

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

Herausgeber: Schweizerischer Forstverein

Band: 171 (2020)

Heft: 5

Artikel: Auswirkungen des Trockensommers 2018 auf Flächen der Interkantonalen Walddauerbeobachtung

Autor: Braun, Sabine / Witte, Lucienne C. de / Hopf, Sven E.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1097306>

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: 02.05.2026

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

Auswirkungen des Trockensommers 2018 auf Flächen der Interkantonalen Walddauerbeobachtung

Sabine Braun

Institut für Angewandte Pflanzenbiologie AG (CH)*

Lucienne C. de Witte

Institut für Angewandte Pflanzenbiologie AG (CH)

Sven E. Hopf

Institut für Angewandte Pflanzenbiologie AG (CH)

Auswirkungen des Trockensommers 2018 auf Flächen der Interkantonalen Walddauerbeobachtung

Die Interkantonale Walddauerbeobachtung untersucht seit 1984 die Waldgesundheit an Buchen, Fichten und Eichen in heute 185 Beobachtungsflächen in der Schweiz. Sie ist ein geeignetes Instrument, um schleichende Veränderungen dieser Wälder zu dokumentieren. Aktuell hilft sie, die Reaktionen der Bäume auf den Trockensommer 2018 zu beobachten und Unterschiede zwischen Baumarten und zwischen Regionen festzustellen. Trockenheitsindikatoren wie die minimale Standortwasserbilanz zeigen, dass das Jahr 2018 im Vergleich zu 2003 nicht trockener war. Jedoch folgte das Jahr 2018 auf eine Reihe trockener Jahre. Die Folgeschäden, die 2019 zutage traten, überstiegen alle bisherigen Beobachtungen auf dem Messnetz. Der Anteil von Buchen mit einer Kronenverlichtung von über 60% war sechsmal höher als im Mittel der gesamten Beobachtungszeit. In einigen Flächen waren bis zu 41% der Buchen zu mehr als 60% verlichtet. Die Buchenmortalität war 2018 und 2019 um das Vier- bis Fünffache erhöht. Auf Flächen mit mangelhafter Phosphorversorgung war die Erhöhung deutlich stärker. Bei den Fichten stieg die Mortalität durch Buchdruckerbefall bis zum Herbst 2019 auf einen Rekordwert von 4.9% und lag damit um ein Vielfaches höher als nach dem Hitzesommer 2003. Stiel-, Trauben- und Flaumeiche zeigten keine Vitalitätseinbusen, die über die bisherigen Erfahrungen hinausgingen. Die Flaumeiche war jedoch im Vergleich zur Traubeneiche stärker verlichtet. Färbungsversuche der Leitgefäße und Messungen des Wassergehalts an Buchen- und Eichenästen zeigten, dass bei der Buche Trockenheit im Vorjahr die Aktivität der Leitgefäße vermindert und den Wassergehalt negativ beeinflusst, bei den Eichen jedoch nicht. Das ist ein wichtiger Hinweis darauf, dass die Schäden 2019 nicht allein die Folge der extremen Trockenheit 2018, sondern vielmehr das Ergebnis mehrerer vorangegangener Trockenjahre waren.

Keywords: drought, crown defoliation, mortality, phosphorus, cavitation

doi: 10.3188/szf.2020.0270

* Benkenstrasse 254a, CH-4108 Witterswil, E-Mail sabine.braun@iap.ch

Das Jahr 2018 zeichnete sich durch eine langanhaltende Trockenheit aus und gehört mit 2003 und 2015 zu den Hitzesommern der letzten beiden Jahrzehnte (MeteoSchweiz 2018). 2018 war es bereits im April trockener als im langjährigen Durchschnitt. Der direkte Effekt des Trockenstresses war eine verfrühte Laubverfärbung vor allem bei den Buchen. Eine solche war stellenweise bereits Ende Juli deutlich sichtbar und wurde in den Medien kommentiert (Amt für Wald beider Basel 2018,¹ Wohlgemuth et al 2018). Sogar bei den Eichen, die eigentlich als relativ trockenheitstolerant gelten, kam es im August stellenweise zu sichtbaren Trockenheitsschäden, etwa im Hardwald bei Muttenz (BL). Bei den Fichten trat ab Ende des Sommers vermehrt der Buchdrucker (*Ips typographus*) auf. Laut dem Bun-

desamt für Umwelt waren die auch sonst niederschlagsarmen Gebiete der Nordschweiz und des Kantons Jura besonders stark betroffen (BAFU 2019).

Während die im Laufe des Spätsommers 2018 beobachteten Schäden – vorzeitige Herbstverfärbung, Braunverfärbung und Blattfall – in ihrer Art den Erfahrungen aus früheren Trockenjahren entsprachen (BAFU 2019), zeugen die Medienberichte aus den Kantonen Basel-Landschaft, Jura und Solothurn von einem völlig unerwarteten Ausmass der Folgeschäden im Sommer 2019.² Viele der trocken-

¹ AMT FÜR WALD BEIDER BASEL (2018) Trockenheitsschäden an Buchen und anderen Laubbäumen. Medienmitteilung vom 23. Juli 2018.

² LE TEMPS (2019) Le Jura, en situation de catastrophe forestière. 8 juillet 2019.



Abb 1 Schädigung ganzer Buchenkronen im August 2018 im Hardwald bei Muttenz (BL).

heitsgeschädigten Buchen trieben nicht mehr oder nur noch teilweise aus. Regional versuchten Forstbetriebe, die Schäden zu beziffern.³

Eine zentrale Fragestellung dieser Arbeit ist es, die nach der Trockenheit 2018 sichtbaren Schäden (Abbildung 1) für die Baumarten auf den Flächen des Interkantonalen Walddauerbeobachtungsprogramms zu quantifizieren und sie mit den Folgeschäden der extremen Trockenheit 2003 zu vergleichen. Zudem werden unter Einbezug von Baum- und Klimadaten mögliche Ursachen für die Schädigung der Bäume und regionale Unterschiede durch statistische Auswertungen untersucht. Schliesslich werden mögliche Zusammenhänge im Waldökosystem und unterschiedliche Lebensstrategien der Bäume näher diskutiert.

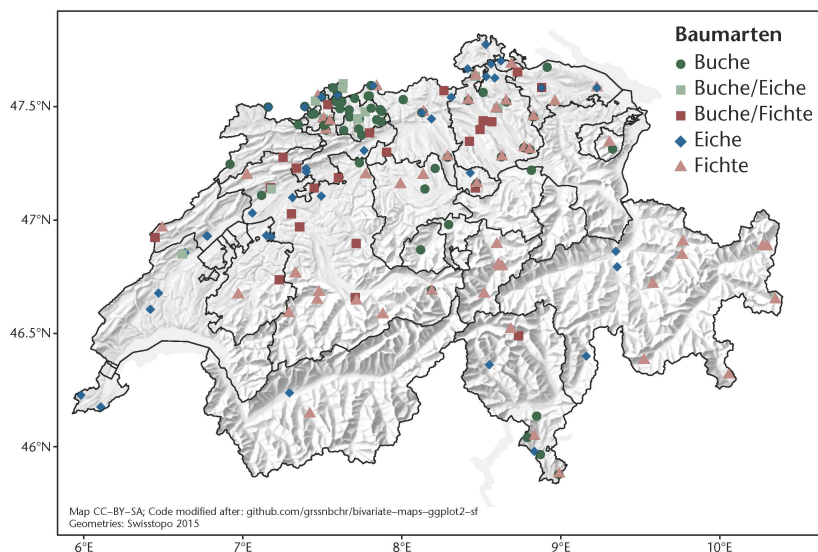


Abb 2 Flächennetz der Interkantonalen Walddauerbeobachtung, Stand 2019, unterteilt nach beobachteter Baumart. Baumarten in der gleichen Zeile bezeichnen Mischflächen.

Material und Methoden

Flächennetz

Das Institut für Angewandte Pflanzenbiologie (IAP) betreibt seit 1984 die Interkantonale Walddauerbeobachtung im Auftrag der Kantone Aargau (AG), Bern (BE), Basel-Landschaft (BL), Basel-Stadt (BS), Graubünden (GR), Solothurn (SO), Thurgau (TG), und Zürich (ZH) sowie der Zentralschweizer Umweltämter. Das Netzwerk umfasst aktuell 185 Flächen, wobei der Fokus auf den Baumarten(gruppen) Buche, Eiche und Fichte liegt (Abbildung 2). So sind im Netzwerk 62 reine Buchenflächen, 52 reine Fichtenflächen und 39 reine Eichenflächen sowie 32 gemischte Flächen (9 Buche/Eiche, 22 Buche/Fichte, 1 Buche/Fichte/Eiche) enthalten. Bei der Buche und der Fichte müssen auf jeder Fläche mindestens 60 Individuen vorhanden sein, bei den Eichen mindestens 35. Kluppschwelle ist 20 cm. Die Flächengrösse liegt zwischen 0.06 und 2 ha. Flächen ausserhalb der Trägerkantone wurden eingerichtet, wenn sie zur Abdeckung von Gradienten (Stickstoff, Trockenheit, Ozon, Bodenversauerung) nötig waren oder, im Fall von Eichenflächen, zur Auffindung geeigneter Bestände. Im September 2019 umfassten die Flächen insgesamt 5806 Buchen, 4841 Fichten und 1867 Eichen (240 Flaum-, 610 Stiel-, 990 Traubeneichen und 27 Eichen ohne genaue Artzuordnung). Bestände werden in Abhängigkeit von waldbaulichen Massnahmen und natürlichen Veränderungen (Sturmereignisse und Absterben) verjüngt, sodass das Bestandesalter nicht linear ansteigt. Trotzdem

³ AMT FÜR WALD BEIDER BASEL (2019) Folgen der Trockenheit 2018 – aktuelle Bilanz der Schäden in den Baselbieter und Basler Wäldern. Medienmitteilung vom 5. Juli 2019.

wird bei jeder statistischen Analyse überprüft, ob eine Alterskorrektur notwendig ist.

