

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

Herausgeber: Schweizerischer Forstverein

Band: 166 (2015)

Heft: 6

Artikel: Empfindlichkeit typischer Schweizer Waldbestände auf den Klimawandel

Autor: Bircher, Nicolas / Cailleret, Maxime / Huber, Markus

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1097553>

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>

Empfindlichkeit typischer Schweizer Waldbestände auf den Klimawandel

Nicolas Bircher Waldökologie, ETH Zürich (CH)*
Maxime Cailleret Waldökologie, ETH Zürich (CH)
Markus Huber Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (CH)
Harald Bugmann Waldökologie, ETH Zürich (CH)

Empfindlichkeit typischer Schweizer Waldbestände auf den Klimawandel

Erste klimabedingte Veränderungen von Waldökosystemen sind in der Schweiz bereits erkennbar. Weitgehend unklar ist aber, wie und in welchem Ausmass im Schweizer Wald häufig vorkommende Waldbestände auf zukünftige Klimaveränderungen reagieren werden. Auf Basis der Daten des 3. Schweizerischen Landesforstinventars und mithilfe des Waldsukzessionsmodells ForClim untersuchten wir die Entwicklung von 71 typischen Beständen unter heutigem sowie zukünftigem Klima (A2-Emissionsszenario) mit und ohne Bewirtschaftungseinfluss und leiteten daraus quantitative Aussagen über ihre Reaktion auf den Klimawandel ab. Die Simulationen zeigen, dass die Reaktion bis in die Jahrhundertmitte schwach ausfällt. Dagegen erhöht sich bis gegen Ende dieses Jahrhunderts die Empfindlichkeit, was sich in Grundflächenrückgängen in Tieflagen beziehungsweise -zunahmen in Hochlagen äussert. Die Reaktion der Bestände ist geprägt von standörtlichen Unterschieden und führt zum Beispiel bei der Fichte zu Verlusten bis in höhere Lagen. Unsere Ergebnisse zeigen eine Zunahme der Laubbaumarten in den oberen Höhenstufen, insbesondere unter Bewirtschaftung. Auswirkungen des Klimawandels auf wichtige Ökosystemleistungen wie Holzproduktion, Schutz vor Naturgefahren oder Biodiversität fallen entlang des bioklimatischen Höhengradienten unterschiedlich aus. Die heutige Bewirtschaftung zeigt Ansätze, wie negativen Effekten des Klimawandels entgegengewirkt werden könnte. Jedoch braucht es hierfür spezifische, standortangepasste Strategien und insbesondere für tiefere Lagen mehr Wissen über das Anpassungspotenzial der Baumarten.

Keywords: Swiss forests, climate change, succession modelling, ForClim, ecosystem services

doi: 10.3188/szf.2015.0408

* Universitätstrasse 16, CH-8092 Zürich, E-Mail birchern@alumni.ethz.ch

Die anthropogene Klimaveränderung ist bereits heute in Waldökosystemen sichtbar (Allen et al 2010). Die Schweiz ist davon nicht ausgenommen. Extreme Sommertemperaturen im Jahr 2003 haben in verschiedenen Höhenlagen zu einem veränderten Wachstumsmuster der Bäume geführt (Jolly et al 2005; Braun et al 2015, dieses Heft) und sind hiermit ein Beispiel für die möglichen Effekte des Klimawandels auf den Wald. Ausserdem zeigt sich bereits ein Wechsel der Baumartenzusammensetzung in den trockenen Tieflagen der inneralpinen Täler (Rigling et al 2013). Sollte sich die Jahresmitteltemperatur in der Schweiz bis ins Jahr 2100 bei gleichzeitigem Rückgang der Sommerniederschläge wie erwartet um bis zu 4.8 °C erhöhen (A2-Emissionsszenario; C2SM 2011), so ist ziemlich sicher mit starken klimabedingten Veränderungen in den Schweizer Wäldern zu rechnen (Bugmann et al 2014).

Entscheidungsträger in Politik und Forstwirtschaft sehen sich bei der zukünftigen waldbaulichen Planung mit erheblichen Schwierigkeiten konfron-

tiert (vgl. Brang et al 2008, Schmid et al 2015), bleibt doch die Unsicherheit bezüglich der möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf den Schweizer Wald hoch. Quantitative Analysen zum Einfluss von Klimaveränderungen auf die Walddynamik sind daher wichtig (Rigling et al 2008). Sowohl empirische Untersuchungen als auch Simulationsstudien zu klimabedingten Einflüssen auf das Waldwachstum und die Ökosystemleistungen fokussieren jedoch oft auf wenige Objekte, welche entweder bereits heute klimatische Extremstandorte darstellen, damit aber nicht die Mehrheit der Schweizer Waldstandorte widerspiegeln (z.B. Bigler et al 2006, Rigling et al 2013), oder dann als Fallbeispiele nur bedingt Rückschlüsse über die Studienregion hinaus zulassen (z.B. Elkin et al 2013, Schmid et al 2015). Zudem gibt es Untersuchungen zur Anpassungsfähigkeit von Baumarten an verstärkte Trockenheit (z.B. Lévesque et al 2014) oder zu deren zukünftigem potenziellem Verbreitungsgebiet (Zimmermann & Bugmann 2008). Solche Untersuchungen liegen jedoch entweder nur für

wenige Baumarten vor oder ziehen wichtige Aspekte der Walddynamik, wie die Konkurrenz, nicht in Betracht. Was insbesondere fehlt, ist eine Betrachtung auf nationaler Ebene, die einerseits auf jene Bestände fokussiert, die in ihrer Struktur sowie Zusammensetzung auf der Schweizer Waldfläche typischerweise anzutreffen sind, und andererseits bioklimatische Einflüsse und Interaktionen zwischen Baumarten berücksichtigt.

Im Rahmen des Projekts «RetroPro» wollten wir einen Beitrag zur Schliessung dieser Lücke leisten. Wir untersuchten entsprechend in den verschiedenen Regionen und Höhenstufen der Schweiz häufig vorkommende Waldbestände auf ihre Empfindlichkeit auf Klimaveränderungen. Wir stellen hier die Hauptresultate des Projektes vor; weitere Ausführungen finden sich in Bircher (2015). Anhand einer Stratifizierung der Daten des dritten Schweizerischen Landesforstinventars (LFI3; Brändli 2010) identifizierten wir 71 typische Schweizer Waldbestände. Deren zukünftige Entwicklung unter heutigem Klima sowie unter Klimawandel (elf Klimaszenarien) haben wir mit dem Waldsukzessionsmodell ForClim simuliert und ihre Reaktion auf veränderte Klimabedingungen für zwei Zeitpunkte, nämlich 2060 und 2100, analysiert.

Dabei sind wir den folgenden Fragen nachgegangen: 1) In welchen Regionen und Höhenstufen werden typische Waldbestände vom Klimawandel besonders stark betroffen sein? 2) Welche Einflussfaktoren spielen dabei eine bedeutende Rolle? 3) Welche Baumarten können als Gewinner respektive als Verlierer des Klimawandels identifiziert werden? 4) Welche Bedeutung kommt der Bewirtschaftung zu? 5) Welchen Einfluss hat der Klimawandel auf zentrale Waldökosystemleistungen?

Material und Methoden

Das Modell ForClim

ForClim ist ein Modell der Walddynamik, das Verjüngung, Wachstum und Mortalität von Einzelbäumen in jährlichen Schritten simuliert (Bugmann 1996). Der Simulation liegen bioklimatische Indizes zugrunde, welche anhand langfristiger standortspezifischer Temperatur- und Niederschlagswerte berechnet werden. Klimawandel wird durch eine graduelle Erhöhung dieser Mittelwerte simuliert (vgl. Schmid et al 2015). Das Modell ist dabei in der Lage, ohne weitere standortspezifische Kalibrierung Waldbestände in einem weiten Bereich von klimatischen Bedingungen zu simulieren. In den letzten Jahren wurde ForClim wiederholt anhand empirischer Daten getestet, wobei die neuesten Verbesserungen eine zufriedenstellende Berücksichtigung der gängigen Schweizer Bewirtschaftungspraktiken erlauben (Rasche et al 2011, Schmid et al 2015).

Um die projizierte Reaktion von Schweizer Wäldern auf den Klimawandel besser auf ihre Robustheit überprüfen zu können, wurden zwei Modellversionen (ForClim v3.3, Mina et al, in revision¹; ForClim BC-MAP, Bircher 2015) verwendet. Deren Mortalitätsfunktionen unterscheiden sich bezüglich der Empfindlichkeit gegenüber Veränderungen im Zuwachs, zum Beispiel aufgrund von Klimaveränderungen.

Stratifizierung

Eine Stratifizierung der LFI3-Daten wurde durchgeführt, um in der Schweiz weit verbreitete Bestandestypen zu identifizieren. Die als «Normalwald» klassifizierten LFI-Plots wurden nach Standortregionen und Höhenstufen gemäss Frehner et al (2005) gruppiert. Höhenstufen mit einem zu geringen Anteil an LFI-Plots innerhalb einer Standortregion blieben unberücksichtigt. Anschliessend folgte eine weitere Aufgliederung gemäss den Bestandesattributen Entwicklungsstufe (Stufen des durchschnittlichen Brusthöhendurchmessers [BHD] der 100 stärksten Bäume; d_{dom}) und vertikale Bestandesstruktur, wobei die Klasse «Jungwuchs/Dickung» nicht berücksichtigt wurde. Zuletzt wurden diese Gruppen nach ihrer Baumartenzusammensetzung in primär nadel- respektive laubholzdominierte Bestände eingeteilt. Detailliertere Ausführungen hierzu finden sich in Schmid et al (2015) und Bircher (2015).

