

Modellierung der Vegetationshöhenstufen und der Areale von Buche und Tanne für die Schweiz

Barbara Huber
Päivi Gubelmann
Andreas Zischg
Sabine Augustin
Monika Frehner

Abenis AG (CH)*
Abenis AG (CH)
Geographisches Institut, Oeschger Zentrum für Klimaforschung, Universität Bern (CH)
Bundesamt für Umwelt, BAFU (CH)
Forstingenieurbüro Frehner (CH)

Modellierung der Vegetationshöhenstufen und der Areale von Buche und Tanne für die Schweiz

Die Vegetationshöhenstufen und die Verbreitungsareale von Buche und Tanne sind in der Schweiz eine zentrale Grundlage für die Klassifizierung der Waldstandorte mit dem Ökogrammansatz und damit für standortbezogene Empfehlungen bezüglich Baumartenwahl und Waldbau. Ihre Grenzen, die massgeblich von klimatischen Faktoren beeinflusst werden, waren bislang nur qualitativ bestimmt. Will man die Ökogramme und Baumartenempfehlungen auch künftig unter geänderten klimatischen Bedingungen verwenden, so müssen sie quantitativ beschrieben sein, damit sie mithilfe von Klimaszenarien für die Zukunft modelliert werden können. Mit hoch aufgelösten schweizweiten Karten walddrelevanter Klimaparameter und unter Berücksichtigung weiterer wichtiger Standortfaktoren konnten diejenigen Parameter ermittelt werden, die für die heutigen Grenzen der Vegetationshöhenstufen sowie der Areale von Buche und Tanne bestimmend sind. Die Höhenstufengrenzen wurden mithilfe von linearen Regressionen zwischen der Position von repräsentativen Höhenstufengrenzen und den zugehörigen klimatischen Faktoren, die Arealgrenzen hingegen mit einem auf der «fuzzy logic» beruhenden Ansatz modelliert. Die Klimaparameter wurden mittels des Klima-(Emissions-)Szenarios A1B (Modelle RegCM3 und CLM) für den Zeitraum 2070–2099 berechnet, sodass die Höhenstufen- und Arealgrenzen für die Zukunft modelliert werden konnten. Die Ergebnisse der Modellierungen sind ökologisch plausibel. Dies zeigte sich im Vergleich mit den Standorttypen auf den Probeflächen des Landesforstinventars und bei einer Begutachtung durch Experten. Die erarbeiteten Vegetations- und Klimakarten sowie die modellierten Projektionen der Vegetationshöhenstufen in die Zukunft sind die Grundlage für die Berücksichtigung des Klimawandels bei der Baumartenwahl. Sie können Waldbewirtschaftern und Waldbehörden als Entscheidungshilfe für die mit vielen Unsicherheiten konfrontierte waldbauliche Planung dienen.

Keywords: vegetation belts, distribution area of beech and silver fir, expert system approach, climate maps, climate change

doi: 10.3188/szf.2019.0326

* Quaderstrasse 7, CH-7000 Chur, E-Mail b.huber@abenis.ch

Der Klimawandel ist für die forstliche Planung und die waldbauliche Tätigkeit zunehmend eine Herausforderung. Denn bei der Waldverjüngung und der Jungwaldpflege müssen Baumarten gefördert werden, die nicht nur im heutigen, sondern auch im zukünftigen Klima gedeihen können. Bei der Bereitstellung von Entscheidungsgrundlagen zur standortgerechten Baumartenwahl im Klimawandel werden in Europa in Abhängigkeit der verfügbaren Datengrundlagen und der Bedürfnisse der Praxis verschiedene Ansätze verfolgt. Im Projekt «Waldinformationssysteme Nordalpen» (WINALP) wurden beispielsweise neue Waldtypenkarten für alpine Gebiete erarbeitet, die Klima, Basenhaushalt und Wasserangebot als wichtigste Eingangsgrössen beinhalten (Reger & Ewald 2011, Reger et al 2014).

Ergänzend wurden Listen mit «Bäumen für die Zukunft» bereitgestellt (Taeger & Kölling 2016). Ein anschliessender Vergleich mit Forstinventurdaten bestätigte prinzipiell die Validität des Vorgehens (Klemmt & Ewald 2011).

In der Schweiz werden Baumartenentscheide auf Bestandesebene vorwiegend auf der Grundlage von Ökogrammen getroffen (Burnand et al 1999, Frey 1995). Die Ökogramme geben Auskunft über die Ansprüche der verschiedenen Waldgesellschaften an die Bodenreaktion (sauer–basisch) und an das Wasserangebot. Die Ökogramme sind nur für bioklimatisch ähnliche Regionen gültig, in Bergregionen sind dies vorwiegend die Vegetationshöhenstufen. Die sich mit der Höhe ändernden klimatischen Randbedingungen wurden schon von von Hum-



Abb 1 Waldföhrenbestand bei Viano (Brusio, GR), der sich in einen Laubwald entwickelt.

Foto: Monika Frehner

boldt & Bonpland (1805) als ordnendes Prinzip für die Vegetationseinheiten erkannt und beschrieben. Bislang wurden die Vegetationshöhenstufen gutachtlich nach dem ökologischen Verhalten verschiedener Baumarten und nach bestandesstrukturellen Merkmalen (Frehner et al 2005, 2009) und nicht aufgrund von Klimaparametern bestimmt. Das ökologische Verhalten meint dabei den Wuchs, den eine Baumart auf einem Standort bei den dort herrschenden Konkurrenz- und Klimabedingungen realisiert (s. auch Ellenberg 1996). Um den Ökogrammansatz klimawandeltauglich zu machen, wurden die Höhenstufengrenzen sowie die Arealgrenzen von Buche und Tanne innerhalb der Standortregionen, wie sie in der Wegleitung «Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald» (NaiS; Frehner et al 2005, 2009) verwendet werden, mit Klima- und Standortparametern beschrieben und modelliert. Die Idee der verschiedenen Tannenareale basiert auf Frey (2003). Die Grenze zwischen Tannen-Nebenareal und Tannen-Reliktareal wird benötigt, um entscheiden zu können, ob in der hochmontanen Stufe der nördlichen und südlichen Zwischenalpen das Ökogramm «Hochmontan, Nebenareal der Tanne» (Tannen-Fichtenwälder) oder «Hochmontan, Reliktareal der Tanne» (Fichtenwälder) verwendet werden soll. Zudem unterscheiden sich in den NaiS-Anforderungsprofilen (Frehner et al 2005) die Baumartempfehlungen bei einigen Standorttypen je nach Zugehörigkeit zu den Tannenarealen. Im Folgenden werden die Daten, Methoden, Ergebnisse und wichtigsten ökologisch relevanten Folgerungen der Modellierung vorgestellt (Huber et al 2015a, Gubelmann et al 2019). Der Fokus wird dabei auf die Methode zur Erstellung der schweizweiten Karten der heutigen und zukünftigen Vegetationshöhenstufen gelegt. Diese Karten sind auf dem Kartenportal des Bundes einsehbar.¹

Verwendete Daten

Erstellung räumlich hoch aufgelöster Klimakarten

Um den Einfluss von Klimafaktoren auf die Höhenstufen- und Arealgrenzen eruieren und diese später modellieren zu können, mussten dieselben zuerst in sehr hoher räumlicher Auflösung berechnet werden. Verwendet wurde eine Auflösung von 25×25 m, was derjenigen des digitalen Geländemodells DHM25 von Swisstopo entspricht. Folgende Klimafaktoren wurden neu berechnet und kartiert: Lufttemperatur (inkl. Einfluss von Kaltluftseen, Firnflächen, Wasserflächen und Strahlung), thermische Kontinentalität, Globalstrahlung, relative Luftfeuchtigkeit, potenzielle Evapotranspiration, mittlerer erster und letzter Frosttag im Jahr und Dauer der frostfreien Vegetationsperiode. Zudem wurden Karten zum Föhneinfluss (Häufigkeit sowie Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit und potenzielle Evapotranspiration bei Föhnlagen) neu entwickelt (Huber et al 2015b). Die Niederschlagskarten wurden aus dem hydrologischen Atlas der Schweiz (Schwarb et al 2001a, 2001b) entnommen und auf die Zielauflösung gebracht. Das Verhältnis zwischen aktueller und potenzieller Evapotranspiration (ET_a/ET_p) und die Standortwasserbilanz (SWB) wurden von Remund (2016) erarbeitet und mithilfe unserer detaillierten Temperaturkarten für heute und für die Periode 2070–2099 berechnet. Basis aller Karten waren Klimadaten von MeteoSchweiz.

Die meisten Waldstandortkartierungen wurden vor dem Jahr 2000 durchgeführt. Deshalb wurde wo möglich die Periode 1961–1990 für die Berechnung der Klimafaktoren verwendet. Für die Erarbeitung der Karten für die Luftfeuchtigkeit, die Verdunstung und den Wind mussten die Werte der Periode 1981–2010 eingesetzt werden, da diese Parameter vor 1981 nicht in geeigneter Stationsdichte gemessen worden waren. Wenn heute die Höhenstufen- und Arealgrenzen im Feld bestimmt werden, werden dazu die Baumarten im Baumholz verwendet. Diese Bäume haben einen grossen Teil ihres Lebens in einem Klima ähnlich dem der Periode 1961–1990 verbracht. Die heutige Krautschicht und die Baumarten in der Verjüngung hingegen haben sich im Klima der Periode 1981–2010 oder in einem noch wärmeren Klima entwickelt (Abbildung 1).

