

Die Eignung verschiedener Trockenheitsindices zur Abschätzung des Trockenheitsrisikos für den Wald und ihre standortspezifische Entwicklung bis 2050/2100

Schlussbericht des Projektes im
Forschungsprogramm „Wald und Klimawandel“

Report

Author(s):

Braun, Sabine

Publication date:

2016

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010691682>

Rights / license:

In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

Schlussbericht des Projektes

Die Eignung verschiedener Trockenheitsindices zur Abschätzung des Trockenheitsrisikos für den Wald und ihre standortspezifische Entwicklung bis 2050/2100

im Forschungsprogramm Wald und Klimawandel

Sabine Braun



04.04.2016



Institut für Angewandte Pflanzenbiologie Schönenbuch

Autoren

Sabine Braun¹

¹Institut für Angewandte Pflanzenbiologie, Sandgrubenstr. 25, 4124 Schönenbuch

Ein Projekt-Schlussbericht aus dem Forschungsprogramm «Wald und Klimawandel» von BAFU und WSL (www.wsl.ch/wald_klima)

Projektlaufzeit: 1.10.2012 bis 30.4.2014.

Zitierung

Braun, S.. (2015). Die Eignung verschiedener Trockenheitsindices zur Abschätzung des Trockenheitsrisikos für den Wald und standortsspezifische Entwicklung 2050/2100. Schlussbericht eines Projekts im Forschungsprogramm "Wald und Klimawandel" von BAFU und WSL. Schönenbuch, Institut für Angewandte Pflanzenbiologie.

Im pdf-Format zu beziehen über www.wsl.ch/wald_klima

Dank

Mit täglichen, räumlich interpolierten Klimadaten lieferten Beat Rihm und Jan Remund, Meteotest Bern, eine wichtige Grundlage für diese Auswertungen, sowohl für die historischen Berechnungen als auch für die Anwendung von Klimamodellen. PD Dr. Christian Schindler vom Swiss Tropical and Public Health (TPH) Institute, Universität Basel, hat bei der statistischen Auswertung wichtige Beiträge geliefert. Seine Mitwirkung sei hier herzlich verdankt. Dr. Karsten Jasper und Dr. Jürg Schulla haben in verdankenswerter Weise Unterstützung bei der Anwendung des hydrologischen Modells WaSiM-ETH geleistet. Die Vegetationsaufnahmen wurden von Richard Stocker, Waldwesen Birrwil, und von Thomas Burger, Burger & Liechti Ennetbaden, durchgeführt. Auch ihre Mitwirkung sei hier herzlich verdankt.

©Institut für Angewandte Pflanzenbiologie, Schönenbuch, 2015

Inhalt

1	Zusammenfassung.....	4
2	Abstract: Indicators for the quantitative assessment of drought risks in forests of beech and Norway spruce and their forecasted development for 2050/2100	5
3	Einleitung.....	6
4	Material und Methoden	7
4.1	Projektablauf	7
4.2	Daten	7
4.2.1	Stammzuwachs	7
4.2.2	Triebwachstum	8
4.2.3	Kronenverlichtung	8
4.2.4	Mortalität.....	8
4.2.5	Nährstoffkonzentrationen, Stickstoffdeposition und Ozon.....	8
4.3.	Berechnung von Trockenheits- und Klimaindikatoren	10
4.3.1.	Das Wasserhaushaltsmodell WaSiM-ETH.....	10
4.3.2.	Die Standortswasserbilanz.....	10
4.3.3.	Frostereignisse und Klima.....	12
4.3.4.	ETa/ETp nach Romanenko/Shuttleworth	12
4.4.	Klimaszenarien.....	13
4.5.	Statistik	14
5	Ergebnisse.....	15
5.1.	Stammzuwachs.....	15
5.1.1.	Buchen	15
5.1.2.	Fichten	17
5.2.	Triebwachstum	19
5.2.1.	Buchen	19
5.2.2.	Fichten	20
5.3.	Verlichtung	23
5.3.1.	Buchen	23
5.3.2.	Fichten	24
5.4.	Mortalität	25
5.4.1.	Buchen	25
5.4.2.	Fichten	28
5.5.	Übersicht über alle ausgewerteten Parameter	32
5.6.	Gleichungen für die Bewertung des Trockenstresses in Klimaszenarien	34
5.7.	Karten	35
5.8.	Vegetationseinheiten und Trockenheit.....	36
5.9.	Projektion in die Zukunft	38
5.9.1.	Szenario CLM	38
5.9.2.	Szenario RCA.....	42
5.9.3.	Szenario REGCM3	47
6	Diskussion	52
7	Literatur.....	54

Abkürzungen

AIC: Akaike Information Criterion

BIC: Bayes Information Criterion

ET_a/ET_p : Verhältnis zwischen aktueller und potentieller Evapotranspiration

T_a/T_p: Verhältnis zwischen aktueller und potentieller Transpiration

SWB: Site Water Balance, Differenz zwischen Niederschlag und potentieller Evapotranspiration unter Einbezug der nutzbaren Feldkapazität

KWB: klimatische Wasserbilanz, Differenz zwischen Niederschlag und potentieller Evapotranspiration

WaSiM: Water balance Simulation Model

1 Zusammenfassung

Aktuelle Klimaszenarien für das 21. Jahrhundert prognostizieren für die Schweiz höhere Temperaturen und mehr Witterungsextreme. Zunehmende Trockenheit wird daher künftig im Waldbau der Schweiz eine grosse Rolle spielen. Es besteht deshalb Bedarf an quantifizierbaren Trockenheitsindikatoren, die die Einschätzung der künftigen Eignung der Baumarten ermöglichen. Ziel des Projektes war die Prüfung verschiedener solcher Indikatoren auf ihre Eignung als Effektparameter für Trockenheitseinflüsse. Dadurch sollte die Entwicklung einer standorts- und baumartenbezogenen Risikoabschätzung für zukünftigen Trockenstress ermöglicht werden.

Im Rahmen des Interkantonalen Walddauerbeobachtungsprogramms wurden viele Daten zu Vitalität und Wachstum auf mittlerweile 179 Flächen erhoben. Die Datenreihe erstreckt sich z.T. auf über 30 Jahre. Aus diesen Daten wurden Stamm- und Triebwachstum, Kronenverlichtung und Mortalität von Buchen und Fichten als Vitalitätsindikatoren ausgewählt. Sie wurden in Beziehung zu verschiedenen Trockenheitsindikatoren gesetzt. Getestet wurden verschiedene den Wasserhaushalt eines Bestandes beschreibende Parameter wie der relative Wassergehalt des Bodens, das mittlere Bodenwasserpotential, das Wassersättigungsdefizit, das Verhältnis zwischen aktueller und potentieller Evapotranspiration (standortsspezifische Berechnung mit dem hydrologischen Modell WaSiM-ETH), das Evapotranspirationsverhältnis nach Romanenko und Shuttleworth sowie die Site Water Balance (Ergebnisse des Projektes „Schätzung standortspezifischer Trockenstressrisiken in Schweizer Wäldern“ von Meteotest).

Entgegen den Erwartungen gibt es nicht „DEN“ besten Trockenheitsindikator, sondern eine Reihe besserer und schlechterer Indikatoren. Der beste Trockenheitsindikator für das Stammwachstum, die Standortwasserbilanz (Site Water Balance SWB), schätzte die Wachstumsreduktion durch das Trockenjahr 2003 fast gleich ein wie ein multivariates Verfahren mit anderen Prädiktoren. Ein weiterer guter Prädiktor war das mit dem Modell WaSiM-ETH berechnete Verhältnis zwischen aktueller und potentieller Evapotranspiration, entweder als Mittelwert über die Vegetationsperiode, als Häufigkeitsverteilung oder als Schwellenwert mit Überschreitungsdauer. Die anderen Indikatoren waren deutlich schlechter oder hatten teilweise nichtsignifikante oder unplausible Ergebnisse. So waren die Niederschlagsmenge allein sowie die über die obersten 40 cm des Bodens gemittelten Indikatoren Wassersättigungsdefizit, relativer Wassergehalt oder Bodenwasserpotential in allen Auswertungen ziemlich schlechte Prädiktoren. Auch die Evapotranspirationsverhältnisse nach Romanenko und Shuttleworth waren schlechte Prädiktoren für die untersuchten Vitalitätsparameter.

Mittels Regression zwischen Stammzuwachs und Standortwasserbilanz wird geschätzt, dass durch das Trockenjahr 2003 das Wachstum von Buchen um 32% und von Fichten um 37% reduziert war. Die Fichtenmortalität stieg um 130% an. Bei der Buchenmortalität variieren die Schätzungen je nach Indikator zwischen 54% und 110%.

Vegetationseinheiten werden üblicherweise in Ökogrammen mit einer Säure-/Basen-Achse und einer Feuchteachse angeordnet. Es wäre zu erwarten, dass die Feuchteachse mit Trockenheitsindikatoren korreliert. Das ist nur sehr schwach und nur am trockenen Ende der Skala der Fall, wobei die Site Water Balance besser differenzierte als das Evapotranspirationsverhältnis von WaSiM-ETH. Stärker korreliert war die Vernässungsstufe des Bodenprofils. (Anmerkung nach Abschluss dieses Berichts: diese war Thema eines späteren Projekts im Rahmen von Wald und Klima).

Mit dem hydrologischen Modell WaSiM-ETH wurden Klimaszenarien für die Flächen der Interkantonalen Dauerbeobachtung berechnet. Die Berechnungen basieren auf dem Szenario A1B und wurden mit drei verschiedenen Klimamodellen (CLM, RCA, und REGCM3) simuliert. Das Modell CLM liefert für die vergangene Periode 1981-2012 die realistischsten Werte. Von den geprüften Modellen ist es dasjenige mit den stärksten Veränderungen in der Zukunft. Detaillierter angeschaut wurden die Veränderungen für die Zeitperiode 2045-2074. Die Extrapolation der Regressionsergebnisse zwischen Trockenheit und Wachstum für diese Zeitperiode lässt eine mittlere Zuwachsreduktion pro Standort von bis zu 33% für Buchen und von 28% für Fichten erwarten. Die Fichte kann von den Temperatursteigerungen profitieren, was die Wachstumsreduktionen durch die Trockenheit teilweise kompensiert. Dafür ist die trockenheitsbedingte Erhöhung der Mortalität bei den Fichten deutlich höher als bei den Buchen: im Extremfall steigt die Mortalität auf 17.7% (Fichten) bzw. auf 0.33% (Buchen).

2 Abstract: Indicators for the quantitative assessment of drought risks in forests of beech and Norway spruce and their forecasted development for 2050/2100

Climate scenarios for the 21st century forecast higher temperatures and increasing weather extremes. Thus, increasing drought is expected to play a larger role in Swiss forest management. This asks for quantifiable drought indicators which will allow to predict the suitability of a site for certain tree species. Aim of the project was the comparison of various drought indicators for their ability to quantify drought effects and species specific risk assessments.

The long-term time series of an intercantonal forest observation program allowed to test various drought indicators, to compare them and to derive quantitative relationships. 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 (ETA/ETP) were equivalent, whereas for spruce mortality ETA/ETP 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 32% for beech and to 37% for Norway spruce. The mortality of Norway spruce increased by 130% whereas the estimates for the increase in 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, Geneva region, Valais and Rhine valley around Chur) where basal area increment of beech and Norway spruce was reduced by more than 40%.

The hydrological model WaSIM-ETH was used to calculate climate scenarios for the plots in the intercantonal forest observation program. The calculations based on the scenario A1B and were simulated with three different climate models (CLM, RCA and REGCM3). For the past time period 1981-2012, the simulations by the model CLM were most realistic. This model predicts, however, the strongest changes for the future. The predictions for the time period 2045-2074 were more closely looked at. A growth reduction by up to 33% for beech and up to 28% for Norway spruce (average per site) is expected. Norway spruce will be able to profit from temperature increases and thus compensate some drought reductions. However, the drought induced increase in mortality rates will be much higher in Norway spruce than in beech: the maximum expected rate is 17.7% compared to 0.33% in beech.

3 Einleitung

Das Klima in der Schweiz ist bereits jetzt Veränderungen unterworfen, die in den nächsten Jahrzehnten wahrscheinlich stark zunehmen werden. Es wird erwartet, dass Hitzesommer wie 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). Trockenheit kann die Pflanzen entweder durch Kohlenstoffmangel infolge geschlossener Stomata („Verhungern“) oder durch Versagen des hydraulischen Systems („Verdursten“) beeinträchtigen (McDowell et al. 2008, O'Grady et al. 2013), wobei neuere Daten letztere Hypothese bestätigen (Fatichi et al. 2014). Wichtig ist aber auch ein erhöhter Befall, also eine verminderte Abwehr, durch Parasiten nach Trockenheit (Desprez-Loustau et al. 2006).

Der Sommer 2003 war nicht nur durch eine langandauernde Trockenperiode gekennzeichnet, sondern auch durch erhöhte Temperaturen und damit durch ein erhöhtes Wasserdampf-sättigungsdefizit der Luft. Eine Modellierung der zukünftigen Regenmengen allein ist deshalb kein geeignetes Mittel, um den zukünftigen Trockenstress an einem Standort zu prognostizieren. Ein geeignetes Hilfsmittel zur Risikoabschätzung stellen Bodenwassermodelle dar, die die Ergebnisse von Klimaszenarien hinsichtlich Trockenheitsbelastung für den Wald besser quantifizieren können (Granier et al. 2000, Schulla 2013).

Bei Trockenheit wird die Transpiration und damit auch die gesamte Evapotranspiration eingeschränkt. Verhältnisse aktueller zu potentieller Transpiration (T_a/T_p) oder aktueller zu potentieller Evapotranspiration (ET_a/ET_p) sind deshalb geeignete, häufig verwendete Trockenheitsindikatoren. ET_a/ET_p ist aus Gründen der Energiebilanz einfacher zu berechnen. Voraussetzung für die Berechnung dieser Verhältnisse ist die Definition einer Grenze für das Bodenwasser, bei dem die Transpiration eingeschränkt wird. Das kann die relative Sättigung wie bei Granier et al. (2000) oder ein Bodenwasserpotentialwert wie bei WaSiM-ETH (Schulla 2013) sein. Das heisst, dass die Berechnung von Trockenheitsrisiken Kenntnisse über den Wasserhaushalt des Bodens voraussetzt. Allerdings muss man sich dabei bewusst sein, dass eine Einschränkung der Transpiration nicht gleichbedeutend ist wie eine Einschränkung des Wachstums (Fatichi et al. 2014) oder eine Erhöhung der Mortalität.

Hydrologische Modelle berechnen Verdunstung, Bodenwassergehalte und Bodenwasserpotentiale in einer zeitlich hohen Auflösung. Für einen Vergleich mit Effektparametern wie dem Wachstum von Bäumen ist jedoch meist eine Zusammenfassung für ganze Vegetationsperioden oder Teilen davon sinnvoller. In Niedersachsen erklärten die Faktoren Wasserverfügbarkeit im Vorjahressommer, Bodenfeuchte im vorangehenden Winter und Austrocknungsgeschwindigkeit im Frühsommer zu mehr als 50 % den Wachstumsverlauf der Buchen seit 1960 (Fleck et al. 2010). Für die Beschreibung von Trockenheitseffekten können verschiedene Indikatoren verwendet werden, die einen Bezug zum Wasserhaushalt von Bäumen oder Beständen haben, z.B. mittlerer relativer Bodenwassergehalt, mittleres Bodenwasserpotential, Anzahl Tage, an denen die Trockenheit einen bestimmten Grenzwert überschreitet, Verhältnis zwischen aktueller und potentieller Evapotranspiration in der Vegetationszeit u.a..

Die Wahl des Indikators hängt davon ab, welcher Effekt betrachtet wird. So fanden Granier et al. (2000) eine Beziehung zwischen dem relativen pflanzenverfügbaren Wasser (REW, relative extractable water, d.h. nFK in einer Relativskala von 0 bis 1) und der mittels Stammfluss gemessenen Kronenleitfähigkeit, die für verschiedene Baumarten Gültigkeit hatte (*Quercus petraea*, *Fagus sylvatica*, *Abies bornmulleriana*, *Picea abies*, *Pinus pinaster*). Sie fanden einen Grenzwert für verminderte Kronenleitfähigkeit bei $REW=0.4$. Grigoryan et al. (2010) verglichen drei verschiedene Indices: eine Differenz zwischen aktueller und potentieller Evapotranspiration mit Schwellenwert, einen relativen Bodenwassergehalt ähnlich wie Granier sowie die nach Durchwurzelungsintensität gewichtete Wasserspannung im Wurzelraum. Die Autoren verwendeten das hydrologische Modell WaSiM-ETH. Klap et al. (2000) berechneten das Verhältnis zwischen aktueller und potentieller Transpiration (T_a/T_p), um das Trockenheitsrisiko in deutschen Wäldern zu schätzen. Sie werteten dieses Verhältnis als Mittelwert über die Zeitperiode 1987-1995. Jahresmittelwerte >0.95 werden als sehr feucht, von <0.6 als sehr trocken eingestuft.

In der Landwirtschaft wird häufig ET_a/ET_p als Indikator eingesetzt (Doorenbos und Kassam 1979). Fuhrer und Jasper (2009) wendeten diesen Indikator für die Schweizer Landwirtschaft an. Sie wählten einen Schwellenwert von 0.8 für das mittlere Verhältnis während der Vegetationsperiode, um Trockenstress zu charakterisieren.

4 Material und Methoden

4.1 Projektablauf

Das Projekt umfasste drei Phasen:

1. Parametrisierung des hydrologischen Modells WaSiM-ETH (Schulla 2013) für alle 179 Flächen des Interkantonalen Walddauerbeobachtungsprogramms. Dies beinhaltete vor allem die Parametrisierung von 39 Eichenflächen, die 2008 dem Programm hinzugefügt worden waren. Als klimatische Input-Variablen wurden die realen Klimadaten in täglicher Auflösung verwendet (von 1980-2012), die im Projekt "Schätzung standortspezifischer Trockenstressrisiken in Schweizer Wäldern" (Remund 2011) räumlich interpoliert wurden. Zum Vergleich wurden auch die Ergebnisse der Trockenstressberechnung von Jan Remund für dieselben Beobachtungsflächen herangezogen.
2. Mittels epidemiologischer Auswertung von Vitalitätsparametern aus den Waldbeobachtungsflächen wie Stammwachstum, Triebwachstum und Kronenverlichtung wurden verschiedene Trockenheitsindices evaluiert und Schwellenwerte abgeleitet.
3. Die evaluierten Indikatoren wurden in die Zukunft (bis 2050/2100) projiziert, basierend auf dem von der Projektleitung zur Verfügung gestellten Klimaszenario A1B. Die Eingangsdaten wurden von Jan Remund, Meteotest, auf tägliche Werte umgerechnet. Die Ergebnisse wurden nach Standorts- und Bestandeseinheiten stratifiziert.

4.2 Daten

Die Auswertungen wurden mit Daten aus dem Interkantonalen Walddauerbeobachtungsprogramm (Braun und Flückiger 2013, Abb. 1) durchgeführt. Diese Flächen erstrecken sich über einen grossen Feuchtigkeitsgradienten: für Buchen und Fichten von der Nordwestschweiz bis zur Zentralschweiz, für Eichen zudem bis ins Genferseegebiet. Zudem sind Böden mit sehr unterschiedlicher Tiefgründigkeit vertreten. Als Vitalitätsindikatoren wurden Daten von Stammzuwachs, Triebwachstum, Kronenverlichtung und Mortalität verwendet. Der untersuchte Zeitraum ist jeweils bei der Beschreibung des entsprechenden Parameters näher spezifiziert.

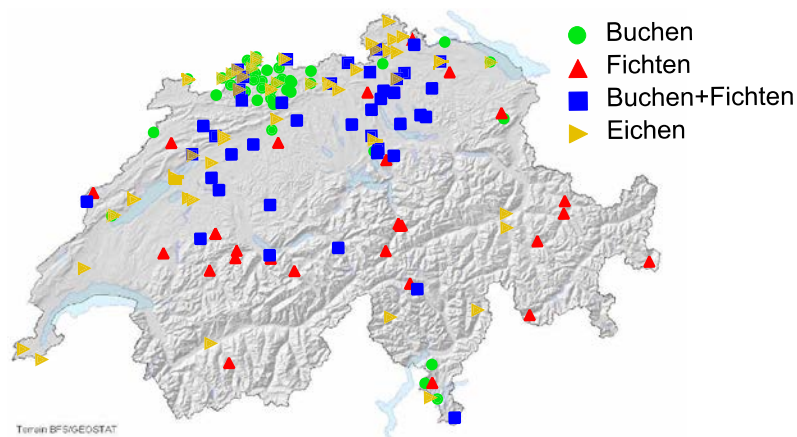


Abb. 1: Beobachtungsflächen des Interkantonalen Dauerbeobachtungsprogramms.

4.2.1 Stammzuwachs

Der Stammzuwachs wird alle vier Jahre durch Kluppierung der Bäume an markierten Stellen auf Brusthöhe gemessen. Pro Fläche und Messzeitpunkt liegen 30-60 Einzelbaummessungen vor. Der Stammzuwachs wurde als jährlicher Basalflächenzuwachs ausgewertet, und zwar in % der Basalfläche zu Beginn der Messperiode. Für die Auswertungen der Trockenheit wurden die Zeitperioden 1992-2010 (Buchen) bzw. 1995-2010 (Fichten) ausgewählt, da für diese Perioden auch Modellierungen des Ozonflux vorliegen (Braun et al. 2014). Bei den Buchen

wurde der Ozonflux als Kovariable bei den Regressionen mit eingesetzt, da er deutlich signifikant war. Bei den Fichten wurden lediglich Trockenheitsindikatoren geprüft, da der Ozonflux nicht signifikant korreliert war.

4.2.2 Triebwachstum

Das Triebwachstum wird seit 1984 alle vier Jahre an den für die Nährstoffanalyse geernteten Trieben rückwirkend gemessen. Die Triebwachstumsdaten wurden zu Trockenheitsindices des laufenden und des Vorjahrs in Beziehung gesetzt, wobei verschiedene Mittelungsperioden innerhalb der Vegetationsperiode verglichen wurden. Die getesteten Zeitperioden orientieren sich am Blattaustrieb der Buchen (AUSTRBU) sowie am Austrieb der Fichten (AUSTRFI) aus der phänologischen Datenbank von Meteo Schweiz (Defila und Clot 2005). Diese Daten liegen für jedes Jahr vor und wurden jeweils höhenkorrigiert, um von den Phänologiestandorten auf die Waldbeobachtungsflächen zu interpolieren.

Bei der Buche wurde der Fruchtbehang an den gleichen Trieben rückwirkend ausgezählt und liegt damit als Einzelbaumergebnis vor, bei den Fichten ist er das Resultat einer sommerlichen Einstufung des Behangs mit diesjährigen Zapfen im Rahmen der Kronenansprache und wurde als Standortsmittel in die Auswertung einbezogen.

4.2.3 Kronenverlichtung

Die Bäume in den Dauerbeobachtungsflächen werden einmal jährlich, zwischen Mitte Juli und Ende August, visuell auf Kronenverlichtung angesprochen. Sie wird in Prozentstufen eingeschätzt und nach einer international einheitlichen Skala bewertet (UNECE 2003). Bei den Fichten erfolgt gleichzeitig eine Abschätzung des Zapfenbehangs. Die Aufnahmen werden immer durch das gleiche Team durchgeführt. Wegen Inkonsistenzen wurden bei den Buchen die ersten Beobachtungsjahre (1984-1986), bei den Fichten die Jahre 1985-1994 aus den Auswertungen ausgeschlossen. Die Zeitreihe umfasst daher die Daten 1987-2012 bzw. 1995-2012. Für die Datenanalyse wurde die mittlere Kronenverlichtung pro Standort und Jahr verwendet. Sie wurde vor der Analyse logtransformiert.