Die Stratifizierung ergab 71 Bestandestypen, welche rund 25% aller LFI-Plots im Wald (ohne Gebüschwald) umfassen und sich über sieben Standortregionen und acht Höhenstufen verteilen (Tabelle 1).

Waldbewirtschaftung

Wir wollten in den Simulationen die gängige Schweizer Waldbewirtschaftung abbilden. Dazu nutzten wir die Höhenstufen als Einteilungskriterium und unterschieden bezüglich Waldstruktur zwischen gleich- und ungleichförmigen Beständen basierend auf der BHD-Verteilung der Straten. Pro Kombination von Höhenstufe und Bestandesstruktur legten wir basierend auf Einschätzungen der Waldbauexperten Peter Rotach (Flachland) und Monika Frehner (Gebirgswald) die jeweilige «best practice»-Bewirtschaftung fest.

Bei den Straten der hochmontanen bis ober-subalpinen Stufe wurde sowohl für gleich- als auch ungleichförmige Bestände die Gebirgspflenterung (Entnahme ganzer Baumgruppen) angewendet. Unterschiede zwischen den Höhenstufen widerspiegelten sich in einer zunehmenden Länge der

¹ MINA M, BUGMANN H, KLOPCIC M, CAILLERET M (IN REVISION) Accurate modeling of harvest is key for projecting future forest dynamics: a case study in the Slovenian mountains. Reg Environ Chang.

Standortregion	Höhenstufe	Bezeichnung der Straten	Bestandesstruktur	Entwicklungsstufe	Grundfläche (m ² /ha)	Häufigste Arten	
Jura (J)	submontan	J_SM_1a	mehrschichtig	mittleres BH	40	Fi, Bu, Ta	
		J_SM_1b			34	Bu	
		J_SM_2a		starkes BH	43	Fi, Bu, Ta	
		J_SM_2b			28	Bu, TEi	
	untermontan	J_UM_2a	einschichtig	mittleres BH	43	Fi, Bu, Ta, WFö	
		J_UM_2b			41	Bu, Ta	
		J_UM_1a	mehrschichtig	mittleres BH	35	Bu, Fi, Ta	
		J_UM_1b			30	Bu, BAH	
	obermontan	J_UM_3a	mehrschichtig	starkes BH	38	Fi, Ta, Bu	
		J_OM_1a			mittleres BH	37	Fi, Bu, Ta
		J_OM_1b		starkes BH		40	Bu, Ta
		J_OM_3a			39	Fi, Ta, Bu	
		J_OM_3b	stufig	gemischt	39	Ta, Bu	
		J_OM_2a			30	Fi, Ta	
Mittelland (M)	submontan	M_SM_2a	mehrschichtig	mittleres BH	37	Fi, Bu, Ta	
		M_SM_2b			31	Bu, Es	
		M_SM_1a		starkes BH	44	Fi, Bu, Ta	
		M_SM_1b			35	Bu, Es	
	untermontan	M_UM_2a	mehrschichtig	mittleres BH	40	Fi, Ta, Bu	
		M_UM_2b			31	Bu, Ta	
		M_UM_1a		starkes BH	49	Fi, Ta, Bu	
		M_UM_1b			36	Bu, Es, Ta	
	obermontan	M_OM_1a	mehrschichtig	starkes BH	45	Fi, Ta, Bu	
		M_OM_1b			39	Ta, Bu, Fi	
		M_OM_2a		stufig	gemischt	36	Fi, Ta
		M_OM_2b				28	Bu, Ta, Fi
	Nördliche Randalpen (NRA)	untermontan	NRA_UM_2a	einschichtig	mittleres BH	55	Fi, Bu, Ta
			NRA_UM_3a	mehrschichtig	mittleres BH	39	Fi, Ta, Bu
NRA_UM_1a			starkes BH		51	Fi, Bu, Ta	
obermontan		NRA_OM_1a	mehrschichtig	starkes BH	48	Fi, Bu, Ta	
		NRA_OM_1b			39	Ta, Bu, Fi	
		NRA_OM_2a			58	Fi, Ta	
		NRA_OM_2b			37	Bu, Ta, BAH	
		NRA_OM_3a		stufig	gemischt	34	Fi, Ta
		NRA_OM_3b				26	Ta, Bu, Fi, BAH
hochmontan		NRA_HM_1a	einschichtig	starkes BH	46	Fi	
		NRA_HM_1b			50	Fi, Ta	
		NRA_HM_3a		stufig	mittleres BH	46	Fi
		NRA_HM_2a			gemischt	28	Fi
subalpin		NRA_HM_2b	stufig	gemischt	48	Fi, Ta	
	NRA_SA_2	28			Fi		
	NRA_SA_1	31			Fi		
	NRA_SA_3	34			WFö, Fi		
Nördliche Zwischenalpen (NZA)	hochmontan	NZA_HM_3	einschichtig	mittleres BH	45	Fi	
		NZA_HM_2		starkes BH	47	Fi	
		NZA_HM_1	stufig	gemischt	32	Fi	
		NZA_SA_3			34	WFö, Fi	
	subalpin	NZA_SA_2	einschichtig	starkes BH	65	Fi	
		NZA_SA_1	stufig	gemischt	24	Fi	
Hochalpen (HA)	hochmontan	HA_HM_2	einschichtig	starkes BH	46	Fi, Lä	
		HA_HM_1	stufig	gemischt	30	Fi	
	subalpin	HA_SA_3	einschichtig	mittleres BH	45	Fi	
		HA_SA_2		starkes BH	53	Fi, Lä	
		HA_SA_1	stufig	gemischt	40	Fi, Lä	
	obersubalpin	HA_OS_2	einschichtig	starkes BH	39	Lä, Av	
		HA_OS_1a	stufig	gemischt	25	Av, Lä	
HA_OS_1b	16	Lä, Av					
Südliche Zwischenalpen (SZA)	hochmontan	SZA_HM_2	einschichtig	Stangenholz	17	Es, GrEr, Bi	
		SZA_HM_1		mittleres BH	40	Fi	
		SZA_HM_3		starkes BH	41	Fi, Lä	
	subalpin	SZA_SA_1	stufig	gemischt	13	Lä	
Südliche Randalpen (SRA)	kollin	SRA_CO_1a	einschichtig	Stangenholz	32	Ka	
		SRA_CO_1b			24	Ka, Bi	
		SRA_CO_1c			14	Bi, Ta, TEi	
		SRA_CO_2a		schwaches BH	36	Ka	
		SRA_CO_2b			34	Ka, TEi, Bi	
		SRA_CO_2c			24	Bu, Bi	
	montan	SRA_MO_1a	einschichtig	Stangenholz	51	Bu	
		SRA_MO_1b			16	Bi, TEi, Bu	
		SRA_MO_2		37	Fi		
		SRA_MO_3		gemischt	29	Bu, Ta	

Tab 1 Übersicht über die 71 Straten. Geordnet nach Standortregion und Höhenstufe (nach Frehner et al 2005) mit Angaben zur Bestandesstruktur, Entwicklungsstufe (BH = Baumholz), der Grundfläche zu Beginn der Simulation sowie den häufigsten Baumarten ($\geq 10\%$ Anteil an der Bestandesgrundfläche, in absteigender Reihenfolge aufgelistet; Av: Arve, Fi: Fichte, Lä: Lärche, Ta: Tanne, WFö: Waldföhre, Bi: Birke, Bu: Buche, BAH: Bergahorn, Es: Esche, GrEr: Grünerle, Ka: Kastanie, TEi: Traubeneiche).

Eingriffsintervalle bei gleichzeitig abnehmender Eingriffsintensität mit zunehmender Höhenlage. Verhältnismässig grosse Vorräte in den gleichförmigen Straten führten zu einem früheren ersten Eingriff. In ungleichförmigen Straten der kollinen bis obermontanen Stufe wurde eine einzelbaumweise Plenterung simuliert. Bei den gleichförmigen Straten dieser Höhenstufen wurde danach unterschieden, ob die Hiebsreife bereits erreicht war oder nicht, wobei ein d_{dom} von 60 cm als Zieldurchmesser verwendet wurde. Hiebsreife Straten wurden innerhalb von zehn Jahren in zwei Schritten stark verjüngt, um den Folgebestand anschliessend mittels Hochdurchforstung zu bewirtschaften. Für Straten mit einem $d_{\text{dom}} < 60$ cm erfolgte von Beginn weg eine Hochdurchforstung. Die Bewirtschaftung wurde während der Simulationen nicht mehr verändert und auf alle vorkommenden Baumarten angewendet. Details zur simulierten Waldbewirtschaftung finden sich in Bircher (2015).

Klima- und Standortdaten

Monatliche Klimadaten (Referenzperiode 1980–2009) wurden durch das Büro Meteotest zur Verfügung gestellt (Remund et al 2014). Dabei handelte es sich um Messdaten von MeteoSchweiz, die räumlich auf alle LFI-Plots interpoliert wurden. Daraus berechneten wir Langzeit-Durchschnittswerte sowie die Standardabweichungen von Temperatur und Niederschlag aller 71 Straten.

Daten zur Wasserspeicherkapazität der Böden stammen ebenfalls aus Interpolationen von Remund et al (2014). Weitere standortspezifische Kennwerte wie die Exposition und die Hangneigung wurden mittels einer GIS-Analyse ermittelt. Die Stickstoffverfügbarkeit wurde überall auf einen Schätzwert von 80 kg/(ha×J) gesetzt. Weitere Modellparameter wurden nicht angepasst.

