

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

Herausgeber: Schweizerischer Forstverein

Band: 166 (2015)

Heft: 6

Artikel: Indikatoren zur Schätzung des Trockenheitsrisikos in Buchen- und Fichtenwäldern

Autor: Braun, Sabine / Remund, Jan / Rihm, Beat

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1097548>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 01.05.2026

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

Indikatoren zur Schätzung des Trockenheitsrisikos in Buchen- und Fichtenwäldern

Sabine Braun Institut für Angewandte Pflanzenbiologie (CH)*
Jan Remund Meteotest (CH)
Beat Rihm Meteotest (CH)

Indikatoren zur Schätzung des Trockenheitsrisikos in Buchen- und Fichtenwäldern

Die Anwendung von Klimamodellen zur Prognose zukünftiger Waldentwicklung benötigt quantitative Beziehungen zwischen Trockenheit und der Reaktion von Bäumen, wobei der Begriff «Trockenheit» zunächst definiert werden muss. Die langjährige Datenreihe des Interkantonalen Walddauerbeobachtungsprogramms erlaubte es, für Buche und Fichte verschiedene Trockenheitsindikatoren zu testen, zu vergleichen und quantitative Beziehungen herzuleiten. Für den Grundflächenzuwachs beider Baumarten eigneten sich Indikatoren der Standortwasserbilanz (Site Water Balance, SWB) am besten. Bei der Buchenmortalität waren Standortwasserbilanz und mehrere auf dem Verhältnis zwischen aktueller und potenzieller Evapotranspiration (ETa/ETp) basierende Indikatoren gleichwertig, während bei der Fichtenmortalität ETa/ETp in den ersten 80 Tagen der Vegetationsperiode am besten abschnitt. Mit den genannten Indikatoren wird geschätzt, dass der Grundflächenzuwachs von Buchen im Jahr 2003 – einem Jahr mit extremer Trockenheit – durch die Trockenheit in den Beobachtungsflächen um 32% und derjenige von Fichten um 37% reduziert wurde. Die Fichtenmortalität stieg um 130% an. Bei der Buchenmortalität variieren die Schätzungen je nach Indikator zwischen 54% und 110%. Die an den Beobachtungsstandorten gefundenen Zusammenhänge für den Grundflächenzuwachs wurden mittels Karten auf die ganze Schweiz übertragen. Deutlich treten die trockenen Regionen der Schweiz (Nordschweiz, Jurasüdfuss, Genferseeregion, Wallis und Churer Rheintal) hervor, in welchen der Grundflächenzuwachs von Buchen und Fichten um mehr als 40% reduziert war.

Keywords: drought, drought indicators, historic data, basal area increment, mortality, site water balance, beech, Norway spruce

doi: 10.3188/szf.2015.0361

* Sandgrubenstrasse 25, CH-4124 Schönenbuch, E-Mail sabine.braun@iap.ch

Das Klima in der Schweiz ist bereits jetzt Veränderungen unterworfen, und diese dürften sich in den nächsten Jahrzehnten noch verstärken. Es wird erwartet, dass Hitzesommer wie im Jahr 2003 häufiger auftreten werden (OcCC 2008). Dies stellt eine grosse Herausforderung für Wald und Waldwirtschaft dar. Die Auswirkungen des genannten Sommers auf den Wald sind gut untersucht und waren deutlich (Ciais et al 2005, Leuzinger et al 2005). Klein et al (2014) fassen den heutigen Wissensstand über Trockenheitswirkungen auf den Wald zusammen. Es werden drei verschiedene pflanzenphysiologische Mechanismen diskutiert. Der erste ist, dass der Verschluss von Spaltöffnungen zur Vermeidung des Austrocknens zu einem Mangel an Photosynthese und damit zu einem «Verhungern» (carbon starvation) führt (Adams et al 2009). Diese Hypothese scheint eher unwahrscheinlich, da das Wachstum selten durch die Fotosynthese limitiert wird (Fatichi

et al 2014). Der zweite ist ein Versagen des hydraulischen Systems: Steigt die Wasserspannung, reißen die Wasserfäden in den Leitbahnen, und es tritt Luft ein. Dadurch kommt es zu einer Blockierung der Leitgefässe (Emboliebildung oder Kavitation; Cochard 1992) und damit zu hydraulischem Versagen. Der Tod tritt bei einem Leitfähigkeitsverlust von 50% bei Koniferen (Brodribb & Cochard 2009) und einem solchen von 90% bei Laubböhlzern (Cochard, persönliche Mitteilung) ein. Es ist zurzeit unklar, ob mit Luft gefüllte Leitgefässe während der Vegetationsperiode wieder mit Wasser gefüllt werden können (Schenk & Espino 2011) oder nicht (Wheeler et al 2013). Der dritte Mechanismus ist eine Limitierung der Zellaktivität durch tiefe Wasserpotenziale (Würth et al 2005). Neben den direkten Trockenheitswirkungen muss aber auch die Erhöhung der Parasitenanfälligkeit aufgrund von Trockenheit in Betracht gezogen werden. Bekannt ist vor allem der Zusammenhang

zwischen Borkenkäferbefall und Trockenheit. Die mit einer Trockenperiode meist einhergehenden hohen Temperaturen können die Entwicklung der Insekten beschleunigen (Wermelinger & Seifert 1999), oder Trockenheit kann die Bäume anfälliger machen (Rouault et al 2006). Bei vielen Pilzkrankheiten gilt Ähnliches. So werden zum Beispiel das Triebsterben der Föhre (Blodgett et al 1997), der Hallimasch (Guillaumin et al 1985) oder wurzelbefallende *Phytophthora*-Arten (Jung 2009) durch Trockenheit gefördert. Desprez-Loustau et al (2006) haben einen umfangreichen Review über den Zusammenhang von Trockenheit und Pilzkrankheiten publiziert; die grosse Mehrheit der untersuchten Studien stellten eine Förderung der Krankheiten durch Trockenheit fest. Bei ausgewachsenen Waldbäumen ist dieser sekundäre Trockenheitseffekt wahrscheinlich bedeutender als ein primäres akutes «Verdursten».

Entsprechend den Wirkungsmechanismen für Trockenheit gibt es auch verschiedene Mechanismen für die Trockenresistenz von Bäumen. Oft wird die Resistenz gegenüber Kavitation genannt. So sind Baumarten, die eine höhere Kavitationsresistenz aufweisen, in der Regel auch resistenter gegenüber Trockenheit (Choat et al 2012, Meinzer & McCulloh 2013). Bäume können Austrocknung auch durch Oberflächenverringern (phänologische Anpassung) oder mittels Durchwurzelung tiefer Bodenschichten (Bréda et al 2006) vermeiden.

Die Untersuchung von Trockenheitswirkungen im Wald setzt voraus, dass Trockenheit quantifiziert werden kann, was nicht so einfach ist. Die Niederschlagsmenge allein ist kein guter Trockenheitsindikator. So war zum Beispiel der Sommer 2003 nicht nur durch eine lang andauernde Trockenperiode gekennzeichnet, sondern auch durch erhöhte Temperaturen und damit durch ein erhöhtes Wasserdampf-sättigungsdefizit der Luft. Ein geeignetes Hilfsmittel zur Risikoabschätzung stellen Bodenwassermodelle dar, mit deren Hilfe sich die Trockenheitsbelastung für den Wald besser quantifizieren lässt (Granier et al 2000, Schulla 2013). Solche Modelle berechnen Verdunstung, Bodenwasser-gehalte und Bodenwasserpotenziale in einer zeitlich hohen Auflösung. Für einen Vergleich mit Effektparametern wie dem Wachstum von Bäumen ist jedoch meist eine Zusammenfassung der Daten über ganze Vegetationsperioden oder Teile davon sinnvoller. Für die Beschreibung von Trockenheitseffekten können verschiedene Indikatoren verwendet werden, die einen Bezug zum Wasserhaushalt von Bäumen oder Beständen haben, zum Beispiel der mittlere relative Bodenwassergehalt, das mittlere Bodenwasserpotenzial, die Anzahl Tage, an denen die Trockenheit einen bestimmten Grenzwert überschreitet, Wasserbilanzen mit und ohne Einbezug des Bodenwasserspeichervermögens (nutzbare Feldkapazität, nFK) oder das Verhältnis zwischen aktu-

eller und potenzieller Evapotranspiration (ETa/ETp) beziehungsweise Transpiration (Ta/Tp ; Remund & Augustin 2015, dieses Heft). Die letzten beiden Indikatoren beruhen darauf, dass bei Trockenheit die Transpiration und damit auch die gesamte Evapotranspiration eingeschränkt wird. Voraussetzung für die Berechnung dieser Verhältnisse ist die Definition einer Grenze für den Bodenwasserhaushalt, ab der die Transpiration eingeschränkt wird. Das kann die relative Sättigung wie bei Granier et al (2000) oder ein Bodenwasserpotenzialwert wie bei WaSiM-ETH (Schulla 2013) sein. Das heisst, dass die Berechnung von Trockenheitsindikatoren Kenntnisse über den Wasserhaushalt des Bodens voraussetzt.