Neuberechnung der Klimakarten für die Periode 2070–2099

Zur Verschiebung der Areal- und Höhenstufengrenzen wurden die Klimaparameter für die Referenzperiode 1981–2010 sowie für zwei Klimazukunftskünfte in der Periode 2070–2099 berechnet. Dazu wurden zwei auf dem Emissionsszenario A1B (Meehl

¹ <https://s.geo.admin.ch/8197e5ba10> (19.8.2019)

Änderung	CLM («trockeneres» Klimamodell)		RegCM3 («weniger trockenes» Klimamodell)	
	Nord	Süd	Nord	Süd
Temperatur (°C)	+4.2	+4.3	+2.9	+3.2
Niederschlag (%)	-13.7	-26.0	+4.6	-8.0

Tab 1 Mit den Klimamodellen ECHAM5/CLM (MPI) und ECHAM5/RegCM3 (ICTP) modellierte Änderung von Temperatur und Niederschlag in der Periode 2070–2099 im Vergleich zur Periode 1981–2010, basierend auf dem Emissionsszenario A1B. Die Werte wurden für die Alpennordseite («Nord») und die Alpensüdseite («Süd») für die folgenden repräsentativen Standorte berechnet: Alpennordseite: Aarau (47.38°N/8.08°E/394 m); Alpensüdseite: Locarno (46.17°N/8.80°E/223 m). Quelle: Remund et al (2014)

et al 2007) beruhende Klimamodelle ausgewählt, ein «weniger trockenes» (ECHAM5/RegCM3 [ICTP]) und ein «trockeneres» (ECHAM5/CLM [MPI]; Tabelle 1). So sollte der Bereich der möglichen Klimaentwicklung innerhalb des Emissionsszenarios A1B abgebildet werden. Es wurde das Klima in der Zeitspanne 2070–2099 modelliert, da Bestände, die heute verjüngt werden, diese Zeitperiode noch erleben sollten (Frehner et al 2018a).

Für die Berechnungen wurden die saisonalen Temperatur- und Niederschlagsänderungen zwischen den beiden Perioden 1981–2010 und 2070–2099 aus Remund et al (2014) verwendet. So konnten neue Kartengrundlagen mit einer Auflösung von 25 × 25 m für die mittlere Lufttemperatur, die mittleren Höchstwerte der Lufttemperatur, die mittleren Tiefstwerte der Lufttemperatur, die Temperatur bei Föhnlagen (analog allen übrigen Temperaturen), der Niederschlag, die potenzielle Evapotranspiration und die potenzielle Evapotranspiration bei Föhn sowohl für die Periode 1981–2010 als auch für die Periode 2070–2099 geschaffen werden. Ebenfalls für die Zukunft berechnet wurden der mittlere erste bzw. letzte Frosttag im Jahr und die frostfreie Vegetationsdauer. Die Klimaparameter relative Luftfeuchtigkeit, Globalstrahlung, Föhnhäufigkeit und mittlere Windgeschwindigkeit wurden als zeitlich konstant angenommen, d.h., eine mögliche Veränderung dieser Parameter wurde nicht berücksichtigt. Dies vor allem deshalb, weil nicht bekannt ist, in welchem Ausmass sich diese Parameter ändern werden.

Weitere verwendete Standortinformationen

Um die bodenbildenden Substrate berücksichtigen zu können, wurden für die Modellierungen Informationen zur Lithologie aus dem Atlas der Schweiz² im Massstab 1:500 000 verwendet. Die 55 Einheiten der Lithologiekarte wurden zu den folgenden sieben Klassen zusammengefasst: 1) Sonstiges, 2) Kalke und Dolomite, 3) Flysch, 4) Gneise, 5) Granite, 6) Bündnerschiefer, 7) Peridotite und Serpentine. Je nach Fragestellung wurden diese Klassen noch weiter aggregiert, um eine genügende Anzahl im Feld kartierter Höhenstufengrenzen (Probleflächen) pro Klasse zu erhalten.

Methodischer Ansatz

Die Modellierung der Verschiebung von Höhen- und Arealgrenzen von Vegetationseinheiten in komplexer Orografie mit kleinräumig und regional erheblich variierenden Standorteigenschaften ist sehr anspruchsvoll. Häufig besteht gerade in solchen Gebieten ein Manko an Daten und empirischen Modellen (Lindner et al 2014), und globale oder kontinentale Modelle lassen sich, da sie zu stark vereinfachen, nicht verwenden. Dies erschwert eine flächendeckende und zugleich robuste Modellierung. Aus diesem Grund wurde ein dreistufiges Vorgehen gewählt. In einem ersten Schritt wurden die Abhängigkeiten der Höhenstufen von Klimaparametern analysiert und in einem iterativen Prozess ein empirisches Höhenstufenmodell abgeleitet. Dieses wurde qualitativ durch Experten kontrolliert und validiert. In einem zweiten Schritt wurde die Verbreitung der Hauptbaumarten Buche und Tanne analysiert. Um die horizontalen Klimagradianten eruiieren zu können – die Modellierung der Arealgrenzen beinhaltet im engeren Sinne nur das –, wurden die Faktoren, die sich aus Höhengradienten ergeben, von den Faktoren, die eine regionale, horizontale Differenzierung darstellen, abgetrennt. Aus den Faktoren der horizontalen regionalen Differenzierung wurden die Arealmodelle entwickelt. In einem dritten Schritt wurden beide Modellierungen kombiniert und daraus die Vegetationshöhenstufenkarte abgeleitet. Um mit den Herausforderungen einer ungenügenden Datenbasis umgehen zu können, wurde ein Expertensystemansatz (Zischg et al 2005, Staffler et al 2008) verfolgt. Die relevanten Klimaparameter wurden sowohl auf Basis einer Literaturrecherche als auch aufgrund der Befragung von lokalen Experten (Jacques Burnand und Gabriele Carraro) ausgewählt. Zusammen mit den Experten wurden Hypothesen dazu formuliert, welche Standortfaktoren und Klimaparameter für welche Höhen- bzw. Arealgrenze relevant sein könnten. Die erarbeiteten Modelle und ihre Ergebnisse wurden den Experten zur Überprüfung und Anpassung der Hypothesen vorgelegt. Sowohl bei den Höhenstufengrenzen als auch bei den Arealgrenzen basierten die ursprünglichen Modelle in den verschiedenen bioklimatischen Regionen auf leicht unterschiedlichen Parameterkombinationen. Die Experten prüften zunächst die Ergebnisse in den ihnen bekannten Regionen. Anschliessend wurden die passenden Parameterkombinationen ausgewählt, die für die Teilgebiete Jura, Nordschweiz ohne Jura und Südschweiz die besten Resultate zeigten. Auch diese wurden den Experten zur Validierung vorgelegt. Im Folgenden werden die so entstandenen Modelle beschrieben.

² www.atlasderschweiz.ch (19.8.2019)

Jura	Höhenstufen				
	Sub-alpin	Hoch-montan	Ober-montan	Unter-montan	Sub-montan
Verwendeter Temperaturparameter			T _{Jahr max}	T _{Jahr max}	T _{Jahr max}
Niederschlag April–August (mm)			○		
Niederschlag Juni–August (mm)				○	○
Thermische Kontinentalität im Jahr auf 1000 m (°C)			○	○	○
Globalstrahlung im Jahr (W/m ²)			●	●	●
ETa/ETp (dimensionslos)			●	●	●

Tab 2 Klimaparameter, die für die Modellierung der Höhenstufengrenzen in der Standortregion Jura verwendet wurden. Die ausgefüllten Kreise kennzeichnen jene Parameter, die sich gemäss Berechnungen und Expertenprüfung für die obere Begrenzung der Höhenstufen als entscheidend erwiesen haben. Die erste Zeile gibt den Temperaturparameter an, der für die entsprechende Höhenstufengrenze verwendet wurde.

Abkürzungen: ETa/ETp = Verhältnis der aktuellen zur potenziellen Evapotranspiration, T_{Juli max} = mittlerer Höchstwert der Lufttemperatur im Juli, T_{Jahr mean} = mittlere jährliche Lufttemperatur, T_{Jahr max} = mittlerer jährlicher Höchstwert der Lufttemperatur, T_{Jan max} = mittlerer Höchstwert der Lufttemperatur im Januar, T_{Abs min} = absoluter Temperaturtiefstwert.

Nordschweiz ohne Jura	Höhenstufen				
	Sub-alpin	Hoch-montan	Ober-montan	Unter-montan	Sub-montan
Verwendeter Temperaturparameter	T _{Juli max}	T _{Jahr mean}	T _{Jahr mean}	T _{Jahr mean}	T _{Jahr max}
Niederschlag Juni–August (mm)					●
Niederschlag April–August (mm)	○	○	○	○	
Thermische Kontinentalität im Jahr auf 1000 m (°C)					○
Thermische Kontinentalität im April auf 1400 m (°C)		●	○	○	
Thermische Kontinentalität im Jahr auf 2000 m (°C)	●				
Föhnhäufigkeit im Jahr (%)	○	○	●	●	
Globalstrahlung im Jahr (W/m ²)					●
Globalstrahlung im April (W/m ²)	●	●	●	●	
ETa/ETp (dimensionslos)			○	●	●

Tab 3 Klimaparameter, die für die Modellierung der Höhenstufengrenzen in der Nordschweiz ohne Jura, d.h. für die Standortregionen Mittelland, nördliche Randalpen, nördliche Zwischenalpen und kontinentale Hochalpen, verwendet wurden. Für Erklärungen s. Tabelle 2.