Auf den Beobachtungsflächen werden jährlich im Sommer die Kronenverlichtung und die Kronenvergilbung aufgenommen. Alle vier Jahre wird der Stammzuwachs durch Kluppierung auf 1.3 m Höhe ermittelt. Ebenfalls alle vier Jahre werden für die Analyse von Nährstoffen, Fruchtbehang und Blattphänologie mit dem Helikopter Äste von je acht Bäumen pro Baumart und Fläche geerntet. Die letzte Ernte erfolgte im Sommer 2019, zwischen dem 23. Juli und dem 3. August.

Kronenverlichtung und Mortalität

Kronenverlichtung, Kronenvergilbung und Ausfälle (Mortalität, Sturmschäden) werden jährlich zwischen Mitte Juli und Mitte August (Laubholz) bzw. Ende August (Fichten) auf den Beobachtungsflächen erhoben. Die Kronenverlichtung wird in 5%-Stufen geschätzt und orientiert sich an den Verlichtungsstufen von ICP Forests – einem Arbeitsprogramm der UNECE-Konvention über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigungen (ICP Forests 2016). Demnach gelten Bäume mit einer Kronenverlichtung von mehr als 25% als gestresst. Eine Verlichtung von mehr als 60% wird als starke Schädigung eingestuft. Auch die Kronenvergilbung wird in 5%-Stufen von 0 bis 100% eingeschätzt. Vor Beginn jeder Aufnahmesaison erfolgt ein Abgleich der Bonitierungen innerhalb des Teams (Bonitierung einiger Standorte durch alle Beteiligten). Anschliessend wird jeweils ein Drittel der Bäume pro Fläche unabhängig durch zwei Personen eingeschätzt, und die Ergebnisse werden als Qualitätskontrolle abgeglichen. Zudem wird seit 1995 darauf geachtet, dass möglichst immer dieselben drei bis sechs Personen bonitieren und dass Wechsel nur nach intensiver Abgleichung stattfinden. Die Kronenverlichtung der Fichten in den Flächen des Kantons Zürich vor 1995 wurde aus Gründen der Vergleichbarkeit für die vorliegenden Auswertungen nicht verwendet.

Die Anzahl im laufenden Jahr abgestorbener Bäume oder die Anzahl infolge Buchdruckerbefalls gefällter Fichten wurde auf die Population des Vorjahres bezogen (Mortalität). Aus forstlichen Gründen gefällte Bäume wurden aus dem Datensatz ab dem Zeitpunkt der Fällung entfernt.

Gipfeltriebe

Alle vier Jahre wird jeweils ein Ast (Gipfeltrieb) von acht permanent markierten Bäumen pro Fläche per Helikopter geerntet. Pro Gipfeltrieb wird die äussere Erscheinung von jeweils 25 Blättern detailliert untersucht. Die Anzahl Blätter, bei denen lichtexponierte Stellen heller als beschattete Stellen sind, d.h., die Zeichen von Photobleaching zeigen, werden in diesem Kollektiv gezählt (Braun et al 2018).

Im Laub der geernteten Astproben werden auch die Nährstoffkonzentrationen bestimmt. Der Aufschluss erfolgt nach Walinga et al (1995). Stickstoff (N) und Phosphor (P) werden fotometrisch mit Farbreaktionen, Calcium (Ca), Magnesium (Mg) und Mangan (Mn) mittels Atomabsorption und Kalium (K) mittels Flammenfotometrie bestimmt. Für die Verwendung als Kovariable zur jährlich aufgenommenen Mortalität werden die Konzentrationen für die Jahre zwischen den Tribernten linear interpoliert.

2019 wurde zum ersten Mal auch der Wassergehalt von jeweils einem etwa 10 cm langen Stück pro Gipfeltrieb bestimmt (Trocknung bei 80 °C). An 145 Buchen von 10 Flächen wurden zudem die aktiven Leitgefässe mit Safranin eingefärbt. Dazu wurden etwa 20 cm lange Abschnitte von Buchenästen unter Wasser neu angeschnitten. Mit einer Druckdifferenz von 0.1 MPa (1 m Wassersäule) wurden die Äste mit einer membranfiltrierten 0.1%-Safraninlösung in Wasser infiltriert. Nach 30 Minuten wurden die infiltrierten Aststücke tiefgefroren. Diese Behandlung färbt die aktiven Leitgefässe rot. Die quantitative Auswertung der gefärbten Querschnittsfläche erfolgte durch Bildanalyse von Fotos von Querschnitten mit der Software ImageJ (Easlon & Bloom 2014). Diese berechnet den Anteil der rot gefärbten Leitgefässe im gesamten Querschnitt ohne Mark. Aus Kapazitätsgründen wurde diese Analyse auf eine Auswahl von Buchenflächen beschränkt.

Trockenheitsindikatoren

In einem Quervergleich verschiedener Trockenheitsindikatoren für das Beobachtungsnetz (Braun et al 2015) waren zwei Indikatoren mit Vitalitätsparametern am besten korreliert. Der erste war das Verhältnis zwischen aktueller und potenzieller Evapotranspiration (E_t/E_{Tp}). Der zweite war die Wasserbilanz. Sie basiert auf der Differenz zwischen (potenzieller) Evapotranspiration und Niederschlag. Ist dieser Wert stark negativ, so ist die Nachlieferung von Wasser gering. Wenn die Wasserspeicherkapazität des Bodens (nutzbare Feldkapazität) in die Berechnungen einfliesst, spricht man von der Standortwasserbilanz (SWB). Berechnet wurde dieselbe durch Kumulation der täglichen Differenzen zwischen Evapotranspiration und Niederschlag seit Jahresbeginn (Spellmann et al 2007). Der tiefste im Laufe des Sommers erreichte Wert, die minimale Standortwasserbilanz (SWB_{min}), war ein guter Trockenheitsindikator. Die für beide Berechnungen notwendigen Evapotranspirationswerte wurden mit dem hydrologischen Modell Wasim-ETH (Schulla 2013) aus Meteodaten berechnet, die auf Tagesbasis räumlich interpoliert wurden (Remund et al 2016).

Stickstoffdeposition

Die Gesamtdosition an Stickstoff wurde aufgrund von Emissionszahlen, Ausbreitungsrechnun-

gen und Depositionsgeschwindigkeiten mit einer räumlichen Auflösung von einer Hektare und einer zeitlichen Auflösung von fünf Jahren modelliert (Rihm & Künzle 2019). Werte für die Einzeljahre wurden interpoliert. Diese modellierte Deposition stimmt gut mit Messwerten der Einzelkomponenten überein (Thimonier et al 2018).

Statistik

Die Datenstruktur mit Bäumen in Flächen und Wiederholungen pro Jahr verlangt nach einem geeigneten statistischen Verfahren, welches die Nicht-homogenität der Daten berücksichtigt. Es braucht eine gemischte Regression (R-Paket lme4, Funktionen lmer für lineare und glmer für logistische Modelle). Als zufällige Variablen wurden der Standort und das Jahr, zum Teil auch der Einzelbaum, eingesetzt. Die Selektion der Prädiktoren erfolgte rückwärts aufgrund des AIC (Akaike Information Criterion). Die Linearität der Beziehungen wurde getestet,

indem der Einfluss der Einführung eines Splines oder eines Polynoms auf den AIC geprüft wurde.

Artunterschiede in der Kronenverlichtung der Eichen wurden mit einer gemischten linearen Regression untersucht. Die Artunterschiede wurden anschliessend mit der Funktion multcomp (R-Paket multcomp) getestet. Für diese Prüfung wurden Bäume mit einer unklaren Artzuordnung ausgeschlossen.

