

Reihe KLIMOPASS-Berichte

Projektnr.: 4500511252/23

Kann über Bodenschutzkalkungen die Trockenheitstoleranz von Fichte und Buche verbessert werden?

von Jörg Kunz, Martin Kohler und Jürgen Bauhus

Finanziert mit Mitteln des Ministeriums für Umwelt, Klima und
Energiewirtschaft Baden-Württemberg (UM)

November 2018

KLIMOPASS

– Klimawandel und modellhafte Anpassung in Baden-Württemberg



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

HERAUSGEBER	LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg Postfach 100163, 76231 Karlsruhe
KONTAKT KLIMOPASS	Dr. Kai Höpker, Dr. Ellinor von der Forst Referat Medienübergreifende Umweltbeobachtung, Klimawandel; E-Mail: klimopass@lubw.bwl.de
FINANZIERUNG	Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg - Programm Klimawandel und modellhafte Anpassung in Baden-Württemberg (KLI- MOPASS)
BEARBEITUNG UND VERANTWORTLICH FÜR DEN INHALT	Jörg Kunz, Martin Kohler, Jürgen Bausch. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Fakultät für Umwelt und Natürliche Ressourcen, Institut für Forstwissenschaften, Professur für Waldbau. Tennenbacher Straße 4, 79106 Freiburg.
BEZUG	http://www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/91063/ ID Umweltbeobachtung U82-W03-N22
STAND	30. November 2018, Internetausgabe 2019

Verantwortlich für den Inhalt sind die Autorinnen und Autoren. Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die in den Beiträgen geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

Nachdruck für kommerzielle Zwecke - auch auszugsweise - ist nur mit Zustimmung der LUBW unter Quellenangabe und Überlassung von Belegexemplaren gestattet.

ABBILDUNGSVERZEICHNIS	4
TABELLENVERZEICHNIS	5
ZUSAMMENFASSUNG	6
1 HINTERGRUND UND ZIELSTELLUNG	7
2 MATERIAL UND METHODEN	10
2.1 Versuchsflächen	10
2.2 Auswahl der Probebäume	12
2.3 Probenaufbereitung	13
2.4 Identifikation von Trockenjahren	13
2.5 Berechnung LLoret-Indizes	14
2.6 Konkurrenzsituation von Fichte und Buche	15
2.7 Datenanalyse	17
3 ERGEBNISSE	19
3.1 Fichte im Reinbestand	19
3.2 Buche und Fichte in Mischung	25
4 DISKUSSION	29
4.1 Wirkungen der Kalkung auf die Resistenz von Fichten und Buchen bei Trockenheit	29
4.2 Wirkungen der Kalkung auf Erholung und Resilienz von Fichten und Buchen nach Trockenheit	31
4.3 Einfluss der Dosierung und Anzahl der Kalkungen, sowie die Dauer des Zeitraums zwischen Kalkung und Trockenjahr	32
4.4 Verändert Kalkung die Trockenheitstoleranz der Fichte stärker als die der Buche?	32
5 SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK	33
6 LITERATURVERZEICHNIS	34
7 ANHANG	41

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Übersicht der Flächen des Praxisdüngerversuchs der FVA Baden-Württemberg.	10
Abbildung 2:	Schematische Darstellung zur Auswahl von Konkurrenten im Waldbestand.	16
Abbildung 3:	Mittlere Radialzuwächse seit dem Jahr 1950 für gekalkte und unbehandelte Fichten.	19
Abbildung 4:	Modellierte Resistenz des Radialwachstums der Fichten in moderaten und starken Trockenjahren.	22
Abbildung 5:	Modellierte Resilienz des Radialwachstums der Fichten nach moderaten und starken Trockenjahren.	24
Abbildung 6:	Darstellung der Konkurrenzsituation nach Baumarten getrennt auf der Fläche des Praxisdüngerversuchs in Bad Waldsee.	25
Abbildung 7:	Boxplots der Resistenz, Erholung (Recovery) und Resilienz der Buchen- und Fichtenpaare in den Trockenheitskategorien moderat, stark und extrem für die Fläche des Praxisdüngerversuchs in Bad Waldsee.	27
Abbildung 8:	Boxplots der Resistenz, Erholung (Recovery) und Resilienz von Fichten aus Reinbestandsituationen und Fichten mit Buchenumgebung in den Trockenheitskategorien moderat, stark und extrem für die Fläche des Praxisdüngerversuchs in Bad Waldsee.	28
Abbildung 9:	Anzahl an Feinwurzeln im Mineralboden der untersuchten Standorte.	30

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Mittelwerte des pH-Werts und der Basensättigung in verschiedenen Bodentiefen für gekalkte und unbehandelte Untersuchungsbestände.	11
Tabelle 2:	Übersichtsinformationen zu den wichtigsten Standortfaktoren auf Flächen des Praxisdüngerversuchs.	11
Tabelle 3:	Anzahl der beprobten Fichten auf den Flächen des Praxisdüngerversuchs.	12
Tabelle 4:	Anzahl der paarweise beprobten Buchen- und Fichten auf den Flächen des Praxisdüngerversuchs.	12
Tabelle 5:	Mittels SPI3-JJA identifizierte Trockenjahre für die untersuchten Standorte absteigend sortiert nach der Intensität der Trockenheit.	14
Tabelle 6:	Ergebnisse der linearen „Generalized-Least-Squares-Modelle“ für die Resistenz des Radialzuwachses für Fichten.	21
Tabelle 7:	Ergebnisse der linearen „Generalized-Least-Squares-Modelle“ für die Erholung (Recovery) des Radialzuwachses für Fichten.	22
Tabelle 8:	Ergebnisse der linearen „Generalized-Least-Squares-Modelle“ für die Resilienz des Radialzuwachses für Fichten.	23

Zusammenfassung

Seit den 1980er Jahren werden in Deutschland in zahlreichen Bundesländern Bodenschutzkalkungen durchgeführt. Dabei ist das primäre Ziel, eine weitere Abnahme der Bodenqualität über die Pufferung der aktuellen Säureeinträge zu stoppen. Diese Maßnahmen können zu einem verbesserten Nährstoffangebot, zu einer Abnahme der Humusaufgaben und höheren Humusgehalten im Mineralboden sowie einer Vertiefung der Durchwurzelung führen. Eine verbesserte Nährstoffversorgung der Bäume und bessere Durchwurzelung der Böden könnte möglicherweise auch die Trockenstresstoleranz von Wäldern erhöhen. Daher wurde die standortdifferenzierte Bodenschutzkalkung auch als eine Maßnahme zur Anpassung der Wälder an den Klimawandel in der „Strategie zur Anpassung an den Klimawandel in Baden-Württemberg“ empfohlen.