Die Wahl des Indikators hängt davon ab, welcher Effekt betrachtet wird. Dabei muss man sich bewusst sein, dass eine Einschränkung der Transpiration nicht gleichbedeutend ist mit einer Einschränkung des Wachstums (Fatichi et al 2014) oder einer Erhöhung der Mortalität. Der von Granier et al (2000) vorgeschlagene Grenzwert von 0.4 für das relative pflanzenverfügbare Wasser (relative extractable water, REW, d.h. die nutzbare Feldkapazität nFK in einer Relativskala von 0 bis 1) ist nur für die Einschränkung der Transpiration gültig. Wagner et al (2015) verglichen eine Reihe von Trockenheitsindikatoren, die sie mit WaSiM-ETH berechnet hatten, mit dendrochronologischen Auswertungen von Buchen aus sieben hessischen Level-II-Flächen. Mit einer Kombination aus der klimatischen Wasserbilanz des Vorjahres, dem ETa/ETp -Verhältnis der Vegetationsperiode, der Anzahl der niederschlagsfreier Tage der frühen Vegetationsperiode mit pflanzenverfügbarem Bodenwasser mit weniger als 40% der nFK in 1 m Bodentiefe und dem Wassersättigungsdefizit während der frühen Vegetationsperiode konnten diese Autoren 27% der Varianz des Wachstums zwischen 1933 und 2005 erklären. Zingg & Bürgi (2008) verglichen das Wachstum in Ertragskundeflächen der Eidgenössischen Forschungsanstalt WSL mit der Abweichung der Regenmenge von einem geglätteten täglichen Durchschnitt. In der Landwirtschaft wird häufig das ETa/ETp -Verhältnis als Indikator eingesetzt (Doorenbos & Kassam 1979). Fuhrer & Jasper (2009) wendeten diesen Indikator für die Schweizer Landwirtschaft an und wählten einen Schwellenwert von 0.8 für das mittlere Verhältnis während der Vegetationsperiode, um Trockenstress zu charakterisieren.

Das Interkantonale Walddauerbeobachtungsprogramm (Braun & Flückiger 2013) weist eine grosse Anzahl Flächen in einem breiten ökologischen Spektrum und mit einer langen Zeitreihe auf. Dessen Daten wurden verwendet, um eine Reihe solcher Trockenheitsindikatoren auf ihre Eignung als Effektparameter zu prüfen. Die Prüfung erfolgte dabei für adulte Buchen und Fichten anhand von zwei Vitali-

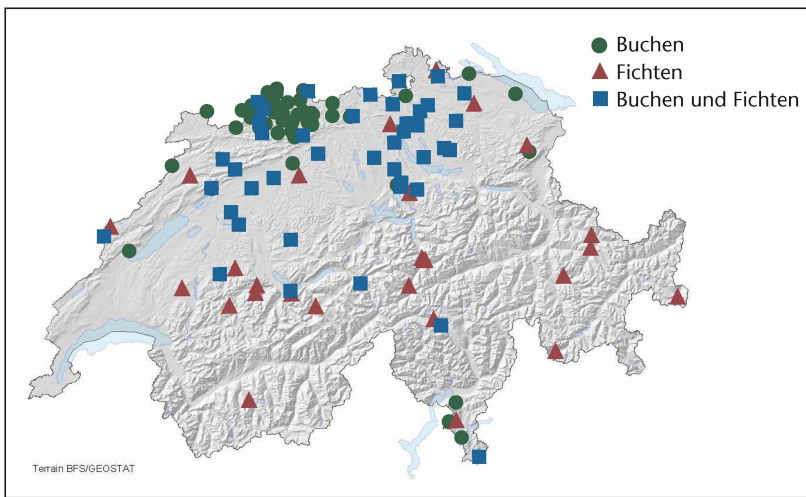


Abb 1 Buchen- und Fichtenbeobachtungsflächen des Interkantonalen Walddauerbeobachtungsprogramms.

tätsindikatoren, dem Grundflächenzuwachs und der Mortalität.

Material und Methoden

Walddauerbeobachtungsflächen

Die für die Untersuchung beigezogenen Beobachtungsflächen mit Buche und Fichte des Interkantonalen Walddauerprogramms erstrecken sich über einen grossen Feuchtigkeitsgradienten von der Nordwestschweiz bis zur Zentralschweiz und ins Tessin (Abbildung 1). Zudem sind Böden mit sehr unterschiedlicher Gründigkeit vertreten. Für eine nähere Beschreibung der Daten und der durchgeführten Auswertungen siehe Braun (2015).

Der Grundflächenzuwachs wurde alle vier Jahre gemessen. Die Mortalität wurde jedes Jahr aufgenommen (Tabelle 1). Sie beinhaltet Bäume, die tot beobachtet wurden, sowie – bei den Fichten – infolge Borkenkäferbefalls zwangsgenutzte Bäume.

Trockenheitsindikatoren

Die Trockenheitsindikatoren wurden mit dem hydrologischen Modell WaSiM-ETH (Schulla 2013) berechnet. Dieses Modell berechnet die potenzielle Verdunstung mit dem Penman-Monteith-Modell (Penman 1948) und die Bodenwasserspannung mit dem Richards-Modell (Richards 1931). Die dafür notwendigen Klimadaten (Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit, Strahlung und Nieder-

schlag) wurden für jede Beobachtungsfläche in täglicher Auflösung aus Daten von Messstationen interpoliert (Remund et al 2011; Remund & Augustin 2015, dieses Heft). Die bodenphysikalischen Eingangsdaten betreffend Horizontenteilung, Bodenart, Lagerungsdichte und Durchwurzelungstiefe wurden aus den Profilaufnahmen nach der bodenkundlichen Kartieranleitung (Benzler et al 1982) abgeleitet, Daten der Bestandesdichte aus den forstlichen Aufnahmen und den Vegetationsaufnahmen. Die nachstehend aufgelisteten Indikatoren wurden über verschiedene Teile der Vegetationsperioden berechnet, die sich am beobachteten Austriebsdatum der Buche gemäss der Datenbank von MeteoSCHWEIZ orientierten (Defila & Clot 2005). Am besten schnitten Auswertungen mit einem fixen Austriebsdatum pro Standort ab, berechnet nach Formel 1). Die Auswahl der besten Zeitperiode erfolgte statistisch durch Vergleich verschiedener Regressionsmodelle.

$$SGS_{Bu} = 108.3 + 0.0179 \times H - 0.03574 \times (KN - 200) \quad (1)$$

SGS_{Bu} : Austriebsdatum Buche

KN: Landeskoordinaten Nord-Süd in km

H: Meereshöhe (m)

Folgende Grössen wurden mit WaSiM-ETH berechnet:

- Verhältnis zwischen aktueller und potenzieller Evapotranspiration (ETA/ETp). Je näher dieses Verhältnis bei 1 liegt, desto weniger ist die Evapotranspiration eingeschränkt und desto geringer ist der Trockenstress. Für die Auswertung wurden zwei Mittelungsperioden verwendet: die ersten 80 Tage nach Blattaustrieb («Frühjahr») und die ganze Vegetationsperiode. Ebenso wurden verschiedene Perzentilwerte berechnet sowie die Zeit, während der das ETA/ETp-Verhältnis einen Schwellenwert von 0.5, 0.6, 0.7, 0.8 oder 0.9 unterschreitet.
- Verhältnis zwischen aktueller und potenzieller Transpiration (Ta/Tp). Auch hier gilt, dass der Trockenstress umso geringer ist, je näher dieses Verhältnis bei 1 liegt.
- Mittleres Bodenwasserpotenzial: gemittelt über eine Bodentiefe von 0–40 oder 0–60 cm und die Vegetationsperiode. Für Korrelationsrechnungen wurde diese Zahl logarithmiert (pF-Wert).
- Wassersättigungsdefizit (mm): Differenz zwischen dem aktuellen Wassergehalt in mm, aufsum-

Indikator	Auflösung	Buchen			Fichten		
		Bäume pro Aufnahme	Flächen	Zeitperiode	Bäume pro Aufnahme	Flächen	Zeitperiode
Grundflächenzuwachs	4 Jahre	641–3303	52–68	1991–2010	1179–1520	47	1995–2010
Mortalität	jährlich	2567–6436	52–93	1987–2012	370–4966	6–71	1987–2012

Tab 1 Verwendetes Datenset mit Angabe der Anzahl Bäume und Flächen sowie der ausgewerteten Zeitperiode. Die Anzahl Bäume und Flächen war zu Beginn der Beobachtungszeit geringer als später, deshalb ist in der Regel ein Bereich angegeben.

miert über die obersten 40 cm des Bodens, und der Feldkapazität (Mass für das pflanzenverfügbare Wasser). Mittelwert über die Vegetationsperiode.

- Relative Sättigung: berechnet über die obersten 40 cm des Bodens und gemittelt über die Vegetationsperiode. Dabei steht der Wert 0 für den permanenten Welkepunkt ($pF=4.2$) und 1 für die Feldkapazität ($pF=1.8$).