Südschweiz	Höhenstufen				
	Sub-alpin	Hoch-montan	Unter-/ober-montan	Kollin	Hyper-insubrisch
Verwendeter Temperaturparameter	T _{Juli max}	T _{Jahr mean}	T _{Jahr mean}	T _{Jan max}	T _{Abs min}
Thermische Kontinentalität im Jahr auf 2000 m (°C)	●				
Thermische Kontinentalität im April auf 1000 m (°C)		●	●		
Globalstrahlung im April (W/m ²)	●	●	●		
Globalstrahlung im Januar (W/m ²)				●	●
ETa/ETp (dimensionslos)				●	●

Tab 4 Klimaparameter, die für die Modellierung der Höhenstufengrenzen in der Südschweiz, d.h. für die Standortregionen südliche Zwischenalpen und südliche Randalpen, verwendet wurden. Für Erklärungen s. Tabelle 2.

Modellierung der Höhenstufengrenzen

Um die Zusammenhänge zwischen Klima und Höhenstufengrenze zu berechnen, wurden aus Nais-nahen kantonalen Waldstandortkartierungen an repräsentativen Stellen typische Höhenstufengrenzen als Probeflächen (Linien) ausgewählt und digitalisiert. Um eine repräsentative Verteilung der Probeflächen zu erhalten, wurden in Gebieten mit fehlender kantonaler Standortkartierung einzelne Höhenstufengrenzen von lokalen Experten neu kartiert und bestimmt. Für jeden Pixel der jeweiligen Probefläche (digitalisierte Höhenstufengrenze) wurden die Werte aller verwendeten Klimaparameter extrahiert. Dabei war wichtig, dass möglichst unabhängige Klimaparameter genommen wurden, um Scheinkorrelationen zu vermeiden. Danach wurde ein lineares Regressionsmodell auf Basis dieser Probeflächen erstellt, welches für jede der sieben Lithologieklassen die Temperatur an der Obergrenze einer Höhenstufe aus den verwendeten Klimaparametern berechnen konnte. Die Temperatur an jeder Höhenstufengrenze variiert regional leicht. Je nach Höhenstufe ist sie vor allem von der Globalstrahlung, dem ETa/ETp-Verhältnis, der thermischen Kontinentalität (Differenz zwischen den mittleren täglichen Tiefst- und Höchstständen der Temperatur eines bestimmten Monats) und dem Niederschlag abhängig (Tabellen 2–4).

Für jeden Pixel im Raster von 25 × 25 m auf der Schweizer Karte liefert die Regressionsgleichung einen Schwellenwert der Temperatur, der die Obergrenze der jeweiligen Höhenstufe am lokalen Standort beschreibt. Dieser Schwellenwert wird mit dem realen Temperaturwert aus der (heutigen) Temperaturkarte verglichen. Solange die reale Temperatur eines bestimmten Pixels höher ist als dessen berechneter Temperaturschwellenwert, gehört der Pixel zur Höhenstufe unterhalb der jeweiligen Obergrenze. Ist sie jedoch tiefer als der Temperaturschwellenwert, dann befindet sich der Pixel oberhalb der fraglichen Höhenstufengrenze. Auf diese Weise können die Höhenstufen flächig modelliert werden. Die untere Grenze einer Höhenstufe ist durch die modellierte Obergrenze der darunterliegenden Höhenstufe definiert. Die Obergrenze der ober-subalpinen Stufe bzw. die obere Waldgrenze wurde nicht untersucht. Um die Modellierungen nach oben einzugrenzen, wurde als Grenzwert eine mittlere maximale Temperatur im Juli von 12 °C gewählt. Für die Periode 2070–2099 fand eine moderate Anpassung des Wertes auf 11 °C statt, da an der oberen Waldgrenze neben der Temperatur noch weitere Faktoren verzögernd auf deren Ausdehnung in höhere Lagen wirken. Es erfolgte eine separate Berechnung für den Jura, die restlichen Standortregionen der Nordschweiz (Mittelland bis kontinentale Hochalpen) und die Südalpen (Tabellen 2–4).

Für die Berechnung der Höhenstufengrenzen für die beiden Klimazukünfte (RegCM3 und CLM)

Klimaparameter	Buchenareal	Tannen-Hauptareal	Tannen-Nebenareal	Kolline Stufe Nordschweiz (inkl. Jura)	
				Wallis und Graubünden	Übrige Nordschweiz
Föhnhäufigkeit im Jahr (%)	●	○	○		
Relative Luftfeuchtigkeit im Jahr (%)	●	○	○		
Niederschlagssumme Juni–August (mm)	●	○	○		○
Thermische Kontinentalität im Jahr auf 1000 m (°C)	○	●	●		
Thermische Kontinentalität im Juli auf 1000 m (°C)					○
ETa/ETp (dimensionslos)	○			●	●
Mittlerer letzter Frosttag (Tag im Jahr)	○	○	○		○
Frostfreie Vegetationsperiode (Anzahl Tage)		○	○		
Mittlerer Höchstwert der Lufttemperatur im Juli (°C)				●	●
Mittlerer Tiefstwert der Lufttemperatur im April (°C)				○	○
Globalstrahlung im Jahr (W/m ²)			○		○
Globalstrahlung im Juli (W/m ²)				●	
Mittlere potenzielle Evapotranspiration im Juli (mm)					○
Lithologieklassen (Anzahl verwendeter Klassen)	7	7	7	2	2
Gewählte Overlay-Methode	GAMMA (Wert 0.9)	GAMMA (Wert 0.9)	GAMMA (Wert 0.9)	AND	AND
Grenzwerte für binäre Areale	N: 0.65 S: 0.75	0.7	VS: 0.7 Süd: 0.65 GR/UR/SG: 0.82	0.21	0.07

Tab 5 Verwendete Klimaparameter und Lithologieklassen für die Modellierung der Arealgrenzen. Die ausgefüllten Kreise kennzeichnen jene Parameter, die sich gemäss Berechnungen und Expertenprüfung für die Begrenzung der Areale als entscheidend erwiesen haben.

wurden dieselben Regressionsgleichungen, aber mit den jeweiligen zukünftigen Klimaparametern verwendet. Weil die kolline Stufe in der Nordschweiz derzeit noch kaum vorkommt, sind nicht genügend Probeflächen vorhanden, um ihre Grenze mit dem Regressionsansatz zu ermitteln. Es musste daher ein anderes Vorgehen gefunden werden. Gewählt wurde das gleiche wie bei der Bestimmung der Arealgrenzen (s. unten).

Modellierung der Arealgrenzen

Für die Bestimmung der Grenzen des Buchenareals sowie derjenigen zwischen den Tannenarealen (Haupt-, Neben- und Reliktareal) wurden schweizweite Arealmodelle auf Basis des Ansatzes der «fuzzy logic» (Zadeh 1978) entwickelt (Tabelle 5). Dieser Ansatz bietet insbesondere die Möglichkeit, unscharfe Übergänge abzubilden. Auch für die Obergrenze der kollinen Stufe (eichendominierten Stufe) in der Nordschweiz wurde dieser Ansatz gewählt, wobei ein Modell für die Kantone Wallis und Graubünden und ein zweites für die übrige Nordschweiz entwickelt wurde.

Als Grundlage für die Entwicklung der Arealmodelle wurde bei Buche und Tanne die Karte der Standortregionen gemäss NaiS (Frehner et al 2005) verwendet. Für die Modellierungen des Buchenareals sowie des Haupt- und des Nebenareals der Tanne wurden jeweils die Höhenbereiche der hauptsächlichen heutigen Verbreitungen dieser Baumarten als Grundlage für die Eichung verwendet. Die darin ent-

haltenen Grenzen mussten mit Daten aus Bestandeskarten und aufgrund von Lokalwissen verfeinert sowie an die topografischen Gegebenheiten angepasst werden. Beim Arealmodell für die kolline Stufe bildeten dagegen von Experten ausgewählte, repräsentative Probeflächen aus den Kantonen Basel-Stadt/Basel-Landschaft, Schaffhausen, Genf, Waadt, Wallis und Graubünden die Grundlage. Zudem wurden im Wallis das Flaumeichenareal und in Graubünden die Rebbaugelände zur kollinen Stufe gezählt. Bei der Modellierung der Buchen- und Tannenarealgrenzen wurden die Modelle jeweils für sieben verschiedene lithologische Klassen separat gerechnet, bei der kollinen Stufe wurden diese sieben Klassen zu zwei Klassen zusammengefasst (Tabelle 5).

In Huber et al (2015a) wurde aufgezeigt, dass die Arealgrenzen von Buche, Tanne und Flaumeiche sowie der kollinen Höhenstufe von vielen Faktoren abhängig sind, deren Bedeutung regional aber unterschiedlich sein kann. Dies bedeutet, dass bei einem überregionalen Modell die Faktorenkombination ein grösseres Gewicht als die einzelnen Faktoren haben muss. Zudem weisen die Areale anders als in der Karte der Standortregionen (Frehner et al 2009) in der Natur keine scharfen Grenzen, sondern fließende Übergänge auf. Es hat sich gezeigt, dass der Ansatz der «fuzzy logic» es ermöglicht, sehr unterschiedliche Klimaparameterkombinationen in einem Arealmodell zu berücksichtigen, was die Abbildung der regionalen Variabilität sehr erleichtert.