Inwieweit die Ausbringung von Kalk bzw. Dolomit tatsächlich zu einer Erhöhung der Trockenstresstoleranz von Bäumen führt, wurde bisher allerdings kaum untersucht. Hierzu wurden in Kooperation mit der FVA Baden-Württemberg die Auswirkungen wiederholter Kalkungen auf die Trockenheitstoleranz von Fichten im Reinbestand auf insgesamt sechs, sowie von Buchen und Fichten in Mischungen auf zwei Standorten analysiert. Die Untersuchungen des Trockenstresses der Bäume konzentrierten sich dabei auf die Zuwachsreaktionen während und in Folge von moderaten bis extremen Trockenjahren. Dabei wurde eine retrospektive Analyse der Radialzuwachsreaktionen von vorherrschenden Fichten und Buchen in den letzten 30 Jahren durchgeführt. Mit linearen „Generalized-Least-Squares-Modellen“ und linearen „Mixed-Effect-Modellen“ wurden die kurz- und langfristigen Effekte der Kalkung auf Resistenz und Resilienz des Radialzuwachses von Fichten und Buchen in und nach Trockenjahren analysiert.

Grundsätzlich konnte keine signifikante Veränderung der Resistenz des Radialzuwachses der Fichten und Buchen durch Kalkung in Trockenjahren festgestellt werden. Es ist daher ein wichtiger Befund, dass die Bodenschutzkalkungen nicht zu einer Erhöhung des Trockenstresses bei Fichten und Buchen geführt haben, wie dies in der Vergangenheit postuliert wurde. Die Erholung (Recovery) sowie die Resilienz der Zuwächse der Fichten aus Reinbestandssituationen waren nach stärkeren Trockenjahren auf den gekalkten Flächen signifikant besser. Der Kalkungseffekt war dabei sowohl für die Erholung (+8 %) als auch für die Resilienz (+ 6 %) vergleichsweise gering. Im Gegensatz dazu konnte dieser positive Effekt der Kalkung nicht für Fichten in Mischung mit Buchen nachgewiesen werden. Da sich die an den einzelnen Standorten identifizierten Trockenheiten überwiegend auf den Zeitraum bis 2003 konzentrierten, erlauben die Ergebnisse der vorliegenden Studie nur Aussagen zu den mittelfristigen Auswirkungen der Kalkungen auf die Trockenheitstoleranz der untersuchten Baumarten. Die beobachtete Erhöhung der Resilienz des Radialzuwachses ist aber ein Indiz für das Potential der Bodenschutzkalkung zur langfristigen Verbesserung der Trockenstresstoleranz von Fichtenbeständen. Eine Wiederholung dieser Studie in zehn bis fünfzehn Jahren wird empfohlen, da dann auch langfristige Auswirkungen der Kalkung analysiert werden könnten.

1 Hintergrund und Zielstellung

Vor dem Hintergrund des globalen Klimawandels werden für große Teile Mitteleuropas gleichermaßen steigende Temperaturen als auch abnehmende Sommerniederschläge erwartet (IPCC 2013). Auch in Baden-Württemberg wird mit häufigeren und intensiveren Dürreereignissen gerechnet (KLIWA 2016). Dies zeigt sich sowohl in einem langfristigen Anstieg der Lufttemperaturen (Mayer et al. 2005), als auch in immer häufiger auftretenden, ausgeprägt heißen und trockenen Sommern wie beispielsweise in den Jahren 2003, 2015 oder 2018 (DWD 2016, LUBW 2019). Insbesondere außergewöhnlich warme und trockene Witterungsbedingungen, vor allem in sogenannten Hitzesommern, führen zu einer Vielzahl an negativen Auswirkungen auf Waldökosysteme (Ciais et al. 2005, Bréda et al. 2006) und könnten bereits eine Andeutung auf das zukünftige Klima in Europa sein (Beniston 2004, Schär et al. 2004). Einige der forstwirtschaftlich wichtigsten europäischen Baumarten zeigen bereits heute eine ausgeprägte Empfindlichkeit gegenüber Trockenheiten. Während die geringe Trockenheitstoleranz der Fichte (*Picea abies* [L.] H. KARST.) als gesichert gilt (Hanewinkel et al. 2013, Pretzsch et al. 2013, Zang et al. 2014), wird die Anfälligkeit von Kiefer (*Pinus sylvestris* L.) und Buche (*Fagus sylvatica* L.) gegenüber Wassermangel kontrovers diskutiert (Rennenberg et al. 2004, Ammer et al. 2005, Eilmann et al. 2006, Bouriaud und Popa 2009, Cavin et al. 2013). Starke Trockenheitsereignisse können zu tiefgreifenden Veränderungen in der Struktur und Zusammensetzung von Waldbeständen führen (Fonti et al. 2006, Choat et al. 2012, Wang et al. 2012) und die Konkurrenzverhältnisse innerhalb von Baumarten verändern (Bittner et al. 2010). Ebenso können ausgeprägte Trockenheiten negative Auswirkungen auf die Biodiversität (Saxe et al. 2001, Archaux und Wolters 2006), die Stabilität (Ives und Carpenter 2007, Lloret et al. 2012), die Sequestrierung von Kohlenstoff (Adams et al., 2009) und die langfristige ökonomische Bewertung (Hanewinkel et al., 2013) von Wäldern haben.