Indikatoren der Standortwasserbilanz (Site Water Balance, SWB) wurden in verschiedenen Varianten berechnet. Allen Berechnungen zugrunde liegt die Berechnung der Wasserbilanz auf Tagesbasis nach folgenden Formeln:

$$KWB = \max([Regen - ETp], 0) \quad 2)$$

$$SWB = \max([Regen - ETp + nFK], nFK) \quad 3)$$

mit:

KWB: klimatische Wasserbilanz

SWB: Standortwasserbilanz

ETp: potenzielle Evapotranspiration

nFK: nutzbare Feldkapazität, über den Wurzelraum aufsummiert

KWB wurde jeweils am 1. Januar auf 0 gesetzt, SWB auf nFK.

Die nachstehend aufgelisteten Varianten unterscheiden sich vor allem in der Art der Aufsummierung über die Vegetationsperiode und in der Wahl des Jahreswertes. Allen gemeinsam ist, dass der Jahreswert vor der weiteren statistischen Verarbeitung exponentialtransformiert wurde.

- $SWB_{\text{Ende Jahr}}$: Entspricht der Standortwasserbilanz nach Spellmann et al (2007). Berechnung mit der nutzbaren Feldkapazität (nFK) als Startwert Anfang Jahr und als Maximalwert. Wert Ende Jahr.

- SWB_{August} : Berechnung wie $SWB_{\text{Ende Jahr}}$, aber Wert Ende August.

- SWB_{minimum} : Berechnung wie $SWB_{\text{Ende Jahr}}$, aber tiefster erreichter Wert während der Vegetationsperiode.

- $SWB_{\text{August}} - SWB_{\text{April}}$: Standortwasserbilanz nach Grier & Running (1977). Entspricht der Differenz der SWB-Werte von Ende August und Ende April.

Zusätzlich wurden zwei Varianten geprüft, bei denen das ETa/ETp -Verhältnis aufgrund der Evapotranspiration nach Romanenko (1961) und nach Shuttleworth (1993) berechnet wurde.

Kovariablen

Zur Ermittlung der Nährstoffkonzentration im Laub wurden alle vier Jahre Ende Juli Äste von je acht Bäumen aus dem oberen Kronenbereich mithilfe eines Helikopters geerntet. Bei den Fichten wurden die Nadeln vom Vorjahr für die Analyse verwendet. Die Proben wurden getrocknet, gemahlen und gemäss der Vorschrift von Walinga et al (1995) auf die Elemente Stickstoff (N), Phosphor (P), Kalium (K) und Magnesium (Mg) hin analysiert. Für die Auswer-

tung mit der jährlich erhobenen Mortalität wurden die alle vier Jahre gemessenen Nährstoffwerte zu Jahreswerten interpoliert. Dies kann zwar zu Unschärfen in meteorologisch bedingten jährlichen Variationen führen, fällt aber angesichts der grossen Standortunterschiede nicht stark ins Gewicht.

Die Stickstoffdeposition wurde basierend auf Messdaten der Nassdeposition sowie von Emissionskatastern, Ausbreitungsmodellen und räumlicher Interpolation in einem Raster von $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ modelliert (FOEN, in preparation).¹ Sie umfasst die Summe aller nassen und trockenen Komponenten, inklusive Gasdeposition.

Die stomatare Aufnahme von Ozon wurde für 38 ländliche Ozonmessstationen in der Schweiz mit dem Aufnahmemodell DO_3SE (Emberson et al 2000) für die Jahre 1991 bis 2011 berechnet und mit geostatistischen Verfahren kartiert (Braun et al 2014). Die Rasterauflösung dieser Kartierung betrug $250 \text{ m} \times 250 \text{ m}$.

Statistische Auswertung der Waldbeobachtungsdaten

Die Daten wurden mit einer gemischten Regression unter Einbezug von verschiedenen Kovariablen ausgewertet. Beim Grundflächenzuwachs wurde der Standort als Cluster (random) und die Zuwachperiode (Jahr) als Faktorvariable (fix) eingesetzt. Letzteres diente dazu, durch das Modell nicht berücksichtigte Unterschiede zwischen den Jahren zu entfernen. Der Grundflächenzuwachs wurde in Relation zur Grundfläche zu Beginn der Messperiode berechnet. Verwendet wurde die Funktion lme aus dem Paket $nlme$ in R (Pinheiro et al 2013). Die Auswahl der Prädiktoren erfolgte schrittweise rückwärts durch Plausibilitätsprüfung der erhaltenen Beziehungen und durch Vergleich von Indikatorwerten für die Güte der Regression. Verwendet wurden das Akaike Information Criterion (AIC-Wert) und das Bayes Information Criterion (BIC-Wert). Beide Indikatoren beziehen die Anzahl der für die Regression benötigten Parameter ein und sollten möglichst tief sein, wobei der BIC die Zahl der Variablen stärker gewichtet als der AIC. Die Mortalitätsdaten wurden mit einer gemischten logistischen Regression ausgewertet, ebenfalls mit Standort als Cluster. Hier wurde die Funktion $glmer$ in R eingesetzt (Paket $lme4$; Bates et al 2014). Die Linearität der Beziehungen wurde geprüft, indem eine Variante mit natural spline (R Core Team 2013) oder als Polynom gerechnet wurde.

¹ FOEN (in preparation) Critical loads of Nitrogen and their exceedance – Swiss map on eutrophying nitrogen deposition, produced within the work programme under the Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution. Bern: Federal Office for the Environment.

Parameter	Koeffizient	Standardfehler	p-Wert
(Intercept)	0.2568	0.0420	0.0000
Ozon (POD1)	-0.0012	0.0003	0.0001
SWB _{August} -SWB _{April}	0.0886	0.0119	0.0000
Alter (logarithmiert)	-0.0356	0.0087	0.0001
Periode_1998	-0.0031	0.0012	0.0138
Periode_2002	-0.0174	0.0013	0.0000
Periode_2006	-0.0057	0.0018	0.0016
Periode_2010	-0.0231	0.0016	0.0000

Tab 2 Regressionsergebnis für den Grundflächenzuwachs von Buchen. Abhängige Variable: Grundflächenzuwachs, bezogen auf die Grundfläche jeweils zu Beginn der Messperiode, wurzeltransformiert. POD1: Ozonflux Buchen (mmol/[m²×J]). Standortwasserbilanz SWB_{August}-SWB_{April} exponentialtransformiert: $y=\exp(x/1000)$. Periode_1998 bis Periode_2010: Zuwachsperioden als Faktorvariable (Vergleichsbasis Periode 1995).

Parameter	Koeffizient	Standardfehler	p-Wert
(Intercept)	0.0414	0.0417	0.3206
SWB _{August} -SWB _{April}	0.1224	0.0175	0.0000
Lufttemperatur Frühjahr	0.0063	0.0014	0.0000
Alter (logarithmiert)	-0.0196	0.0060	0.0023
Periode_2002	-0.0134	0.0016	0.0000
Periode_2006	-0.0116	0.0021	0.0000
Periode_2010	-0.0212	0.0017	0.0000

Tab 3 Regressionsergebnis für den Grundflächenzuwachs von Fichten. Abhängige Variable: Grundflächenzuwachs, bezogen auf die Grundfläche jeweils zu Beginn der Messperiode, wurzeltransformiert. Standortwasserbilanz SWB_{August}-SWB_{April} exponentialtransformiert: $y=\exp(x/1000)$. Temperatur Frühjahr: mittlere Lufttemperatur in der Periode 10 Tage vor Blattaustrieb der Buche bis 50 Tage nach Austrieb. Periode_2002 bis Periode_2010: Zuwachsperiode als Faktorvariable (Vergleichsbasis Periode 1998).

Parameter	Koeffizient	Standardfehler	p-Wert
(Intercept)	-3.0452	0.8648	0.0004
Meereshöhe (km)	-3.203	1.0855	0.0032
SWB _{minimum} Vorjahr	-3.2207	0.8042	0.0001

Tab 4 Regressionsergebnis für die Mortalität von Buchen (gruppierte logistische Regression). Abhängige Variablen: Anzahl toter und überlebender Bäume pro Standort und Jahr. AIC=749.9.

Ergebnisse

Grundflächenzuwachs

Grundflächenzuwachs von Buchen

Der Grundflächenzuwachs von Buchen ist nicht nur mit der Trockenheit, sondern auch negativ mit Ozon und mit dem Alter deutlich korreliert (Tabelle 2). Der beste einzelne Trockenheitsindikator war die SWB_{August}-SWB_{April}. Es bestehen keine Hinweise auf Nichtlinearität der Beziehung. Allerdings wurde die SWB exponentialtransformiert, um eine günstigere Werteverteilung zu erreichen, und der Grundflächenzuwachs selbst war wurzeltransformiert. Mit den Koeffizienten wird die trockenheitsbedingte Wachstumsreduktion im Jahr 2003 für die Buchenflächen im Vergleich zum Mittelwert 1981–2011 auf 32% geschätzt.