4.2.4 Mortalität

Im Rahmen der jährlichen Kronenansprachen werden abgestorbene Bäume, d.h. Verlichtungsstufe 4, ebenfalls aufgenommen. Da die meisten IAP-Walddauerbeobachtungsflächen bewirtschaftet sind und durchforstet werden, ist diese Aufnahme der Mortalität eine konservative Schätzung – Zwangsnutzungen wurden nur berücksichtigt, wenn sie nachgewiesenermassen auf Borkenkäferbefall zurückgeführt werden konnten. Nicht eingeschlossen sind ausserdem Schäden durch Windwurf, die gesondert betrachtet wurden (Braun et al. 2003). Das Datenset umfasst 3323 Beobachtungen (Flächen x Jahre) mit insgesamt 215'811 Einzelbeobachtungen seit 1985/1987.

4.2.5 Nährstoffkonzentrationen, Stickstoffdeposition und Ozon

Zur Ermittlung der Nährstoffkonzentration im Laub wurden alle vier Jahre Ende Juli Äste von je acht Bäumen aus dem oberen Kronenbereich mit dem Helikopter 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) analysiert. Für die Auswertung mit der jährlich erhobenen Mortalität und dem Triebwachstum 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 m × 100 m modelliert (FOEN 2015). Sie umfasst die Summe aller nassen und trockenen Komponenten, inklusive Gasdeposition.

Die stomatäre Aufnahme von Ozon wurde für 38 ländliche Ozonmessstationen in der Schweiz mit dem Aufnahmmodell DO3SE (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 m × 250 m.

Indikator	Auf- lösung	Buchen				Fichten			
		Bäume	Flächen	Zeit- periode	tote Bäume	Bäume	Flächen	Zeit- periode	tote Bäume
Stammzuwachs	4 Jahre	641-3303	52-68	1991-2010		1179-1520	47	1995-2010	
Triebwachstum	jährlich	354-654	56-85	1987-2010		135-298	17-39	1984-2010	
Mortalität	jährlich	2567-6436	52-93	1987-2012	96	370-4966	6-71	1987-2012	395
Kronenverlichtung	jährlich	2763-6459	58-94	1987-2011		2401-5037	43-73	1995-2012	

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.

4.3. Berechnung von Trockenheits- und Klimaindikatoren

4.3.1. Das Wasserhaushaltsmodell WaSiM-ETH

Trockenheit wurde mit dem hydrologischen Modell WaSiM-ETH (Schulla 2013) quantifiziert. Dieses Modell berechnet die Evapotranspiration mit dem Penman-Monteith-Modell (Penman 1948) und die Bodenwasserspannung mit dem Richards-Modell (Richards 1931). Die dafür notwendigen Klimadaten wurden von Jan Remund (Meteotest) für jede Beobachtungsfläche auf tägliche Mittelwerte für Temperatur, relative Feuchte, Windgeschwindigkeit, Strahlung und Regen interpoliert. Die bodenphysikalischen Eingangsdaten Horizontenteilung, Bodenart, Lagerungsdichte und Durchwurzelungstiefe wurden aus den Profilaufnahmen abgeleitet, Daten der Bestandesdichte aus den forstlichen Aufnahmen und den Vegetationsaufnahmen. Für die Buchen wurde die beobachtete Wurzeltiefe eingesetzt. Bei den Fichten wurde sie für die Berechnungen auf maximal 60 cm beschränkt, da in früheren Auswertungen Trockenheitsindikatoren, die das Bodenwasser bis 60 cm berücksichtigen, besser mit dem Stammzuwachs korreliert waren als solche, die die eine grössere, beobachtete Wurzeltiefe beinhalteten (Braun et al. 2014).

Folgende Grössen wurden mit WaSiM-ETH berechnet :

- Verhältnis zwischen aktueller (ETa) und potentieller (ETp) Evapotranspiration (ETa/ETp). Je näher dieses Verhältnis bei eins liegt, umso geringer ist der Wasserstress. Die Transpiration wird im Modell eingeschränkt, wenn das Bodenwasserpotential einen Schwellenwert, in den vorliegenden Berechnungen -35 kPa ($p_F=2.5$), unterschreitet. Die Transpiration wird zusätzlich auch in staunassen Böden eingeschränkt (aktuell bei einem relativen Wassergehalt von >0.95). Für die Auswertung der Buchenstammzuwachsdaten wurden verschiedene Mittelungsperioden verglichen: die ersten 80 Tage nach Blattaustrieb oder die ganze Vegetationsperiode. Ebenso wurden verschiedene Perzentilwerte berechnet sowie die Zeit, während der das ETa/ETp einen bestimmten Schwellenwert unterschreitet.
- Verhältnis zwischen aktueller (Ta) und potentieller (Tp) Transpiration. Von der potentiellen Transpiration wurde in WaSiM noch die Interzeptions- und die Schneeverdunstung abgezogen. Da in WaSiM die aktuelle, nicht jedoch die potentielle Transpiration von der Vegetationsdichte abhängt, wurde die aktuelle Transpiration für jeden Standort so skaliert, dass das Verhältnis Ta/Tp im Maximum eins erreichte. Im Mittel wurde mit 0.87 multipliziert.
- Mittleres Bodenwasserpotential: gemittelt über eine feste Bodentiefe von 40 oder 60 cm und das ganze Jahr. Für Korrelationsrechnungen wurde diese Zahl logarithmiert (p_F -Wert).
- Wassersättigungsdefizit (mm): Differenz zwischen dem aktuellen Wassergehalt in mm, aufsummiert über die obersten 40 cm des Bodens, und der Feldkapazität. Mittelwert über die ganze Vegetationsperiode.
- Relative Sättigung (0: permanenter Welkepunkt = p_F 4.2, 1: Feldkapazität = p_F 1.8). Mittelwert über die ganze Vegetationsperiode.

4.3.2. Die Standortswasserbilanz

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

$$KWB = \max((Regen - ETp), 0)$$

$$SWB = \max((Regen - ETp + nFK), nFK)$$

mit:

KWB: klimatische Wasserbilanz, am 1. Januar auf 0 gesetzt

SWB: Standortswasserbilanz, am 1. Januar auf nFK gesetzt

ETP: potentielle Evapotranspiration

nFK: nutzbare Feldkapazität, über den Wurzelraum aufsummiert

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.

1. SWB Ende Jahr: Site Water Balance nach Spellmann et al. (2007): Aufsummierung der täglichen Differenzen zwischen Niederschlag und Verdunstung, mit nutzbarer Feldkapazität als Startwert anfangs Jahr. Wenn der Wert die nutzbare Feldkapazität überstieg, wurde er auf diesen Wert gesetzt (=maximale Sättigung). Der am Ende der Vegetationsperiode erreichte Wert wurde in die Auswertungen eingesetzt.

2. SWB August: Berechnung wie Site Water Balance nach Spellmann, aber Wert Ende August
3. SWB minimum: Berechnung wie Site Water Balance nach Spellmann, aber tiefster erreichter Wert während der Vegetationsperiode.
4. SWB August – SWB April: Site Water Balance nach Grier und Running (1977), berechnet nach Zimmermann (<http://www.wsl.ch/staff/niklaus.zimmermann/programs/amls/swb.html>), jedoch mit Tageswerten anstatt mit Monatsmitteln : Aufsummierung der Differenz zwischen Niederschlag und Verdunstung. Der Tageswert Ende April wurde vom Tageswert Ende August subtrahiert.
5. Da die SWB-Auswertungen nach Grier und Running z.T. erstaunlich gute Korrelationen mit den getesteten Vitalitätsparameter lieferte, obwohl bei diesem Indikator die nutzbare Feldkapazität des Bodens nicht mehr enthalten ist, wurde der Indikator SWB minimum (Punkt 3) noch in einer Variante ohne nFK berechnet. Diese ist nachstehend KWBminimum benannt.

Die Indikatorwerte wurden, sofern nichts anderes angegeben ist, über die ganze Vegetationsperiode gemittelt. Zusätzlich wurden verschiedene Mittelungsperioden getestet, die sich am Zeitpunkt des Blattaustriebs der Buche orientieren. Dieser wird von Meteo Schweiz jährlich beobachtet (Defila und Clot 2005). Die Daten von 18 phänologischen Beobachtungsstationen wurden durch jährliche Regressionen mit der Meereshöhe an die Walddauerbeobachtungsflächen angepasst.

In Abb. 2 ist der Mittelwert des Verhältnisses zwischen aktueller und potentieller Evapotranspiration über die gesamte ausgewertete Zeitperiode, 1981-2012, für die einzelnen Beobachtungsflächen dargestellt. Die trockenen Gebiete in der Nordschweiz, im Raum Genf und im Wallis sind bei dieser Auswertung deutlich erkennbar. Im Kanton Graubünden gibt es auch trockene Regionen. Abb. 3 zeigt den gleichen Indikator in der zeitlichen Entwicklung als Mittelwert (dicke grüne Linie), die feuchteste Fläche (Zugerberg Vordergeissboden, blaue Linie), die trockenste Buchenfläche (Riehen Ausserberg, orange Linie) und die trockenste Eichenfläche (Sion, rote Linie). In Abb. 4 ist der entsprechende zeitliche Verlauf für die Site Water Balance nach Grier & Running dargestellt. ETa/ETp differenziert die Wuchsregionen zwar besser (die Fläche Sion ist mit diesem Indikator besser abgetrennt), aber die Site Water Balance zeigte die besseren Korrelationen mit dem Wachstum (vgl. Kap. 4.5).

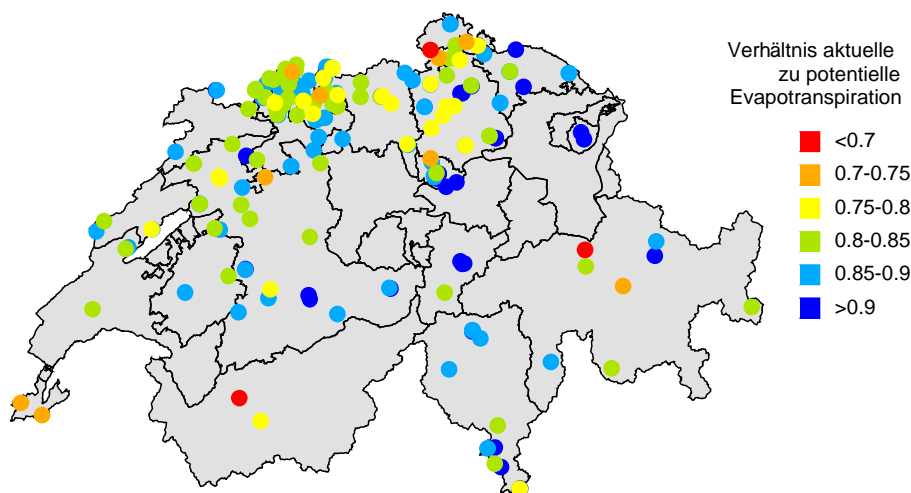


Abb. 2: Modelliertes Trockenheitsrisiko für IAP-Dauerbeobachtungsflächen als Verhältnis aktueller zu potentieller Evapotranspiration (Mittelwert über die Jahre 1981-2012, jeweils Vegetationsperiode).

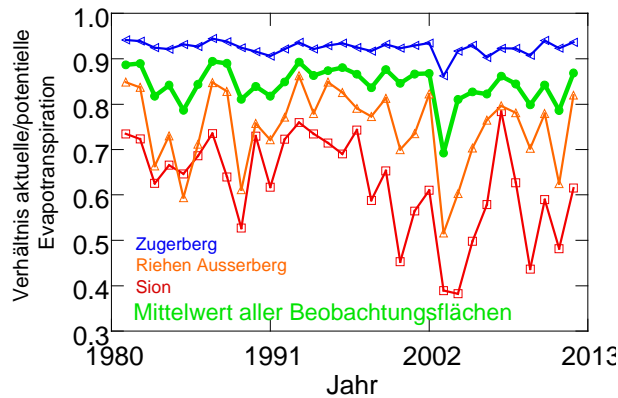


Abb. 3: Modelliertes Verhältnis zwischen aktueller und potentieller Evapotranspiration über die ganze Vegetationsperiode: zeitlicher Verlauf des Mittelwertes über alle Beobachtungsflächen (grüne Linie) sowie als Beispiele die feuchteste Buchenfläche (Zugerberg), die trockenste Buchenfläche (Riehen Ausserberg) und die trockenste Eichenfläche (Sion).

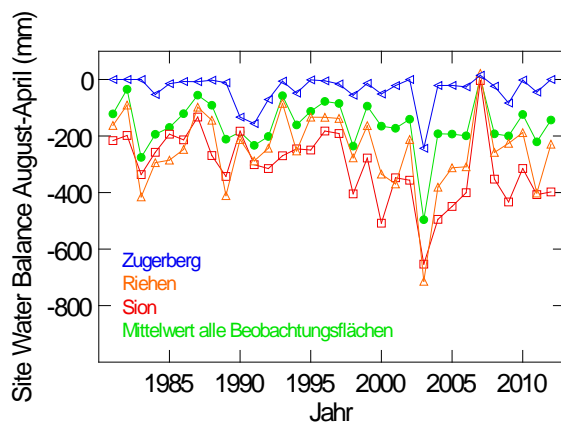


Abb. 4: Zeitlicher Verlauf der Site Water Balance nach Grier & Running, berechnet als Tageswert: Mittelwert über alle Beobachtungsflächen (grüne Linie) sowie als Beispiele die feuchteste Buchenfläche (Zugerberg), die trockenste Buchenfläche (Riehen Ausserberg) und die trockenste Eichenfläche (Sion).

4.3.3. Frostereignisse und Klima

Ein Spätfrostereignis wurde angenommen, wenn innerhalb der ersten 60 Tage nach Blattaustrieb der Buchen die Tagesmitteltemperatur unter $+2^{\circ}\text{C}$ sank. Diese Definition wurde aus Daten eigener Klimastationen mit halbstündlicher Auflösung der Temperatur hergeleitet. Eine Auswertung mit Minimumtemperaturen über den gleichen Zeitraum, die ebenfalls verfügbar waren, ergab eine nichtsignifikante Beziehung mit der Kronenverlichtung (Minimumtemperatur $< -2^{\circ}\text{C}$). Pro Jahr wurden die Spätfrostereignisse aufsummiert.

Lufttemperatur sowie Trockenheitsindikatoren wurde über verschiedene Abschnitte der Vegetationsperiode gemittelt, die sich am Datum des Blattaustriebs der Buche orientierten. Dieses Datum wurde aus den agrarmeteorologischen Beobachtungen von Meteo Schweiz Defila und Clot 2005 entnommen und jährlich höhenkorrigiert.

4.3.4. ET_a/ET_p nach Romanenko/Shuttleworth

Nicht mit WaSiM berechnet wurden zwei Varianten des Trockenheitsindikators ET_a/ET_p , die im Rahmen des Projekts „Schätzung standortsspezifischer Trockenstressrisiken in Schweizer Wäldern“ von Meteotest modelliert wurden (ET_a/ET_p complex und ET_a/ET_p simple: Remund et al. 2011). Sie unterscheiden sich von der in WaSiM berechneten Grösse durch die der Berechnung der Evapotranspiration zugrundeliegende Formel. Bei der einfachen Version kam die Evapotranspiration nach Romanenko (1961) zur Anwendung, bei der komplexen diejenige nach Shuttleworth (1993 und 2007), während WaSiM-ETH die ET nach Penman-Monteith (Penman 1956) berechnet. Sie wurden über die Vegetationsperiode gemittelt in die Auswertungen eingesetzt.

4.4. Klimaszenarien

Das Wasserhaushaltsmodell WaSiM-ETH wurde nicht nur für die Zeitperiode 1981-2012 mit realen Klimadaten angewendet, sondern auch auf Klimaszenarien für die Zukunft. Die Modelldaten wurden ebenfalls von Meteotest in täglicher Auflösung für jede Beobachtungsfläche geliefert (Remund et al. 2014). Sie basieren auf drei Modellen, die im Rahmen des Projekts „ENSEMBLES“ erarbeitet wurden (Hewitt und Griggs 2004) oder auf das Max-Planck Institut für Meteorologie zurückgehen (Keuler et al. 2009). Ausgewählt wurden die Modelle CLM, RCA und REGCM3. Es wurden die gleichen Indikatoren verwendet wie zur Datenanalyse der Stammzuwachs- und der Mortalitätsdaten (vgl. Abschnitt Statistik).

Bei der Anwendung von Klimamodellen für zukünftige Perioden wird in der Regel davon ausgegangen, dass die Vegetationsperiode länger wird. Zur Berechnung des Austriebsdatums wird üblicherweise ein Modell verwendet, bei dem zuerst die Austriebsbereitschaft mit einer 'chilling' Temperatursumme und anschliessend der Austrieb selbst mit einer 'warming' Temperatursumme beschrieben wird (Menzel et al. 2006). Dieses Modell wurde in der Version von Kramer 1994 (improved sequential) und von Menzel (1997) mit phänologischen Daten aus der Datenbank von Meteo Schweiz (Defila und Clot 2005) getestet. Die Daten wurden mit einer gemischten Regression ausgewertet, mit Phänostation als Cluster. Die erklärte Varianz wurde mit der Funktion `rsquared.glm` (Nakagawa und Schielzeth 2013) berechnet, wobei sowohl das "marginal" als auch das "conditional" R² für die Beurteilung der Regressionsgüte von Bedeutung sind. Tab. 2 zeigt den Vergleich der beobachteten Austriebsdaten der Buche mit den Modellresultaten nach Menzel und Kramer sowie einfachen Regressionen mit Jahresmitteln der Temperatur. Das Modell von Kramer ist deutlich besser als dasjenige von Menzel. Aber auch dieses ist nur geringfügig besser als ein einfaches Modell, das auf dem Jahresmittel der Temperatur basiert. Der Grund ist, dass der Austrieb der Buche photoperiodisch gesteuert erfolgt und deshalb nur innerhalb enger Grenzen auf die Temperatur reagiert (Basler und Körner 2012).

	R ² mit Funktion <code>rsquared.glm</code>		AIC	Intercept	Koeff.
	Marginal	Conditional			
Austriebsdatum Buche nach Menzel	0.292	0.102	5008	38.4	0.632
Austriebsdatum Buche nach Kramer	0.382	0.169	4963	21.3	0.794
Meereshöhe	0.219	-0.011	5218	105.7	0.021
Jahresmittel der Temperatur	0.358	0.142	5054	160.1	-4.689
Jahresmittel der Temperatur April bis März	0.377	0.102	5095	157.6	-4.412

Tab. 2: Regression modellierter Austriebsdaten (Menzel 1997, Kramer 1994) für Buche mit dem von MeteoSchweiz beobachteten Austriebsdatum der Buche. Datenset: 29 Phänostationen von MeteoSchweiz mit im Mittel 25 Beobachtungsjahren. Klimadaten von Jan Remund auf die Koordinaten der Phänostationen interpoliert.

Für die Anwendung in Klimamodellen wird deshalb ein einfacheres Modell hergeleitet, das lediglich auf dem Jahresmittelwert der Temperatur, der Meereshöhe und dem Breitengrad basiert:

$$\begin{aligned}
 \text{Austrieb}_{\text{Buchen}} &= 157.2 - 4.329 * T_{0403} - 0.05649 * \frac{KN - 200000}{1000} \\
 \text{Blattfall}_{\text{Buchen}} &= 264.9 + 1.985 * T_{0403} \\
 \text{Austrieb}_{\text{Fichten}} &= 154.0 - 3.6228 * T_{0403} + 0.01216 * \text{HOEHE}
 \end{aligned}$$

wobei T₀₄₀₃ das Jahresmittel der Temperatur vom April des Vorjahr bis März des laufenden Jahres ist, KN die Schweizer Koordinaten in Nord-Süd-Richtung und HOEHE die Höhe über Meer in m.

Dieses Modell wurde schliesslich bei den Klimaszenarien für die Definition der Vegetationsperiode angewendet, um die berechneten Trockenheitsindices im Jahresverlauf einzuordnen.

4.5. Statistik

Da die Daten in örtlicher und/oder zeitlicher Wiederholung vorliegen, entsprechen sie nicht der Homogenitätsanforderung für eine normale Regression. Deshalb wurden sie mit einer gemischten Regression ausgewertet, in der die Gruppen (Cluster) als random Variable behandelt werden (Pinheiro und Bates 2000). Diese beurteilt die Güte nicht mit dem Anteil erklärter Varianz (R²), sondern durch Vergleich des Akaike Information Criterion (AIC) oder des Bayes Information Criterion (BIC). Diese Indikatoren werten die Devianz zusammen mit der Anzahl der für die Regression benötigten Parameter und sollten möglichst tief sein. Beim Stammzuwachs wurde Standort als Cluster (random) und Jahr als Faktorvariable 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. Beim Triebwachstum und bei der Kronenverlichtung wurde Standort als Cluster eingesetzt. Verwendet wurde die Funktion lme aus dem Paket nlme von R (Pinheiro et al. 2013). Die Auswahl der Prädiktoren erfolgte schrittweise rückwärts durch Plausibilitätsprüfung der erhaltenen Beziehungen und durch Vergleich der AIC-Werte. Die Modellwahl erfolgte in mindestens zwei Schritten: im ersten Schritt wurde mit ETa/ETp als Trockenheitsindikator geprüft, welche Kovariablen in Frage kommen. In einem zweiten Schritt wurden die anderen Trockenheitsindikatoren zusammen mit den gleichen Kovariablen getestet. Wenn sowohl Indikatorwerte aus dem laufenden und dem Vorjahr in die Analyse eingeschlossen wurden, so ging dem ersten Schritt noch eine Auswahl der besten Mittelungsperiode für das laufende Jahr voraus, die sich am Datum des Blattaustriebs orientierte.

Nach der Analyse wurden Residuenplots (Residuen gegen Schätzwert, QQ-plot sowie Residuen gegen Prädiktoren) erstellt. Die Site Water Balance-Werte wurden exponentialtransformiert, um die stark linksschiefe Verteilung zu korrigieren (Abb. 5) und damit die Zuverlässigkeit darauf basierender quantitativer Schätzer zu erhöhen. Aber auch nach dieser Transformation weist der Indikator nach Grier & Running eine Häufung um Null auf, während die anderen Indikatoren besser verteilt sind.

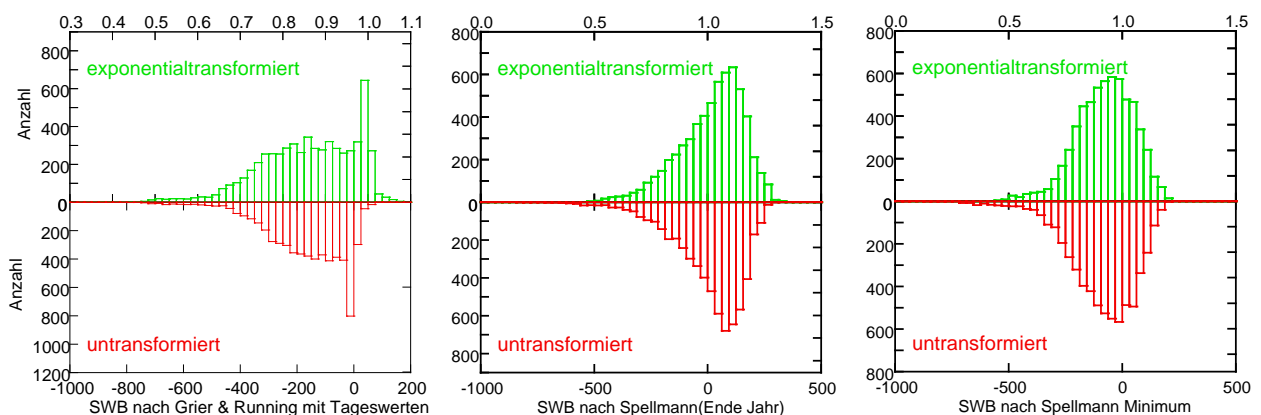


Abb. 5: Häufigkeitsverteilungen der SWB-Indikatorwerte vor (rot) und nach Exponentialtransformation (grün)

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). Abhängige Variable war die Kombination von toten und nicht-toten Bäumen. Die Auswertungen wurden in Zusammenarbeit mit PD Dr. C. Schindler, Swiss Tropical and Public Health Institute der Universität Basel, durchgeführt.

