

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

Herausgeber: Schweizerischer Forstverein

Band: 166 (2015)

Heft: 5

Artikel: Naturnaher und multifunktionaler Waldbau in Zeiten des Klimawandels : eine Fallstudie

Autor: Schmid, Ueli / Bircher, Nicolas / Bugmann, Harald

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1097543>

Nutzungsbedingungen

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

Conditions d'utilisation

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

Terms of use

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

Download PDF: 01.05.2026

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

Naturnaher und multifunktionaler Waldbau in Zeiten des Klimawandels – eine Fallstudie

Ueli Schmid Waldökologie, ETH Zürich (CH)*
Nicolas Bircher Waldökologie, ETH Zürich (CH)
Harald Bugmann Waldökologie, ETH Zürich (CH)

Naturnaher und multifunktionaler Waldbau in Zeiten des Klimawandels – eine Fallstudie

Aussagen über den Einfluss der erwarteten Klimaveränderungen auf die Dynamik der Schweizer Wälder sind mit erheblichen Unsicherheiten behaftet und oft nur qualitativ; deshalb sind die bisherigen Empfehlungen zum waldbaulichen Umgang meist sehr allgemein gehalten. Wir untersuchten mit einer quantitativen Methode, ob der heutige «best practice»-Waldbau auch unter sich verändernden Klimabedingungen zielführend ist. Anhand einer Stratifizierung der Daten des dritten Schweizerischen Landesforstinventars wurden 71 typische Schweizer Waldbestände ermittelt. Daraus wählten wir sechs illustrative Beispiele aus und untersuchten mit dem Waldmodell ForClim, wie sich die Holzproduktion, die Schutzfunktion und die Baumartendiversität dieser Bestände im Klimawandel verändern. Im Dialog mit Waldbauexperten erarbeiteten wir spezifische Bewirtschaftungsvorgaben für die kommenden 100 bis 150 Jahre unter verschiedenen waldbaulichen Zielstellungen. Um diese detailliert wiederzugeben, wurde das Simulationsmodell erweitert und damit eine wichtige Grundlage für plausible, praxisrelevante Modellanwendungen geschaffen. Die Resultate zeigen ein zufriedenstellendes Verhalten der neu eingeführten Bewirtschaftungsverfahren «Gebirgsplenterung» und «Z-Baum-Management», wobei bei letzterem das Verfahren zur Auswahl der Z-Bäume Verbesserungspotenzial aufweist. In den untersuchten Bestandestypen zeichnen sich unter den verwendeten Klimaszenarien keine abrupten Veränderungen in der Walddynamik ab. Wir erachten dies als ein Beispiel dafür, dass der heute gelehrte Waldbau auch in den kommenden Jahrzehnten zielführend sein kann.

Keywords: silviculture, modelling, climate change, ecosystem services, ForClim
doi: 10.3188/szf.2015.0314

* General-Guisan-Strasse 44, CH-5000 Aarau, E-Mail ueli.schmid@gmx.net

Für die Schweiz wird bis ins Jahr 2100 ein Anstieg der Jahresmitteltemperaturen um bis zu 4.8 °C prognostiziert, einhergehend mit um bis zu 28% verringerten Sommerniederschlägen (CH2011 2011). So starke klimatische Veränderungen werden einen Einfluss auf das Waldwachstum und die Ökosystemleistungen haben (Bugmann et al 2014). Anhaltspunkte zur Richtung der Veränderungen geben einerseits Analysen vergangener Hitze- und Trockenperioden. In den von Trockenheit geprägten 1940er-Jahren wurde ein verminderter Grundflächenzuwachs von Buche und Fichte festgestellt, während Tanne und Eiche nur schwach respektive gar nicht reagierten (Zingg & Bürgi 2008). Im Hitzesommer 2003 konnte ein verringertes Wachstum im Mittelland festgestellt werden, während in höheren Lagen der erhöhte Wärmeinput die Trockenheit überwog und das Wachstum ankurbelte (Jolly et al 2005). Andererseits erlauben Modelle einen Blick

in eine mögliche Zukunft; so sagen beispielsweise statistische Potenzialmodelle eine Veränderung der Artverbreitungsgebiete voraus, etwa eine Zunahme der Traubeneichen im Mittelland oder eine Vergrößerung des Buchenareals in den Randalpen (Zimmermann et al 2006).

Die Waldwirtschaft ist in Anbetracht dieser Veränderungen mit grossen Herausforderungen konfrontiert. Es stellt sich die Frage, ob und wie man den Waldbau anpassen muss, um auch in Zukunft die gewünschten Ökosystemleistungen bereitstellen zu können. Die bisher verfügbaren Empfehlungen sind sehr allgemein gehalten. Sie lauten: Stabilität erhalten sowie Diversität und trockenheitsresistente Arten und Provenienzen fördern (z.B. Bolte & Ibisch 2007, Brang et al 2008, Lindner 1999, Milad et al 2013, Temperli et al 2012). Es wird aber oft davon ausgegangen, dass der naturnahe und multifunktionale Waldbau bereits heute Strukturen schafft, mit

denen die negativen Auswirkungen des Klimawandels gut abgedeckt werden können (Brang et al 2008). Eine quantitative Prüfung dieser Hypothese fehlt bisher.

Im Rahmen des Forschungsprogramms «Wald und Klimawandel» wurde im Projekt «RetroPro» die Sensitivität der Schweizer Wälder gegenüber dem Klimawandel mit dem Waldmodell ForClim landesweit untersucht. ForClim simuliert Verjüngung, Wachstum, Konkurrenz und Mortalität von Einzelbäumen und erlaubt die Abschätzung der Waldentwicklung auf Bestandesebene. Das Modell bietet sich für eine solche Studie an, da einerseits der Einfluss eines sich ändernden Klimas berücksichtigt werden kann und es andererseits einen breiten klimatischen Gradienten abdeckt, ohne für jeden Bestand kalibriert werden zu müssen (Bugmann 1996). ForClim wird kontinuierlich weiterentwickelt und ist mehrfach mit empirischen Daten validiert worden (z.B. Risch et al 2005, Wehrli et al 2005). ForClim erlaubt zudem den Einbezug von Bewirtschaftungsstrategien, mit denen das Waldwachstum auf Ertragskundeflächen bereits zufriedenstellend simuliert worden ist (Bircher et al 2015, Rasche et al 2011). In Untersuchungen über Auswirkungen des Klimawandels wurde die Bewirtschaftung bisher aber nur stark vereinfacht berücksichtigt (Elkin et al 2013). Das Ziel der Arbeiten im Rahmen von «RetroPro» war daher, den schweizerischen Waldbau in den Simulationen möglichst genau abzubilden, was bedingt, dass die verschiedenen Standortregionen, Höhenstufen und Bestandesstrukturen differenziert betrachtet werden.

Im Rahmen einer Masterarbeit (Schmid 2014) haben wir untersucht, 1) ob die in ForClim integrierten Bewirtschaftungsstrategien es erlauben, die in der Schweiz vorherrschenden Waldbaupraktiken angemessen abzubilden, und 2) wie sensitiv ausgewählte Bestandestypen unter Einfluss der Bewirtschaftung auf den Klimawandel reagieren. Wir wählten dazu beispielhaft sechs typische Schweizer Waldbestände aus. Zusammen mit Waldbauexperten erarbeiteten wir für diese konkrete Bewirtschaftungsstrategien, die wir in der Folge so exakt wie möglich im Modell umsetzten. Unter Einbezug der neuesten regionalen Klimaszenarien untersuchten wir die Veränderungen in der Walddynamik sowie in den Ökosystemleistungen Holzproduktion, Diversität und Schutz gegen Naturgefahren.