Die Mortalitätsdaten wurden in einer gemischten logistischen Regression in Beziehung zu Trockenheitsindikatoren des laufenden Jahres und bis zu vier Vorjahren gesetzt. Als weitere Kovariablen wurden die Konzentrationen von N, P, K, Mg und Ca im Laub, die modellierte N-Deposition, die Meereshöhe und das Alter geprüft. Die Auswertung der Safraninfärbung und des Wassergehaltes der Zweige erfolgte ebenfalls mit einer gemischten Regression, aber linear, mit dem Standort als zufällige Variable. Regressionsgrafiken wurden erstellt, indem die vorausgesagten Werte und der 95%-Vertrauensbereich davon mit der Funktion ggpredict (R Paket ggeffects; Lüdecke 2018) berechnet wurden.

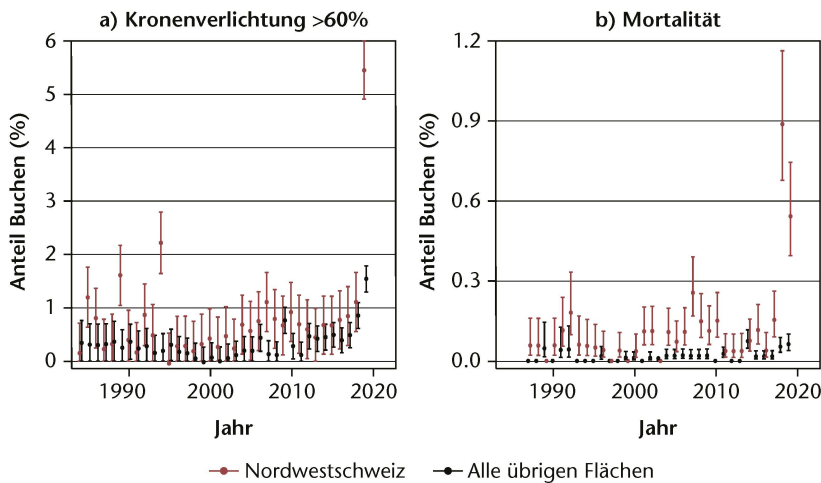


Abb 3 Zeitliche Entwicklung a) des Buchenanteils mit einer Kronenverlichtung von über 60% und b) der Buchenmortalität in Prozent pro Beobachtungsjahr in der Nordwestschweiz (rot, Kantone BS und BL sowie Fricktal) und in allen übrigen Flächen (schwarz). Anzahl Bäume 2019: 5806 für Verlichtung, 6139 für Mortalität. Balken: Standardfehler.

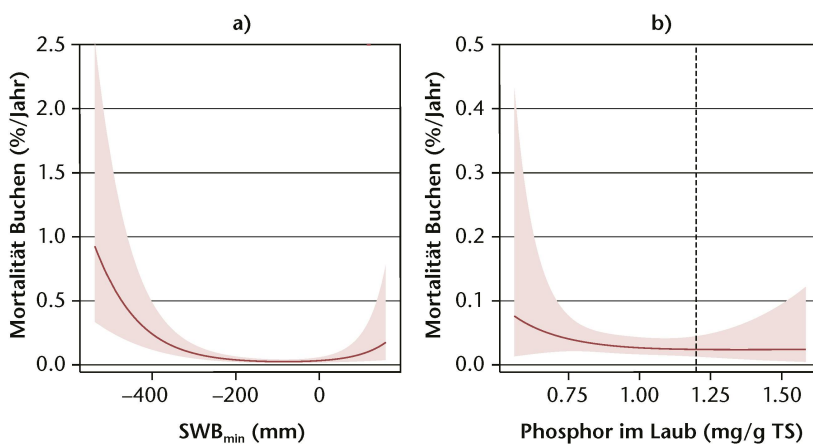


Abb 4 Buchenmortalität in Abhängigkeit von a) der minimalen Standortwasserbilanz (SWB_{min}), gemittelt über drei Vorjahre, und b) der Phosphorkonzentration im Laub. Der schattierte Bereich ist der 95%-Vertrauensbereich. Die gestrichelte Linie in b) gibt die untere Grenze des Normalversorgungsbereichs nach Göttlein (2016) an.

Resultate

Verlichtung, Mortalität und Vergilbung bei der Buche

Der prozentuale Anteil von Buchen mit einer Verlichtung von mehr als 25% fiel für die Jahre 2018 mit 14.6% und 2019 mit 16.7% nicht überdurchschnittlich hoch aus. Das für die unterschiedlich lange Beobachtungsdauer korrigierte langjährige Mittel liegt bei 14.5%. Jedoch fanden wir im Sommer 2019 sechsmal mehr Buchen mit einer Kronenverlichtung von über 60% als im Mittel der ganzen Beobachtungszeit, das bei 0.5% liegt (Abbildung 3a). Der Anteil solcher stark geschädigter Buchen betrug 2019 in den Dauerbeobachtungsflächen bis zu 41%, während er im Jahr 2018 maximal 18% und im Jahr zuvor maximal 10% erreicht hatte. Bei Buchen mit einer Verlichtung von über 60% ist das Risiko gross, dass sie in den nächsten Jahren absterben werden. Die räumliche Verteilung der stark geschädigten Buchen widerspiegelt die extreme Trockenheit 2018 in der Nordwestschweiz sowie in Teilen des Kantons Zürich.

Die Mortalität der Buchen auf den Walddauerbeobachtungsflächen war in den Jahren 2018 mit 0.25% und 2019 mit 0.18% 3.9- bis 5.4-mal so hoch wie im Mittel der letzten 36 Jahre (0.05%). In der Nordwestschweiz war die Mortalität gegenüber den übrigen Flächen deutlich erhöht (Abbildung 3b). Eine Auswertung mit verschiedenen Klimaparametern zeigte, dass die Buchenmortalität signifikant durch die Trockenheit von jeweils drei vorausgehenden Jahren beeinflusst wird (Abbildung 4a, Tabelle 1). Bester Trockenheitsindikator war dabei die SWB_{min} .

Merkmal	Koeffizient	SE	t	p-Wert
(Intercept)	2.053	1.370	1.498	0.134
SWB _{min} erstes Vorjahr	-2.879	1.065	-2.703	0.007**
SWB _{min} zweites Vorjahr	-3.316	1.117	-2.970	0.003**
SWB _{min} drittes Vorjahr	-1.232	1.161	-1.061	0.289
Höhe ü.M.	-1.742	0.994	-1.753	0.080
Phosphor	-2.273	0.808	-2.815	0.005**

Tab 1 Regressionsmodell zur Buchenmortalität mit einzelnen Trockenjahren.

Merkmal	Koeffizient	SE	t	p-Wert
(Intercept)	-5.19	1.45	-3.58	<0.001***
SWB _{min} 3jr Spline 1	-8.73	3.36	-2.60	0.009**
SWB _{min} 3jr Spline 2	-22.02	6.77	-3.25	0.001**
Phosphor Spline 1	-0.14	2.42	-0.06	0.956
Phosphor Spline 2	-10.14	3.08	-3.30	0.001**
Höhe ü.M.	-2.18	0.89	-2.45	0.014*
SWB _{min} 3jr Spline 1*Phosphor Spline 1	9.24	6.43	1.44	0.151
SWB _{min} 3jr Spline 2*Phosphor Spline 1	34.49	11.95	2.89	0.004**
SWB _{min} 3jr Spline 1*Phosphor Spline 2	13.03	5.26	2.48	0.013*
SWB _{min} 3jr Spline 2*Phosphor Spline 2	-14.88	6.19	-2.40	0.016*

Tab 2 Regressionsmodell zur Buchenmortalität mit zusammengefassten Trockenjahren (SWB_{min}3jr), Splines für nicht lineare Beziehungen und Interaktion zwischen Trockenheit und Phosphor.

Nicht nur die Trockenheit, sondern auch die P-Versorgung der Bäume spielt bei der Erklärung der Buchenmortalität eine Rolle (Abbildung 4b, Tabelle 2). Die Mortalität im Beobachtungsnetz steigt mit zunehmendem P-Mangel stark an, ist aber auch bei hohen P-Konzentrationen etwas erhöht. P-Mangel verstärkt zudem den Effekt von Trockenheit auf die Mortalität (Tabelle 2). Das heisst, die Daten legen nahe, dass der Anstieg der Buchenmortalität

nach Trockenheit mit der abnehmenden P-Versorgung zusammenhängt.

Bei den Aufnahmen der Kronenverlichtung wird auch die Vergilbung aufgenommen. Bei den Buchen war dieser Wert sowohl für 2018 als auch für 2019 deutlich erhöht (Abbildung 5a). Parallel wurde an den Gipfeltrieben der Anteil Blätter aufgenommen, die Zeichen von Photobleaching aufwiesen. Dieser Anteil erreichte 2019 einen neuen Rekordwert, nachdem er bei der vorausgehenden Ernte im Jahr 2015 bereits schon deutlich erhöht gewesen war (Abbildungen 5b und 5c). Frühere Auswertungen hatten gezeigt, dass Photobleaching von der P-Konzentration im Laub und der Temperatur im Zeitraum vor der Ernte abhängt (Braun et al 2018). Das heisst, dass auch die an den übrigen Bäumen in der Kronenverlichtungsaufnahme beobachteten Vergilbungen wahrscheinlich auf Hitze und P-Mangel zurückgehen.