Aus den Regressionsergebnissen wurden Koeffizienten zur Quantifizierung des Trockenheitseffektes gewonnen. Mit Hilfe dieser Koeffizienten wurde für jeden Trockenheitsindikator berechnet, wie hoch die Schätzung von Wachstum, Mortalität und Kronenverlichtung für das Trockenjahr 2003 im Vergleich zur ganzen beobachteten Zeitperiode ausfiel. Dieser Relativwert erlaubte einen direkten Vergleich der verschiedenen Indices.

Um eine quantitative Schätzung der trockenheitsbedingten Reduktion des Stammzuwachses und der trockenheitsbedingten Erhöhung der Mortalität herzuleiten, wurde zusätzlich zu den Regressionen mit jeweils einem Trockenheitsindikator pro Modell ein Regressionsmodell mit mehreren Indikatoren gleichzeitig aufgesetzt. Diejenigen Prädiktoren, die zu einer Erhöhung des AIC führten, wurden schrittweise rückwärts entfernt.

5 Ergebnisse

5.1. Stammzuwachs

5.1.1. Buchen

In Tab. 3 ist das für den Stammzuwachs von Buchen verwendete Regressionsmodell mit allen Kovariablen aufgelistet. Für den Stammzuwachs der Buchen war neben den Trockenheitsparametern auch der Ozonflux ein deutlich signifikanter Prädiktor. Jahr wurde als Faktorvariable einbezogen, um durch das Modell nicht berücksichtigte Unterschiede zwischen den Jahren zu entfernen. Die gleichen Kovariablen wie in Tab. 3 wurden verwendet, um die in Tab. 4 aufgelisteten Trockenheitsindikatoren zu testen. Diese Tabelle enthält die Regressionsparameter sowie Schätzwerte für das Jahr 2003. Je tiefer der AIC, umso besser die Regression. Am besten schneidet die Site Water Balance nach Grier & Running ab. Mit diesem Parameter wird geschätzt, dass die trockenheitsbedingte Wachstumsreduktion 2003 32% betrug. Von der Regression her nur wenig schlechter sind T_a/T_p über die Vegetationsperiode und das Evapotranspirationsverhältnis nach WaSiM-ETH. Alle drei Indikatoren liefern aber einen geringeren Schätzwert für die Wachstumsreduktion. Die übrigen Trockenheitsindikatoren schneiden deutlich schlechter ab. Das Evapotranspirationsverhältnis nach Romanenko („simple“) war gar nicht signifikant.

	Koeff.	SE	p-Wert
(Intercept)	0.2309	0.0465	0.0000
Ozon (POD1) mmol m ⁻²	-0.0009	0.0003	0.0020
ET _a /ET _p Vegetationsperiode	0.1051	0.0152	0.0000
Alter logarithmiert	-0.0342	0.0095	0.0006
Periode 1998	-0.0026	0.0013	0.0376
Periode 2002	-0.0173	0.0013	0.0000
Periode 2006	-0.0065	0.0018	0.0004
Periode 2010	-0.0189	0.0016	0.0000

Tab. 3: Regressionsmodell für Stammzuwachs Buchen. Abhängige Variable: Grundflächenzuwachs, bezogen auf die Grundfläche jeweils zu Beginn der Messperiode, wurzeltransformiert. Periode_1998 bis Periode_2010: Zuwachspannen als Faktorvariable (Vergleichsbasis Periode 1995).

	Buchen Stammzuwachs					Mittelwert Trockenheits- indikator	
	AIC	Koeff	SE	p-Wert	Verän- derung 2003	ganze Periode	2003
ETa/ETp Vegetationsperiode	-55087	0.105	0.015	0.0000	-9.6	0.84	0.70
ETa/ETp Frühjahr	-55087	0.089	0.013	0.0000	-6.7	0.85	0.74
Ta/Tp Vegetationsperiode	-55090	0.063	0.008	0.0000	-10.8	0.85	0.62
Relative Sättigung 0-40cm	-55070	0.041	0.007	0.0000	-6.6	0.65	0.41
Wasserpotential 60cm	-55075	-0.016	0.002	0.0000	-6.5	2.72	3.33
Wasserpotential 40cm	-55070	-0.015	0.003	0.0000	-6.0	2.71	3.31
Wassersättigungsdefizit	-55034	0.000	0.000	0.0211	-2.4	30.13	51.27
ETa/ETp Meteotest complex	-55055	0.067	0.017	0.0001	-3.1	0.85	0.79
ETa/ETp Meteotest simple	-55041	0.020	0.013	0.1231	-1.9	0.90	0.76
SWB Spellmann Ende Jahr ¹⁾	-55062	0.037	0.008	0.0000	-16.7	1.02	0.73
SWB Spellmann Minimum ¹⁾	-55082	0.070	0.011	0.0000	-29.2	0.92	0.64
KWB Minimum ¹⁾	-55086	0.090	0.013	0.0000	-31.3	0.80	0.56
SWB Spellmann August ¹⁾	-55088	0.070	0.010	0.0000	-29.6	0.98	0.69
SWB August-April (Grier & Running) ¹⁾	-55093	0.089	0.012	0.0000	-32.0	0.85	0.60
Niederschlag/1000	-55074	0.038	0.000	0.0000	-9.6	703.93	557.19

Tab. 4: Regressionsergebnisse für verschiedene Trockenheitsindikatoren und Stammzuwachs Buchen. Koeff und SE: Regressionskoeffizient mit Standardfehler. AIC: Akaike Information Criterion (Mass für die Güte der Regression). ETa/ETp Frühjahr: Mittelung 5 Tage vor Blattaustrieb der Buche bis 80 Tage nach Austrieb. Veränderung 2003: Mit dem Regressionskoeffizienten berechnete Wachstumsreduktion für das Jahr 2003 im Vergleich zur ganzen Periode. 1) Site Water Balance exponentialtransformiert ($y=\exp(x/1000)$).

In einer multivariate Auswertung mit mehreren Trockenheitsindikatoren gleichzeitig verbleiben neben dem Alter und dem Ozonflux der Anteil der Zeit, in der das Verhältnis zwischen aktueller und potentieller Evapotranspiration die Grenzwerte von 0.5, 0.8 und 0.9 unterschreitet sowie der Niederschlag während der Vegetationsperiode. Mit dieser Auswertung wird die trockenheitsbedingte Wachstumsreduktion im Jahr 2003 auf 29% geschätzt. Die multivariate Auswertung hat zwar ein tieferes AIC, wegen der höheren Variablenzahl aber ein höheres BIC und ist daher auch von der Güte der Regression her nicht als besser einzustufen als das Regressionsmodell mit nur einer Trockenheitsvariablen. Mittels Spline (Paket Splines, R Core Team 2013) wurde geprüft, ob die Beziehungen Nichtlinearitäten aufweisen, die in der Auswertung berücksichtigt werden sollten. Das war jedoch nicht der Fall.

	Koeff	SE	p-Wert
(Intercept)	0.312	0.044	0.000
Ozon (POD1sw)	-0.001	0.000	0.003
Anteil Zeit mit ETa/ETp<0.5	-0.069	0.012	0.000
Anteil Zeit mit ETa/ETp<0.8	0.061	0.013	0.000
Anteil Zeit mit ETa/ETp<0.9	-0.075	0.018	0.000
Niederschlag/1000	0.035	0.007	0.000
log Alter	-0.034	0.009	0.000
Periode 1998	0.000	0.001	0.837
Periode 2002	-0.018	0.002	0.000
Periode 2006	-0.004	0.002	0.068
Periode 2010	-0.016	0.002	0.000

Tab. 5: Regressionsmodell mit mehreren Trockenheitsindikatoren. Anteil Zeit mit ETa/ETp <X: Anteil der Zeit, in der das Evapotranspirationsverhältnis den angegebenen Schwellenwert von X unterschreitet. Niederschlag: Summe während der Vegetationsperiode (mm/1000). Periode_1998 bis Periode_2010: Zuwachsperioden als Faktorvariable (Vergleichsbasis Periode 1995). AIC=-55103.

5.1.2. Fichten

In Tab. 6 ist das für den Stammzuwachs von Fichten verwendete Regressionsmodell mit allen Kovariablen aufgelistet. Alter war ein deutlich signifikanter Prädiktor. Lufttemperatur war nur signifikant, wenn sie über die ersten 60 Tage der Vegetationsperiode (beginnend 10 Tage vor Blattaustrieb der Buche) gemittelt wurde. Jahr wurde als Faktorvariable einbezogen, um durch das Modell nicht berücksichtigte Unterschiede zwischen den Jahren zu entfernen. Die gleichen Kovariablen wie in Tab. 6 wurden verwendet, um die in Tab. 7 aufgelisteten Trockenheitsindikatoren zu testen. Auch hier schneidet die Site Water Balance nach Grier & Running am besten ab. Mit diesem Indikator wird die Wachstumsreduktion 2003 auf 36% geschätzt. Das Evapotranspirationsverhältnis nach WaSIM-ETH ist deutlich schlechter.

	Koeffizient	Standardfehler	p-Wert
(Intercept)	0.0414	0.0417	0.3206
SWBAugust-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. 6: Regressionsmodell für Stammzuwachs Fichten. Abhängige Variable: Grundflächenzuwachs, bezogen auf die Grundfläche zu Beginn der Messperiode, wurzeltransformiert. Periode_2002 bis Periode_2010: Zuwachsperioden als Faktorvariable (Vergleichsbasis Periode 1998).

	Fichten Stammzuwachs					Mittelwert Trockenheits- indikator	
	AIC	Koeff	SE Koeff	p- Wert	Verän- derung 2003	ganze Periode	2003
ETa/ETp Vegetationsperiode	-19206	0.087	0.026	0.0007	-14.2	0.86	0.76
ETa/ETp Frühjahr	-19198	0.036	0.022	0.1039	-5.7	0.86	0.76
Ta/Tp Vegetationsperiode	-19207	0.052	0.014	0.0003	-10.8	0.88	0.75
Relative Sättigung 0-40cm	-19208	0.041	0.010	0.0001	-15.0	0.72	0.49
Wasserpotential 60cm	-19197	-0.007	0.003	0.0171	-7.1	2.49	3.13
Wasserpotential 40cm	-19197	-0.007	0.003	0.0130	-7.2	2.50	3.13
Wassersättigungsdefizit	-19194	0.000	0.000	0.0012	-12.7	25.97	48.79
ETa/ETp Meteotest complex	-19212	0.110	0.026	0.0000	-9.6	0.90	0.84
ETa/ETp Meteotest simple	-19195	-0.010	0.019	0.6050	1.7	0.93	0.83
SWB Spellmann Ende Jahr ¹⁾	-19217	0.057	0.012	0.0000	-16.7	1.05	0.87
SWB Spellmann Minimum ¹⁾	-19232	0.097	0.016	0.0000	-32.3	0.96	0.75
KWB Minimum ¹⁾	-19229	0.116	0.020	0.0000	-33.2	0.85	0.66
SWB Spellmann August ¹⁾	-19239	0.097	0.014	0.0000	-34.3	1.02	0.79
SWB August-April (Grier & Running) ¹⁾	-19243	0.122	0.018	0.0000	-37.2	0.91	0.70
Niederschlag/1000	-19204	0.000	0.000	0.0000	-9.3	760.21	648.76

Tab. 7: Regressionsergebnisse für verschiedene Trockenheitsindikatoren und Stammzuwachs Fichten. Koeff und SE Koeff: Regressionskoeffizient mit Standardfehler. AIC: Akaike Information Criterium. 1) Site Water Balance exponentialtransformiert ($y=\exp(x/1000)$).

In einer multivariaten Auswertung mit mehreren Trockenheitsindikatoren blieben als signifikante Prädiktoren neben dem Alter der Anteil der Zeit, bei der das Verhältnis zwischen aktueller und potentieller Evapotranspiration einen Wert von 0.75 unterschreitet, der 8-Perzentilwert des Evapotranspirationsverhältnisses sowie die Standortwasserbilanz Ende August. Die trockenheitsbedingte Wachstumsreduktion war trotz der verschiedenen Variablenwahl fast gleich wie bei der Einzelregression, nämlich 35%. Auch bei der Fichte gilt, dass die multivariate Auswertung zwar ein tieferes AIC, aber ein höheres BIC liefert und damit nicht als besser einzustufen ist.

	Koeff	SE	p-Wert
(Intercept)	0.1261	0.0298	0.0000
Anteil Zeit mit ETa/ETp <0.75	0.0784	0.0144	0.0000
SWB August	0.0893	0.0187	0.0000
8-Perzentilwert ETa/ETp	0.0522	0.0122	0.0000
Alter logarithmiert	-0.0282	0.0055	0.0000
Periode 2002	-0.0094	0.0014	0.0000
Periode 2006	-0.0093	0.0019	0.0000
Periode 2010	-0.0179	0.0014	0.0000

Tab. 8: Regressionsmodell mit mehreren Trockenheitsindikatoren. Anteil Zeit mit ETa/ETp <0.75: Anteil der Zeit, in der das Evapotranspirationsverhältnis den Schwellenwert von 0.75 unterschreitet. 8-Perzentilwert von ETa/ETp: Perzentilwert während der Vegetationsperiode. Periode_2002 bis Periode_2010: Zuwachsperioden als Faktorvariable (Vergleichsbasis Periode 1998). AIC=-19238.

5.2. Triebwachstum

5.2.1. Buchen

Das Triebwachstum kann sowohl von den Bedingungen des laufenden Jahres als auch des Vorjahres beeinflusst werden. Deshalb müssen Daten aus mindestens zwei Jahren in die Auswertung einbezogen werden. Da das Triebwachstum der Buchen schon anfangs Juni abgeschlossen ist und die Buchen im Mittel Ende April austreiben, ist im laufenden Jahr eine Mittelung der Klimadaten über einen Zeitraum von maximal 60 Tagen nach Blattaustrieb sinnvoll. Es wurden verschiedene Mittelungsperioden getestet und verglichen, die Ergebnisse sind in Tab. 9 aufgelistet. Das beste Modell, mit dem tiefsten AIC-Wert, umfasst die Periode von 5 Tagen vor bis 55 Tage nach Blattaustrieb (AUSTRBU). Diese Periode wurde anschliessend für alle weiteren Auswertungen verwendet und liegt auch den in Tab. 10 und Tab. 11 vorgestellten Ergebnissen zugrunde.

Periode		AIC	Koeff	SE	p-Wert
von	bis				
AUSTRBU -10	AUSTRBU +40	41793.61	0.5815	0.2553	0.0227
AUSTRBU -10	AUSTRBU +50	41784.89	0.8202	0.2659	0.0020
AUSTRBU -10	AUSTRBU +60	41777.59	0.6542	0.2581	0.0113
AUSTRBU -5	AUSTRBU +25	41809.23	0.7044	0.2262	0.0018
AUSTRBU -5	AUSTRBU +35	41813.18	0.5710	0.2449	0.0198
AUSTRBU -5	AUSTRBU +45	41780.32	0.5742	0.2575	0.0258
AUSTRBU -5	AUSTRBU +55	41767.18	0.8124	0.2529	0.0013

Tab. 9: Vergleich verschiedener Perioden zur Mittelung des Verhältnisses zwischen aktueller und potentieller Evapotranspiration im laufenden Jahr als Prädiktor für das Triebwachstum der Buchen (Modell gemäss Tab. 10). AUSTRBU= Zeitpunkt des Blattaustriebs.

Neben Trockenheitsindikatoren des laufenden Jahres und des Vorjahres waren weitere signifikante Prädiktoren des Triebwachstums der Buche der Fruchtbehang des laufenden Jahres und des Vorjahres, die Bodenwassersättigung und die Lufttemperatur des laufenden Jahres sowie die Stickstoffkonzentration im Laub (Tab. 10).

Parameter	Koeff	SE	p-Wert
(Intercept)	-3.610052	0.29948149	0.0000
Verhältnis ETa/ETp Vorjahr	2.704032	0.24621501	0.0000
Verhältnis ETa/ETp laufendes Jahr	0.81242	0.25290433	0.0013
Wassersättigung laufendes Jahr	-0.214345	0.04161435	0.0000
Lufttemperatur laufendes Jahr	0.121791	0.0119165	0.0000
Fruchtbehang laufendes Jahr (logarithmiert)	-0.620455	0.03636177	0.0000
Fruchtbehang Vorjahr (logarithmiert)	-0.945017	0.03634878	0.0000
Stickstoffkonzentration im Laub	1.101966	0.03880486	0.0000

Tab. 10: Regressionsmodell zur Erklärung des Triebwachstums von Buchen. Abhängige Variable: Zuwachs, wurzeltransformiert. Mittelungsperiode laufendes Jahr: 5 Tage vor bis 55 Tage nach Blattaustrieb.

Mit den Kovariablen aus Tab. 10 wurden anschliessend verschiedene Trockenheitsindices jeweils für das laufende Jahr und für das Vorjahr, basierend auf dem Modell in Tab. 10, verglichen. Wie Tab. 11 zeigt, hat das Minimum der Site Water Balance den tiefsten AIC-Wert und ist damit der beste Parameter zur Erklärung des Triebwachstums.

Aufgrund der Einzelkoeffizienten kann berechnet werden, dass das Triebwachstum 2003 durch die Trockenheit um 31% reduziert war. Vergleicht man direkt das Triebwachstum 2004 mit demjenigen von 2002 (das Triebwachstum reagiert mit einem Jahr Verzögerung), würde man den Trockenheitseffekt deutlich stärker einschätzen: das Triebwachstum der Buchen fiel von 11.9 cm im Jahr 2002 auf 5.2 cm im Jahr 2004. Ein solcher direkter Vergleich berücksichtigt allerdings die starke Beziehung zwischen Triebwachstum und Fruchtbehang nicht. 2001 und 2002 waren mässige Fruchtjahre, 2004 ein eher starkes.

	Buchen Triebwachstum			Mittelwert Trockenheitsindikator	
	AIC	p-Wert	Veränderung 2003	ganze Periode	2003
ETa/ETp Vegetationsperiode	41762	0.000	-28.9	0.84	0.71
ETa/ETp Frühjahr	41827	0.000	-18.2	0.84	0.74
Ta/Tp Vegetationsperiode	41903	0.000	-22.2	0.85	0.68
Relative Sättigung 0-40cm	41953	0.000	-14.7	0.65	0.41
Wasserpotential 60cm	41961	0.000	-10.3	2.74	3.32
Wasserpotential 40cm	41970	0.000	-12.0	2.73	3.30
Wassersättigungsdefizit	41995	0.000	5.9	30.04	50.92
ETa/ETp Meteotest complex	41903	0.000	-10.4	0.85	0.79
ETa/ETp Meteotest simple	41893	0.000	-15.2	0.89	0.76
SWB Spellmann Ende Jahr ¹⁾	41709	0.000	-26.2	1.00	0.72
SWB Spellmann Minimum ¹⁾	41701	0.000	-31.3	0.90	0.64
KWB Minimum ¹⁾	41738	0.000	-24.5	0.80	0.57
SWB Spellmann August ¹⁾	41736	0.000	-23.4	0.96	0.68
SWB August-April (Grier & Running) ¹⁾	41757	0.001	-17.7	0.85	0.61
Niederschlag	42103	0.757	-3.6	703.79	561.85

Tab. 11: Regressionsergebnisse für verschiedene Trockenheitsindikatoren und Triebwachstum von Buchen. AIC: Akaike Information Criterium. Abhängige Variable: Triebwachstum, wurzeltransformiert. 1) Site Water Balance exponentialtransformiert ($y=\exp(x/1000)$).

5.2.2. Fichten

Auch bei der Fichte wurden als erklärende Variablen für das Triebwachstum der Fichte sowohl Trockenheitsindikatoren für das laufende Jahr, gemittelt über eine bestimmte Zeitperiode im Frühjahr, und für das Vorjahr geprüft. Die Modellwahl erfolgte ebenfalls in zwei Schritten. Zunächst wurden die Mittelungsperioden für das laufende Jahr mit verschiedenen Regressionsmodellen getestet, ausgehend vom phänologischen Blattaustrieb der Buche oder dem Austriebsdatum der Fichte. Auf den ersten Blick überraschend war, dass der Blattaustrieb der Buche ein besserer Indikator für den Start der Vegetationsperiode war. Die Erklärung dafür ist, dass dem Austrieb der Fichte, d.h. der Bildung des jüngsten Nadeljahrgangs, eine physiologisch aktive Phase mit der Bildung des neuen Triebs vorausgeht. Trockenheitsindikatoren, die über den Zeitraum 5 Tage vor bis 55 Tage nach Blattaustrieb der Buche gemittelt wurden, waren am besten mit dem Triebwachstum korreliert (Tab. 12). Der entsprechende Indikator wurde dann in die weiteren Regressionen eingesetzt. Tab. 13 zeigt das volle Regressionsmodell mit ETa/ETp als Trockenheitsindikator und den signifikanten Kovariablen. Diese waren, wie bei der Buche, Zapfenbehang und Stickstoffkonzentration im Laub. Tab. 14 sind die getesteten Trockenheitsindikatoren unter Einbezug der genannten Kovariablen einzeln verglichen. Die Site Water Balance nach Spellmann (Minimum) war auch hier klar der beste Indikator.

Periode					
von	bis	AIC	Koeff	SE	p-Wert
AUSTRBU -10	AUSTRBU +40	17971.02	1.9628	0.2831	0.0000
AUSTRBU -10	AUSTRBU +50	17952.6	2.2630	0.3044	0.0000
AUSTRBU 10	AUSTRBU +60	17938.48	2.0073	0.3109	0.0000
AUSTRBU -5	AUSTRBU +25	17965.23	1.5597	0.2346	0.0000
AUSTRBU -5	AUSTRBU +35	17970.21	1.6081	0.2639	0.0000
AUSTRBU -5	AUSTRBU +45	17944.88	1.9255	0.2880	0.0000
AUSTRBU -5	AUSTRBU +55	17909.09	2.0438	0.2993	0.0000
AUSTRBU -5	AUSTRBU +70	17913.97	1.5208	0.3097	0.0000
AUSTRFI 0	AUSTRFI +30	17989.93	0.6724	0.2466	0.0064
AUSTRFI 0	AUSTRFI +60	17946.51	0.6898	0.2978	0.0206
AUSTRFI -25	AUSTRFI +25	17996.65	0.5144	0.2709	0.0576
AUSTRFI -25	AUSTRFI +35	17995.61	1.0114	0.3030	0.0009

Tab. 12: Vergleich verschiedener Perioden zur Mittelung des Verhältnisses zwischen aktueller und potentieller Evapotranspiration im laufenden Jahr als Prädiktor für das Triebwachstum der Fichten. AUSTRBU= Blattaustrieb Buchen, AUSTRFI: Austrieb Fichten.

	Koeff.	SE Koeff.	p-value
(Intercept)	-0.980	0.146	0.000
ETa/ETp Vorjahr	1.244	0.137	0.000
ETa/ETp laufendes Jahr	0.102	0.027	0.000
Zapfenbehang laufendes Jahr (logarithmiert)	-0.155	0.015	0.000
Zapfenbehang Vorjahr (logarithmiert)	-0.224	0.015	0.000
Stickstoffkonzentration in Nadeln	0.688	0.051	0.000

Tab. 13: Triebwachstum von Fichten: beste Regression und Kovariablen. ETa/ETp laufendes Jahr: gemittelt über die Zeit 10 Tage vor und 30 Tage nach Blattaustrieb Buche. Der Zapfenbehang wurde logarithmiert. Abhängige Variable: Triebwachstum, wurzeltransformiert.