Material und Methoden

Das Modell

ForClim ist ein sogenanntes «Gap-Modell» (Shugart 1984), welches die Walddynamik auf einer Vielzahl voneinander unabhängiger kleiner Flächen («patches») simuliert, deren Grösse so gewählt ist,

dass sie von wenigen Bäumen der Oberschicht vollständig beschattet werden können. Durch das Absterben eines grossen Baumes entsteht eine Lücke (engl. «gap»), in welcher Verjüngung aufkommt und unterdrückte Bäume besser wachsen können. Die Bestandeseigenschaften werden als Mittelwerte über alle Patches berechnet (Watt 1947). Die horizontale Position der einzelnen Bäume innerhalb eines Patches wird nicht berücksichtigt, die Struktur in der Vertikalen hingegen schon (Bugmann 1996).

ForClim besteht aus verschiedenen Untermodellen. Das Untermodell Wetter beinhaltet einen Wettergenerator, der basierend auf standortspezifischen Monatsmittelwerten von Niederschlag und Temperatur jährliche bioklimatische Indizes bereitstellt. Die statistischen Eigenschaften des Klimas können, um den Klimawandel zu simulieren, graduell um einen bestimmten Betrag oder Anteil verändert werden. Die Evapotranspiration und ein Trockenheitsindex werden im Untermodell Wasser aus standortspezifischen Kennwerten (Wasserspeicherkapazität, Exposition und Hangneigung) und den aktuellen Wetterdaten berechnet. Im Untermodell Pflanzen wird aus den oben erwähnten Indizes und baumartenspezifischen Eigenschaften wie Schattentoleranz, Temperatur- und Wärmeansprüchen sowie dem maximalen Lebensalter die Etablierung, das Wachstum und die Mortalität von Einzelbäumen in Zeitschritten von einem Jahr simuliert. Im Untermodell Bewirtschaftung schliesslich können Eingriffsabfolgen definiert werden. Zur Auswahl stehen unter anderem Hoch- und Niederdurchforstung, Zieldurchmesserernte, Saum- und Schirmschlag sowie die Einzelbaumplenterung (Rasche et al 2011).

In ForClim sind 30 mitteleuropäische Baumarten parametrisiert. Die einzelnen Bäume sind durch ihren Brusthöhendurchmesser (BHD), die Höhe und die Kronenlänge charakterisiert. Das Derbholzvolumen wird über die Denzin-Formel approximiert (Schmid 2014).

Stratifizierung und Auswahl der Bestände

Im Rahmen des Projekts «RetroPro» wurde eine Stratifizierung der Daten des dritten Schweizerischen Landesforstinventars (LFI3; Brändli 2010) vorgenommen, um typische, d.h. verbreitete Waldbestände der Schweiz zu identifizieren. Hierfür wurden die als «Normalwald» klassifizierten Untersuchungsflächen (LFI-Plots) zuerst gemäss den Standortregionen und Höhenstufen nach der Wegleitung «Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald» (NaiS; Frehner et al 2005) unterteilt. Für jede Standortregion wurden dabei ausschliesslich diejenigen Höhenstufen berücksichtigt, welche mindestens 10% der LFI-Plots dieser Region enthielten. Dann wurden die LFI-Plots nach ihrer vertikalen Bestandesstruktur und Entwicklungsstufe weiter aufgegliedert. LFI-Plots mit

Bezeichnung	Standortregion	Höhenstufe	Bestandesstruktur	Entwicklungsstufe	Häufigste Arten*	Vorrat (m ³ /ha)**
OS1	Hochalpen	obersubalpin	stufig	gemischt	75% Arve 20% Lärche	320
OS2	Hochalpen	obersubalpin	einschichtig	starkes Baumholz	65% Lärche 35% Arve	500
SA1	Hochalpen	subalpin	stufig	gemischt	80% Fichte 15% Lärche	510
SA2	Hochalpen	subalpin	einschichtig	mittleres Baumholz	95% Fichte	570
SM1	Mittelland	submontan	mehrschichtig	starkes Baumholz	45% Fichte 25% Buche 15% Tanne	560
SM2	Mittelland	submontan	mehrschichtig	mittleres Baumholz	50% Buche 20% Esche	400

Tab 1 Die sechs untersuchten Straten und ihre Eigenschaften.

* Anteil an gesamtem Derbholzvolumen;

** Derbholzvolumen, gerundet, berechnet mit Denzin-Formel.

Entwicklungsstufe «Jungwuchs/Dickung» wurden nicht berücksichtigt. In einem letzten Schritt wurde die Baumartenzusammensetzung genauer untersucht. Wo notwendig, wurden auf Empfehlung der Waldbauexpertin Monika Frehner die LFI-Plots weiter stratifiziert, primär in nadel- und in laubholddominierte Bestände.

Auf diese Weise ergaben sich 71 typische Waldbestände, verteilt über sieben Standortregionen und acht Höhenstufen, die rund einen Viertel aller LFI-Plots umfassen. Die Daten der Einzelbaumaufnahmen (BHD und Baumart) aller zu einem Waldbestand gehörigen LFI-Plots dienen zur Bestandescharakterisierung und zur Initialisierung des Modells.

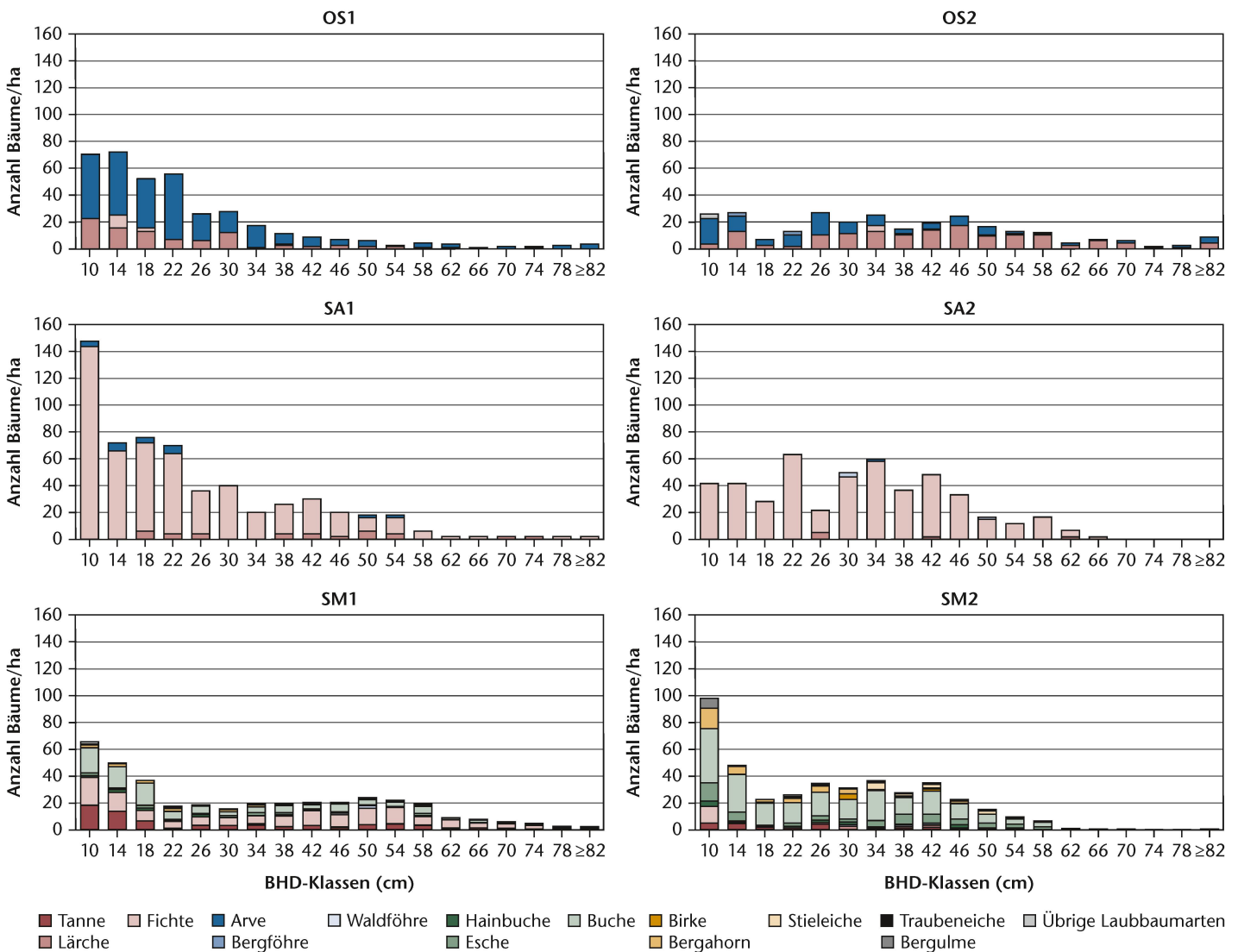


Abb 1 BHD-Verteilung der sechs untersuchten Straten vor Beginn der Simulationen. Bäume mit BHD < 8 cm sind nicht dargestellt. Die auf der horizontalen Achse angegebenen Werte entsprechen der Mitte der jeweiligen BHD-Klasse. Für die Umschreibung der Straten vgl. Tabelle 1.