Verlichtung und Mortalität bei der Fichte

Der Anteil Fichten mit über 25% Kronenverlichtung war 2018 und 2019 nur wenig erhöht: 2018 betrug er 24.3%, 2019 18.8%, bei einem mit der gemischten Regression gerechneten langjährigen Mittel von 16.4%. Der Schwankungsbereich der bisherigen Jahreswerte liegt zwischen 7.8 und 26.2%. Dagegen erreichte die Mortalität bis zum Herbst 2019 einen neuen Rekordwert, nachdem sie bereits 2018 stark erhöht gewesen war (Abbildung 6a). In absoluten Zahlen beträgt dieser 4.9%, mit gemischter Regression korrigiert 3.0%. Grund dafür ist der Befall mit dem Buchdrucker, der sich nach den in den letzten Jahren häufiger auftretenden Hitzewellen, langen Trockenperioden sowie Sturmereignissen (z.B. Burglind, Evi und Friederike im Januar 2018) stark vermehrt hat. Trockenperioden führen zu einer Schwächung der Vitalität der Bäume. Nach Stürmen bleibt viel Holz liegen, welches eine ideale Brutstätte

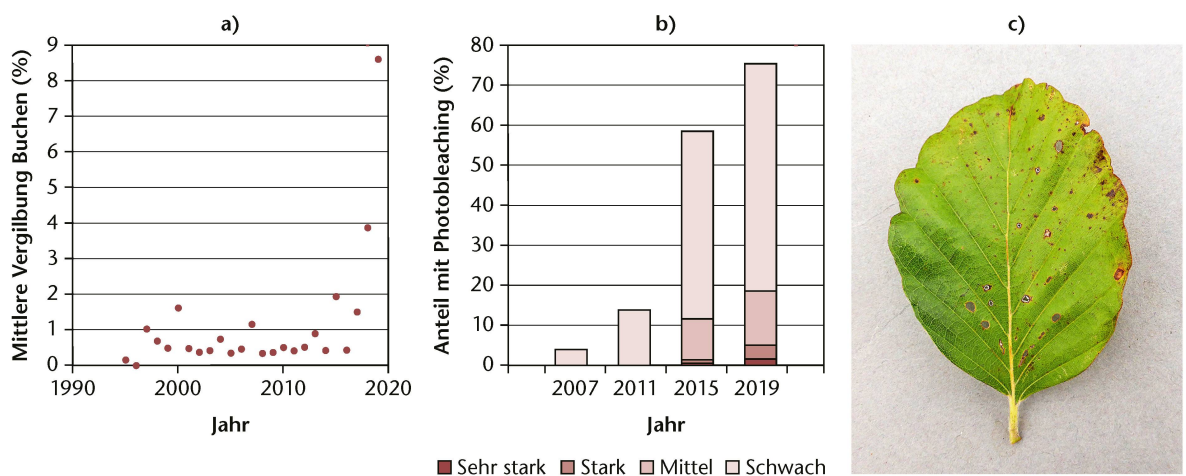


Abb 5 a) Entwicklung der Vergilbung der Buchenkronen von 1995 bis 2019, erfasst in den Feldaufnahmen. b) Ausmass des Auftretens von Photobleaching an Buchenästen, die in den Jahren 2007, 2011, 2015 und 2019 geerntet worden waren (2019: n = 728 Bäume). Anteil Blätter mit Symptom an einem Kollektiv von je 25 Blättern pro Baum: schwach: 0, mittel: >0–20%, stark: >20–50%, sehr stark: >50%. c) Buchenblatt mit starkem Photobleaching.

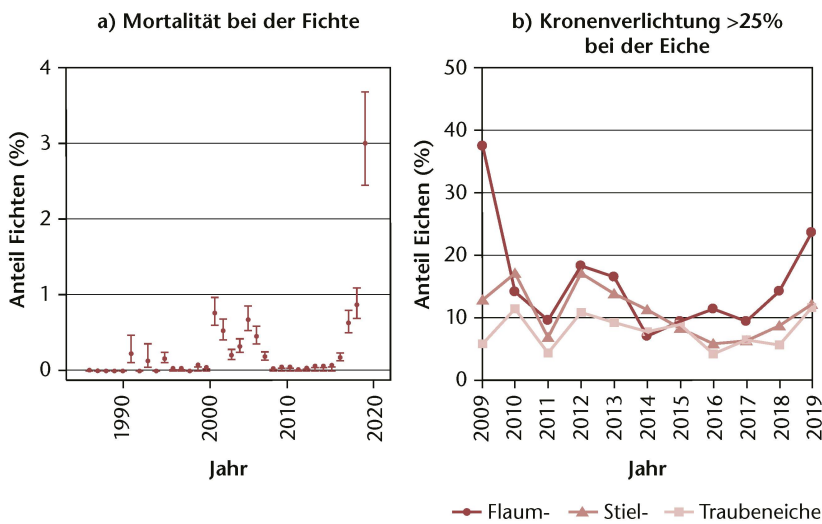


Abb 6 Zeitliche Entwicklung a) der Fichtenmortalität in Prozent pro Beobachtungsjahr (Balken: Standardfehler) und b) des Eichenanteils mit einer Kronenverlichtung von über 25%, nach Art getrennt, ohne die stark von der Trockenheit 2018 betroffene Fläche La Sarraz (VD).

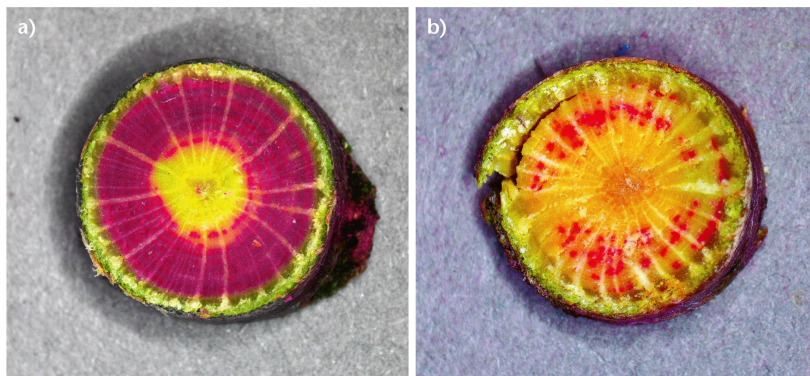


Abb 7 Aktive Leitgefäße (mit einem Farbstoff rot markiert) im Ast einer Buche mit einer Kronenverlichtung von a) 20% und b) 70%.

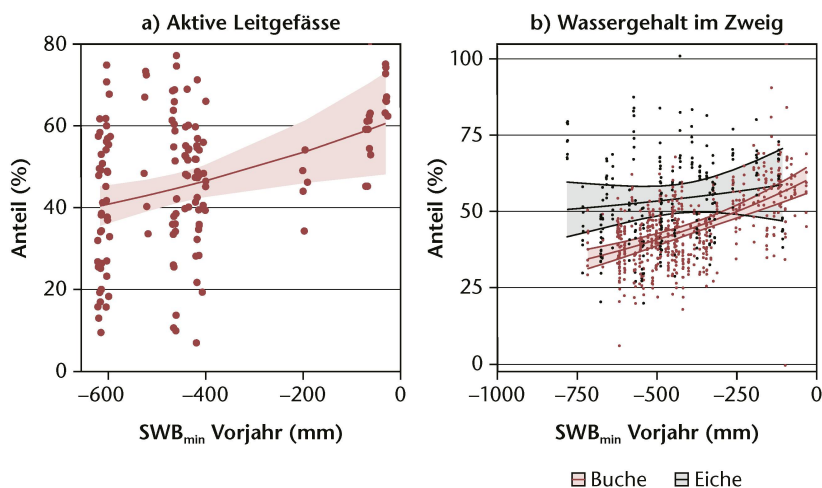


Abb 8 a) Anteil aktiver Leitgefäße bei den 145 untersuchten Buchenzweigen und b) Wassergehalt in 636 Buchen- und 247 Eichenzweigen in Abhängigkeit der minimalen Standortwasserbilanz (SWB_{min}) im Vorjahr. Schattierte Fläche: 95%-Vertrauensbereich.

für den Buchdrucker ist. Daher gab es bereits einen Mortalitätsanstieg auf den Fichten-Beobachtungsflächen nach dem Sturm Lothar 1999 und dem Hitzesommer 2003. In den Jahren 2018 und 2019 wurde

Mortalität in 38 der 75 Fichtenflächen beobachtet. In 24 Flächen wurde als Ursache ein Befall mit Buchdrucker festgestellt, wobei 1% bis 89% der Fichten betroffen waren. In 9 Flächen lag der Befall bei über 10%.

