

Trockenperioden seit 1900 und Waldwachstum: eine Analyse langfristiger Datenreihen

Andreas Zingg
Anton Bürgi

Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (CH)*
Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (CH)

Drought periods since 1900 and growth of forest stands: an analysis of long-term data series

Drought during the vegetation period has an effect on tree growth. Using daily precipitation data and growth records from long-term research plots, we investigated what can be defined as "drought" and how strong its effect is. Dry or humid periods are defined as the deviation from the long-term daily mean of precipitation. Such periods must last at least 60 days to be considered as being decisive for tree growth. The drought values are used together with other site and stand parameters as explaining variables in a model for the basal area increment for Norway spruce (*Picea abies* [L.] H. Karst.), silver fir (*Abies alba* Mill.), European beech (*Fagus sylvatica* L.) and oak (*Quercus* L.), based on data from long-term growth and yield plots which are located in the neighbourhood of precipitation measurement stations. These models explain 55 to 89% of the variance. In drought situations basal area increment drops clearly for spruce and beech, for fir only weakly and oak shows no reaction. Furthermore, we checked if there happened additional or compulsory felling after drought periods and if the basal area growth changed significantly compared to the growth in the period before. For both it is not the case, despite distinct drought periods in the last century, especially in the 40s with the extreme year of 1947. Therefore we do not expect dramatic changes for the investigated species in similar drought situations under the prerequisite that the other conditions do not change essentially.

Keywords: drought, basal area increment, long-term data series, spruce, fir, beech, oak
doi: 10.3188/szf.2008.0352

* Zürcherstrasse 111, CH-8903 Birmensdorf, E-Mail andreas.zingg@wsl.ch

Markante Klimaereignisse, die sich auf das Wachstum von Bäumen und Waldbeständen auswirken können, sind beispielsweise Trockenperioden mit oder ohne gleichzeitige Hitze und extreme Kälteereignisse (vgl. Lenz et al 1988). Ob sie für Bäume und Waldbestände entscheidend sind, hängt ausserdem davon ab, in welcher Phase des saisonalen Baumwachstums sie sich ereignen. Früh- und Spätfröste, Trockenheit in der Phase des Dicken- oder Höhenwachstums und sonstige extreme Klimaereignisse während der Vegetationszeit sind als massgebend zu betrachten. Nicht nur für die inneralpinen Trockentäler, wo Wasserstress häufig auftritt, sondern auch für Waldbestände in den tieferen Lagen der Schweiz, also im schweizerischen Mittelland sowie in den tieferen Lagen der Voralpen und des Juras, kann das verfügbare Wasser ein Minimumfaktor für das Waldwachstum sein.

Zahlreiche Studien befassen sich mit dem Einfluss des Klimas beziehungsweise der Witterung auf das Wachstum von Einzelbäumen, in vielen Fällen mit Methoden der Jahrringforschung oder mit Messung der Umfangveränderung mit permanent

installierten Messbändern (z.B. Lenz et al 1988, Z'Graggen 1992, Dittmar et al 2002, Cherubini et al 2005, Graf Pannatier et al 2007). Da das Wachstum des Einzelbaumes aber nicht nur durch die Standortfaktoren wie das Klima beeinflusst wird, sondern auch durch seine Stellung im Bestand (Assmann 1961), haben wir uns wie Flury (1927) entschlossen, anstelle der Durchmesseränderungen den Grundflächenzuwachs der Hauptbaumarten in einem Bestand über mehrere Jahrzehnte zu betrachten. Der Grundflächenzuwachs verläuft ähnlich wie der Volumenzuwachs. Er ist für solche Untersuchungen aber besser geeignet, da es sich bei ihm um einen gemessenen Wert handelt, während der Volumenzuwachs mit Modellen (Tarifen) bestimmt wird.

Die Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) betreibt seit ihrer Gründung im Jahr 1886 ein Netz ertragskundlicher Versuchsflächen, die geeignet sind, den Einfluss von Trockenperioden auf den Grundflächenzuwachs zu untersuchen. Die Abdeckung der Periode 1900 bis 2007 mit Wachstumsdaten ist nicht konstant, zum einen, da sich das Netz der ertragskund-

lichen Versuchflächen zu Beginn der Periode noch im Aufbau befand, und zum anderen, weil die letzten Bestandesaufnahmen erst nach Durchlaufen eines gesamten Aufnahmeturnus vorliegen werden. Ziel dieser Studie ist es, die Zusammenhänge zwischen trockenen Perioden in der Vegetationszeit und dem baumartenspezifischen Wachstum von Beständen aufzuzeigen. Wir fokussieren dabei auf durchschnittliche Standorte, weshalb wir die inneralpinen Trockentäler für unsere Betrachtung weglassen, und konzentrieren uns auf die Untersuchung der Periode von 1920 bis 1990. In dieser Zeit liegen die trockenen 1940er-Jahre mit dem extremen Sommer 1947 (z.B. Pfister & Rutishauser 2000), der auch aus ertragskundlicher Sicht von Interesse ist (Zingg 1996).

Wir gehen von der Hypothese aus, dass sich mangelnde Wasserverfügbarkeit in den Zuwachsverläufen zeigt. In Aufnahmeperioden, in denen Trockenjahre vorkommen, oder solchen kurz danach sollte der Grundflächenzuwachs absinken, allerdings unterschiedlich ausgeprägt nach Region, Standort und Baumarten. Wesentlich bei der Beurteilung der Auswirkungen von Trockenperioden sind auch die Regeneration des Zuwachses und allfällige Ausfälle in den Beständen, welche sich in Zwangsnutzungen oder einer generell höheren Nutzung widerspiegeln.

Material und Methoden

Die meteorologischen Messstationen (Quelle: Meteo Schweiz), die für diese Studie beigezogen wurden, mussten Niederschlagsmessungen für die Jahre 1900 bis 2007 aufweisen und durften während dieser Zeit nicht verlegt worden sein. Die Messstationen in Tabelle 1 erfüllen mit einer Ausnahme diese Bedingungen. Für unsere Untersuchung berücksichtigten wir wegen der geografischen Lage der ertragskundlichen Versuchflächen dabei auch Stationen,

Name	Höhenlage m ü. M.	Koordinaten	Stationstyp	Mittlerer täglicher Niederschlag 1900 bis 2007 (mm/Tag)
Couvet	750	538 640/197 550	Niederschlagsstation	3.52
Payerne	450	561 770/185 570	Niederschlagsstation	2.48
Langnau i. E.	755	628 070/198 830	konventionelle Klimastation	3.60
St. Urban**	491	631 125/230 015	Niederschlagsstation	3.18
Zürich SMA*	556	685 125/248 090	automatische Station	3.00
Winterthur	510	699 230/259 430	Niederschlagsstation	3.13

Tab 1 Lage der hinzugezogenen meteorologischen Messstationen und mittlerer täglicher Niederschlag in der Zeitspanne 1900 bis 2007. * Die Station Zürich SMA wurde 1949 von der Gloriamstrasse (493 m ü. M.) um ca. 1 km an die Krähbühlstrasse (556 m ü. M.) verlegt. ** St. Urban nur bis 30.9.2006 wegen fehlender Daten im Oktober 2006. Quelle: Meteo Schweiz

die nur den Niederschlag registrieren. Wegen fehlender Temperatur- und Luftfeuchtigkeitswerte stehen deshalb an diesen Stationen keine Evapotranspirationswerte nach Primault (1962) zur Verfügung, wie sie das Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie (Meteo Schweiz; früher SMA) seit 1981 berechnet.