Aus den 71 Waldbeständen wählten wir für die vorliegende Pilotstudie deren sechs aus, je zwei der obersubalpinen, der subalpinen und der submontanen Höhenstufe (Tabelle 1 und Abbildung 1), um verschiedene Bestandesstrukturen, Entwicklungsstufen und Baumartenzusammensetzungen abzudecken. Die standortspezifische Hangneigung und Exposition ergibt sich aus dem Durchschnitt aller berücksichtigten LFI-Plots; für die Wasserspeicherkapazität und die Stickstoffverfügbarkeit wurden Werte von mittleren Standorten angenommen.

Bewirtschaftungsszenarien

Zusammen mit vier Waldbauexperten (Monika Frehner, ETH Zürich; Jean-Jacques Thormann, HAFL Zollikofen; Peter Rotach, ETH Zürich; Peter Ammann, FWB Lyss) erarbeiteten wir für die sechs Straten detaillierte Bewirtschaftungsszenarien. Diese decken einen Planungshorizont und somit eine Simulationszeit von 100 bis 150 Jahren ab. Die Szenarien orientieren sich an den Grundsätzen des naturnahen Waldbaus und der Multifunktionalität. Sie repräsentieren die aktuelle Lehrmeinung, basieren aber bewusst auf der Annahme, dass sich das Klima nicht verändert. Sie können also als gegenwärtige «best practice»-Szenarien angesehen werden und helfen somit die Frage zu beantworten, welche Waldentwicklung bei einer Weiterführung der heutigen «best practice» im Waldbau zu erwarten wäre. Es resultierten zwölf Kombinationen von Straten und Bewirtschaftungsvorgaben (Tabelle 2). Hier werden die Simulationsergebnisse von vier interessanten Kombinationen vorgestellt.

In der multifunktionalen Bewirtschaftung des obersubalpinen Stratums OS1 (OS1-MulFun; Ausgangsbestand in Abbildung 1, erste Zeile links), de-

ren Ziel es ist, sowohl die Schutzfunktion zu fördern als auch Holz zu produzieren, wird im Simulationsjahr 15 erstmals zur Pflege ins Stangenholz eingegriffen, und es werden 10% des Vorrates gruppenweise entnommen. Lärchen sollen freigestellt und gefördert werden und sind darum vom Eingriff ausgenommen. Darauf folgen im Abstand von 30 respektive 40 Jahren zwei weitere, ebenfalls eher schwache Eingriffe zur Strukturförderung, bei denen über alle Durchmesserklassen und Baumarten verteilt je 15% des Vorrates gruppenweise entnommen werden.

Die Durchmesserverteilung des subalpinen Stratums SA1 (Abbildung 1, zweite Zeile links) ist bereits nahe an der als optimal angesehenen Struktur des Gebirgspflenterwaldes, das Stratum weist jedoch eine hohe Verjüngungsdringlichkeit auf. Darum werden im multifunktionalen, ebenfalls auf Schutzwirkung und Holzproduktion ausgerichteten Bewirtschaftungsszenario SA1-MulFun mit einem Intervall von 40 Jahren, beginnend im Jahr 5, drei Eingriffe zur Strukturhaltung ausgeführt. Dabei werden jeweils 30% des Vorrates gruppenweise entnommen, wobei das Entnahmevolumen zu 80% aus Bäumen mit einem BHD >35 cm besteht. Lärchen und Arven werden zur Förderung der Baumartenvielfalt geschont. Die relativ starken Eingriffe (dafür mit langer Wiederkehrperiode) tragen den erschliessungsbedingt oft erschwerten Umständen der Holznutzung im Gebirge Rechnung.

Im produktionsorientierten Bewirtschaftungsszenario mit Nadelholz im Folgebestand (SM1-NH) wird der Ausgangsbestand des submontanen Mittel-landstratums SM1 (Abbildung 1, dritte Zeile links) in drei Eingriffen über 20 Jahre verjüngt, um die bereits etablierten Fichten, Tannen und Buchen als Fol-

Name	Waldbauliche Zielsetzung	Bewirtschaftungsform	Wiederkehrperiode/ Umtriebszeit**
OS1-MulFun*	Multifunktionalität (Holzproduktion und Schutzwald)	Gebirgspflenterung	30–40
OS2-HP	Holzproduktion		30
OS2-SW	Schutzwald		30
SA1-MulFun*	Multifunktionalität (Holzproduktion und Schutzwald)		40
SA2-HP	Holzproduktion		30
SA2-MulFun	Multifunktionalität (Holzproduktion und Schutzwald)		30
SA2-EL	Erholung und Landschaft (Lärchenförderung)	Schlagweiser Hochwald	–
SM1-BU	Holzproduktion mit Buche	Schlagweiser Hochwald mit Z-Bäumen (jeweils 80 Z-Bäume/ha)	100–110
SM1-DR*	Baumartendiversität fördern		110–120
SM1-NH*	Holzproduktion mit Buche, Tanne und Fichte		90–110
SM2-BU	Holzproduktion mit Buche		100–110
SM2-LB	Lichtbaumarten fördern		60–100

Tab 2 Die zwölf erarbeiteten Bewirtschaftungsszenarien und ihre Eigenschaften. * Im Artikel diskutierte Bewirtschaftungsszenarien; ** Wiederkehrperiode für Gebirgspflenterung, Umtriebszeit für schlagweisen Hochwald (in Jahren).

gebstand aufzubauen und den Wertzuwachs in der Oberschicht aufrechtzuerhalten. Die Z-Baum-Auswahl im Endabstand (40% Tanne, 30% Fichte und 30% Buche) und eine erste Durchforstung erfolgen 10 Jahre nach der Räumung, gefolgt von drei weiteren Durchforstungen innerhalb von 30 Jahren. Dabei wird der Vorrat jeweils um 25 bis 40% reduziert. Nach 30 Jahren Hiebsruhe wird der Bestand erneut verjüngt.

In einem weiteren Szenario für dasselbe Stratum sollte die Baumartendiversität gefördert werden (SM1-DR). Hier wird nach einer direkten Räumung im Simulationsjahr 5 eine breitere Artenpalette angestrebt. Die Z-Baum-Auswahl und vier Durchforstungen folgen im 10-Jahres-Rhythmus, beginnend im Simulationsjahr 30. Das Kollektiv der Zukunftsbäume besteht aus 30% Buche, 20% Tanne, 20% Fichte, 20% Bergahorn und 10% Esche; alle diese Arten sind in der Vorverjüngung bereits vorhanden. Durch das Freistellen der Z-Bäume wird der Vorrat jeweils um 15 bis 20% verringert. Nach 55 Jahren Hiebsruhe wird ein erster Lichtungshieb ausgeführt, 10 Jahre später folgt die Räumung.