Eine multivariate Auswertung mit mehreren Trockenheitsindikatoren gleichzeitig hatte zwar ein

tiefere AIC, aber ein höheres BIC und ist deshalb nicht als besser einzustufen als das Regressionsmodell mit nur einer Trockenheitsvariablen.

Grundflächenzuwachs von Fichten

Beim Grundflächenzuwachs der Fichten waren das Alter sowie die Temperatur in der Zeitperiode 10 Tage vor bis 50 Tage nach Blattaustrieb der Buche signifikante Kovariablen. Das Alter war negativ, die Lufttemperatur positiv korreliert (Tabelle 3). Bester einzelner Trockenheitsindikator war wie bei den Buchen die SWB_{August}-SWB_{April}, mit täglicher Auflösung gerechnet. Mit den Koeffizienten wird die trockenheitsbedingte Wachstumsreduktion im Jahr 2003 auf 37% geschätzt. Auch bei den Fichten wurden keine Hinweise auf Nichtlinearität der Beziehung zwischen Grundflächenzuwachs und Trockenheitsindikatoren gefunden, abgesehen von der Exponentialtransformation der SWB. Ebenfalls war die multivariate Auswertung mit mehreren Trockenheitsindikatoren nicht besser als die Auswertung mit nur einer Variablen.

Mortalität

Mortalität von Buchen

Die Mortalität der Buchen war signifikant mit der Trockenheit des Vorjahrs korreliert (Tabelle 4). Klimaparameter des laufenden Jahres zeigten auch bei Mittelung über die Zeit bis zur jährlichen Aufnahme der Kronenverlichtung (ab Mitte Juli) keine Korrelation. Ausser der Trockenheit war noch die Meereshöhe ein signifikanter Prädiktor: In höher gelegenen Flächen war die Mortalität geringer. Bei der Buche waren mehrere Trockenheitsindikatoren fast gleichwertig. Der tiefste AIC-Wert wurde bei SWB_{minimum} beobachtet, aber die AIC-Werte für die Indikatoren ETa/ETp_{Frühjahr} und die Perzentilwerte von ETa/ETp waren um weniger als 2 erhöht, d.h., sie unterscheiden sich nicht signifikant vom besten Trockenheitsindikator. Die Schätzungen für die trockenheitsbedingte Erhöhung der Mortalität nach 2003 variieren je nach Indikator zwischen 54 und 110%, wobei der beste Indikator die höchste Schätzung liefert (vgl. Abbildung 6 im Kapitel «Vergleich verschiedener Trockenheitsindikatoren»).

In den Jahren vor dem Absterben sind die Buchen deutlich stärker verlichtet (Abbildung 2). Das heisst, dass der Absterbeprozess bei den Buchen langsam verläuft und dass zusätzlich zur Trockenheit des Vorjahrs möglicherweise noch weitere Jahre mit einbezogen werden müssen. Deshalb wurde geprüft, ob auch Trockenheitsindikatoren für weiter zurückliegende Jahre berücksichtigt werden müssen. Wenn SWB_{minimum} aus zwei Vorjahren als Mittelwert eingesetzt wird, wird die Regression tatsächlich signifikant verbessert (Tabelle 5, Abbildung 3). Diese Variante wurde entsprechend für die Modellierung der Mortalität unter Klimawandel verwendet.

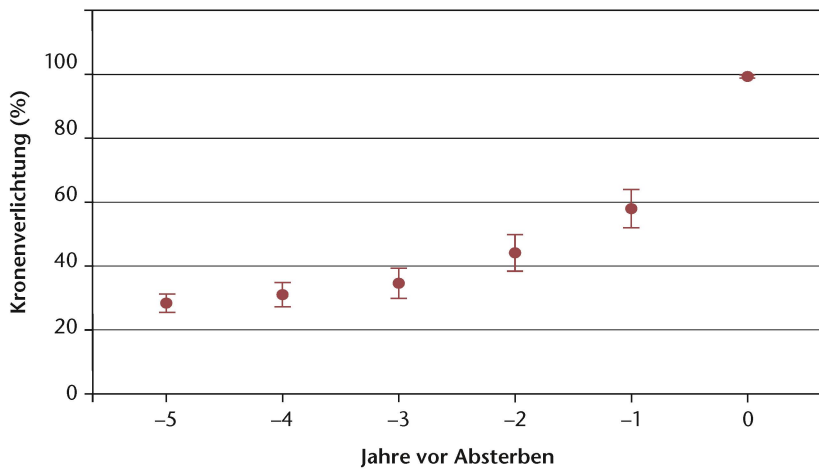


Abb 2 Kronenverlichtung abgestorbener Buchen in den dem Absterben vorausgehenden Jahren. Jahr 0: Absterbejahr. Balken: 95%-Vertrauensbereich.

Parameter	Koeffizient	Standardfehler	p-Wert
(Intercept)	-1.864	1.031	0.0705
Meereshöhe (km)	-2.924	1.077	0.0066
SWB _{minimum} , Mittelwert aus zwei Vorjahren	-4.676	1.074	0.0000

Tab 5 Regressionsergebnis für die Mortalität von Buchen (gruppierte logistische Regression) mit der Standortwasserbilanz SWB_{minimum} als Mittelwert aus zwei Vorjahren. Abhängige Variablen: Anzahl toter und überlebender Bäume pro Standort und Jahr. AIC=746.9.

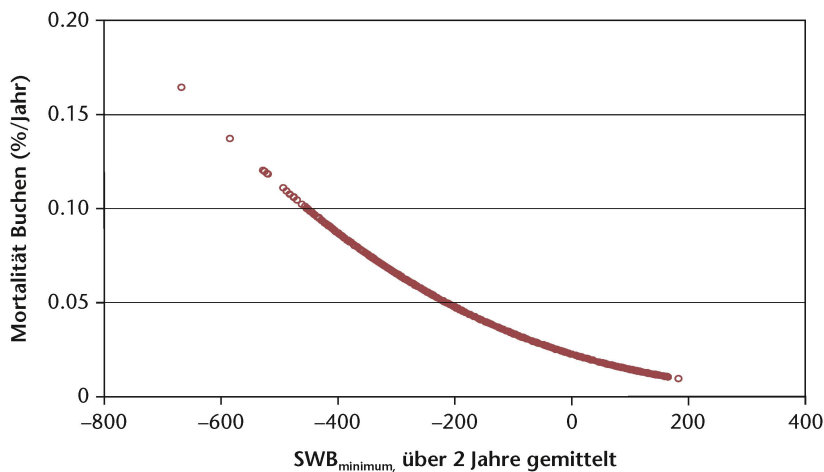


Abb 3 Beziehung zwischen der Mortalität von Buchen und der Standortwasserbilanz SWB_{minimum} als Mittelwert der vorausgehenden zwei Jahre. Aus der in Tabelle 5 gezeigten Regression vorausgesagte Werte.

Parameter	Koeffizient	Standardfehler	p-Wert
(Intercept)	7.796	1.777	0.000
K in Nadeln, gruppiert (≤ 2.8 , > 2.8 mg/g TS)	-1.809	0.320	0.000
Mg in Nadeln, gruppiert (≤ 0.8 , > 0.8 mg/g TS)	-0.921	0.166	0.000
ETa/ETp _{Frühjahr} , Vorjahr	-6.401	0.954	0.000
ETa/ETp _{Frühjahr} , zwei Jahre vorher	-3.922	1.036	0.000
ETa/ETp _{Frühjahr} , drei Jahre vorher	-4.385	1.130	0.000

Tab 6 Regressionsergebnis für die Mortalität von Fichten (logistische Regression) mit ETa/ETp-Verhältnis im Frühjahr (d.h. in den ersten 80 Tagen der Vegetationsperiode) aus drei Vorjahren sowie Kalium- und Magnesiumkonzentration in den Nadeln. Abhängige Variablen: Anzahl toter und überlebender Bäume pro Standort und Jahr. TS: Trockensubstanz.

Mortalität von Fichten

Wie bei der Buche wird die Absterberate durch trockene Verhältnisse in den Vorjahren gefördert, bei der Fichte zeigt das Modell mit Berücksichtigung der letzten drei Jahre die beste Korrelation (Tabelle 6). Bester Indikator war das über die Frühjahrsmonate gemittelte ETa/ETp-Verhältnis. Aufgrund dieser Koeffizienten wird geschätzt, dass die Mortalität bei den Fichten nach 2003 um 130% erhöht war. Zusätzlich zur Trockenheit waren auch Nährstoffkonzentrationen signifikant mit der Fichtenmortalität korreliert. So steigt die Mortalität um den Faktor 6.1, wenn die K-Konzentration in den Nadeln den Wert von 2.8 mg/g unterschreitet. Ist die Mg-Konzentration in den Nadeln tiefer als 0.8 mg/g, steigt die Gesamtmortalität nochmals um einen Faktor 2.5. Zwischen K-Konzentration und Trockenheit besteht eine hochsignifikante Interaktion (Abbildung 4, Tabelle 7): Ist die K-Konzentration in den Fichtennadeln tiefer als 2.8 mg/g, steigt die Mortalität bei Trockenheit deutlich stärker an als bei besserer K-Versorgung.