Als Trockenperiode wird eine Periode unterdurchschnittlicher Niederschläge bezeichnet (vgl. Kuhn 1973). Zur Bestimmung solcher Perioden glätteten wir zuerst die Niederschlagskurve, indem wir die täglichen Werte als gleitendes Mittel der letzten 30 Tage darstellten. Als «trocken» definierten wir, was aufgrund der geglätteten Kurve unter dem täglichen Durchschnitt der betrachteten Zeitperiode (in der Regel 1.1.1900 bis 31.12.2007) liegt. Liegt der geglättete Durchschnitt während mehr als 60 aufeinanderfolgenden Tagen unter dem Durchschnitt und liegt mindestens ein Teil davon im Zeitraum vom 1. April bis zum 30. September, bezeichneten wir dies als eine Trockenperiode. 60 Tage wählten wir, damit auf jeden Fall von Trockenstress ausgegangen werden darf. Zimmermann et al (2006) rechnen beispielsweise mit Trockenstress für eine Baumbestockung, wenn während 20 bis 35 Tagen kein nennenswerter Niederschlag fällt. Für diese Trockenperiode wird als Trockenheitswert der durchschnittliche tägliche Niederschlag aufgrund der effektiv gemessenen (nicht der geglätteten) Werte berechnet, für die zwischen den Trockenperioden gelegenen feuchten Perioden (die auch unterdurchschnittliche Werte annehmen können) wird analog ein durchschnittlicher Tagesniederschlag berechnet. Für diese so bestimmten Perioden wird also die negative respektive die positive Abweichung des Niederschlags vom täglichen Durchschnitt der gesamten Untersuchungsperiode berechnet. Die Höhe der Säule zeigt dabei die Abweichung vom täglichen Durchschnittsniederschlag in Millimeter. Das Ergebnis, auf der Zeitachse dargestellt, visualisiert Trocken- respektive Feuchtperioden wesentlich besser, als es die üblichen Durchschnittswerte auf monatlicher oder jährlicher Basis tun (Abbildung 1).

Für den Vergleich mit den periodischen Zuwächsen der ertragskundlichen Versuchflächen berechneten wir den Mittelwert dieser Trockenheitswerte der Vegetationszeit April bis September für die ertragskundlichen Messperioden (Trockenheitswert 1) und den Mittelwert nur der negativen Trockenheitswerte, also der eigentlichen Trockenheit (Trockenheitswert 2), sowie die Niederschlagssumme für die ganze ertragskundliche Periode (Niederschlag 1) und den Mittelwert pro Jahr der ertragskundlichen Periode (Niederschlag 2).

Die ertragskundlichen Versuchflächen wurden in einem Umkreis von 25 km um diese meteorologischen Messstationen ausgewählt. Bedingungen für die Auswahl der Versuchflächen waren eine

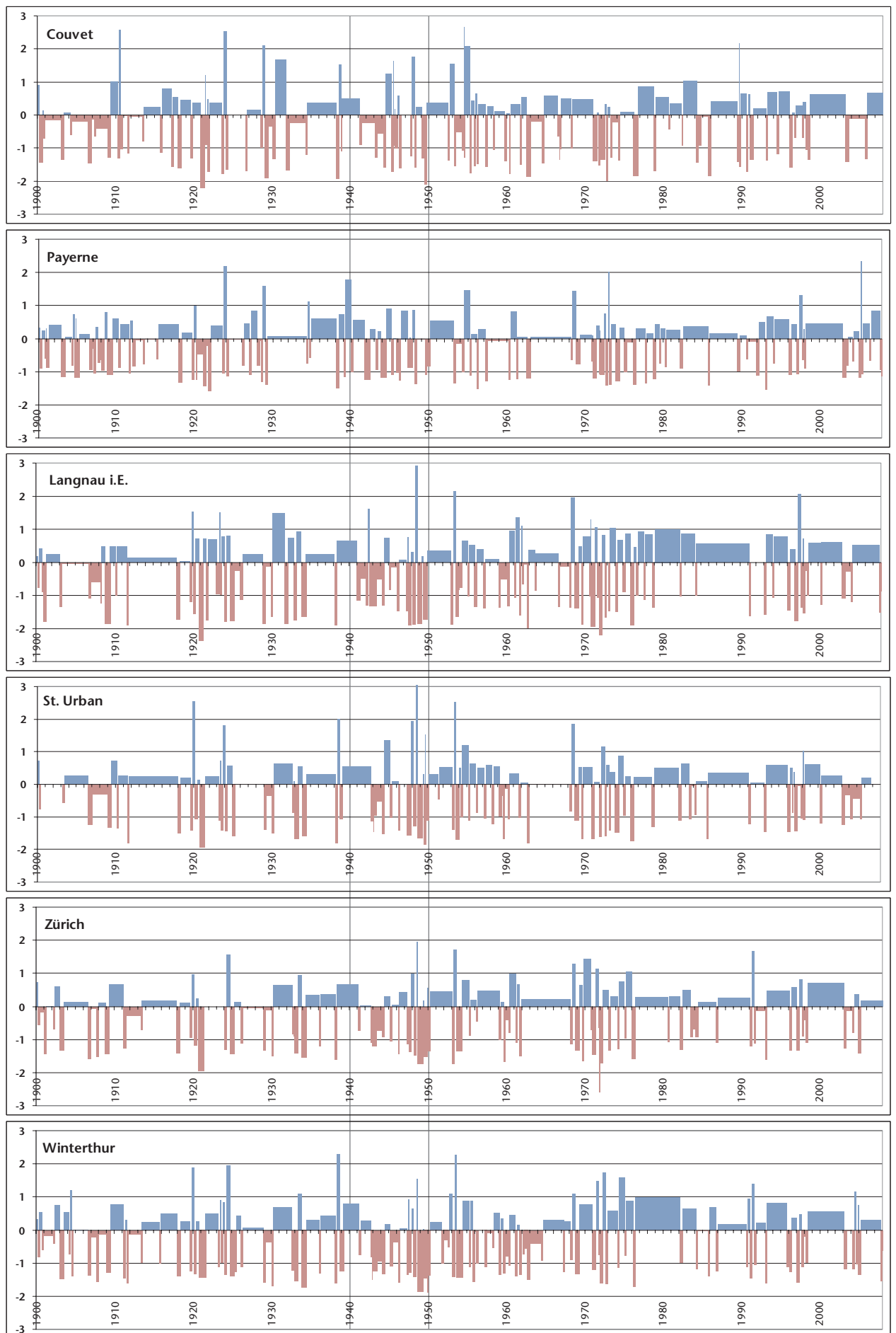


Abb 1 Trocken- und Feuchtperioden, ausgedrückt als Abweichung vom langjährigen Tagesmittel vom 1.1.1900 bis 31.12.2007. Markiert sind die Jahre 1940 und 1950. Die X-Achse ist mit dem Jahr (Jahresbeginn) beschriftet, die Y-Achse zeigt maximal ± 3 mm Abweichung des Niederschlages vom langjährigen Mittel.

