

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

Herausgeber: Schweizerischer Forstverein

Band: 166 (2015)

Heft: 6

Artikel: Entwicklung klimasensitiver Wachstumsfunktionen für das Szenariomodell "Massimo"

Autor: Rohner, Brigitte / Thürig, Esther

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1097551>

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>

Entwicklung klimasensitiver Wachstumsfunktionen für das Szenariomodell «Massimo»

Brigitte Rohner Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (CH)*
Esther Thürig Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (CH)

Entwicklung klimasensitiver Wachstumsfunktionen für das Szenariomodell «Massimo»

Das Baumwachstum wird massgeblich von klimatischen Faktoren beeinflusst. Angesichts des Klimawandels sollten daher in die Abschätzungen der zukünftigen Produktivität des Schweizer Waldes Klimaeinflüsse miteinbezogen werden. Um Klimaeffekte in die Wachstumsfunktion des in der Schweiz für Potenzialanalysen oft verwendeten Modells «Massimo» zu integrieren, wurden in dieser Studie Klimaeinflüsse gemeinsam mit weiteren Einflüssen auf den Einzelbaumzuwachs repräsentativ für die ganze Schweiz statistisch modelliert. In einem ersten Schritt wurden Jahrringdaten verwendet, um zu ermitteln, wie die klimatischen Einflussgrössen definiert werden sollen. Diese Jahrringanalyse ergab, dass für die Modellierung von mehrjährigen Einzelbaumzuwachsen Mittelwerte von Ganzjahresgrössen berücksichtigt werden sollten. In einem zweiten Schritt wurden Zuwachsdaten aus dem Schweizerischen Landesforstinventar mittels nichtlinearer gemischter Modelle separat für die Hauptbaumarten modelliert. Dabei flossen entsprechend der Jahrringanalyse definierte Klimavariablen zusammen mit zahlreichen weiteren Einzelbaum-, Bestandes- und Standortgrössen als erklärende Variablen ein. Die in den statistischen Modellen quantifizierten Effekte fielen weitestgehend plausibel aus und bildeten physiologische Unterschiede zwischen den Baumarten schlüssig ab. Die statistischen Modelle für die Hauptbaumarten sollen nun in das Waldentwicklungsmodell «Massimo» eingebaut werden. Dies ermöglicht eine fundierte Analyse von Szenarien, die von sich ändernden Klimabedingungen ausgehen.

Keywords: basal area increment, tree growth, nonlinear mixed-effects model, National Forest Inventory, tree rings, climate-growth relationship

doi: 10.3188/szf.2015.0389

* Zürcherstrasse 111, CH-8903 Birmensdorf, E-Mail brigitte.rohner@wsl.ch

Das Wachstum von Bäumen wird zu einem erheblichen Teil von Wetter- und Klimabedingungen beeinflusst. So ist beispielsweise bekannt, dass in den tieferen Lagen der Schweiz das Baumwachstum vom Niederschlag abhängt, während in höheren Lagen eher die Temperatur limitierend wirkt (Ellenberg & Leuschner 2010). Entsprechend führte das ausgesprochen warme und trockene Jahr 2003 in der kollinen und montanen Stufe zu Wachstumseinbussen, in der subalpinen Stufe allerdings zu Wachstumssteigerungen (Jolly et al 2005). Die Reaktionen des Wachstums auf das Klima unterscheiden sich zwischen den Baumarten. So stellten Zingg & Bürgi (2008) anhand von Daten aus ertragskundlichen Versuchsflächen fest, dass der Grundflächenzuwachs von Fichte und Buche in Trockenperioden stärker reduziert war als jener der Tanne, während die Eiche keine Reaktion zeigte. Entlang ei-

nes Klimagradienten zeigten sich die Fichte, die Lärche und die Waldföhre sensitiver gegenüber Trockenheit als die Douglasie und die Schwarzföhre (Lévesque et al 2015, dieses Heft). Um die Produktivität des Schweizer Waldes auch in einem sich ändernden Klima abschätzen und Auswirkungen verschiedener Anpassungsstrategien analysieren zu können, ist daher fundiertes Wissen zu den Klima-Wachstums-Beziehungen aller Hauptbaumarten zentral, und dies möglichst repräsentativ für die ganze Schweiz.

Viele bisherige Erkenntnisse zu Klimaeinflüssen auf das Baumwachstum wurden anhand von Jahrringen gewonnen (Fritts 1976; Weber et al 2007; Rohner et al 2013; Lévesque et al 2015, dieses Heft). Die Stärken von Jahrringdaten liegen unter anderem in ihrer hohen zeitlichen Auflösung und den potenziell langen abgedeckten Zeiträumen. Weil das Entnehmen von Jahrringproben aber aufwendig ist, be-

schränken sich Jahrringstudien meist auf einzelne Standorte oder Regionen. Ausserdem eignen sich Nadelbaumarten und ringporige Laubbaumarten besser zur Untersuchung von Jahrringen als zerstreutporige Laubbaumarten. Repräsentative Schlüsse für alle Hauptbaumarten und für die gesamte Schweiz können deshalb kaum allein basierend auf Jahrringuntersuchungen gezogen werden.

Für repräsentative Aussagen über die Schweizer Wälder gibt es das Landesforstinventar (LFI; Brändli 2010). Anhand zahlreicher Grössen, die für jeden Stichprobenpunkt und jeden Einzelbaum im Rahmen des LFI erhoben werden, können beispielsweise Einflüsse der Bestandesstruktur, des Standorts und der Bewirtschaftung auf den Einzelbaumzuwachs quantifiziert werden (Thürig et al 2005). Bisher wurde dabei aber von konstanten Umweltbedingungen ausgegangen; Klimateffekte auf das Baumwachstum wurden anhand des Schweizerischen LFI noch nie untersucht. Eine Schwierigkeit dabei ist, dass Daten des LFI im Vergleich zu Jahrringdaten in einer viel geringeren zeitlichen Auflösung vorliegen (ca. zehnjährlich). Dies zieht die Frage nach sich, wie Klimateffekte auf das Baumwachstum über die Zeit aggregieren.

An der Schnittstelle zwischen der hohen zeitlichen Auflösung der Jahrringe und der flächigen Repräsentativität der LFI-Daten setzte das hier vorgestellte Projekt KliWaWa (Verbesserung der Klimaabhängigkeit der Wachstumsfunktion für Szenarienanalysen der Waldentwicklung) an. Hauptziel des Projekts war es, Klimateffekte gemeinsam mit weiteren Einflüssen auf den Einzelbaumzuwachs repräsentativ für die ganze Schweiz zu modellieren, um mit dem Modell «Massimo» künftig auch klimaabhängige Waldentwicklungsszenarien für die Schweiz analysieren zu können. In einem ersten Schritt wurde mittels Jahrringdaten analysiert, welche klimatischen Variablen für das Baumwachstum relevant sind (genaue Definition, Berechnungsart) und welchen Einfluss deren zeitliche Auflösung hat. Um den Einfluss längerer Inventurintervalle zu untersuchen, wurden die Jahrringe künstlich zu Intervallen von bis zu zehn Jahren zusammengefasst (Rohner et al, in press). In einem zweiten Schritt wurden daraus abgeleitete Klimavariablen zusammen mit zahlreichen weiteren Grössen verwendet, um empirische Zuwachsdaten aus dem LFI statistisch zu modellieren (Rohner et al 2015). Konkret wurde untersucht, welche der folgenden Faktoren den Einzelbaumzuwachs am besten beschreiben:

- 1) Niederschlag und Temperatur in welchem Abschnitt des Jahres: Frühling, Sommer, Vegetationsperiode oder physiologisches Jahr?
- 2) Mittel- oder Extremwerte dieser Grössen innerhalb von Inventurperioden?
- 3) Welche Kombination aus Klima-, Standort-, Bestandes- und Einzelbaumgrössen?