Standortregionen Nordschweiz	Modellierte Höhenstufen	Modelliertes Areal		Definitive Vegetationshöhenstufe
		Buche	Kolline Stufe	
Jura, Mittelland, nördliche Randalpen, nördliche Zwischenalpen mit Buche	submontan, untermontan, obermontan	nein	n.b.	kollin
Nördliche Zwischenalpen ohne Buche, kontinentale Hochalpen	submontan, untermontan, obermontan	nein	ja	kollin
		nein	nein	hochmontan

Tab 6 Ableitung der Vegetationshöhenstufenkarte für die Nordschweiz aus der Kombination von Höhenstufenmodellierung und Arealmodellierung für die Buche und die kolline Stufe. n.b.: nicht berücksichtigt. Die in der Tabelle nicht aufgeführten Vegetationshöhenstufen konnten direkt aus der Höhenstufenmodellierung abgeleitet werden (z.B. subalpin).

Standortregionen Südschweiz	Modellierte Höhenstufen	Modelliertes Buchenareal	Definitive Vegetationshöhenstufe
Südliche Zwischenalpen, südliche Randalpen	unter-/obermontan	ja	unter-/obermontan
		nein	hochmontan
	kollin	nein	kollin ¹⁾
		ja	kollin mit Buche
	hyperinsubrisch	ja	hyperinsubrisch
		nein	kollin ¹⁾

Tab 7 Ableitung der Vegetationshöhenstufenkarte für die Südschweiz aus der Kombination von Höhenstufenmodellierung und Arealmodellierung für die Buche. Die in der Tabelle nicht aufgeführten Vegetationshöhenstufen konnten direkt aus der Höhenstufenmodellierung abgeleitet werden (z.B. subalpin). 1) ohne Buche.

Ableitung der Vegetationshöhenstufenkarte

Durch die Kombination der Höhenstufen- und der Arealmodelle wurde die Vegetationshöhenstufenkarte für die Schweiz hergeleitet.

Dabei wurden in der Nordschweiz die modellierten Höhenstufen submontan, untermontan und obermontan einer anderen Stufe zugewiesen, wenn sie sich ausserhalb des modellierten Buchenareals befanden. In den Standortregionen Jura, Mittelland, nördliche Randalpen und nördliche Zwischenalpen wurden sie zur kollinen Stufe gezählt. In den nördlichen Zwischenalpen ohne Buche und in den kontinentalen Hochalpen wurden sie dagegen in Abhängigkeit der modellierten kollinen Stufe entweder der kollinen oder der hochmontanen Stufe zugeordnet (Tabelle 6).

In der Südschweiz wurden auf Grundlage des Buchenareals die Stufen «kollin» und «kollin mit Buche» unterschieden. Ausserdem wurde innerhalb des Buchenareals die Stufe unter-/obermontan gebildet, während diese Stufe ausserhalb des Buchenareals zur hochmontanen Stufe gezählt wurde. Die hyperinsubrische Stufe kann nur innerhalb des Buchenareals vorkommen (Tabelle 7).

Alle Vegetationshöhenstufen, die in den Tabellen 6 und 7 nicht erwähnt werden, wurden unverändert von den Höhenstufenmodellen übernommen. Die hochmontane Stufe wurde zudem weiter unterteilt in die drei Klassen Tannen-Hauptareal,

Tannen-Nebenareal und Tannen-Reliktareal (gemäss Frey 2003).

Validierung der Modellergebnisse

Zur Validierung der Ergebnisse wurde die Vegetationshöhenstufenkarte mit den Höhenstufen, wie sie auf den Probeflächen des Landesforstinventars (LFI) im Rahmen des Projekts «NaiS-LFI» von Arge Frehner et al (im Druck) angesprochen worden waren, verglichen.

Die modellierten Höhenstufengrenzen wurden ausserdem mehrmals von Experten (Jacques Burnand, Gabriele Carraro, Berchthold Wasser, Hans-Ulrich Frey, Monika Frehner) kontrolliert. Die modellierten Areale von Buche und Tanne wurden in Frehner et al (2017) mit der aktuellen Verbreitung der Baumarten auf den LFI-Probeflächen sowie mit den Modellierungen von Zimmermann et al (2016) und Bircher et al (2016) verglichen.

Resultate

Modellierte Vegetationshöhenstufen

Die Mehrheit der Höhenstufen wird hauptsächlich durch die Wärme begrenzt und ist entsprechend vor allem von Temperatur, Strahlung und thermischer Kontinentalität abhängig. Die Feuchte ist hingegen für das Vorkommen der Baumarten innerhalb der Höhenstufen entscheidend. Zum Beispiel kann die hochmontane Stufe im sehr trockenen Wallis mehrheitlich durch Waldföhren und Fichten, in den niederschlagsreichen Nordalpen dagegen mehrheitlich durch Fichten und Tannen aufgebaut sein. Bei der subalpinen Stufe korrelierte in unserer Untersuchung der mittlere Höchstwert der Temperatur im Juli am besten mit der Höhenstufenobergrenze, in der untermontanen bis zur hochmontanen Höhenstufe war es (ausser im Jura) die mittlere Jahrestemperatur und in den tiefen Lagen der Nordschweiz der mittlere Temperaturhöchstwert im Jahr, der mit der Obergrenze korrelierte. Im Gelände beobachtet werden kann, dass die Obergrenze einiger Vegetationshöhenstufen mit zunehmender Kontinentalität und zunehmendem Massenerhebungseffekt vom nördlichen und südlichen Rand der Alpen zu deren Zentrum hin ansteigt. Deshalb sind auch die in den Kantonen St. Gallen und Appenzell Ausserrhoden eruierten Werte für die Höhenstufengrenzen nicht 1:1 auf den Kanton Graubünden übertragbar. Hier sind die hohe Kontinentalität, die starken Frost- und Föhneinflüsse sowie die hohe Strahlung entscheidende Faktoren für die Begrenzung der Höhenstufen. Durch Berücksichtigung dieser Faktoren in den Höhenstufenmodellen (Regressionsgleichungen) der Nordschweiz (ohne Jura) konnte den regionalen Unterschieden Rechnung getragen werden.

- Vegetationshöhenstufe stimmt mit Ansprache NaiS-LFI überein
- Vegetationshöhenstufe weicht ab, liegt aber im Bereich von ± 30 m der Höhenstufengrenze
- Vegetationshöhenstufe weicht ab

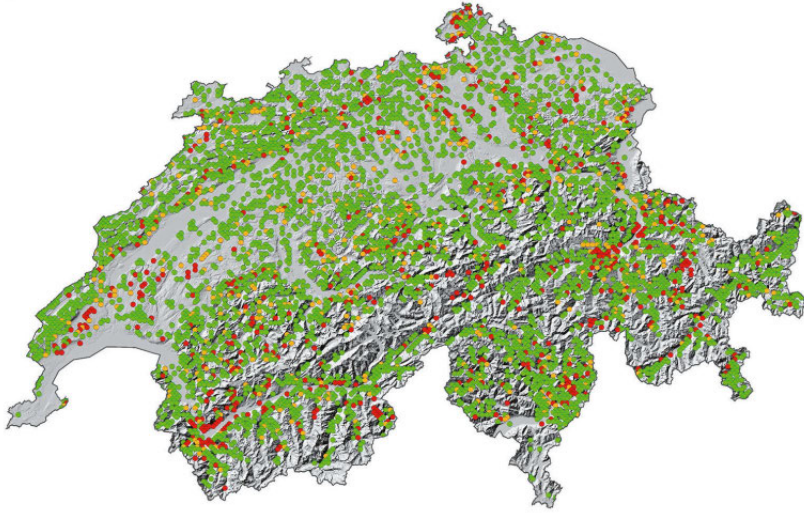


Abb 2 Kontrolle der Vegetationshöhenstufenkarte (für das heutige Klima modelliert) mit den Höhenangaben auf den NaiS-LFI-Probeflächen (Arge Frehner et al, im Druck). Kartenhintergrund: hillshade (dhm25), Swisstopo, Stand 2019

Die Kontrolle der Vegetationshöhenstufenkarte (Kombination aus Höhenstufen- und Arealmodellen) mit den Höhenangaben der NaiS-LFI-Probeflächen ergab durchweg gute Resultate (Abbildung 2). Bei über 90% der über 6000 Flächen stimmte die Höhenstufe überein, oder die Abweichung betrug höchstens ± 30 Höhenmeter. Wie weiterführende visuelle Kontrollen durch Experten zeigten, weist die Zuordnung an etwa 25 Orten in der Nordschweiz und an 6 Orten im Tessin und im Misox gröbere Fehler auf (siehe Gubelmann et al 2019, Anhang 8.3).

Der Vergleich der Modellierungen für heutiges und künftiges Klima zeigte in allen Regionen

deutlich, dass die meisten heutigen Vegetationshöhenstufen künftig um mehr als eine Höhenstufe verschoben werden. Dies vor allem bei der «trockeneren» Klimazukunft (CLM-Modell; Abbildung 3). Die Modellierungen mit den Klimazukünften RegCM3 und CLM können nicht empirisch überprüft werden. Da aber die Plausibilisierung der Modellergebnisse für heutige Verhältnisse mit dem unabhängigen Datensatz der NaiS-LFI-Probeflächen erfolgreich war, ist davon auszugehen, dass die Projektion in die Zukunft verlässlich ist. Bei den Resultaten wird vor allem auf das CLM-Modell eingegangen, da dieses inzwischen als das realistischere Szenario erscheint.

Modellierung des Buchenareals

Die Arealmodellierung bildet das heutige Buchenareal relativ gut ab, grössere Abweichungen zur Realität bestehen vor allem im Calancatal, südlich von Amsteg und in der Surselva.