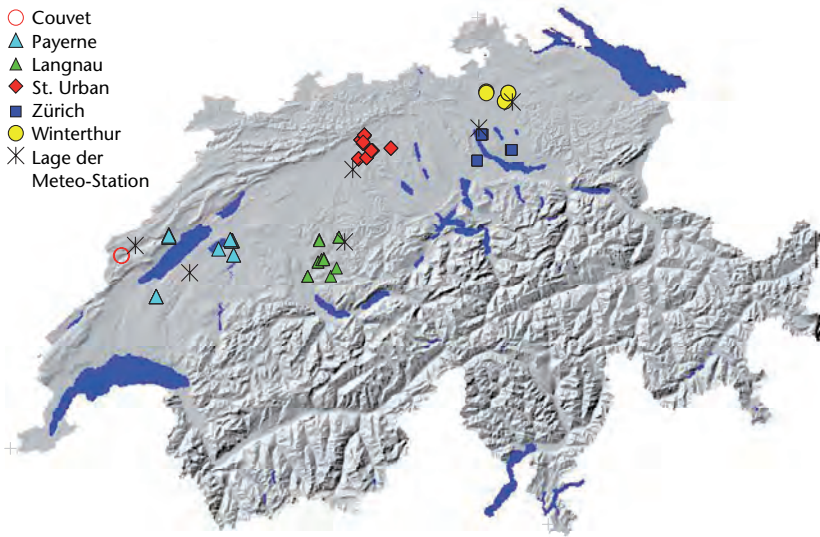


Abb 2 Lage der gewählten meteorologischen Messstationen und der Versuchsflächen, welche sich im Umkreis von 25 km um die Messstationen befinden. Reproduziert mit Bewilligung von Swisstopo (JA082265)

Beobachtungsdauer von mindestens 60 Jahren, welche die Vegetationsjahre 1940 bis 1955 einschliesst, und ein mittlerer Grundflächenanteil während der ganzen Beobachtungsperiode von mindestens 10% von mindestens einer der Hauptbaumarten Fichte (*Picea abies* [L.] H. Karst.), Tanne (*Abies alba* Mill.), Buche (*Fagus sylvatica* L.) und Eiche (*Quercus* L.). 76 Versuchsflächen entsprechen diesen Bedingungen (Abbildung 2). Diese Flächen wurden zwei Waldformen zugeteilt: den gleichförmigen und den ungleichförmigen, plenterartigen.

Der periodische Grundflächenzuwachs als Zielgrösse wurde auf jeder Versuchsfläche und pro Baumart berechnet. Dies gibt für Fichte 560 Zuwachsperioden (Periodenlänge durchschnittlich 6, minimal 2, maximal 12 Jahre), für Tanne 408 (7/4/22), für Buche 473 (7/3/22) und für Eiche 96 (9/3/22).

Als klimafremde Einflussgrössen berücksichtigten wir in den statistischen Modellen den Alterstrend, den Grundflächenanteil der Baumarten und die Bestandesdichte. Das Alter beziehungsweise ein allfälliger Alterstrend wurde über den Durchmesser des Grundflächenmittelstammes pro Baumart einbezogen. Um allfällige interspezifische Konkurrenzverhältnisse zu beschreiben, flossen der

	Couvet	Payerne	Langnau	St. Urban	Zürich	Winterthur
Couvet	1					
Payerne	0.504	1				
Langnau	0.507	0.527	1			
St. Urban	0.531	0.520	0.722	1		
Zürich	0.379	0.425	0.694	0.688	1	
Winterthur	0.480	0.427	0.637	0.697	0.713	1

Tab 2 Korrelationsmatrix nach Pearson für die jedem Tag zugeordneten Abweichungen vom langjährigen mittleren Tagesniederschlag vom 1.1.1901 bis 31.12.2007 (St. Urban nur bis 3.9.2006). Alle Korrelationen sind hoch signifikant.

Grundflächenanteil der Baumart und jener des Nadel- respektive des Laubholzes sowie die Bestandesdichte (mit der mittleren Grundflächenhaltung als Kenngrösse) ein. Zudem berücksichtigten wir den Einfluss forstlicher Eingriffe über den Grundflächenanteil des ausscheidenden Bestandes zu Beginn einer Periode. Schliesslich versuchten wir die Tatsache zu berücksichtigen, dass die Versuchsflächen nicht genau bei den meteorologischen Stationen liegen, weshalb wir die Distanz und die Höhendifferenz zwischen Messstation und Versuchsfläche für die Regression bereitstellten.

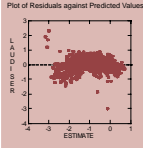
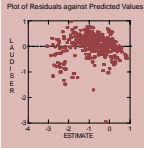
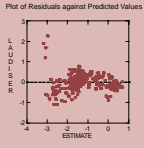
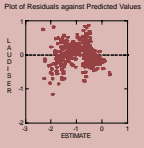
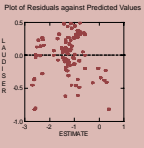
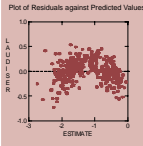
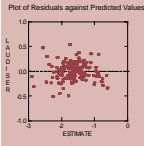
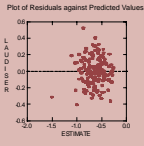
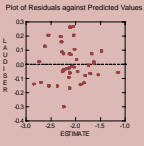
Um den Einfluss von Trockenperioden auf das Wachstum von Waldbeständen zu schätzen, rechneten wir lineare Modelle (General Linear Model, GLM) mit dem logarithmierten Grundflächenzuwachs als abhängiger und den Trockenheits-, Niederschlags- und den oben genannten klimafremden Eingangsgrössen als erklärenden Variablen. Um die Koeffizienten der ins Modell eingehenden Variablen auch in ihrem Wert vergleichen zu können, wurden die Variablen auf die Standardabweichung = 1 standardisiert. In ersten Modellrechnungen zeigte sich, dass der Trockenheitswert 1, der Niederschlagswert 1 und die Distanz zur meteorologischen Messstation in einzelnen Fällen zwar signifikante Einflussgrössen sind, aber nur kleine Koeffizienten aufweisen. Aus diesem Grund schlossen wir diese Variablen zur Vereinfachung aus dem Modell aus, was das Bestimmtheitsmass nur unwesentlich verringerte.

Um allfällige Mehrnutzungen oder Zwangsnutzungen nach Trockenperioden feststellen zu können, berechneten wir für jede einzelne Versuchsfläche und jeden Eingriff am Ende der Periode die ausscheidende Grundfläche. Da die Zwangsnutzungen aufgrund der Datenlage nicht eindeutig von den geplanten Nutzungen unterschieden werden konnten, setzten wir die Grundfläche der angezeichneten, der sogenannten zufälligen und der verschwundenen Bäume als ausscheidend in Bezug zur gesamten Grundfläche (verbleibend und ausscheidend) und berechneten diese ausscheidende Grundfläche als Mittelwert für Zeitabschnitte von fünf Jahren (z.B. 1941–1945, 1946–1950). Ausserdem berechneten wir die jeweilige reale Veränderung des Grundflächenzuwachses im Vergleich zur Vorperiode, um allfällige Zuwachseinbrüche oder Erholungsphasen bestimmen zu können.