Klimaszenarien

Bei der Berücksichtigung der Klimaveränderungen gingen wir von Klimawandelszenarien aus, die sich aus dem IPCC-Emissionsszenario A2 (Nakicenovic & Swart 2000, IPCC 2007) ergeben. Hierfür verwendeten wir von globaler auf regionale Ebene herunterskalierte Daten der Veränderungen von Temperatur und Niederschlag für fünf Regionen der Schweiz (Westschweiz, Nordostschweiz, Westalpen, Ostalpen und Schweiz südlich der Alpen; Fischer et al 2015). Saisonale Abschätzungen zur Klimaveränderung (untere, mittlere und obere Schätzwerte) standen für drei Zeitfenster (2020–2049, 2045–2074, 2070–2099) zur Verfügung. Bezüglich regionaler und saisonaler Niederschlagsveränderung weist das A2-Emissionsszenario hohe Ähnlichkeiten mit dem A1B-Szenario auf (vgl. C2SM 2011). Dagegen sind die Veränderungen bei der Lufttemperatur grösser. Um die Empfindlichkeit der Schweizer Wälder gegenüber

dem Klimawandel zu erfassen, erschien uns der Einbezug extremerer Klimaszenarien wichtig und die Verwendung des A2-Emissionsszenarios daher sinnvoll.

Saisonale (z.B. warmer Sommer – warmer Herbst) sowie intervariable Abhängigkeiten (z.B. hohe Temperatur – wenig Niederschlag) sind statistisch gesehen nicht immer gegeben, was theoretisch 6561 Kombinationen von saisonalen Schätzwerten möglich macht (OCCR 2014). Wir reduzierten das Set von potenziellen Kombinationen, indem wir uns bei der Auswahl der Klimaszenarien auf das letzte Zeitfenster fokussierten, wo mehrere signifikante Abhängigkeiten auftreten (Fischer et al 2015). Unter der Annahme, dass diese Abhängigkeiten für alle Regionen gleichermaßen Gültigkeit besitzen, liessen sich die ursprünglichen 6561 Kombinationen auf 45 reduzieren (Bircher 2015). Daraus wurden zehn Kombinationen zufällig sowie die Kombination aller mittleren Schätzwerte («medium scenario») ausgewählt.

Simulationsexperimente

Die Modelle wurden mit den Einzelbaumdaten (BHD, Baumart) aller LFI-Plots eines Stratum initialisiert. Die Simulationen liefen von 2006 (letztes Aufnahmejahr des LFI3) bis 2100. Der Klimawandel trat ab 2010 ein, d.h., die Klimawerte veränderten sich jeweils linear zwischen dem mittleren Jahr der drei Zeitfenster (2035, 2060, 2085). Die Entwicklung aller Straten wurde mit beiden Modellversionen, zwölf Klimaszenarien (inkl. «heutiges Klima») sowie mit respektive ohne Waldbewirtschaftung simuliert (total $71 \times 2 \times 12 \times 2 = 3408$ Simulationen).

Auswertung

Für jeden Bestand berechneten wir die relative Differenz zwischen den simulierten Grundflächen der Klimawandelszenarien und der Grundfläche unter der Annahme, dass heutige klimatische Verhältnisse fortbestehen, für die Jahre 2060 respektive 2100. Aus dem Durchschnittswert dieser elf Differenzen ergab sich dann die mittlere relative Veränderung der Grundfläche. Diese Grösse nutzten wir als Mass für die Empfindlichkeit eines Stratum gegenüber dem Klimawandel. Denselben Ansatz verwendeten wir, um die mittlere Veränderung der absoluten Grundfläche der Baumarten zu berechnen.

Den Einfluss der Standort- und Bestandeseigenschaften auf die Walddynamik unter Klimawandel untersuchten wir mittels linearer Mixed-effects-Regressionsmodelle. Dabei dienten die mittlere relative Grundflächenveränderung als abhängige Variable und diverse Standort- oder Bestandesattribute (Höhenlage, Artenreichtum, Entwicklungsstufe etc.) als erklärende Variablen. Die Standortregionen wurden als Zufallseffekt (random effect) modelliert (Bircher 2015).

Zentrale Ökosystemleistungen des Schweizer Waldes – Holzproduktion, Schutz vor Naturgefahren und Biodiversität/Erholungsraum (Brändli 2010) – erfassen wir mittels verschiedener Indizes:

Für die Holzproduktion berechneten wir das Holznutzungspotenzial, basierend auf einer fixen Bewirtschaftungsstrategie und ohne Berücksichtigung der Holzerntekosten, als die mittlere jährlich erntbare Grundfläche ($m^2/[ha \times J]$) für die Perioden 2006–2060 respektive 2061–2100.

Die Schutzwirkung des Waldes approximierten wir mittels eines allgemeinen Index, des GPFI (Bircher 2015), welcher zwar nicht einer spezifischen Naturgefahr (z.B. Lawine, Steinschlag), aber doch den grundsätzlichen Anforderungen an einen Schutzwald in Bezug auf Artenzusammensetzung, Bestandsstruktur sowie Verjüngungspotenzial Rechnung trägt.

Der Beitrag eines Baumbestandes an die Biodiversität und die Erholungsleistung wurde anhand seiner Strukturdiversität approximiert, denn ein strukturell vielfältiger Baumbestand ist nicht nur für die Biodiversität, sondern auch aus ästhetischen Gründen wünschenswert (vgl. Rasche et al 2013).

Die Strukturdiversität der Straten wurde mittels des Shannon-Bestandesstrukturindex (SSI) erfasst, welcher dem Mittelwert des Shannon-Diversitätsindex für Baumarten, Baumhöhe sowie Baumdicke entspricht (vgl. Staudhammer & LeMay 2001, Elkin et al 2013). Dieser Index berücksichtigt die Anzahl Arten beziehungsweise Grössenklassen sowie die Gleichmässigkeit ihrer Verteilung.

Das Holznutzungspotenzial wurde für alle Straten berechnet, die Schutzwirkung nur für Straten der höheren Lagen (hochmontan bis obersubalpin), die Strukturdiversität nur für tiefere Lagen (kollin bis obermontan).

Resultate

Zukünftiges Klima

Die elf Klimaszenarien ergeben für die Schweiz bis Ende des 21. Jahrhunderts eine durchschnittliche Temperaturerhöhung von $4.1\text{ }^\circ\text{C}$, welche insbesondere im Sommer besonders ausgeprägt ist ($4.9 \pm 1.1\text{ }^\circ\text{C}$, Mittelwert \pm Standardabweichung). Dagegen fallen die Änderungen beim Niederschlag saisonal sehr unterschiedlich aus: Während für den Sommer ein Rückgang ($-23 \pm 11\%$) beziehungsweise für den Winter eine Zunahme ($+12 \pm 16\%$) der Niederschläge erwartet wird, zeigt sich für den Frühling ($-1.3 \pm 15\%$) und Herbst ($-2 \pm 14\%$) eine hohe Unsicherheit. Bei Änderungen des Jahresniederschlags sind die regionalen Unterschiede demgegenüber gering. Die erwartete mittlere Temperaturerhöhung liegt in den West- und Ostalpen über dem Schweizer Durchschnitt ($4.4 \pm 1.3\text{ }^\circ\text{C}$ resp. $4.2 \pm 1.0\text{ }^\circ\text{C}$).

Walddynamik unter Klimawandel

Die Empfindlichkeit der Straten gegenüber dem Klimawandel wurde mit zwei verschiedenen Modellversionen untersucht. Die beiden Modelle unterschieden sich nicht signifikant bezüglich der simulierten Reaktionsmuster sowohl ohne (Mann-Whitney-U-Test für relative Veränderung der Grundfläche: P-Wert = 0.84) als auch mit Bewirtschaftung (P-Wert = 0.63). Aus diesem Grund konzentrieren wir uns hier auf die Ergebnisse der ForClim-Version 3.3.

Für das Jahr 2060 zeigen sich in den Straten ohne Bewirtschaftung nur geringe Veränderungen der Grundfläche aufgrund des Klimawandels (Abbildung 1; linke Seite). Eine leicht Abnahme ist ausschliesslich in der submontanen (Median der mittleren Empfindlichkeit: -3.8%) und der untermontanen Stufe (-1.8%) des Juras sowie der submontanen Stufe des Mittellandes (-1.35%) zu erkennen. Ansonsten ist in allen Regionen ab der untermontanen bis in die subalpine Stufe eine leichte Zunahme der Grundfläche zu verzeichnen ($+0.48$ bis $+4.1\%$), wobei das Stratum in der subalpinen Stufe der südlichen Zwischenalpen ($+12.3\%$) sowie die obersub-