Eine der größten Herausforderungen der heutigen Forstwirtschaft ist die voraussichtliche Abnahme an derzeit kommerziell bedeutsamen Baumarten (Hanewinkel et al. 2013). Daher ist eine Anpassung der Waldbestände an extreme Trockenstresssituationen eine vordringliche Aufgabe des Waldbaus. Eine solche Anpassung kann durch das Einbringen trockenheitstoleranterer Baumarten (Vitali et al. 2017, Kunz et al. 2018), die Begründung bzw. Förderung von Mischbeständen (Lindner 2000, Bolte et al. 2009, Pretzsch et al. 2017), sowie durch waldbauliche Pflegeeingriffe zur Förderung der Vitalität und Stabilität von Einzelbäumen und Beständen erfolgen (Kohler et al. 2010, Sohn et al. 2012). Eine Förderung der Vitalität von Waldbeständen ist auch über Kalkungen möglich. Bodenschutzkalkungen im Wald werden in Deutschland seit den 1980er Jahren in zahlreichen Bundesländern durchgeführt. Dabei werden in der Regel magnesiumhaltige Karbonatgesteinsmehle (z.B. Dolomit) ausgebracht. Ein Hauptziel der Bodenschutzkalkung ist die Pufferung der aktuellen Säureeinträge, um dadurch ein weiteres Fortschreiten der anthropogen verursachten Bodenversauerung zu verhindern sowie dem Verlust an Bodenqualität entgegenzusteuern (Ulrich 1986, Huettl 1989, von Wilpert 2014). Weitere Ziele der Kalkung im Wald sind die Erhöhung der bodenbiologischen Aktivität und der damit verbundenen Aggregatneubildung und Porenraumstehung, die verbesserte biologische Einarbeitung organischer Substanz in den Mineralboden, die Erhöhung der Basensättigung im Hauptwurzelraum und die Stabilisierung der Kohlenstoffspeicherung im Boden sowie langfristig die Vertiefung des durch Feinwurzeln erreichbaren Wurzelraumes (von Wilpert et al. 2013). Dadurch bietet das Projekt enge Anknüpfungspunkte an die Anpassungsstrategie des Landes Baden-Württemberg, da darin im Handlungsfeld „Wald und Forstwirtschaft“ die standortdifferenzierte Bodenschutzkalkung explizit als Maßnahme zur bodenchemischen Stabilisierung unnatürlich stark versauernder Standorte angeführt wird (UM 2015).

Letztendlich könnte die Kalkung auch zu einer Erhöhung der Trockenstresstoleranz von Bäumen führen. Hierbei dürften vor allem langfristige Wirkungen der Kalkung eine Rolle spielen, wie beispielsweise die Anreicherung organischer Substanz im Mineralboden und insbesondere die Vertiefung des durch Feinwurzeln erreichbaren Wurzelraumes. Über die Kalkung wird in der Regel auch eine bessere Versorgung der Bäume mit basischen Nährelementkationen, vor allem von Magnesium oder Kalium, erreicht. Kalium kommt dabei eine besonders wichtige Rolle zu, da diese Nährelement neben Calcium einerseits den Schluss der Spaltöffnungen von Blättern bzw. Nadeln bei Trockenstress steuert (De Silva et al. 1985; Humble und Raschke 1971) und andererseits auf vielen Waldstandorten durch selektive Verarmung der Aggregatoberflächen im Boden nur eingeschränkt verfügbar ist (Hildebrand 1990). Grundsätzlich ist daher davon auszugehen, dass gut ernährte Bäume eine höhere Stresstoleranz gegenüber Umwelteinflüssen, wie beispielsweise Trockenheit, aufweisen als Bäume mit einer Mangelernährung.

Insbesondere hinsichtlich der langfristigen Auswirkungen von Bodenschutzkalkungen auf die Trockenheitstoleranz von Bäumen gibt es nur wenige wissenschaftlich belastbare Forschungsergebnisse. Bisherige Untersuchungen fokussierten sich zumeist auf die Baumart Fichte und die kurz- bis mittelfristigen Auswirkungen der Kalkung auf die Analyse bodenchemischer und –physikalischer Parameter sowie die Waldernährung (z.B. Ulrich 1986, Huettl 1989, Kreutzer 1995, Schaaf und Hüttl 2006, Ponette et al. 1997), wohingegen die explizite Wirkung der Kalk- oder Dolomitzugabe auf das Baumwachstum weniger gut erforscht ist. In einem Düngungsexperiment an Fichten im Nordschwarzwald beobachtete Spiecker (1991) eine langsam beginnende, jedoch über mehr als 25 Jahre anhaltende Zuwachssteigerung bei einer einmaligen Gabe von zwei Tonnen Kalk pro Hektar. Innerhalb dieser Studie wurden auch das Baumwachstum beeinflussende Wettereffekte diskutiert, jedoch ohne die Resistenz im – und Resilienz nach Trockenjahren ausdrücklich zu berücksichtigen. Bei einmalig mit $2,5 \text{ t ha}^{-1}$ gekalkten Fichtenbeständen fanden van der Perre et al. (2012) eine zweiphasige Wuchsreaktion. Dabei wurde zunächst innerhalb der ersten, achtjährigen Phase eine stark positive Wachstumsreaktion beobachtet (über 54 % erhöhter Zuwachs), die jedoch anschließend deutlich nachließ. In der zweiten Phase (mehr als acht Jahre nach Kalkung) erhöhte sich die interannuelle Variabilität des kalkbezogenen Wachstumsüberschusses eindeutig, was teilweise mit der Variation der Wetterkonditionen in Einzeljahren in Einklang gebracht werden konnte. Der Anstieg dieser „Wettersensitivität“ des Radialzuwachses der Fichte nach Kalkung wurde sowohl durch das für die Baumart typische flache Wurzelsystem, als auch durch den limitierten „Tiefeneffekt“ einer einmalig durchgeführten Gabe von Kalk erklärt (van der Perre et al. 2012). In Übereinstimmung zu diesen Ergebnissen wurden in weiteren Untersuchungen (z.B. Kreutzer 1995, Helmisaari und Hallbäcken 1999) sogar eine weitere Verflachung des Wurzelsystems der Fichte nach Kalkung beobachtet, was letztlich sogar zu einem erhöhten Risiko gegenüber Trockenstress führen könnte. Gleichwohl konnte Schäffer (2006) selbst nach einer 50 Jahre zurückliegenden, einmaligen Kalkung eine tiefere und homogenere Wurzelpenetration sowie erhöhte Feinwurzeldichten im Mineralboden bei Fichten feststellen. Allerdings war die Dosierung der Kalkung bei diesem Experiment mit 10 t ha^{-1} extrem hoch. Durch die im Vergleich zur praktizierten forstlichen Kalkung lag die Dosierung in diesem Experiment etwa dreifach höher, wodurch eine generelle Verbesserung der Eindringtiefe von Feinwurzeln daher nicht direkt abgeleitet werden kann.

