurse zum Thema statt. Die waldbaulichen Empfehlungen zielen auf eine höhere Vitalität und Stabilität des Einzelbaumes, auf Risikominderung durch Vielfalt und auf die Naturnähe der Bestände ab. Dies soll durch naturnahen Waldbau mit standortgerechten Baumarten, natürliche Waldverjüngung und eine Erhöhung der Baumartenvielfalt erreicht werden. Diese Grundsätze scheinen zwar vernünftig, könnten aber der Ergänzung bedürfen, wenn sich das Klima stark und rasch ändert.

Handlungsempfehlungen der Nachbarländer. – Im Rahmen regelmässiger Konsultationen beschäftigten sich die Waldverantwortlichen der deutschsprachigen Länder bzw. Regionen (Deutschland, Österreich, Liechtenstein, Südtirol, Schweiz) im April 2011 in Zürich mit dem Klimawandel. Die Strategien zum Umgang mit dem Klimawandel sind in den Nachbarländern noch nicht ausgereift. Übereinstimmung bestand darin, dass eine eindeutige politische Zielsetzung bzgl. Waldleistungen erforderlich sei. Der Klimawandel beeinflusst die Waldentwicklung und die Waldleistungen, doch dies trifft auch auf das Waldmanagement in mindestens gleichem Mass zu. Die Methoden des naturnahen Waldbaus sind angesichts des Klimawandels zu überprüfen und allenfalls zu aktualisieren. Das Konzept «Waldumbau zur Anpassung an den Klimawandel» der Bayerischen Staatsforsten (Möges 2007) fokussiert auf Waldumbau-massnahmen in Waldbeständen mit zeitweise auftretendem Wassermangel und führender Fichte.

Nationale Adaptationsstrategie. – Im Auftrag des Bundesrates wird eine nationale Adaptationsstrategie entwickelt, in welcher die Anpassung des Waldes an den Klimawandel ein prioritäres Thema ist (BAFU in prep.). Die Strategie gibt Antwort auf die drei Fragen «welche Folgen dürfte der Klimawandel im Wald haben?», «wie sind diese Folgen zu bewerten?» und «welcher Handlungsbedarf ist daraus abzuleiten?» Sie beruht auf einer vorläufigen Einschätzung der Situation, da erst wenig gesicherte Erkenntnisse vorliegen. Ein erhöhter Handlungsbedarf liegt gemäss der Adaptationsstrategie bei kritischen Schutzwäldern, fichtenreichen Beständen in tieferen Lagen sowie bei trockenheits- oder waldbrandgefährdeten Standorten. Auf allen übrigen Standorten ist auf erhöhte Resilienz und Anpassungsfähigkeit hinzuwirken, so dass heute verjüngte Bäume auch unter verändertem Klima gute Überlebenschancen haben.

Kritische Schutzwälder. – Gemäss dem dritten Landesforstinventar (LFI3) weisen rund 67'900 ha Schutzwälder sowohl ungenügende oder ungeeignete Verjüngung als auch verminderte Bestandesstabilität auf (z. B. infolge gleichförmiger Struktur mit wenig Widerstandskraft; s. Kap. 3.5). Diese Bestände sind durch Stürme und anschliessende Borkenkäfer-Kalamitäten erheblich gefährdet. Durch Pflegeeingriffe sind Widerstandskraft sowie Resilienz und Anpassungsfähigkeit dieser Bestände über einen Zeitraum von 30 bis 50 Jahren zu erhöhen.

Fichtenreiche Bestände in tieferen Lagen. – Solche Bestände haben sich in den letzten Jahren speziell in tieferen Lagen (kollin und submontan) als empfindlich gegenüber Sturm, Borkenkäfer und Trockenheit erwiesen. Von 1995 bis 2005 wurden in tieferen Lagen rund 4,4 Millionen m³ Fichtenholz durch den Sturm Lothar (1999) geworfen, weitere 3,7 Millionen m³ Fichte fielen als Käferholz an. Da die Fichte die wichtigste Baumart für die einheimische Sägereiindustrie ist, sollte sie gezielter im Sinn eines Risikoabbaus bewirtschaftet werden, vor allem dort, wo hohe Fichtenanteile Klumpenrisiken bilden. Ziel ist der stabilere (Misch-)Wald. Die betroffenen Flächen summieren sich gemäss LFI3 zu rund 50'000 ha, während es gemäss LFI 2 (Erhebungsperiode 1985-1995) noch rund 64'000 ha waren.

Klimasensitive Waldstandorte. – Als klimasensitiv anzusehen sind Standorte, auf denen die Bäume oft unter Trockenstress stehen (infolge langen Trockenperioden, starker Einstrahlung und geringer Wasserspeicherkapazität des Bodens) sowie Standorte mit hohen Anteilen an dürrer Holz in brandgefährdetem Klima (z.B. Tessin, Wallis, Graubünden). Im Rahmen des Forschungsprogramms Wald und Klimawandel sollen die Risiken dieser Kategorie genauer beschrieben und lokalisiert werden. Derzeit ist von 40'000 ha auszugehen.