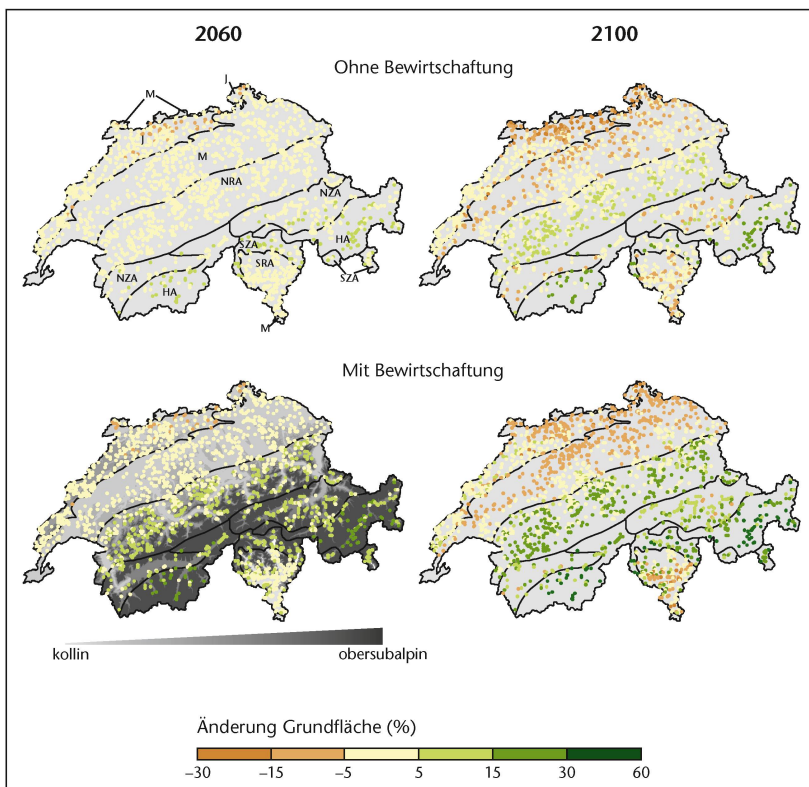


Abb 1 Mittlere relative Veränderung der Grundfläche unter Klimawandel im Vergleich zum heutigen Klima für die Jahre 2060 (links) und 2100 (rechts) basierend auf Simulationen mit der Modellversion ForClim v3.3. Oben: Simulationsergebnisse ohne Bewirtschaftung; unten: mit Bewirtschaftung. Die Punkte entsprechen den LFI-Plots, deren Einzelbaumdaten in die Simulationen eingeflossen sind, d.h., die Simulationsergebnisse der 71 Straten wurden auf die zugehörigen LFI-Plots projiziert. Die Unterteilung in Standortregionen (J = Jura, M = Mittelland, NRA = nördliche Randalpen, NZA = nördliche Zwischenalpen, HA = Hochalpen, SZA = südliche Zwischenalpen und SRA = südliche Randalpen) ist modifiziert nach Frehner et al (2005). Das Höhenprofil der Schweiz ist in der Abbildung links unten zur Orientierung dargestellt.

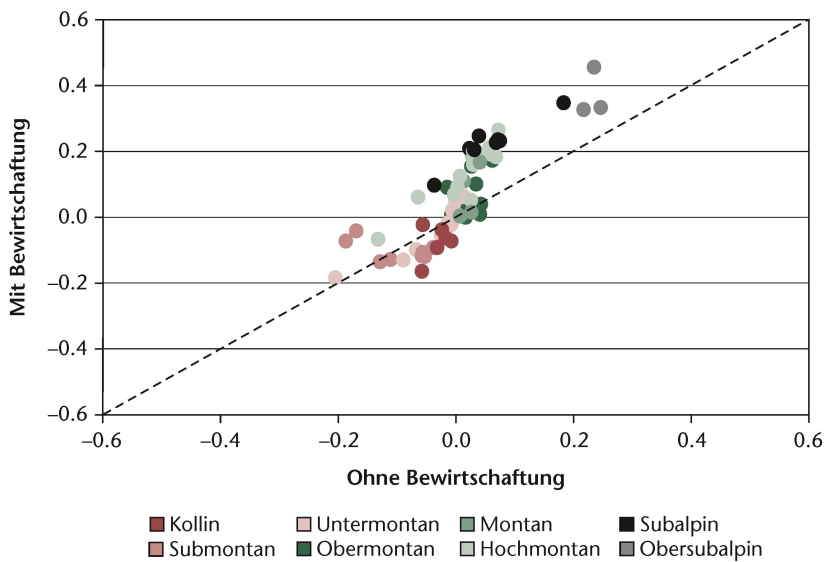


Abb 2 Mittlere relative Veränderung der Grundfläche unter Klimawandel im Vergleich zum heutigen Klima in Simulationen ohne (x-Achse) und mit (y-Achse) Waldbewirtschaftung gemäss ForClim v3.3 im Jahr 2100.

Modell	Ohne Waldbewirtschaftung		Mit Waldbewirtschaftung	
	Gemittelt	Bestes	Gemittelt	Bestes
Feste Effekte				
(Achsenabschnitt)	0.1076	0.0154	5.811523	5.812
Höhenlage	15.0298	14.7705	25.177671	26.0046
Heutige Baumartenzahl	-2.1877	-2.8683	-1.187489	
Heutiger Anteil Tanne	0.2710		-0.106284	
Heutiger Anteil Fichte	-5.9692	-6.3608	-3.797702	-3.9578
Heutiger Anteil Buche	-1.9858	-2.5609	0.083506	
Nutzbare Feldkapazität (Median)	2.4457	3.1455	4.055844	4.1931
d_{dom}	0.1866		4.744881	5.1505
Vertikale Bestandesstruktur (VSSDI)	-3.1348	-3.3301	0.004875	

Tab 2 Lineare Mixed-effects-Regressionsmodelle für die mittlere relative Veränderung der Grundfläche ($n=71$) im Jahr 2100. Gezeigt werden die festen Effekte der gemittelten sowie der besten Modelle, berechnet mit der ForClim-Version v3.3, mit und ohne Waldbewirtschaftung. Die hinterlegten Grautöne geben die Signifikanzniveaus der Parameterschätzung an: ■ = $P < 0.001$, ■ = $P < 0.01$, ■ = $P < 0.05$.

alpinen Straten der Hochalpen (+12.2%) eine deutlich höhere Zunahme aufweisen.

Hingegen zeigt sich ein stärkerer Einfluss des Klimawandels auf die Grundfläche für das Jahr 2100 (Abbildung 1; rechte Seite), wobei die Reaktion der Straten je nach Klimaszenario variiert (nicht dargestellt). Im Schnitt weisen der Jura (-2.4%), das Mittelland (-0.7%) sowie die südlichen Randalpen (-1.2%) einen Rückgang der Grundfläche auf. Die übrigen Regionen zeigen eine Zunahme der Grundfläche, allerdings in unterschiedlicher Ausprägung (z.B. nördliche Randalpen: +4.1% vs. nördliche Zwischenalpen: +0.5%). In der kollinen (-2.7%), submontanen (-8.4%) und untermontanen Höhenstufe (-1.0%) zeigt sich im Schnitt ein Rückgang der Grundfläche. Besonders ausgeprägt ist dieser in der submontanen Stufe des Juras (-14.9%). In den höhe-

ren Lagen nimmt die durchschnittliche Grundfläche zu. Besonders deutlich ist dies in der subalpinen (+5.4%) und in der obersubalpinen Stufe (+23.5%). Zuweilen sind jedoch differenzierte Reaktionsmuster erkennbar: Während die Grundfläche in der hochmontanen Stufe im Schnitt zunimmt (+2.9%), nimmt sie in dieser Höhenlage in den nördlichen Zwischenalpen ab (-3.0%).

Die simulierte Waldbewirtschaftung führt dazu, dass sich der Rückgang der Grundfläche in Regionen und Höhenstufen, welche bereits ohne Bewirtschaftung von einem Rückgang betroffen sind, noch verstärkt (Abbildungen 1 und 2). Hingegen ist für höhere Lagen bestimmter Regionen (insbesondere nördliche Randalpen, Hochalpen und südliche Zwischenalpen) eine verstärkte Zunahme der Grundfläche unter Bewirtschaftung ersichtlich.

Zusammenhang zwischen Bestandesvariablen und Empfindlichkeit auf Klimawandel

Bei der Analyse des Einflusses verschiedenster Variablen auf die Empfindlichkeit eines Stratum gegenüber dem Klimawandel zeigen die mittlere Höhenlage, die mittlere Wasserspeicherkapazität (nutzbare Feldkapazität) sowie der heutige Fichtenanteil des Stratum einen besonders starken Zusammenhang (Tabelle 2), welcher in allen Regressionsmodellen übereinstimmt: Je höher ein Stratum liegt, desto grösser ist die Wahrscheinlichkeit, dass seine Grundfläche unter Klimawandel grösser ist als unter heutigen klimatischen Bedingungen. Mit zunehmender Wasserspeicherkapazität nehmen die negativen Wirkungen des Klimawandels auf die Grundfläche ab. Im Gegensatz dazu zeigt sich, dass je höher der Anteil der Fichte in einem Stratum heute ist, dessen Grundfläche unter Klimawandel umso stärker abnimmt. Derselbe Effekt – jedoch schwächer ausgeprägt – zeigt sich für den Buchenanteil von Straten ohne simulierte Bewirtschaftung. Dagegen gewinnt unter Bewirtschaftung der heutige Entwicklungszustand des Stratum, ausgedrückt durch d_{dom} , an Bedeutung: Je höher der heutige d_{dom} eines Stratum ist, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass seine Grundfläche unter Klimawandel grösser ist als unter heutigen klimatischen Bedingungen.

Die Zufallseffekte lassen wesentliche Unterschiede zwischen den Standortregionen erkennen (nicht gezeigt). Unter Bewirtschaftung waren diese jedoch weniger stark ausgeprägt.