Verlichtung und Mortalität bei der Eiche

Den Eichen wird wegen ihrer grösseren Trockenheitstoleranz ein grosses Potenzial als zukünftiger Hauptbaumart in vielen Schweizer Wäldern zugeschrieben. Bei den drei beobachteten Eichenarten (Trauben-, Stiel- und Flaumeiche) erreichte die Mortalität nach dem Trockensommer 2018 mit 0.43% fast das Maximum von 2016 (langjähriges Mittel 0.27%).

Über die ganze Beobachtungszeit waren die Traubeneichen signifikant geringer verlichtet als die Stieleichen. Auffallend ist, dass die als trockenheitstoleranter geltenden Flaumeichen häufiger eine Kronenverlichtung von über 25% aufwiesen als die Traubeneichen (Abbildung 6b). Der Unterschied zwischen Flaumeiche und Stieleiche ist wegen zu geringer gemeinsamer Vorkommen statistisch nicht gesichert. Die Flaumeiche wird in nur sechs Flächen beobachtet.

Wasserleitfähigkeit der Gefäße und Kavitation

Der Färbungsversuch aktiver Leitgefäße mit Safranin an 145 Buchenzweigen weist darauf hin, dass die Trockenheit des Vorjahrs Auswirkungen auf die Wasserleitfähigkeit im aktuellen Jahr hat (Abbildungen 7 und 8a, Tabelle 3). Mit der Trockenheit des laufenden Jahres konnte keine Beziehung gefunden werden. Die Ergebnisse sind vergleichbar, wenn man den Wassergehalt im Astmaterial betrachtet (Abbildung 8b). Wegen der einfacheren Bestimmung des Wassergehaltes konnten mit der Trocknungsmethode mehr Proben (636 Buchen und 247 Eichen) ausgewertet werden. Bemerkenswert ist, dass bei den Eichen die Beziehung zwischen der Trockenheit im Vorjahr und dem Wassergehalt im Zweig nur als nicht signifikanter Trend besteht, während bei den Buchen das Resultat wie beim Färbversuch signifikant ist (Tabelle 3). Mit der Trockenheit des laufenden Jahres ist die Beziehung mit den Eichen dagegen signifikant. Allerdings war diesmal nicht die SWB_{min} der beste Trockenheitsindikator, sondern das Eta/ETp-Verhältnis über die ersten 80 Tage der Vegetationsperiode (Tabelle 3).

Einstufung der Trockenheit 2018 im Vergleich zu 2003

Während sich die trockenen Jahre 2003 und 2015 bei den Buchen vor allem in Zuwachsreduktion und erhöhter Kronenverlichtung auswirkten, waren die Folgen der Trockenheit 2018, wie sie erst im Laufe des Sommers 2019 zutage traten, wesent-

Merkmal	Koeffizient	SE	t	p-Wert
a) Relative Fläche der aktiven Leitgefäße in Buchenzweigen				
(Intercept)	0.15	0.11	1.32	0.184
SWB _{min} erstes Vorjahr	0.47	0.18	2.62	0.009**
b) Wassergehalt in Buchenzweigen				
(Intercept)	8.73	4.87	1.79	0.077
SWB _{min} erstes Vorjahr	52.90	7.00	7.56	<0.001***
c) Wassergehalt in Eichenzweigen				
(Intercept)	-17.87	33.29	-0.54	0.591
ETa/ETp laufendes Jahr	141.66	62.16	2.28	0.023*
ETa/ETp Vorjahr	-59.88	41.26	-1.45	0.147

Tab 3 Regressionsmodelle a) zur relativen Fläche der aktiven Leitgefäße in Buchenzweigen, b) zum Wassergehalt in Buchen- und c) in Eichenzweigen. SWB_{min}: minimale Standortwasserbilanz. ETa/ETp: Verhältnis zwischen aktueller und potenzieller Evapotranspiration, gemittelt über die ersten 80 Tage der Vegetationsperiode.

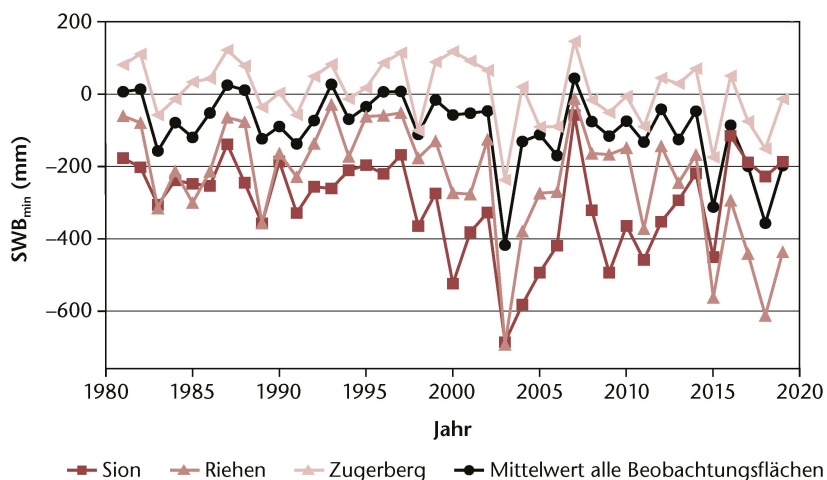


Abb 9 Jährlicher Wert für die minimale Standortwasserbilanz (SWB_{min}) als Mittelwert aller Flächen (schwarze Linie), der feuchtesten Buchenfläche (Zugerberg), der trockensten Buchenfläche (Riehen) und der trockensten Eichenfläche (Sion).

lich gravierender. Bei vielen Buchen waren grosse Kronenteile abgestorben, einige Bäume starben ganz ab. Bei den Fichten nahm im Spätsommer 2018 und im Laufe des Sommers 2019 der Buchdruckerbefall stark zu, in unseren Flächen deutlich stärker als nach 2003. Diese stärkere Auswirkung ist zunächst nicht mit dem Klima von 2018 zu erklären, da der Sommer 2018 klimatisch ähnlich war wie 2003. Die SWB_{min} war 2018 nicht tiefer als 2003 (Abbildung 9). Dem Trockenjahr 2018 ging jedoch eine Reihe trockener Jahre voraus. Unsere Auswertung zeigt, dass für die Buchenmortalität die Trockenheit von bis zu drei Vorjahren relevant ist, während die Trockenheit des laufenden Jahres nicht signifikant korreliert ist. Wenn die SWB_{min} von drei Vorjahren gemäss den Koeffizienten der Regression in Tabelle 1 gemittelt wird, wird ersichtlich, dass der Hitzesommer 2003 mit einer relativ geringen Vorbelastung durch Trockenheit startete (Abbildung 10). Dagegen war das dreijährige Gleitmittel der SWB_{min} zu Beginn des Jahres 2018 bereits so gross wie in der Vergangenheit ein Jahr nach 2003. Zur Stresssituation 2018 bei-

getragen hat auch, dass in den letzten beiden Jahrzehnten der Fruchtbehang stark zugenommen und die P-Versorgung stark abgenommen hatte (Braun et al 2018). Die P-Konzentrationen lagen 2015 im Mittel bei 0.92 mg/g und damit 23% unter der Grenze für ausreichende Versorgung nach Göttlein (2015). P-Mangel war mit einer erhöhten trockenheitsbedingten Mortalität korreliert, und die Wirkung von Trockenheit auf die Buchenmortalität war bei P-Mangel deutlich stärker (Tabelle 2).

Diskussion

Die Kombination von Beobachtungen und Messungen an Bäumen auf diesen zahlreichen Flächen mit den pro Standort berechneten Trockenheitsindikatoren erlaubte es in dieser Studie, präzisere Aussagen über das Ausmass der extremen Trockenheit und den Gesundheitszustand der Bäume im Schweizer Wald machen zu können. Die beobachteten Baumarten zeigten unterschiedliche Einbussen an Vitalität und Zunahmen der Mortalität. Dies könnte auf ihre unterschiedlichen physiologischen Reaktionen zurückzuführen sein.

Die mittleren Mortalitätszahlen der Buchen im Interkantonalen Walddauerbeobachtungsprogramm sind mit 0.05% sehr gut vergleichbar mit den Daten aus anderen Studien, zum Beispiel mit denen aus Nordwestdeutschland: Das langjährige Mittel betrug dort 0.05 bis 0.06%. 2019 stieg die Buchenmortalität in Hessen auf 0.3% und in Sachsen-Anhalt auf 0.2% (Eichhorn et al 2019). ICP Forests (2019) berichtet für das Jahr 2018 eine Absterberate von Buchen von 0.2% und von laubwerfenden Eichen von 0.4%. Auch letztere Rate ist sehr gut vergleichbar mit der von uns beobachteten Zahl. Beim Befall der Fichten mit dem Buchdrucker meldet Waldschutz Schweiz für 2019 den zweithöchsten Befall seit 2003 (Stroheker et al 2020), während der Befall in den IAP-Beobachtungsflächen 2019 höher war als 2003. Dieser Befall tritt punktuell gehäuft auf und ist damit sehr unregelmässig verteilt. Somit sind grosse Abweichungen zwischen verschiedenen Erhebungen zu erwarten.