Resultate

Trockenperioden

Die Klimadaten ergaben für die gewählten Regionen unterschiedliche Ergebnisse. Wohl liegt das betrachtete Gebiet vom Neuenburger Jura bis ins nordöstliche Mittelland in einer einheitlichen Grossklimaregion. Trotzdem ergeben sich mit der von uns

Modell A Gleichförmige Wälder	Alle Baumarten	Fichte	Tanne	Buche	Eiche
Anzahl	1103	366	220	416	101
Bestimmtheitsmass (adjusted multiple R ²)	0.776	0.789	0.795	0.767	0.826
Konstante	-1.004 ***	-1.059 ***	-0.887 ***	-0.992 ***	-1.028 ***
Trockenheitswert 2	0.096 ***	0.129 ***		0.156 ***	
Niederschlag 2	-0.074 ***	-0.115 ***	-0.087 *	-0.076 ***	-0.087 *
Durchmesser des Grundflächemittelstamms	-0.241 ***	-0.330 ***	-0.259 ***	-0.131 ***	-0.103 ***
Grundfläche der Baumart %	0.717 ***	0.632 ***	0.832 ***	0.621 ***	0.778 ***
Grundflächenanteil Laubholz	-0.222 ***	-0.407 ***	-0.204 **	-0.194 ***	-0.418 **
Mittlere Grundflächenhaltung	0.071 ***				
Grundfläche des ausscheidenden Bestandes	0.030 *				0.046 n.s.
Höhenunterschied	-0.090 ***	-0.067 ***	-0.099 *	-0.079 *	-0.551 ***
Verteilung der Residuen					
Modell P Plenterwälder					
Anzahl	357	153	164	40	
Bestimmtheitsmass (adjusted multiple R ²)	0.889	0.846	0.550	0.874	
Konstante	-0.843 ***	-0.044 n.s.	-0.555 ***	-0.764 ***	
Trockenheitswert 2	0.071 ***	0.094 ***	0.061 ***	0.059 *	
Niederschlag 2	0.046 *		0.038 n.s.	0.083 *	
Durchmesser des Grundflächemittelstamms	-0.219 ***	-0.252 ***	-0.238 ***	-0.590 ***	
Grundfläche der Baumart %	0.863 ***	1.152 ***	0.483 ***		
Grundflächenanteil Laubholz		0.573 ***	0.207 *	2.747 ***	
Mittlere Grundflächenhaltung			0.127 ***		
Grundfläche des ausscheidenden Bestandes	0.071 ***				
Höhenunterschied	-0.043 ***	-0.107 ***	-0.042 **		
Verteilung der Residuen					

Tab 3 Regressionsmodelle zur Schätzung des logarithmierten Grundflächenzuwachses, Bestimmtheitsmasse und Regressionskoeffizienten der erklärenden Variablen. In den Grafiken sind die Residuen der Modelle dargestellt. Sie sind in den meisten Fällen nicht zufällig verteilt, d.h., dass Einflussgrößen im Modell fehlen. *** = $p < 0.001$, ** = $p < 0.01$, * = $p < 0.05$, ohne Symbol = $p < 0.1$, n.s. = nicht signifikant.

gewählten Methode zur Definition von Trockenperioden unterschiedliche Muster (Tabelle 2): Mit zunehmender Distanz zwischen den meteorologischen Stationen werden die Korrelationen kleiner und nahe beieinanderliegende Stationen korrelieren besser, dies v.a. im zentralen und östlichen Mittelland.

Obschon sich die untersuchten Stationen bezüglich der Ausprägung von trockenen und feuchten Perioden unterscheiden, lassen sich doch Gemeinsamkeiten erkennen (Abbildung 1):

- Die Trockenperioden zu Beginn des 20. Jahrhunderts, Anfang der 20er-Jahre, in den 40er-Jahren sowie Ende der 60er- bis Mitte der 70er-Jahre treten an allen Stationen auf. In den 60er- und 70er-Jahren sind die Trockenperioden jedoch durch deutlich

feuchtere Perioden unterbrochen als zum Beispiel in den 40er-Jahren.

- Die bezüglich des kumulierten Niederschlagsdefizits sowie der Häufigkeit und Länge der Trockenperioden ausgeprägteste Trockenzeit im untersuchten Zeitraum dauerte von 1941 bis 1950.

- Seit Mitte der 70er-Jahre dominieren feuchtere Perioden, die nur von kurzen trockenen Episoden unterbrochen wurden.

Grundflächenzuwachs

Die Streuung des Grundflächenzuwachses lässt sich mit den gewählten Variablen je nach Modell zu 55 bis 89% erklären. Mit Ausnahme der Modelle für Tanne und Eiche in den gleichförmigen Wäldern (Modell A: Tabelle 3) ist der Trockenheits-

Abb 3 Grundfläche des ausscheidenden Bestandes, berechnet für Zeitabschnitte von fünf Jahren (die Asterisk- und Kreissymbole sind Ausreisser).

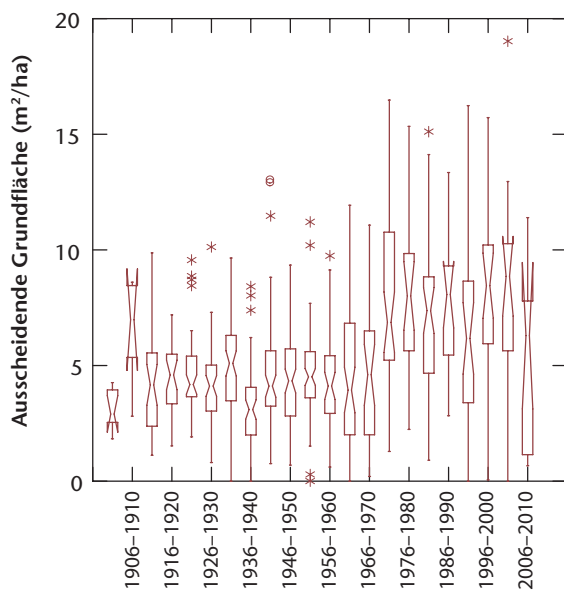
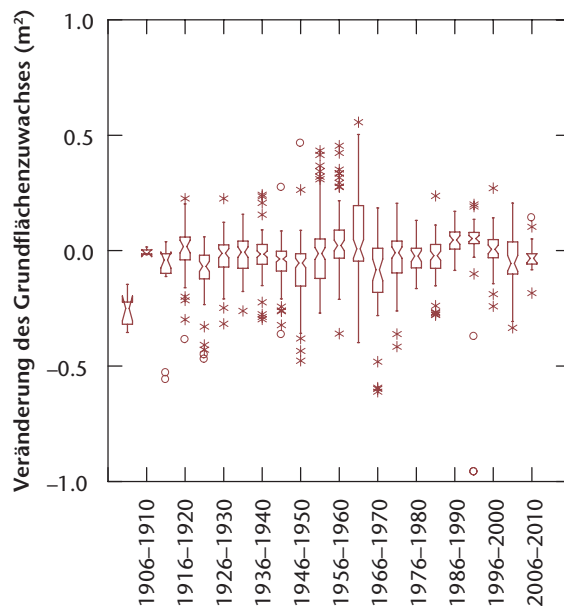


Abb 4 Absolute Veränderung des Grundflächenzuwachses im Vergleich zur Vorperiode (die Asterisk- und Kreissymbole sind Ausreisser).



wert 2 in allen Modellen eine signifikante Einflussgröße. Der Durchmesser des Grundflächenmittlammes ist in allen Modellen signifikant negativ und widerspiegelt damit den Alterstrend. Als erklärende Variablen ins Modell aufgenommen wurden mit je einer Ausnahme der Grundflächenanteil der jeweiligen Baumart und die Höhendifferenz zwischen der meteorologischen Messstation und der Versuchsfläche. Der Grundflächenanteil der Baumart geht positiv und hoch signifikant, die Höhendifferenz negativ und unterschiedlich stark signifikant in das Modell ein. Nicht bei allen Modellen berücksichtigt wurden der Laubholzanteil an der Grundfläche, die mittlere Grundflächenhaltung und der Grundflächenanteil des ausscheidenden Bestandes.