	Fichten Triebwachstum			Mittelwert Trockenheitsindikator	
	AIC	p-Wert	Veränderung 2003	ganze Periode	2003
ETa/ETp Vegetationsperiode	17936	0.000	-23.9	0.84	0.74
ETa/ETp Frühjahr	17950	0.000	-21.3	0.84	0.75
Ta/Tp Vegetationsperiode	17970	0.000	-20.2	0.86	0.71
Relative Sättigung 0-40cm	18005	0.000	-15.1	0.70	0.46
Wasserpotential 60cm	18027	0.084	-10.9	2.63	3.27
Wasserpotential 40cm	18032	0.051	-11.1	2.62	3.25
Wassersättigungsdefizit	18022	0.000	-15.4	28.92	52.05
ETa/ETp Meteotest complex	17981	0.000	-7.1	0.86	0.80
ETa/ETp Meteotest simple	17953	0.000	-13.1	0.91	0.78
SWB Spellmann Ende Jahr ¹⁾	17963	0.000	-24.3	1.02	0.80
SWB Spellmann Minimum ¹⁾	17922	0.000	-30.5	0.92	0.69
KWB Minimum ¹⁾	17922	0.000	-30.9	0.81	0.61
SWB Spellmann August ¹⁾	18001	0.000	-21.3	0.98	0.73
SWB August-April (Grier & Running) ¹⁾	18001	0.000	-21.2	0.87	0.65
Niederschlag	18067	0.143	-9.5	751.39	625.13

Tab. 14: Regressionsergebnisse für verschiedene Trockenheitsindikatoren und Triebwachstum von Fichten. AIC: Akaike Information Criterion. 1) Site Water Balance exponentialtransformiert ($y=\exp(x/1000)$).

Aufgrund der Koeffizienten wird geschätzt, dass das Triebwachstum 2003 durch die Trockenheit um 31% reduziert war. Wie bei der Buche kommt man auch bei der Fichte durch Direktvergleich der Triebwachstumsraten 2002 mit 2004 auf eine höhere Beeinträchtigung des Wachstums: das Triebwachstum der Fichten fiel von 12.6 cm im Jahr 2002 auf 6.3 cm im Jahr 2004 (50% Reduktion). 2003 hatte das mittlere Triebwachstum immer noch 12.3 betragen. Aber auch bei der Fichte war der Fruchtbehang 2004 deutlich grösser als in den Vorjahren.

5.3. Verlichtung

Dass die Kronenverlichtung stark witterungsabhängig ist, ist hinlänglich bekannt (u.a. van Leeuwen et al. 2000, Seidling et al. 2012). Es ging hier jedoch darum zu testen, welcher Trockenheitsindikator sich am besten für die Erklärung der Verlichtungsgrade eignet.

5.3.1. Buchen

Die Kronenverlichtung der Buche war signifikant mit Spätfrost, Fruchtbehang und Trockenheit des Vorjahrs korreliert (Tab. 15). Mit den Klimawerten des laufenden Jahres fand sich keine Beziehung, ausser beim Spätfrost.

Parameter	Koeffizient	SE	p-Wert
(Intercept)	3.484	0.0435	<.0001
Spätfrost	0.0252	0.0090	0.0051
ETa/ETp Vorjahr	-0.507	0.0498	<.0001
Fruchtbehang	0.0861	0.0083	<.0001

Tab. 15: Regression der Kronenverlichtung von Buchen mit verschiedenen Prädiktoren. Abhängige Variable: mittlere Verlichtung pro Standort und Jahr, logtransformiert. Ausgewertete Zeitreihe 1988-2011. SE=Standardfehler.

Unter Einbezug von Spätfrost und Fruchtbehang als Kovariablen wurden die verschiedenen Trockenheitsindikatoren einzeln getestet (Tab. 16). Alle aufgelisteten Indikatoren sind Vorjahreswerte. Ausser dem Spätfrost war kein Klimaparameter des laufenden Jahres signifikant mit der Verlichtung korreliert. Am besten schneidet ETa/ETp für die Frühjahrsmonate ab. Alle Beziehungen sind zwar deutlich signifikant, aber die beiden Evapotranspirationsindices von Meteotest weisen ein unplausibles Vorzeichen auf; sie schätzen eine Reduktion der Verlichtung für 2003.

	Buchen Verlichtung			Mittelwert Trockenheitsindikator	
	AIC	p-Wert	Veränderung 2003	ganze Periode	2003
ETa/ETp Vegetationsperiode	-2712	0.000	7.0	0.84	0.71
ETa/ETp Frühjahr	-2747	0.000	6.3	0.85	0.74
Ta/Tp Vegetationsperiode	-2703	0.000	6.3	0.85	0.68
Relative Sättigung 0-40cm	-2703	0.000	5.2	0.65	0.42
Wasserpotential 60cm	-2681	0.000	3.8	2.74	3.31
Wasserpotential 40cm	-2677	0.000	3.7	2.73	3.30
Wassersättigungsdefizit	-2677	0.000	4.6	30.19	50.93
ETa/ETp Meteotest complex	-2659	0.000	-1.7	0.85	0.79
ETa/ETp Meteotest simple	-2677	0.000	-2.6	0.89	0.76
SWB Spellmann Ende Jahr ¹⁾	-2690	0.000	6.3	1.00	0.73
SWB Spellmann Minimum ¹⁾	-2724	0.000	8.3	0.91	0.64
KWB Minimum ¹⁾	-2719	0.000	8.2	0.80	0.56
SWB Spellmann August ¹⁾	-2710	0.000	7.5	0.97	0.68
SWB August-April (Grier & Running) ¹⁾	-2697	0.000	6.9	0.86	0.60
Niederschlag	-2605	0.041	0.6	707.67	562.88

Tab. 16: Regressionsergebnisse für verschiedene Trockenheitsindikatoren (Vorjahreswerte) und Kronenverlichtung von Buchen. Koeff und SE Koeff: Regressionskoeffizient mit Standardfehler. AIC: Akaike Information Criterion. 1) Site Water Balance exponentialtransformiert ($y=\exp(x/1000)$).

5.3.2. Fichten

Auch bei den Fichten sind Spätfrost und das Verhältnis zwischen aktueller und potentieller Evapotranspiration des Vorjahres mit der Kronenverlichtung korreliert. (Tab. 17). Alter war kein signifikanter Prädiktor ($p > 0.1$).

Parameter	Koeffizient	SE	p-Wert
(Intercept)	3.387812	0.17056069	<0.001
ETa/ETp Vorjahr	-0.666128	0.08006234	<0.001
Alter (logarithmiert)	0.057046	0.03464063	0.110
Spätfrost	0.037627	0.01128712	<0.001

Tab. 17: Regression der Kronenverlichtung von Fichten mit verschiedenen Klimaparametern. Ausgewertete Zeitreihe 1995-2011. Abhängige Variable: Mittelwert der Kronenverlichtung pro Jahr und Standort, logarithmiert.

Tab. 18 vergleicht die verschiedenen Trockenheitsindices für die Kronenverlichtung der Fichte. Da das Klima des laufenden Jahres auch hier nicht signifikant war, handelt es sich überall um Vorjahreswerte. Am besten schnitt ETa/ETp für das Frühjahr ab. Zweitbesten Indikator ist ETa/ETp für die ganze Vegetationsperiode. Die beiden Evapotranspirationsindikatoren von Meteotest haben wiederum ein unplausibles Vorzeichen.

	Fichten Verlichtung			Mittelwert Trockenheitsindikator	
	AIC	p-Wert	Veränderung 2003	ganze Periode	2003
ETa/ETp Vegetationsperiode	-1885	0.000	6.4	0.85	0.75
ETa/ETp Frühjahr	-1912	0.000	5.6	0.85	0.76
Ta/Tp Vegetationsperiode	-1865	0.000	5.0	0.87	0.73
Relative Sättigung 0-40cm	-1875	0.000	5.5	0.69	0.46
Wasserpotential 60cm	-1856	0.000	4.3	2.57	3.19
Wasserpotential 40cm	-1855	0.000	4.2	2.59	3.20
Wassersättigungsdefizit	-1873	0.000	5.7	28.52	50.10
ETa/ETp Meteotest complex	-1818	0.000	-1.1	0.88	0.82
ETa/ETp Meteotest simple	-1812	0.001	-1.1	0.91	0.81
SWB Spellmann Ende Jahr ¹⁾	-1863	0.000	5.7	1.03	0.83
SWB Spellmann Minimum ¹⁾	-1891	0.000	8.0	0.94	0.72
KWB Minimum ¹⁾	-1888	0.000	7.9	0.83	0.64
SWB Spellmann August ¹⁾	-1878	0.000	7.4	1.01	0.76
SWB August-April (Grier & Running) ¹⁾	-1859	0.000	6.2	0.90	0.68
Niederschlag	-1809	0.000	1.4	765.76	645.40

Tab. 18: Regressionsergebnisse für verschiedene Trockenheitsindikatoren und Kronenverlichtung von Fichten. Koeff und SE Koeff: Regressionskoeffizient mit Standardfehler. AIC: Akaike Information Criterion. 1) Site Water Balance exponentialtransformiert ($y = \exp(x/1000)$).

5.4. Mortalität

5.4.1. Buchen

Die Mortalität der Buchen war signifikant mit der Trockenheit des Vorjahrs korreliert (Tab. 19). 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 signifikant korreliert: in höhergelegenen Flächen war die Mortalität geringer. Bei der Buche waren mehrere Trockenheitsindikatoren fast gleichwertig. Der tiefste AIC-Wert wurde bei SWBmin 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 (Tab. 20). Die beiden Indikatoren von Meteotest (ETa/Etp simple und complex) sind nicht signifikant mit der Mortalität korreliert. Die Mortalität schwankt stark von Jahr zu Jahr (Abb. 6).

	Koeffizient	SE	p-Wert
(Intercept)	-3.0452	0.8648	0.0004
Meereshöhe (km)	-3.203	1.0855	0.0032
SWBmin Vorjahr	-3.2207	0.8042	0.0001

Tab. 19: Regressionsergebnis für die Mortalität der Buchen (gruppierte logistische Regression). Abhängige Variablen: Anzahl toter und überlebender Bäume pro Standort und Jahr. AIC=749.9

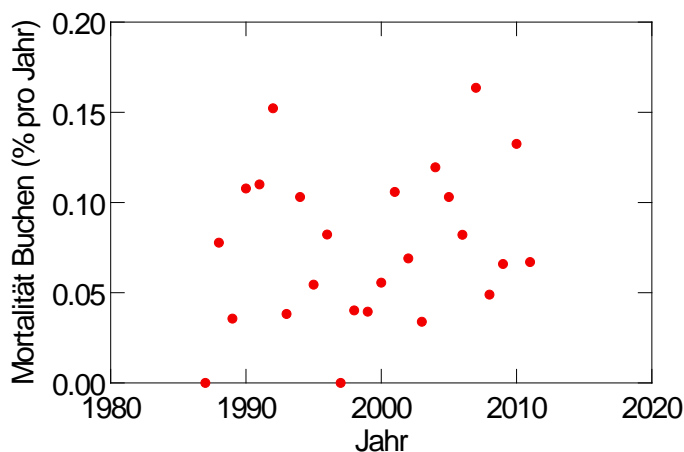


Abb. 6: Mortalität von Buchen in den einzelnen Beobachtungsjahren (Prozent pro Jahr). Bei der Beurteilung der Datenpunkte muss berücksichtigt werden, dass die Mortalität durch die Witterung vom Vorjahr bestimmt wird, d.h. also die Wirkung von 2003 erst 2004 sichtbar wird.

	Buchen Mortalität			Mittelwert Trockenheitsindikator	
	AIC	p-Wert	Veränderung 2003	ganze Periode	2003
ETa/ETp Vegetationsperiode	709.9	0.003	74.5	0.84	0.71
ETa/ETp Frühjahr	708.7	0.001	54.1	0.85	0.74
Ta/Tp Vegetationsperiode	712.5	0.014	62.3	0.85	0.68
Relative Sättigung 0-40cm	715.1	0.085	32.3	0.65	0.42
Wasserpotential 60cm	714.3	0.053	33.9	2.73	3.31
Wasserpotential 40cm	714.1	0.047	34.9	2.72	3.30
Wassersättigungsdefizit	717.3	0.398	14.6	29.86	50.93
ETa/ETp Meteotest complex	716.3	0.192	13.0	0.85	0.79
ETa/ETp Meteotest simple	716.4	0.205	16.3	0.89	0.76
SWB Spellmann Ende Jahr ¹⁾	712.3	0.013	68.7	1.00	0.73
SWB Spellmann Minimum ¹⁾	708.4	0.001	110.4	0.91	0.64
KWB Minimum ¹⁾	709.4	0.002	107.0	0.80	0.56
SWB Spellmann August ¹⁾	712.1	0.012	80.4	0.96	0.68
SWB August-April (Grier & Running) ¹⁾	713.0	0.022	75.1	0.85	0.60
Niederschlag	717.9	0.777	3.5	706.78	562.88

Tab. 20: Regressionsergebnisse für verschiedene Trockenheitsindikatoren und Mortalität Buchen. Die Spalte „Veränderung 2003“ gibt die prozentuale Veränderung der trockenheitsbedingten Mortalität im Jahr 2003 im Vergleich zum Mittelwert über die ganze Periode (1997-2013) an. 1) Site Water Balance exponentialtransformiert ($y=\exp(x/1000)$).

Eine Auswertung der Kronenverlichtung absterbender Buchen legte nahe, dass der Absterbeprozess sich über mehrere Jahre erstreckt (Abb. 7). Deshalb wurde geprüft, ob auch weiter zurückliegende Klimadaten berücksichtigt werden müssen. Wenn SWBmin aus zwei Vorjahren als Mittelwert eingesetzt wird, wird die Regression tatsächlich signifikant verbessert (Tab. 21). der AIC verbessert sich von 749.9 auf 746.9. Diese Variante wurde für die Klimamodellierung verwendet. Abb. 8 illustriert diese Beziehung.

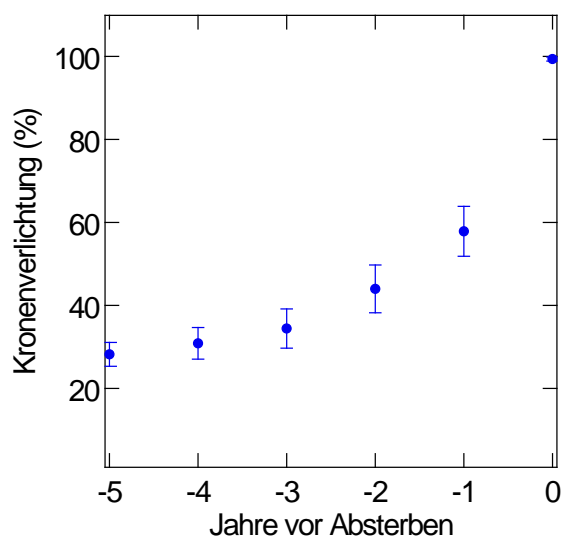


Abb. 7: Kronenverlichtung von Buchen in den Jahren vor dem Absterben. Balken: 95%-Vertrauensbereich.

	Koeffizient	SE	p-Wert
(Intercept)	-1.864	1.031	0.0705
Meereshöhe (km)	-2.924	1.077	0.0066
SWBmin Mittelwert aus zwei Vorjahren	-4.676	1.074	0.0000

Tab. 21: Mortalität Buchen mit der Standortwasserbilanz als Mittelwert aus zwei vorausgehenden Jahren. AIC=746.9.

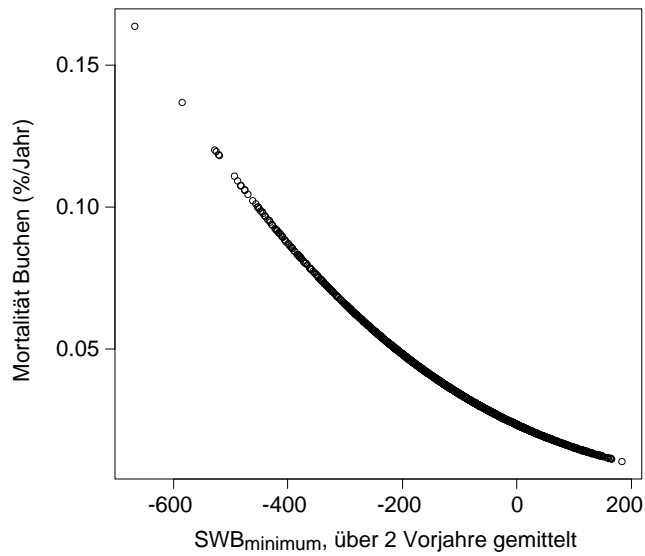


Abb. 8: Aus der Beziehung in Tab. 21 vorausgesagte Mortalitätsraten für Buche in Beziehung zum Trockenheitsindikator.

5.4.2. Fichten

Die Mortalität der Fichten zeigte eine starke zeitliche Variation (Abb. 9). Zwischen 2001 und 2006 war sie als Folge der Borkenkäferinvasion nach dem Sturm „Lothar“ 1999 und nach dem trockenen Sommer 2003 deutlich erhöht. Dieser Verlauf ist ähnlich wie die gesamtschweizerische Buchdruckersituation (Meier et al. 2014, Abb. 10). Die Anzahl Borkenkäferherde in der gesamtschweizerischen Statistik wurde deshalb versuchsweise als Kovariable mit einbezogen. Trotzdem wurde am Schluss darauf verzichtet, da die Borkenkäferdichte ihrerseits von der Trockenheitssituation abhängt und damit als „intermediate endpoint“ einzustufen ist. Zusätzlich zu den Trockenheitsindikatoren wurde die Temperatursumme für Borkenkäferentwicklung nach Wermelinger und Seifert (1998) berechnet. Diese ergab jedoch keine plausible Beziehung mit der Fichtenmortalität und war mit der Trockenheit selbst stark korreliert, sodass sie nicht weiter berücksichtigt wurde.

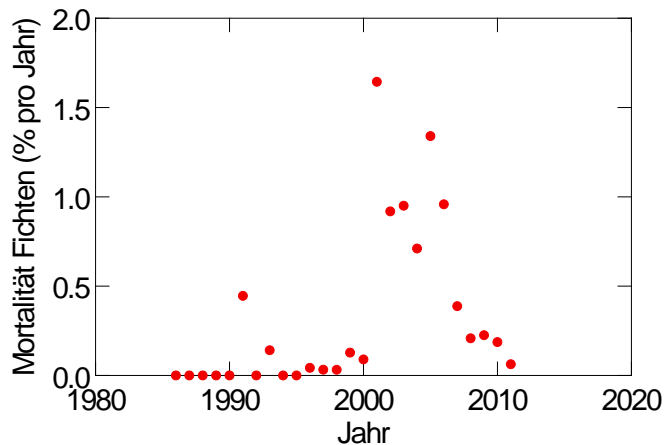


Abb. 9: Zeitlicher Verlauf der Fichtenmortalität.

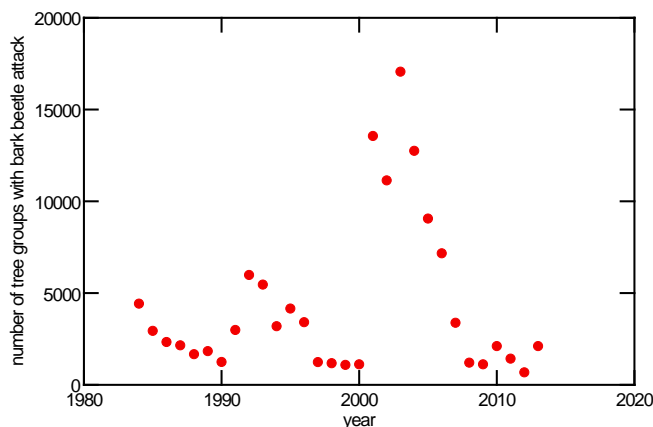


Abb. 10: Anzahl Borkenkäferherde (Meier et al. 2014, kantonale Borkenkäferdaten).

Wie bei den Buchen wurde als erklärende Variable für die Mortalität die Trockenheit gefunden. Mit Abstand bester Indikator war ETa/ETp für die ersten 80 Tage der Vegetationsperiode. Aufgrund dieses Koeffizienten wird geschätzt, dass die Mortalität bei den Fichten nach 2003 um 130% erhöht war. Absterbende Fichten haben in den Jahren zuvor nur eine geringfügig erhöhte Kronenverlichtung (Abb. 11). Das deutet auf einen plötzlicheren Absterbeprozess als bei der Buche. Eine Prüfung von weiter zurückliegenden Trockenheitsindikatoren ergab aber trotzdem, dass die Korrelation am besten ist, wenn die Trockenheit bis drei Jahre zurück einbezogen wird (Tab. 24). Damit geht die Trockenheitswirkung noch ein Jahr weiter zurück als bei der Buche, und der Effekt ist deutlicher. Für die quantitative Verwendung in Klimamodellen wurden die Trockenheitsindikatoren über drei Jahre gemittelt.

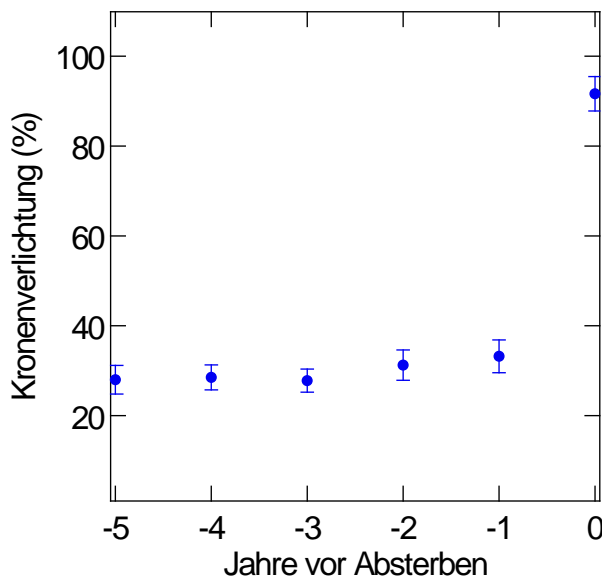


Abb. 11: Kronenverlichtung von Fichten in den dem Absterben vorausgehenden Jahren. Balken: 95%-Vertrauensbereich

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 (Tab. 25, Abb. 12): 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. Rechnet man das Modell mit Spline, dann ist sowohl eine Interaktion zwischen Stickstoffdeposition und Trockenheit einerseits wie auch zwischen Kaliumkonzentration in den Nadeln und Trockenheit andererseits zu beobachten (Tab. 26, Abb. 13). Das heisst, eine Beziehung zwischen Trockenheit und Mortalität besteht nur bei hoher Stickstoffdeposition. Umgekehrt hat die Stickstoffdeposition nur bei Trockenheit einen Einfluss auf die Mortalität.

Parameter	Koeffizient	SE	p-Wert
(Intercept)	2.291	0.922	0.0129
K in Nadeln gruppiert (≤ 2.8 , > 2.8 mg g ⁻¹ TS)	-1.670	0.264	0.0000
ETa/ETp Frühjahr	-9.320	0.959	0.0000

Tab. 22: Regressionsergebnis für die Mortalität bei Fichten (gemischte logistische Regression). Abhängige Variablen: Anzahl toter und überlebender Bäume pro Standort und Jahr.

Im Falle der Fichtenmortalität ist ETa/ETp mit WaSiM der beste Einzelindikator (Tab. 23), wobei der für die Frühjahrsmonate berechnete Index klar besser ist als derjenige über die ganze Vegetationsperiode. Gemäss diesen Berechnungen war 2003 die Mortalität um 130% erhöht. Die Mehrheit der übrigen Indikatoren sind ebenfalls signifikant, mit Ausnahme von ETa/ETp simple. Allerdings liefert ETa/ETp complex einen signifikanten Schätzer mit umgekehrtem Vorzeichen.