Wenn die für die Modellierung verwendeten Klimaparameter einzeln betrachtet werden, korreliert keiner in allen Regionen der Schweiz gleich gut mit dem Buchenareal. Regional bestehen hingegen gute Übereinstimmungen mit gewissen Klimaparametern, welche begrenzend für die Buche wirken können. So scheint die Verbreitung der Buche (v.a. in Graubünden, Uri und in den Südalpen) stark von der Lufttrockenheit abhängig zu sein. Diese wird vor allem durch die Föhnhäufigkeit gesteigert. So ist es sehr wahrscheinlich, dass das Fehlen der Buche im Bergell, im mittleren und oberen Misox sowie im Calancatal hauptsächlich auf den Nordföhn zurückzuführen ist. Eine jährliche Föhnhäufigkeit von mehr als etwa 13% scheint die Buche im Allgemeinen auszuschliessen, auch wenn die übrigen Faktoren für die Buche günstig wären (Huber et al 2015a).

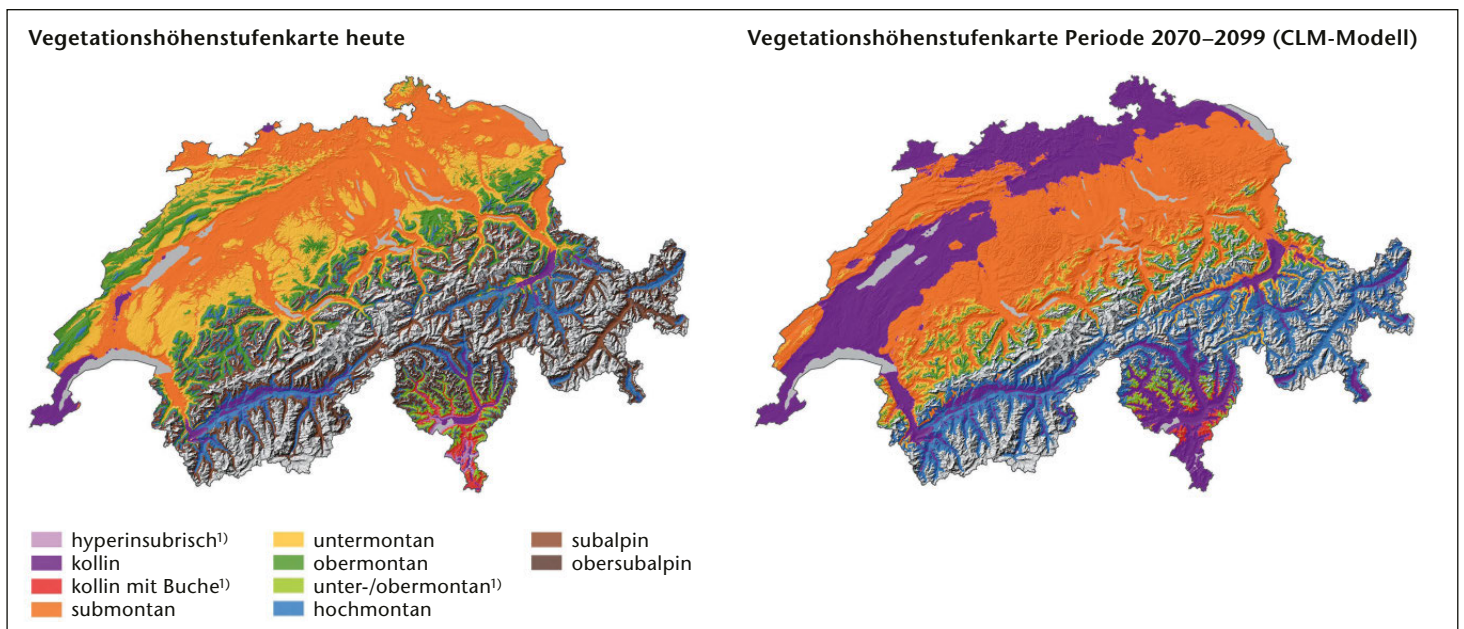


Abb 3 Vegetationshöhenstufenkarte heute (links) und in der Periode 2070–2099 für die trockenere Klimazukunft (CLM-Modell; rechts). 1) nur in der Südschweiz vorkommende Vegetationshöhenstufen. Kartenhintergrund: hillshade (dhm25), Swisstopo, Stand 2019

Ebenfalls wesentlich ist der Sommerniederschlag, vor allem im Wallis. Hier zeigte sich, dass dort, wo der Sommerniederschlag in warmen Gebieten unter etwa 250 bis 300 mm fällt, die Buche unabhängig von den anderen Faktoren aussetzt (Huber et al 2015a). In geringerem Masse scheinen die Spätfrostgefahr (v.a. in Kaltluftseen) und das ETa/ETp-Verhältnis mitzuwirken.

Die Modellierung mit der trockeneren Klimazukunft (CLM-Modell) weist für die Periode 2070–2099 im westlichen und im nördlichen Mittelland grossflächig nur noch eine sehr beschränkte Habitateignung für die Buche aus. Die Buche wird dort nur noch auf frischen und feuchten Standorten als mögliche Mischbaumart erwartet. Kombiniert mit den Höhenstufenmodellen erfolgt eine starke Höhengausdehnung der Buche, was zu einer grossflächigen Zunahme in den Voralpen, im Jura, in Nordbünden und in geringerem Masse im Tessin führen kann.

Modellierung der Tannenareale

Auch die Modellierung der Tannenareale ergab gute Resultate. Am meisten Abweichungen gegenüber der Realität traten in kleineren Seitentälern auf, dies vermutlich auch deshalb, weil lokale, kleine Kaltluftseen bei der Erstellung der Temperaturkarte nicht berücksichtigt wurden.

Für die Modellgrenze Hauptareal-Nebenareal sind eingangs des Wallis bei St-Maurice die thermische Kontinentalität, die Niederschlagssumme in den Monaten Juni bis August und die relative Luftfeuchtigkeit entscheidend. Im Kanton Graubünden, im Taminatal und in der Leventina sind es die thermische Kontinentalität, die relative Luftfeuchtigkeit und die Föhnhäufigkeit. Der Übergang vom Haupt- zum Nebenareal liegt generell im Bereich einer jährlichen thermischen Kontinentalität auf 1000 m ü.M. von 3.5–4.0 °C, auch wenn die übrigen Faktoren noch günstig sind (Huber et al 2015a).

Bei der Grenze Nebenareal-Reliktareal wirkt nach den Modellen im Oberwallis, im Bedrettal und im Engadin vor allem die thermische Kontinentalität begrenzend. Dazu kommen im Wallis und im Puschlav der Sommerniederschlag und die Luftfeuchtigkeit und an den Südhängen des Wallis eventuell die Globalstrahlung, die allerdings mit einer Zunahme der thermischen Kontinentalität einhergeht. Ein Südhang heizt sich tagsüber wegen der hohen Globalstrahlung stärker auf als ein West- oder Osthang und noch stärker als ein Nordhang, wobei im Winterhalbjahr der Unterschied zwischen sonnigem Südhang und schattigem Nordhang bei wolkenlosem Wetter bis 4 °C betragen kann (Volken 2008; in der Region Visp). Im Jahresmittel weist ein sonniger Südhang etwa eine um 1 °C höhere thermische Kontinentalität auf als ein Nordhang.³ Wenn die thermische Kontinentalität auf 1000 m ü.M. 5 °C überschreitet, scheint die Tanne, unabhängig von

anderen Faktoren, nur noch Reliktbestände aufzuweisen. Auch der Föhn (und somit die Luftfeuchtigkeit) spielt in gewissen Regionen eine wesentliche Rolle. In den oberen Tälern der Alpensüdseite scheint eine jährliche Föhnhäufigkeit von 12–15% die Tanne so weit zu benachteiligen, dass sie sich auf Nordhänge, tiefgründige Böden und Ähnliches zurückzieht. Weil dort eine grosse Föhnhäufigkeit und eine relativ hohe thermische Kontinentalität zusammen auftreten, ist es schwierig zu entscheiden, welcher der beiden Faktoren ausschlaggebend ist.

Kombiniert mit dem Höhenstufenmodell wird bei der trockeneren Klimazukunft (CLM-Modell) in der Periode 2070–2099 die hochmontane Stufe – die entscheidende Stufe bei den Tannenarealen – in die Höhe geschoben. In den Regionen, die heute im Tannen-Hauptareal liegen, wird für die Periode 2070–2099 weiterhin das Hauptareal modelliert. In den Regionen, die heute im Nebenareal liegen, wird zum Teil weiterhin das Nebenareal, aber vor allem in tiefen Lagen zum Teil auch das Reliktareal modelliert. In den Regionen, wo es heute Reliktareal oder noch keine hochmontane Stufe hat, wird für die Periode 2070–2099 neben dem Reliktareal teilweise in den höheren Lagen ein Band mit Nebenareal oder sogar Hauptareal modelliert.

Modellierung der kollinen Stufe

Die für heutige klimatische Verhältnisse modellierte kolline Stufe weist einige kleinere Abweichungen zu den Eichungsdatensätzen auf: So werden beim Genfersee sowie in den Kantonen Basel-Stadt, Basel-Landschaft und Aargau leicht grössere Gebiete modelliert. Im Wallis zeigt das Modell in den Südtälern und am Nordhang zwischen Leuk und Brig sowie im Goms ebenfalls eine leicht grössere Ausdehnung. Im Kanton Graubünden weist das Modell zusätzlich kleine Gebiete im Prättigau und in der Rheinschlucht, im Albulatal und im Schams auf.