Verdursten oder Verhungern

Dass bei Waldbäumen das hydraulische System teilweise oder gar völlig zusammenbrechen kann, wie dies im Sommer 2018 mit dem plötzlichen Absterben grosser Kronenbereiche und ganzer Bäume beobachtet wurde, ist in diesem Ausmass in der Schweiz eine neue Erfahrung. Die Ergebnisse der Färbung der aktiven Leitgefäße bei Buchen belegen, dass dies in situ vorkommt und nicht nur eine theoretische Grösse ist. Übereinstimmende Beob-

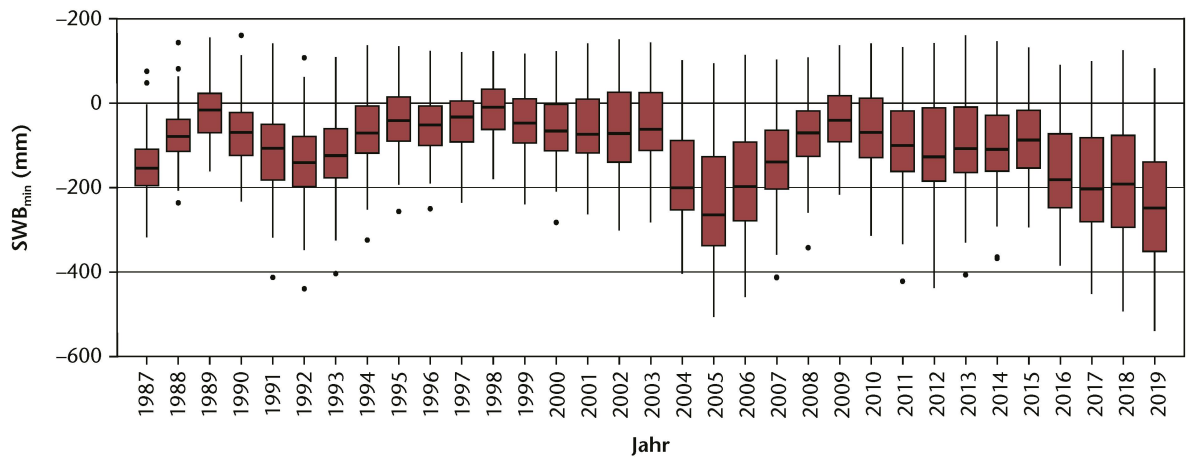


Abb 10 Minimale Standortwasserbilanz (SWB_{min}) für alle Beobachtungsflächen als dreijähriges Gleitmittel, mit Gewichtung gemäss der Regression mit der Buchenmortalität (laufendes Jahr 0, erstes Vorjahr 37%, zweites Vorjahr 43%, drittes Vorjahr 20%; siehe Tabelle 1).

achtungen wurden auch in einer Experimentierfläche der Universität Basel in Hölstein gemacht (Schuldt et al 2020). Das unterschiedliche Resultat beim Wassergehalt von Buchen- und Eichenästen lässt sich mit bekannten morphologischen Unterschieden zwischen den Artengruppen interpretieren: Bei den Buchen tragen mehrere Jahrgänge zur aktiven Wasserleitung bei, während es bei den Eichen nur der jüngste Jahrgang ist.

In der Ökophysiologie werden zwei verschiedene Prozesse beschrieben, die zu Trockenheitsschäden an Bäumen führen: das «Verdursten» und das «Verhungern» (McDowell et al 2011). Beim «Verdursten» reissen die Wasserfäden in den Leitgefässen bei extremer Saugspannung. Die Wasserleitung wird dabei unterbrochen, und periphere Äste und Zweige können nicht mehr mit Wasser versorgt werden. Dieser als Kavitation oder Embolie bezeichnete Prozess spielt in der Trockenempfindlichkeit von Bäumen eine essenzielle Rolle (Choat et al 2012, Engelbrecht 2012). Der Tod tritt ein, wenn ein bestimmter Prozentsatz der Gefässe ihre Aktivität verloren hat (Urli et al 2013, Choat et al 2018). Ob bereits kavitierte Gefässe wieder aktiv mit Wasser gefüllt werden können, ist nicht restlos geklärt. Schenk & Espino (2011) postulieren, dass der nächtliche Saftfluss dem Wiederbefüllen luftgefüllter Leitgefässe dient, während Cochard (persönliche Mitteilung) davon ausgeht, dass luftgefüllte Gefässe durch Thyllen verschlossen werden und damit einer weiteren Funktion, aber auch der Messung, entzogen werden. Die Ergebnisse der Färbung der aktiven Leitgefässe in Buchenästen unterstützen die zweite Hypothese und liefern eine Begründung dafür, dass aufeinanderfolgende Trockenjahre stärkere Auswirkungen haben als vereinzelte.

Beim «Verhungern» schliessen die Bäume ihre Spaltöffnungen so stark, dass sie keine Fotosynthese mehr betreiben können. Ist infolge Spaltenschluss zu wenig Energie vorhanden, kann die Oxidation

von Chlorophyll durch das Sonnenlicht, das ein normaler Begleitprozess der Fotosynthese ist, nicht mehr genügend repariert werden, und es kommt zu Fotooxidation (Powles 1984). Vergilbungen aufgrund von Hitze, wie sie im Wald bei der Feldaufnahme beobachtet und an den geernteten Ästen in Form von Photobleaching aufgenommen werden konnten, sind ein Hinweis darauf, dass auch dieser Prozess und damit das «Verhungern» 2018 und 2019 eine Rolle gespielt hat.

Einfluss der Nährstoffversorgung

Die Beziehung, die zwischen der Buchenmortalität und der P-Versorgung der Buchen beobachtet wurde, könnte bei der starken Reaktion auf die Trockenheit 2018 eine Rolle gespielt haben. Zwischen 2003 und 2015 hat die P-Versorgung um 9.9% abgenommen. Heute liegt sie im akuten Mangelbereich (Braun et al 2020). P-Ernährung ist nur in wenigen Studien zusammen mit Trockenheitsresistenz ein Thema. Harvey & van den Driessche (1997) fanden einen Zusammenhang zwischen P-Ernährung und der Kavitationsresistenz von Hybridpappeln. Eine solche Veränderung der Kavitationsresistenz könnte auch bei den beobachteten Buchenschäden eine Rolle gespielt haben. Hinsichtlich eines Einflusses der P-Ernährung auf eine allgemeine Trockenheitsresistenz sind die Ergebnisse nicht einheitlich (z.B. Graciano et al 2005). Der P-Einfluss auf die Mortalität könnte auch im Zusammenhang mit der Resistenz gegenüber Sekundärparasiten stehen. Borowicz (2001) beschreibt in einer Literaturstudie Zusammenhänge zwischen der Symbiose mit arbuskulären Mykorrhizen, der dadurch verbesserten P-Versorgung und einer nachfolgenden Änderung von Pflanzen-Parasiten-Beziehungen. Bei der Fichte zeigten Auswertungen, dass die K-Versorgung eine Rolle spielt (Braun et al 2018). Die Nadelanalysen 2019 sind aber noch nicht abgeschlossen, sodass dieses Ergebnis für die Trockenperiode 2018/2019 noch nicht validiert



Abb 11 Blick auf die in den Jahren 2015 und 2018 stark von Trockenheit betroffene Fläche La Sarraz (VD), aufgenommen am 22. Juli 2019.

werden kann. Bei den Eichen ist der Datensatz für die Auswertung der Mortalität zu klein, um Zusammenhänge mit der Nährstoffversorgung zu finden.

Sekundäre Schädlinge

Sekundäre Schädlinge spielen beim Absterbeprozess der Bäume oft eine wichtige Rolle (Desprez-Loustau et al 2006), vor 2018 waren sie in den Dauerbeobachtungsflächen die praktisch ausschliessliche Ursache. Der Buchdrucker, der in der Schweiz viele Fichten befällt, ist das klassische Beispiel in dieser Kategorie. Bei den beobachteten Fichten können die durch Trockenheit verursachten Schäden und die Zunahme der Mortalität auf den Befall geschwächter Bäume mit diesem Schwächeparasiten zurückgeführt werden. Die Trockenheit hemmt die Harzbildung in den Bohrlöchern des Käfers und erleichtert damit seine Ausbreitung. In Tieflagen, wo es weniger Niederschläge gibt als im Gebirge, dürfte die Fichte zukünftig besonders oft betroffen sein, da sie dort meist in einem für sie unnatürlichen Lebensraum gepflanzt wurde (Huber et al 2019).

Auch der Hallimasch (*Armillaria mellea*) ist ein wichtiger Schwächeparasit, der viele Baumarten, darunter die Buche, zum Absterben bringen kann (Kubiak et al 2017). Bei der Buche wird auch die Buchenrindennekrose als Trockenheitsfolge genannt (Jarcuska et al 2013). Allerdings können die starken Kronenschäden und die erhöhte Mortalität bei den von uns beobachteten Buchen 2018/2019 wahrscheinlich weniger auf ein erhöhtes Vorkommen von sekundären Parasiten als eher auf einen Unterbruch der Wasserleitung zurückgeführt werden, obwohl an den stark geschädigten Buchen in der Ajoie auch häufig die Buchenrindennekrose beobachtet wurde (P. Girardin, persönliche Mitteilung).