4.2 Entwicklung von Anpassungsstrategien in anderen Ländern

Mehrere Forstverwaltungen in Mitteleuropa haben in den letzten Jahren Strategien zum Umgang mit dem Klimawandel entwickelt und entsprechende Handlungsempfehlungen herausgegeben (z.B. Möges 2007). Eine europaweite Übersicht über Anpassungsmassnahmen hat die Europäische Kommission geschaffen (Lindner et al. 2008). Im Rahmen einer COST Action (ECHOES)⁹ wurde eine europaweite Datenbank von Anpassungsmassnahmen und ihres Anwendungsbereichs erstellt, deren Auswertung im Gang ist. Mehrere Reviewaufsätze behandeln Anpassungsstrategien an den Klimawandel aus wissenschaftlicher Perspektive (Millar et al. 2007, Bolte & Ibisch 2007, Brang et al. 2008, Rigling et al. 2008, Blate et al. 2009, Bolte et al. 2009 und 2010, Walentowski et al. 2009, Brang et al. in prep.).

4.3 Wissensbedarf zu Anpassungsstrategien

Wissensbedarf auf der operativen Ebene. – Diskussionen mit Forstverwaltungen und Förstern zeigen, dass sie viele Fragen rund um die Thematik «Wald und Klimawandel» haben. Folgende Themen werden immer wieder genannt oder sind umstritten:

- Eine genauere Abschätzung der Auswirkungen des Klimawandels auf den Wald
- Eine verbesserte Frühwarnung vor Störungen (Borkenkäfer/Feuer)
- Eine verstärkte phytosanitäre Waldbeobachtung zum Erkennen von Neobiota und/ oder Schädlingen
- Der Umgang mit der Unsicherheit der Klimaentwicklung

⁹ www2.gip-ecofor.org/publi/page.php?id=2&rang=0&domain=37&lang=en_GB

- Die Bewertung von Anpassungsmassnahmen, insbesondere des naturnahen Waldbaus und des Dauerwalds, oder von Naturverjüngung vs. Pflanzung
- Der konkrete Nutzen bzw. die Grenzen von grosser Baumartenvielfalt und feinen Baumartenmischungen
- Standortsspezifische Baumartenempfehlungen unter Berücksichtigung von Exoten und fremdländischen Provenienzen
- Der Nutzen von Standortkartierungen unter veränderten Klimabedingungen
- Die Überarbeitung der Empfehlungen zur Herkunftswahl
- Die Etablierung eines einfachen Systems für Provenienznachweise
- Die Aktivierung des Knowhows der Förster zur Etablierung eines adaptiven Managements

Wissensbedarf auf der politischen Ebene. – Auf der politischen Ebene sind Lösungsansätze für Nutzungskonflikte gefragt, die sich in der Folge von Anpassungsmassnahmen ergeben dürften: Der Abkehr von der Fichte im Mittelland wegen zu hoher Produktionsrisiken steht in Konflikt mit der Nachfrage der Holzindustrie; der zunehmend praktizierte Ersatz der Fichte durch die Douglasie schafft Konflikte mit Naturschutzinteressen; es ist ein Bündel möglichst wirksamer Anpassungsmassnahmen mit nachvollziehbaren Prioritäten zu entwickeln, und dessen Kosten sind zu schätzen, als Beitrag zur nationalen Adaptationsstrategie.

5 Folgerungen für die 2. Phase des Forschungsprogramms

Fazit

- Ziel der 2. Programmphase ist es, wichtige verbleibende Wissenslücken zu schliessen, die Resultate in Form belastbarer Grundlagen für die Umsetzung aufzubereiten und erste Instrumente zur Umsetzung bereitzustellen.
- In Forschungsprojekten sollen die Grundlagen komplettiert, die Abschätzung der Risiken des Klimawandels verfeinert und Adaptationsstrategien entwickelt werden.
- Die Umsetzung der Resultate in die Praxis bekommt gegen Ende der 2. Programmphase grosses Gewicht. Es ist eine breite Palette zielgruppen-orientierter Produkte geplant.
- Strukturen and Abläufe des Programms haben sich grundsätzlich bewährt. Die Projektcalls werden aber aufgrund des stärkeren Fokus auf die Umsetzung der Resultate in die Praxis die erwarteten Resultate genauer beschreiben. Die Projekte sollen zudem sowohl von Wissenschaftlern als auch von Praktikern reviewt werden.

5.1 Generelle Ausrichtung der 2. Programmphase

In Kap. 3.7 wurden Wissenslücken aus wissenschaftlicher Sicht aufgezeigt und gewichtet, in Kap. 4.3 Wissenslücken aus Sicht der Forstpraxis und Waldpolitik. Neben Wissenslücken gibt es auch Lücken im Hinblick auf die Umsetzung. Die Ziele der Phase 2 des Forschungsprogramms sind,

1. die wichtigsten identifizierten Wissenslücken zu schliessen, auch durch Abschluss von einigen in Phase 1 des Forschungsprogramms begonnenen Forschungsprojekten,
2. bei Forschungsfragen, die langfristig auch ausserhalb des Kontexts des Klimawandels relevant sind, im Rahmen des Programms aber nur teilweise beantwortbar scheinen, in Pilotprojekten nach neuen Ansätzen zu suchen (Innovationsprojekte),
3. die Resultate in Form belastbarer Grundlagen für die Umsetzung aufzubereiten und erste Instrumente zur Umsetzung zu bereitzustellen.

5.2 Forschungsthemen der 2. Programmphase

Die folgende Beschreibung der Forschungsschwerpunkte der 2. Programmphase kann je nach verfügbaren Mitteln noch Änderungen erfahren.