Es ist relativ schwierig, die kolline Stufe realitätsnah zu modellieren. So hat zum Beispiel das Unterengadin eine sehr hohe Maximaltemperatur im Juli und eine hohe Globalstrahlung, was ein Höhersteigen der Eiche und der kollinen Stufe erlauben würde. Auch ist das ETa/ETp-Verhältnis klein, was die Eiche gegenüber der Buche begünstigt. All diese Faktoren würden die kolline Stufe fördern. Die Eiche ist wohl sehr trockenheitstolerant (v.a. die Flaumeiche, aber auch die Traubeneiche), aber eben auch sehr frostempfindlich. Dies bedeutet, dass die Eiche in nicht allzu frostreichen Lagen bei zunehmender Kontinentalität zwar die Buche ablöst, bei allzu grosser Frosthäufigkeit (und evtl. Winterkälte) aber ebenfalls aussteigt und der Waldföhre oder manch-

³ Die Karte der thermischen Kontinentalität bezieht sich auf neutrale Lagen wie Osthänge, Westhänge oder flache Standorte.

mal auch der Zitterpappel Platz macht. Diese Gebiete sind Teil der hochmontanen Stufe, weshalb die hochmontane Stufe in den Regionen ohne Buche deutlich weiter hinunterreicht als in den Regionen mit Buche. Zu beobachten ist dies zum Beispiel im Unterengadin, im Schams, im mittleren Goms und in der oberen Leventina.

Entscheidend bei der Modellierung der Grenzen der kollinen Stufe in allen Gebieten der Nordschweiz wirken der mittlere Höchststand des Tagesganges der Temperatur im Juli und in geringerem Masse das ET_a/ET_p -Verhältnis. In den Kantonen Genf, Basel-Stadt, Basel-Landschaft und Schaffhausen scheinen zusätzlich der Sommerniederschlag und die mittlere potenzielle Evapotranspiration im Juli eine Rolle zu spielen.

Die Modellierung der kollinen Stufe mit der trockeneren Klimazukunft (CLM-Modell) führt zu markanten Gebietsvergrößerungen (horizontal und vertikal) im westlichen und im östlichen Mittelland, im Wallis, in der Surselva, in Mittelbünden und im Prättigau. Neu würden auch die tiefsten Lagen im Münstertal und im Unterengadin der kollinen Stufe zugerechnet. Auf der Alpennordseite sowie in den Kantonen Wallis und Graubünden würde dies bedeuten, dass Buche, Fichte und Tanne in Zukunft nur noch auf besonders gut wasserversorgten Standorten innerhalb der neuen kollinen Stufe vorkämen, sie also auf einem grossen Teil der Fläche ausfielen.

Diskussion

Methodisches Vorgehen

Die Modellierung der bislang gutachterlich gezogenen Grenzen der Höhenstufen und der Areale von Buche und Tanne mit vorwiegend klimatischen Parametern ist die Grundlage für die Verwendung der Ökogramme in der forstlichen Praxis zur Herleitung von Baumartenempfehlungen im Klimawandel (Frehner & Zürcher-Gasser 2019). Bei der Ausbildung der Vegetationshöhenstufen wirken stets mehrere Faktoren zusammen, die den «Klimacharakter» eines Ortes abbilden (s. dazu Ellenberg 1996). Dies wurde in der vorliegenden Arbeit berücksichtigt, indem die Grenzen jeweils mit einer Kombination verschiedener klimatischer Parameter auf Basis eines Expertensystemansatzes beschrieben wurden. Expertensystemansätze, in denen Expertenwissen (Fracek & Mosimann 2013) zum Teil mit eigens dafür entwickelten Modellen (z.B. «fuzzy logic») verarbeitet wird (Zischg et al 2005, Staffler et al 2008), werden bei ökologischen Fragestellungen häufig eingesetzt. Die klimatischen Grundlagen für die Modellierungen waren die über die Periode 1961–1990 (bei den Karten für die Luftfeuchtigkeit, die Verdunstung und den Wind die Periode 1981–2010) gemittelten Jahres- und Monatswerte (zum Teil für die Vegetati-

onsperiode aggregiert). Diese reflektieren die langjährig am Standort wirkenden Klimaverhältnisse, die die Höhenzonierung der Vegetation bestimmen. Der methodische Ansatz war somit der Fragestellung angemessen. Die Modellierungen erwiesen sich als zuverlässig, wie der Vergleich mit Arge Frehner et al (im Druck) zeigte.

Für die Arealgrenzen entscheidende Klimaparameter

Die Grenzen der Vegetationshöhenstufen waren in den höheren Lagen vorwiegend von der thermischen Kontinentalität und den Frühjahrswerten der Globalstrahlung bestimmt, in den tieferen Lagen waren es die jährliche Globalstrahlung, das ET_a/ET_p -Verhältnis in der Vegetationszeit und die sommerlichen Niederschläge. Dies reflektiert die Tatsache, dass in höheren Lagen die Vegetationszeit kurz ist und folglich die Wachstumsbedingungen in einem kleinen Zeitfenster entscheidend sind. Im Jura, wo die Wasserspeicherkapazität der Böden meist sehr gering ist, wurde die jährliche Globalstrahlung als besonders wichtiger Faktor erkannt. Die Kombination von geringer Wasserverfügbarkeit und hoher jährlicher Strahlung begrenzt das Vorkommen der Buche entscheidend zugunsten der Flaumeiche (Reif et al 2017).

Die Begrenzung des Buchenareals vorwiegend durch Föhnhäufigkeit und Luftfeuchtigkeit ist in Übereinstimmung mit den ökophysiologischen Eigenschaften der Buche (u.a. Lenzion & Leuschner 2008). Künftig ist mit einer Zunahme der Lufttrockenheit zu rechnen (Ficklin & Novack 2017), wodurch diese in weiten Teilen der Schweiz zu einem wichtigen Co-Faktor der Baumartenverbreitung werden könnte.

Höhenstufen und Arealgrenzen unter dem Klimawandel

Die klimatische Charakterisierung der Grenzen der Höhenstufen und Areale ermöglichte anschliessend ihre Projektion in die Zukunft (2070–2099) mit dem Klimaszenario A1B. Die neuen Klimaszenarien CH2018 (NCCS 2018), vor allem das RCP8.5, stimmen eher mit der trockeneren (CLM-Modell) als mit der weniger trockenen Realisierung (RegCM3-Modell) überein. Dies ist in Übereinstimmung mit den gemessenen und beobachteten Trends der letzten Jahre (u.a. Rigling et al 2012, Remund & Augustin 2015, Raspe et al 2016, Braun et al 2018). Die Modellierungen mit dem CLM-Modell zeigen, dass sich die klimatischen Bedingungen für die Baumarten in vielen Gebieten so stark verändern, dass es zum Teil fraglich ist, ob eine einfache «Verschiebung» der Areale noch sinnvoll ist. Eine Verschiebung impliziert, dass das neue Areal klimatisch weitgehend wie das bekannte Ausgangsareal charakterisiert ist, womit auch die darin potenziell vorkom-

menden Waldgesellschaften den heutigen mehr oder weniger entsprechen müssten. Zumindest für die künftige kolline Stufe im Mittelland ist das nicht sicher. Bei der künftigen kollinen Stufe muss auch damit gerechnet werden, dass sie aus mehreren klimatisch unterscheidbaren biogeografischen (Unter-)Einheiten bestehen wird. Für die Baumartenwahl fehlen in der Schweiz die Referenzgebiete mit der künftig möglichen Baumartenzusammensetzung. Deshalb erfolgte eine Orientierung an Gebieten in Europa, die heute das Klima aufweisen, das gegen Ende des Jahrhunderts im Mittelland erwartet wird (Huber et al 2017). Die Ergebnisse von Exkursionen nach Südfrankreich (Allgaier Leuch et al 2017) und in die Toskana (Frehner et al 2018b) bestätigen prinzipiell die Baumartenempfehlungen für die kolline Stufe der Regionen Mittelland, Jura und nördliche Randalpen (Frehner & Zürcher-Gasser 2019), die vor allem heute in der Schweiz vorkommende Baumarten, aber auch einige in der Schweiz noch nicht vorkommende enthalten.

Der Boden konnte im Modell nur über Klassen der lithologischen Einheiten der Ausgangsgesteine berücksichtigt werden. Diese haben einen Bezug zur potenziellen Wasserspeicherung am Standort (Renger et al 2008) sowie zur Nährstoffnachlieferung durch Verwitterung. Für die Zielsetzung «Modellierung der Grenzen der Vegetationshöhenstufen», also von grossen Raumausschnitten, ist der hier gewählte Ansatz über die Lithologie angemessen. Für die Baumartenwahl wären aber genauere Angaben zur Nährstoffverfügbarkeit wünschenswert, da die klimatische Trockenheitsgrenze der Baumarten auch vom Bodennährstoffstatus abhängt (Mellert et al 2018). Auch Scherrer & Guisan (2019) betonen, dass Informationen zum Bodenwasser- und Nährstoffhaushalt die Modelle der Pflanzenausbreitung entscheidend verbessern und dass der oft gefundene dominante Temperatureffekt nur aus der Nichtberücksichtigung dieser edaphischen Faktoren resultiert. Das Standortinformationssystem der Bayerischen Forstverwaltung wurde unter anderem deshalb um Bodeninformationen erweitert (Mette et al 2019). Bei der Herleitung der Baumartenempfehlungen für die Schweiz im Hinblick auf den Klimawandel haben Frehner & Zürcher-Gasser (2019) den Boden über den Standorttyp berücksichtigt.