Die Grundfläche des ausscheidenden Bestandes, berechnet für Zeitabschnitte von fünf Jahren, ist in Abbildung 3 dargestellt. Von 1900 bis 1960 fal-

len einzig die Perioden 1901–1905, 1906–1910, 1931–1935 und 1936–1940 auf, wobei die Datenlage für die erste Periode schwach ist. Die Grundfläche des ausscheidenden Bestandes der Periode 1936–1940 ist im Vergleich zu den anderen eher tiefer. Die trockenen 40er-Jahre treten in diesen Daten nicht hervor. Die höheren Werte für die Grundfläche des ausscheidenden Bestandes ab 1976 sind auf die veränderte waldbauliche Behandlung der Versuchsflächen zurückzuführen. Die Veränderung des Grundflächenzuwachses im Vergleich zur Vorperiode zeigt ebenfalls keine Auffälligkeiten. Die Perioden 1921–1925, 1941–1945, 1946–1950 und 1965–1970 zeigen einen Rückgang des Grundflächenzuwachses, der allerdings in den Folgeperioden kompensiert wird.

Diese Entwicklung ist auch in den Zuwachsverläufen der einzelnen Versuchsflächen sichtbar, allerdings je nach Baumart und Bestandesstruktur unterschiedlich (Abbildung 5). In den Buchenreinbeständen in Zofingen, Aarburg, Embrach, die in den 40er-Jahren zwischen 70 und 90 Jahre alt waren, und Zollikon (120 Jahre) brach in den 40er-Jahren der Grundflächenzuwachs ein. Ein Zuwachseinbruch konnte in den Buchenmischbeständen nicht in dieser Deutlichkeit beobachtet werden, wobei der Einbruch in den Beständen mit einem Buchenanteil von mehr als 50% deutlicher ist als in den Beständen mit kleinerem Buchenanteil oder im Buchennebenbestand der Eichenfläche 005. Ähnlich wie die Buchen reagieren auch die Fichten in den Reinbeständen deutlich, wobei hier die Regeneration nach dem Einbruch zum Teil zu höheren Zuwächsen führte.

Die Eichenbestände scheinen nicht auf die Trockenheit zu reagieren. Die jüngeren sind in den 40er-Jahren und danach sogar besser gewachsen. Schwankungen sind bei den jüngeren Beständen in den 60er-Jahren und Ende der 70er-Jahre zu erkennen, allerdings durchaus im Rahmen eines anzunehmenden Alterstrends.

Der Zuwachseinbruch der 40er-Jahre ist in den Plenterwäldern mit Ausnahme einzelner Flächen, die andere Zuwachsverläufe zeigen, bei den Fichten besser sichtbar als bei den Tannen. Hingegen zeigt die Fichte in fast allen Flächen einen tendenziell zunehmenden Zuwachs. Dieser ist auch in einigen Versuchsflächen bei der Tanne zu erkennen. Die klimatische Abhängigkeit der Zuwachsverläufe scheint hier aber eher gedämpft zu sein. Rückgänge bis 70% des langjährigen mittleren Grundflächenzuwachses wurden in Buchenreinbeständen (1946–1954) und in einzelnen Fällen bei Fichten im Plenterwald (1924–1932) festgestellt. Die stärksten Zuwachseinbrüche zeigen in gleichaltrigen Beständen die Tanne (40% in der Periode 1951–1956) und die Eiche (44%, 1951–1956) sowie im Plenterwald die Tanne (30%, 1944–1949) und die Buche (54%, 1947–1953).