Grundlagen und Auswirkungen auf den Wald. – Es soll versucht werden, mit geostatistischen Verfahren Bodenparameter räumlich explizit zu schätzen, welche für den Bodenwasserhaushalt bestimmend sind. Damit könnte man die vorhandenen Bodendaten und Standortinformationen in Wert setzen. Mit der Modellierung von Sturmschäden (Windgeschwindigkeit, gelände- und bestandesbedingte Anfälligkeit) wird eine Lücke bei der Einschätzung von Störungsereignissen geschlossen. Ein laufendes Projekt, in dem Herkunftsunterschiede bei Fichte, Tanne und Buche untersucht werden, um die Anpassungsfähigkeit dieser Hauptbaumarten bei unterschiedlichen Klimaszenarien abzuschätzen, wird fortgeführt.

Auswirkungen auf Waldleistungen und -ressourcen. – Die Auswirkungen des Klimawandels auf Biodiversität und Trinkwasser sollen in Form von Reviews des Kenntnisstandes abgeschätzt werden. Mit Risikoanalysen werden, auf der Basis der Abschätzungen der Auswirkun-

gen des Klimawandels auf die Waldleistungen und -produkte, deren Ausfallrisiken abgeschätzt. Bei Vorliegen verbesserter neuer Grundlagen (z.B. Klimaszenarien) sind die in der 1. Programmphase erarbeiteten Abschätzungen der Auswirkungen des Klimawandels auf die Waldleistungen und -produkte Holz, Kohlenstoff-Senke und Schutz vor Naturgefahren evtl. zu aktualisieren.

Anpassungsstrategien. – Zusammen mit Entscheidungsträgern werden mögliche Anpassungsstrategien erarbeitet, also Bündel von Anpassungsmassnahmen. Dann werden Kosten und Erträge bei der Bereitstellung von Waldleistungen und -produkten mit diesen Adaptationsstrategien über lange Zeiträume quantifiziert und bewertet. Besonderes Augenmerk wird auf die Bewertung der inhärenten Unsicherheiten der Szenarien gelegt. Die Eignung verschiedener Waldbaukonzepte, insbesondere die in der Schweiz üblichen Varianten des naturnahen Waldbaus, bzgl. Adaptation wird geprüft, ausgehend von den heutigen Schweizer Wäldern und Standorten. Es werden optimale Strategien identifiziert, auch für die zukünftige Nadelholzproduktion im Mittelland, und Kosten für no-regret-Strategien abgeschätzt. Eine wichtige Grundlage für die Erarbeitung dieser Anpassungsstrategien sind für Schweizer Wälder kalibrierte Waldmanagementmodelle.

Koordination mit anderen Forschungsprogrammen. – Das Programm strebt an, Synergien mit anderen Forschungsprogrammen zu nutzen, z.B. zu neuen Forschungsprogrammen im Bereich erneuerbarer Energien.

5.3 Umsetzung der Resultate des Forschungsprogramms in seiner 2. und 3. Phase

Die Einbettung des Forschungsprogramms in die Waldpolitik. – Die Waldpolitik und damit auch der Umgang mit dem Klimawandel ist grundsätzlich eine Verbundaufgabe von Bund, Kantonen und Gemeinden (BAFU 2011). Ihre Ziele werden zusammen mit den Waldeigentümern, im Dialog mit Interessengruppen und unter Nutzung der hohen Fachkompetenz im Wald und Holzbereich erreicht. Eine enge Zusammenarbeit mit anderen Politik- und Wirtschaftsbereichen wird praktiziert. Länderübergreifende Probleme, wie es der Klimawandel in hohem Masse darstellt, werden durch ein aktives Engagement der Schweiz auf internationaler Ebene angegangen. Wald und Klimawandel ist als neues Thema in die Waldpolitik 2020 aufgenommen worden (BAFU 2011), und dieses soll nun konkretisiert werden. Die Umsetzung des Forschungsprogramms berücksichtigt und nutzt diesen Rahmen.

Das Forschungsprogramm legt grosses Gewicht auf eine wirksame Umsetzung seiner Resultate in der Praxis. Dazu wird ein breiter Diskussionsprozess mit Praxisvertretern verschiedener Stufen geführt. Die Umsetzung erfolgt gegen Ende der 2. Programmphase und in der 3. Programmphase.

Handlungsempfehlungen auf der operativen Ebene für die Praxis. – Die erarbeiteten Grundlagen und Adaptationsstrategien werden zu Handlungsempfehlungen verdichtet und nutzergerecht präsentiert. Bei unterschiedlichen Szenarien wirksame Adaptationsmassnahmen werden in Form differenzierter Handlungsempfehlungen (bei unterschiedlicher Risikoakzeptanz) zuhanden der Forstpraxis dargestellt. Wichtige Elemente davon sind das Baumartenportfolio und konkrete Umsetzungsbeispiele.

Produktepalette. – Da sich die Resultate des Forschungsprogramms an unterschiedliche Entscheidungsträger richten, ist eine breite Palette von Produkten geplant (Tab. 5.3-1). Ein wichtiges Produkt des Programms ist ein Synthesebericht (Ende von Phase 2) zuhanden der Waldpo-

litik und der Öffentlichkeit, welcher im Hauptteil die Handlungsempfehlungen sowie in einem Anhang in knapper Form den Kenntnisstand zu Wald und Klimawandel darstellt. Sensitivitätskarten können auf kantonaler Ebene für interessierte Kantone produziert werden. Im Rahmen des Programms wird ein Beispiel in einem Pilotkanton erarbeitet.