Im Vergleich zur Fichte ist der allgemeine Wissensstand zur Wirkung von Kalkung auf die Trockenheitstoleranz der Buche noch weniger belastbar. Nach zweimaliger Ausbringung von jeweils 6 t Hüttenkalk pro Hektar in einem Versuch im Sauerland konnte eine Erhöhung des Feinwurzelaufbaus der Buche im Oberboden festgestellt werden (Asche 1999). Dieser Effekt führte jedoch nicht zu einem insgesamt tiefer in den Boden reichenden Wurzelsystem. Der Einsatz von Kalkdüngern erhöhte die Konzentrationen der Nährelemente Calcium, Magnesium, Kalium und Mangan in Mykorrhizen (*Lactarius subdulcis*) im Boden bereits nach der

einmaligen Gabe von 757 kg ha⁻¹ Calciumcarbonat (CaCO₃) und 380 kg ha⁻¹ Magnesiumcarbonat (MgCO₃) signifikant, wodurch auch die Nährstoffaufnahme der Bäume verbessert werden konnte. Ebenso führte die einmalige Ausbringung von 3 t ha⁻¹ Dolomit in Kombination mit einer zusätzlichen Düngung mit 800 kg ha⁻¹ Phosphorit und 350 kg ha⁻¹ Kaliumsulfat (K₂SO₄) zu einer Erhöhung der Calciumgehalte in den Blättern, sowie einer Reduktion des vorzeitigen Blattabwurfs bei Buchen (Jonard et al. 2010).

Anhand der bisher vorliegenden Publikationen lässt sich klar erkennen, dass noch erheblicher Forschungsbedarf bei der vertiefenden Analyse der Auswirkungen der Kalkung auf das Wachstum von Bäumen in Trockenjahren besteht. Vor allem die konkrete Frage, inwieweit nach wiederholter Ausbringung von Kalk bzw. Dolomit tatsächlich eine Erhöhung der Trockenstresstoleranz von Wäldern erreicht werden kann, wurde bisher nicht untersucht.

Daher sollen innerhalb des Projekts für die jeweils wichtigste Nadel- und Laubbaumart, Fichte und Buche, folgende Forschungsfragen beantwortet werden:

- Ist die Resistenz, also die Reaktion des Radialzuwachses im Trockenjahr, bei vorherrschenden Fichten und Buchen in den gekalkten Beständen größer als in den unbehandelten Beständen?
- Ist die Resilienz, also die Erholung des Radialwachstums in den Jahren nach der Trockenheit, bei vorherrschenden Fichten und Buchen in den gekalkten Beständen höher als in den unbehandelten Beständen?
- Werden Resistenz und Resilienz der beiden Baumarten durch Dosierung und Anzahl der Kalkungen, sowie die Dauer des Zeitraums zwischen Kalkung und Trockenjahr beeinflusst?
- Ist bei der Fichte durch Kalkung eine stärkere Veränderung der Trockenheitstoleranz zu erwarten als bei der tiefer wurzelnden Buche?

2 Material und Methoden

2.1 VERSUCHSFLÄCHEN

Die Zuwachsanalysen werden auf Flächen der Praxisdüngerversuche (PDV) der Forstlichen Forschungs- und Versuchsanstalt (FVA) Baden- Württemberg durchgeführt. Auf diesen Versuchsflächen wurden in den Jahren 1983 - 1985 erstmals Praxiskalkungen (3 t ha^{-1} Dolomit) durchgeführt, die 2003 (mit 6 t ha^{-1} Dolomit) und teilweise 2015 (mit 4 t ha^{-1} Dolomit und Holzasche) wiederholt wurden.