Der Unterschied in der Kronenverlichtung von Trauben- und Stieleichen könnte eine Folge unterschiedlicher Anfälligkeiten auf den Eichenblatt-

bräune-Pilz (*Discula quercina*) sein, wie Untersuchungen an geernteten Ästen ergaben (Flückiger & Braun 2009). Ein stärkerer Befall mit der Eichenblattbräune erklärt möglicherweise den schlechten Gesundheitszustand und die erhöhte Mortalität der Stieleichen in der besonders stark betroffenen Fläche Plan-les-Ouates (GE). Flaumeichen werden an sechs Standorten in den Kantonen Neuchâtel, Schaffhausen, Waadt und Tessin beobachtet. Laut Literatur müssen diese Standorte als Randvorkommen im Verbreitungsgebiet dieser Art betrachtet werden, und ausserdem ist bekannt, dass die Flaumeiche extreme Trockenstandorte meidet (Pasta et al 2016). Der schlechte Zustand der Flaumeichen in La Sarraz (VD; Abbildung 11) ist möglicherweise die Folge des Befalls mit dem Schwächeparasiten *Gymnopus fusipes* (V. Queloz, persönliche Mitteilung).

Einfluss der Forstwirtschaft

Bei den Buchen waren in der Nordwestschweiz vor allem die älteren, bestandesbildenden Bäume betroffen. Daher könnten waldbauliche Massnahmen, zum Beispiel eine Verkürzung der Umtriebszeit (Pauli et al 2016), die Bestände stärken. Zurzeit wird geprüft, ob die Trockenheitsresistenz von Buchen durch Auswahl von Herkünften aus trockeneren Gebieten oder durch genetische Selektion verbessert werden kann. Der Umbau von Waldbeständen durch Auswahl trockenheitstoleranterer Baumarten, basierend auf der aktuellen Vegetationszusammensetzung, ist im Gang (Huber et al 2019). Dieser sieht für Fichten in Tieflagen keine Zukunft mehr. Dass Eichen trocken-toleranter sind als Buchen, ist bekannt. Über den Befall von Eichen mit Schwächeparasiten können wegen der kürzeren Beobachtungsdauer noch wenig Aussagen gemacht werden, doch scheint es, dass die Flaumeichen möglicherweise ein Problem damit haben.

Schlussfolgerungen

Während die Trockenheitsempfindlichkeit und der starke Buchdruckerbefall der Fichten in Tieflagen den Erwartungen entspricht, sind die Buchenschäden in ihrem Ausmass überraschend. Die hier vorgestellten Auswertungen haben gezeigt, dass sich Trockenheit nicht nur im laufenden Jahr, sondern bis zu drei Jahre nach dem Ereignis auf die Vitalität der Buchen auswirkt. Das heisst, dass die 2018/2019 beobachteten Schäden wahrscheinlich auf ein Aufeinanderfolgen von mehreren trockenen Jahren zurückzuführen sind. Die Wasserleitung ist ein Jahr nach einem Trockenheitsereignis immer noch eingeschränkt. Die Beobachtungen zeigen auch regionale Unterschiede auf, die klimatisch erklärt werden können: In der Nordwestschweiz waren die Schäden an Buchen deutlich erhöht. Die Trockenheit besser

überstanden haben die Eichen. Bei diesen findet die Wasserleitung hauptsächlich im jüngsten Jahrring statt. Mit Luft gefüllte Leitgefäße werden damit im nächsten Jahr ersetzt. Das ist möglicherweise einer der Gründe, weshalb bei den Eichen keine verzögerten Trockenheitseffekte beobachtet wurden. Der Befall mit sekundären Schwächeparasiten sollte bei den Eichen im Auge behalten werden.

Ausblick

Neben den vielen geschädigten Buchen in der Nordwestschweiz stehen auch solche, die den trockenen Sommer 2018 schadlos überstanden haben. Im Auftrag des Amtes für Wald beider Basel führen wir deshalb zusätzlich genetische Analysen durch, um herauszufinden, ob sich die Bäume im Erbgut unterscheiden. Die Blattproben dafür wurden während der regulären Gipfeltriebernte im Sommer 2019 gesammelt.

Eingereicht: 29. November 2019, akzeptiert (mit Review): 2. Juli 2020

Dank

Die Untersuchungen in Walddauerbeobachtungsflächen werden von den Forstämtern der Kantone AG, BE, BL, BS, GR, SO, TG und ZH sowie von den Zentralschweizer Umweltämtern der Kantone LU, OW, NW, SZ und UR finanziell unterstützt, wofür wir uns bedanken möchten. Ein grosser Dank geht an alle lokalen Förster und Waldbesitzer für ihre wohlwollende Begleitung der Untersuchungen, an das IAP-Team für den tatkräftigen Einsatz im Wald und Labor, an die vielen studentischen Hilfskräfte für ihre Geduld während der Verarbeitung der Gipfeltriebe, an Valentine Kamm für ihren unermüdlischen Einsatz für die Safraninfärbungen und Wassergehaltsmessungen, an Simon Tresch für seinen Beitrag an die Datenauswertungen und an die Projektleitung sowie Vertreter des Bundesamts für Umwelt für die wertvollen Kommentare zum Manuskript.

Literatur

- BAFU ET AL, EDITOR (2019) Hitze und Trockenheit im Sommer 2018. Auswirkungen auf Mensch und Umwelt. Bern: Bundesamt Umwelt, Umwelt-Zustand 1909. 91 p.
- BOROWICZ VA (2001) Do arbuscular mycorrhizal fungi alter plant-pathogen relations? *Ecology* 82: 3057–3068.
- BRAUN S, REMUND J, RIHM B (2015) Indikatoren zur Schätzung des Trockenheitsrisikos in Buchen- und Fichtenwäldern. *Schweiz Z Forstwes* 166: 361–371. doi: 10.3188/szf.2015.0361
- BRAUN S, HOPF S, DE WITTE L (2018) Wie geht es unserem Wald? 34 Jahre Walddauerbeobachtung. *Schönenbuch: Institut Angewandte Pflanzenbiologie*. 140 p.

- BRAUN S, SCHINDLER C, RIHM B (2020) Foliar nutrient concentrations of European beech in Switzerland: Relations with Nitrogen deposition, ozone, climate and soil chemistry. *Front For Glob Change* 3: 33.
- CHOAT B, BRODRIBB TJ, BRODERSEN CR, DUURSMA RA, LÓPEZ R ET AL (2018) Triggers of tree mortality under drought. *Nature* 558: 531–539.
- CHOAT B, JANSEN S, BRODRIBB TJ, COCHARD H, DELZON S ET AL (2012) Global convergence in the vulnerability of forests to drought. *Nature* 491: 752–755.
- DESPREZ-LOUSTAU ML, MARÇAIS B, NAGELEISEN LM, PIOUS D, VANNINI A (2006) Interactive effects of drought and pathogens in forest trees. *Ann For Sci* 63: 597–612.
- EASLON HM, BLOOM AJ (2014) Easy leaf area: Automated digital image analysis for rapid and accurate measurement of leaf area. *Appl Plant Sci* 2: 1400033.
- EICHHORN J, SUTMÖLLER J, SCHELER B, WAGNER M, DAMMANN I ET AL (2019) Auswirkungen der Stürme und der Dürre 2018/2019 auf die Vitalität der Wälder in Nordwestdeutschland. In: HMUKLV, editor. *Waldzustandsbericht 2019*. Kassel: Hessisches Ministerium Umwelt Klimaschutz Landwirtschaft Verbraucherschutz. pp. 21–31.
- ENGELBRECHT BMJ (2012) Plant ecology: Forests on the brink. *Nature* 491: 675–677.
- FLÜCKIGER W, BRAUN S (2009) Wie geht es unserem Wald? 25 Jahre Walddauerbeobachtung. *Schönenbuch: Institut Angewandte Pflanzenbiologie*. 88 p.
- GÖTTLEIN A (2015) Grenzwertbereiche für die ernährungsdiagnostische Einwertung der Hauptbaumarten Fichte, Kiefer, Eiche und Buche. *Allg Forst- Jagdztg* 186: 110–116.
- GÖTTLEIN A (2016) Ableitung von Nährelementrelationen für die mitteleuropäischen Hauptbaumarten aus dem Wertebereich normaler Ernährung im Vergleich zu verfügbaren Literaturdaten. *Allg Forst- Jagdztg* 187: 237–246.
- GRACIANO C, GUIAMÉT JJ, GOYA JF (2005) Impact of nitrogen and phosphorus fertilization on drought responses in *Eucalyptus grandis* seedlings. *For Ecol Manage* 212: 40–49.
- HARVEY HP, VAN DEN DRIESSCHE R (1997) Nutrition, xylem cavitation and drought resistance in hybrid poplar. *Tree Physiol* 17: 647–654.
- HUBER B, GUBELMANN P, ZISCHG A, AUGUSTIN S, FREHNER M (2019) Modellierung der Vegetationshöhenstufen und der Areale von Buche und Tanne für die Schweiz. *Schweiz Z Forstwes* 170: 326–337. doi: 10.3188/szf.2019.0326
- ICP FORESTS (2016) Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests. Revision 2016. Part IV: Visual assessment of crown condition and damaging agents. *Eberswalde: Johann Heinrich von Thünen Institute*. 53 p.
- ICP FORESTS (2019) Forest condition in Europe. 2019 Technical Report of ICP Forests. Vienna: Austrian Research Centre for Forests, BFW Dokumentation 27/2019. 104 p.
- JARCUSKA B, MIHAL I, CIOCIK A, TSAKOV H (2013) Beech bark necrosis: partitioning the environmental and spatial variation of the damage severity in Central and South-Eastern Europe. *Ann For Res* 56: 317–338.
- KUBIAK K, ZOLCIAK A, DAMSZEL M, LECH P, SIEROTA Z (2017) *Armillaria pathogenesis* under climate changes. *Forests* 8: 100.
- LÜDECKE D (2018) ggeffects: Create tidy data frames of marginal effects for 'ggplot' from model outputs. R package version 0.3.3. <https://CRAN.R-project.org/package=ggeffects> (31.5.2020).
- MCDOWELL NG, BEERLING DJ, BRESHEARS DD, FISHER RA, RAFFA KF ET AL (2011) The interdependence of mechanisms underlying climate-driven vegetation mortality. *Trends Ecol Evol* 26: 523–532.
- METEOSCHWEIZ (2018) Hitze und Trockenheit im Sommerhalbjahr 2018 – eine klimatologische Übersicht. Zürich: *Meteo-Schweiz, Fachber* 272. 36 p.