In den meisten Fällen (89%) konnte die Mortalität bei den Fichten auf Borkenkäferbefall zurückgeführt werden. Dies ist wohl der Grund, weshalb absterbende Fichten im Mittel nur eine leicht erhöhte Kronenverlichtung in den beiden Vorjahren (Abbildung 5) zeigen, deutlich weniger stark als bei den Buchen. Trotzdem trugen die Trockenheitsindikatoren zwei und drei Jahre vor dem Absterben deutlich zur Erklärung der Mortalität bei, sogar noch stärker als bei der Buche.

Vergleich verschiedener Trockenheitsindikatoren

Mithilfe der Regressionsergebnisse wurde für jeden Trockenheitsindikator einzeln berechnet, wie hoch die trockenheitsbedingte Veränderung von Wachstum und Mortalität im Trockenjahr 2003 im Vergleich zur ganzen beobachteten Zeitperiode ausfiel. Dieser Relativwert erlaubte einen direkten Vergleich der verschiedenen Indikatoren. Wie die Abbildung 6 zeigt, gibt es keinen eindeutig besten Indikator, der für beide Vitalitätsparameter gilt. Gut schneiden Indikatoren der SWB beim Grundflächenzuwachs und bei der Mortalität der Buche ab, wobei bei der Mortalität der Buche die Indikatoren, die auf dem ETa/ETp-Verhältnis beruhen, fast gleichwertig sind (Abbildung 6, oben). Bei der Mortalität der Fichte ist ETa/ETp_{Frühjahr} (d.h. über die ersten 80 Tage der Vegetationsperiode) klar der beste Indikator (Abbildung 6, unten). Generell schlecht sind die Indikatoren, die über die obersten 40 oder 60 cm des Bodens gemittelt wurden, wie Wassersättigungsdefizit, relative Sättigung und mittleres Bodenwasserpotenzial. Diese sind zum Teil nicht einmal signifikant mit den geprüften Vitalitätsparametern korreliert. Die beiden ETa/ETp-Indikatoren nach Romanenko

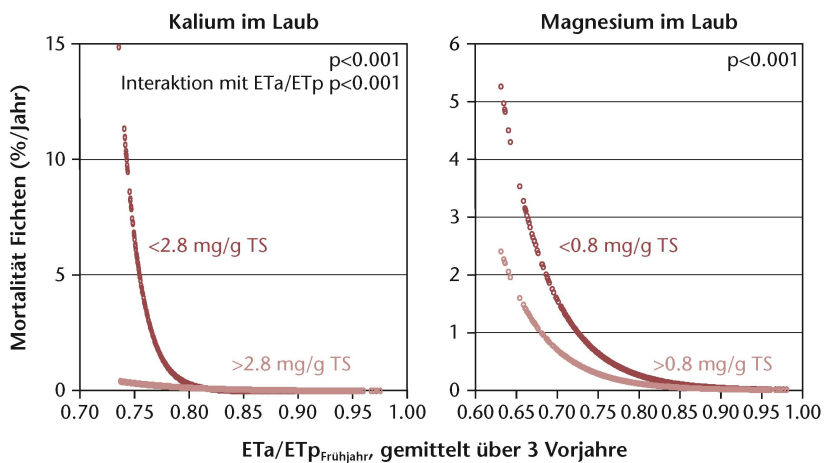


Abb 4 Mortalität von Fichten in Beziehung zur Trockenheit ($ETa/ETp_{Frühjahr}$, d.h. in den ersten 80 Tagen der Vegetationsperiode, über drei Vorjahre gemittelte Werte) und zur Konzentration von Kalium (links) und Magnesium (rechts) in den Fichtennadeln. Aus der in Tabelle 7 gezeigten Regression vorausgesagte Werte.

Parameter	Koeffizient	Standardfehler	p-Wert
(Intercept)	45.135	10.830	0.0000
K in Nadeln gruppiert (≤ 2.8 , $> 2.8 \text{ mg/g TS}$)	-37.524	10.537	0.0004
Mg in Nadeln gruppiert (≤ 0.8 , $> 0.8 \text{ mg/g TS}$)	-0.813	0.172	0.0000
$ETa/ETp_{Frühjahr}$, Mittelwert über 3 Jahre	-62.958	14.168	0.0000
K gruppiert, $ETa/ETp_{Frühjahr}$, Mittelwert über 3 Jahre	45.978	13.771	0.0008

Tab 7 Regressionsergebnis für die Mortalität bei Fichten mit einem dreijährigen Gleitmittel beim ETa/ETp -Verhältnis in den ersten 80 Tagen der Vegetationsperiode («Frühjahr») und einer Interaktion zwischen K-Konzentration und ETa/ETp -Verhältnis.

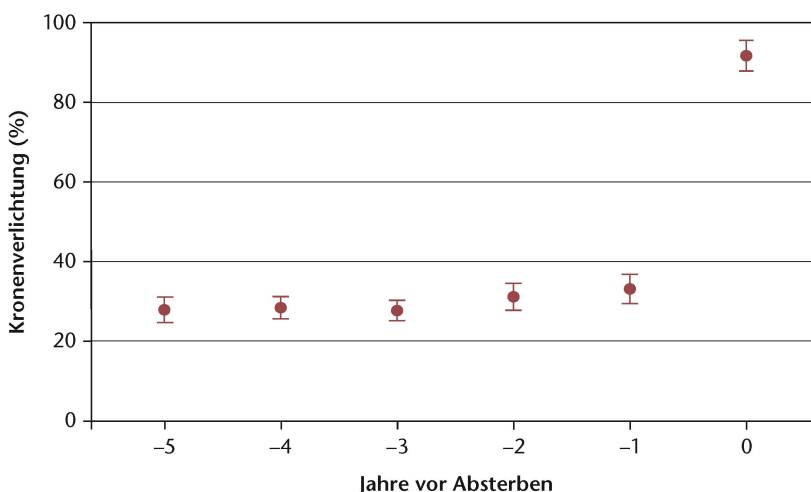


Abb 5 Kronenverlichtung abgestorbener Fichten in den dem Absterben vorausgehenden Jahren. Jahr 0: Absterbejahr. Balken: 95%-Vertrauensbereich.

und nach Shuttleworth schneiden ebenfalls schlecht ab. Niederschlag allein ist ebenfalls ein schlechter Indikator, auch wenn er in der multivariaten Auswertung des Grundflächenzuwachses der Fichten als signifikanter Prädiktor enthalten ist.

Bewertung der Trockenheit in Klimaszenarien

Aufgrund der vorangehenden Vergleiche wird vorgeschlagen, bei der Buche und der Fichte den Einfluss von Trockenheit auf den Grundflächenzuwachs mithilfe einer Regression mit $SWB_{August} - SWB_{April}$ abzuschätzen (bester Indikator gemäss Abbildung 6) und dafür die Formeln 4) und 5) zu verwenden. Für die Abschätzung der trockenheitsbedingten Mortalitätsrate wird für die Buche die über zwei Jahre gemittelte $SWB_{minimum}$ als Indikator vorgeschlagen (Formel 6), für die Fichte hingegen das über die ersten 80 Tage der Vegetationsperiode berechnete und über drei Jahre gemittelte ETa/ETp -Verhältnis im Frühjahr (Formel 7).

$$I_{GBu} = 100 \times (0.0543 + 0.08857 \times e^{SWB1/1000})^2 \quad (4)$$

$$I_{GFi} = 100 \times (-0.0678 + 0.00635 \times T + 0.122 \times e^{SWB1/1000})^2 \quad (5)$$

$$Mortalität_{Buchen} (\%) = 100 \times \frac{e^{(-2.342 - 3.994 \times SWB2 - 0.00326 \times H)}}{1 + e^{(-2.342 - 3.994 \times SWB2 - 0.00326 \times H)}} \quad (6)$$

$$Mortalität_{Fichten} (\%) = 100 \times \frac{e^{(5.761 - 15.15 \times ETa/ETp_{Frühjahr})}}{1 + e^{(5.761 - 15.15 \times ETa/ETp_{Frühjahr})}} \quad (7)$$

wobei:

- I_{GBu} : Grundflächenzuwachs Buchen (in %)
- I_{GFi} : Grundflächenzuwachs Fichten (in %)
- $SWB1$: Standortwasserbilanz nach Grier & Running (1977) = $SWB_{August} - SWB_{April}$
- $SWB2$: 2-Jahres-Mittel der Standortwasserbilanz, Minimum pro Vegetationsperiode ($SWB_{minimum}$; vor der Mittelung exponentialtransformiert)
- H : Höhe über Meer (m)
- T : Lufttemperatur in der Periode 10 Tage vor und 50 Tage nach Blattaustrieb der Buche
- $ETa/ETp_{Frühjahr}$: ETa/ETp in den ersten 80 Tagen der Vegetationsperiode, über drei Jahre gemittelt

Mittels der Gleichungen 3 und 4 sowie Karten der SWB (Remund et al 2011) wurden Karten erstellt, die den Grundflächenzuwachs im Jahr 2003 im Vergleich zu einem langjährigen Mittelwert für Buchen (Abbildung 7) und Fichten (Abbildung 8) zeigen. Deutlich treten die trockenen Regionen der Schweiz (Nordschweiz, Jurasüdfuss, Genferseeregion, bei den Fichten auch Wallis und Churer Rheintal) hervor, in welchen der Grundflächenzuwachs um mehr als 40% reduziert war.