Umsetzungspartner. – Bei der gesamten Umsetzung werden in der Umsetzung Partner beteiligt, zum Beispiel die Fachstellen für Waldbau (Lyss) und Gebirgswaldpflege (Maienfeld).

Politischer Handlungsbedarf. – Das Forschungsprogramm stellt Grundlagen zur Verfügung, damit die Entscheidungsträger den politischen Handlungsbedarf und die Kosten der Umsetzung der Handlungsempfehlungen ableiten können. Dies geschieht im Rahmen der Umsetzung der Waldpolitik 2020, welche vom Bundesrat im August 2011 gutgeheissen wurde.

5.4 Organisation des Forschungsprogramms

Organisationsstruktur. – Die Struktur des Forschungsprogramms hat sich grundsätzlich bewährt. Als Mitglied des Steuerungsausschusses ist Prof. J. Kirchner nach seinem Ausscheiden aus der WSL mittelfristig zu ersetzen. Die Programmleitung bestehend aus WSL und BAFU (P. Brang, S. Augustin) sowie eine Assistenzstelle (WSL, J. Born) wird beibehalten. Die Funktion der Workpackage Leitenden wird genauer definiert, die Anzahl der Workpackages und ihr Inhalt werden für die 2. Programmphase überprüft. Pro Jahr sollen ein bis zwei Programmmeetings stattfinden.

Projektcalls. – Die Projektcalls werden, aufgrund des stärkeren Fokus auf die Umsetzung der Resultate in die Praxis, die Projektanforderungen spezifischer darstellen. Das Reviewverfahren soll bei stark anwendungsorientierten Projekten neu auch vermehrt Reviews durch Praktiker einschliessen. Projektcalls werden weiter mit einer offenen Ausschreibung lanciert. Der erste Projektcall mit einem wissenschaftlichen Fokus wird wie die bisherigen lanciert, wobei ein einstufiges Verfahren gewählt wird (ohne Skizzenphase). Der Steuerungsausschuss kann bei Projekten, bei welchen die nötigen Kompetenzen nur bei wenigen möglichen Projektnehmern vorhanden sind, im Rahmen der GATT-Richtlinien auf eine offene Ausschreibung verzichten und Projekte im Einladungsverfahren durchführen.

Begleitgruppen. – Vor dem Lancieren umsetzungsorientierter Projekte, welche konkrete Umsetzungsprodukte erarbeiten sollen, werden der Bedarf an solchen Produkten und deren Anforderungen in Diskussion mit potenziellen Nutzern definiert. Solche Projekte sollen durch Nutzergruppen begleitet werden.

Tabelle 5.3-1. Geplante Produkte des Forschungsprogramms. Waldfachleute schliessen die Waldverantwortlichen auf kantonalen Ämtern und im BAFU sowie bei NGOs und selbständig Tätige, alle mit akademischer Ausbildung, ein.

Produkt	Beschreibung	Adressat	Phase
Synthesebericht	Handlungsempfehlungen im Waldbereich zum Umgang mit dem Klimawandel	Waldpolitik, Öffentlichkeit	2
Baumarten-Portfolio	Überarbeitetes Baumarten-Portfolio für jede Waldgesellschaft, regionalisiert	Förster, Waldfachleute, Waldeigentümer	2
Waldmanagement-Modell	In Mitteleuropa etablierter Wachstums-simulator, auf Schweizer Verhältnisse angepasst, Grundlage für die Bewertung von Adaptationsstrategien	Forschende, Waldfachleute	2
Merkblätter Wald im Klimawandel	Eigene für ca. 5 Grossregionen: Waldbau, Entscheidungshilfen in Form von Argument-listen und Gewichtungsvorschlag für die Argumente, mit Unterscheidung wichtiger Fälle	Förster, Waldfachleute, Waldeigentümer	3
Kurse und Vorträge, Umsetzungs-publikationen	Aufarbeitung des Wissensstands, Einführung der Merkblätter	Förster, Waldfachleute, Waldeigentümer	2, 3
Sondernummer Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen	Darstellung ausgewählter Programmresultate	Waldfachleute	2
Sensitivitätskarten	Regionale Karten der Klimasensitivität	Förster, Waldfachleute, Waldeigentümer	2
Frühwarnsystem Borkenkäfer	Webtool, das die aktuelle witterungsbedingte regionale Borkenkäfergefährdung darstellt	Förster, Waldfachleute, Waldeigentümer	2
Frühwarnsystem Waldbrand ¹⁰	Webtool, das die witterungsbedingte regionale Waldbrandgefährdung darstellt	Förster, Waldfachleute, Waldeigentümer	2
Bodenkarten	Regionalisierung von Bodenparametern	Forschende, Waldfachleute	2
Webtool Provenienznachweis	Webbasierte Datenbank zur Erfassung verwendeter Provenienzen	Förster, Waldfachleute, Waldeigentümer	2
Herkunftsempfehlungen	Aktualisierte Version der heutigen Empfehlungen	Förster, Waldfachleute	3
Website des Forschungsprogramms	Knappe Informationen über das Forschungsprogramm, Leistungsausweis, Resultate	Förster, Waldfachleute, Waldeigentümer	2
Dossier Wald und Klimawandel auf waldwissen.net	Knappe Darstellung aller Umsetzungs-publikationen, Hinweis darauf (inkl. auf Merkblätter)	Förster, Waldfachleute, Waldeigentümer	2
Medienkontakte	Bekanntmachung der Resultate über die Massenmedien, aktiv und reaktiv	Öffentlichkeit	2