Diskussion

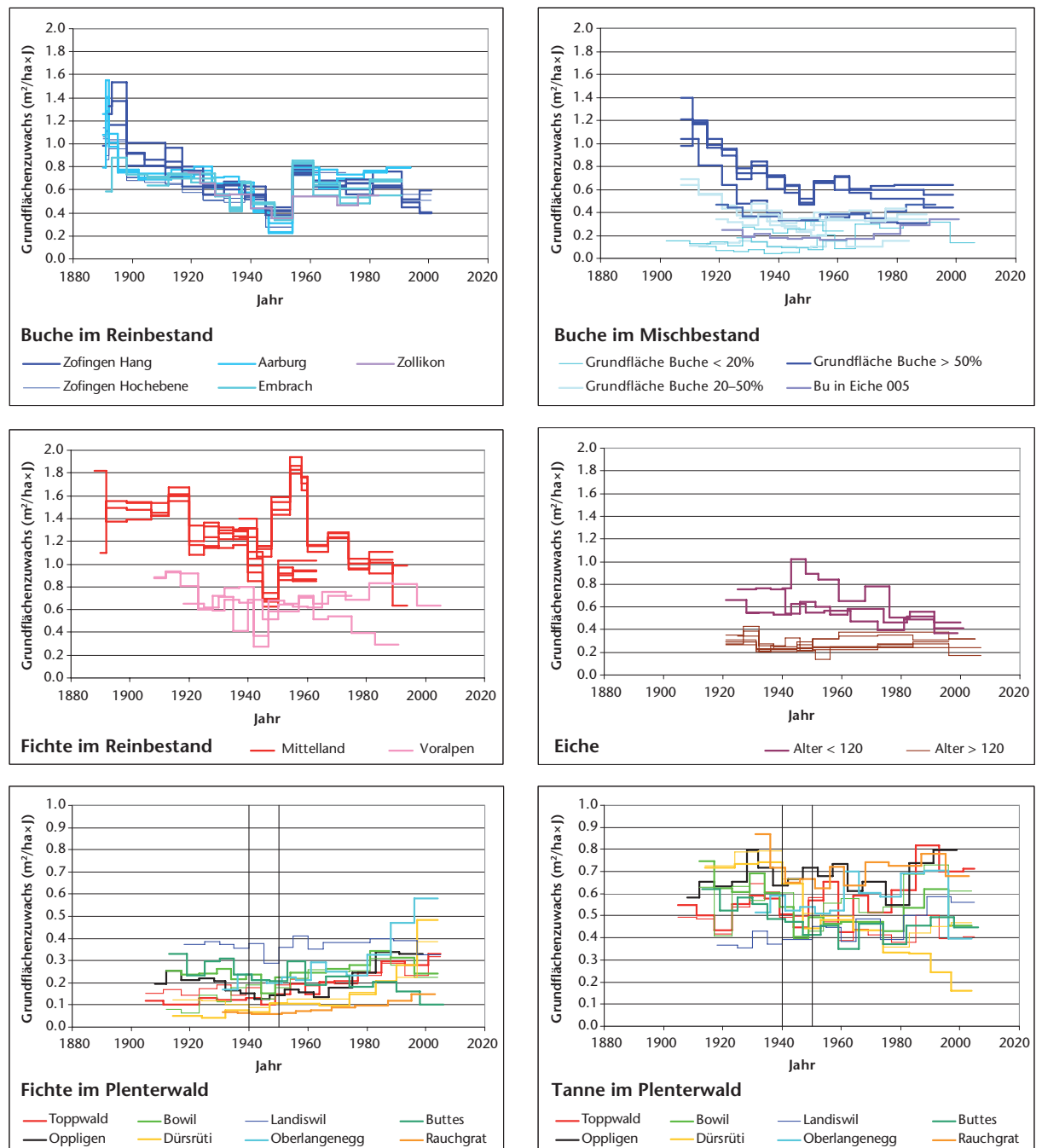
Trockenheit

Trockenheit ist nicht genau definiert. Allgemein ausgedrückt handelt es sich um die relative Abwesenheit von Wasser. Übliche monatliche bis jährliche Indikatoren dafür finden sich beispielsweise bei Gyalistras (2000). Monatliche Werte können aber durch einzelne Ereignisse, die eine trockene Periode nur statistisch unterbrechen (z.B. Gewitterregen, vgl. dazu auch Flury 1927), stark beeinflusst sein. Besser geeignet, vor allem für saisonale Kulturen in der Landwirtschaft, ist der Dürreindex (Pfister et al 2000). Dieser zeigt aber aufeinanderfolgende feuchte respektive trockene Perioden nicht in der gewünschten Klarheit. Die von Lenz et al (1988) verwendete

Methode ist sehr aufwendig und liefert eine weniger klare Unterscheidung von feuchten und trockenen Perioden. Ungeeignet für unsere Betrachtungen ist der Ariditätsindex nach de Martonne (1926), denn auch bei einer monatlichen Analyse der Ariditätswerte wird der Grenzwert für Trockenheit ≤ 20 bei den analysierten Messstationen praktisch nie erreicht. In der Schweiz herrschen, auch wenn es wenig regnet, feuchte Verhältnisse.

Der Vorteil der hier verwendeten Methode liegt in der kontinuierlichen, nicht monats- oder jahresweisen Darstellung von trockenen und feuchten Perioden. Zudem wird das Ausmass der positiven oder negativen Abweichung der Periode anhand der absoluten Abweichung vom Durchschnittswert des betrachteten Zeitraums dargestellt. Das erlaubt ei-

Abb 5 Zuwachsverläufe ausgewählter Baumarten in verschiedenen Versuchsflächen und Waldtypen.



nen raschen Überblick über einen grossen Zeitraum, was beim Interpretieren von Waldwachstumsvorgängen ein grosser Vorteil ist.

Die ausgeprägteste Häufung von Trockenperioden, sichtbar bei allen ausgewerteten Stationen, ist der Zeitraum von (1941) 1943 bis 1950. Kein anderer Zeitraum seit 1900 war nur annähernd so trocken. Die feuchteren Perioden seit Mitte der 70er-Jahre waren nur von kurzen trockenen Episoden unterbrochen. Diese dürften wegen der generell gestiegenen Temperaturen in ihren Auswirkungen etwas schwerer wiegen, als unsere Darstellung es erwarten lässt. Dies ändert aber nichts daran, dass die letzten drei Jahrzehnte, der Jahrhundertsommer 2003 dabei eingeschlossen, für den Wasserhaushalt der Bäume günstiger waren als die Zeit von Beginn des 20. Jahrhunderts bis in die 1970er-Jahre. Die feuchteste Periode, und damit die für das Baumwachstum vorteilhafteste, dauerte von (1977) 1979 bis 1990, trotz anderen Beurteilungen (z.B. Häsler & Böhm 1996). Die Trockenperiode von 2003 bis 2005 fällt als Ereignis nicht speziell auf, obschon es sich auch um ein deutliches Signal handelt. Es ist also mit den hier untersuchten Niederschlagsdefiziten nicht zu erklären, warum der Käferholzanfall von 1943 bis 1950 nur gerade etwa 800 000 m³ betrug (Pfister et al 1988), währenddem zwischen 2000 und 2007 mehr als 8.5 Mio. m³ Käferholz anfielen (Forster et al 2008, Waldschutz Schweiz 2008). Zwar war der Sommer 2003 der wärmste seit Messbeginn (Schär et al 2004, Bader 2004), aber die Trockenheit im Jahre 1947 war ausgeprägter (Bader 2004) und die Temperatur war nur wenig tiefer als 2003. Denkbar ist, dass die weniger konsequente Käferbekämpfung zum deutlich höheren Käferholzanfall wesentlich beigetragen hat (Forster & Meier 2008).

Grundflächenzuwachs

Von allen Variablen, die in die Regression mit einbezogen wurden, trägt die Wasserversorgung, ausgedrückt durch den Trockenheitswert 2 und den mittleren Niederschlag in der Vegetationsperiode (Niederschlagswert 2), zur Erklärung des Grundflächenzuwachses auf Bestandesebene bei. Wenn der Trockenheitswert 2 nicht ins Modell einbezogen wird, wie bei Tanne und Eiche in den gleichförmigen Beständen, bleibt der Niederschlag meist schwach oder nicht signifikant im Modell. Wasser spielt, wie erwartet, in den tieferen Lagen eine wichtige Rolle für das Baumwachstum (Z'Graggen 1992). Wesentlich für die Wasserversorgung der Bäume sind zudem die physikalischen Bodeneigenschaften. Da für diese Studie solche Daten nicht zur Verfügung standen, sind die Resultate diesbezüglich entsprechend vorsichtig zu interpretieren.

Die Ergebnisse für alle anderen gewählten Variablen entsprechen ebenfalls dem Stand des Wissens und überraschen nicht: Mit zunehmendem

Alter – hier dargestellt über den Durchmesser des Grundflächenmittelstamms – nimmt der Zuwachs ab, ebenso mit zunehmender Höhenlage, hier als Differenz der Höhenlage der Versuchsflächen zur meteorologischen Messstation ausgedrückt. Der Anteil der jeweiligen Baumart und die Mischung wurden zwar nicht in jedem Fall ins Modell einbezogen, aber wo sie einflossen, zeigen sie, wie auch der Durchmesser des Grundflächenmittelstammes, grössere Koeffizienten als die Wasserversorgung. Die Bestandesdichte (mittlere Grundflächenhaltung) und die Grundfläche des ausscheidenden Bestandes wurden nur in einzelnen Fällen im Modell berücksichtigt und tragen im Vergleich zu den anderen Variablen relativ wenig zur Erklärung bei.

In den gleichförmigen Beständen (Modell A) ergeben sich für Fichte und Buche signifikante Einflüsse der Trockenheit (Trockenheitswert 2), während in den Modellen für Tanne und Eiche diese Variable nicht berücksichtigt wird. In den ungleichförmigen Beständen (Modell P) sind die Koeffizienten dieser Variablen bei Fichte höher als bei Buche und Tanne, im gleichförmigen (Modell A) bei Buche höher als bei Fichte. Der Grundflächenzuwachs von Fichte und Buche scheint aufgrund dieser Daten stärker durch Wassermangel beeinflusst zu werden als bei der Tanne und der Eiche. Die Eiche stockt allerdings in der Regel auch auf besser wasserversorgten Standorten (vgl. dazu Kuhn 1973). Diese Ergebnisse decken sich mit den Ergebnissen von Flury (1927) und Ellenberg (1996), welche der Fichte eine sehr grosse Dürreempfindlichkeit zuschreiben, der Buche eine grosse, der Tanne eine mittelmässige und den Eichen eine mittelmässige (*Quercus petraea* [Matt.] Liebl., Traubeneiche) beziehungsweise sehr geringe (*Quercus robur* L., Stieleiche). Aufgrund der Abbildung 5 scheint es auch so, dass die Reaktion auf Trockenheit in Mischbeständen moderater ausfällt. Dies müsste aber vertieft untersucht werden.