Diskussion

Die Schätzungen für die trockenheitsbedingte Reduktion des Grundflächenzuwachses im Jahr 2003 von 32% bei Buchen und 37% bei Fichten sind vergleichbar mit denjenigen von Ciais et al (2005). Diese Autoren kamen zum Schluss, dass der Verlust der Bruttoprimärproduktion für das Jahr 2003 im europäischen Wald etwa 30% betrug. Diese Über-

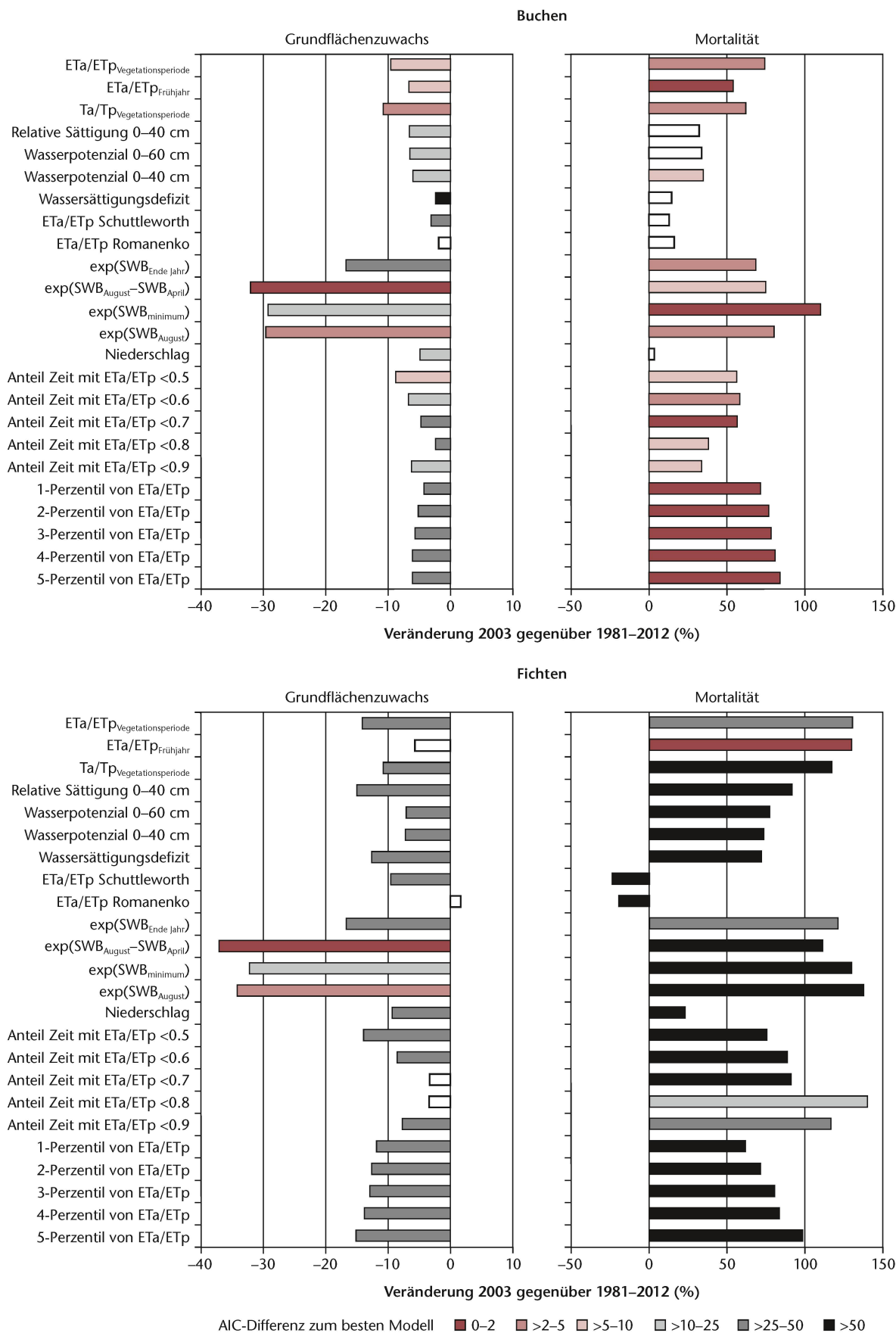


Abb 6 Vergleich verschiedener Trockenheitsindikatoren in Bezug auf den Grundflächenzuwachs (links) sowie die Mortalität (rechts) bei Buchen (oben) und Fichten (unten). Angegeben ist die trockenheitsbedingte Veränderung durch das Trockenjahr 2003 im Vergleich zur Beobachtungsperiode 1981–2012. Die Farben geben die AIC-Differenz zum besten Modell an. Wenn der Balken nicht ausgefüllt ist, war die entsprechende Regression nicht signifikant. Exp.: Exponentialtransformiert. Lesebeispiel: Aufgrund der Regression mit $SWB_{August} - SWB_{April}$ (beste Regression für den Grundflächenzuwachs) wird berechnet, dass die Trockenheit 2003 bei der Buche zu einer 32%igen Wachstumsreduktion führte.

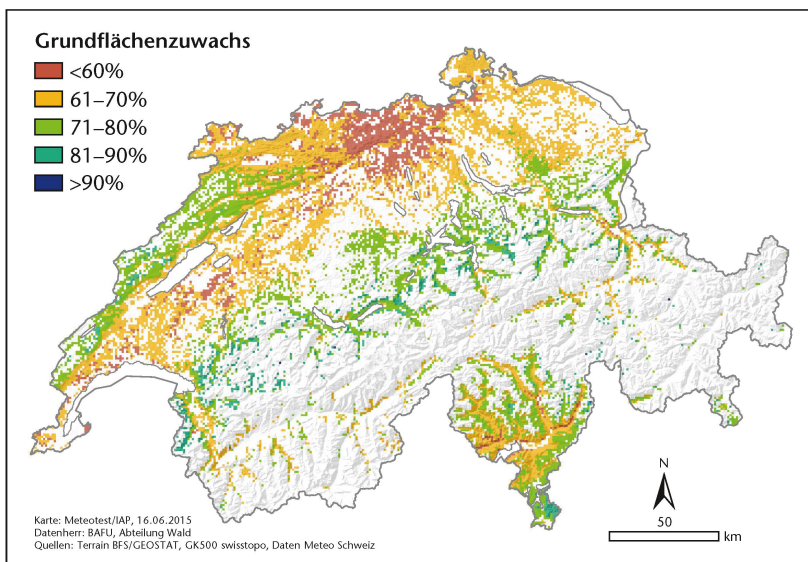


Abb 7 Grundflächenzuwachs von Buchen im Jahr 2003 im Vergleich zum Mittelwert 1981–2010. Modelliert mithilfe der Formel 3). Nur Flächen mit einem Laubholzanteil von >50% wurden berücksichtigt (1-km-Raster von BFS 2004).

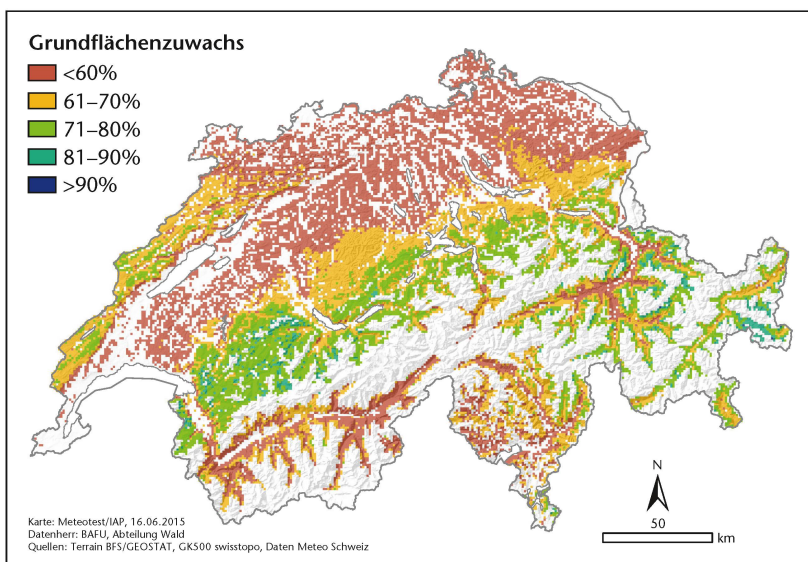


Abb 8 Grundflächenzuwachs von Fichten im Jahr 2003 im Vergleich zum Mittelwert 1981–2010. Modelliert mithilfe von Formel 4. Nur Flächen mit einem Nadelholzanteil von >50% wurden berücksichtigt (1-km-Raster von BFS 2004).

einstimmung und der Umstand, dass die auf der multivariaten Regression mit anderen Indikatoren basierenden Schätzungen ziemlich ähnlich ausfielen, lassen den Schluss zu, dass die quantitative Schätzung für das Wachstum vertrauenswürdig ist. Da die Beziehungen linear sind, ist eine Extrapolation bis zu einem gewissen Grad möglich, obwohl auch bei linearen Beziehungen mit ökophysiologischen «Bruchpunkten» gerechnet werden muss.