Methoden

Alle nachfolgend erwähnten Analysen wurden mit der Statistiksoftware R durchgeführt (R Core Team 2013). Methodische Details zur Jahrringanalyse sind in Rohner et al (in press) und zur LFI-Analyse in Rohner et al (2015) beschrieben.

Jahrringanalyse

Wie Effekte von Niederschlag und Temperatur auf den Einzelbaumzuwachs über die Zeit aggregieren, wurde anhand der in Weber et al (2015, dieses Heft) vorgestellten Jahrringdaten untersucht. Dabei wurde der Fokus auf die Buche und die Fichte als die zwei häufigsten Schweizer Baumarten gelegt. Von 13 Standorten im Schweizer Mittelland lag eine Chronologie des Einzelbaum-Grundflächenzuwachses (im Folgenden «Zuwachs» genannt) für die Buche vor, von 8 Standorten eine Chronologie für die Fichte (zwei davon überlappend). Details zur Datenerhebung und -aufbereitung sind in Weber et al (2015, dieses Heft) beschrieben.

Für den Zeitraum 1930 bis 2006 lagen monatliche Niederschlagssummen und Temperaturmittel vor, die anhand des DAYMET-Modells (Thornton et al 1997) und unter Berücksichtigung eines digitalen Höhenmodells für jeden Standort interpoliert wurden. Um Effekte verschiedener Jahreszeiten vergleichen zu können, wurden Temperaturmittel und Niederschlagssummen über folgende Monate gebildet: März–Juni (Frühling), Juli–September (Sommer), März–September (Vegetationsperiode) und Oktober des Vorjahres–September des laufenden Jahres (physiologisches Jahr; vgl. Lapointe-Garant et al 2010).

Die zeitliche Auflösung der Zuwachsdaten wurde künstlich von jährlich auf fünf- und zehnjährlich reduziert, um eine mit den Inventurdaten vergleichbare Ausgangslage zu erhalten. Dazu wurden mittlere Zuwächse über Intervalle von fünf und zehn Jahren berechnet. Für die Niederschlags- und Temperaturdaten wurden zusätzlich zu den Mittelwerten die Maxima und Minima innerhalb der Intervalle bestimmt.

Die Beziehungen zwischen den klimatischen Grössen und dem Zuwachs wurden für die verschiedenen zeitlichen Auflösungen untersucht. Einflüsse monatlicher Temperatur- und Niederschlagswerte auf den jährlichen Zuwachs wurden mittels sogenannter «Response Funktionen» ermittelt (Fritts 1976), wobei es sich um Hauptkomponenten-Regressionen handelt. Als Zeitfenster, in welchem die Temperatur und der Niederschlag potenziell auf den jährlichen Zuwachs wirken, wurde März des Vorjahres bis September des laufenden Jahres gewählt. Zur Quantifizierung von saisonalen Einflüssen auf den jährlichen, fünfjährigen und zehnjährlichen Zuwachs wurden Korrelationskoeffizienten nach Pearson berechnet. Dabei wurden die fünf- und zehnjährlichen

Variable	Masseinheit	Mittelwert (± Standardabweichung)	Bezugsquelle	Betrachtungsebene	Zeitliche Variabilität
Temperatur	°C	6.9 (± 2.2)	Remund et al (2014)	Probefläche	Ja
ETa/ETp-Verhältnis	–	0.98 (± 0.04)	Remund et al (2014)	Probefläche	Ja
Brusthöhendurchmesser (BHD)	cm	31 (± 15)	LFI	Einzelbaum	Ja
Konkurrenzindex (Grundfläche grösserer Bäume)	m ² /ha	22 (± 16)	LFI	Einzelbaum	Ja
Bestandesdichte nach Reineke (1933)	–	742 (± 304)	LFI	Probefläche	Ja
BHD der 100 dicksten Bäume pro ha (d _{dom})	cm	42 (± 11)	LFI	Probefläche	Ja
Freistellungsindex	–	0.009 (± 0.03)	LFI	Probefläche	Ja
Waldtyp (gleichförmig/ungleichförmig)	–	–	LFI	Probefläche	Ja
Hangneigung	%	46 (± 28)	LFI	Probefläche	Nein
Ost-West-Indikator	–	–0.02 (± 0.7)	LFI	Probefläche	Nein
Nord-Süd-Indikator	–	0.06 (± 0.7)	LFI	Probefläche	Nein
Geländekurvatur	–	0.003 (± 0.3)	LFI	Probefläche	Nein
Nutzbare Feldkapazität (nFK)	mm	177 (± 62)	Remund et al (2014)	Probefläche	Nein
pH-Wert des Oberbodens	–	5.1 (± 1.4)	LFI	Probefläche	Nein
Globalstrahlung	W/m ²	1586 (± 149)	Remund et al (2014)	Probefläche	Ja
N-Deposition	kg/(ha×J)	27 (± 10)	Rihm (METEOTEST)	Probefläche	Ja

Tab 1 Übersicht über die potenziellen erklärenden Variablen zur Modellierung der Einzelbaum-Grundflächenzuwächse aus dem Landesforstinventar.

Zuwächse mit den Minima, Mittelwerten und Maxima der saisonalen Temperatur- und Niederschlagsgrössen innerhalb der Fünf- und Zehnjahresintervalle korreliert. Sowohl die Response-Funktionen als auch die Korrelationen wurden für die Standorte und die Baumarten (Buche, Fichte) separat berechnet.

Zuwachsmmodellierung mit LFI-Daten

Für die schweizweit repräsentative Analyse wurde als Zielgrösse der auf LFI-Daten basierende Grundflächenzuwachs von Einzelbäumen modelliert. Als Grundlage dienten Messungen des Brusthöhendurchmessers (BHD) der LFI-Inventuren 1 (1983–1985; Mahrer 1988), 2 (1993–1995; Brassel & Brändli 1999) und 3 (2004–2006; Brändli 2010). Für alle Bäume, für die BHD-Messungen von zwei direkt aufeinanderfolgenden Inventuren vorlagen, wurde der entsprechende Zuwachs berechnet. Aufgrund der leicht unterschiedlichen Länge der Inventurintervalle wurden die mittleren jährlichen Zuwächse berechnet, indem jeweils der gesamte Zuwachs durch die Anzahl Vegetationsperioden zwischen den beiden Inventuren dividiert wurde. Auf diese Weise flossen 42202 Datenpunkte aus dem ersten und 44060 aus dem zweiten Inventurintervall in die Analyse ein. Details zu Auswertemethoden des LFI sind in Brassel & Lischke (2001) zu finden.

Zur Modellierung des mittleren Zuwachses wurden nichtlineare gemischte Modelle (Pinheiro & Bates 2000) basierend auf der folgenden Funktion angepasst (vgl. Thürig et al 2005):

$$\text{Zuwachs} = e^{b_1 \times (1 - e^{b_2 \times \text{BHD}})} \times e^{b_3} + \epsilon \quad 1)$$

wobei b_1 bis b_3 die zu schätzenden Koeffizienten und ϵ der zufällige Fehler sind. Der Koeffizient b_3 wurde in Abhängigkeit von erklärenden Variablen $V_{1,\dots,i}$ modelliert:

$$b_3 = b_0 + c_1 \times V_1 + \dots + c_i \times V_i \quad 2)$$

Dabei wurden feste Effekte $c_{1,\dots,i}$ für die erklärenden Variablen und ein zufälliger Achsenabschnitt b_0 auf Ebene der Probeflächen geschätzt. Diese Modellformulierung erlaubte, die gruppierte Struktur der Daten (mehrere Bäume pro Probefläche) zu berücksichtigen.