Veränderung bezüglich Baumarten

Bei den Nadelbaumarten bleibt die simulierte Grundfläche der Tanne unter Klimawandel bis ins Jahr 2100 weitgehend gleich (Abbildung 3), unabhängig davon, ob mit oder ohne Bewirtschaftung. Ein Grundflächenverlust ist hingegen in den meisten Regionen für die Fichte zu verzeichnen (Median der absoluten Grundflächenänderung: -1.7 bis -0.1 m^2/ha);

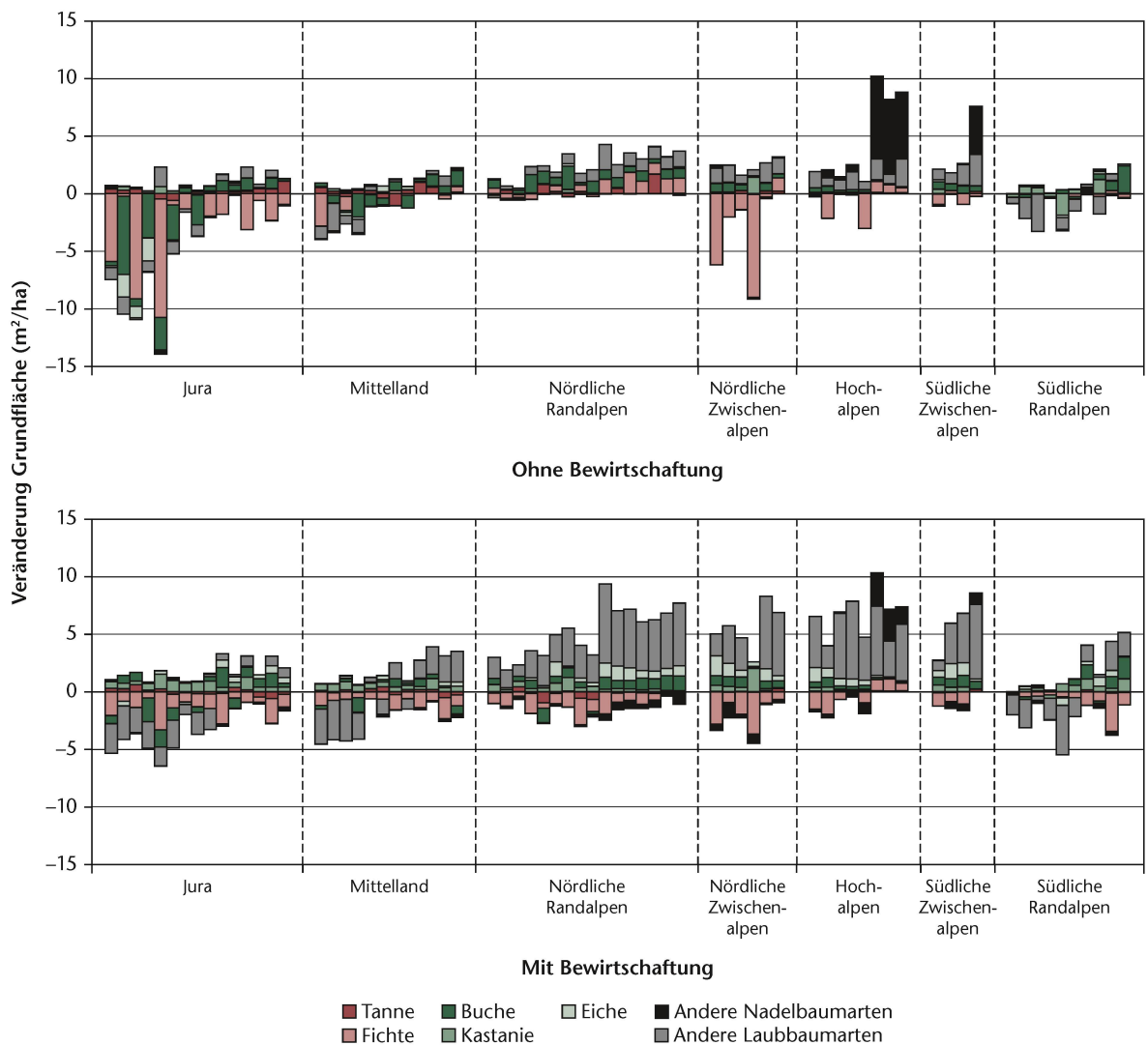


Abb 3 Mittlere Veränderung der absoluten Grundfläche von ausgewählten Baumarten/-gruppen für jedes Stratum gemäss Modellversion ForClim v3.3 im Jahr 2100. Die Straten sind gemäss Tabelle 1 nach Standortregion und Höhenstufe geordnet.

ausgenommen davon sind alleine die nördlichen (+0.5 m²/ha) und südlichen Randalpen (0.0 m²/ha). Im Schnitt weist die Fichte in allen Höhenstufen mit Ausnahme der obersubalpinen Stufe einen Rückgang auf. Im Jura ist dies beispielsweise in allen untersuchten Höhenstufen der Fall, mit maximalen Rückgängen von bis zu 9.2 m²/ha (submontan) beziehungsweise 10.3 m²/ha (untermontan). Rückgänge machen sich jedoch auch in der hochmontanen Stufe der nördlichen Zwischenalpen (Median: -4.1 m²/ha; Maximum: -8.9 m²/ha) sowie in der subalpinen Stufe der Hochalpen (Median: -1.1 m²/ha; Maximum: -2.2 m²/ha) bemerkbar. Wenn die Straten bewirtschaftet werden, sind die maximalen Rückgänge der Fichte in der submontanen und der untermontanen Stufe insbesondere im Jura geringer. Die Bewirtschaftung kann die generelle Abnahme der Fichte jedoch nicht verhindern, sondern verstärkt sie zuweilen gar noch. Bei den übrigen Nadelbaumarten sind bezüglich der Standortregionen und Höhenstufen kaum Veränderungen erkennbar, mit Ausnahme der obersubalpinen Stufe (+6.5 m²/ha). Hier erfahren die Arve und

insbesondere die Lärche eine Zunahme der Grundfläche. Wenn die Straten bewirtschaftet wurden, nimmt die Grundfläche der übrigen Nadelbaumarten von der obermontanen bis zur subalpinen Stufe jedoch leicht ab, und der Zuwachs in der obersubalpinen Stufe ist nicht mehr so stark ausgeprägt.

Bei den Laubbaumarten verzeichnet die Buche über alle Standortregionen hinweg eine unveränderte beziehungsweise schwach zunehmende Grundfläche (Median: 0.0 bis 0.8 m²/ha). Nach Höhenstufen differenziert nimmt die Grundfläche hingegen in der submontanen (-2.4 bzw. -0.4 m²/ha) und untermontanen Stufe (-2.6 bzw. -0.8 m²/ha) des Juras und des Mittellandes ab. Eine leichte Zunahme zeigt sich im Schnitt von der obermontanen bis zur subalpinen Stufe (0.2 bis 1.0 m²/ha). Die Bewirtschaftung sorgt wie bei der Fichte für eine Reduktion der maximalen Rückgänge in tieferen Lagen und vermag die Zunahme der Grundfläche unter Klimawandel in höheren Lagen marginal zu erhöhen. Kastaniendominierte Straten in den südlichen Randalpen zeigen in der kollinen Stufe ein kaum verändertes Bild.

Region	Holznutzungspotenzial			
	2006–2060 (m ² /[ha×J])	Diff-CC60 (%)	2061–2100 (m ² /[ha×J])	Diff-CC100 (%)
Jura	0.5±0.1	0.9±5.1	0.6±0.1	-3.1±17.6
Mittelland	0.6±0.1	0.6±2.4	0.8±0.1	-0.3±9.2
Nördliche Randalpen	0.4±0.2	1.7±3.2	0.5±0.2	13.4±8.2
Nördliche Zwischenalpen	0.4±0.1	1.1±1.5	0.5±0.1	8.3±13.2
Hochalpen	0.4±0.1	2.2±3.3	0.4±0.2	17.9±10.9
Südliche Zwischenalpen	0.3±0.2	1.4±5.7	0.4±0.1	11.3±6.2
Südliche Randalpen	0.5±0.1	1.4±3.4	0.6±0.1	0.2±10.1

Tab 3 Holznutzungspotenzial in den verschiedenen Standortregionen für die Zeitperioden 2006–2060 und 2061–2100 unter Fortführung des heutigen Klimas und prozentuale Veränderung des Holznutzungspotenzials unter Klimawandel im Vergleich zu heutigen klimatischen Bedingungen in diesen Perioden (Diff-CC60 bzw. Diff-CC100). Dargestellt sind jeweils Median und Standardabweichung. Signifikante Veränderungen unter Klimawandel sind grau markiert.

Unter Bewirtschaftung ist in allen Standortregionen (0.1 bis 0.6 m²/ha) und von der kollinen bis zur subalpinen Höhenstufe (0.1 bis 0.7 m²/ha) im Schnitt eine schwache Zunahme der Kastanie zu verzeichnen. Bei den Eichen zeichnet sich im Schnitt ebenfalls kaum eine Veränderung der Grundfläche ab. Eine leichte Zunahme ist alleine unter Bewirtschaftung von der obermontanen bis zur subalpinen Höhenstufe zu erkennen. Die Grundfläche der übrigen Laubbaumarten ist mit Ausnahme der südlichen Randalpen (-0.8 m²/ha) je nach Region unverändert beziehungsweise leicht erhöht. Die Reaktionen fallen je nach Höhenstufe jedoch unterschiedlich aus: So geht die Grundfläche der übrigen Laubbaumarten in der kollinen und submontanen Stufe im Schnitt zurück (-1.0 bzw. -1.1 m²/ha), bleibt in mittleren Lagen unverändert und steigt von der hochmontanen (+1.4 m²/ha) bis auf die obersubalpine Stufe (+1.8 m²/ha) leicht an. Unter Bewirtschaftung ist der Rückgang dieser Artengruppe in tieferen Lagen erhöht, dafür nimmt die Grundfläche in höheren Lagen deutlich stärker zu.