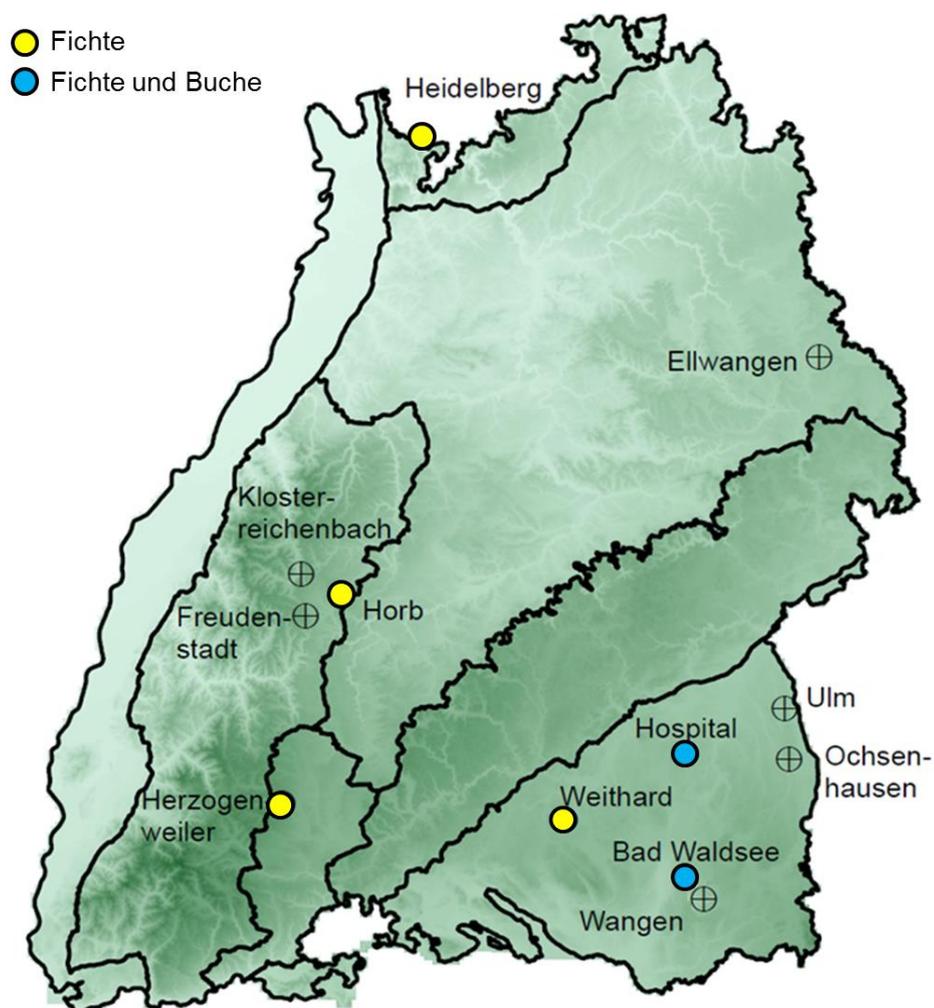


Abbildung 1: Übersicht der Flächen des Praxisdüngerversuchs der FVA Baden-Württemberg. An gelb markierten Standorten wurden Fichten, an blau markierten Standorten Fichten und Buchen paarweise beprobt.

Diese Flächen liegen im Schwarzwald, Odenwald und im Südwestdeutschen Alpenvorland (Abb. 1) auf einer breiten Standortpalette von armen bis zu reicheren, im Wurzelraum aber stark versauerten Böden (Tab. 1). Die Flächen sind hinsichtlich der verwendeten Kalkformulierung und Dosierung gut dokumentiert. Alle Versuchsflächen weisen standörtlich wie waldbaulich sehr gut vergleichbare, nicht gekalkte Kontrollflächen auf.

Tabelle 1: Mittelwerte des pH-Werts und der Basensättigung (BS) in verschiedenen Bodentiefen für gekalkte (Kalk) und unbehandelte (Kon; Abkürzung für Kontrolle) Untersuchungsbestände auf den PDV-Flächen. FVA unveröffentlicht.

Standort Behandlung	Bad Waldsee		Heidelberg		Herzogenweiler		Horb		Hospital		Weithard	
	Kalk	Kon	Kalk	Kon	Kalk	Kon	Kalk	Kon	Kalk	Kon	Kalk	Kon
pH (KCl) 0-20 cm	3.8	3.4	3.8	3.0	3.7	3.4	3.7	3.4	3.6	3.4	3.7	3.5
pH (KCl) 21-60 cm	4.1	3.9	4.0	4.1	3.9	3.9	3.8	3.7	3.7	3.7	3.8	4.0
BS [%] 0-20 cm	33.0	9.0	82.0	8.0	30.0	4.0	41.0	20.0	29.0	8.0	37.0	8.0
BS [%] 21-60 cm	10.0	6.0	26.0	5.0	9.0	4.0	8.0	13.0	14.0	18.0	14.0	7.0

Des Weiteren liegen für diese Flächen periodisch erhobene Bodenkennwerte, Nadelspiegelwerte, sowie teilweise auch Daten zur Feinwurzelverteilung vor. Für die vorliegende Untersuchung wurden insgesamt 6 Standorte aus dem Praxisdüngerversuch der FVA Baden-Württemberg ausgewählt. Die berücksichtigten Standorte bilden einen breiten Gradienten unterschiedlicher Standortsqualitäten und somit vermutlich auch des Risikos für Trockenstress ab (Tab. 2). Es wurden ausschließlich einschichtige Bestände mit vergleichbaren Durchforstungsregimen, Kronenschlussgraden und Altersstufen ausgewählt.

Tabelle 2: Übersichtsinformationen zu den wichtigsten Standortfaktoren auf den PDV-Flächen. Angegeben sind mittlere Jahresdurchschnittstemperatur und mittlere jährliche Niederschlagssummen für die Jahre 1971 bis 2013. Nebenbaumarten sind abgekürzt als *F. sylv.* (*Fagus sylvatica* L.), *L. dec.* (*Larix decidua* MILL.; Europäische Lärche) und *A. alba* (*Abies alba* MILL.; Weißtanne).

	Bad Waldsee	Heidelberg	Herzogenweiler	Horb	Hospital	Weithard
Breitengrad [°]	47°50'	49°30'	48°01'	48°28'	48°07'	47°58'
Längengrad [°]	9°41'	8°47'	8°20'	8°32'	9°41'	9°17'
Temperatur [° C]	8.7	9.4	6.8	8.4	8.2	7.9
Niederschlag [mm]	970	1130	1190	1160	840	630
Höhe [m ü. NN]	580	490	950	630	650	630
Wuchsbezirk	Alpenvorland	Odenwald	Baar-Wutach	Schwarzwald	Alpenvorland	Alpenvorland
Hauptbaumart	<i>P. abies</i>	<i>P. abies</i>	<i>P. abies</i>	<i>P. abies</i>	<i>P. abies</i>	<i>P. abies</i>
Nebenbaumarten	<i>F. sylv.</i> , <i>L. dec.</i>		<i>A. alba</i>	<i>A. alba</i>	<i>F. sylv.</i> , <i>L. dec.</i>	
Dominierender Bodentyp (untergeordnet)	Cambisol	Podsol	Cambisol (Stagnosol, Luvisol)	Cambisol (Stagnosol, Luvisol)	Stagnosol (Luvisol)	Stagnosol (Cambisol, Luvisol)
Ausgangsmaterial	Gletschermoräne (Würm)	Sandstein (mittlerer Buntsandstein)	Sandstein (oberer Buntsandstein)	Sandstein (oberer Buntsandstein)	Gletschermoräne (Riss)	Gletschermoräne (Würm)
Bodentexturklasse	Lehm	Sandiger Lehm	Lehm	Toniger Lehm	Schluffiger Lehm	Lehm
Humusform	Mull-Moder Mull	Mull	Mull-Moder Mull	Mull	Mull-Moder Moder	Mull-Moder Moder

2.2 AUSWAHL DER PROBEBÄUME

Auf allen PDV-Flächen ist die Fichte die dominierende Baumart. Buchen kommen nur auf ausgewählten Versuchsflächen in Einzelmischung vor. Daher wurden bei der Auswahl der Probebäume unterschiedliche Ansätze gewählt. Während bei der Fichte aufgrund ihrer Häufigkeit in den untersuchten Beständen eine Auswahl der Zielbäume über die gesamte Fläche hinweg mit einer großen Anzahl an Wiederholungen durchgeführt werden konnte, wurden Buchen in Paaren gemeinsam mit der nächstgelegenen Fichte untersucht. Bei diesem Ansatz werden Zielbäume vergleichbarer sozialer Stellung ausgewählt und paarweise analysiert (Bigler und Buchmann 2003; Kane und Kolb 2010; Gaylord et al. 2015), wodurch sich mögliche Unterschiede oder Gemeinsamkeiten in der Zuwachsreaktion in und nach Trockenjahren vergleichend darstellen lassen. Aufgrund der geringen Buchenanteile war es nicht möglich, an allen Standorten geeignete Paare von Probebäumen ausfindig zu machen. Eine statistisch ausreichende Anzahl von Baumpaaren konnte nur an den Standorten Bad Waldsee und Hospital gefunden werden (Abb. 1).