Für alle LFI-Probeflächen konnten Klimadaten in monatlicher Auflösung ab Januar 1982 vom Projekt Remund et al (2014) bezogen werden. Als potenzielle erklärende Klimagrössen wurden die Temperatur, das Verhältnis zwischen aktueller und potenzieller Evapotranspiration (ETa/ETp; ein Trockenheitsindikator) und die Globalstrahlung berücksichtigt. Die Art und Weise, wie aus den monatlichen Werten erklärende Variablen für die LFI-Zuwächse gebildet wurden, folgte aus den Erkenntnissen der Jahrringstudie (siehe Diskussion).

Neben den Klimavariablen wurden Grössen zum Einzelbaum, zum Bestand, zur Topografie, zur Bewirtschaftung und zur Stickstoff(N)-Deposition als potenzielle erklärende Variablen berücksichtigt (Tabelle 1). Als Einzelbaumvariablen wurden der individuelle BHD und die Grundfläche von Bäumen mit grösserem BHD auf derselben Probefläche (Konkurrenzindex) einbezogen. Als Bestandesvariablen wurden die Bestandesdichte nach Reineke (1933) und der mittlere BHD der 100 dicksten Bäume pro

ha (d_{dom}) berücksichtigt. Diese Einzelbaum- und Bestandesvariablen wurden jeweils für den Zeitpunkt zu Beginn der Inventurintervalle direkt aus der LFI-Datenbank bezogen. Angaben zu Hangneigung, Exposition, pH-Wert des Oberbodens und Geländekurvature für jede Probefläche konnten ebenfalls der LFI-Datenbank entnommen werden. Die Exposition wurde mit einer Sinustransformation in einen Ost-West- und mit einer Cosinustransformation in einen Nord-Süd-Indikator umgerechnet. Als weitere potenzielle erklärende Variable wurde die nutzbare Feldkapazität berücksichtigt (nFk; Remund et al 2014). Bezüglich der Bewirtschaftung wurde zum einen der Waldtyp anhand einer kategoriellen Variable mit den beiden Stufen gleichförmig (Niederwald, Stangenholz, Baumholz I–III) und ungleichförmig (Mittelwald, plenterartiger Hochwald, ungleichförmiger Hochwald) berücksichtigt. Zum anderen wurde eine Variable zur Quantifizierung von Freistellungseffekten definiert, die im Falle der Entnahme eines Oberschichtbaumes für die verbleibenden Bäume derselben Probefläche einen Wachstumsschub vorsieht, der umgekehrt proportional zur deren Anzahl ist (bei einem verbleibenden Baum nimmt die Variable den Wert 1 an, bei zehn verbleibenden Bäumen den Wert 0.1). Bei den auf die LFI-Probeflächen interpolierten Daten zur N-Deposition handelt es sich um Werte für die Referenzjahre 1990 und 2000, wobei jeweils gemessene Depositionen aus fünf Jahren in die Modellierung einfließen (Thimonier et al 2005, Roth et al 2013). Die Werte des Referenzjahres 1990 wurden als potenzielle erklärende Variable für die erste Inventurperiode und die Werte des Referenz-

jahres 2000 für die zweite Inventurperiode verwendet.

Zahlreiche weitere Grössen wurden ursprünglich als mögliche erklärende Variablen in Betracht gezogen (z.B. Höhe über Meer, Niederschlag). Dieses ursprüngliche Variablen-set wies jedoch Gruppen hoch miteinander korrelierter Grössen auf, von denen jeweils nur eine im endgültigen Modell vertreten sein sollte. In einer systematischen Vorselektion wurden Modelle für alle Kombinationen dieser «konkurrierenden» Variablen angepasst, wobei alle «nicht in Konkurrenz stehenden» Variablen miteinbezogen wurden (d.h. volle Modelle mit verschiedenen Kombinationen «konkurrierender» Variablen). Jene Kombination (Tabelle 1) wurde als Ausgangspunkt für die weitere Modellselektion verwendet, die das tiefste Akaike-Informationskriterium (AIC; Akaike 1973) erreichte (Rohner et al 2015).

Ausgehend von dem auf diese Weise ermittelten vollen Modell wurden schrittweise jene Variablen weggelassen, deren Ausschluss das AIC am stärksten reduzierte. Die Modellselektion galt als abgeschlossen, wenn das AIC durch Weglassen weiterer Variablen nicht mehr reduziert wurde. Die Modellselektion wurde für die Hauptbaumarten separat durchgeführt.

Resultate

Jahrringanalyse

Die Einflüsse der monatlichen Temperaturmittel und Niederschlagssummen auf den jährlichen Zuwachs fielen für die Buche und die Fichte sehr

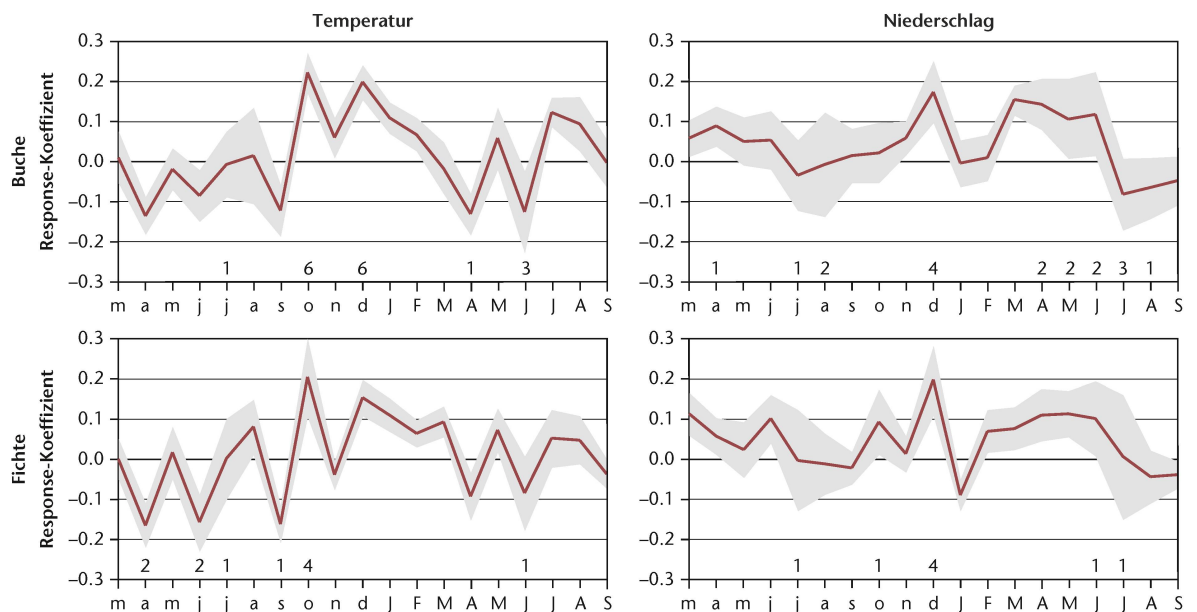


Abb 1 Response-Koeffizienten zwischen monatlichen Temperaturmitteln (links) oder Niederschlagssummen (rechts) und dem Grundflächenzuwachs der Buche (oben) und der Fichte (unten). Die Monate des Vorjahres sind mit Kleinbuchstaben abgekürzt (März–Dezember), jene des laufenden Jahres mit Grossbuchstaben (Januar–September). Die rote Linie zeigt den Mittelwert, der eingefärbte Bereich die Standardabweichung der Koeffizienten aller Standorte. Oberhalb der Monatskürzel ist die Anzahl Standorte angegeben, an denen sich der jeweilige Koeffizient signifikant von null unterscheidet. Für die Fichte wurden insgesamt 8 und für die Buche 13 Standorte berücksichtigt.