Ökosystemleistungen unter Klimawandel

Das Holznutzungspotenzial bleibt regional betrachtet für beide Untersuchungsperioden (2006–2060 bzw. 2061–2100) im Schnitt nahezu unverändert (Tabelle 3). Unter Klimawandel zeichnet sich für den Jura und das Mittelland bis 2100 ein leichter Rückgang ab, während in alpinen Regionen eine Zunahme feststellbar ist. Jedoch sind diese prozentualen Veränderungen lediglich in den nördlichen Randalpen, den Hochalpen sowie den südlichen Zwischenalpen signifikant.

Unter heutigen klimatischen Verhältnissen bleibt die Schutzwirkung des Waldes (GPFI) ohne simulierte Bewirtschaftung nahezu unverändert, während sie unter Bewirtschaftung abnimmt (Tabelle 4). Effekte des Klimawandels resultieren regional in einer Verstärkung der Schutzwirkung, sofern eine Bewirtschaftung simuliert wurde. Ohne Bewirtschaftung fallen diese Effekte kaum ins Gewicht oder können sogar leicht negative Konsequenzen haben.

Analog zur Schutzwirkung bleibt ohne Bewirtschaftung eine grössere Strukturvielfalt in den Straten erhalten, wenn man mit den heutigen klimatischen Verhältnissen vergleicht (Tabelle 4). Unter Klimawandel geht die Strukturvielfalt im Jura, in den südlichen Randalpen sowie im Mittelland (nur unter Bewirtschaftung) zurück. Diese Veränderungen sind aber nur für den Jura signifikant. Grosse Abweichungen der mittleren Veränderungen aller Indizes innerhalb einer Region kommen wegen des starken Höhengradienten der Straten (P < 0.01) zustande.

Diskussion

Wir haben die Empfindlichkeit typischer Schweizer Waldbestände gegenüber dem Klimawandel untersucht. Dazu haben wir ein starkes Emissionsszenario (A2) verwendet und die Entwicklung von 71 repräsentativen Straten mit und ohne Bewirt-

Region	Schutzwirkung (GPFI)					Strukturdiversität (SSI)				
	2006 (-)	Ohne Bewirtschaftung		Mit Bewirtschaftung		2006 (-)	Ohne Bewirtschaftung		Mit Bewirtschaftung	
		2100 (-)	Diff-CC (%)	2100 (-)	Diff-CC (%)		2100 (-)	Diff-CC (%)	2100 (-)	Diff-CC (%)
Jura	-	-	-	-	-	2.1±0.4	2.8±0.3	-6.0±13.1	1.5±0.4	-7.3±6.1
Mittelland	-	-	-	-	-	2.1±0.5	3.1±0.2	0.6±7.1	1.5±0.4	-1.4±7.2
Nördliche Randalpen	77.4±8.2	78.6±4.0	1.2±0.5	66.7±6.7	7.2±5.2	2.1±0.3	3.0±0.3	4.8±5.1	1.7±0.4	2.4±3.6
Nördliche Zwischenalpen	78.4±9.9	78.5±5.5	-0.7±3	64.4±6.7	4.4±5.7	-	-	-	-	-
Hochalpen	76.7±10	74.3±5.5	-0.1±2.1	61.8±7.1	7.9±5.3	-	-	-	-	-
Südliche Zwischenalpen	62±20.3	76.9±4.4	0.4±1.9	64.3±9.7	7.8±5.9	-	-	-	-	-
Südliche Randalpen	-	-	-	-	-	1.2±0.6	2.7±0.7	-4±7.9	1.3±0.3	-3.4±8.2

Tab 4 Absolute Indexwerte der allgemeinen Schutzwirkung sowie der Strukturdiversität unter heutigem Klima für die Jahre 2006 (Simulationsbeginn) und 2100 basierend auf Simulationen mit ForClim v3.3 und prozentuale Veränderung der Indizes im Vergleich zu heutigen klimatischen Bedingungen im Jahr 2100 (Diff-CC). Für beide Indizes sind die Ergebnisse ohne und mit Berücksichtigung der Waldbewirtschaftung, ausgedrückt mit Median und Standardabweichung, dargestellt. Die Ökosystemleistungen wurden jeweils für jede Region getrennt betrachtet. Signifikante Veränderungen unter Klimawandel sind grau markiert.

schaftung simuliert. Die Simulationsergebnisse erlauben es, mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf die Waldentwicklung und auf verschiedene Ökosystemleistungen landesweit abzuschätzen.

Verschiedene dynamische Vegetationsmodelle sind oft unterschiedlich empfindlich gegenüber dem Klimawandel (z.B. Moorcroft 2006), insbesondere bezüglich der zukünftigen Baum mortalität (z.B. Friend et al 2014, Bircher et al 2015). Um die Reaktion von Schweizer Wäldern auf den Klimawandel besser abschätzen zu können, haben wir uns deshalb auf die Ergebnisse von zwei verschiedenen Modellversionen abgestützt, die den Bereich der zu erwartenden Klimasensitivität der Mortalität gut abdecken dürften. Die beiden Modellversionen divergieren nicht signifikant in ihren Aussagen, was für die Robustheit der Ergebnisse spricht.

Gemäss den Ergebnissen werden typische Schweizer Wälder und deren Ökosystemleistungen auch unter einem extremen, aber durchaus im Bereich der Wahrscheinlichkeit liegenden A2-Szenario bis ins Jahr 2060 nicht entscheidend verändert. Im Gegensatz dazu zeichnen sich bis ins Jahr 2100 teils starke klimabedingte Veränderungen in unseren Wäldern ab (vgl. Morales et al 2007, Seidl et al 2011a, Elkin et al 2013), welche mit Verlusten der Grundfläche in den tieferen Lagen beziehungsweise Zunahmen in höheren Lagen einhergehen (vgl. auch Morales et al 2007, Wamelink et al 2009, Poulter et al 2011, Reyer et al 2014). Trotz guter Übereinstimmung mit anderen Studien muss die simulierte Stärke und Geschwindigkeit der Bestandesveränderungen mit Vorsicht interpretiert werden, da Störungsereignisse nicht berücksichtigt sind. Windwürfe, Waldbrände oder Borkenkäferkalamitäten haben beispielsweise in den letzten Jahrzehnten in Mitteleuropa bereits zugenommen, und dieser Trend dürfte sich in Zukunft fortsetzen (Seidl et al 2011b, Seidl et al 2014). Störungsereignisse (Raffa et al 2008) können rasante Veränderungen in Waldökosystemen einleiten (Turner 2010).

Wirkung des Klimawandels entlang des Höhengradienten

Die Reaktion der Straten auf klimatische Veränderungen ist stark von der standörtlichen Variabilität geprägt (vgl. Wamelink et al 2009, Reyer et al 2014). Wie schon in anderen Studien gezeigt (Seidl et al 2011a, Elkin et al 2013), spielt der bioklimatische Höhengradient für Wirkung und Stärke des Klimawandels entscheidend mit. Gerade die Reaktion der beiden Hauptbaumarten Buche und Fichte zeigt eine offenkundige Abhängigkeit von der Höhenlage des Bestandes, während die Tanne fast keine Reaktion aufweist. Bei der Buche erwarten wir einen Rückgang in der sub- und untermontanen Stufe des Juras und des Mittellandes. Bei der Fichte bleibt dieser aber nicht auf die unteren Lagen beschränkt, son-

dern zieht sich hinauf bis in die hochmontane und subalpine Stufe und verändert somit deren natürliches Verbreitungsgebiet (Ellenberg & Leuschner 2010). Dabei zeigen sich jedoch klare regionale Unterschiede: Während der niederschlagsreiche Alpennordrand davon ausgenommen bleibt, zeigt sich eine negative Reaktion der Fichte in den nördlichen Zwischenalpen (hochmontane Stufe) und den Hochalpen (subalpine Stufe). Waldbestände der inneralpinen Regionen sind in unteren Lagen bereits heute erhöhtem Stress durch Trockenheit ausgesetzt (Rebetez & Dobbertin 2004, Bigler et al 2006). In Zukunft wird für diese Regionen eine deutliche Zunahme der Trockenheit bis in Höhen von 1800 m ü. M. erwartet (Rössler et al 2012), was sich auch mit den von uns simulierten Trockenheitswerten deckt. Eine negative Reaktion der Fichte, welche gerade bezüglich Sommertrockenheit eine hohe Sensitivität aufweist (Lévesque et al 2014), ist daher durchaus realistisch. Damit ist unsere Studie auch ein Hinweis dafür, dass sich die Anfälligkeit von Baumarten auf den Klimawandel nicht ausschliesslich an der Peripherie des Verbreitungsareals zeigen kann (vgl. Hlásny et al 2011), sondern je nach Topografie, Bodenbedingungen und Emissionsszenario auch in dessen Zentrum. Das robuste Verhalten der Tanne hingegen stimmt gut mit den Ergebnissen neuerer Studien überein, die ihr ein breites klimatisches Spektrum attestieren (Maiorano et al 2013, Tinner et al 2013).