Bei der Mortalität, mit einer logistischen Verteilung, ist eine Extrapolation über die bestehenden Daten hinaus stärker mit Fehlern behaftet. Zudem wird die Genauigkeit der Schätzung aus methodischen Gründen durch die grosse Zahl von Nullbeobachtungen eingeschränkt. Die berechneten Schätzwerte sind möglicherweise zu tief. Dennoch kann

festgehalten werden, dass die Trockenheit von mehr als einem Jahr zur Erklärung beiträgt: bei den Buchen sind es zwei, bei den Fichten drei Jahre. Das heisst, dass die Mortalität der ausgewachsenen Waldbäume in den Beobachtungsflächen ein eher langsamer Prozess ist. Damit rückt ein akutes hydraulisches Versagen durch Kavitation als Mortalitätsursache eher in den Hintergrund. Eine langsame Vitalitätseinbusse und der Befall mit Schwächeparasiten sind wahrscheinlicher. Bei den Fichten ist dies vor allem der Borkenkäfer. Die Versorgung mit Nährstoffen, besonders mit Kalium, spielt eine wesentliche Rolle bei der Resistenz gegenüber Parasitenbefall (Amtmann et al 2008). Die Interaktion zwischen der Kaliumversorgung und Trockenheit, wie sie bei der Fichtenmortalität beobachtet wurde, lässt sich mit dieser Resistenz gegenüber Parasitenbefall sowie mit der wichtigen Rolle von Kalium in der Regulation des Wasserhaushalts (Marschner 1995) erklären. Es muss darauf hingewiesen werden, dass die Kaliumkonzentration in den Fichtennadeln mit der Stickstoffdeposition negativ korreliert war (Braun & Flückiger 2013). Wird Kalium im Regressionsmodell ersetzt durch die Stickstoffdeposition, lässt sich eine signifikante Interaktion zwischen Trockenheit und der Stickstoffdeposition nachweisen. Die Stickstoffdeposition verstärkt damit den Trockenheitseffekt ebenfalls. Obwohl die Regression schlechter wird, bedeutet dies trotzdem, dass die Stickstoffdeposition die Trockenheitsgefährdung von Fichten verstärkt. Auch Ozon kann die Trockenheitsempfindlichkeit von Waldbäumen erhöhen, indem die Reaktionsfähigkeit der Spaltöffnungen vermindert wird («sluggishness»), obwohl die primäre physiologische Reaktion ein Spaltenschluss ist (Review bei Mills et al 2013).

Bei den Buchen wurde die Mortalitätsursache nicht im Detail untersucht. Häufige Ursachen sind Schleimflussflecken, die als Folge des Befalls mit dem Pilz *Nectria coccinea* oder mit Hallimasch (*Armillaria mellea*) auftreten können. Keines der beiden Symptome wurde jedoch quantitativ erfasst.

Dass absterbende Bäume in den Vorjahren stärker verlichtete Kronen aufweisen, wurde bereits von Dobbertin & Brang (2001) beschrieben. Diese Autoren benutzten eine erhöhte Kronenverlichtung, um Mortalität vorauszusagen, ohne aber nach Baumarten zu differenzieren.

Schlussfolgerung

Auswertungen mit Walddauerbeobachtungsdaten von Buchen und Fichten in Bezug zu verschiedenen Trockenheitsindikatoren zeigten, dass sich die optimalen Trockenheitsindikatoren je nach Vitalitätsparameter unterscheiden. Die Wachstumsparameter (Grundflächenzuwachs) waren besser mit der SWB, einem Indikator für potenzielle Trockenheit,

korreliert, während bei der Buchenmortalität SWB und ETa/ETp, Letzteres ein Indikator für aktuelle Trockenheit, als Prädiktoren praktisch gleichwertig waren. Für die Fichtenmortalität war ETa/ETp über die ersten 80 Tage der Vegetationsperiode am besten. Die aus dem Datensatz hergeleiteten quantitativen Beziehungen eignen sich für die Anwendung in Klimaszenarien und damit für zukünftige Risikobeurteilungen bezüglich dieser beiden Baumarten. ■

Eingereicht: 8. Februar 2015, akzeptiert (mit Review): 7. August 2015

Dank

Die Daten wurden im Rahmen des Interkantonalen Walddauerbeobachtungsprogramms erhoben, das von den Kantonen Aargau, Bern, Basel-Landschaft, Basel-Stadt, Solothurn, Thurgau, Zürich und Zug sowie dem BAFU finanziert wird. Die Auswertung erfolgte im Rahmen eines im BAFU/WSL-Forschungsprogramm «Wald und Klimawandel» durchgeführten und finanzierten Projektes. Bei den Auswertungen wurden wir unterstützt von PD Dr. C. Schindler, Swiss Tropical and Public Health Institute der Universität Basel. Die Anwendung des hydrologischen Modells wurde beratend begleitet von Karsten Jasper. Alle diese Unterstützungen seien herzlich verdankt.

Literatur

- ADAMS HD, GUARDIOLA-CLARAMONTE M, BARRON-GAFFORD GA, VILLEGAS JC, BRESHEARS DD ET AL (2009) Temperature sensitivity of drought-induced tree mortality portends increased regional die-off under global-change-type drought. *Proc Nat Acad Sci* 106: 7063–7066.
- AMTMANN A, TROUFLARD S, ARMENGAUD P (2008) The effect of potassium nutrition on pest and disease resistance in plants. *Physiol Plant* 133: 682–691.
- BATES D, MAEHLER M, BOLKER B, WALKER S (2014) lme4: Linear mixed effects models using Eigen and S4. R package version 1.1–7. <http://CRAN.R-project.org/package=lme4> (11.8.2015).
- BENZLER JH, FINNERN H, MÜLLER W, ROESCHMANN G, WILL KH ET AL (1982) *Bodenkundliche Kartieranleitung*. Stuttgart: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung. 331 p.
- BFS (2004) *Waldmischungsgrad der Schweiz*. Datensatz mit Auflösung 100 m (WMG100). Neuenburg: Bundesamt Statistik, Sektion Geoinformation. www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index/dienstleistungen/geostat/datenbeschreibung/waldmischungsgrad.html (12.8.2015).
- BLODGETT JT, KRUGER EL, STANOSZ GR (1997) Effects of moderate water stress on disease development by *Sphaeropsis sapinea* on red pine. *Phytopathology* 87: 422–434.
- BRAUN S (2015) *Die Eignung verschiedener Trockenheitsindizes zur Abschätzung des Trockenheitsrisikos für den Wald und ihre standortspezifische Entwicklung bis 2050/2100*. Schönleubach: Institut für Angewandte Pflanzenbiologie. 58 p.
- BRAUN S, FLÜCKIGER W (2013) *Wie geht es unserem Wald?* Schönleubach: Institut für Angewandte Pflanzenbiologie. 126 p.
- BRAUN S, SCHINDLER C, RIHM B (2014) Growth losses in Swiss forests caused by ozone: epidemiological data analysis of stem increment data of *Fagus sylvatica* L. and *Picea abies* Karst. *Environ Pollut* 192: 129–138.
- BREDA N, HUC R, GRANIER A, DREYER E (2006) Temperate forest trees and stands under severe drought: a review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences. *Ann For Sci* 63: 625–644.
- BRODRIBB TJ, COCHARD H (2009) Hydraulic failure defines the recovery and point of death in water-stressed conifers. *Plant Physiol* 149: 575–584.
- 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.
- CIAIS P, REICHSTEIN M, VIOVY N, GRANIER A, OGEE J ET AL (2005) Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature* 437: 529–533.
- COCHARD H (1992) Vulnerability of several conifers to air embolism. *Tree Physiol* 11: 73–83.
- DEFILA C, CLOT B (2005) Phytophenological trends in the Swiss Alps, 1951–2002. *Meteorol Z* 14: 191–196.
- DESPREZ-LOUSTAU ML, MARÇAIS B, NAGELEISEN LM, PIOUS D ET AL (2006) Interactive effects of drought and pathogens in forest trees. *Ann For Sci* 63: 597–612.
- DOBBERTIN M, BRANG P (2001) Crown defoliation improves tree mortality models. *For Ecol Manage* 141: 271–284.
- DOORENBOS J, KASSAM AH (1979) *Yield response to water*. Rome: Food Agriculture Organization, FAO Irrigation and Drainage paper 33.
- EMBERSON LD, ASHMORE MR, CAMBRIDGE HM, SIMPSON D, TUOVINEN JP (2000) Modelling stomatal ozone flux across Europe. *Environ Pollut* 109: 403–414.
- FATICHI S, LEUZINGER S, KÖRNER C (2014) Moving beyond photosynthesis: from carbon source to sink-driven vegetation modeling. *New Phytol* 201: 1086–1095.
- FUHRER J, JASPER K (2009) *Bewässerungsbedürftigkeit von Acker- und Grasland im heutigen Klima*. Agrarforschung 16: 396–401.
- GRANIER A, LOUSTAU D, BREDA N (2000) A generic model of forest canopy conductance dependent on climate, soil water availability and leaf area index. *Ann Sci For* 57: 755–765.
- GRIER CG, RUNNING SW (1977) Leaf area of mature northwestern coniferous forests: Relation to site water balance. *Ecology* 58: 893–899.
- GUILLAUMIN JJ, BERNARD C, DELATOUR C, BELGRAND M (1985) Root pathology of *Quercus-robur*-dieback in the Tronçais Forest (of Central France). *Ann Sci For* 42: 1–22.
- JUNG T (2009) Beech decline in Central Europe driven by the interaction between *Phytophthora* infections and climatic extremes. *For Pathol* 39: 73–94.
- KLEIN T, YAKIR D, BUCHMANN N, GRÜNZWEIG JM (2014) Towards an advanced assessment of the hydrological vulnerability of forests to climate change-induced drought. *New Phytol* 201: 712–716.
- LEUZINGER S, ZOTZ G, ASSHOFF R, KÖRNER C (2005) Responses of deciduous forest trees to severe drought in Central Europe. *Tree Physiol* 25: 641–650.
- MARSCHNER H (1995) *Mineral nutrition of higher plants*. London: Academic Press. 889 p.
- MEINZER FC, MCCULLOH KA (2013) Xylem recovery from drought-induced embolism: where is the hydraulic point of no return? *Tree Physiol* 33: 331–334.
- OCCC (2008) *Das Klima ändert – was nun?* Der neue UN-Klimabericht (IPCC 2007) und die wichtigsten Ergebnisse aus Sicht der Schweiz. Bern: Organe consultatif sur les changements climatiques. 47 p.
- PENMAN HL (1948) Natural evaporation from open water, bare soils and grass. *Proc R Soc Lond* 193 (A): 120–145.
- PINHEIRO J, BATES D, DEBROY S, SARKAR D, THE R DEVELOPMENT CORE TEAM (2013) nlme: Linear and nonlinear mixed effects models. R package version 3.1–108.
- R CORE TEAM (2013) *R: A language and environment for statistical computing*. Vienna: R Foundation for Statistical Computing.