	Fichten Mortalität			Mittelwert Trockenheitsindikator	
	AIC	p- Wert	Veränderung 2003	ganze Periode	2003
ETa/ETp Vegetationsperiode	1800	0.000	129.3	0.85	0.75
ETa/ETp Frühjahr	1761	0.000	127.5	0.85	0.76
Ta/Tp Vegetationsperiode	1822	0.000	77.1	0.87	0.73
Relative Sättigung 0-40cm	1826	0.000	96.0	0.71	0.47
Wasserpotential 60cm	1830	0.000	80.7	2.50	3.16
Wasserpotential 40cm	1832	0.000	76.9	2.51	3.17
Wassersättigungsdefizit	1830	0.000	75.1	26.60	48.91
ETa/ETp Meteotest complex	1831	0.000	-22.5	0.89	0.83
ETa/ETp Meteotest simple	1841	0.002	-18.7	0.92	0.81
SWB Spellmann Ende Jahr ¹⁾	1804	0.000	119.2	1.04	0.85
SWB Spellmann Minimum ¹⁾	1817	0.000	126.5	0.95	0.73
KWB Minimum ¹⁾	1820	0.000	116.7	0.84	0.65
SWB Spellmann August ¹⁾	1813	0.000	136.9	1.02	0.78
SWB August-April (Grier & Running) ¹⁾	1821	0.000	111.4	0.90	0.69
Niederschlag	1840	0.001	25.0	773.78	644.89

Tab. 23: Regressionsergebnisse für verschiedene Trockenheitsindikatoren und Mortalität Fichten. Die Spalte „Veränderung 2003“ gibt die prozentuale Veränderung der trockenheitsbedingten Mortalität im Jahr 2003 an im Vergleich zum Mittelwert über die ganze Periode (1997-2012) an. 1) Site Water Balance exponentialtransformiert ($y = \exp(x/1000)$).

Parameter	Koeffizient	SE	p-Wert
(Intercept)	7.796	1.777	0.000
K in Nadeln gruppiert (≤ 2.8 , > 2.8 mg g ⁻¹ TS)	-1.809	0.320	0.000
Mg in Nadeln gruppiert (≤ 0.8 , > 0.8 mg g ⁻¹ TS)	-0.921	0.166	0.000
ETa/ETp Vegetationsperiode Vorjahr	-6.401	0.954	0.000
ETa/ETp Vegetationsperiode zwei Jahre vorher	-3.922	1.036	0.000
ETa/ETp Vegetationsperiode drei Jahre vorher	-4.385	1.130	0.000

Tab. 24: Regressionsergebnis für Mortalität von Fichten unter Einschluss von weiter zurückliegenden Trockenheitsindices.

Parameter	Koeffizient	Standardfehler	p-Wert
(Intercept)	45.135	10.830	0.0000
K in Nadeln gruppiert (≤ 2.8 , > 2.8 mg/g TS)	-37.524	10.537	0.0004
Mg in Nadeln gruppiert (≤ 0.8 , > 0.8 mg/g TS)	-0.813	0.172	0.0000
ET _A /ET _P Frühjahr Mittelwert über 3 Jahre	-62.958	14.168	0.0000
K gruppiert * ET _A /ET _P Frühjahr Mittelwert über 3 Jahre	45.978	13.771	0.0008

Tab. 25: Regressionsergebnis für die Mortalität bei Fichten mit einem dreijährigen Mittelwert des ETA/ETP - Verhältnisses in den ersten 80 Tagen der Vegetationsperiode und einer Interaktion zwischen K-Konzentration und Trockenheit.

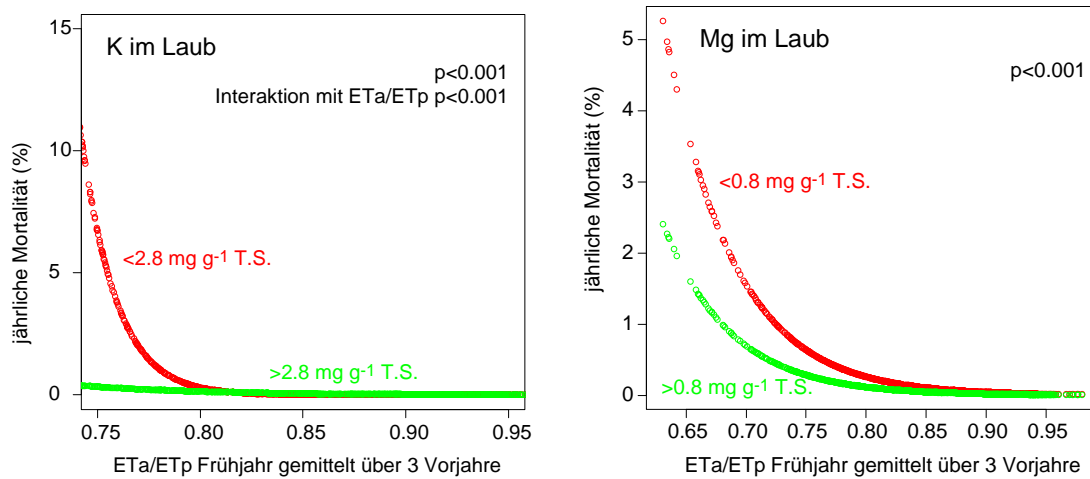


Abb. 12: Mortalität von Fichten in Beziehung zur Trockenheit (ETA/ETP im in den ersten 80 Tagen der Vegetationsperiode, über drei Vorjahre gemittelte Werte) und zur Konzentration von Kalium (links) und Magnesium (rechts) in den Fichtennadeln. Aus der in Tab. 25 gezeigten Regression vorausgesagte Werte.

	Spline, df	F-Wert	p-Wert
N-Deposition	3	1.84	n.s.
ETA/ETp Frühjahr 3-Jahresmittel	2	28.30	p<0.001
K in Nadeln gruppiert (=2.8, >2.8 mg/g TS)	1	67.72	p<0.001
Mg in Nadeln gruppiert (=0.8, >0.8 mg/g TS)	1	23.38	p<0.001
ETA/ETp Frühjahr 3 Jahresmittel : N-Deposition	3x2	4.67	p<0.05
K in Nadeln : ETA/ETp Frühjahr 3-Jahresmittel	1	9.77	p<0.01

Tab. 26: Spline-Modell für die Mortalität von Fichten.

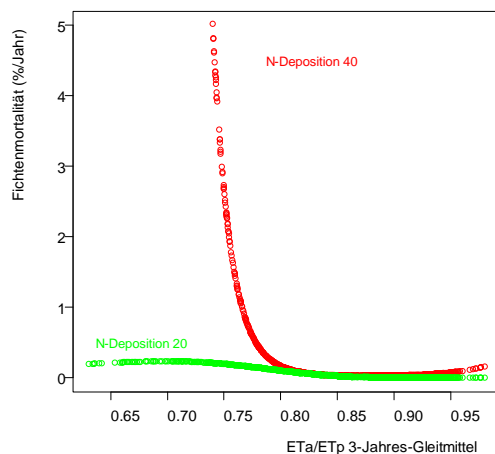


Abb. 13: Visualisierung der Interaktion zwischen Stickstoffdeposition und Trockenheit im Splinemodell (Tab. 26).

5.5. Übersicht über alle ausgewerteten Parameter

Mit Hilfe 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 Indices. Abb. 14 zeigt diese Auswertungen für die Buche, Abb. 15 für die Fichte. Die Säulen sind gemäss dem AIC-Wert eingefärbt. Nichtsignifikante Regressionen sind durch leere Säulen gekennzeichnet. In der Regel bedeutet ein besseres Regressionsergebnis auch eine stärkere Schätzung der Veränderung, im Einzelfall gibt es jedoch auch Abweichungen davon.

Es lässt sich kein eindeutig bester Indikator für alle Vitalitätsparameter herauslesen. Gut schneiden Indikatoren der Standortwasserbilanz beim Stammzuwachs und beim Triebwachstum ab. Gleiches gilt für die Mortalität der Buche, wobei jedoch mehrere Indikatoren, die auf dem ETa/ETp -Verhältnis beruhen, fast gleichwertig sind. Bei der Mortalität der Fichte ist ETa/ETp Frühjahr (d.h. über die ersten 80 Tage der Vegetationsperiode) klar der beste Indikator. Generell schlecht sind die Indikatoren, die über die obersten 40 oder 60 cm des Bodens gemittelt wurden, wie Wassersättigungsdefizit, relative Bodenfeuchte und Wasserpotential. Diese sind z.T. nicht einmal signifikant mit den geprüften Vitalitätsparametern korreliert. Die beiden ETa/ETp -Indikatoren nach Romanenko und nach Shuttleworth schneiden ebenfalls schlecht ab. Niederschlag allein ist ebenfalls ein schlechter Indikator, ist aber in der multivariaten Auswertung des Stammzuwachses der Buchen als signifikanter Prädiktor enthalten.

Ökologisch relevant sind vor allem die Auswertungen von Stammzuwachs und Mortalität, da quantitative Schätzungen für die Extrapolation der Ergebnisse in die Zukunft mit Klimaszenarien gefragt sind. Triebwachstum ist ein guter Indikator, weil er messbare Daten in jährlicher Auflösung liefert, ist aber forstlich von geringerer Bedeutung. Von geringer Relevanz ist die Kronenverlichtung, die mit den meisten Indikatoren gleich gut oder schlecht geschätzt wird. Die meisten Indikatoren schätzen die trockenheitsbedingte Veränderung im Jahr 2003 um ca. 5-7%.

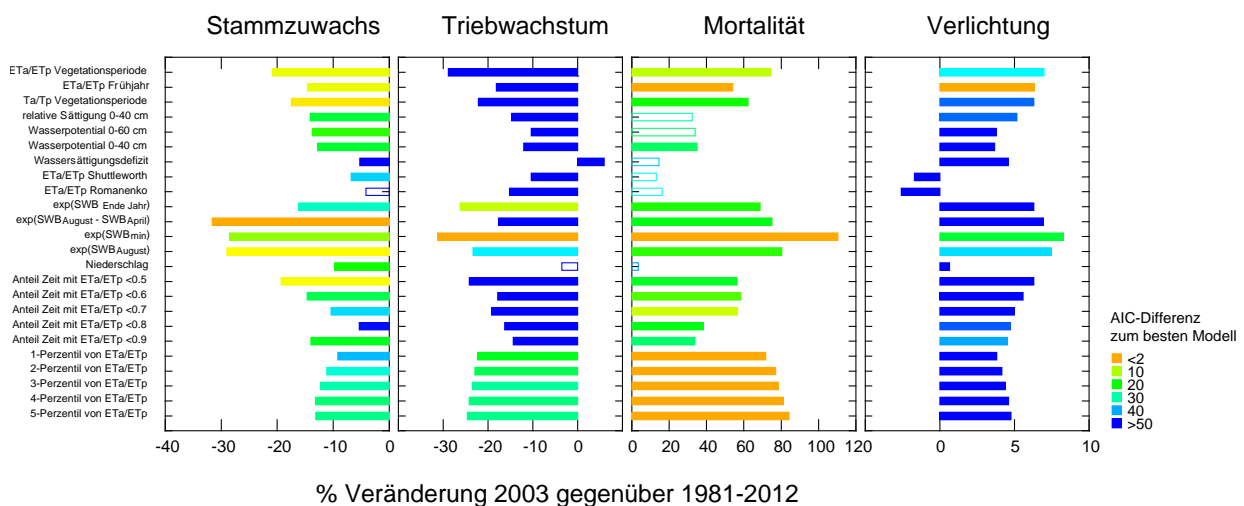


Abb. 14: Vergleich verschiedener Trockenheitsindikatoren für die vier untersuchten Vitalitätsparameter bei Buchen. Angegeben ist die trockenheitsbedingte Veränderung durch das Trockenjahr 2003 im Vergleich zur gesamten Beobachtungsperiode. Die Säulen für die beste Regression sind orange eingefärbt. Die übrigen Farben geben die Differenz des AIC zum besten Modell an. Wenn die Säule nicht ausgefüllt ist, war die entsprechende Regression nicht signifikant. Lesebeispiel: Aufgrund der Regression mit SWB August minus SWB April (beste Regression für Stammzuwachs) wird berechnet, dass die Trockenheit 2003 zu einer 32%igen Wachstumsreduktion führte.

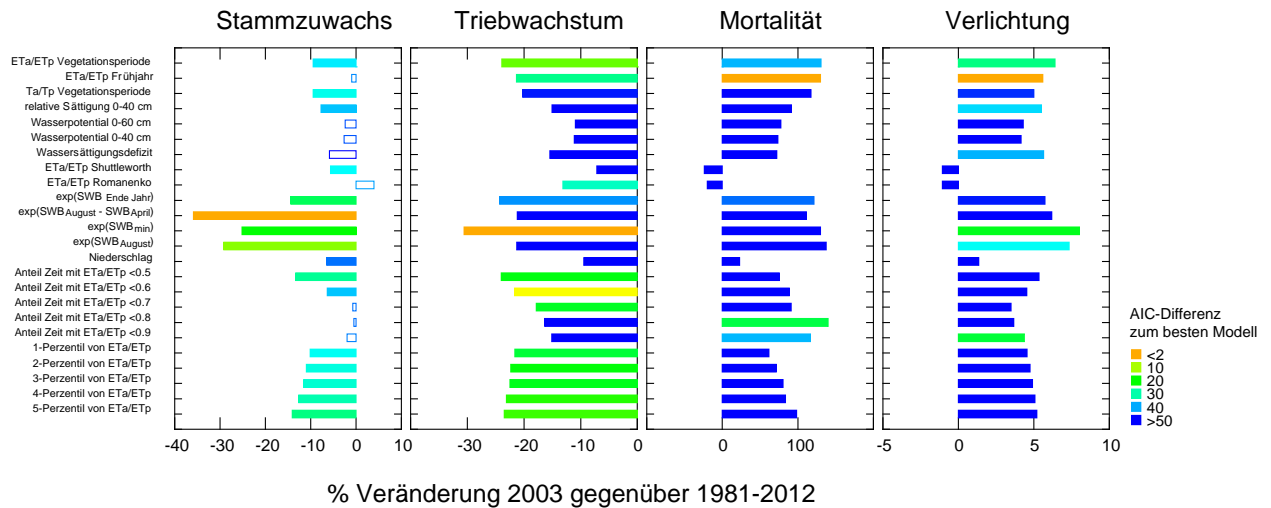


Abb. 15: Vergleich verschiedener Trockenheitsindikatoren für die vier untersuchten Vitalitätsparameter bei Fichten. Angegeben ist die trockenheitsbedingte Veränderung im Jahr 2003 im Vergleich zur gesamten Beobachtungsperiode. Die Säulen für die beste Regression sind orange eingefärbt. Die übrigen Farben geben die Differenz des AIC zum besten Modell an. Wenn die Säule nicht ausgefüllt ist, war die entsprechende Regression nicht signifikant.

Diese hier hergeleiteten quantitativen Beziehungen werden nachfolgend mittels der Klimaszenarien in die Zukunft projiziert.

5.6. Gleichungen für die Bewertung des Trockenstresses in Klimaszenarien

Gemäss Abb. 14 und Abb. 15 ist für den Stammzuwachs sowohl bei Buchen als auch bei Fichten der am besten geeignete Trockenheitsindikator die Standortwasserbilanz nach Grier und Running (SWB). Aufgrund der Regressionen werden folgende Gleichungen vorgeschlagen (% Zuwachs bezogen auf die Grundfläche).

$$\text{Zuwachs}_{\text{Buchen}} = 100 * (0.0543 + 0.08857 * e^{SWB/1000})^2 \quad (1)$$

$$\text{Zuwachs}_{\text{Fichten}} = 100 * (0.01407 + 0.1176 * e^{SWB/1000})^2 \quad (2)$$

Für die Berechnung der Mortalität werden folgende Gleichungen vorgeschlagen:

$$\text{Mortalität}_{\text{Buchen}} (\%) = 100 * \frac{e^{(-2.342 - 3.994 * SWBAVG2 - 0.00326 * HOEHE)}}{1 + e^{(-2.342 - 3.994 * SWBAVG2 - 0.00326 * HOEHE)}} \quad (3)$$

$$\text{Mortalität}_{\text{Fichten}} (\%) = 100 * \frac{e^{(5.761 - 15.15 * ETAETPAVG3)}}{1 + e^{(5.761 - 15.15 * ETAETPAVG3)}} \quad (4)$$

wobei:

SWB: Site Water Balance nach Grier & Running (Differenz Ende August – Ende April)

SWBAVG2: 2-Jahresmittel der Standortwasserbilanz nach Spellmann, Minimum pro Vegetationsperiode (vor der Mittelung exponentialtransformiert)

HOEHE: Meereshöhe (m)

ETAETPAVG3: 3-Jahresmittel des Frühjahrs-Evapotranspirationsverhältnisses

Bei der Schätzung der Mortalität muss allerdings berücksichtigt werden, dass die beobachteten Daten in einem sehr tiefen Prozentbereich liegen, mit sehr vielen Nullen, und damit das logistische Modell nicht sehr gut extrapolieren kann. Ein Vergleich von aus der Regression geschätzten mit beobachteten Werten zeigt, dass die geschätzte Mortalität im Bereich der höheren Mortalitätszahlen zu tief ausfallen (Abb. 16), während die Mittelwerte einigermaßen übereinstimmen: bei den Buchen beträgt der Mittelwert der modellierten Mortalität 0.081 und der beobachteten Mortalität 0.089%. Bei den Fichten lauten die entsprechenden Zahlen 0.48 und 0.51%.

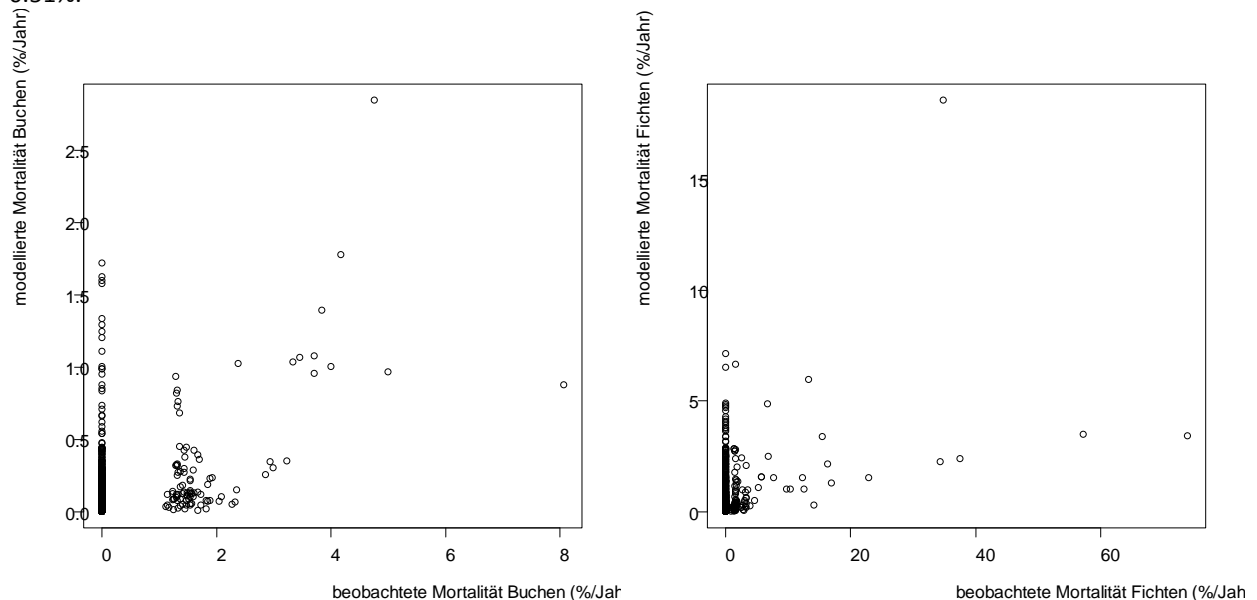


Abb. 16: Aus der Regression geschätzte Mortalität bei Buchen und Fichten im Vergleich zur beobachteten Mortalität.

5.7. Karten

Mittels Gleichungen 1 und 2 sowie Karten der SWB (Remund et al. 2011) wurden Karten erstellt, die die Reduktion des Stammwachstums für Buchen (Abb. 17) und Fichten (Abb. 18) für das Jahr 2003 zeigt. Die Karten zeigen deutlich die trockenen Regionen der Schweiz: Nordschweiz, Jurasüdfuss, Genferseeregion, bei den Fichten auch Wallis und Churer Rheintal. Die für die Fichten geschätzte Wachstumsreduktion ist grösser als für die Buche.

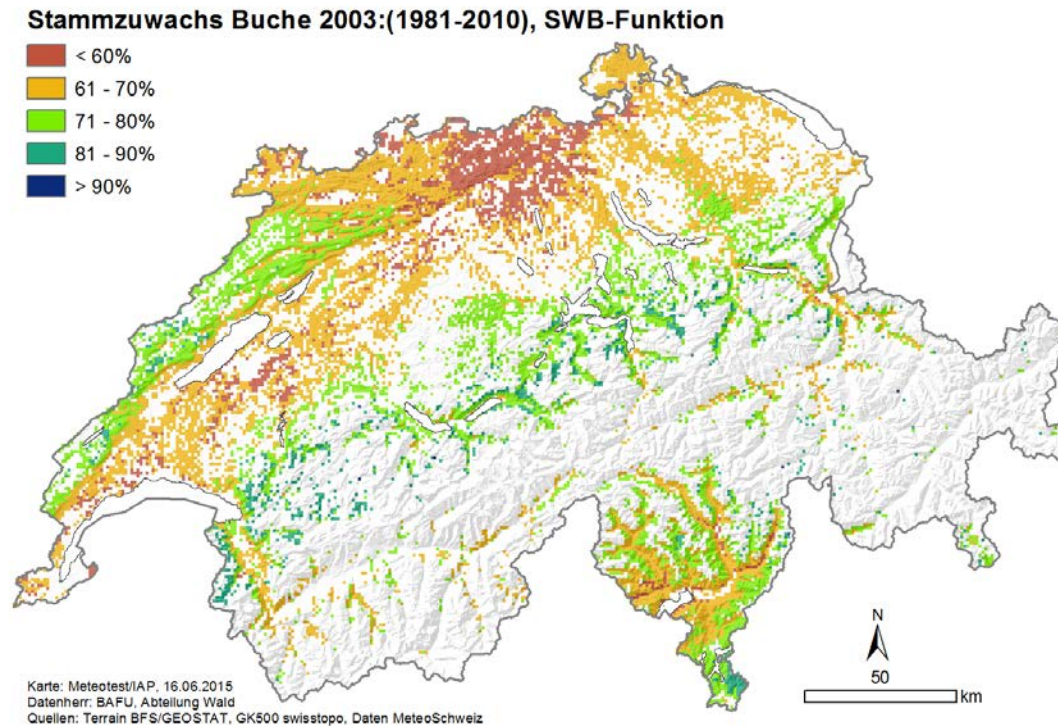


Abb. 17: Trockenheitsbedingte Reduktion des Stammzuwachses von Buchen im Jahr 2003 im Vergleich zum Mittelwert 1981-2010. Nur Flächen mit einem Laubholzanteil von >50% (1-km-Raster des BFS 2004)

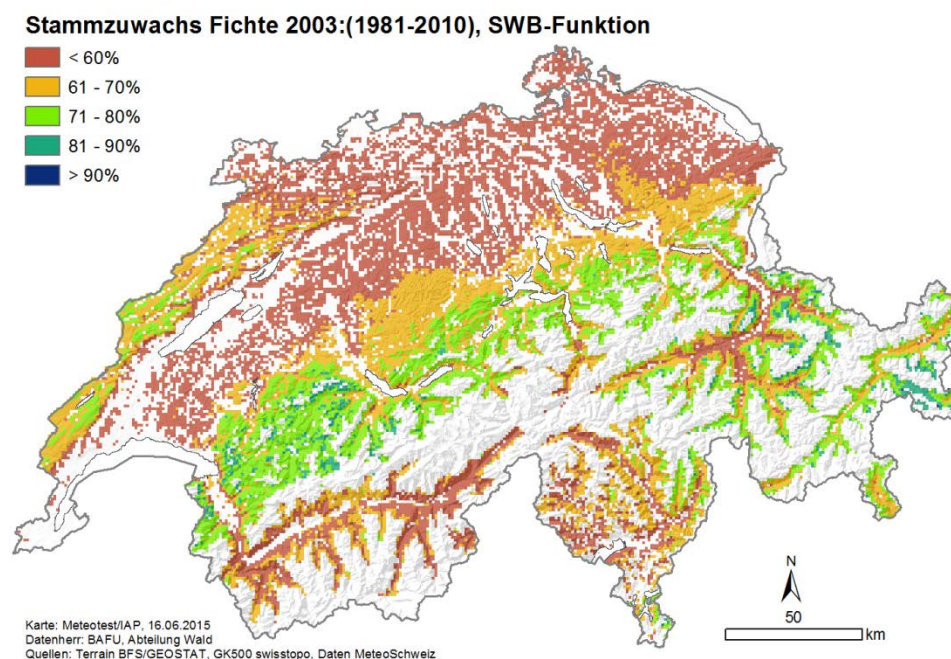


Abb. 18: Trockenheitsbedingte Reduktion des Stammzuwachses von Fichten im Jahr 2003 im Vergleich zum Mittelwert 1981-2010. Nur Flächen mit einem Nadelholzanteil von >50% (1-km-Raster des BFS 2004)

5.8. Vegetationseinheiten und Trockenheit

In Ökogrammen der Vegetationseinheiten wird die Feuchtigkeit des Standorts abgestuft von nass bis sehr trocken dargestellt. Es stellte sich die Frage, ob diese Feuchtigkeitsachse mit den im Rahmen dieses Projektes hergeleiteten Trockenheitsindikatoren korreliert, d.h. ob sie eine Aussage zur Trockenheitsgefährdung der Waldgesellschaft enthält. Die Anordnung der Gesellschaften im Ökogramm wurde deshalb in eine kontinuierliche Feuchtigkeitsachse umgesetzt (Abb. 19). Der Feuchtigkeitswert der entsprechenden Waldgesellschaft in den Waldbeobachtungsflächen wurde mit der über die Jahre 1981-2012 gemittelten Site Water Balance nach Spellmann (Wert Ende Jahr, exponentialtransformiert) in Beziehung gesetzt. Wie in Abb. 20 und Tab. 27 dargestellt, besteht nur eine schwach signifikante Beziehung zwischen diesen beiden Parametern. Andere Trockenheitsindikatoren wie ET_a/ET_p nach WaSiM-ETH waren noch schlechter und sind hier deshalb nicht weiter dargestellt. Eine stärkere Beziehung zum Feuchtewert der Vegetationseinheit hat der Vernässungsgrad des Bodens (Tab. 27), auch wenn die insgesamt erklärte Varianz mit 24% nicht sehr gross ist. Im Fall der Vernässung spielt dabei sicher mit, dass die Vegetationseinheit nicht genau am Punkt des Bodenprofils aufgenommen wurde, Vernässungsmerkmale aber kleinräumig sehr heterogen sind.