ähnlich aus (Abbildung 1). Oftmals hatten die Koeffizienten für die Temperatur und den Niederschlag gegensätzliche Vorzeichen, d.h., der Zuwachs reagierte ähnlich auf höhere Temperaturen wie auf geringere Niederschläge (oder umgekehrt). Im Allgemeinen wiesen beide Baumarten höhere Zuwächse auf, wenn der Herbst des Vorjahres und der Winter warm waren. Dieser Effekt war für den Oktober und den Dezember an vielen Standorten signifikant. Der Zuwachs war meist negativ mit der Temperatur im April und im Juni assoziiert, jedoch positiv mit der Temperatur im Juli und im August. Nach niederschlagsreichen Dezembem war der Zuwachs an allen Standorten höher. Die Reaktionen auf den Niederschlag des laufenden Jahres waren zweigeteilt: Während der Zuwachs meist positiv auf Niederschlag zwischen März und Juni reagierte, dominierten negative Reaktionen von Juli bis September.

Die Einflüsse der saisonalen Grössen auf den jährlichen, fünf- und zehnjährlichen Zuwachs waren ebenfalls für beide Baumarten sehr ähnlich (Ab-

bildung 2). Während die Minima, Mittelwerte und Maxima der Temperaturgrössen jeweils ähnliche Korrelationen mit dem Zuwachs aufwiesen, unterschieden sie sich bei den Niederschlagsgrössen teilweise deutlich. Eine allgemeine Tendenz zu stärkeren Korrelationen mit zunehmender Intervalllänge konnte sowohl für die Temperatur- als auch die Niederschlagsgrössen festgestellt werden. Die Temperatur korrelierte am einheitlichsten mit dem Zuwachs, wenn das ganze physiologische Jahr berücksichtigt wurde. So war unabhängig von der zeitlichen Auflösung an den meisten Standorten der Zuwachs umso grösser, je höher die Temperatur zwischen Oktober des Vorjahres und September des laufenden Jahres war. Je höher der mittlere oder der maximale Frühlingsniederschlag innerhalb der betrachteten Intervalle war, desto höher war im Allgemeinen der Zuwachs. Im Gegensatz dazu dominierten beim Sommerniederschlag negative Korrelationen. Der Niederschlag in der Vegetationsperiode war tendenziell positiv mit dem Zuwachs korreliert, jedoch

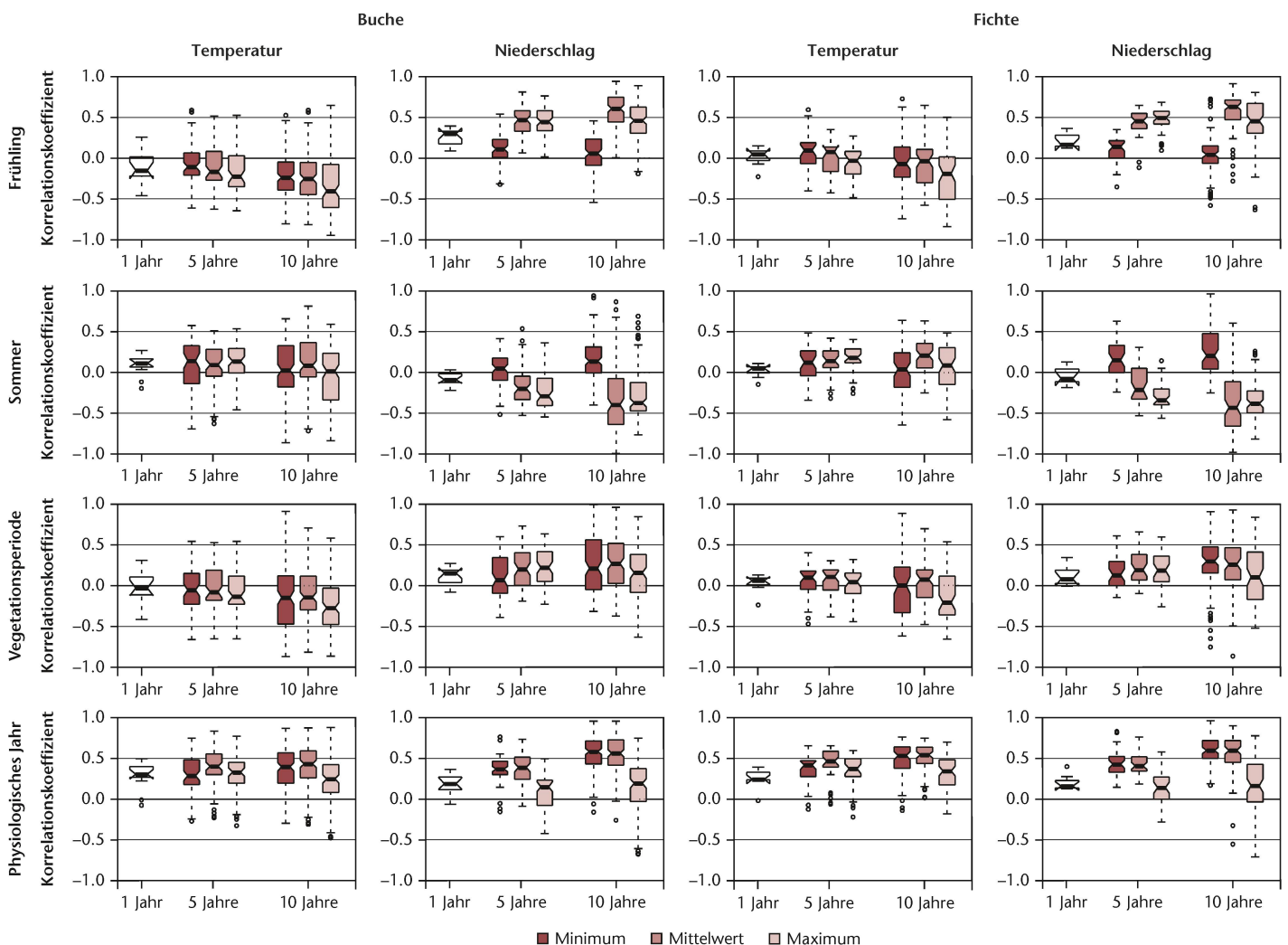


Abb 2 Korrelationen zwischen Grundflächenzuwachs und Temperatur respektive Niederschlag für die Buche (links) und die Fichte (rechts). Die Boxen zeigen die Verteilung der Korrelationskoeffizienten aller Standorte. Die Kerben der Boxen approximieren ein 95%-Konfidenzintervall, d.h., wenn die eingekerbten Bereiche zweier Boxen nicht überlappen, unterscheiden sich die beiden Mediane mit hoher Wahrscheinlichkeit. Frühling: Monate März–Juni, Sommer: Juli–September, Vegetationsperiode: März–September, physiologisches Jahr: Oktober des Vorjahres–September des laufenden Jahres. Verändert nach Rohner et al (in press).