Veränderungen bezüglich Baumarten

Veränderungen in der Grundfläche der Straten gegen Ende des 21. Jahrhunderts sind meist eine Folge davon, dass verschiedenste Baumarten bioklimatische Toleranzschwellenwerte insbesondere in Bezug auf die Trockenheit erreichen und dadurch deutlich erhöhten Mortalitätswahrscheinlichkeiten ausgesetzt sind (vgl. Elkin et al 2013). Der Übergang zu neuen, trockenheitsangepassten Baumarten erfolgt dagegen viel langsamer (Lindner et al 2014). Grundsätzlich stellen wir insbesondere in höheren Lagen ein verstärktes Verjüngungspotenzial verschiedenster Baumarten fest, welches aber durch die einfache Modellierung der Verjüngung (vgl. Schmid et al 2015) überschätzt sein dürfte. Welche Baumarten sich langfristig unter Klimawandel etablieren werden, lässt sich daher anhand des von uns simulierten Zeitraums nicht abschliessend folgern. Übereinstimmend mit anderen Studien (Hlásny et al 2011, Hanewinkel et al 2013, Mette et al 2013) stellen jedoch auch wir eine Zunahme von Buche, Eiche und anderen Laubholzarten in mittleren und höheren Lagen fest. Eine solche Reaktion kann in den untersten Lagen jedoch kaum beobachtet werden.

Einfluss der Waldbewirtschaftung

Die von uns simulierte heutige «best practice»-Waldbewirtschaftung führt gerade in höheren La-

gen zu einer stärkeren Zunahme der Grundfläche unter Klimawandel. Sie tut dies prinzipiell durch zwei Effekte: Einerseits mindert sie das Risiko eines Bestandeszusammenbruchs, indem der Anteil jener Baumarten, welche mit veränderten klimatischen Bedingungen nur schlecht zurechtkommen, frühzeitig reduziert wird. Andererseits schafft die Entnahme dominanter Bäume Licht und Raum für die Verjüngung und lässt somit den Übergang zu klimadaptierten Baumarten schneller erfolgen, als dies unter natürlichen Bedingungen der Fall wäre (vgl. Lindner et al 2000). Die Entnahme «risikobehafteter» Baumarten wie beispielsweise der Fichte bei gleichzeitiger Förderung einer hohen Baumartenvielfalt im Folgebestand scheint daher ein wirkungsvolles Mittel zu sein. Schwieriger gestaltet sich die Situation in den untersten Höhenstufen: Hier vermag die Bewirtschaftung zwar starke Rückgänge von Fichte und Buche abzuschwächen. Der Vergleich mit den Simulationen ohne Bewirtschaftung lässt in diesen Lagen aber auf eine ungenügende Naturverjüngung unter Klimawandel schliessen. Um hier eine kontinuierliche Waldentwicklung auch unter Klimawandel zu gewährleisten, sind weitere Abklärungen bezüglich des Anpassungs- sowie Verjüngungspotenzials der Baumarten dringend notwendig (z.B. Bolte et al 2009).

Auswirkungen auf Ökosystemleistungen

Unsere Abschätzung von Ökosystemleistungen des Schweizer Waldes basiert auf wenigen und modellbedingt relativ einfachen Indikatoren, was eine vorsichtige Interpretation erfordert. Dennoch erlaubt sie wertvolle Rückschlüsse: Die von uns angenommenen Bewirtschaftungsmassnahmen haben sich absolut gesehen langfristig negativ auf die allgemeine Schutzwirkung und die Strukturdiversität der Straten ausgewirkt. Den Nutzen der heutigen Bewirtschaftungsmassnahmen bezüglich dieser Waldfunktionen in Zweifel zu ziehen, wäre jedoch verfrüht. Basierend auf sehr genauen und funktions-spezifischen Bewirtschaftungsstrategien für sechs der 71 Straten kommen Schmid et al (2015) zum Schluss, dass der naturnahe Waldbau auch unter Klimawandel seine Gültigkeit behalten kann. Aufgrund der hohen Anzahl Straten konnten wir in dieser Studie nicht ebenso spezifische Bewirtschaftungsstrategien definieren. Wie sich herausstellte, führte dies zu einer unbefriedigenden Entwicklung der Ökosystemleistungen unter Bewirtschaftung. Dennoch ist unser Ansatz deutlich fortgeschrittener als in den meisten bisherigen Simulationsstudien, wo die Bewirtschaftung sehr stark vereinfacht (z.B. Elkin et al 2013) oder gar nicht berücksichtigt wurde (z.B. Reyer et al 2014). Die Erkenntnis, dass die Genauigkeit unseres Ansatzes immer noch nicht ausreicht, ist für zukünftige Simulationsstudien sehr wichtig. Sie zeigt aber auch der Forstpraxis, dass Aussagen über

die Wirkung pauschal angewendeter Bewirtschaftungsstrategien den einzelnen Standorten unter Umständen nicht gerecht werden.

Letztlich hängt die simulierte Reaktion der Wälder auf den Klimawandel stark von den verwendeten Klimaszenarien ab. Jedoch herrscht auch innerhalb eines bestimmten Treibhausgasszenarios bezüglich der Aussagen verschiedener Klimamodelle eine hohe Variabilität (Fischer et al 2012), was die Verwendung von mittleren Schätzwerten unzulässig erscheinen lässt (vgl. OCCR 2014). Deshalb stützten wir uns auf elf verschiedene Klimaszenarien, um mittlere Abschätzungen zur Auswirkung des Klimawandels vorzunehmen. In diesem Zusammenhang mag ein A2-Szenario zwar extrem erscheinen, jedoch deutet derzeit nichts auf eine globale Senkung der Emission von Treibhausgasen hin (vgl. WMO 2014), weshalb unsere Projektionen für den Wald unter klimatischen Bedingungen erfolgten, die für das Ende dieses Jahrhunderts absolut realistisch sein dürften.

Schlussfolgerungen

Die simulierte Reaktion der 71 typischen Schweizer Waldbestände auf den Klimawandel bis 2060 erwies sich als eher schwach; dies darf nicht darüber hinwegtäuschen, dass bis Ende des Jahrhunderts eine deutlich höhere Empfindlichkeit festzustellen ist. Dabei haben regionale Klimaunterschiede einen entscheidenden Einfluss auf die Empfindlichkeit der Waldbestände, die ansonsten in erster Linie durch ihre Höhenlage geprägt ist. Unter den Baumarten zeigt die Fichte regional einen Rückgang bis in höhere Lagen. Laubbaumarten werden dagegen in mittleren und höheren Zonen zulegen.

Die von uns simulierte Geschwindigkeit der Veränderungen in Schweizer Wäldern kann durch das veränderte Auftreten von natürlichen Störungen überformt werden, da solche Ereignisse das Potenzial haben, die Walddynamik extrem zu beschleunigen und auch in andere Bahnen zu lenken. Die Verwendung verschiedener Klimaszenarien macht zwar eine mittlere Abschätzung der Empfindlichkeit der Wälder gegenüber dem Klimawandel möglich, sie zeigt jedoch auch die hohe Variabilität auf, die weiterhin existiert, solange die Unsicherheit über die Entwicklung des zukünftigen Klimas hoch bleibt. Daran wird sich kaum etwas ändern, da das menschliche Handeln (d.h. die Emissionen) nicht auf Jahrzehnte hinaus mit Sicherheit prognostiziert werden kann.

Die Waldbewirtschaftung hat einen wichtigen Einfluss auf die Entwicklung der Wälder im Klimawandel, indem sie den Anteil risikofälliger Baumarten frühzeitig reduziert und den Übergang zu angepassten Arten beschleunigen kann. Die nach-

haltige Sicherstellung der untersuchten Waldleistungen bedingt jedoch eine standortangepasste Bewirtschaftung und, je nach lokaler Zielsetzung, eventuell auch neue Strategien. Handlungs- und Forschungsbedarf besteht hier insbesondere in Bezug auf das Anpassungs- und Verjüngungspotenzial von Baumarten in Tieflagen. ■

Eingereicht: 31. März 2015, akzeptiert (mit Review): 1. September 2015

Dank

Wir bedanken uns beim BAFU/WSL-Forschungsprogramm «Wald und Klimawandel» für die Mitfinanzierung des Projekts «RetroPro».