¹⁰ Existiert bereits

6 Literatur

- Ackerman F, DeCanio SJ, Howarth RB, Sheeran K. 2009. Limitations of integrated assessment models of climate change. *Climat Change* 95: 297–315.
- Aitken SN, Yeaman S, Holliday JA, Wang T, Curtis-McLane S. 2008. Adaptation, migration or extirpation: climate change outcomes for tree populations. *Evolut Applic* 1: 95-111.
- Allen CD, Macalady, AK, Chenchouni H, Bachelet D, McDowell N, Vennetier M, Kitzberger T, Rigling A, Breshears DD, Hogg EH, Gonzalez P, Fensham R, Zhang Z, Castro J, Demidova N, Lim JH, Allard G, Running SW, Semerci A, Cobb N. 2010. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *For Ecol Manage* 259: 660-684.
- Amt für Landschaft und Natur. 2009. Wald und Klimawandel. Waldbauliche Empfehlungen des Zürcher Forstdienstes. Zürich, Abteilung Wald.
- BAFU. 2011. Waldpolitik 2020. 21 S. (www.bafu.admin.ch/wald/01152/11490)
- Begert M, Schlegel T, Kirchhofer W. 2005. Homogeneous temperature and precipitation series of Switzerland from 1864 to 2000. *Int J Climatol* 25: 65-80, doi: 10-1002/joc1118
- Beinhofer B, Knoke T. 2010. Finanziell vorteilhafte Douglasienanteile am Baumartenportfolio. *Forstarchiv* 81: 255-265.
- Blate GM, Joyce LA, Littell JS, McNulty SG, Millar CI, Moser SC, Neilson RP, O'Halloran K Peterson DL. 2009. Adapting to climate change in United States national forests. *Unasylva* 60, 231/232: 57-62.
- Bolte A, Ammer C, Lof M, Madsen P, Nabuurs GJ, Schall P, Spathelf P, Rock J. 2009. Adaptive forest management in central Europe: Climate change impacts, strategies and integrative concept. *Scand J For Res* 24: 473-482.
- Bolte A, Ammer C, Lof M, Nabuurs G-J, Schall P, Spathelf P. 2010. Adaptive forest management: a prerequisite for sustainable forestry in the face of climate change. In: Spathelf P (Ed.) *Sustainable forest management in a changing world: a European perspective*. Springer. pp. 115-139.
- Bolte A, Ibsch PL. 2007. Neun Thesen zu Klimawandel, Waldbau und Waldnaturschutz. *AFZ/Der Wald* 62(11): 572-576.
- Brang P, Bugmann H, Bürgi A, Mühlethaler U, Rigling A, Schwitter R. 2008. Klimawandel als waldbauliche Herausforderung. *Schweiz Z Forstwes* 159: 362-373.
- Brang P, Larsen JB, Spathelf P, Bauhus J, Boncina A, Drössler L, García-Güemes C, Heiri C, Kerr G, Lexer M, Mason B, Mühlethaler U, Nocentini S, Svoboda M. in prep. Opportunities and constraints of close-to-nature silviculture as adaptation strategy to climate change.
- Brang P, Schönenberger W, Frehner M, Schwitter R, Thormann J-J, Wasser B. 2006. Management of protection forests in the European Alps: an overview. *For Snow Landsc Res* 80: 23-44.
- Bugmann H. 1997. Sensitivity of forests in the European Alps to future climatic change. *Climate res* 8: 35-44.
- Bugmann H. 2008. Sinn und Unsinn der Anrechnung von Waldsenken im Kyoto-Protokoll (Essay). *Schweiz Z Forstwes* 159: 267-272.
- Bundesamt für Statistik, Bundesamt für Landwirtschaft. 2000. Bodeneignungskarte der Schweiz, 1: 200'000. Grundlagen für die Raumplanung. Bern, Eidg. Drucksachen- und Materialzentrale.
- BAFU, in prep. Anpassung an die Klimaänderung in der Schweiz – die Strategie des Bundes.
- CH2011. 2011. Swiss Climate Change Scenarios CH2011. Zurich, C2SM, MeteoSwiss, ETH, NCCR Climate, OcCC. 88 p.
- Christiansen E, Bakke A, 1988. The spruce bark beetles of Eurasia. In: Berryman AA (Ed.) *Dynamics of forest insect populations; patterns, causes, implications*. New York, Plenum Press, pp. 479-503.
- Christiansen E, Waring RH, Berryman AA. 1987. Resistance of conifers to bark beetle attack: searching for general relationships. *For Ecol Manage* 22: 89-106.