	Fichte (34552)	Tanne (10430)	Föhre (3722)	Lärche (3901)	Übrige Nadelbaumarten (992)	Buche (17791)	Eiche (2082)	Esche/ Ahorn (5770)	Übrige Laubbaumarten (7022)
Temperatur	***	***		***	*	***	*	***	
ETa/ETp-Verhältnis	***	***		***		**		*	*
Brusthöhendurchmesser (BHD)	***	***	***	***	***	***	***	***	***
Konkurrenzindex (Grundfläche größerer Bäume)	***	***	***	***	***	***		***	***
Bestandesdichte nach Reineke (1933)	***	***	*	***			x	*	***
BHD der 100 dicksten Bäume pro ha (d_{dom})	***	*				***	***	*	**
Freistellungsindex	***	*				***	***	***	**
Waldtyp (gleichförmig, ungleich- förmig)			**	x				*	
Hangneigung	***	***	*	***	**	***	***	***	***
Ost-West-Indikator			x			*			
Nord-Süd-Indikator	***				x	*			
Geländekurvatur	***					*		*	
Nutzbare Feldkapazität (nFk)	***					***	*		x
pH-Wert des Oberbodens	***	***	***	x	x	***	**	***	
Globalstrahlung	***	**		*					
N-Deposition	***	***	*		*	***	***	***	***

Tab 2 Übersicht über die in den selektierten Modellen enthaltenen erklärenden Variablen. Grün hervorgehoben sind positive Effekte (je höher der Wert der entsprechenden Variable, desto mehr Zuwachs) und rot negative Effekte (je höher der Wert der entsprechenden Variable, desto weniger Zuwachs). Die Effektstärke entspricht dem Farbton (je dunkler, desto grösser). P-Werte: *** $p \leq 0.001$, ** $p \leq 0.01$, * $p \leq 0.1$, x $p \leq 0.17$. Für jede Baumart ist die Anzahl verwendeter Datenpunkte in Klammern angegeben.

schwächer als der Frühlingsniederschlag. Auch der Ganzjahresniederschlag war klar positiv mit dem Zuwachs korreliert, insbesondere wenn Mittelwerte und Minima innerhalb der Intervalle betrachtet wurden.

Zuwachsmmodellierung mit LFI-Daten

Die pro Baumart selektierten Modelle sind in der Tabelle 2 zusammengefasst. Während der Zuwachs mit zunehmendem BHD aufgrund der Modellformulierung generell zunimmt, unterschied sich die weitere Variablenzusammensetzung zwischen den Baumarten. Der Zuwachs der meisten Baumarten war umso höher je geringer die Konkurrenz, die Bestandesdichte, der d_{dom} und die Hangneigung waren. Für die Eiche wurde jedoch kein Effekt der Konkurrenz, für die Buche kein Effekt der Bestandesdichte und für die Waldföhre und die Lärche kein Effekt des d_{dom} festgestellt. Die meisten Baumarten hatten einen höheren Zuwachs nach Freistellung, bei höheren Temperaturen und bei höherem ETa/ETp-Verhältnis (d.h. bei geringerer Trockenheit). Der Zuwachs der Waldföhre zeigte jedoch keine Abhängigkeit von der Temperatur und dem ETa/ETp-Verhältnis, auch der Zuwachs der Eiche blieb unbeeinflusst vom ETa/ETp-Verhältnis. Für die Fichte und die meisten Laubbaumarten wurde ein positiver Effekt der nFk und für einige Nadelbaumarten ein positiver Effekt der Globalstrahlung gefunden. Mit Ausnahme der Lärche und der übrigen

Laubbaumarten reagierte der Zuwachs aller untersuchten Baumarten negativ auf höhere pH. Die N-Deposition wirkte bei den meisten Baumarten positiv auf den Zuwachs, bei der Fichte und der Tanne jedoch negativ. Der Waldtyp, die Variablen zur Exposition und die Geländekurvatur stellten sich nur für einzelne Baumarten als relevant heraus.

Am Beispiel der Tanne ist in Abbildung 3 dargestellt, wie die einzelnen im selektierten Modell enthaltenen erklärenden Variablen auf den Zuwachs wirken. Die Effektstärke variiert beträchtlich zwischen den Variablen: Während die Hangneigung und die Klimavariablen am stärksten auf den Zuwachs wirken, sind die Effekte von d_{dom} , pH-Wert und N-Deposition vergleichsweise schwach. Der geringste Effekt aller für die Tanne berücksichtigten Variablen wurde für den Freistellungsindex festgestellt. Visualisierungen der selektierten Modelle für die anderen Baumarten sind in Rohner et al (2015) zu finden.

Diskussion

Das hier vorgestellte Projekt zielte darauf, klimatische und weitere Effekte auf den Einzelbaumzuwachs simultan und repräsentativ für die ganze Schweiz zu modellieren. Die Jahrringdaten wurden dabei verwendet, um zu ermitteln, wie Klimavariablen für die Modellierung mehrjähriger Zuwächse definiert werden sollen. Dabei wurde evaluiert, wel-

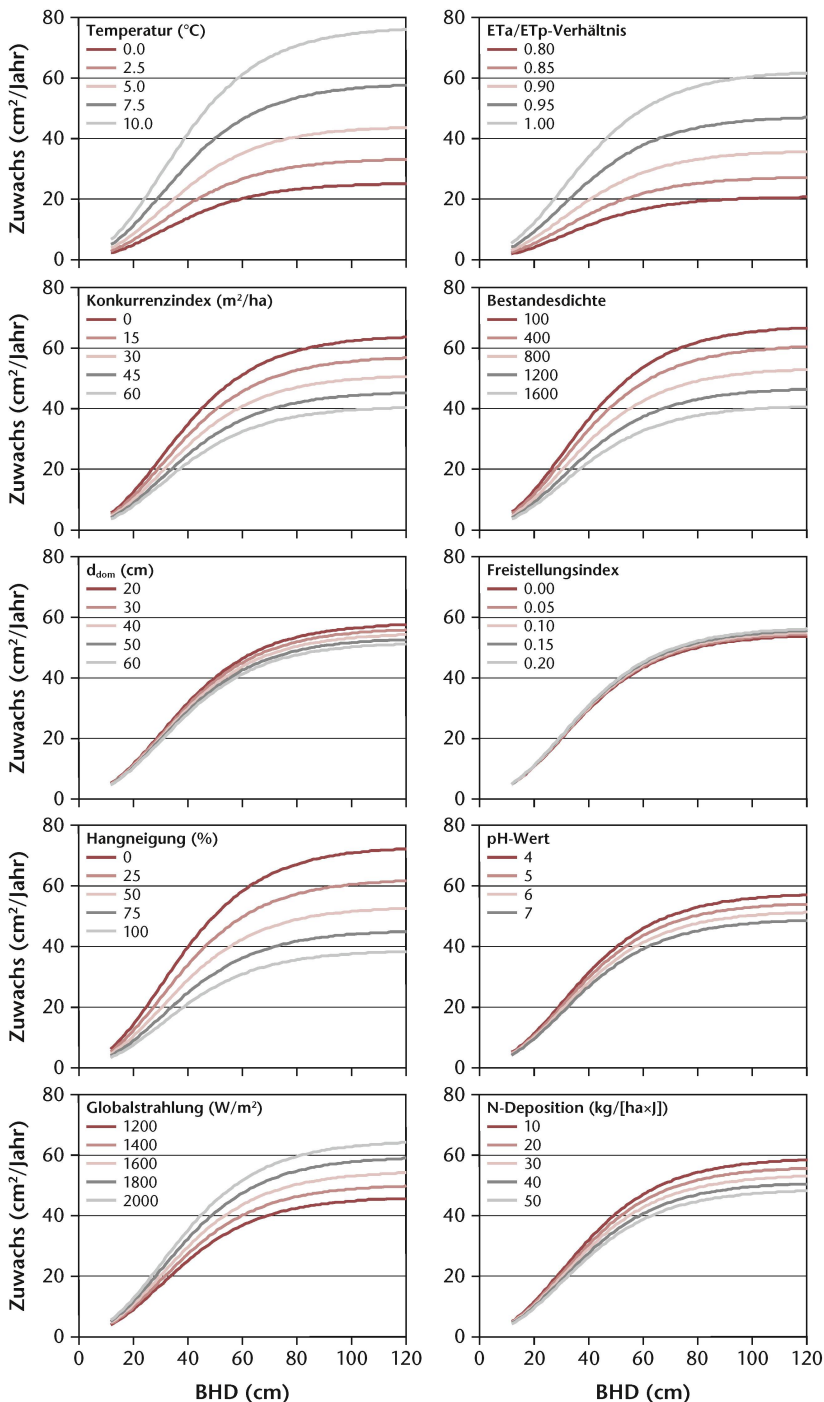


Abb 3 Visualisierung des selektierten Modells für die Tanne. Der Einzelbaum-Grundflächenzuwachs ist in Abhängigkeit vom Brusthöhendurchmesser (BHD) und von der im Modell enthaltenen erklärenden Variablen dargestellt. Während jeweils eine Variable innerhalb ihres Wertebereichs variiert wurde, blieben die anderen Variablen auf ihrem jeweiligen Mittelwert (siehe Tabelle 1) fixiert.