In den Experteninterviews wurde die Bedeutung der Gebirgspflenterung und des schlagweisen Hochwaldes mit Z-Baum-Durchforstung als zentrale Waldbaupraktiken in der Schweiz offenkundig. Beide Bewirtschaftungstypen waren aber zu diesem Zeitpunkt noch nicht in ForClim implementiert. Eine Umsetzung der beschriebenen Bewirtschaftungsvorgaben erforderte also eine Erweiterung des Modells (für eine detaillierte Beschreibung vgl. Schmid 2014):

- Gebirgspflenterung: Ein vorgegebener Anteil des Gesamtvorrates wird gruppenweise entnommen. Im Modell werden dafür die Eingriffe auf zufällig ausgewählte Patches konzentriert, während die übrigen unberührt bleiben. Die Arten- und Durchmesserverteilung der zu entnehmenden Bäume kann frei definiert werden.

- Z-Baum-Bewirtschaftung: 1) Auswahl-Algorithmus, der nach den vorgegeben Artanteilen pro Patch einen oder mehrere möglichst hohe Bäume als Zukunftsbäume bestimmt. Die Z-Baum-Dichte kann über die Patchgrösse und die Anzahl Z-Bäume pro Patch gesteuert werden. 2) Die Z-Bäume werden in den Durchforstungen konsequent freigestellt, d.h., auf jedem Patch werden alle sie überragenden Bäume entfernt. Ist damit eine vorgegebene Vorratsreduktion noch nicht erreicht, werden sukzessive die höchsten Bäume des Nebenbestandes entnommen. 3) Die Bestandesverjüngung kann in mehrere Schritte mit unterschiedlicher Eingriffsintensität aufgeteilt werden.

Die Dauerwaldbewirtschaftung, eine weitere wichtige und verbreitete Betriebsart in der Schweiz, wurde aufgrund der zweischichtigen Struktur der untersuchten Mittellandbestände (Abbildung 1) nicht

berücksichtigt. Die in ForClim bereits integrierte Einzelbaumplenterung hat sich in früheren Untersuchungen zwar bewährt (Rasche et al 2011), von der Implementierung des äusserst komplexen Prozesses der Überführung wurde jedoch in der vorliegenden Arbeit abgesehen.

Wetterdaten und Klimaszenarien

Die monatlichen Temperatur- und Niederschlagsdaten, die das heutige Klima abbilden, stammen aus der räumlich expliziten Datenbank der Forschungseinheit Landschaftsdynamik der Eidgenössischen Forschungsanstalt WSL mit einer Zellengrösse von 1 ha. Für jedes Stratum wurden jene Datenpunkte eruiert und gemittelt, in denen die berücksichtigten LFI-Plots liegen. Die relativ deutliche klimatische Ähnlichkeit aller LFI-Plots innerhalb derselben Standortregion und Höhenstufe sollte dem Auftreten möglicher Artefakte durch die Mittelung der Klimadaten entgegenwirken.

Um die Auswirkungen des Klimawandels zu untersuchen, wurden die zwei Emissionsszenarien A1B und A2 nach IPCC (2007) berücksichtigt und die regionalen Szenarien für Temperatur- und Niederschlagsveränderung des Center for Climate Systems Modeling (C2SM) der ETH Zürich verwendet (CH2011 2011, Fischer et al 2012). Das A1B-Emissionsszenario ergibt für die Schweiz eine Zunahme der saisonalen Mitteltemperatur von 2.7 bis 4.1 °C sowie eine Abnahme der mittleren Sommerniederschläge um 18 bis 25% bis zum Ende des 21. Jahrhunderts. Das A2-Emissionsszenario führt zu einer saisonalen Temperaturzunahme von 3.2 bis 4.8 °C und einer Reduktion der mittleren Sommerniederschläge um 21 bis 28%. Für jedes Stratum wurde jenes regionale Szenario gewählt, dessen Referenzfläche die meisten LFI-Plots des Stratums enthält.

Als Startzeitpunkt der Simulationen wurde das mittlere Jahr der Aufnahmen zum LFI3, also 2005, gewählt. In den Simulationsergebnissen entspricht dies dem Jahr null.

Ökosystemleistungen

Aus den Simulationsergebnissen wurden Indizes zur Abbildung der Ökosystemleistungen Holzproduktion, Baumartendiversität und Schutzwirkung vor Naturgefahren abgeleitet. Die Holzproduktionskapazität eines Bestandes wurde über die Nettoproduktivität abgebildet, also die Veränderung des stehenden, lebenden Vorrates pro Jahr plus allfällige Holznutzungen. Als Mass für die Baumartendiversität diente der Shannon-Diversitätsindex (SDI; vgl. Elkin et al 2013, Temperli et al 2012). Dieser Index berücksichtigt die absolute Anzahl Baumarten sowie deren relative Häufigkeit innerhalb des Bestandes; dabei wurde eine virtuelle Kluppschwelle von 5 cm angenommen. Als eine in den Alpen zentrale Schutzwirkung von Wäldern gegenüber Naturgefahr-

ren wurde der Lawinenschutz ausgewählt. Zur Quantifizierung dieser Ökosystemleistung wurde der von Elkin et al (2013) für das Landschaftsmodell LandClim entwickelte «Avalanche Protection Index» (API) in leicht abgeänderter Form verwendet. Dieser basiert auf den Anforderungen für Lawinenschutzwald gemäss NaiS (Frehner et al 2005) und berück-

sichtigt einerseits die Stammzahl in bestimmten BHD-Klassen und andererseits die Interzeption via Blattfläche sowie den Anteil immergrüner Nadelbäume. Die Unterschiede der Indizes verschiedener Klimaszenarien wurden mit einem gepaarten t-Test auf einem Signifikanzniveau von 5% ermittelt.