- Cioldi F, Baltensweiler A, Brändli U-B, Duc P, Ginzler C, Herold Bonardi A, Thürig E, Ulmer U. 2010. Waldressourcen. In: Brändli U-B (Red.) Schweizerisches Landesforstinventar. Ergebnisse der dritten Erhebung 2004-2006. Eidg. Forschungsanstalt WSL, Bundesamt für Umwelt BAFU, Birmensdorf, Bern. SS. 31-113.
- Conedera M, Cesti G, Pezzatti GB, Zumbrunnen T, Spinedi F, 2006. Lightning-induced fires in the Alpine region: An increasing problem. In: Viegas DX (ed), V International Conference on Forest Fire Research, 27-30 November 2006, Figueira da Foz, Portugal. [CD-ROM]. Portugal, ADAI/CEIF University of Coimbra, 9 S.
- Conedera M, Marozzi M, Jud B, Mandallaz D, Chatelain F, Frank C, Kienast F, Ambrosetti P, Corti G, 1996. Incendi boschivi al Sud delle Alpi: passato, presente e possibili sviluppi futuri. In: Rapporto di lavoro del Programma Nazionale di Ricerca «Mutamenti climatici e catastrofi naturali» PNR 3. Zürich, vdf Hochschulverlag. 143 S.
- Czajkowski T, Bolte A. 2006. Unterschiedliche Reaktion deutscher und polnischer Herkünfte der Buche (*Fagus sylvatica* L.) auf Trockenheit. Allg Forst- Jagdztg 177: 30-40.
- Duc P, Brändli U-B, Herold Bonardi A, Rösler E, Thürig E, Ulmer U, Frutig F, Rosset C, Kaufmann E. 2010. Holzproduktion. In: Brändli U-B (Red.) Schweizerisches Landesforstinventar. Ergebnisse der dritten Erhebung 2004-2006. Eidg. Forschungsanstalt WSL, Bundesamt für Umwelt BAFU, Birmensdorf, Bern. SS. 134-184.
- Ecoplan. 2007. Auswirkungen der Klimaänderung auf die Schweizer Volkswirtschaft (nationale Einflüsse). Auftraggeber Bundesamt für Umwelt (BAFU) und Bundesamt für Energie (BFE).
- Engesser R, Forster B, Meier F, Wermelinger B. 2008. Forstliche Schadorganismen im Zeichen des Klimawandels. Schweiz Z Forstwes 159: 344-351.
- Finkeldey R, Ziehe M. 2004. Genetic implications of silvicultural regimes. For Ecol Manage 197: 231-244.
- Forstamt beider Basel. 2006. Arbeitspapier zur Waldpflege und Waldverjüngung unter dem Aspekt der Klimaveränderung. Basel, Forstamt beider Basel.
- Forstamt Thurgau. 2007. Waldbau und Klimaveränderung. Strategiepapier. Empfehlungen des Forstdienstes Kanton Thurgau. Frauenfeld, Forstamt Thurgau.
- Forster B, Meier F. 2008. Sturm, Witterung und Borkenkäfer. Merkbl Prax WSL 44: 8 S.
- Frehner M, Wasser B, Schwitter R. 2005. Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald. Wegleitung für Pflegemassnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion. Bern, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL).
- Frei C, Calanca P, Schär C, Wanner G, Schädler B, Haeberli W, Appenzeller C, Neu U, Thalmann E, Ritz C, Hohmann R. 2007. Grundlagen. In: ProClim (Ed.). Klimaänderungen und die Schweiz 2050. Erwartete Auswirkungen auf die Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft, Bern, pp. 11-23.
- Gehrig-Fasel J, Guisan A, Zimmermann NE. 2007. Tree line shifts in the Swiss Alps: Climate change or land abandonment? J Veg Sci 18: 571-582.
- Grier CG, Running SW. 1977. Leaf Area of Mature Northwestern Coniferous Forests: Relation to Site Water Balance. Ecology 58: 893-899.
- Hanewinkel M, Navarro G. 2005. Finanzielle Konsequenzen des Waldumbaus – Analyse mit Methoden der Investitionsrechnung. In: Teuffel von K, Baumgarten M, Hanewinkel M, Konold W, Spiecker H, Sauter HU, Wilpert von K (Hrsg.). Waldumbau für eine zukunftsorientierte Waldwirtschaft. Berlin, Heidelberg, Springer Verlag: 248-260.
- Hanewinkel M, Hummel S, Albrecht A. 2011. Assessing natural hazards in forestry for risk management: a review. Eur J For Res 130: 329-351.
- Hegg C, Jeisy M, Waldner P. 2004. Wald und Trinkwasser. Eine Literaturstudie. Birmensdorf, Eidg. Forschungsanstalt WSL.
- Höllnerl S. 2009. Berücksichtigung finanzieller Aspekte bei waldbaulichen Entscheidungen – eine Fallstudie für reine Fichtenbestände in der Bergmischwaldzone. Forstarchiv 80: 4-14.
- Hostettler M, Deegen P. 2009. Kernfragen der Klimaökonomik und ihr Einfluss auf die Praxis. Forst Holz 64: 28-31.
- IPCC. 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment. Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.[Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt KB, Tignor M, Miller HL (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.