cher Teil des Jahres berücksichtigt werden und ob eher Mittel- oder Extremwerte einfließen sollten (Rohner et al, in press). Anhand der LFI-Daten fand anschliessend die flächig repräsentative Modellierung statt, bei der entsprechend den zuvor gewonnenen Erkenntnissen potenzielle Klimavariablen definiert und mit zahlreichen weiteren Einflüssen verbunden wurden (Rohner et al 2015). Die Idee, Jahrring- und Inventurdaten zu kombinieren, wurde bereits von Biondi (1999) in den USA sowie von Yue

et al (2011) und Kohnle et al (2014) in Deutschland realisiert. Bei diesen Studien lag der Fokus aber jeweils eher auf der Identifikation langfristiger Wachstumstrends der vergangenen Jahrzehnte.

Niederschlag und Temperatur in welchem Abschnitt des Jahres?

Die Korrelationsanalyse für die Fichte und die Buche zeigte, dass der Niederschlag im Frühling und im ganzen Jahr stärker mit dem Zuwachs korrelierte als der Niederschlag im Sommer oder in der Vegetationsperiode. Ein Blick auf die Response-Funktionen gibt über mögliche Gründe Aufschluss: Die Reaktion des Zuwachses auf den Niederschlag verändert sich von positiv in den Winter- und Frühlingsmonaten hin zu negativ in den Sommermonaten. Diese Effekte mitteln sich folglich gegenseitig weg, wenn die Vegetationsperiode betrachtet wird. Die bekannte Niederschlagslimitierung in tiefen Lagen der Schweiz (Ellenberg & Leuschner 2010) scheint somit eher zu Beginn der Vegetationsperiode zu wirken. Die hohe Korrelation mit dem Ganzjahresniederschlag ergibt sich daraus, dass der positive Effekt der Frühlingsmonate etwas stärker ausfiel als der negative Effekt der Sommermonate und zusätzlich auch der Niederschlag der meisten Wintermonate positiv auf den Zuwachs wirkte. Eine mögliche Erklärung für die positive Wirkung des Winterniederschlags ist die Sättigung des Bodens mit Wasser, welche den Bäumen einen optimalen Start in die Wachstumsphase erlaubt. Diese Erklärung lässt allerdings offen, weshalb der Zuwachs der Fichte negativ (wenn auch nicht signifikant) auf den Niederschlag im Januar reagierte, was in früheren Studien bereits für die Buche festgestellt wurde (Dittmar et al 2003, Scharnweber et al 2011).

Bei der Temperatur wurden die höchsten Korrelationen unter Einbezug des ganzen Jahres festgestellt. Dies ist eine Folge davon, dass nach warmen Herbst- und Wintermonaten meist höhere Zuwächse gebildet wurden, die Effekte der Frühlings- und Sommertemperaturen aber nicht einheitlich ausfielen. Der positive Effekt hoher Herbst- und Wintertemperaturen könnte in Zusammenhang mit vorteilhaften Bedingungen für das Wurzelwachstum stehen (vgl. Weber et al 2007).

Dass sowohl für den Niederschlag als auch die Temperatur klare Effekte der Herbst- und Wintermonate gefunden wurden, spricht für die Berücksichtigung dieses Zeitraums bei der Definition von erklärenden Klimavariablen für die Zuwachsmmodellierung. Für die hier verwendete Definition des physiologischen Jahres als Oktober des Vorjahres bis September des laufenden Jahres ist dies gegeben.

Mittel- oder Extremwerte innerhalb von Inventurintervallen?

Bei der Temperatur zeigte sich, dass der Entscheid zwischen Mittel- und Extremwerten wohl

deutlich weniger relevant ist als der Entscheid zum berücksichtigten Teil des Jahres. Beim Niederschlag hingegen scheinen beide Entscheide eine gewisse Relevanz zu haben. Die höhere Relevanz für die Niederschlagsvariablen ist eine plausible Folge davon, dass der Niederschlag im Verhältnis zu längerfristigen Trends von Jahr zu Jahr stärker variiert als die Temperatur (Rohner et al, in press). Dennoch erreichten oder übertrafen auch beim Niederschlag die Korrelationen der Mittelwerte stets jene der Extreme. Die Tendenz zu höheren Korrelationen bei längeren Intervallen ist eine Folge davon, dass langfristige Trends in den Klimavariablen und dem Grundflächenzuwachs synchron verlaufen. Je länger die Intervalle sind, desto mehr gleichen sich kurzfristige Variationen aus.

Definition der Klimavariablen für die Zuwachsmodellierung mit LFI-Daten

Die Resultate der Jahrringstudie sprechen zusammenfassend also dafür, sich auf Mittelwerte von Ganzjahresgrößen (Oktober Vorjahr bis September des laufenden Jahres) zu konzentrieren, wenn Klimavariablen für die Modellierung von mehrjährigen Einzelbaumzuwächsen definiert werden sollen. An dieser Empfehlung orientierte sich die Herleitung der Klimavariablen für die Modellierung der LFI-Zuwächse. Dies impliziert eine Verallgemeinerung der Erkenntnisse, die für die Fichte und die Buche gewonnen wurden, für alle Hauptbaumarten der Schweiz. Die Resultate der Jahrringstudie unterschieden sich zwischen der Fichte und der Buche nicht wesentlich, vermutlich weil die ökologischen Nischen überlappen, die beide Baumarten im Schweizer Flachland einnehmen. Wünschenswert wäre, die gleiche Fragestellung für weitere Baumarten und Wuchsbedingungen zu untersuchen, um die Empfehlungen zur Definition von Klimavariablen noch breiter abstützen zu können. Denkbar wäre beispielsweise, dass für die Flaumeiche saisonale Variablen besser abschneiden könnten als Ganzjahresvariablen, da diese Art einen Grossteil ihres Zuwachses zu Beginn der Vegetationsperiode bildet (Burger & Truniger 2006, Zweifel et al 2006), oder dass in höheren Lagen die vermehrte Temperaturlimitierung die Resultate beeinflussen könnte. Die Definition klimatischer Variablen wird bei inventurbasierten Zuwachsmodellierungen nur selten überhaupt quantitativ begründet (z.B. Notherdt et al 2012), während sie sich hier zumindest auf Resultate für die zwei häufigsten Baumarten der Schweiz (Brändli 2010) stützen konnte.

Welche Kombination aus Klima-, Standort-, Bestandes- und Einzelbaumgrößen?

Das LFI ist durch sein flächendeckend repräsentatives Netz eine wertvolle empirische Grundlage für die Entwicklung eines Waldentwicklungsmodells, das zur Analyse von Auswirkungen verschie-

dener Bewirtschaftungs- und Klimaszenarien verwendet werden kann (Kaufmann 2001, 2011). Dabei ist zentral, dass die verschiedenen auf das Baumwachstum wirkenden Effekte kombiniert geschätzt werden können, zumal sie sich nur schwer voneinander trennen lassen.