Die Veränderung der Vegetationszusammensetzung infolge des Klimawandels ist ein «moving target», ein «bewegliches Ziel», da auch das Klima weiter in Veränderung sein wird. Auch sagen die neu modellierten Höhenstufen nichts über die Geschwindigkeit der Vegetationsveränderung aus. Diese wird vermutlich in der Höhe langsamer verlaufen als in tiefer gelegenen Gebieten, wie es für die letzten Jahrzehnte belegt werden konnte (Rumpf et al 2018). Die Vegetation wird – ohne menschliche Eingriffe – sehr wahrscheinlich der klimatischen Entwicklung nicht

unmittelbar folgen können. Daher ist es gerade auf Flächen mit einem sehr deutlichen Wechsel der Vegetationshöhenstufe (klimasensitiven Standorten) wichtig, dass Zukunftsbaumarten gefördert werden, sofern dies aufgrund der heutigen klimatischen Bedingungen bereits schon möglich ist. Insbesondere die Spätfrostgefahr kann die Höhenausbreitung von Laubbäumen begrenzen (Kollas et al 2013, Vitasse et al 2018). Bis zu einem gewissen Ausmass können sich Bäume durch ein späteres Austreiben anpassen, was allerdings die Vegetationszeit verkürzt und somit auf Kosten des potenziellen Wachstums geht (Lenz et al 2013). Ein breites Baumartenportfolio mit beigemischten trockenheits- und wärmetoleranten Baumarten ist deshalb eine weitere Vorsorgemassnahme zur Sicherung der Waldleistungen. Die hier vorgestellten aktuellen und künftigen Vegetationshöhenstufen sind eine wichtige Grundlage für die Herleitung von Baumartenempfehlungen, die den Klimawandel berücksichtigen (Frehner & Zürcher-Gasser 2019). Sie waren auch die Grundlage für die Tree-App⁴, die den Waldfachleuten dieses Wissen digital zur Verfügung stellt. Im Jahr 2020 soll die Vegetationshöhenstufenkarte mit den neuen Klimaszenarien CH2018 (NCCS 2018) und eventuell unter Berücksichtigung von verbesserten geologischen Grundlagen berechnet werden. ■

Eingereicht: 8. April 2019, akzeptiert (mit Review): 12. September 2019

Dank

Die Projekte «Mit welchen Klimaparametern kann man Grenzen plausibel erklären, die in NaiS (Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald) verwendet werden, um Ökogramme auszuwählen?» und «Adaptierte Ökogramme» konnten im Rahmen des Forschungsprogramms Wald und Klimawandel des Bundesamts für Umwelt und der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) durchgeführt werden. Bedanken möchten wir uns auch bei MeteoSchweiz, dem LFI-Team der WSL und den Kantonen für das Zurverfügungstellen von Daten sowie bei unseren Experten Jacques Burnand, Gabriele Carraro, Berchthold Wasser und Hans-Ulrich Frey, die dank ihren Lokalkenntnissen essenzielle Informationen beisteuerten.

⁴ <https://tree-app.ch/> (12.9.2019)

Literatur

- ALLGAIER LEUCH B, STREIT K, BRANG P (2017) Wälder, die es bei uns bald gibt? Eine Reise in die Provence. *Wald Holz* 98 (9): 32–35.
- ARGE FREHNER M, DIONE SA, IWA – WALD UND LANDSCHAFT AG (IM DRUCK) NaiS-LFI: Zuordnung der LFI-Stichprobepunkte zu Waldgesellschaften. Bern: Bundesamt Umwelt.

- BIRCHER N, CAILLERET M, ZINGG A, BUGMANN H (2016)** Potenzielle Grundflächenveränderungen auf Bestandesebene im Klimawandel. In: Pluess AR, Augustin S, Brang P, editors. Wald im Klimawandel. Grundlagen für Adaptionsstrategien. Bern: Haupt. pp. 157–174.
- BRAUN S, HOPF S, DE WITTE L (2018)** Wie geht es unserem Wald? 34 Jahre Walddauerbeobachtung. Schönenbuch: Institut Angewandte Pflanzenbiologie. 140 p.
- BURNAND J, FREHNER M, FREY HU, PREISWERK T, LÜSCHER P (1999)** Projekt Waldstandortkartierung St. Gallen-Mittelland: Bericht zum Teilprojekt Kartierungsschlüssel und Beschreibung der Standorte – Katalog der Standortstypen. St. Gallen: Kantonsforstamt, Polykopie.
- ELLENBERG H (1996)** Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen in ökologischer, dynamischer und historischer Sicht. Stuttgart: Ulmer, 5 ed. 1095 p.
- FICKLIN DL, NOVACK K (2017)** Historic and projected changes in vapor pressure deficit suggest a continental-scale drying of the United States atmosphere. *J Geophys Res Atmos* 122: 2061–2079.
- FRACEK K, MOSIMANN T (2013)** Wissensbasierte Modellierung der Mächtigkeit des kalkfreien Bodenbereiches in Waldböden des Kantons Basel-Landschaft (Nordwestschweiz). *Waldökol Landsch.forsch Nat.schutz* 13: 5–16.
- FREHNER M, WASSER B, SCHWITTER R (2005)** Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald. Wegleitung für Pflegemassnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion. Bern: Bundesamt Umwelt, Vollzug Umwelt.
- FREHNER M, BURNAND J, CARRARO G, FREY HU, LÜSCHER P (2009)** Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald. Wegleitung für Pflegemassnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion, Anhang 2A: Bestimmen des Standortstyps. Bern: Bundesamt Umwelt.
- FREHNER M, ZIMMERMANN NE, HUBER B, GUBELMANN P, BUGMANN H ET AL (2017)** Schlussbericht des Projektes «Adaptierte Ökogramme» im Forschungsprogramm «Wald und Klimawandel», Teil 3: «Vergleich verschiedener Modelle der Baumartenverbreitung». Chur: Abenis AG. 105 p.
- FREHNER M, BRANG P, KAUFMANN G, KÜCHLI C (2018A)** Standortkundliche Grundlagen für die Waldbewirtschaftung im Klimawandel. Birmensdorf: Eidgenöss. Forsch.anstalt WSL, Ber 66. 43 p.
- FREHNER M, CARRARO G, STREIT K (2018B)** Exkursion Toskana vom 17.–21. April 2018, Projekt «Nicht analoge Standorte». Sargans: Forstingenieurbüro Frehner. 58 p.
- FREHNER M, ZÜRCHER-GASSER N (2019)** Schlussbericht des Projektes «Adaptierte Ökogramme» im Forschungsprogramm «Wald und Klimawandel», Teil 5: Herleitung von regional optimierten Baumartenempfehlungen. Sargans: Forstingenieurbüro Frehner. 24 p.
- FREY HU (1995)** Waldgesellschaften und Waldstandorte im St. Galler Berggebiet. Zürich: Geobotanisches Institut der ETH, Stiftung Rübel. 280 p.
- FREY HU (2003)** Die Verbreitung und die waldbauliche Bedeutung der Weisstanne in den Zwischenalpen. Ein Beitrag für die waldbauliche Praxis. *Schweiz Z Forstwes* 154: 90–98. doi: 10.3188/szf.2003.0090
- GUBELMANN P, HUBER B, FREHNER M, ZISCHG A, BURNAND J ET AL (2019)** Schlussbericht des Projektes «Adaptierte Ökogramme» im Forschungsprogramm «Wald und Klimawandel», Teil 1: Quantifizierung und Verschiebung der Höhenstufengrenzen sowie des Tannen- und Buchenareals in der Schweiz mit zwei Klimazukünften. Chur: Abenis AG. 194 p.
- HUBER B, ZISCHG A, FREHNER M, CARRARO G, BURNAND J (2015A)** Mit welchen Klimaparametern kann man Grenzen plausibel erklären, die in NaiS (Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald) verwendet werden, um Ökogramme auszuwählen? Schlussbericht März 2015. Chur: Abenis AG. 151 p.
- HUBER B, ZISCHG A, FREHNER M, CARRARO G, BURNAND J (2015B)** Neu entwickelte Klimakarten für den Wald im Klimawandel. *Schweiz Z Forstwes* 166: 432–434. doi: 10.3188/szf.2015.0432
- HUBER B, FREHNER M, ZIMMERMANN NE, GUBELMANN P, WÜEST RO (2017)** Vorarbeiten für Baumartenempfehlungen von Standortstypen, die in der Schweiz heute noch nicht vorkommen. Ein Bericht aus dem Projekt «Adaptierte Ökogramme» im Forschungsprogramm «Wald und Klimawandel». Chur: Abenis AG. 70 p.
- KLEMMT HJ, EWALD J (2011)** Wachstum der Fichte nach Waldtypen. *AFZ/Der Wald* 66 (24): 22.
- KOLLAS C, KÖRNER C, RANDIN CF (2013)** Spring frost and growing season length co-control the cold range limits of broad-leaved trees. *J Biogeogr* 41: 773–783.
- LENDZION J, LEUSCHNER C (2008)** Growth of European beech (*Fagus sylvatica* L.) saplings is limited by elevated atmospheric vapour pressure deficits. *For Ecol Manage* 256: 648–655.
- LENZ A, HOCH G, VITASSE Y, KÖRNER C (2013)** European deciduous trees exhibit similar safety margins against damage by spring freeze events along elevational gradients. *New Phytol* 200: 1166–1175.
- 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.
- MEEHL GA, STOCKER TF, COLLINS WD, FRIEDLINGSTEIN P, GAYE AT ET AL (2007)** Global climate projections. In: Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M et al, editors. *Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge Univ Press. 100 p.
- MELLERT KH, CANULLO R, METTE T, ZICHE D, GÖTTLEIN A (2018)** Die klimatische Trockengrenze häufiger Baumarten hängt vom Bodennährstoffstatus ab. *Schweiz Z Forstwes* 169: 323–331. doi: 10.3188/szf.2018.0323
- METTE T, KOLB J, SCHUSTER O, FALK W, KLEMMT HJ (2019)** BASIS-Wasserhaushalt wird bodensensitiver. Freising: Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, LWF aktuell 2/2019: 50–52.
- NCCS, EDITOR (2018)** CH2018. Climate Scenarios for Switzerland, Zurich: National Centre for Climate Services. 271 p.
- RASPE S, ZIMMERMANN L, WAUER A (2016)** Dem Wald den Puls gefühlt. Erste Ergebnisse aus dem forstlichen Umweltmonitoring zum Trockenjahr 2015. Freising: Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, LWF aktuell 3/2016: 6–9.
- REGER B, EWALD J (2011)** Waldtypenkarte Bayerische Alpen. *AFZ/Der Wald* 66 (24): 14–16.
- REGER B, HÄRING T, EWALD J (2014)** The TRM model of potential natural vegetation in mountain forests. *Folia Geobot* 49: 337–359.
- REIF A, XYSTRAKIS F, GÄRTNER S, SAYER U (2017)** Floristic change at the drought limit of European beech (*Fagus sylvatica* L.) to Downy oak (*Quercus pubescens*) forest in the temperate climate of central Europe. *Not Bot Horti Agrobo* 45: 646–654.
- REMUND J, RIHM B, HUGUENIN-LANDB B (2014)** Klimadaten für die Waldmodellierung für das 20. und 21. Jahrhundert. Bern: Meteotest. 38 p.
- REMUND J, AUGUSTIN S (2015)** Zustand und Entwicklung der Trockenheit in Schweizer Wäldern. *Schweiz Z Forstwes* 166: 352–360. doi: 10.3188/szf.2015.0352
- RENGER M, BOHNE K, FACKLAM M, HARRACH T, RIEK W ET AL (2008)** Ergebnisse und Vorschläge der DBG-Arbeitsgruppe «Kennwerte des Bodengefüges» zur Schätzung bodenphysikalischer Kennwerte. Berlin: Deutsche bodenkundliche Gesellschaft (DBG). 51 p.