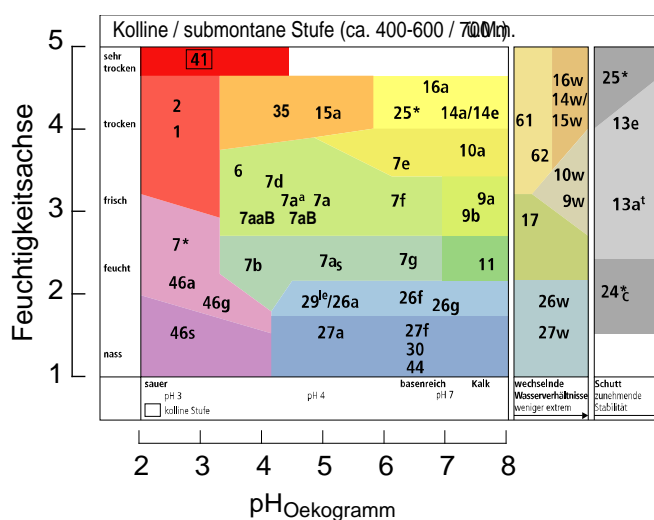


Abb. 19: Quantitative Auswertung der Ökogramme. Die Position der Gesellschaften im Ökogramm wurde in eine kontinuierliche X- und eine kontinuierliche Y-Achse umgesetzt. Die X-Achse („pHÖkogramm“) wurde auf einen Wert zwischen 2 (sauer) und 8 (basenreich) aufgeteilt, die Y-Achse (Feuchtigkeitsachse) auf einen Wert zwischen 1 (nass) und 5 (sehr trocken).

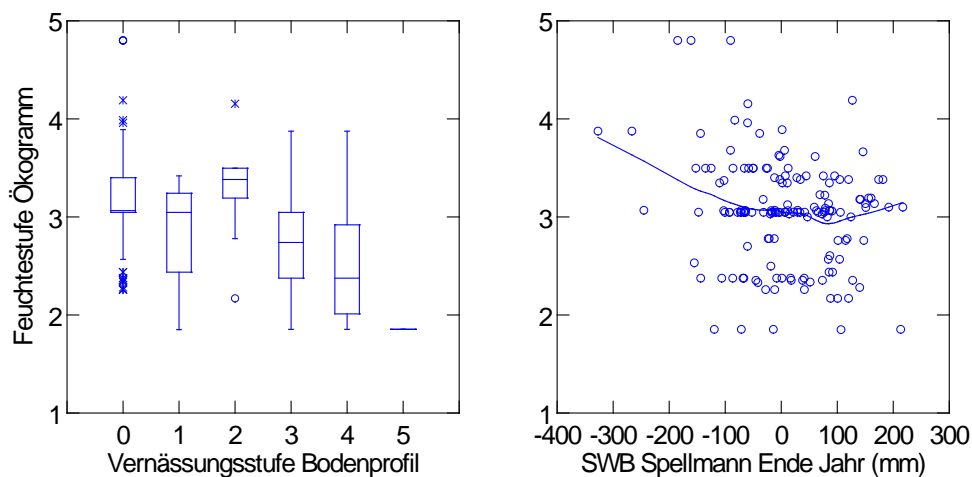


Abb. 20: Beziehung der Feuchteachse des Ökogramms (relative Einheiten von 1=sehr feucht bis 5=sehr trocken; vgl. Abb. 19) und der Vernässungsstufe nach Bodenkundlicher Kartieranleitung (links) sowie der Site Water Balance nach Spellmann Ende Jahr (rechts). Statistik vgl. Tab. 27.

5.9. Projektion in die Zukunft

Mittels Wasim wurden die Auswirkungen der Klimamodelle CLM, RCA und REGCM3 auf die zukünftige Trockenheitsbelastung der Walddauerbeobachtungsflächen modelliert. Mit Gleichungen 1 bis 4 wurden Stammwachstum und Mortalität für die reale Zeitperiode 1981-2012 sowie für die modellierte Periode 1981-2099 in jährlicher Auflösung berechnet. Um die Veränderungen quantitativ zu dokumentieren, wurden zudem die Ergebnisse für die Periode 2045-2074 mit der realen Periode 1981-2012 verglichen.

Die Auswertungen wurden nach Vegetationseinheit in der Reihenfolge der heutigen Trockenheitsgefährdung (Abb. 21) gruppiert. Die Berechnungen wurden unabhängig davon durchgeführt, ob die Baumarten unter den veränderten Klimabedingungen eine Chance haben oder nicht. Einen Hinweis auf die Überlebenschance der Fichte gibt der Vergleich zwischen den Beobachtungsflächen mit einer bestehenden Fichtenbestockung und denjenigen ohne. Die Mortalitätsschätzung aus Klimadaten für die Zeitperiode 1981-2014 beträgt in den Fichtenflächen max. 0.85% pro Jahr. Ausserhalb der Fichtenzone, im Eichengebiet, steigen diese Schätzungen auf bis zu 5.0% (Sion) bzw. 2.9% (Tamins). Das bedeutet, dass eine mittlere Fichtenmortalität von grösser als 1-2%/Jahr über einen Zeitraum von 30 Jahren als Risiko für diese Baumart bewertet werden muss.

5.9.1. Szenario CLM

Das Szenario CLM ist das Modell mit den stärksten Veränderungen (Remund et al. 2014). Wenn die bisherigen Regressionsergebnisse extrapoliert und pro Standort über den Zeitraum 2045-2074 gemittelt werden, so resultiert eine Schätzung der Buchenmortalität von bis zu 0.2% pro Jahr und der Fichtenmortalität von bis zu 2.8% pro Jahr (Extremwerte in einzelnen Jahren 0.3 bzw. 17.7%). Beim über den Zeitraum 2045-2074 gemittelten Zuwachs der Buchen sind Reduktionen von bis zu 33% (im Mittel 16%) und beim Fichtenzuwachs Reduktionen von bis zu 28% (Mittel 9%) zu erwarten. In Einzeljahren und an einzelnen Standorten können die Reduktionen bis zu 64% (Buchen) und 66% (Fichten) betragen (Tab. 28). Abb. 24 und Abb. 25 zeigen die entsprechenden Häufigkeitsverteilungen. Da das Modell die stärksten Veränderungen im Jura und im Tessin voraussagt, sind auch die Veränderungen bei Gesellschaften, die für diese Regionen typisch sind, besonders gross (z.B. die Tessiner Gesellschaften 3mL und 4L). Die Zuwachsreduktion ist bei den Fichten geringer, da diese Baumart von den erhöhten Temperaturen profitieren kann, jedoch steigt die Mortalität unter Trockenheit stärker an. Kombiniert man beide Reaktionen zu einem kombinierten Zuwachs, so zeigt sich, dass beim untersuchten Flächenkollektiv der Dauerbeobachtungsflächen die erhöhte trockenheitsbedingte Mortalität die geringere Zuwachsreduktion bei den Fichten nicht aufhebt (Tab. 29).

Modell CLM	Standortsmittel 2045-2074		Einzeljahre 2045-2074	Standortsmittel 2075-2099		Einzeljahre 2075-2099
	Mittelwert	Extremwert	Extremwert	Mittelwert	Extremwert	Extremwert
Stammzuwachs Buchen relativ	0.84	0.67	0.36	0.72	0.55	0.36
Stammzuwachs Fichten relativ	0.91	0.72	0.34	0.83	0.64	0.38
Mortalität Buchen (% pro Jahr)	0.04	0.18	0.33	0.05	0.23	0.34
Mortalität Fichten (% pro Jahr)	0.23	2.75	17.7	0.25	2.92	16.65

Tab. 28: Stammzuwachs Buchen und Fichten relativ (d.h. heutiger Zuwachs=1) sowie Mortalität im Zeitraum 2045-2074, entweder als Mittelwert pro Standort über diese Periode oder als Einzelwert. Beim Zuwachs ist als Extremwert der minimale Zuwachs angegeben, bei der Mortalität das Maximum.

Jahr	kumulierter Zuwachsverlust Buchen		kumulierter Zuwachsverlust Fichten	
	Mittelwert	Minimum	Mittelwert	Minimum
2045	0.97	0.74	0.97	0.74
2074	0.90	0.78	0.94	0.53
2099	0.81	0.66	0.88	0.30

Tab. 29: Kumulierte Zuwachsverluste für Buchen und Fichten (Startwert: 2010, Vergleichswert: Klimaperiode 1981-2014)

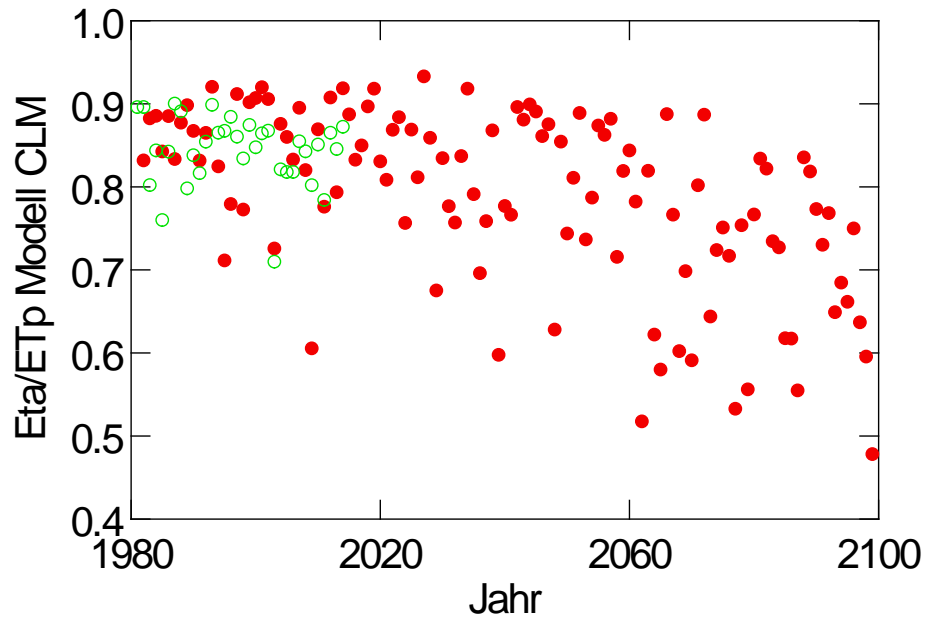


Abb. 22: Verhältnis zwischen aktueller und potentieller Evapotranspiration mit dem Klimaszenario CLM (rote Punkte) sowie reale Werte für die Jahre 1981-2012 (grüne Punkte). Jährlicher Mittelwert über alle Beobachtungsflächen (n=187).

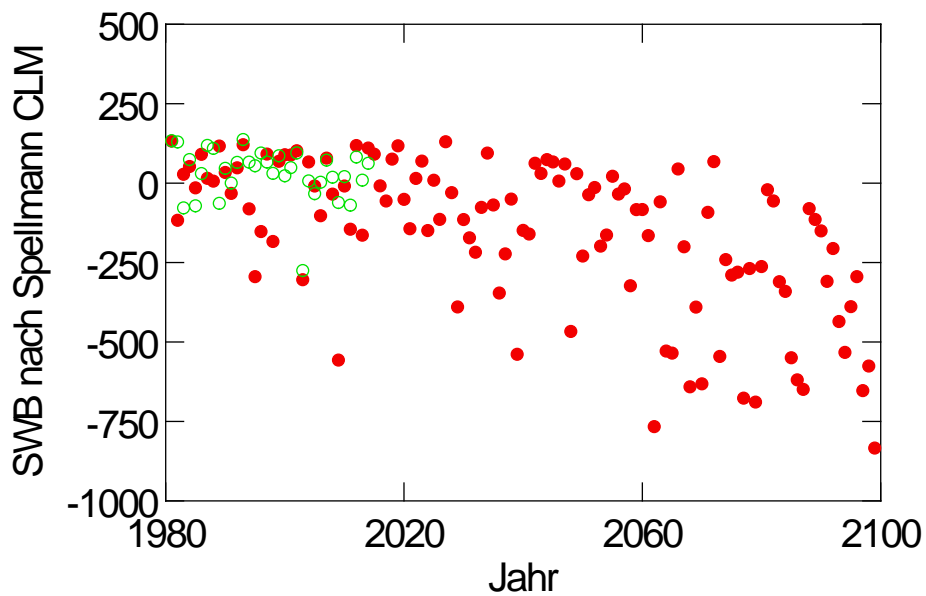


Abb. 23: Site Water Balance nach Spellmann (in mm) mit dem Klimaszenario CLM (rote Punkte) sowie reale Werte für die Jahre 1981-2012 (grüne Punkte). Jährlicher Mittelwert über alle Beobachtungsflächen (n=187).

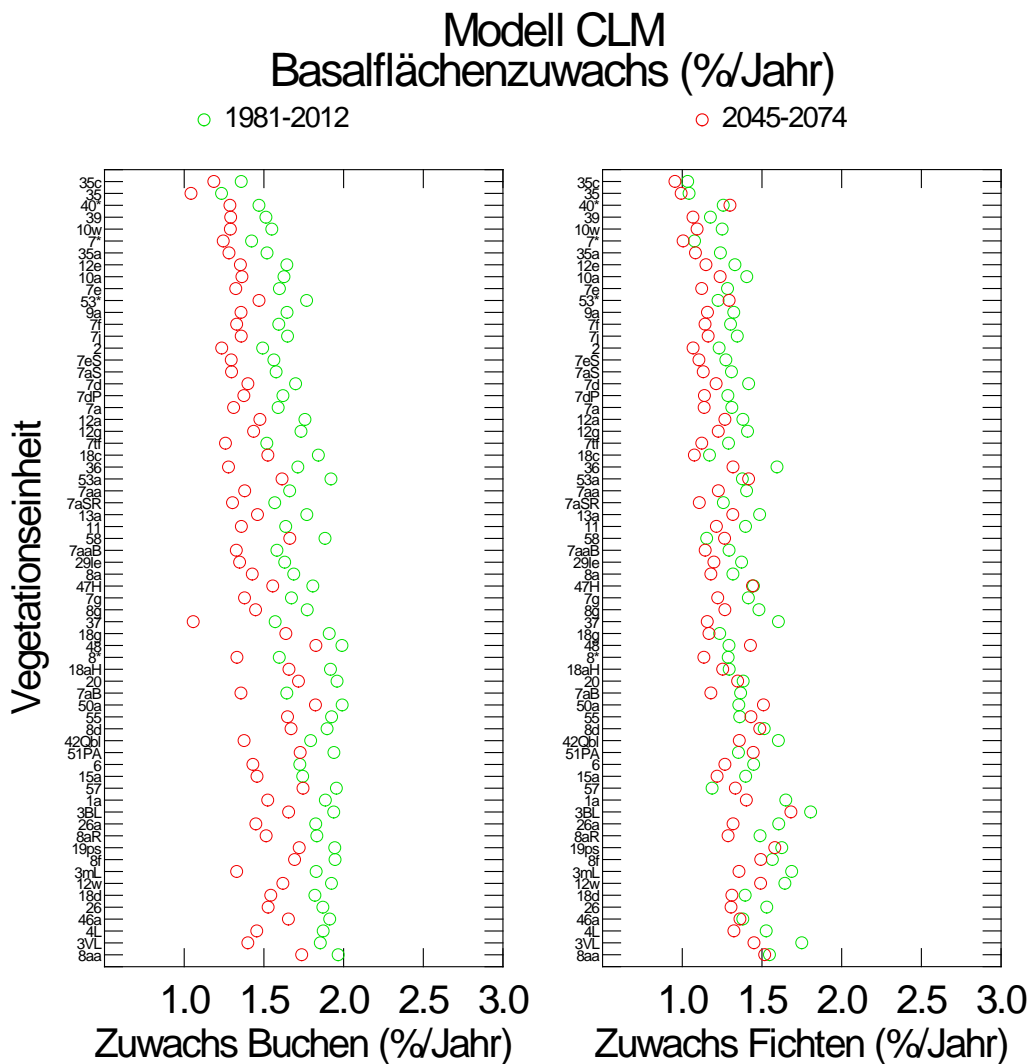


Abb. 26: Schätzung des Basalflächenzuwachses (in % pro Jahr) für Buchen (links) und für Fichten (rechts) beim Klimaszenario CLM. Die Vegetationseinheiten sind nach der heutigen Site Water Balance nach Spellmann sortiert.

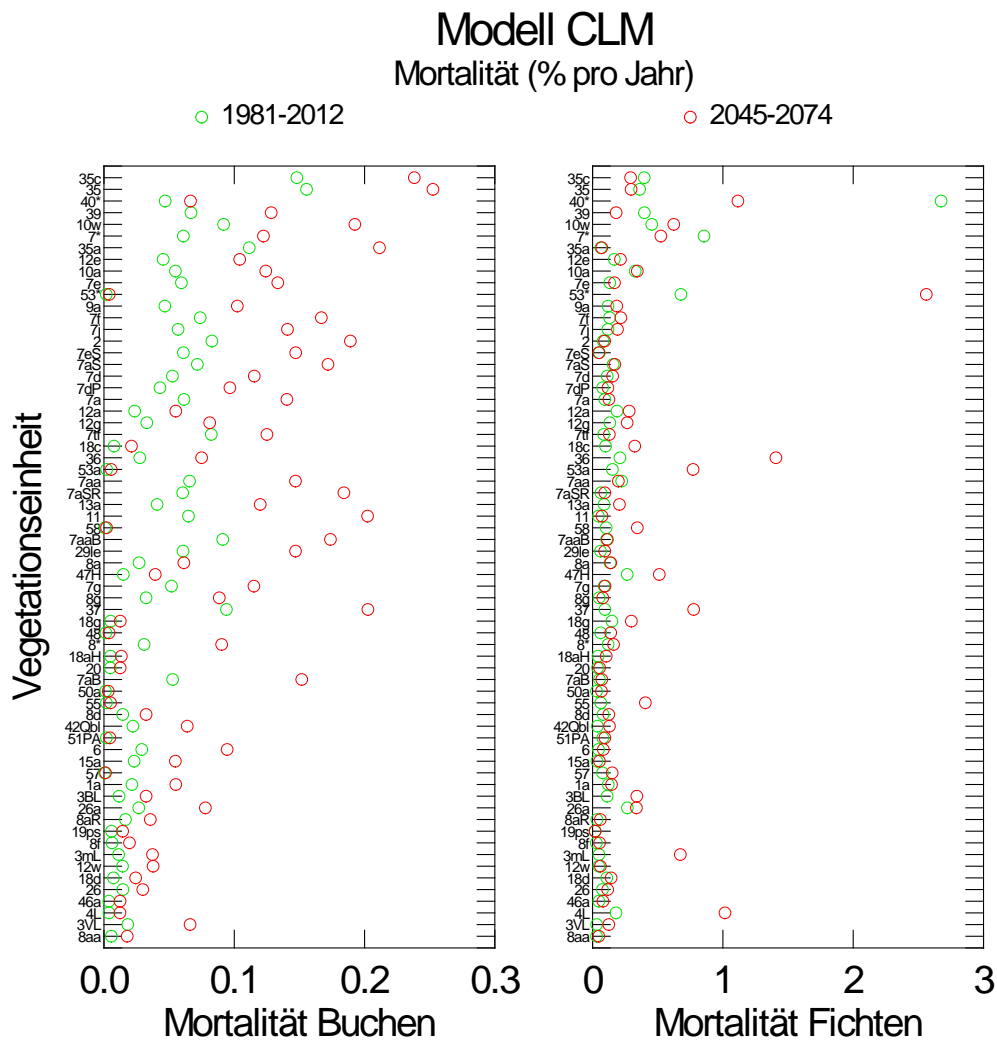


Abb. 27: Schätzung der Mortalität für Buchen (links) und für Fichten (rechts) beim Klimaszenario CLM in % pro Jahr.

5.9.2. Szenario RCA

Das Szenario RCA ist das zweittrockenste der drei Klimaszenarien. Aufgrund der Ergebnisse wird ein Zuwachsverlust für Buchen auf bis zu 14% und für Fichten auf bis zu 8% geschätzt. Die Buchenmortalität wird im Mittel auf 0.03% pro Jahr geschätzt (Extremwerte 0.12 bzw. 0.15% pro Jahr), die Fichtenmortalität auf 0.08% pro Jahr (Extremwerte 1.0 bzw. 4.0%) (Tab. 30). Am stärksten von den Veränderungen betroffen sind in diesem Modell die Einheiten 53* und 53a sowie die bereits heute trockenen Eichengesellschaften 40*, 35 und 35c.

Modell RCA	Standortsmittel 2045-2074		Einzeljahre 2045-2074	Standortsmittel 2075-2099		Einzeljahre 2075-2099
	Mittelwert	Extremwert	Extremwert	Mittelwert	Extremwert	Extremwert
Stammzuwachs Buchen relativ	0.93	0.86	0.56	0.85	0.73	0.33
Stammzuwachs Fichten relativ	1.02	0.92	0.44	1.01	0.81	0.41
Mortalität Buchen (% pro Jahr)	0.03	0.12	0.15	0.03	0.14	0.24
Mortalität Fichten (% pro Jahr)	0.08	1.00	3.97	0.22	4.51	26.67

Tab. 30: Stammzuwachs Buchen und Fichten relativ (d.h. heutiger Zuwachs=1) sowie Mortalität im Zeitraum 2045-2074, entweder als Mittelwert pro Standort über diese Periode oder als Einzelwert. Beim Zuwachs ist als Extremwert der minimale Zuwachs angegeben, bei der Mortalität das Maximum.