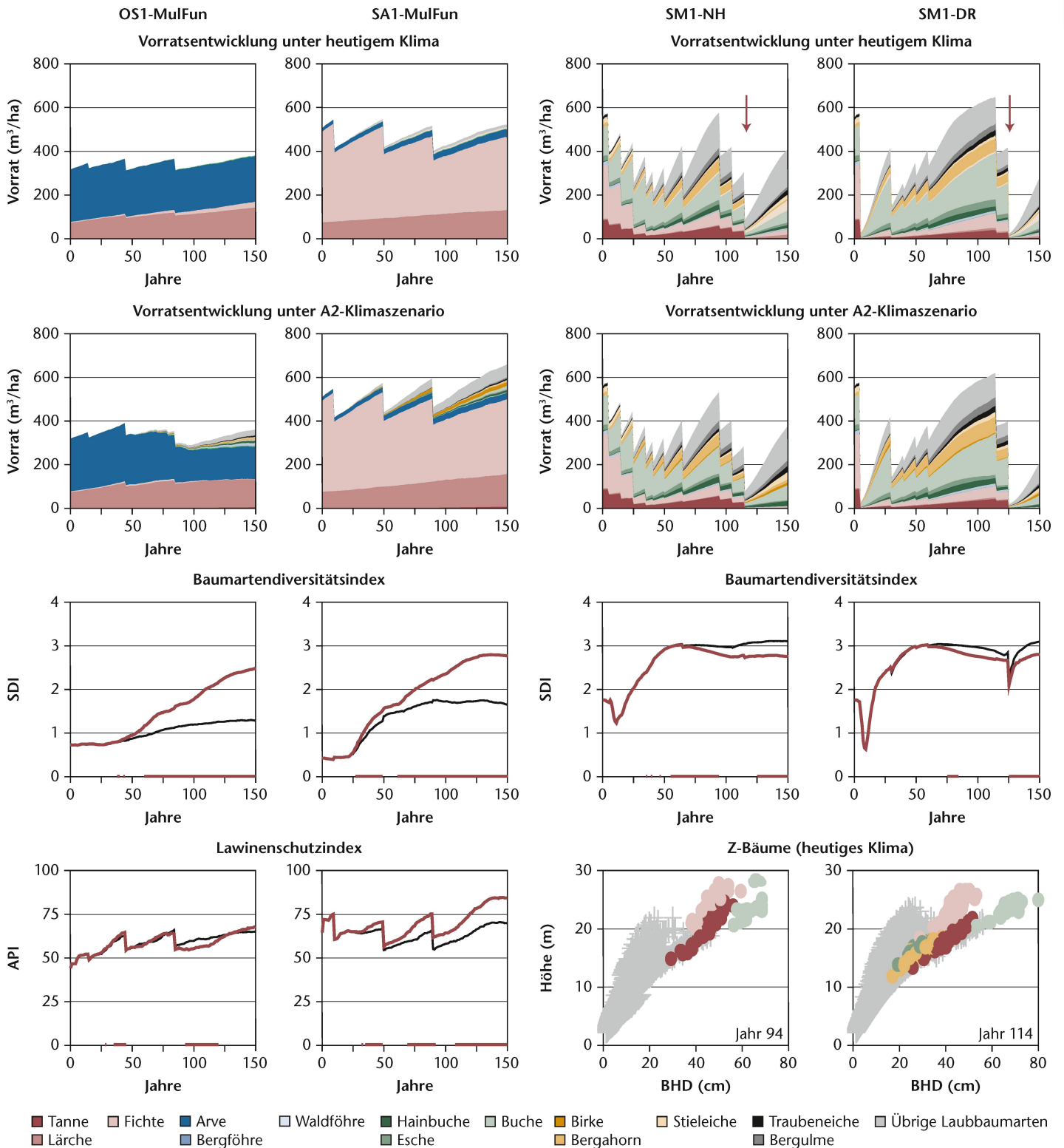


Abb 2 Vorrats- und Indexverläufe der vier diskutierten Straten. Die schwarzen Indexlinien stellen den Verlauf unter heutigem Klima dar, die roten jenen des A2-Szenarios. Die horizontalen roten Linien bezeichnen Jahre, in denen sich die Indizes signifikant unterscheiden. Die BHD-Höhen-Diagramme zeigen den Zeitpunkt vor der Räumung (mit rotem Pfeil in erster Zeile markiert), wobei nur die Z-Bäume farbig und der Nebenbestand grau dargestellt sind.

Simulation	Mittlere Produktivität (m ³ /[ha×J])	
	ForClim; Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall	Vergleichswert LFI3
OS1-MulFun	1.3 (–0.3/2.5)	3.4*
SA1-MulFun	2.7 (0.5/4.8)	4.3**
SM1-NH	10.2 (4.1/14.4)	10.8***
SM1-DR	9.4 (0.9/19.8)	

Tab 3 Durchschnittliche Nettozuwächse mit dem 95%-Konfidenzintervall der Simulationen über die gesamte Laufzeit von 150 Jahren unter heutigem Klima und Vergleichswerte des LFI3. * Alpen, obere subalpine Stufe; **Alpen, untere subalpine Stufe; ***Mittelland, kolline/submontane Stufe.

Resultate

Die vier hier diskutierten Kombinationen von Bestand und Bewirtschaftung stellen eine anschauliche Auswahl aus den zwölf untersuchten Kombinationen dar; über die Gesamtheit der 71 Straten lassen sich aber keine Aussagen machen, dafür wären weitere Simulationen notwendig. Ausserdem gehen wir hier ausschliesslich auf die Resultate des A2-Emissionsszenarios ein, da die Effekte des etwas milderen A1B-Szenarios meist sehr ähnlich oder nur leicht schwächer ausfielen.

Weiterentwicklung der Bestände unter heutigem Klima

Unter der (wenig realistischen) Annahme, dass das Klima sich nicht ändert, würde in den Gebirgsstraten OS1 und SA1 durch die Eingriffe der Zuwachs abgeschöpft und der Gesamtvorrat somit über den simulierten Zeitraum von 150 Jahren relativ konstant bleiben (Abbildung 2, erste Zeile). Die Anteile der Hauptbaumarten Arve und Fichte verändern sich kaum, während die Lärche – in beiden Simulationen gefördert – ihren Anteil leicht vergrössert. Die Produktivität in OS1-MulFun beträgt durchschnittlich 1.3, jene von SA1-MulFun 2.7 m³/(ha×Jahr). In beiden Straten liegt die Produktivität unter dem regionalen Durchschnitt ihrer Vegetationshöhenstufe, der in der oberen subalpinen Stufe 3.4 und in der unteren subalpinen Stufe 4.3 m³/(ha×Jahr) beträgt (Tabelle 3). Während die Baumartendiversität im ober-subalpinen Stratum über die Zeit beinahe konstant verläuft (Abbildung 2, dritte Zeile), etabliert sich in der subalpinen Stufe ein kleiner Anteil breit gemischter laubwerfender Pionierarten, was die Diversität deutlich ansteigen lässt. Durch die Eingriffe wird die Schutzwirkung gegenüber Lawinen in beiden Straten der Hochalpen kurzfristig leicht reduziert, sie bleibt aber auf lange Sicht konstant auf einem hohen Niveau (Abbildung 2, vierte Zeile).

Die Vorratsverläufe der beiden Simulationen SM1-NH und SM1-DR der submontanen Stufe sind über die Dauer der Durchforstungen von einer Stagnation gekennzeichnet (Abbildung 2, erste Zeile).

Der erste Eingriff nach der Z-Baum-Auswahl fällt in beiden Straten sehr stark aus, vor allem in SM1-DR. In den weiteren Durchforstungen werden die Vorgaben bezüglich Vorratsreduktion erfüllt. Während der Hiebsruhe weisen beide Simulationen jedoch eine kräftige Vorratssteigerung auf und erreichen Maximalwerte von rund 600 m³/ha. Vor der Einleitung der Verjüngung machen die Z-Baumarten in SM1-NH knapp die Hälfte, in SM1-DR rund zwei Drittel des stehenden Vorrates aus; der baumartenreiche Nebenbestand ist anteilmässig also relativ stark vertreten. Die Produktivität der Bestände beträgt im Durchschnitt über die Simulationsdauer 10.2 resp. 9.4 m³/(ha×Jahr) und weist in SM1-DR eine Spitze von 20 m³/(ha×Jahr) auf (Tabelle 3). Die Mittelwerte stimmen gut mit dem Durchschnittswert für submontane Wälder des Mittellandes überein, der laut LFI3 10.8 m³/(ha×Jahr) beträgt. Die Baumartendiversität beider Bestände sinkt bei der ersten Verjüngungseinleitung, übersteigt dann jedoch die Ausgangswerte deutlich und bleibt auf einem hohen Niveau (Abbildung 2, dritte Zeile). In beiden Simulationen entwickeln sich die als Z-Bäume ausgewählten Buchen und Fichten deutlich besser als der gesamte Nebenbestand und erreichen bis zur Räumung Durchmesser von bis zu 80 respektive knapp 70 cm (Abbildung 2, vierte Zeile). Die Tannen erreichen Durchmesser von bis zu 60 cm, heben sich aber vor allem in SM1-DR weniger deutlich vom Nebenbestand ab. Bergahorn und Esche erreichen zum Erntezeitpunkt BHD-Werte von gut 40 cm.

Waldentwicklung im Klimawandel

Der Klimawandel (A2-Emissionsszenario) führt im ober-subalpinen Stratum OS1-MulFun anfänglich zu einer knapp 50 Jahre dauernden Wachstumssteigerung (Abbildung 2, zweite Zeile). Darauf folgt eine Phase, in der sich Laubhölzer langsam zu etablieren beginnen, während die Fichte und vor allem die Arve im Vergleich zum heutigen Klima an Vorrat einbüßen. Als Folge des Aufkommens neuer Arten erhöht sich die Diversität ab dem Simulationsjahr 70 signifikant, während die Schutzwirkung gegenüber Lawinen praktisch unbeeinflusst bleibt. Im subalpinen Stratum SA1-MulFun zeigt die Baumartendiversität eine ähnliche Entwicklung, die Produktivität und damit sowohl der Vorrat als auch der Lawinenschutz (aufgrund der höheren Stammzahlen) werden jedoch vom wärmeren Klima positiv beeinflusst. In beiden Alpenstraten wird innerhalb des Simulationszeitraums keine der neu auftretenden Baumarten dominant.