- RIGLING A, ELKIN C, DOBBERTIN M, EILMANN B, GIUGGIOLA M ET AL (2012) Wald und Klimawandel in der inneralpinen Trockenregion Visp. *Schweiz Z Forstwes* 163: 481–492. doi: 10.3188/szf.2012.0481
- RUMPF SB, HÜLBER K, KLONNER G, MOSER D, SCHÜTZ M ET AL (2018) Range dynamics of mountain plants decrease with elevation. *Proc Natl Acad Sci USA* 115: 1848–1853.
- SCHERRER D, GUISSAN A (2019) Ecological indicator values reveal missing predictors of species distribution. *Sci Rep* 9: 3061.
- SCHWARB M, DALY C, FREI C, SCHÄR C (2001A) Mittlere jährliche Niederschlagshöhen im europäischen Alpenraum 1971–1990. In: Gruppe Hydrologie Univ Bern, editor. *Hydrologischer Atlas der Schweiz*. Bern: Univ Bern, Band 1, Tafel 2.6.
- SCHWARB M, DALY C, FREI C, SCHÄR C (2001B) Mittlere saisonale Niederschlagshöhen im europäischen Alpenraum 1971–1990. In: Gruppe Hydrologie Univ Bern, editor. *Hydrologischer Atlas der Schweiz*. Bern: Univ Bern, Band 1, Tafel 2.7.
- STAFFLER H, POLLINGER R, ZISCHG A, MANI P (2008) Spatial variability and potential impacts of climate change on flood and debris flow hazard zone mapping and implications for risk management. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 8: 539–558.
- TAEGER S, KÖLLING C (2016) Standortinformationssystem BaSIS. *AFZ/Der Wald* 71 (4): 10–13.
- VITASSE Y, SCHNEIDER L, RIXEN C, CHRISTEN D, REBETEZ M (2018) Increase in the risk of exposure of forest and fruit trees to spring frosts at higher elevations in Switzerland over the last four decades. *Agric For Meteor* 248: 60–69.
- VOLKEN D (2008) Mesoklimatische Temperaturverteilung im Rhone- und Vispental. Zürich: Eidgenössische Technische Hochschule ETH Zürich, Diss 17705. 129 p.
- VON HUMBOLDT A, BONPLAND A (1805) *Essai sur la géographie des plantes accompagné d'un tableau physique des régions équinoxiales*. Fondé sur des mesures exécutées, depuis le dixième degré de latitude boréale jusqu'au dixième degré de latitude australe, pendant les années 1799, 1800, 1801, 1802 et 1803. Avec un planche. Paris: Schoell, Cotta.
- WASSER B, FREHNER M (1996) *Wegleitung Minimale Pflegemaßnahmen für Wälder mit Schutzfunktion*. Bern: Bundesamt Umwelt Wald Landschaft, Vollzug Umwelt.
- ZADEH LA (1978) Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility. *Fuzzy Sets and Systems* 1 (1): 3–28.
- ZIMMERMANN NE, SCHMATZ DR, GALLIEN L, KÖRNER C, HUBER B ET AL (2016) Baumartenverbreitung und Standorteignung. In: Pluess AR, Augustin S, Brang P, editors. *Wald im Klimawandel. Grundlagen für Adaptationsstrategien*. Bern: Haupt. pp. 199–221.
- ZISCHG A, FUCHS S, KEILER M, MEISSL G (2005) Modelling the system behaviour of wet snow avalanches using an expert system approach for risk management on high alpine traffic roads. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 5: 821–832.

Modélisation des étages de végétation et des aires de répartition du hêtre et du sapin blanc pour la Suisse

Pour la classification des stations forestières suisses fondée sur les écogrammes et donc pour les recommandations, par station, concernant le choix des essences et la sylviculture, les étages de végétation et les aires de répartition du hêtre et du sapin blanc constituent une base essentielle. Jusqu'à présent, leurs limites, influencées de manière décisive par des facteurs climatiques, n'étaient déterminées que de manière qualitative. Pour pouvoir continuer à utiliser ces écogrammes et ces recommandations dans des conditions climatiques modifiées, il est nécessaire de les décrire quantitativement afin qu'ils puissent être modélisés pour l'avenir à l'aide de scénarios climatiques. À l'aide de cartes à haute résolution de la Suisse pour des paramètres climatiques décisifs pour la forêt et en tenant compte d'autres facteurs stationnels importants, il a été possible de définir les paramètres qui déterminent les limites d'étages de végétation et les aires de répartition du hêtre et du sapin blanc. Les premières ont été modélisées à l'aide de régressions linéaires entre la position de certaines limites représentatives connues et les facteurs climatiques associés, tandis que la modélisation des secondes a pour base une approche logique floue. Les paramètres climatiques ont été calculés à l'aide du scénario climatique A1B (basé sur les émissions; modèles RegCM3 et CLM) pour la période 2070–2099, de sorte que l'altitude des limites des étages de végétation et les aires de répartition ont pu être modélisées pour l'avenir. Les résultats de la modélisation sont écologiquement plausibles, ce qui a été démontré par comparaison avec les stations forestières sur les points d'échantillonnage de l'Inventaire forestier national (IFN) et dans une évaluation effectuée par des experts. Les cartes de végétation et climatiques ainsi élaborées, de même que les projections des étages de végétation modélisées dans l'avenir servent de base pour la prise en compte du changement climatique lors de la sélection des essences. Elles peuvent servir aux gestionnaires et autorités forestiers d'aide à la décision en matière de planification sylvicole, celle-ci étant toujours confrontée à de nombreuses incertitudes.

Modelling of the vegetation belts and the areas of beech and silver fir for Switzerland

The vegetation belts and the distribution area of beech and silver fir in Switzerland are an essential basis for the classification of forest site types with ecograms and therefore for site-specific recommendations of tree species and for forestry. Their limits, which are to a large extent defined by climatic factors, were until now only defined on a qualitative basis. For the future usage of the ecograms for tree species recommendations the limits must be described quantitatively, so that they can be modelled for the future with climate scenarios. With maps in a high spatial resolution of the forest-relevant climate variables and with additional important site parameters, those parameters were selected, which were relevant for the actual limits of the vegetation belts as well as for the beech and silver fir areal. The altitudinal belts were modelled by means of a linear regression between the known position of a representative altitudinal limit and the respective climatic factors at that position. The areal limits were modelled with a fuzzy logic approach. The climatic variables for the time span 2070–2099 were calculated on the basis of the climate (emission) scenario A1B (regional models RegCM3 and CLM), so that the limits of the altitudinal belts and the areas could be modelled for the future. The results of the model approaches are ecologically plausible. This could be shown in a comparison with the forest site types on the sample points of the National Forest Inventory and in an expert evaluation. The developed vegetation and climate maps as well as the modelled projections of the altitudinal belts in the future are the basis for the inclusion of climate change in the recommendation of tree species. They serve as decision support for forest managers and authorities in the forestry planning which is confronted with many uncertainties.