- Kantonsforstamt St.Gallen. 2008. Waldpflege und Waldverjüngung unter dem Aspekt der Klimaveränderung. Strategiepapier. Empfehlungen des Forstdienstes des Kantons St.Gallen. St.Gallen, Kantonsforstamt St.Gallen.
- Kaufmann E. 2011. Nachhaltiges Holzproduktionspotenzial im Schweizer Wald. *Schweiz Z Forstwes* 162: 300-311.
- Kemfert C. 2007. Die Kosten des Klimawandels sind höher als die Kosten des Klimaschutzes. *Volkswirtschaft* 9: 28-29.
- Kienast F, Brzeziecki B, Wildi O. 1996. Long-term adaption potential of Central European mountain forests to climate change: a GIS-assisted sensitivity assessment. *For Ecol Manage* 80: 133-153.
- Knoke T, Wurm J. 2006. Mixed forests and a flexible harvest strategy: A problem for conventional risk analysis? *Eur J For Res* 125: 303-315.
- Körner C. 1998. A re-assessment of high elevation treeline positions and their explanation. *Oecologia* 115: 445-459.
- Kozłowski TT, Pallardy SG. 1996: *Physiology of woody plants*. San Diego, Academic Press.
- Kräuchi N, Kienast F. 1993. Modelling subalpine forest dynamics as influenced by a changing environment. *Water Air Soil Pollut* 68: 185-197.
- Kupferschmid AD, Brang P, Bugmann H, Schönenberger W. 2004. Wie gut schützen Totholzbestände vor Naturgefahren? *Wald Holz* 85, 1: 33-36.
- Lindner M, Garcia-Gonzalo J, Kolström M, Green T, Reguera R, Maroschek M, Seidl R, Lexer MJ, Netherer S, Schopf A, Kremer A, Delzon S, Barbati A, Marchetti M, Corona P. 2008. Impacts of Climate Change on European Forests and Options for Adaptation. AGRI-2007-G4-06. Report to the European Commission Directorate-General for Agriculture and Rural Development. European Forest Institute; University of Natural Resources and Applied Life Sciences; INRA; Italian Academy of Forest Sciences. 173 p.
- Leuzinger S, Körner C. 2007. Tree species diversity affects canopy leaf temperatures in a mature temperate forest. *Agric For Meteorol* 146: 29-37
- Leuzinger S, Vogt R, Körner C. 2010. Tree surface temperature in an urban environment. *Agric For Meteorol* 150: 56-62
- Lexer MJ, Seidl R. 2007. Der österreichische Wald im Klimawandel – Auswirkungen auf die Waldbewirtschaftung. Online-Fachzeitschrift des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft.
- Markowitz HM. 1952. Portfolio selection. *J Finance* 7: 77–91.
- Mantau U, Saal U. 2011. Holzverknappung in der EU fordert die Branche. *Holz-Zentralblatt* 13: 327-328.
- Mayer H. 1992. *Waldbau auf soziologisch-ökologischer Grundlage* 4., neu bearb. Aufl. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart; Jena; New York.
- Menzel A, Sparks TH, Estrella N, Koch E, Aasa A, et al. 2006. European phenological response to climate change matches the warming pattern. *Glob Change Biol* 12: 1969-1976.
- Millar CI, Stephenson NL, and Stephens SL. 2007. Climate change and forests of the future: managing in the face of uncertainty. *Ecol Applic* 17: 2145-2151.
- Möges M. 2007. Klima-Konzept für den Staatswald. *LWF aktuell* 14, 5: 42-44.
- Moser B, Temperli C, Schneiter G, Wohlgemuth T. 2010. Potential shift in tree species composition after interaction of fire and drought in the central Alps. *Eur J For Res* 129: 625-633.
- Müller-Kroehling SW, Helge-Bussler H. 2007. Waldnaturschutz im Klimawandel. *LWF aktuell* 14: 30-33.
- Münchner Rück. 2001. Winterstürme in Europa (II). München, Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft, Zentralbereich Unternehmenskommunikation.
- Nabuurs GJ, Thurig E, Heidema N, Armolaitis K, Biber P, Cienciala E, Kaufmann E, Makipaa R, Nilson P, Petritsch R, Pristova T, Rock J, Schelhaas MJ, Sievanen R, Somogyi Z, Vallet P. 2008. Hotspots of the European forests carbon cycle. *For Ecol Manage* 256: 194-200.
- OcCC. 2008: Das Klima ändert – was nun? Der neue UN-Klimabericht (IPCC 2007) und die wichtigsten Ergebnisse aus Sicht der Schweiz.