Die beiden Simulationen der submontanen Stufe zeigen bezüglich Vorratsverlauf und Artensammensetzung nur kleine Unterschiede zwischen dem A2- und dem Referenzszenario (Abbildung 2, dritte und vierte Spalte). In beiden Simulationen werden die Produktivität sowie die Diversität nach dem

Simulationsjahr 50 zeitweise signifikant, jedoch absolut gesehen nur leicht verringert im Vergleich mit dem heutigen Klima. Das durchschnittliche Derbholzvolumen der Z-Bäume liegt unter dem verwendeten Klimaszenario bei Buchen und Fichten rund 15%, bei Eschen sogar rund 30% tiefer als unter dem heutigen Klima, während jenes von Tanne und Bergahorn um bis zu 5% zunimmt (nicht gezeigt).

Diskussion

Plausibilität der simulierten Dynamik unter heutigem Klima

Die mit den LFI-Daten initialisierten Simulationen zeigen in der obersubalpinen und subalpinen Stufe unter heutigem Klima stabile Vorratsverläufe, was dem Ziel der waldbaulichen Eingriffe entspricht. Es sind keine Modellartefakte erkennbar. Die auf Expertenwissen basierenden Eingriffsintensitäten und -zeitpunkte der Gebirgsplenterung stehen im Einklang mit der simulierten Bestandesdynamik. In den schlagweise bewirtschafteten Beständen der submontanen Stufe hingegen wird in der ersten simulierten Durchforstung mehr Vorrat entnommen als geplant, um alle Z-Bäume freizustellen. Dass dies in SM1-DR, wo fünf Arten im Z-Baum-Kollektiv vertreten sind, stärker zum Ausdruck kommt als bei SM1-NH mit drei Z-Baumarten, lässt vermuten, dass der Auswahlalgorithmus für die Z-Bäume (siehe Kapitel «Bewirtschaftungsszenarien») verbessert werden sollte. Trotzdem erreichen die Baumarten Buche, Fichte und Tanne innerhalb der gängigen Umtriebszeit von gut 100 Jahren realistische Zieldurchmesser von 60 bis 80 cm BHD (vgl. Ammann 2008). Die Zuwächse von Bergahorn und Esche hingegen werden unterschätzt, daher erreichen sie die Zieldurchmesser von 60 bis 70 cm BHD bis zur Ernte nicht.

Die Etablierung einer grossen Anzahl Pionierarten in der subalpinen Stufe und der breit gefächerte Artenmix in der submontanen Stufe, insbesondere nach Ende des Bewirtschaftungsregimes, sind grösstenteils auf die vereinfachte Modellierung der Naturverjüngung zurückzuführen. Dabei wird davon ausgegangen, dass immer und überall Samen aller Arten verfügbar sind. Zusätzlich werden nach Abschluss des Bewirtschaftungsregimes in der submontanen Stufe keine Arten mehr begünstigt. Die Annahme der unbegrenzten Samenverfügbarkeit mag stark vereinfacht sein, ist aber bei einem Modell, das keinen horizontalen Raum kennt, ohne Szenarienannahmen nicht anders machbar. Ausserdem ist zu berücksichtigen, dass die simulierten Bestände aus verschiedensten, räumlich keineswegs nebeneinander liegenden LFI-Plots bestehen, d.h., es handelt sich ohnehin um «virtuelle» Bestände. Diese vereinfachenden Annahmen mögen störend wirken, sie ermöglichen es jedoch, ohne Umparametrisierung des

Modells und generell ohne Tricks auch die Effekte des Klimawandels zu simulieren. Die Migrationsgeschwindigkeit der Arten und die Baumartendiversität werden dadurch jedoch tendenziell überschätzt (vgl. Zimmermann & Bugmann 2008).

Die simulierten Nettozuwächse für die obersubalpine und die subalpine Stufe sind zwar deutlich tiefer als der Durchschnitt ihrer Höhenstufe (Tabelle 3), in Anbetracht der weit überdurchschnittlichen Vorräte dieser Straten (vgl. LFI3) sind die Werte jedoch durchaus realistisch. Im Mittelland, wo die Vorräte der Straten näher beim Durchschnitt der LFI-Daten liegen, stimmen die simulierten Zuwächse denn auch sehr gut mit den empirischen Daten überein.

Einfluss des Klimawandels

Für die obersubalpine Stufe ergeben die Simulationsergebnisse eine Baumartendiversifizierung, und gleichzeitig büst die Arve an Vorrat ein. Der teilweise sprunghaft abnehmende Vorrat zeigt Mortalitätswellen an, die mit der zunehmenden Trockenheit des südexponierten Standortes zusammenhängen (Casalegno et al 2010, Saulnier et al 2011). Trotz des Rückgangs der Arve bleibt der Gesamtvorrat relativ stabil, und deshalb bleibt auch die Schutzwirkung erhalten.

Die Bestände der subalpinen Stufe zeigen durchgehend eine als positiv zu wertende Reaktion auf die zugrunde gelegten Klimaszenarien – eine Feststellung, die mit anderen Studien im Alpenbogen übereinstimmt (Elkin et al 2013, Seidl et al 2011). Auch bei diesen Simulationen gilt es, die Vielfalt der sich neu etablierenden Laubbäume kritisch zu hinterfragen. Dennoch liefern sie einen starken Hinweis dafür, dass sich zunehmend Laubbäume in der subalpinen Stufe etablieren können, wie es auch aus Arbeiten mit Potenzialmodellen hervorgeht (z.B. Zimmermann et al 2006).

Im Gegensatz zu den höheren Lagen zeichnen sich in den Straten des Mittellandes tendenziell negative Effekte eines wärmeren und sommertrockeneren Klimas ab. Die Produktivität und die Artenvielfalt gehen leicht zurück; in den simulierten 150 Jahren ergeben sich jedoch keine abrupten oder sehr starken Änderungen in der Artenzusammensetzung. Die Zuwachsveränderung der Z-Baumarten deckt sich mit den Untersuchungen der Trockenperiode in den 1940er-Jahren (Zingg & Bürgi 2008). Interessant ist, dass sich das simulierte Wachstum begünstigter Fichten auch unter einem starken Klimaszenario (A2-Emissionsszenario) nur wenig verschlechtert, wogegen Fichten, die nicht freigestellt werden, fast komplett aus dem Artenspektrum verschwinden (nicht gezeigt). Dies unterstreicht den grossen Einfluss der Bewirtschaftung auf die Bestandesdynamik, der jenen des Klimawandels bisweilen zu übertönen vermag (Lindner 2000), und steht im Gegensatz zu Untersuchungen, welche der Fichte



Abb 3 Verjüngung an der aktuell oberen Verbreitungsgrenze der Buche auf 1140 m ü. M. in Trun (GR). Aufgrund der vorliegenden Resultate gehen wir davon aus, dass dieses Bild in Zukunft auch in höheren Lagen zu beobachten sein wird. Foto: Christian Buchli, AWN Ilanz

in Tieflagen in Zukunft eine deutlich schlechtere Eignung für den Waldbau attestieren (z.B. Müller-Kroehling et al 2009).

Aufgrund der relativ milden Reaktionen des Waldwachstums auf die hier verwendeten Klimaszenarien, vor allem in den ersten Jahrzehnten des aktuellen Jahrhunderts, kann für die hier untersuchten Straten geschlossen werden, dass an den gegenwärtigen «best practice»-Waldbausystemen vorderhand nichts geändert werden muss. Im Gebirge wird sich die Frage stellen, welche neuen Baumarten sinnvollerweise gefördert werden sollen (Abbildung 3). In schlagweisen Systemen im Mittelland erlaubt das konsequente Fördern von Einzelbäumen, diese auch ausserhalb ihres ökologischen Optimums erfolgreich im Bestand zu halten. Welche Baumarten die potenziellen Gewinner des Klimawandels sind, kann aus unseren Simulationsresultaten nicht abgeleitet werden. Ein breites Artenspektrum begünstigter Bäume vereinfacht jedoch die Möglichkeiten zur Anpassung an sich wandelnde Wuchsbedingungen.