Aufgrund der Analyse des ausscheidenden Bestandes und der Veränderung des Grundflächenzuwachses im Vergleich zur Vorperiode kann auf keine langfristigen Zuwachsdpressionen nach Trockenheit geschlossen werden (vgl. dazu Dittmar et al 2002). Unterschiedliches Verhalten der Baumarten, das allerdings noch im Zusammenhang mit Standorteigenschaften überprüft werden müsste, ist jedoch nicht auszuschliessen.

Folgerungen

Fehlendes Wasser beeinträchtigt das Wachstum von Waldbeständen, und zwar bei Fichten und Buchen deutlicher als bei Tannen und Eichen. Im ganzen betrachteten Zeitraum von 1900 bis 2007 sind die Jahre 1941 bis 1950 weitaus die trockensten, wobei regionale Unterschiede in der Ausprägung be-

obachtet werden können. Bei keiner der untersuchten Baumarten konnten Mehrnutzungen respektive Ausfälle als Folge der gut identifizierbaren Trockenperioden beobachtet werden. Solche müssen somit auch in Zukunft auf Standorten wie den hier untersuchten bei moderatem Temperaturanstieg nicht erwartet werden. Die wesentlich höheren Zwangsnutzungen in den Jahren 1999 bis 2003 können aufgrund der hier präsentierten Daten kaum allein auf die Trockenheit zurückgeführt werden. In Frage dafür kommen insbesondere andere Waldstrukturen (höhere Vorräte, dunklere Wälder, extensivere Bewirtschaftung), veränderte Stoffflüsse (z.B. Stickstoffeinträge), aber auch die im Mittel gestiegenen Temperaturen. Forster & Meier (2008) erwähnen als Grund auch veränderte Forstschutzstrategien. Dass sich in Zukunft trockene Perioden in Kombination mit weiter steigenden Temperaturen deutlicher als in den vergangenen 100 Jahren auf den Grundflächenzuwachs auswirken werden, ist zwar zu vermuten, lässt sich aber aus unseren Daten nicht ableiten.

Daraus folgt, dass ohne genauere und gesicherte Kenntnisse des prognostizierten Klimawandels für die Schweiz und für die hier betrachteten Regionen keine Aussagen zur zukünftigen Baumartenwahl möglich sind (vgl. dazu Rennenberg et al 2004 und Ammer et al 2005). Die im 4. Sachstandsbericht des Uno-Klimarates (IPCC 2007) enthaltenen Aussagen gelten nur auf kontinentaler Ebene als gesichert. Das OcCC (2007) erwartet für die Nordschweiz keine Niederschlagsveränderungen in den Monaten März bis Mai und eine Abnahme der Niederschläge um 17% in den Monaten Juni bis August bis ins Jahr 2050. Für die Station Bern-Liebefeld werden im selben Bericht für das Jahr 2050 und die Monate Juni bis August immer noch rund 90 mm Niederschlag pro Monat prognostiziert, was im Bereich des mittleren täglichen Niederschlages der von uns beigezogenen Stationen liegt (Tabelle 1).

Es ist zu vermuten, dass die heute in der Schweiz vorhandenen Baumarten seit ihrer Einwanderung nach der letzten Eiszeit unterschiedlichen klimatischen Epochen ausgesetzt waren und damit möglicherweise auch zukünftigen Veränderungen zu begegnen vermögen respektive dass der Wald diese Veränderungen in kurzer Zeit bewältigen kann, indem er seine Baumartenzusammensetzung ändert (Wohlgemuth et al 2006). Diese Fähigkeiten können mit waldbaulichen Verfahren unterstützt und damit Risiken vermindert werden (Brang et al 2008, dieses Heft). So sind Mischbestände Reinbeständen in der Regel vorzuziehen, wobei die Baumartenanteile durchaus stärker wirtschaftlichen Gesichtspunkten folgen können, als dies von Natur aus der Fall wäre (vgl. dazu Flury 1927). Im Weiteren ist Naturverjüngung mit entsprechender Baumartenwahl Kunstverjüngungen vorziehen, da damit der natürlichen Anpassung durch Auslese vermutlich besser Rechnung

getragen wird. Soll gepflanzt werden, ist nach einer gründlichen Standortanalyse, unter Einbezug möglicher Auswirkungen von klimatischen Veränderungen, die Wahl der geeigneten Provenienzen sehr sorgfältig vorzunehmen. Dies gilt für alle Baumarten, auch für bezüglich Trockenheit scheinbar robustere Baumarten wie die Eiche. ■

Eingereicht: 10. Mai 2008, akzeptiert (mit Review): 10. September 2008

Literatur

- AMMER C ET AL (2005) Zur Zukunft der Buche (*Fagus sylvatica* L.) in Mitteleuropa. Kritische Anmerkungen zu einem Beitrag von Rennenberg et al (2004). Allg Forst Jagdztg 176 (4): 60–67.
- ASSMANN E (1961) Waldertragskunde. München: BLV. 490 p.
- BADER S (2004) Die extreme Sommerhitze im aussergewöhnlichen Witterungsjahr 2003. Zürich: Meteo Schweiz, Arbeitsbericht 200. 23 p.
- CHERUBINI P ET AL (2005) Tree rings predict which trees will survive the next drought and which will die: a case study from South Tirol (Italy). Int For Rev 7 (5): 98.
- DE MARTONNE E (1926) Une nouvelle fonction climatologique: L'indice d'aridité. Météorologie 2: 449–458.
- DITTMAR C, ZECH W, ELLING W (2002) 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 (1996) Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen. Stuttgart: Ulmer, 5 ed. 1097 p.
- FLURY P (1927) Über den Einfluss von Trockenperioden auf das Bestandeswachstum. Mitt Eidgenöss Forsch.anst Wald Schnee Landsch 14 (2): 251–292.
- FORSTER B, MEIER F, BRÄNDLI UB (2008) Vorratsabbau – auch durch Sturm und Käfer. Wald Holz 89 (3): 52–54.
- FORSTER B, MEIER F (2008) Sturm, Witterung und Borkenkäfer. Risikomanagement im Forstschutz. Birmensdorf: Eidgenöss Forsch.anst Wald Schnee Landsch, Merkbl Prax 44: 8 p.
- GRAF PANNATIER E, DOBBERTIN M, SCHMITT M, THIMONIER A, WALDNER P (2007) Effects of the drought 2003 on forests in Swiss Level II plots. Schr Forstl Fak Univ Gött Niedersächs forstl Vers.anst 142: 128–135.
- GYALISTRAS D (2000) Trockenheit in der Schweiz: Trends im 20. Jahrhundert und Szenarien für die Zukunft. Unterlagen zum OcCC/ProClim-Workshop vom 4. April 2000 in Bern. Bern: Univ Bern, Historisches Inst. 13 p.
- HÄSLER R, BÖHM J (1996) Wald im Klimastress. Wald Holz 77 (9): 32–35.
- IPCC (2007) Climate change 2007. Synthesis Report of the IPCC Fourth Assessment Report. Cambridge: Cambridge Univ Press. 104 p.
- KUHN N (1973) Frequenzen von Trockenperioden und ihre ökologische Bedeutung. Birmensdorf: Eidgenöss Forsch. anst Wald Schnee Landsch, Ber 116. 42 p.
- LENZ O, NOGLER P, BRÄKER OU (1988) L'évolution du temps et le dépérissement du Sapin blanc dans la région de Berne. Birmensdorf: Eidgenöss Forsch.anst Wald Schnee Landsch, Ber 303. 44 p.
- OCCC (2007) Klimaänderung und die Schweiz 2050. Bern: ProClim. 168 p.