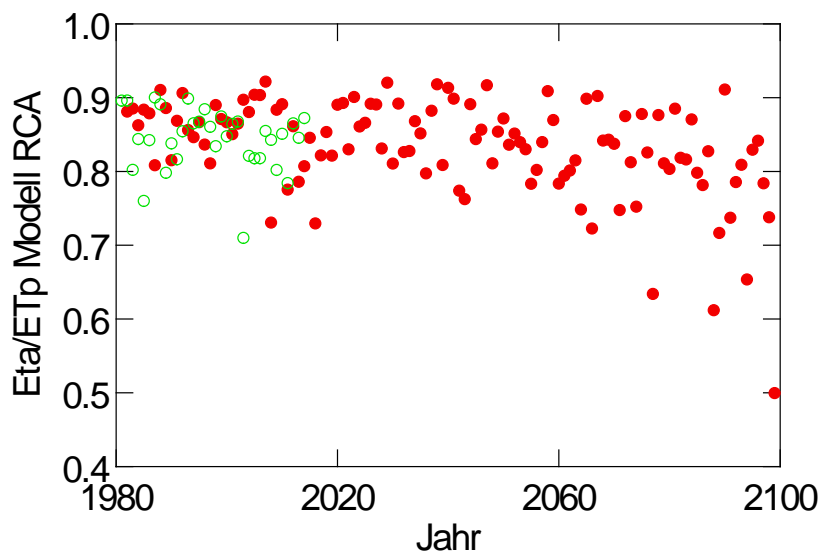


Abb. 28: Verhältnis zwischen aktueller und potentieller Evapotranspiration mit dem Klimaszenario RCA (rote Punkte) sowie reale Werte für die Jahre 1981-2012 (grüne Punkte). Jährlicher Mittelwert über alle Beobachtungsflächen (n=187).

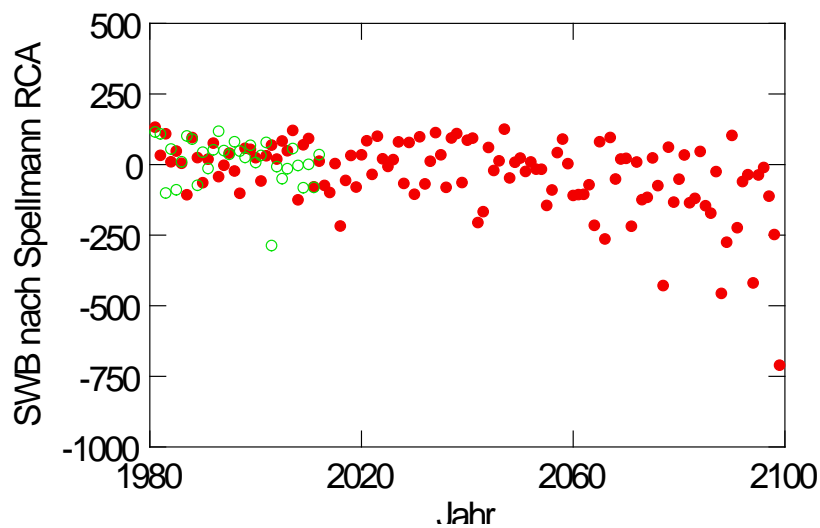


Abb. 29: Site Water Balance nach Spellmann (in mm) mit dem Klimaszenario RCA (rote Punkte) sowie reale Werte für die Jahre 1981-2012 (grüne Punkte). Jährlicher Mittelwert über alle Beobachtungsflächen (n=187).

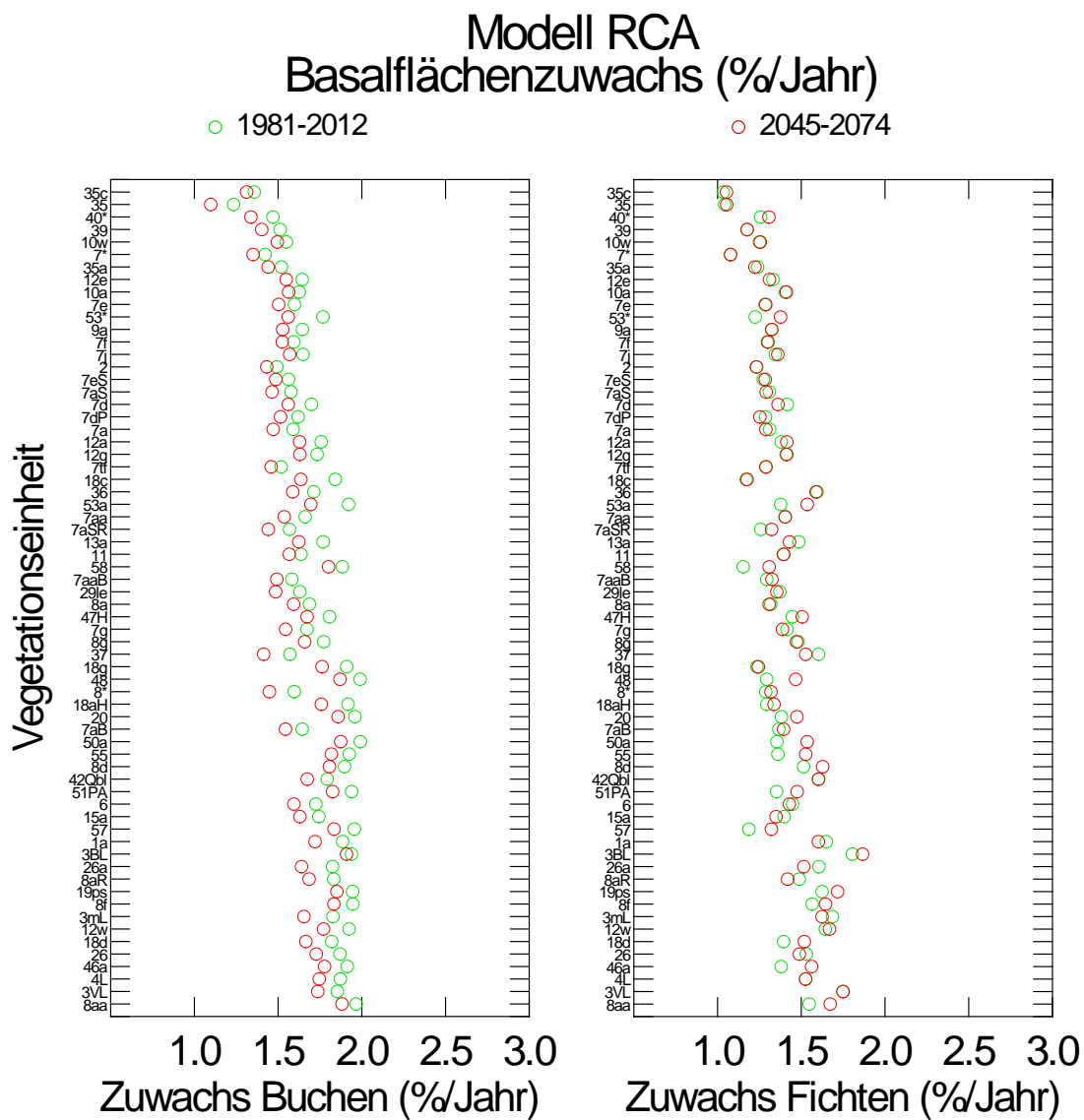


Abb. 32: Schätzung des Zuwachses für Buchen (links) und für Fichten (rechts) mit dem Klimaszenario RCA.

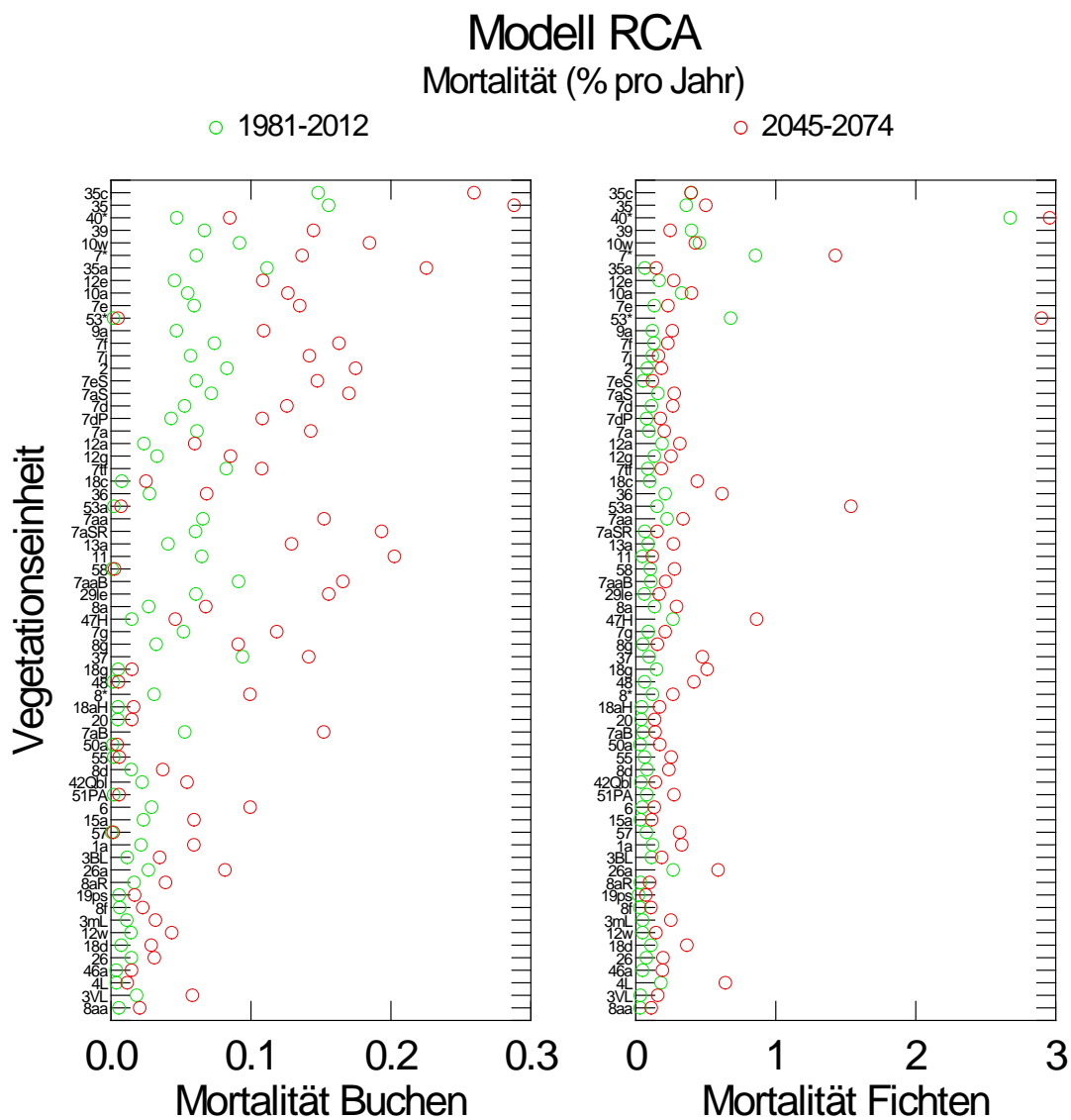


Abb. 33: Schätzung der Mortalität für Buchen (links) und für Fichten (rechts) beim Klimaszenario RCA.

5.9.3. Szenario REGCM3

Szenario REGCM3 ist ein Szenario, das nur eine geringe Zunahme der Trockenheit voraussagt. Da es aber bereits für den Zeitraum 1981-2012 feuchtere Werte berechnet hat als effektiv gemessen wurden, ist es wohl als „zu mild“ einzustufen. Die Zuwachsreduktion bei den Buchen wird auf bis zu 15% und bei den Fichten auf bis zu 8% geschätzt, die Mortalität bei den Buchen im Mittel auf 0.03% (Extremwerte 0.13 bzw. 0.18%) und bei den Fichten im Mittel auf 0.08% (Extremwerte 1.06 bzw. 6.8%) (Tab. 31). Träte dieses Szenario ein, wären wohl die Auswirkungen auf die Forstwirtschaft eher gering und zu bewältigen.

Modell REGCM3	Standortsmittel 2045-2074		Einzeljahre 2045-2074	Standortsmittel 2075-2099		Einzeljahre 2075-2099
	Mittelwert	Extremwert	Extremwert	Mittelwert	Extremwert	Extremwert
Stammzuwachs Buchen relativ	0.92	0.85	0.63	0.88	0.80	0.51
Stammzuwachs Fichten relativ	1.00	0.92	0.43	0.98	0.90	0.29
Mortalität Buchen (% pro Jahr)	0.03	0.13	0.18	0.03	0.15	0.23
Mortalität Fichten (% pro Jahr)	0.08	1.06	6.80	0.16	1.97	8.35

Tab. 31: Stammzuwachs Buchen und Fichten relativ (d.h. heutiger Zuwachs=1) sowie Mortalität im Zeitraum 2045-2074, entweder als Mittelwert pro Standort über diese Periode oder als Einzelwert. Beim Zuwachs ist als Extremwert der minimale Zuwachs angegeben, bei der Mortalität das Maximum.

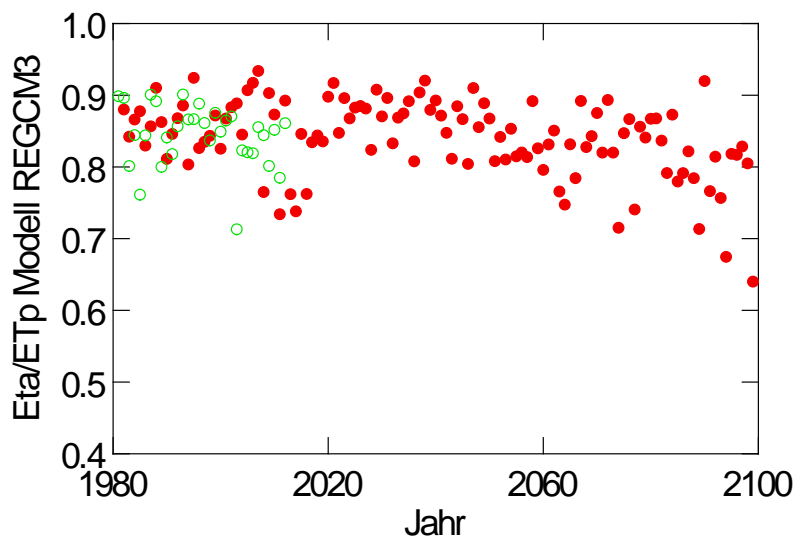


Abb. 34: Verhältnis zwischen aktueller und potentieller Evapotranspiration mit dem Klimaszenario REGCM3 (rote Punkte) sowie reale Werte für die Jahre 1981-2012 (grüne Punkte). Jährlicher Mittelwert über alle Beobachtungsflächen (n=187).

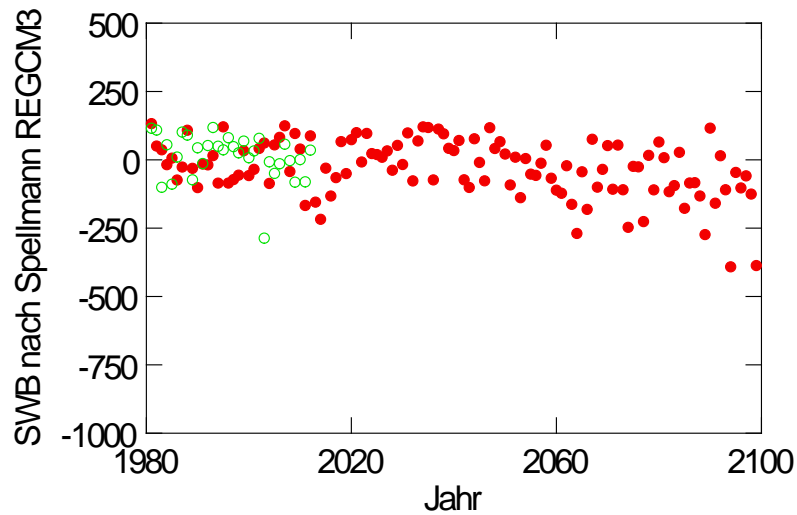


Abb. 35: Site Water Balance nach Spellmann (in mm) mit dem Klimaszenario REGCM3 (rote Punkte) sowie reale Werte für die Jahre 1981-2012 (grüne Punkte). Jährlicher Mittelwert über alle Beobachtungsflächen (n=187).

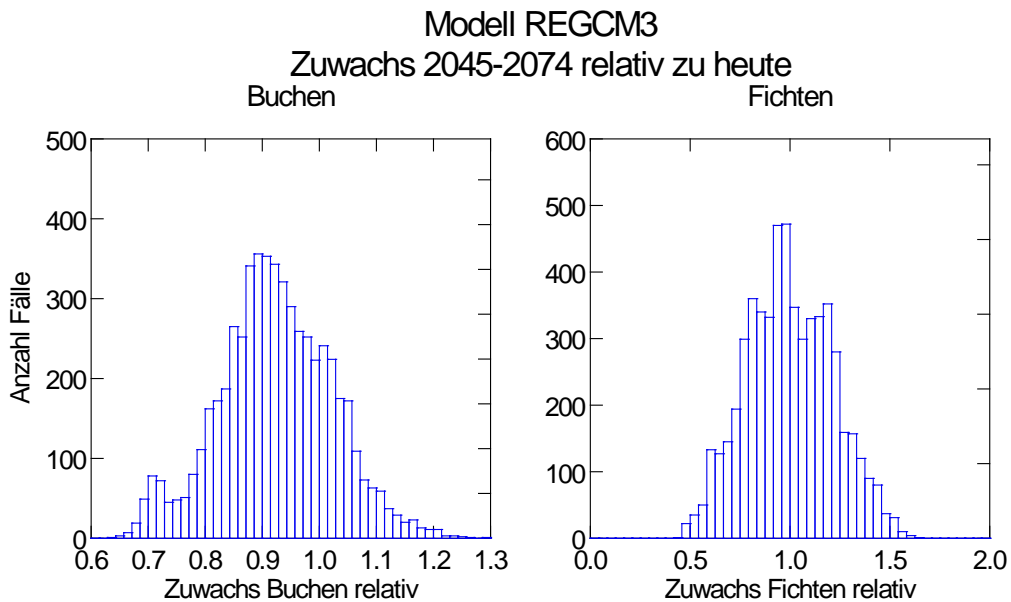


Abb. 36: Häufigkeitsverteilung der modellierten Veränderung des Zuwachses in der Zeitperiode 2045-2074 relativ zu heute mit dem Klimaszenario REGCM3.

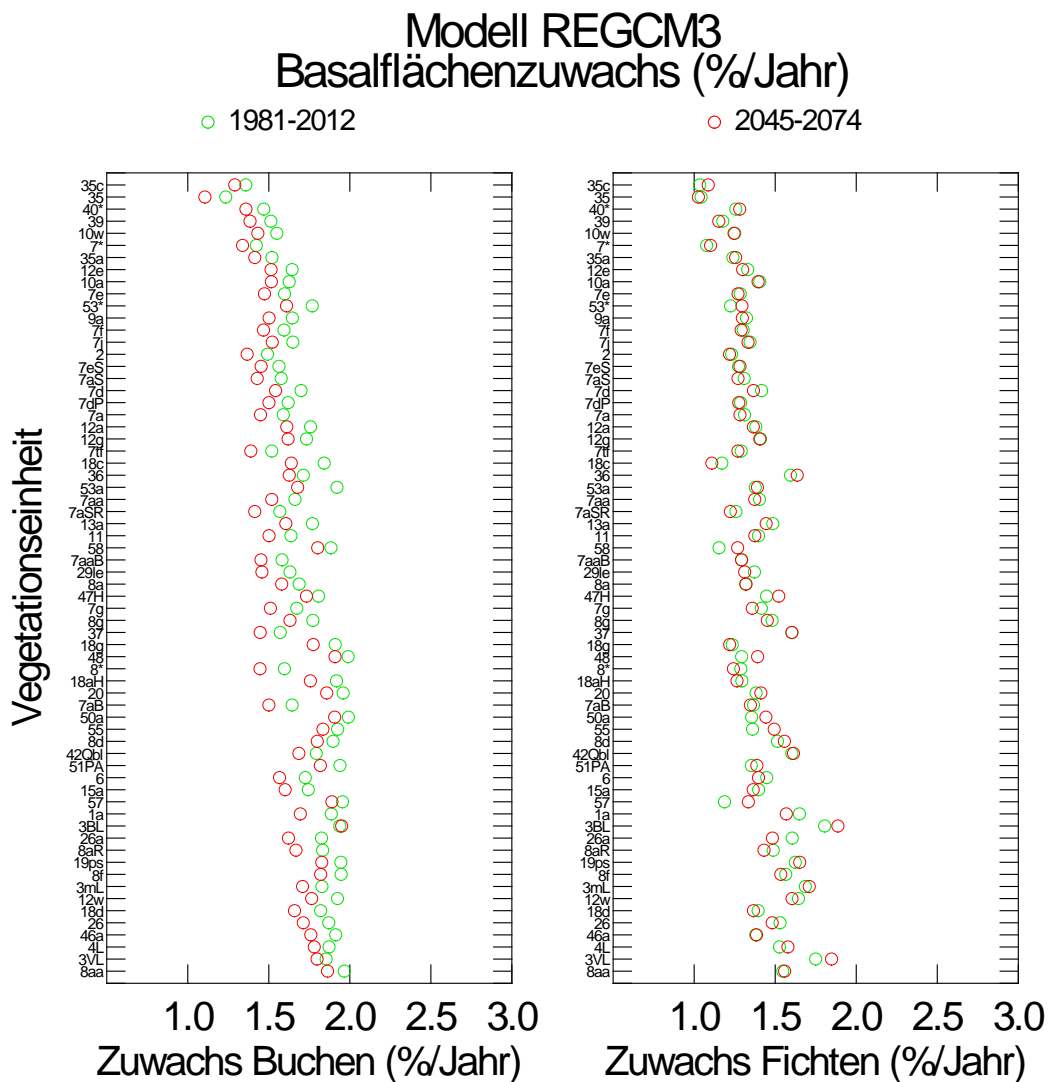


Abb. 38: Schätzung des Zuwachses für Buchen (links) und für Fichten (rechts) beim Klimaszenario REGCM3.

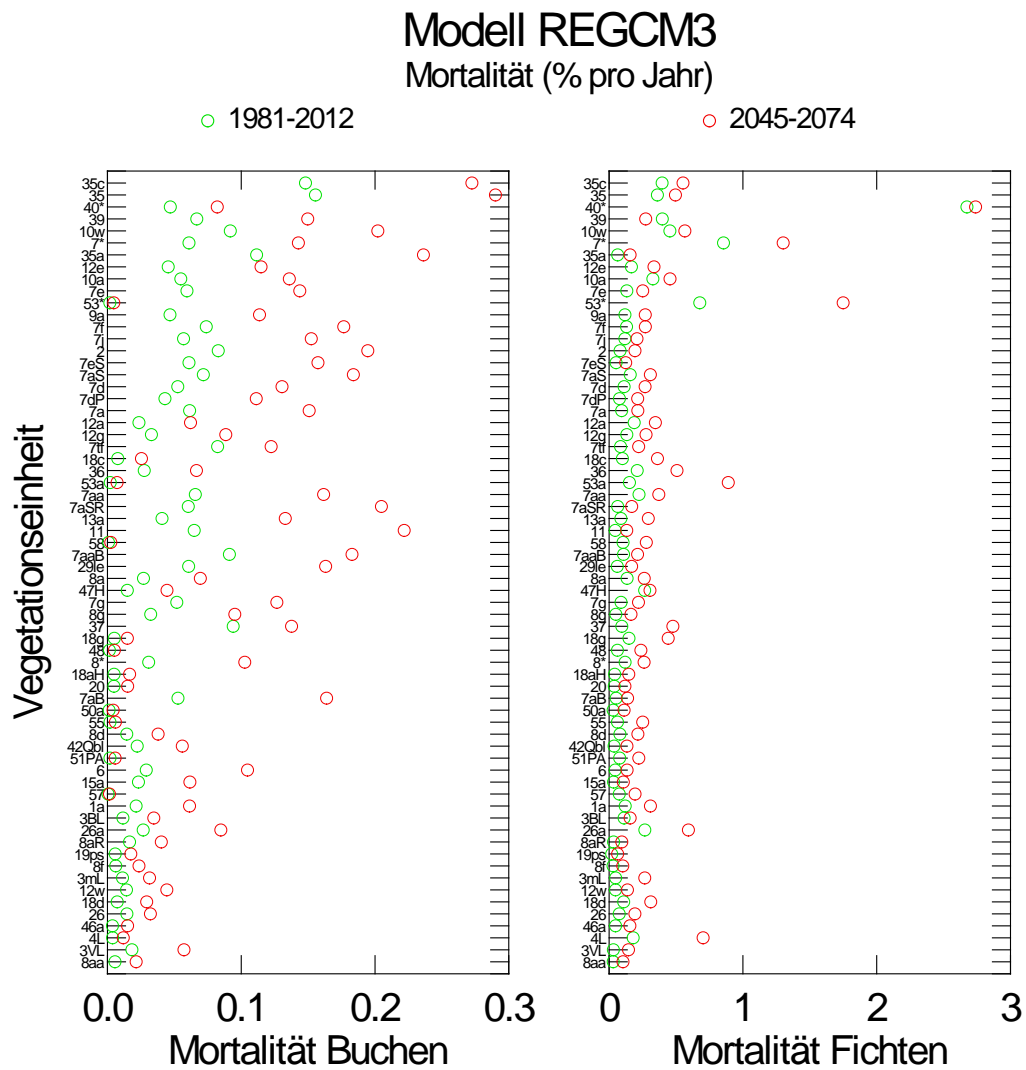


Abb. 39: Schätzung der Mortalität für Buchen (links) und für Fichten (rechts) beim Klimaszenario REGCM3.