- PASTA S, DE RIGO D, CAUDULLO G (2016) *Quercus pubescens* in Europe: distribution, habitat, usage and threats. In: San-Miguel-Ayanz J, de Rigo D, Caudullo G, Houston Durrant T, Mauri A, editors. European atlas of forest tree species. Luxembourg: Publication Office European Union. pp. 156–157.
- PAULI B, STÖCKLI B, ROSSET C (2016) Wirtschaftliche Konsequenzen waldbaulicher Strategien zur Bewältigung des Klimawandels. Schweiz Z Forstwes 167: 39–48. doi: 10.3188/szf.2016.0039
- POWLES SB (1984) Photoinhibition of photosynthesis induced by visible light. Ann Rev Plant Physiol 35: 15–44.
- REMUND J, VON ARX G, GALLIEN L, REBETEZ M, HUBER B ET AL (2016) Klimawandel in der Schweiz – Entwicklung waldbaulicher Klimagrößen. In: Pluess AR, Augustin S, Brang P, editors. Wald im Klimawandel. Grundlagen für Adaptionsstrategien. Bern: Haupt. pp. 23–37.
- RIHM B, KÜNZLE TH (2019) Mapping Nitrogen deposition 2015 for Switzerland. Technical report on the update of critical loads and exceedance, including the years 1990, 2000, 2005 and 2010. Berne: Federal Office for the Environment. 49 p.
- SCHENK HJ, ESPINO S (2011) Nighttime sap flow removes air from plant hydraulic system. 8th Internat Workshop on Sap Flow, May 8–12 2011, Volterra/IT.
- SCHULDT B, BURAS A, AREND M, VITASSE Y, BEIERKUHNEIN C ET AL (2020) A first assessment of the impact of the extreme 2018 summer drought on Central European forests. Basic Appl Ecol 45: 86–103.
- SCHULLA J (2013) Model description WaSIM (Water balance Simulation Model). Zurich: Hydrology Software Consulting J. Schulla. 335 p.
- SPELLMANN H, SUTMÖLLER J, MEESENBURG H (2007) Risikovorsorge im Zeichen des Klimawandels. AFZ/Der Wald 62: 1246–1249.
- STROHEKER S, FORSTER B, QUELOZ V (2020) Waldschutz Aktuell – 1/2020. Birmensdorf: Eidgenöss. Forschungsanstalt WSL. 2 p.
- THIMONIER A, KOSONEN Z, BRAUN S, RIHM B, SCHLEPPI P ET AL (2018) Total deposition of nitrogen in Swiss forests: comparison of assessment methods and evaluation of changes over two decades. Atmos Environ 198: 335–350.
- URLI M, PORTÉ AJ, COCHARD H, GUENGANT Y, BURLETT R ET AL (2013) Xylem embolism threshold for catastrophic hydraulic failure in angiosperm trees. Tree Physiol 33: 672–683.
- WALINGA I, VAN DER LEE JJ, HOUBA VJ, VAN VARK W, NOVOZAMSKY I (1995) Plant analysis manual. Dordrecht: Kluwer.
- WOHLGEMUTH T, FORSTER B, GESSLER A, GINZLER C, QUELOZ V ET AL (2018) Sommertrockenheit. Zunehmend eine Herausforderung für den Wald. Wald Holz 98 (9): 18–19.

Impacts de l'été sec de 2018 sur les placettes du programme intercantonal d'observation permanente des forêts

Le programme intercantonal d'observation permanente des forêts étudie, depuis 1984, la santé des forêts en analysant les hêtres, les épicéas et les chênes de 185 placettes réparties dans toute la Suisse. Il constitue un instrument approprié pour documenter les changements lents et insidieux qui interviennent dans les forêts. Actuellement, il permet d'observer les réactions des arbres à la sécheresse estivale de 2018 et de mettre en évidence les différences entre les essences et les régions. Les indicateurs de sécheresse, comme le bilan hydrique stationnel minimum, montrent que l'année 2018 n'était pas plus sèche que 2003. 2018 a cependant suivi toute une série d'années sèches. Les dégâts consécutifs, qui apparurent en 2019, ont dépassé toutes les observations faites jusqu'ici dans le réseau de mesure. La proportion de hêtres défoliés à plus de 60% était six fois supérieure à la moyenne de l'ensemble de la période d'observation. Dans quelques placettes, jusqu'à 41% des hêtres étaient défoliés à plus de 60%. En 2018 et 2019, la mortalité du hêtre a quadruplé, voire quintuplé. La hausse était nettement plus marquée dans les placettes mal approvisionnées en phosphore. Chez l'épicéa, la mortalité n'a cessé de croître jusqu'en automne 2019 en raison des attaques de bostryches typographes. Elle a atteint un niveau record de 4.9%, qui est par conséquent beaucoup plus élevé que les valeurs relevées à la suite de l'été caniculaire 2003. Les chênes pédonculé, rouvre et pubescent n'ont pas montré des signes de perte de vitalité au-delà de l'expérience acquise jusqu'à présent. Comparé au chêne rouvre, le chêne pubescent était pourtant plus défolié. Des essais de coloration des faisceaux vasculaires et des mesures de la teneur en eau de rameaux de hêtre et de chêne ont montré que la sécheresse de l'année précédente réduisait l'activité des faisceaux de hêtre et influençait négativement la teneur en eau. Il n'en est pas ainsi pour le chêne. Ces résultats indiquent sans équivoque que les dégâts de 2019 ne sont pas uniquement la conséquence de la sécheresse extrême de 2018, mais qu'ils constituent en fait l'aboutissement de plusieurs années sèches consécutives.

Impacts of the dry summer of 2018 on observation plots studied by the Intercantonal Forest Monitoring Programme

The Intercantonal Forest Monitoring Programme has been studying the health of European beech, Norway spruce and oaks in currently 185 designated observation plots in Switzerland since 1984. This programme is a useful method to document early signs of changes in these trees. The data that is currently being collected is helping to identify the consequences of the dry summer of 2018 and to differentiate the effects of that summer between tree species and regions. Drought indicators such as the minimum site water balance suggest that 2018 was not drier than 2003. However, 2018 was preceded by a series of dry years. The damage that became evident in 2019 exceeded previous findings from across the monitoring network. The proportion of beech trees with a crown transparency of >60% was six times higher than the average measurement from the whole period of the programme. In some plots up to 41% of the beech trees were transparent by more than 60%. The mortality of beech increased by a factor of four or five in 2018 and 2019, respectively. The increase was higher in plots with an insufficient foliar phosphorus concentration. Mortality in Norway spruce increased as a consequence of infestation by European spruce bark beetle and reached 4.9% in the autumn of 2019, which was much higher than the impact of the dry summer of 2003. The common, sessile and pubescent oaks did not show any loss of vitality in 2018–19, however pubescent oak showed a higher crown transparency than sessile oak. Staining of active vessels and measurements of the water content of shoots showed that drought in the previous year reduced vessel activity and reduced the water content of beech shoots, but in oaks this was not the case. These findings are a strong indication that the damage to trees observed in 2019 was not only the consequence of the extreme drought in 2018 but also of a series of dry years.