Aussagekraft und Einschränkungen der Studie

Unrealistisches Modellverhalten aufgrund des Initialisierungsprozesses oder der angewendeten Bewirtschaftungsregimes konnte in den Simulationsergebnissen nicht festgestellt werden. Trotzdem

sollten diese nicht als exakte Prognosen aufgefasst werden, da sie auf bewussten Vereinfachungen der Realität beruhen, wie sie jedem Modell zugrunde liegen. Sofern dies bei der Interpretation in Betracht gezogen wird, sind die Simulationsergebnisse für eine Abschätzung der möglichen Waldentwicklung auf jeden Fall wertvoll.

Aufgrund der grossen Unsicherheiten, mit denen quantitative Prognosen zu Extremereignissen noch behaftet sind (CH2011 2011), werden diese in den meisten Klimafolge-Untersuchungen nicht berücksichtigt, so auch hier nicht. Es wird jedoch damit gerechnet, dass sowohl abiotische Störungen wie Windwurf oder Trockenheit als auch biotische Störungen wie Krankheiten und Schädlinge in Zukunft häufiger werden und/oder einen stärkeren Einfluss auf die Walddynamik haben werden (z.B. Bolte & Ibisch 2007, Engesser et al 2008, Krehan & Steyrer 2006, Seidl et al 2011, Wohlgemuth et al 2008). Die von uns simulierten Veränderungen in der Baumartenzusammensetzung dürften durch ein intensiveres Störungsregime beschleunigt werden. Solche Störungen haben zudem das Potenzial, die Veränderung der Waldstruktur entscheidend zu prägen und zu beschleunigen (Turner 2010). Wie stark sich diese Effekte auswirken werden und wie die Bewirtschaftung auf solche Herausforderungen reagieren kann, muss im Sinn eines ganzheitlichen Risikomanagements weiter untersucht werden; dies lässt sich aus unseren Ergebnissen nicht ableiten.

Aufgrund des Anspruchs, detaillierte und realistische Eingriffe formulieren zu können, wurde der Zeitraum der Untersuchung auf 150 Jahre begrenzt; ein längerer Zeitraum ergibt aus einer waldbaulichen Planungsperspektive auch keinen Sinn, da die Zielstellung auf dieser Zeitskala hinterfragt und angepasst werden dürfte. Die Periode ist zudem genügend lange, um verzögert auftretende Reaktionen des Waldwachstums auf den Klimawandel mindestens ansatzweise aufzuzeigen (Lindner 2000), die Simulationen enden jedoch zu einem Zeitpunkt, zu dem sich die Wälder noch bei Weitem nicht im Gleichgewicht mit dem «neuen» Klima befinden. Starke Reaktionen der Walddynamik zu einem späteren Zeitpunkt können somit nicht ausgeschlossen werden, sie wurden hier aber nicht betrachtet.

Schlussfolgerungen

Mit den an ForClim vorgenommenen Erweiterungen wurde eine wichtige Grundlage für plausible und praxisrelevante Modellanwendungen geschaffen. Mit der Gebirgspalterung werden die gruppenweisen Eingriffe und ihre Auswirkungen realistisch abgebildet. Die Z-Baum-Bewirtschaftung ist modelltechnisch deutlich komplexer, und daher mussten mehr Annahmen getroffen werden. Auch

wenn vor allem beim Auswahlalgorithmus für Zukunftsbäume Optimierungspotenzial besteht, können die waldbaulichen Abläufe im Allgemeinen bereits gut dargestellt werden. Unseres Wissens ist dies der erste Versuch überhaupt, ein derart komplexes Bewirtschaftungssystem in ein räumlich nicht explizites Gap-Modell zu integrieren.

Die Simulationsergebnisse deuten für eine wärmere Zukunft bei gleich bleibender Bewirtschaftung auf eine Erweiterung des Baumartenspektrums bei gleichzeitig tendenziell positiven Effekten auf die Ökosystemleistungen in der obersubalpinen und subalpinen Stufe hin. In schlagweise bewirtschafteten Hochwaldbeständen des Mittellandes dürfte eine leichte Reduktion des Zuwachses eintreten, von der teils auch konsequent begünstigte Z-Bäume betroffen sind. Abrupte Veränderungen sind in den kommenden rund 150 Jahren aber weder im Baumartenspektrum noch in der Produktivität der untersuchten Bestandestypen zu erwarten. Zu bedenken ist jedoch, dass klimatische Extremereignisse sowie abiotische und biotische Störungen in den Simulationen nicht berücksichtigt wurden.

Die in der vorliegenden Pilotstudie durchgeführten Analysen verstehen sich als Fallbeispiele, deren Ergebnisse nicht auf alle Wälder der Schweiz übertragen werden dürfen. Für die untersuchten Fallbeispiele von der submontanen bis in die obersubalpine Höhenstufe liefern die Simulationsergebnisse jedoch starke Hinweise dafür, dass die zugrunde gelegten naturnahen Waldbaumethoden unter dem Primat der Multifunktionalität auch in Anbetracht von relativ starken Klimaszenarien vorderhand zielführend sind. Die Aussicht auf Veränderungen in der Produktivität und der Baumartenzusammensetzung in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts bedeutet, dass zwar keine vorschnellen Umstellungen im Waldbausystem angezeigt sind, Entwicklungen jedoch genau beobachtet und Anpassungen erarbeitet werden müssen. Insbesondere Idealvorstellungen über das künftig angestrebte Artenspektrum sowohl in Hochlagen als auch im Mittelland werden laufend justiert werden müssen. ■

Eingereicht: 13. Februar 2015, akzeptiert (mit Review): 24. Juni 2015

Literatur

- AMMANN P (2008) Grundsätze des Waldbaus und der Jungwaldpflege. Aarau: Departement Bau, Verkehr und Umwelt, Abteilung Wald. 4 p.
- BIRCHER N, CAILLERET M, BUGMANN H (2015) The agony of choice: different empirical mortality models lead to sharply different future forest dynamics. *Ecol Appl* 25: 1303–1318.
- BOLTE A, IBISCH PL (2007) Neun Thesen zu Klimawandel, Waldbau und Waldnaturschutz. *Allg Forst Z Waldwirtsch Umweltvorsorge* 62: 572–576.
- BRÄNDLI UB, EDITOR (2010) Schweizerisches Landesforstinventar. Ergebnisse der dritten Erhebung 2004–2006. Birmensdorf: Eidgenöss. Forsch.anstalt WSL. 312 p.