- REMUND J, AUGUSTIN S (2015) Zustand und Entwicklung der Trockenheit in Schweizer Wäldern. Schweiz Z Forstwes 166: 352–360. doi: 10.3188/szf.2015.0352
- REMUND J, FREHNER M, WALTHERT L, KÄGI M, RIHM B (2011) Schätzung standortspezifischer Trockenstressrisiken in Schweizer Wäldern. Schlussbericht. Bern: Meteotest. 48 p.
- RICHARDS LA (1931) Capillary conduction of liquids through porous mediums. Physics 1: 318–333.
- ROMANENKO VA (1961) Computation of the autumn soil moisture using a universal relationship for a large area. Kiev: Hydrometeorological Research Institute, Proc 3.
- ROUAULT G, CANDAU JN, LIEUTIER F, NAGELEISEN LM, MARTIN JC ET AL (2006) Effects of drought and heat on forest insect populations in relation to the 2003 drought in Western Europe. Ann For Sci 63: 613–624.
- SCHENK HJ, ESPINO S (2011) Nighttime sap flow removes air from plant hydraulic system. In: 8th International Workshop on Sap Flow, May 8–12, 2011, Volterra. S2–4.
- SCHULLA J (2013) Model description WaSIM (Water balance Simulation Model). Zurich: WASIM. 324 p. www.wasim.ch/de/products/wasim_description.htm (12.8.2015).
- SHUTTLEWORTH J (1993) Evaporation. In: Maidment, DR, editor. Handbook of Hydrology. New York: McGraw-Hill. pp. 4.1–4.53.
- SPELLMANN H, SUTMÖLLER J, MEESENBURG H (2007) Risikovor-sorge im Zeichen des Klimawandels. AFZ/Der Wald 62: 1246–1249.
- WAGNER M, SUTMÖLLER J, NAGEL RV, RUDOLPH J, HANSEN J ET AL (2015) Untersuchungen zur Anpassungsfähigkeit hessischer Buchenwälder an veränderte Klimabedingungen. Abschlussbericht. Göttingen: Nordwestdeutsche Forstl Vers.anstalt. 106 p.
- WALINGA I, VAN DER LEE JJ, HOUBA VJ, VAN VARK W, NOVOZAM-SKY I (1995) Plant analysis manual. Dordrecht: Kluwer.
- WERMELINGER B, SEIFERT M (1999) Temperature-dependent re-production of the spruce bark beetle *Ips typographus*, and analysis of the potential population growth. Ecol Entomol 24: 103–110.
- WHEELER JK, HUGGETT BA, TOFTE AN, ROCKWELL FE, HOLBROOK NM (2013) Cutting xylem under tension or supersaturated with gas can generate PLC and the appearance of rapid re-covery from embolism. Plant Cell Environ 36: 1938–1949.
- WÜRTH MKR, PELÁEZ-RIEDL S, WRIGHT SJ, KÖRNER C (2005) Non-structural carbohydrate pools in a tropical forest. Oecologia 143: 11–24.
- ZINGG A, BÜRGI A (2008) Trockenperioden seit 1900 und Wald-wachstum: eine Analyse langfristiger Datenreihen. Schweiz Z Forstwes 159: 352–361. doi: 10.3188/szf.2008.0352

Indicateurs pour estimer le risque de sécheresse dans les hêtraies et pessières

L'utilisation de modèles climatiques pour le pronostic du développement à venir des forêts nécessite la relation quantitative entre la sécheresse et la réaction des arbres, pour laquelle le terme de «sécheresse» doit tout d'abord être défini. La longue série de données du programme intercantonal d'observations forestières permet de tester et comparer différents indicateurs de sécheresse pour le hêtre et l'épicéa et ainsi en dériver une relation quantitative. Pour l'accroissement de la surface terrière des deux essences, les indicateurs du bilan hydrique des stations se sont avérés être les meilleurs. Pour la mortalité du hêtre, le bilan hydrique des stations et plusieurs indicateurs se basant sur la relation entre évapotranspiration réelle et potentielle (E_{Tr}/E_{Tp}) étaient équivalents, tandis que la relation E_{Tr}/E_{Tp} était meilleure pour la mortalité de l'épicéa dans les 80 premiers jours de la période de végétation. Avec les indicateurs mentionnés, on a estimé que l'accroissement de la surface terrière du hêtre en 2003 – une année de sécheresse extrême – a été réduit dans les surfaces d'observation de 32% en raison de la sécheresse et de 37% pour l'épicéa. La mortalité de l'épicéa a augmenté de 130%. Les estimations pour la mortalité du hêtre varient selon des indicateurs entre 54% et 110%. Les relations déterminées pour les surfaces d'observation par rapport à l'accroissement de la surface terrière ont été reportées sur des cartes pour l'ensemble de la Suisse. Les régions les plus sèches en Suisse (Suisse septentrionale, pied sud du Jura, région lémanique, Valais et vallée septentrionale du Rhin), dans lesquelles l'accroissement de la surface terrière du hêtre et de l'épicéa est réduit de plus de 40%, se distinguent nettement.

Indicators for quantitative assessment of drought risks in beech and Norway spruce forests

The application of climate models to forecast future forest development asks for quantitative drought-response relationships, with the term “drought” first needing a definition. The long-term data series of an intercantonal forest observation program allowed to test various drought indicators, to compare them and to derive quantitative relationships for beech and Norway spruce. For basal area increment of both tree species indicators of the site water balance (SWB) performed best. For beech mortality site water balance and several indicators basing on the ratio between actual and potential evapotranspiration (E_{Tr}/E_{Tp}) were equivalent, whereas for spruce mortality E_{Tr}/E_{Tp} during the first 80 days of the season was the best indicator. With these indicators the average drought related growth reduction after 2003 – a year with extreme drought – was estimated to amount to 32% for beech and 37% for Norway spruce. Mortality of Norway spruce increased by 130%, whereas the estimates for the increase of beech mortality vary between 54 and 110%, depending on the indicator. The observed quantitative relationships for growth were applied to map drought responses of growth for Switzerland. The maps clearly show the dry regions of Switzerland (northern Switzerland, southern Jura foothills, Lemanic region, Valais and Rhine valley around Chur), where basal area increment of beech and Norway spruce was reduced by more than 40%.