Die ermittelten Effekte auf den mittleren Zuwachs fielen weitestgehend plausibel aus. Jene Variablen, welche als Mass für den Kampf um Ressourcen interpretiert werden können, wiesen fast ausschliesslich negative Koeffizienten auf. So wurden umso grössere Zuwächse festgestellt, je geringer der Konkurrenzindex, die Bestandesdichte und der d_{dom} waren. Der Effekt des d_{dom} war dabei am schwächsten, weil er als generelle Beschreibung des Entwicklungszustandes des Bestandes wohl weniger unmittelbar auf den Einzelbaumzuwachs wirkt als beispielsweise der Konkurrenzindex. Diese negativen Effekte stehen im Einklang mit dem konsistent positiven Effekt des Freistellungsindex, der für die meisten Baumarten festgestellt wurde. Dieser fiel allerdings vergleichsweise gering aus, vermutlich weil nach Eingriffen eine Begünstigung für alle Bäume der Probefläche – also auch für solche nicht in unmittelbarer Nähe zu den entnommenen Bäumen – vorgesehen ist. Bei der Berechnung all dieser Variablen wurde die Baumartenzusammensetzung nicht berücksichtigt. Die Frage nach der Wirkung der Baumartenmischung auf den Zuwachs (vgl. Pretzsch et al 2013) wird für die Schweiz in dem derzeit laufenden Projekt Swiss-SpeMixMod im Rahmen der COST-Action EuMIXFOR näher untersucht.

Die mit zunehmender Hangneigung geringeren Zuwächse deuten auf harschere Wuchsbedingungen an steileren Hängen hin. Die positiven Koeffizienten für die nFk und das ETa/ETp-Verhältnis bedeuten, dass die Bäume bei grösserer Wasserverfügbarkeit wie erwartet mehr Zuwachs leisteten. Dass geringe Temperaturen das Baumwachstum hemmen, ist bekannt (Ellenberg & Leuschner 2010). Der positive Einfluss der Temperatur sollte aber auch als Effekt des in der Schweiz vorhandenen Höhengradienten verstanden werden, da die Temperatur mit der Höhe über Meer kontinuierlich abnimmt. Weil dieser Effekt durch die Temperatur bereits abgedeckt ist, wurde im Zuge der systematischen Vorselektion darauf verzichtet, die Höhe über Meer als separate Variable zu berücksichtigen.

Die Variablen zur Nährstoffverfügbarkeit – pH-Wert und N-Deposition – wiesen teilweise eher überraschende Koeffizienten auf. Während höhere N-Depositionen bei den meisten Baumarten wie erwartet zu stärkerem Wachstum führten (vgl. Laubhann et al 2009), war der Effekt bei der Fichte und der Tanne umgekehrt. Mögliche Erklärungen dafür sind, dass die Fichte und die Tanne überdurchschnittlich häufig auf Standorten mit hohen N-Depositionen wuchsen, wo bereits ein Sättigungseffekt zu verzeichnen

ist (Aber et al 1998), und bei diesen beiden Baumarten die N-Deposition viel stärker mit der Hangneigung und der Temperatur korrelierte, was in statistischen Modellen zu wenig aussagekräftigen Koeffizientenschätzungen führen kann (Rohner et al 2015). Weshalb der Zuwachs mit zunehmendem pH abnahm, ist weniger klar. Möglicherweise rührt dieser unerwartete Effekt daher, dass flachgründige Böden über kalkhaltigem Gestein einen hohen pH-Wert, aber nur geringe Durchwurzelungstiefen aufweisen.

In der Zusammensetzung der erklärenden Variablen äusserten sich einige physiologische Eigenschaften der betrachteten Baumarten. So erwies sich beispielsweise das ETa/ETp-Verhältnis für die meisten Baumarten als relevant, jedoch nicht für die als trockenheitstolerant geltenden Waldföhren und Eichen. Zudem wies die Buche im Gegensatz zu den meisten anderen Baumarten keine Abhängigkeit von der Bestandesdichte auf, was in Anbetracht ihrer hohen Schattentoleranz plausibel ist.

Ausblick

Die im Rahmen des hier vorgestellten Projekts entwickelten statistischen Modelle bilden für die Schweizer Hauptbaumarten eine Vielzahl von Einflüssen auf den Zuwachs ab. Als nächster Schritt können diese statistischen Beziehungen im Waldentwicklungsmodell «Massimo» (Kaufmann 2001, 2011) eingebaut werden, sodass sie in Potenzialanalysen Eingang finden. Im Gegensatz zu früheren Versionen wird dadurch ermöglicht, auch Szenarien fundiert zu analysieren, die von sich ändernden Klimabedingungen ausgehen. ■

Eingereicht: 6. Mai 2015, akzeptiert (mit Review): 25. September 2015

Dank

Das hier vorgestellte Forschungsprojekt «Kli-WaWa» wurde durch das BAFU/WSL-Forschungsprogramm «Wald und Klimawandel» finanziert. Für die Zusammenarbeit bei den einzelnen Projektteilen bedanken wir uns bei Pascale Weber und Peter Waldner. Wir danken Beat Rihm für die Bereitstellung von Daten zur N-Deposition sowie Dirk Schmatz und Jan Remund für die Aufbereitung der Klimadaten.

Literatur

- ABER J, MCDOWELL W, NADELHOFFER K, MAGILL A, BERNTSON G ET AL (1998) Nitrogen saturation in temperate forest ecosystems. *BioScience* 48: 921–934.
- AKAIKE H (1973) Information theory and an extension of the maximum likelihood theory. In: Petrov BN, Csaki F, editors. Second International Symposium on Information Theory. Akademiai Kiado, Budapest.
- BIONDI F (1999) Comparing tree-ring chronologies and repeated timber inventories as forest monitoring tools. *Ecol Appl* 9: 216–227.
- BRÄNDLI UB, EDITOR (2010) Schweizerisches Landesforstinventar. Ergebnisse der dritten Erhebung 2004–2006. Birmensdorf: Eidgenöss. Forsch.anstalt WSL. 312 p.
- BRASSEL P, BRÄNDLI UB, EDITORS (1999) Schweizerisches Landesforstinventar. Ergebnisse der Zweitaufnahme 1993–1995. Bern: Haupt. 442 p.
- BRASSEL P, LISCHKE H, EDITORS (2001) Swiss National Forest Inventory: Methods and models of the second assessment. Birmensdorf: Swiss Federal Research Institute WSL. 336 p.
- BURGER M, TRUNIGER P (2006) Das intra-annuelle Wachstum von Waldföhre und Flaumeiche im Pfywald (Wallis), eine holz-anatomische und dendrochronologische Untersuchung. Zürich: ETH Zürich, Prof Waldökologie, Diplomarbeit. 61 p.
- DITTMAR C, ZECH W, ELLING W (2003) Growth variations of common beech (*Fagus sylvatica* L.) under different climatic and environmental conditions in Europe – a dendroecological study. *For Ecol Manage* 173: 63–78.
- ELLENBERG H, LEUSCHNER C (2010) Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen. Stuttgart: Ulmer. 1333 p.
- FRITTS HC (1976) Tree rings and climate. London: Academic Press. 567 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.
- KAUFMANN E (2001) Prognosis and management Scenarios. In: Brassel P, Lischke H, editors. Swiss National Forest Inventory: methods and models of the second assessment. Birmensdorf: Swiss Federal Research Institute WSL. pp. 197–206.
- KAUFMANN E (2011) Nachhaltiges Holznutzungspotenzial im Schweizer Wald. *Schweiz Z Forstwes* 162: 300–311. doi: 10.3188/szf.20111.0300
- KOHNLE U, ALBRECHT A, LENK E, OHNEMUS K, YUE C (2014) Zuwachstrends im Spiegel langfristiger Versuchsflächen in Südwestdeutschland. *Allg Forst- Jagdztg* 185: 97–117.
- LAPOINTE-GARANT MP, HUANG JG, GEA-IZQUIERDO G, RAULIER F, BERNIERS P ET AL (2010) Use of tree rings to study the effect of climate change on trembling aspen in Québec. *Glob Chang Biol* 16: 2039–2051.
- LAUBHANN D, STERBA H, REINDS GJ, DE VRIES W (2009) The impact of atmospheric deposition and climate on forest growth in European monitoring plots: an individual tree growth model. *For Ecol Manage* 258: 1751–1761.
- LÉVESQUE M, RIGLING A, BRANG P (2015) Réponse à la sécheresse de conifères indigènes et exotiques: une étude dendroécologique. *J for suisse* 166: 372–379. doi: 10.3188/szf.2015.0372
- MAHRER F, EDITOR (1988) Schweizerisches Landesforstinventar. Ergebnisse der Erstaufnahme 1982–1986. Birmensdorf: Eidgenöss. Forsch.anst Wald Schnee Landsch, Ber 305. 375 p.
- NOTHDURFT A, WOLF T, RINGELER A, BÖHNER J, SABOROWSKI J (2012) Spatio-temporal prediction of site index based on forest inventories and climate change. *For Ecol Manage* 279: 97–111.
- PINHEIRO JC, BATES DM (2000) Mixed-effects models in S and S-PLUS. New York: Springer. 528 p.
- PRETZSCH H, BIELAK K, BLOCK J, BRUCHWALD A, DIELER J ET AL (2013) Productivity of mixed versus pure stands of oak (*Quercus petraea* [Matt.] Liebl. and *Quercus robur* L.) and European beech (*Fagus sylvatica* L.) along an ecological gradient. *Eur J For Res* 132: 263–280.
- R CORE TEAM (2013) R: A language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing.
- REINEKE LH (1933) Perfecting a stand-density index for even-aged forests. *J Agricult Res* 46: 627–638.