Tabelle 3: Anzahl der beprobten Fichten auf den PDV-Flächen (reine Fichtensituationen).

PDV-Fläche	Bad Waldsee	Heidelberg	Herzogenweiler	Horb	Hospital	Weithard
N Kalkung	16	18	16	17	16	17
N Kontrolle	16	18	16	17	16	17
N Gesamt	32	36	32	34	32	34

Um Konkurrenzeffekte zu minimieren, wurden alle Bohrkerne ausschließlich an vorherrschenden und herrschenden (Kraft 1884) Einzelbäumen entnommen. In einer ersten Kampagne im Mai und Juni 2017 wurden je Standort und Behandlung jeweils 16 bis 18 Fichten beprobt (Tab. 3) und insgesamt 400 Bohrkerne entnommen (2 Bohrkerne pro Baum aus jeweils 2 Himmelsrichtungen). Im Oktober und November 2017 wurde eine zweite Geländekampagne durchgeführt, in der alle Buchen und Fichten für den paarweisen Vergleich ausgewählt und beprobt wurden. Dabei wurden pro Standort und Behandlung jeweils 12 Fichten- und Buchenpaare, also insgesamt 96 Bäume beprobt und insgesamt 192 Bohrkerne entnommen (Tab. 4). Die Anzahl der Wiederholungen für den paarweisen Vergleich fällt damit etwas geringer aus als in den reinen Fichtensituationen (Tab. 3), bewegt sich aber noch in einer für die Durchführung dendroökologischer Analysen üblichen Größenordnung (Cook et al. 1990).

Tabelle 4: Anzahl der paarweise beprobten Buchen- und Fichten auf den PDV-Flächen.

PDV-Fläche	Bad Waldsee		Hospital	
	Buche	Fichte	Buche	Fichte
N Kalkung	12	12	12	12
N Kontrolle	12	12	12	12
N Gesamt	24	24	24	24

Sowohl die Auswahl der Bestände als auch der beprobten Bäume erfolgte in enger Abstimmung mit unserem Kooperationspartner, der FVA Baden-Württemberg, um mögliche Synergien mit dem am 01. Mai 2017 gestarteten und durch den Waldklimafonds geförderten Projekt „*KalKo – Waldbodenkalkung als Maßnahme zur Erhöhung der Anpassungsfähigkeit der Wälder an den Klimawandel und zur Sicherung und Erhöhung der CO₂-Speicher und Senkenfunktion der Wälder*“ nutzen zu können. Bei verschiedenen Treffen mit den Partnern der FVA Baden-Württemberg wurden neben der Auswahl von Flächen und Bäumen auch vorhandene Daten ausgetauscht und gemeinsam genutzt wie beispielsweise Werte zur Bodenchemie und -physik, der Feinwurzelverteilung oder Witterungsdaten. Insbesondere bei der zukünftig geplanten, vertiefenden Analyse von Buchen in Reinbeständen außerhalb Baden-Württembergs ist eine weitere Zusammenarbeit geplant.

2.3 PROBENAUFBEREITUNG

Die Aufbereitung der Bohrkerne erfolgte im Labor der Professur für Waldbau und umfasste das Trocknen, Schleifen und Polieren der Bohrkerne. Anschließend wurden die jährlichen Radialzuwächse auf 1/100 mm genau auf einem Positioniertisch in Kombination mit einem Binokular vermessen (Messsystem LINTAB) und mit der Software TSAP-Win (Rinntech, Heidelberg) kreuzvalidiert (Schweiggruber 1983). Aus den Radialzuwächsen wurden jährliche Grundflächenzuwächse berechnet, da das Grundflächenwachstum in der Regel das jährliche Gesamtwachstum des Stammes am besten widerspiegelt (Cook et al. 1990). Zusätzlich wurden in den Zuwachsreihen vorhandene Alterstrends eliminiert und dimensionslose Zuwachsindizes hergeleitet (Fritts 1976).

2.4 IDENTIFIKATION VON TROCKENJAHREN

Zur Einschätzung der klimatischen Situation wurden von der FVA Freiburg Witterungsdaten für jeden einzelnen Probepunkt auf den PDV-Flächen bereitgestellt. Diese Daten decken den Zeitraum von 1961-2013 ab. Hierfür wurden Klimaparameter von Stationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) über ein Regionalisierungsverfahren für die einzelnen Flächen modelliert.

Die von der FVA bereitgestellten Temperatur- und Niederschlagsdaten wurden in verschiedenen zeitlichen Auflösungen aggregiert (zumeist zwischen 3 und 12 Monaten) und der meteorologische Trockenheitsindex SPI - Standardized Precipitation Index - berechnet (McKee et al. 1993). Für die Identifikation und Klassifizierung der Trockenjahre wurde der SPI für die Hauptvegetationszeit der drei Monate Juni, Juli und August verwendet (SPI3-JJA), weil insbesondere trockene Sommermonate als Verursacher von Zuwachseinbrüchen bei Fichte angenommen werden müssen (Zang et al. 2014). In Tabelle 5 sind die für die untersuchten Standorte identifizierten und nach ihrer Intensität klassifizierten Trockenjahre zusammengestellt.

Tabelle 5: Mittels SPI3-JJA (Juni bis August) identifizierte Trockenjahre für die untersuchten Standorte absteigend sortiert nach der Intensität der Trockenheit. SPI Klassifizierung in „moderate“ (hellgrau), „starke“ (mittelgrau) und „extreme“ (dunkelgrau) Trockenjahre erfolgte nach McKee et al. (1993).