- BRANG P, BUGMANN H, BÜRGI A, MÜHLETHALER U, RIGLING A ET AL (2008) Klimawandel als waldbauliche Herausforderung. *Schweiz Z Forstwes* 159: 362–373. doi: 10.3188/szf.2008.0362
- BUGMANN H (1996) A simplified forest model to study species composition along climate gradients. *Ecology* 77: 2055–2074.
- BUGMANN H, BRANG P, ELKIN C, HENNE P, JAKOBY O ET AL (2014) Climate change impacts on tree species, forest properties, and ecosystem services. In: CH2014-Impacts. Toward quantitative scenarios of climate change impacts in Switzerland. Bern: OCCR. 136 p.
- CASALEGNO S, AMATULLI G, CAMIA A, NELSON A, PEKKARINEN A (2010) Vulnerability of *Pinus cembra* L. in the Alps and the Carpathian mountains under present and future climates. *For Ecol Manage* 259: 750–761.
- CH2011 (2011) Swiss climate change scenarios CH2011. Zürich: C2SM. 88 p.
- ELKIN C, GUTIÉRREZ AG, LEUZINGER S, MANUSCH C, TEMPERLI C ET AL (2013) A 2 °C warmer world is not safe for ecosystem services in the European Alps. *Glob Chang Biol* 19: 1827–1840.
- ENGESSER R, FORSTER B, MEIER F, WERMELINGER B (2008) Forstliche Schadorganismen im Zeichen des Klimawandels. *Schweiz Z Forstwes* 159: 344–351. doi: 10.3188/szf.2008.0344
- FISCHER AM, WEIGEL AP, BUSER CM, KNUTTI R, KÜNSCH HR ET AL (2012) Climate change projections for Switzerland based on a Bayesian multi-model approach. *Int J Climatol* 32: 2348–2371.
- FREHNER M, WASSER B, SCHWITTER R (2005) Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald. Wegleitung für Pflegemassnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion. Bern: Bundesamt Umwelt Wald Landschaft, Vollzug Umwelt. 564 p.
- IPCC (2007) Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge Univ Press. 996 p.
- JOLLY WM, DOBBERTIN M, ZIMMERMANN NE, REICHSTEIN M (2005) Divergent vegetation growth responses to the 2003 heat wave in the Swiss Alps. *Geophys Res Lett* 32: L18409.
- KREHAN H, STEYRER G (2006) Klimaänderung – Schadorganismen bedrohen unsere Wälder. Wien: Bundesforschungszentrum Wald, BFW-Praxisinformation 10: 15–17.
- LINDNER M (1999) Waldbaustrategien im Kontext möglicher Klimaänderungen. *Forstwiss Cent.bl* 118: 1–13.
- LINDNER M (2000) Developing adaptive forest management strategies to cope with climate change. *Tree Physiol* 20: 299–307.
- MILAD M, SCHAICH H, KONOLD W (2013) How is adaptation to climate change reflected in current practice of forest management and conservation? A case study from Germany. *Biodivers Conserv* 22: 1181–1202.
- MÜLLER-KROEHLING S, WALENTOWSKI H, BUSSLER H, KÖLLING C (2009) Natürliche Fichtenwälder im Klimawandel – hochgradig gefährdete Ökosysteme. Freising: Bayer Landesanstalt Wald Forstwirtschaft, LWF Wissen 63: 70–85.
- RASCHE L, FAHSE L, ZINGG A, BUGMANN H (2011) Getting a virtual forester fit for the challenge of climatic change. *J Appl Ecol* 48: 1174–1186.
- RISCH AC, HEIRI C, BUGMANN H (2005) Simulating structural forest patterns with a forest gap model: a model evaluation. *Ecol Modell* 181: 161–172.
- SAULNIER M, EDOUARD JL, CORONA C, GUIBAL F (2011) Climate/growth relationships in a *Pinus cembra* high-elevation network in the Southern French Alps. *Ann For Sci* 68: 189–200.
- SCHMID U (2014) Bewirtschaftung ausgewählter Wälder der Schweiz unter Klimawandel. Zürich: ETH Zürich, Masterarbeit. 224 p.
- SEIDL R, RAMMER W, LEXER MJ (2011) Climate change vulnerability of sustainable forest management in the Eastern Alps. *Clim Change* 106: 225–254.
- SHUGART HH (1984) A theory of forest dynamics. The ecological implications of forest succession models. New York: Springer. 278 p.

TEMPERLI C, BUGMANN H, ELKIN C (2012) Adaptive management for competing forest goods and services under climate change. *Ecol Appl* 22: 2065–2077.

TURNER MG (2010) Disturbance and landscape dynamics in a changing World. *Ecology* 91: 2833–2849.

WATT AS (1947) Pattern and process in the plant community. *J Ecol* 35: 1–22.

WEHRLI A, ZINGG A, BUGMANN H, HUTH A (2005) Using a forest patch model to predict the dynamics of stand structure in Swiss mountain forests. *For Ecol Manage* 205: 149–167.

WOHLGEMUTH T, CONEDERA M, ALBISETTI AK, MOSER B, USBECK T ET AL (2008) Effekte des Klimawandels auf Windwurf, Waldbrand und Walddynamik im Schweizer Wald. *Schweiz Z Forstwes* 159: 336–343. doi: 10.3188/szf.2008.336

ZIMMERMANN NE, BOLLIGER J, GEHRIG-FASEL J, GUIGAN A, KIENAST F ET AL (2006) Wo wachsen die Bäume in 100 Jahren? In: Wohlgemuth T, editor. *Wald und Klimawandel. Forum für Wissen* 2006. pp. 63–71.

ZIMMERMANN NE, BUGMANN H (2008) Die Kastanie im Engadin – oder was halten Baumarten von modellierten Potenzialgebieten? *Schweiz Z Forstwes* 159: 326–335. doi: 10.3188/szf.2008.0326

ZINGG A, BÜRGI A (2008) Trockenperioden seit 1900 und Waldwachstum: eine Analyse langfristiger Datenreihen. *Schweiz Z Forstwes* 159: 352–361. doi: 10.3188/szf.2008.0352

Quellen

Schweizerisches Landesforstinventar. Ergebnistabellen und Karten im Internet zu den Landesforstinventaren LF11 bis LF14b. Eidgenössische Forschungsanstalt WSL. www.lfi.ch (6.7.2015).

Sylviculture proche de la nature et multifonctionnelle en période de changement climatique – un cas d'étude

Les estimations disponibles des impacts du changement climatique sur la dynamique des forêts suisses sont principalement de natures qualitatives et sujettes à des incertitudes considérables. Les recommandations de mesures sylvicoles sont ainsi habituellement assez génériques. En utilisant une méthode quantitative, nous avons analysé si les meilleures pratiques sylvicoles d'aujourd'hui restent valides en cas de conditions climatiques changeantes. 71 peuplements forestiers typiques de Suisse ont été identifiés sur la base d'une stratification des données de l'Inventaire forestier national IFN3. A partir de celles-ci, nous avons sélectionné six exemples illustratifs et examiné comment la production de bois, la fonction de protection de la forêt, et la diversité des arbres évoluent sous l'influence du changement climatique en utilisant le modèle forestier ForClim. En coopération avec des experts sylvicoles, nous avons élaboré des schémas spécifiques de gestion pour les prochaines 100 à 150 années en considérant différents objectifs sylvicoles. Afin de les imiter en détail, ForClim a été étendu, établissant les bases vers une modélisation plus plausible et orientée vers la pratique. Les résultats indiquent un comportement satisfaisant des techniques de gestion nouvellement introduites: «jardinage des forêts de montagne» et «gestion par sélection d'arbres d'avenir». Dans ce dernier cas, la modélisation de la sélection des arbres d'avenir peut être potentiellement améliorée. Pour les six peuplements typiques étudiés ici, aucun changement brutal dans la dynamique forestière n'a été observé sous l'influence des scénarios de changement climatique considérés. Nos résultats révèlent que les pratiques sylvicoles d'aujourd'hui peuvent être toujours appropriées pour les prochaines décennies.

"Close-to-nature" and multifunctional silviculture in times of climate change – a case study

The available assessments of the impacts of the expected climate change on the dynamics of Swiss forests are prone to considerable uncertainties and are mostly of qualitative nature; recommendations on silvicultural measures are therefore typically quite generic. Using a quantitative method, we analyzed whether today's best-practice silviculture remains valid under changing climatic conditions. Based on a stratification of the data from the National Forest Inventory NF13, 71 typical Swiss forest stands were identified. Thereof, we chose six illustrative examples and examined how timber production, protective function and tree diversity evolve under climate change, using the ForClim forest model. In cooperation with silviculture experts, we elaborated specific management schemes for the upcoming 100 to 150 years considering different silvicultural objectives. In order to reproduce these in detail, ForClim was extended, and thereby an important basis for plausible, practice-oriented modelling was laid. The results show a satisfying behaviour of the newly introduced management techniques "mountain plentering" and "Z-tree management". In the latter, the modelling of the selection of Z-trees can potentially be improved. In the six stand types investigated here, no abrupt changes in forest dynamics became apparent under the considered climate change scenarios. The results indicate that today's silviculture may remain suitable in the coming decades.