- PFISTER C, BÜTIKOFER N, SCHULER A, VOLZ R (1988) Witterungs-extreme und Waldschäden in der Schweiz. Eine historisch-kritische Untersuchung von Schadenmeldungen aus schweizerischen Wäldern in ihrer Beziehung zur Klimabelastung, insbesondere durch sommerliche Dürreperioden. Bern: Bundesamt Forstwesen. 70 p.
- PFISTER C, RUTISHAUSER M (2000) Dürresommer im Schweizer Mittelland seit 1525. Unterlagen zum OcCC/ProClim-Workshop vom 4. April 2000 in Bern. Bern: Univ Bern, Historisches Inst. 15 p.
- PRIMAULT B (1962) Du calcul de l'évapotranspiration. Arch Meteor Geophys B 12 (1): 124–150.
- RENNENBERG H, SEILER W, MATYSSEK R, GESSLER A, KREUZWIENER J (2004) Die Buche (*Fagus sylvatica* L.) – ein Waldbaum ohne Zukunft im südlichen Mitteleuropa? Allg Forst Jagdztg 175: 210–224.
- SCHÄR C ET AL (2004) The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. Nature 427: 332–336.
- WALDSCHUTZ SCHWEIZ (2008) Waldschutz Aktuell 1/2008. 2 p. www.wsl.ch/forschung/forschungunits/walddynamik/waldschutz/wsinfo/wsaktuell/wsaktuell32d.pdf (23.8.2008).
- WOHLGEMUTH T, BUGMANN H, LISCHKE H, TINNER W (2006) Wie rasch ändert sich die Waldvegetation als Folge von raschen Klimaänderungen? In: Wohlgemuth T, editor. Wald und Klimawandel. Birmensdorf: Eidgenöss. Forsch. anst. Wald Schnee Landsch, Forum Wissen. pp. 7–16.
- Z'GRAGGEN S (1992) Dendrohistometrisch-klimatologische Untersuchung an Buchen (*Fagus sylvatica* L.). Basel: Univ Basel, PhD-thesis. 167 p.
- ZIMMERMANN S, LUSTER J, BLASER P, WALTHERT L, LÜSCHER P (2006) Waldböden der Schweiz. Band 3: Region Mittelland und Voralpen. Bern: Hep. 848 p.
- ZINGG A (1996) Diameter and basal area increment in permanent growth and yield plots in Switzerland. In: Spiecker H, Mielikäinen K, Köhl M, Skovsgaard JP, editors. Growth trends in European forests. Berlin: Springer, pp. 239–265.

Trockenperioden seit 1900 und Waldwachstum: eine Analyse langfristiger Datenreihen

Trockenheit während der Vegetationsperiode wirkt sich auf das Wachstum der Bäume aus. Wir untersuchten anhand von täglichen Niederschlagswerten und Daten von langfristig beobachteten Versuchsflächen der Waldwachstumsforschung, wie «Trockenheit» definiert werden kann und wie stark sich diese auswirkt. Trockene beziehungsweise feuchte Perioden werden als Abweichung vom langjährigen täglichen Niederschlagsmittel definiert, wobei dies während mindestens 60 Tagen der Fall sein muss, damit sie für die Bäume als massgeblich angenommen werden. Die Trockenheitswerte werden zusammen mit anderen Standort- und Bestandesparametern in einem Modell als erklärende Variablen für den periodischen Grundflächenzuwachs der Baumarten Fichte (*Picea abies* [L.] H. Karst.), Tanne (*Abies alba* Mill.), Buche (*Fagus sylvatica* L.) und Eiche (*Quercus* L.), ermittelt auf ertragskundlichen Versuchsflächen im Umkreis der Niederschlagsmessstationen, verwendet. Mit dem Modell sind zwischen 55 und 89% der Varianz erklärbar. In Trockenperioden sinken die Grundflächenzuwächse von Fichte und Buche deutlich, jene von Tanne nur wenig, und die Eiche zeigt keine Reaktion. Im Weiteren untersuchten wir, ob nach Trockenperioden zusätzliche Nutzungen oder Zwangsnutzungen stattfanden und ob sich die Zuwächse gegenüber den Vorjahren im Durchschnitt wesentlich verändert haben. Beides war nicht der Fall, trotz der ausgeprägten Trockenperioden im letzten Jahrhundert, im Speziellen in den 40er-Jahren mit dem Extremjahr 1947. Unter der Voraussetzung, dass die übrigen Bedingungen sich nicht wesentlich verändern, sind aufgrund dieser Ergebnisse bei ähnlichen Trockensituationen keine dramatischen Änderungen für die untersuchten Baumarten zu erwarten.

Périodes de sécheresse depuis 1900 et croissance des peuplements forestiers: analyse des données sur le long terme

Une sécheresse pendant la période de végétation a une influence sur la croissance des arbres. Sur la base des données pluviométriques journalières et des données issues d'essais de croissance forestière à long terme nous avons étudié comment la sécheresse peut être définie et quels sont ses effets. Les périodes sèches ou humides sont définies à l'écart par rapport aux moyennes pluviométriques journalières de longue date. Elles doivent de plus durer au moins 60 jours afin de pouvoir être considérées comme déterminantes pour la croissance des arbres. Ces données sont utilisées dans un modèle aux côtés d'autres paramètres décrivant la station et le peuplement, comme variables expliquant l'accroissement en surface terrière des essences suivantes: l'épicéa (*Picea abies* (L.) H. Karst.), le sapin (*Abies alba* Mill.), le hêtre (*Fagus sylvatica* L.) et le chêne (*Quercus* L.). L'accroissement en surface terrière est établi sur des placettes de production forestière aux alentours des stations de mesures pluviométriques. Ce modèle permet d'expliquer 55 à 89 % de la variance. En situation de sécheresse, l'accroissement en surface terrière baisse considérablement pour l'épicéa et le hêtre; la réaction est faible pour le sapin, et le chêne semble ne pas être concerné. Puis, nous avons cherché si des exploitations additionnelles ou forcées avaient lieu après des périodes de sécheresse et si les accroissements présentaient, en moyenne, des différences notables par rapport aux années précédentes. Cela n'est pas le cas, malgré les périodes marquées de sécheresse du siècle dernier, notamment pendant les années 1940 avec l'année extrême de 1947. On peut supposer sur la base de ces résultats que, si les autres conditions n'ont pas fondamentalement évolué, aucune modification dramatique n'est à redouter pour les essences étudiées lors de situations similaires de sécheresse.