- Peñuelas J, Ogaya R, Boada M, Jump AS. 2007. Migration, invasion and decline: changes in recruitment and forest structure in a warming-linked shift of European beech forest in Catalonia (NE Spain). *Ecography* 30: 829-837.
- Peuke AD, Schraml C, Hartung W, Rennenberg H. 2002. Identification of drought-sensitive beech ecotypes by physiological parameters. *New Phytologist* 154: 373-387.
- Rigling A, Dobbertin M, Bürgi M, Feldmeier-Christen E, Gimmi U, Ginzler C, Graf U, Mayer P, Zweifel R, Wohlgemuth T. 2006. Baumartenwechsel in den Walliser Waldföhrenwäldern. *Eidg. Forschungsanstalt WSL, Forum für Wissen* 2006: 23-33.
- Rigling A, Brang P, Bugmann H, Kräuchi N, Wohlgemuth T, Zimmermann NE. 2008. Klimawandel als Prüfstein für die Waldbewirtschaftung. *Schweiz Z Forstwes* 159: 316-325.
- Sauvard D. 2004. General biology of bark beetles. In: *Bark and wood boring insects in living trees in Europe - a synthesis*. Lieutier F, Day KR, Battisti A, Grégoire J-C, Evans HF (eds.), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 63-88.
- Schelhaas MJ. 2008. Impacts of natural disturbances on the development of European forest resources: application of model approaches from tree and stand levels to large-scale scenarios. *Alterra scientific contributions* 23 (Alterra green world research, 168).
- Scherrer D, Baader MKF, Körner C. in press. Drought-sensitivity ranking of deciduous tree species based on thermal imaging of forest canopies. *Agric For Meteorology*.
- Schraml C, Rennenberg H. 2002. Ökotypen der Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.) zeigen unterschiedliche Reaktionen auf Trockenstreß. *Forstwiss Cbl* 121: 59-72.
- Schumacher S, Bugmann H. 2006: The relative importance of climatic effects, wildfires and management for future forest landscape dynamics in the Swiss Alps. *Glob Change Biol* 12: 1435–1450.
- Schumacher S, Reineking B, Sibold J, Bugmann H. 2006: Modeling the impact of climate and vegetation on fire regimes in mountain landscapes. *Landsc Ecol* 21: 539–554.
- Seidl R, Rammer W, Jäger D, Lexer MJ. 2008. Impact of bark beetle (*Ips typographus* L.) disturbance on timber production and carbon sequestration in different management strategies under climate change. *For Ecol Manage* 256: 209–220.
- Sverdrup H. 2008. Towards critical loads for nitrogen based on biodiversity: Exploring a fully integrated dynamic model at test sites in Switzerland and Sweden. Background document for the 18th CCE workshop on the assessment of nitrogen effects under the ICP for Modelling and Mapping, LRTAP Convention (UNECE), Berne, Switzerland, 68 p.
- Thalenhorst W. 1958. Grundzüge der Populationsdynamik des grossen Fichtenborkenkäfers *Ips typographus* L. *Schr.reihe Forstl Fak Univ Gött* 21: 1-126.
- Theurillat JP, Guisan A, 2001. Potential Impact of Climate Change on Vegetation in the European Alps: A Review. *Clim Change* 50: 77-109.
- Theurillat JP, Guisan A. 2002. Erratum. *Clim Change* 53: 529-530.
- Thuiller W, Lavorel S, Araújo MB, Sykes MT, Prentice IC, Mooney HA. 2005. Climate Change Threats to Plant Diversity in Europe. *Proc Nat Acad Sci USA* 102: 8245-8250.
- Thürig E, Kaufmann E. 2008. Waldbewirtschaftung zu Senkenerhöhung? Mögliche Konfliktfelder und Synergien. *Schweiz Z Forstwes* 159: 281-287.
- Usbeck T, Wohlgemuth T, Dobbertin M, Pfister C, Bürgi A, Rebetez M. 2010. Increasing storm damage to forests in Switzerland from 1858 to 2007. *Agric For Meteor* 150: 47–55.
- Vitasse Y, Bresson CC, Kremer A, Michalet R, Delzon S. 2010. Quantifying phenological plasticity to temperature in two temperate tree species. *Funct Ecol* 24: 1211-1218.
- Vitasse Y, Hoch G, Randin CF, Lenz A, Kollas C, Körner C. *subm.* Tree recruitment of European tree species at their current upper elevational limits in the Swiss Alps.
- Von Arx G, Dobbertin M, Rebetez M. Manuskript. Spatio-temporal relationships between below-canopy and open-site microclimate of temperate forests in a long-term experiment in Switzerland.
- Walentowski H, Bolte A, Glogner K, Ibsch PL, Reif A. 2009. AFSV-Konzeptpapier „Wald im Klimawandel - Möglichkeiten der Risikominderung“. 7 S.

- Weber P, Bugmann H, Rigling A. 2007. Radial growth response to drought of *Pinus sylvestris* and *Quercus pubescens* in an inner-Alpine dry valley. *Ecol Model* 210: 301-311.
- Weber P, Bugmann H, Fonti P, Rigling A. 2008: Using a retrospective dynamic competition index to reconstruct forest succession. *For Ecol Manage* 254: 96-106.
- Wermelinger B, Seifert M, 1999. Temperature-dependent reproduction of the spruce bark beetle *Ips typographus*, and analysis of the potential population growth. *Ecol Entomol* 24: 103-110.
- Wermelinger B. 2004. Ecology and management of the spruce bark beetle *Ips typographus* - a review of recent research. *For Ecol Manage* 202: 67-82.
- Wohlgemuth T, Conedera M, Kupferschmid Albisetti A, Moser B, Usbeck T, Brang P, Dobbertin M. 2008. Effekte des Klimawandels auf Windwurf, Waldbrand und Walddynamik im Schweizer Wald. *Schweiz Z Forstwes* 159: 336-343.
- Zimmermann NE, Bugmann H. 2008. Modellierung und Klimawandel. *Schweiz Z Forstwes* 159: 326-335.
- Zimmermann NE, Bolliger J, Gehrig-Fasel J, Guisan A, Kienast F, Lischke H, Rickebusch S, Wohlgemuth T. 2006. Wo wachsen die Bäume in 100 Jahren? Eidg. Forschungsanstalt WSL, Forum Wissen: 63-71.
- Zingg A. 1996. Diameter and basal area increment in permanent growth and yield plots in Switzerland. In: Spiecker H, Mielikäinen K, Köhl M, Skovsgaard JP (eds.). *Growth Trends in European Forests*. Res Rep 5. Eur For Inst. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 239-265.
- Zingg A, Bürgi A. 2008. Trockenperioden seit 1900 und Waldwachstum: eine Analyse langfristiger Datenreihen. *Schweiz Z Forstwes* 159: 352-361.
- Zumbrunnen T, Bugmann H, Conedera M, Bürgi M, 2009: Linking Forest Fire Regimes and Climate - A Historical Analysis in a Dry Inner Alpine Valley. *Ecosyst* 12: 73-86.