Bad Waldsee		Heidelberg		Herzogenweiler		Horb		Hospital		Weithard	
Jahr	SPI-3	Jahr	SPI-3	Jahr	SPI-3	Jahr	SPI-3	Jahr	SPI-3	Jahr	SPI-3
2003	-2.35	1983	-2.85	1983	-2.30	1983	-2.74	1983	-2.71	1983	-3.48
1983	-2.27	1976	-2.36	1991	-1.73	2015	-2.13	1962	-2.45	2003	-1.70
1998	-1.92	2003	-1.91	1998	-1.73	1981	-1.75	1998	-1.92	1964	-1.68
1962	-1.85	1964	-1.66	1985	-1.71	1962	-1.65	2003	-1.62	2015	-1.37
2015	-1.64	1962	-1.58	1988	-1.43	1976	-1.58	1964	-1.57	1981	-1.35
1981	-1.38	1991	-0.98	1994	-1.22	2003	-1.55	2015	-1.21	1984	-1.22
2004	-1.35	2005	-0.97	1962	-1.20	1989	-1.49	2006	-1.06	1962	-1.11
2006	-1.18	1967	-0.94	1984	-1.14	1964	-1.44	1990	-0.95	1972	-1.02
1964	-0.97	1999	-0.86	1974	-1.12	1998	-0.87	2008	-0.86	2013	-1.02
2001	-0.84	1970	-0.71	2003	-1.12	1979	-0.85	1972	-0.84	1998	-1.01
1984	-0.76	2015	-0.62	2005	-1.01	1991	-0.80	2013	-0.83	2006	-0.99
2009	-0.74	2013	-0.61	2013	-0.97	1985	-0.73	1976	-0.80	1968	-0.75
1967	-0.71	1998	-0.52	1981	-0.91	1990	-0.64	1999	-0.77	1979	-0.71
1972	-0.55	1997	-0.51	1990	-0.89	1984	-0.62	1977	-0.65	1985	-0.60
				1995	-0.74	1974	-0.58	1974	-0.64	2004	-0.58
				1979	-0.56			1980	-0.61	1990	-0.57
				1976	-0.52					2009	-0.57
										1989	-0.55

Die Klassifikation der kalkulierten SPI-3 Werte in „moderate“ (SPI -1 bis -1,49), „starke“ (SPI -1,5 bis -1,99) und „extreme“ (SPI kleiner -2) Trockenjahre (McKee et al. 1993) hat den Vorteil, dass sich die verschiedenen Trockenheitsereignisse definieren und anhand ihrer Stärke einteilen lassen (Williams et al. 2013). Dadurch steigt die Vergleichbarkeit der einzelnen Trockenheitsereignisse und darüber hinaus ist eine Auswertung beispielsweise des Radialzuwachses von Bäumen in verschiedenen individuellen Trockenjahren zusammenfassend in den drei vorgestellten Klassen möglich. Auf diese Weise kann neben der einzelweisen Betrachtung von Trockenheitsereignissen eine übergeordnete Auswertung der erhobenen Daten erfolgen.

2.5 BERECHNUNG LLORET-INDIZES

Zur Analyse der Wachstumsreaktionen während und nach Trockenheiten wird das bereits in früheren KLIMOPASS-Projekten und anderen Studien (z.B. Sohn et al. 2016, Vitali et al. 2017, Kunz et al. 2018) erfolgreich eingesetzte Konzept für die Resistenz, Recovery (Erholung) und Resilienz nach Lloret et al. (2011) angewandt.

Die Resistenz (R_t) beschreibt dabei den direkten Einfluss der Trockenheit auf das Wachstum im Trockenjahr im Verhältnis zum Wachstum vor dem Trockenjahr. Dabei wird das Wachstum in einem Referenzzeitraum vor Trockenheit mit dem Radialzuwachs (bzw. Index) im Trockenjahr verglichen. Bei $R_t = 1$ ist eine vollständige Resistenz gegeben, je weiter R_t unter den Wert von 1,0 fällt, desto kleiner ist die Widerstandskraft der Zuwächse gegen witterungsbedingte Einbrüche. Die Recovery (R_c) beschreibt die Fähigkeit der Zuwächse, sich wieder von einem trockenheitsbedingten Einbruch zu erholen. Diese Erholung wird durch das Verhältnis des Wachstums in einem Referenzzeitraum nach und während der Trockenheit ausgedrückt. Eine $R_c = 1$ bedeutet, dass die Zuwächse nach dem Trockenjahr auf gleich niedrigem Niveau bleiben. Eine $R_c < 1$ bedeutet einen weiteren Rückgang der Zuwächse nach dem Trockenjahr. Je weiter die Recovery über 1,0 steigt, desto größer ist die Erholung von der Zuwachsdepression. Die Resilienz (R_s) gibt an, inwiefern der Zustand vor Einsetzen des Stresses nach dessen Abklingen wieder erreicht wurde. Sie errechnet sich aus dem Verhältnis des Wachstums in einem Referenzzeitraum nach der Trockenheit zu dem Wachstum in einem Referenzzeitraum vor der Trockenheit. Damit kann mit dieser Größe festgestellt werden, wie gut der Baum in der Lage ist, ein vor der Störung gemessenes Zuwachsniveau wieder zu erreichen. Im Vergleich der Aussagekraft von Erholung und Resilienz ist jedoch darauf zu achten, dass bei Trockenheitsereignissen oftmals die Reduktion der Erholung mit dem Zuwachs bei der Resistenz korrespondiert, da beide Werte reziprok kalkuliert werden. Daher wäre eine Betrachtung der Erholung (Recovery) nach Trockenheiten ohne die Einbeziehung der Resilienz überaus kritisch.

Zur Berechnung der Toleranz-Indizes können unterschiedlich lange Referenzzeiträume herangezogen werden. Für die bisher durchgeführten Analysen wurde ein häufig als Standardwert angesehener Referenzzeitraum von fünf Jahren gewählt. Durch diesen vergleichsweise langen Referenzzeitraum können natürlicherweise vorkommende Schwankungen im Radialzuwachs gut ausgeglichen und somit sehr robuste Referenzwerte berechnet werden, allerdings ist der gewählte Zeitraum zu lang um beispielsweise die Erholung und Resilienz nach dem Trockenjahr 2015 zu berechnen (Tab. 5).