Literatur

- ALLEN CD, MACALADY AK, CHENCHOUNI H, BACHELET D, MCDOWELL N ET AL (2010) A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *For Ecol Manage* 259: 660–684.
- BIGLER C, BRÄKER OU, BUGMANN H, DOBBERTIN M, RIGLING A (2006) Drought as an inciting mortality factor in Scots pine stands of the Valais, Switzerland. *Ecosystems* 9: 330–343.
- BIRCHER N (2015) To die or not to die: Forest dynamics in Switzerland under climate change. Switzerland: Swiss Federal Institute of Technology Zurich, PhD Thesis. 186 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*: 1303–1318.
- BOLTE A, AMMER C, LÖF M, MADSEN P, NABUURS GJ ET AL (2009) Adaptive forest management in central Europe: Climate change impacts, strategies and integrative concept. *Scand J For Res* 24: 473–482.
- 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. 10.3188/szf.2008.0362
- BRAUN S, REMUND J, RIHM B (2015) Indikatoren zur Schätzung des Trockenheitsrisikos in Buchen- und Fichtenwäldern. *Schweiz Z Forstwes* 166: 361–371. doi: 10.3188/szf.2015.0361
- 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: OCCR 2014. CH2014-Impacts. Toward quantitative scenarios of climate change impacts in Switzerland. Bern: OCCR. pp. 79–89.
- BUGMANN HKM (1996) A simplified forest model to study species composition along climate gradients. *Ecology* 77: 2055–2074.
- C2SM (2011) Swiss climate change scenarios CH2011. Zurich: Eidg Techn Hochschule, Center Climate Systems Modeling. 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.
- ELLENBERG H, LEUSCHNER C (2010) Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen: In ökologischer, dynamischer und historischer Sicht. Stuttgart: UTB, 6 ed. 1333 p.
- FISCHER AM, LINIGER MA, APPENZELLER C (2015) Climate scenarios of seasonal means: inter-variable and inter-seasonal correlations of change estimates. Zurich: MeteoSwiss, CH2011 Extension Series 3. (in revision).
- 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.
- FRIEND AD, LUCHT W, RADEMACHER TT, KERIBIN R, BETTS R ET AL (2014) Carbon residence time dominates uncertainty in terrestrial vegetation responses to future climate and atmospheric CO₂. *Proc Natl Acad Sci USA* 111: 3280–3285.
- HANEWINKEL M, CULLMANN DA, SCHELHAAS MJ, NABUURS GJ, ZIMMERMANN NE (2013) Climate change may cause severe loss in the economic value of European forest land. *Nat Clim Chang* 3: 203–207.
- HLASNY T, BARCZA Z, FABRIKA M, BALÁZS B, CHURKINA G ET AL (2011) Climate change impacts on growth and carbon balance of forests in Central Europe. *Clim Res* 47: 219–236.
- IPCC (2007) Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change. 52 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.
- LÉVESQUE M, RIGLING A, BUGMANN H, WEBER P, BRANG P (2014) Growth response of five co-occurring conifers to drought across a wide climatic gradient in Central Europe. *Agric For Meteorol* 197: 1–12.
- LINDNER M, FITZGERALD JB, ZIMMERMANN NE, REYER C, DELZON S ET AL (2014) Climate change and European forests: What do we know, what are the uncertainties, and what are the implications for forest management? *J Environ Manage* 146: 69–83.
- LINDNER M, LASCH P, ERHARD M (2000) Alternative forest management strategies under climatic change. Prospects for gap model applications in risk analyses. *Silva Fenn* 34: 101–111.
- MAIORANO L, CHEDDADI R, ZIMMERMANN NE, PELLISSIER L, PETITPIERRE P ET AL (2013) Building the niche through time: using 13,000 years of data to predict the effects of climate change on three tree species in Europe. *Glob Ecol Biogeogr* 22: 302–317.
- METTE T, DOLOS K, MEINARDUS C, BRÄUNING A, REINEKING B ET AL (2013) Climatic turning point for beech and oak under climate change in Central Europe. *Ecosphere* 4: 19.
- MOORCROFT PR (2006) How close are we to a predictive science of the biosphere? *Trends Ecol Evol* 21: 400–407.
- MORALES P, HICKLER T, ROWELL DP, SMITH B, SYKES MT (2007) Changes in European ecosystem productivity and carbon balance driven by regional climate model output. *Glob Chang Biol* 13: 108–122.
- NAKICENOVIC N, SWART R (2000) Special report on emissions scenarios. Cambridge: Cambridge Univ Press. 612 p.
- OCCR (2014) CH2014-Impacts. Toward quantitative scenarios of climate change impacts in Switzerland. Bern: Oeschger Centre for Climate Change Research. 136 p.
- POULTER B, FRANK DC, HODSON EL, ZIMMERMANN NE (2011) Impacts of land cover and climate data selection on understanding terrestrial carbon dynamics and the CO₂ airborne fraction. *Biogeosciences* 8: 2027–2036.
- RAFFA KF, AUKEMA BH, BENTZ BJ, CARROLL AL, HICKE JA ET AL (2008) Cross-scale drivers of natural disturbances prone to anthropogenic amplification: The dynamics of bark beetle eruptions. *Bioscience* 58: 501–517.
- RASCHE L, FAHSE L, BUGMANN H (2013) Key factors affecting the future provision of tree-based forest ecosystem goods and services. *Clim Chang* 118: 579–593.

- 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.
- REBETEZ M, DOBBERTIN M (2004) Climate change may already threaten Scots pine stands in the Swiss Alps. *Theor Appl Climatol* 79: 1–9.
- REMUND J, RIHM B, HUGUENIN-LANDL B (2014) Klimadaten für die Waldmodellierung für das 20. und 21. Jahrhundert. Bern: Meteotest. 38 p.
- REYER C, LASCH-BORN P, SUCKOW F, GUTSCH M, MURAWSKI A ET AL (2014) Projections of regional changes in forest net primary productivity for different tree species in Europe driven by climate change and carbon dioxide. *Ann For Sci* 71: 211–225.
- RIGLING A, BIGLER C, EILMANN B, FELDMEYER-CHRISTE E, GIMMI U ET AL (2013) Driving factors of a vegetation shift from Scots pine to pubescent oak in dry Alpine forests. *Glob Chang Biol* 19: 229–240.
- RIGLING A, BRANG P, BUGMANN H, KRÄUCHI N, WOHLGEMUTH T ET AL (2008) Klimawandel als Prüfstein für die Waldbewirtschaftung. *Schweiz Z Forstwes* 159: 316–325. doi: 10.3188/szf.2008.0316
- RÖSSLER O, DIEKKRUGER B, LOFFLER J (2012) Potential drought stress in a Swiss mountain catchment. Ensemble forecasting of high mountain soil moisture reveals a drastic decrease, despite major uncertainties. *Water Res Res* 48: 19.
- SCHMID U, BIRCHER N, BUGMANN H (2015) Naturnaher und multifunktionaler Waldbau in Zeiten des Klimawandels – eine Fallstudie. *Schweiz Z Forstwes* 166: 314–324. doi: 10.3188/szf.2015.0314
- SEIDL R, RAMMER W, LEXER MJ (2011A) Climate change vulnerability of sustainable forest management in the Eastern Alps. *Clim Chang* 106: 225–254.
- SEIDL R, SCHELHAAS MJ, LEXER MJ (2011B) Unraveling the drivers of intensifying forest disturbance regimes in Europe. *Glob Chang Biol* 17: 2842–2852.
- SEIDL R, SCHELHAAS MJ, RAMMER W, VERKERK PJ (2014) Increasing forest disturbances in Europe and their impact on carbon storage. *Nat Clim Chang* 4: 806–810.
- STAUDHAMMER CL, LEMAY VM (2001) Introduction and evaluation of possible indices of stand structural diversity. *Can J For Res* 31: 1105–1115.
- TINNER W, COLOMBAROLI D, HEIRI O, HENNE PD, STEINACHER M ET AL (2013) The past ecology of *Abies alba* provides new perspectives on future responses of silver fir forests to global warming. *Ecol Monogr* 83: 419–439.
- TURNER MG (2010) Disturbance and landscape dynamics in a changing world. *Ecology* 91: 2833–2849.
- WAMELINK GWW, WIEGERS HJJ, REINDS GJ, KROS J, MOL-DIJKSTRA JP ET AL (2009) Modelling impacts of changes in carbon dioxide concentration, climate and nitrogen deposition on carbon sequestration by European forests and forest soils. *For Ecol Manage* 258: 1794–1805.
- WMO (2014) WMO The state of greenhouse gases in the atmosphere using global observations through 2013. Geneva: World Meteorological Organization, Greenhouse gas bulletin.
- 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

Sensibilité au changement climatique des peuplements forestiers suisses typiques

Les premiers changements au sein des écosystèmes forestiers en raison du climat peuvent être observés en Suisse. Il n'est toutefois pas clair comment et dans quelle mesure des peuplements fréquents dans la forêt suisse vont réagir aux changements climatiques à venir. Sur la base du troisième Inventaire forestier national et à l'aide du modèle de succession ForClim, nous avons examiné le développement de 71 peuplements typiques sous le climat actuel et futur (scénario d'émission A2) avec et sans influence de gestion. Les simulations démontrent que ces réactions seront modérées jusqu'au milieu de ce siècle. Par contre, vers la fin de ce siècle, la sensibilité sera accrue, ce qui provoquera une baisse de la surface terrière en basse altitude et une augmentation de cette dernière en altitude. La réaction des peuplements est influencée par les différences de stations et conduit par exemple à une diminution de l'épicéa jusqu'en haute altitude. Nos résultats démontrent une augmentation des feuillus en altitude, notamment par l'influence de la gestion. Les répercussions du changement climatique sur d'importants services écosystémiques comme la production de bois, la protection contre les dangers naturels ou la biodiversité varient selon le gradient altitudinal bioclimatique. La gestion forestière actuelle montre des approches pour contrer les effets négatifs du changement climatique. Il faudra toutefois des stratégies spécifiques et adaptées à la station et, en particulier pour les stations en basse altitude, une meilleure connaissance du potentiel d'adaptation des essences.

Sensitivity of typical Swiss forest stands to climate change

In Switzerland, first climate-induced changes of forest ecosystems can be observed. However, it is widely unknown how and to what extent the typical (widespread) forest stands will respond to future climate change. With the data of the third National forest inventory and the forest succession model ForClim we examined the development 71 typical stands under current and future climatic conditions (A2 emission scenario) with and without management, respectively. The simulations show a weak response until the middle of the century. In contrast, an increased sensitivity towards the end of the century becomes apparent, expressed by declines of basal area at lower elevations, respectively increases at higher elevations. The responses of forest stands are depending on site-specific characteristics. For example, Norway spruce is expected to decline up to higher elevations. Our results show an increase of deciduous tree species in higher elevation zones, particularly if management is applied. The impacts of climate change on important forest ecosystem services vary along a bioclimatic elevation gradient. Thereby, current forest management shows approaches how to at least partly counteract adverse effects of climate change. However, target- and site-specific strategies are needed and, particularly with regard to lower elevations, more knowledge on the potential of tree species to adapt is required.