- REMUND J, RIHM B, HUGUENIN-LANDL B (2014) Klimadaten für die Waldmodellierung für das 20. und 21. Jahrhundert. Bern: Meteotest. 38 p.
- ROHNER B, BUGMANN H, BRANG P, WUNDER J, BIGLER C (2013) Eichenrückgang in Schweizer Naturwaldreservaten. Schweiz Z Forstwes 164: 328–336.
- ROHNER B, THÜRIG E (2015) Verbesserung der Klimaabhängigkeit der Wachstumsfunktion für Szenarienanalysen der Waldentwicklung (KliWaWa). Projektschlussbericht. Birmensdorf: Eidgenöss. Forsch.anst WSL.
- ROHNER B, WEBER P, THÜRIG E (IN PRESS) Bridging tree rings and forest inventories: How climate effects on spruce and beech growth aggregate over time. For Ecol Manage.
- ROTH T, KOHLI L, RIHM B, ACHERMANN B (2013) Nitrogen deposition is negatively related to species richness and species composition of vascular plants and bryophytes in Swiss mountain grassland. Agric Ecosyst Environ 178: 121–126.
- SCHARNWEBER T, MANTHEY M, CRIEGEE C, BAUWE A, SCHRÖDER C ET AL (2011) Drought matters – declining precipitation influences growth of *Fagus sylvatica* L. and *Quercus robur* L. in north-eastern Germany. For Ecol Manage 262: 947–961.
- THIMONIER A, SCHMITT M, WALDNER P, RIHM B (2005) Atmospheric deposition on Swiss long-term forest ecosystem research (LWF) plots. Environ Monit Assess 104: 81–118.
- THORNTON PE, RUNNING SW, WHITE MA (1997) Generating surfaces of daily meteorological variables over large regions of complex terrain. J Hydrol 190: 214–251.
- THÜRIG E, KAUFMANN E, FRISULLO R, BUGMANN H (2005) Evaluation of the growth function of an empirical forest scenario model. For Ecol Manage 204: 51–66.
- WEBER P, BUGMANN H, RIGLING A (2007) Radial growth responses to drought of *Pinus sylvestris* and *Quercus pubescens* in an inner-Alpine dry valley. J Veg Sci 18: 777–792.
- WEBER P, HEIRI C, LÉVESQUE M, TROTSIUK V, WALTHERT L (2015) Zuwachs und Klimasensitivität von Baumarten im Ökogramm der kollinen und submontanen Stufe. Schweiz Z Forstwes 166: 380–388. doi: 10.3188/szf.2015.0380
- YUE C, KOHNLE U, HANEWINKEL M, KLÄDTKE J (2011) Extracting environmentally driven growth trends from diameter increment series based on a multiplicative decomposition model. Can J For Res. 41: 1577–1589.
- ZINGG A, BÜRGI A (2008) Trockenperioden seit 1900 und Waldwachstum: eine Analyse langfristiger Datenreihen. Schweiz Z Forstwes 159: 352–361. doi: 10.3188/szf.2008.0352
- ZWEIFEL R, ZIMMERMANN L, ZEUGIN F, NEWBERY DM (2006) Intra-annual radial growth and water relations of trees: implications towards a growth mechanism. J Exp Bot 57: 1445–1459.

Développement de fonctions de croissance sensibles au climat pour le modèle de scénario «Massimo»

La croissance des arbres est influencée par le climat. Face au changement climatique, il faut donc prendre en compte également les effets climatiques pour évaluer la productivité future de la forêt suisse. Pour intégrer les effets climatiques dans les fonctions de croissance du modèle «Massimo», un modèle souvent utilisé pour projeter les ressources forestières en Suisse, nous avons modélisé les impacts climatiques ainsi que d'autres impacts sur la croissance des arbres, de façon représentative pour l'ensemble de la Suisse. Dans une première étape, nous avons utilisé des données dendrochronologiques pour évaluer comment les variables climatiques pouvaient être définies. Cette analyse a montré que les moyennes annuelles des variables climatiques devaient être prises en compte pour la modélisation de l'accroissement multiannuel d'arbres individuels. Dans une deuxième étape, les données de croissance de l'Inventaire forestier suisse ont alimenté des modèles non linéaires mixtes afin d'étudier séparément chaque essence. L'assimilation inclut les variables climatiques déterminées précédemment, ainsi que de nombreuses valeurs caractéristiques des arbres, des peuplements et des sites. Les effets quantifiés dans les modèles statistiques sont tout à fait plausibles et illustrent bien les différences physiologiques entre les essences. Les modèles statistiques seront intégrés dans le modèle de développement de la forêt «Massimo». Ceci permettra de considérer sur des bases solides les scénarios dépendant de l'évolution des conditions climatiques.

Development of climate-dependent growth functions for the scenario model “Massimo”

Tree growth is substantially influenced by climatic factors. In the face of climate change, climate effects should therefore be included in estimations of Switzerland's future forest productivity. In order to include climate effects in the growth functions of the “Massimo” model, which is typically applied to project forest resources in Switzerland, we statistically modelled climate effects on tree growth representatively for Switzerland by simultaneously considering further growth-influencing factors. First, we used tree ring data to evaluate how climate variables should be defined. This analyses showed that for modelling multi-year tree growth we should use averages of whole-year variables. Second, we fitted nonlinear mixed-effects models separately for the main tree species to individual-tree growth data from the Swiss National Forest Inventory. In these models, we combined climate variables defined according to the results of the tree ring study with various further variables that characterize sites, stands and individual trees. The quantified effects were generally plausible and explained convincingly the physiological differences between the species. The statistical growth models for the main tree species will now be included in the forest scenario model “Massimo”. This will allow for founded analyses of scenarios which assume changing climatic conditions.