6 Diskussion

Die Auswertungen ergaben, dass es nicht DEN Trockenheitsindikator gibt, der mit allen Vitalitätsparametern gut korreliert ist. Der Stammzuwachs liess sich am besten mit der Wasserbilanz des Standorts, der Site Water Balance (SWB nach Grier & Running oder Spellmann, in täglicher Auflösung berechnet) in der Vegetationszeit erklären. Diese Variante entspricht der klimatischen Wasserbilanz, da durch die Differenzbildung zwischen Ende August und Ende April die nutzbare Feldkapazität des Bodens aus der Rechnung verschwindet. Das Triebwachstum war ebenfalls gut mit den SWB-Indices korreliert, doch das Verhältnis zwischen aktueller und potentieller Evapotranspiration nach WaSiM-ETH war ebenfalls gut geeignet.

Wie realistisch sind die Schätzungen für die trockenheitsbedingte Reduktion des Grundflächenzuwachses im Jahr 2003 von 32% bei Buchen und 36% bei Fichten? In Tieflagen beobachtete Dobbertin (2005) Wachstumsreduktionen von 50-75% in diesem Jahr in Vergleich zu 2002, während in den höheren Lagen das Wachstum zunahm. Über alle 15 Beobachtungsflächen (LWF), mit verschiedenen Baumarten, beträgt die Abnahme 25%. In der CO₂-Begasungsfläche Hofstetten nahm das Wachstum von 22 Bäumen verschiedener Arten 2003 um 25% ab (Leuzinger et al. 2005). Die Zahlen sind auch vergleichbar mit denjenigen von Ciais et al (2005), die den Verlust der Bruttoprimärproduktion für das Jahr 2003 im europäischen Wald auf etwa 30% schätzten. Diese Übereinstimmung und der Umstand, dass die auf der multivariaten Regression 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 an Nullbeobachtungen eingeschränkt. Die berechneten Schätzwerte sind möglicherweise zu tief, vor allem die hohen Mortalitätsraten. 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. Das Absterben kann wohl eher durch eine kontinuierliche Schwächung und durch einen Befall mit Schwächeparasiten erklärt werden. Der Unterschied zwischen Wachstum und Mortalität kann physiologisch begründet werden. Wachstum wird durch die Meristemaktivität bestimmt, und diese kann durch tiefe Wasserpotentiale direkt gehemmt werden (Würth et al. 2005). Die Prozesse, die die trockenheitsbedingte Mortalität steuern, sind dagegen vielfältiger. Eine wichtige Rolle spielt der Verlust der Wasserleitfähigkeit unter Wasserspannung, wenn die Leitgefässe mit Luftblasen gefüllt werden (Emboliebildung oder Kavitation: Cochard 1992). Der Tod tritt bei einem Leitfähigkeitsverlust von 50% bei Koniferen (Brodrigg und Cochard 2009) und von 90% bei Laubhölzern (Cochard pers. Mitt.) ein. Die Resistenz gegenüber Kavitation ist mit der Trockenheitsresistenz von Baumarten korreliert (Choat et al. 2012). Trotzdem ist ein akutes hydraulisches Versagen als Mortalitätsursache im vorliegenden Fall weniger wahrscheinlich, da offenbar das Klima eines längeren Zeitraums entscheidend ist. Neben den direkten Trockenheitswirkungen muss aber auch die Erhöhung der Parasitenanfälligkeit durch 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 und Seifert 1999) oder Trockenheit kann die Bäume anfälliger machen (Rouault et al. 2006). Bei vielen Pilzkrankheiten gilt Ähnliches. So werden z.B. 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. Bei ausgewachsenen Waldbäumen ist dieser sekundäre Trockenheitseffekt wahrscheinlich bedeutender als ein primäres akutes „Verdursten“. Bei den Fichten kann dies direkt beurteilt werden, da der Borkenkäferbefall getrennt aufgenommen wurde. Der entsprechende Anteil an der Gesamtmortalität beträgt im Mittel der Jahre 1987-2013 87%. Auch bei den Buchen ist ein durch Trockenheit erhöhter Parasitenbefall sicher mitbeteiligt. Darauf deutet die bereits mehrere Jahre vor dem Absterben und damit chronisch erhöhte Kronenverlichtung hin, wie sie auch von Dobbertin und Brang (2001) bei verschiedenen Baumarten beobachtet wurde. Direkt sichtbare Indizien sind Schleimflussflecken, die auf eine Infektion mit dem Pilz *Nectria coccinea* oder durch Hallimasch (*Armillaria mellea*) zurückgeführt werden können.

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 mit dieser Resistenz gegenüber Parasitenbefall sowie mit der wichtigen Rolle von Kalium in der Regulation des Wasserhaushalts (Marschner 1995) erklären. Die Kaliumkonzentration in den Fichtennadeln war mit der Stickstoffdeposition negativ korreliert (Braun und Flückiger 2013). Im nichtlinearen Modell zeigten sowohl die Kaliumkonzentration als auch die Stickstoffdeposition eine Interaktion mit der Trockenheit: bei Kaliummangel und bei erhöhter Stickstoffdeposition ist die Trockenheitswirkung deutlich verstärkt. Diese Stickstoffwirkung könnte eine Erklärung dafür sein, der Borkenkäferbefall der Fichten nach dem Trockenjahr 1947 deutlich geringer ausfiel als nach dem – nicht ganz so starken – Trockenjahr 2003, wie dies Zingg und Bürgi (2008) erwähnen. 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).

Die geprüften Trockenheitsgradienten erstrecken sich von den trockensten Buchenstandorten der Nordwestschweiz bis zu den feuchten Alpenstandorten und decken damit den heute in der Schweiz möglichen Bereich ab. Die Eichenstandorte in der Romandie und im Wallis sind noch trockener. Dass die Buche dort fehlt, vor allem im Wallis, gibt die Möglichkeit, in einer Fortsetzung des Projekts Trockenheitsindikatoren für die Grenzen des Buchenvorkommens zu charakterisieren. Ähnliches gilt für die Fichte, die in der Nordwestschweiz an ihre Trockenheitsgrenze stösst.

Vegetationseinheiten werden in Ökogrammen in einer Feuchteachse und einer Säure-Basen-Achse angeordnet (Stocker et al. 2002, Frehner et al. 2005). Eine Beziehung zwischen der Feuchteachse und Trockenheitsindikatoren, so wie sie zwischen Säure-Basen-Achse und der Basensättigung gefunden wurde (Braun et al. 2015) wäre deshalb zu erwarten gewesen. Offenbar gilt dies nur sehr beschränkt, und nur am trockenen Ende der Skala. Dies ist auch der Grund, weshalb die Anordnung der Vegetationseinheiten entlang eines Gradienten des Evapotranspirationsverhältnisses oder der Wasserbilanz zwischen dem trockenen und dem feuchten Ende nicht wirklich differenziert. Diese Frage wurde im Rahmen eines weiteren Projektes unter „Wald und Klima“ vertieft angeschaut (Frehner et al. 2016). Wichtige Prädiktoren waren neben der Vernässung des Bodens auch die Topographie, die Trockenheit der Luft (Dampfdrucksättigungsdefizit) und, eher untergeordnet, Trockenheitsindikatoren wie Ta/Tp oder Niederschlag.

Die Anwendung der hergeleiteten quantitativen Beziehungen auf Klimamodelle prognostiziert für die Periode 2045-2074 und das Modell CLM Wachstumsreduktionen bei den Buchen in einzelnen Flächen um bis zu 33% und bei den Fichten um bis zu 28%. Das liegt in der Grössenordnung der Auswirkungen des Hitzesommers 2003, gilt aber für den Mittelwert von 30 Jahren. Die geringere Wachstumsreduktion bei den Fichten wird durch eine Wachstumssteigerung durch infolge steigender Temperaturen erklärt, die die trockenheitsbedingte Wachstumsreduktion teilweise aufhebt. Bei der Buche konnte keine Beziehung zwischen Temperatur und Wachstum gefunden werden, was darauf hinweist, dass die Buche bei uns eher trockenheitslimitiert ist. Allerdings sind die Auswirkungen der Trockenheit auf die Mortalität bei der Fichte deutlich grösser als bei der Buche. Die maximalen Schätzungen (trockenstes Einzeljahr, trockenster Standort) belaufen sich auf 0.33% pro Jahr für Buche und 17.7% für Fichte. Aber auch die erhöhte Mortalität kompensiert nicht für die geringere Zuwachsreduktion bei der Fichte, wie Berechnungen des kumulierten Zuwachses zeigen. Für die Zeitperiode 2075-2099 werden Wachstumsreduktion für die Buchen von bis zu 45% und von Fichten bis zu 36% geschätzt. Die Schätzungen für die Mortalität ändern sich gegenüber der Periode 2045-2074 dagegen nicht.

7 Literatur

- Amtmann, A., Troufflard, S. und Armengaud, P. (2008). The effect of potassium nutrition on pest and disease resistance in plants. *Physiologia Plantarum* 133, 682-691.
- Basler, D. und Körner, C. (2012). Photoperiod sensitivity of bud burst in 14 temperate forest tree species. *Agricultural and Forest Meteorology* 165, 73-81.
- Bates, D., Maechler, M., Bolker, B. und 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>
- Benzler, J. H., Finner, H., Müller, W., Roeschmann, G., Will, K. H. und Wittmann, O. (1982). *Bodenkundliche Kartieranleitung*. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 331 S.
- BFS (2004). *Waldmischungsgrad der Schweiz. Datensatz mit Auflösung 100m (WMG100)*. Bundesamt für Statistik, Sektion Geoinformation. <http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index/dienstleistungen/geostat/datenbeschreibung/waldmischungsgrad.html>, Neuchâtel
- Blodgett, J. T., Kruger, E. L. und Stanosz, G. R. (1997). Effects of moderate water stress on disease development by *Sphaeropsis sapinea* on red pine. *Phytopathology* 87, 422-434.
- Braun, S., Schindler, C., Volz, R. und Flückiger, W. (2003). Forest damage by the storm "Lothar" in permanent observation plots in Switzerland: the significance of soil acidification and nitrogen deposition. *Water Air and Soil Pollution* 142, 327-340.
- Braun, S. und Flückiger, W. (2013). *Wie geht es unserem Wald? Bericht 4*. Institut für Angewandte Pflanzenbiologie, Schönenbuch
- Braun, S., Schindler, C. und 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. *Environmental Pollution* 192, 129-138.
- Braun, S., Belyazid, S., Burger, T., Stocker, R., Kurz, D., Remund, J. und Rihm, B. (2015). *Erfassung und Behandlung gefährdeter Waldstandorte. Bericht 2006-2014*. 1-168. Schönenbuch, Institut für Angewandte Pflanzenbiologie.
- Brodribb, T. J. und Cochard, H. (2009). Hydraulic Failure Defines the Recovery and Point of Death in Water-Stressed Conifers. *Plant Physiology* 149, 575-584.
- Choat, B., Jansen, S., Brodribb, T. J., Cochard, H., Delzon, S., Bhaskar, R., Bucci, S. J., Feild, T. S., Gleason, S. M., Hacke, U. G., Jacobsen, A. L., Lens, F., Maherali, H., Martinez-Vilalta, J., Mayr, S., Mencuccini, M., Mitchell, P. J., Nardini, A., Pittermann, J., Pratt, R. B., Sperry, J. S., Westoby, M., Wright, I. J. und Zanne, A. E. (2012). Global convergence in the vulnerability of forests to drought. *Nature* 491, 752-755.
- Ciais, P., Reichstein, M., Viovy, N., Granier, A., Ogee, J., Allard, V., Aubinet, M., Buchmann, N., Bernhofer, C., Carrara, A., Chevallier, F., De Noblet, N., Friend, A. D., Friedlingstein, P., Grunwald, T., Heinesch, B., Kerönen, P., Knohl, A., Krinner, G., Loustau, D., Manca, G., Matteucci, G., Miglietta, F., Ourcival, J. M., Papale, D., Pilegaard, K., Rambal, S., Seufert, G., Soussana, J. F., Sanz, M. J., Schulze, E. D., Vesala, T. und Valentini, R. (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 Physiology* 11, 73-83.
- Defila, C. und Clot, B. (2005). Phytophenological trends in the Swiss Alps, 1951-2002. *Meteorologische Zeitschrift* 14, 191-196.
- Desprez-Loustau, M.-L., Marçais, B., Nageleisen, L.-M., Piou, D. und Vannini, A. (2006). Interactive effects of drought and pathogens in forest trees. *Ann.For.Sci.* 63, 597-612.
- Dobbertin, M. und Brang, P. (2001). Crown defoliation improves tree mortality models. *Forest Ecology and Management* 141, 271-284.
- Dobbertin, M. (2005). Tree growth as indicator of tree vitality and of tree reaction to environmental stress: a review. *European Journal of Forest Research* 124, 319-333.
- Doorenbos, J. und Kassam, A. H. (1979). *Yield response to water*. FAO Irrigation and Drainage paper 33, Rome, Italy, FAO.
- Emberson, L. D., Ashmore, M. R., Cambridge, H. M., Simpson, D. und Tuovinen, J.-P. (2000). Modelling stomatal ozone flux across Europe. *Environmental Pollution* 109, 403-414.
- Fatichi, S., Leuzinger, S. und Körner, C. (2014). Moving beyond photosynthesis: from carbon source to sink-driven vegetation modeling. *New Phytologist* 201, 1086-1095.
- Fleck, S., Wagner, M. und Meesenburg, H. (2010). *Witterung und Klima. Waldzustandsbericht 2010*, S. 19-21. Niedersächsisches Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft, Verbraucherschutz und Landesentwicklung, Göttingen.

- FOEN (2015). 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. in prep., Bern, Federal Office for the Environment.
- Frehner, M., Wasser, B. und Schwitter, R. (2005). Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald. Wegleitung für Pflegemassnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion. 1-564. Bern, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft. Vollzug Umwelt.
- Frehner, M., Scherler, M. und Braun, S. (2016). Adaptierte Ökogramme, Schlussbericht des Teilprojekts C: Quantifizierung der Lage von Standortstypen im Ökogramm. Sargans. Forschungsprogramm Wald und Klimawandel.
- Fuhrer, J. und Jasper, K. (2009). Bewässerungsbedürftigkeit von Acker- und Grasland im heutigen Klima. *AGRARForschung* 16, 396-401.
- Granier, A., Loustau, D. und Bréda, N. (2000). A generic model of forest canopy conductance dependent on climate, soil water availability and leaf area index. *Annales des Sciences forestières* 57, 755-765.
- Grier, C. G. und Running, S. W. (1977). Leaf Area of Mature Northwestern Coniferous Forests: Relation to Site Water Balance. *Ecology* 58, 893-899.
- Grigoryan, G. V., Casper, M. C., Gauer, J., Vasconcelos, A. C. und Reiter, P. P. (2010). Impact of climate change on water balance of forest sites in Rhineland-Palatinate, Germany. *Advances in Geosciences* 27, 37-43.
- Guillaumin, J. J., Bernard, C., Delatour, C. und Belgrand, M. (1985). Root Pathology of *Quercus-Robur* I Dieback in the Tronçais Forest (of Central France). *Annales des Sciences Forestières* 42, 1-22.
- Hewitt, C. D. und Griggs, D. J. (2004). Ensembles-based predictions of climate changes and their impacts. *Eos* 86, 566.
- Jung, T. (2009). Beech decline in Central Europe driven by the interaction between *Phytophthora* infections and climatic extremes. *Forest Pathology* 39, 73-94.
- Keuler, K., Lautenschlager, M., Wunram, C., Keup-Thiel, E., Schubert, M., Will, A., Rockel, B. und Boehm, U. (2009). Climate simulation with CLM, Scenario A1B run no 2, Data Stream 2: European region MPI-M/MaD. World Data Center for Climate (WDCC)
- Klap, J. M., Reinds, G. J., Bleeker, A. und de Vries, W. (2000). Environmental stress in German forests: Assessment of critical deposition levels and their exceedances and meteorological stress for crown condition monitoring sites in Germany. *Alterra Rapport 134*, Wageningen, Alterra.
- Kramer, K. (1994). Selecting a Model to Predict the Onset of Growth of *Fagus sylvatica*. *Journal of Applied Ecology* 31, 172-181.
- Leuzinger, S., Zotz, G., Asshoff, R. und Körner, C. (2005). Responses of deciduous forest trees to severe drought in Central Europe. *Tree Physiology* 25, 641-650.
- Marschner, H. (1995). Mineral Nutrition of Higher Plants. Academic Press, London, 889 S.
- McDowell, N., Pockman, W. T., Allen, C. D., Breshears, D. D., Cobb, N., Kolb, T., Plaut, J., Sperry, J., West, A., Williams, D. G. und Yezzer, E. A. (2008). Mechanisms of plant survival and mortality during drought: why do some plants survive while others succumb to drought? *New Phytologist* 178, 719-739.
- Meier, F., Forster, B. und Engesser, R. (2014). Borkenkäfer - Buchdrucker-Befall hat zugenommen. *Waldschutz aktuell* 2014
- Menzel, A., Sparks, T. H., Estrella, N., Koch, E., Aasa, A., Ahas, R., Alm-Kübler, K., Bissolli, P., Braskavská, O., Briede, A. und et al. (2006). European phenological response to climate change matches the warming pattern. *Global Change Biology* 12, 1269-1976.
- Mills, G., Wagg, S. und Harmens, H. (2013). Ozone Pollution: Impacts on ecosystem services and biodiversity. Report prepared by the ICP Vegetation. Centre for Ecology and Hydrology, Bangor UK
- Nakagawa, S. und Schielzeth, H. (2013). A general and simple method for obtaining R² from generalized linear mixed-effects models. *Methods in Ecology and Evolution* 42, 133-142.
- O'Grady, A. P., Mitchell, P. J. M., Pinkard, E. A. und Tissue, D. T. (2013). Thirsty roots and hungry leaves: unravelling the roles of carbon and water dynamics in tree mortality. *New Phytologist* 200, 294-297.
- OcCC (2008). Das Klima ändert - was nun? Der neue UN-Klimabericht (IPCC 2007) und die wichtigsten Ergebnisse aus Sicht der Schweiz. *Organe consultatif sur les changements climatiques*, Bern, 47 S., ISBN 978-3-907630-33-4
- Penman, H. L. (1948). Natural evaporation from open water, bare soils and grass. *Proc.Royal Meteorological Society London* 193 (A), 120-145.
- Penman, H. L. (1956). Estimating evaporation. *Trans.Amer.Geophys.Union.* 37, 1.
- Pinheiro, J., Bates, D., DebRoy, S., Sarkar, D. und the R Development Core Team (2013). nlme: Linear and nonlinear mixed effects models. R package version 3.1-108.
- Pinheiro, J. C. und Bates, D. M. (2000). *Mixed-Effects Models in S and S-PLUS*. Statistics and Computing, New York, Springer-Verlag.

- R Core Team (2013). R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, ISBN 3-900051-07-0
- Remund, J. (2011). Standortstypenspezifische Trockenstressrisiken in Schweizer Wäldern. Zwischenbericht über ein BAFU-Projekt im Rahmen von Wald und Klima.
- Remund, J., Frehner, M., Walthert, L., Kägi, M. und Rihm, B. (2011). Schätzung standortspezifischer Trockenstressrisiken in Schweizer Wäldern. Schlussbericht. Meteotest, Bern
- Remund, J., Rihm, B. und Huguenin-Landl, B. (2014). Klimadaten für die Waldmodellierung für das 20. und 21. Jahrhundert im Forschungsprogramm Wald und Klimawandel. Schlussbericht des Projektes. Meteotest, Bern, 38 S.
- Richards, L. A. (1931). Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics* 1, 318-333.
- Romanenko, V. A. (1961). Computation of the autumn soil moisture using a universal relationship for a large area. Kiev.
- Rouault, G., Candau, J.-N., Lieutier, F., Nageleisen, L.-M., Martin, J.-C. und Warzée, N. (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.
- Schulla, J. (2013). Model Description WaSIM (Water balance Simulation Model). http://www.wasim.ch/de/products/wasim_description.htm, Zurich
- Seidling, W., Ziche, D. und Beck, W. (2012). Climate responses and interrelations of stem increment and crown transparency in Norway spruce, Scots pine, and common beech. *Forest Ecology and Management* 284, 196-204.
- Shuttleworth, J. (1993). Evaporation. In: Maidment, D. R. (ed.) , *Handbook of Hydrology*, S. 4.1-4.53. McGraw-Hill, New York, USA.
- Shuttleworth, J. (2007). Putting the vap' into evaporation. <http://www.hydrol-earth-syst-sci.net/11/210/2007/hess-11-210-2007.pdf>.
- Spellmann, H., Suttmöller, J. und Meesenburg, H. (2007). Risikovorsorge im Zeichen des Klimawandels. *AFZ-Der Wald* 62, 1246-1249.
- Stocker, R., Burger, T., Elsener, O., Liechti, T., Portmann-Orlowski, K. und Zantop, S. (2002). Die Waldstandorte des Kantons Aargau. Finanzdepartement des Kantons Aargau, Abteilung Wald, Wohlen
- UNECE (2003). Forest Condition in Europe. Results of the 2002 Large-Scale Survey, Technical Report. Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution, International Cooperative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests, Brussels, Geneva
- van Leeuwen, E. P., Hendriks, K. C., Klap, J. M., De Vries, W., de Jong, E. und Erisman, J. W. (2000). Effects of environmental stress on forest crown condition in Europe. Part II: Estimation of stress induced by meteorology and air pollutants. *Water Air and Soil Pollution* 119, 335-362.
- Walinga, I., van der Lee, J. J., Houba, V. J., van Vark, W. und Novozamsky, I. (1995). Plant analysis manual. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht
- Wermelinger, B. und Seifert, M. (1998). Analysis of the temperature dependent development of the spruce bark beetle *Ips typographus* (L.) (Col., Scolytidae). *Journal of Applied Entomology* 122, 185-191.
- Wermelinger, B. und Seifert, M. (1999). Temperature-dependent reproduction of the spruce bark beetle *Ips typographus*, and analysis of the potential population growth. *Ecological Entomology* 24, 103-110.
- Würth, M. K. R., Peláez-Riedl, S., Wright, S. J. und Körner, C. (2005). Non-structural carbohydrate pools in a tropical forest. *Oecologia* 143, 11-24.
- Zingg, A. und Bürgi, A. (2008). Trockenperioden seit 1900 und Waldwachstum: eine Analyse langfristiger Datenreihen | Drought periods since 1900 and growth of forest stands: an analysis of long-term data series. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* 159, 352-361.