Ein Beispiel für ein überregionales Weiserjahr zur Untersuchung der Zuwachsresistenz und -resilienz der Bäume ist das als "Jahrhundertereignis" (Beniston 2004; Fink et al. 2004; Ciais et al. 2005; Rebetez et al. 2006) bezeichnete Trockenjahr 2003. An allen ausgewerteten Standorten wurde das Jahr 2003 als Trockenjahr klassifiziert, jedoch trat es nur am Standort Horb als extremes Trockenjahr auf (Tab. 5). Dadurch ist die Verwendung als Weiserjahr für alle Standorte möglich, jedoch sollte bei einer vertiefenden Auswertung auf die Ausprägung der Trockenheit geachtet werden. Ähnlich verhält es sich mit dem regional ausgeprägten Trockenjahr 2015, das nur in Teilen von Baden-Württemberg ausgesprochen trocken war. Während in Horb 2015 eine extreme Trockenheit darstellt (SPI-3 -2,13), trat das Jahr 2015 in Herzogenweiler nicht als besonders niederschlagsarm in Erscheinung (Tab. 5).

2.6 KONKURRENZSITUATION VON FICHTE UND BUCHE

Da die Analysen der Buchen im Gegensatz zu der Untersuchung an Fichten nicht im Reinbestand bei annähernd identischen Konkurrenzbedingungen an allen Probestämmen, sondern in Mischungssituationen durchgeführt wurde, war es nötig die jeweilige Konkurrenzlage innerhalb der beprobten Fichten- und Buchenpaare zu verifizieren. Dadurch sollten soweit wie möglich die Wirkungen des Faktors Konkurrenz auf die Tro-

ckenheitstoleranz der untersuchten Bäume vor und nach Ereignisjahren nachvollziehbar werden und letztlich somit als zusätzliche erklärende, kontinuierliche Variable fungieren kann. Zunächst war es jedoch nötig eine klare Definition von Konkurrenten für die jeweiligen untersuchten Zentralbäume aufzustellen und vor Ort anzuwenden (McTague und Weiskittel 2016). Eine schematische Übersicht zur Auswahl von Konkurrenten zu den jeweiligen Zentralbäumen ist in Abbildung 2 dargestellt. Für eine klare Darstellung der situationsbedingten Konkurrenz im Bestand ist jedoch die Auswahl und Berechnung eines oder mehrerer passender Konkurrenzindizes nötig (Bachmann 1998).

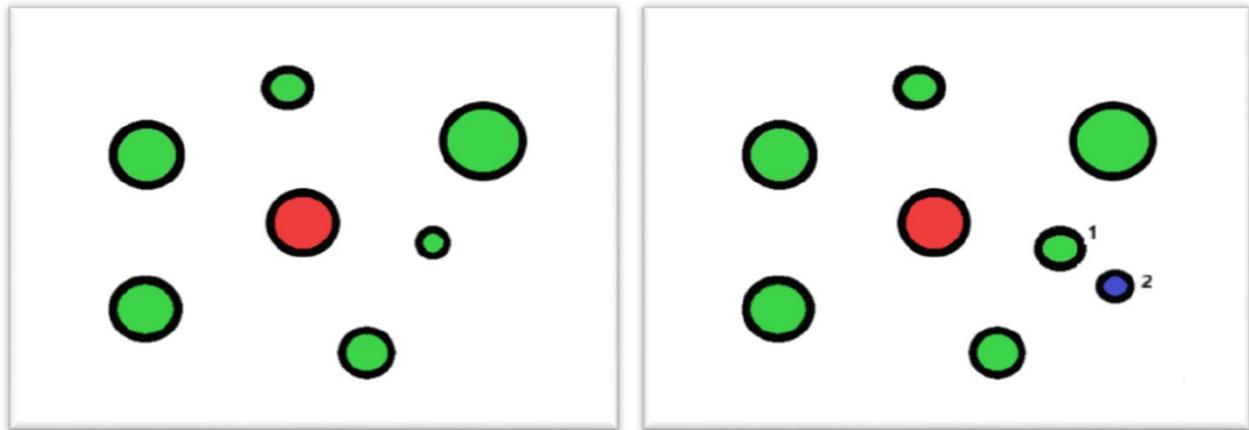


Abbildung 2: Schematische Darstellung zur Auswahl von Konkurrenten im Waldbestand. Der zu untersuchende Zentralbaum ist jeweils in Rot dargestellt. Auf der linken Seite sind alle in Grün dargestellten Bäume direkte Konkurrenten des Zentralbaums, wohingegen der auf der rechten Seite in Blau dargestellte Baum nicht mit dem Zentralbaum in Konkurrenz tritt und daher nicht in die weitere Analyse eingeschlossen wurde.

Daher wurden zunächst an allen untersuchten Buchen und Fichten sowie deren direkten Konkurrenten Einzelbaumvariablen wie Höhe und Brusthöhendurchmesser (BHD) erhoben, der Abstand zwischen Zentralbaum und Bedränger, sowie Höhe und Deckungsgrad der natürlichen Verjüngung in direkter Nachbarschaft der beprobten Bäume aufgenommen. Darüber hinaus wurden an allen in die Analysen eingeschlossenen Bäume auch die Höhe des Kronenansatzes sowie die Winkel zwischen Zentralbaum und Konkurrenten gemessen. Diese Daten sollten als Grundlage zur Kalkulation von drei unterschiedlichen Konkurrenzindizes verwendet werden, wodurch die jeweilige Konkurrenzsituation auf unterschiedlicher Datenbasis dargestellt, verglichen und bewertet wird.

Zunächst wurde ein sehr einfacher, einzig auf BHDs und Baumabständen basierender Index kalkuliert (Hegyi 1974). Dieser Hegyi-Index gilt trotz seiner einfachen Herleitung und Kalkulation als sehr robust und in vielerlei Situationen anwendbar (Bachmann 1998, Mürder 2005). Der dem Hegyi-Index sehr ähnliche, und auf aus den gemessenen BHDs hergeleiteten Grundflächen sowie den Abständen von Probestaum und Bedränger basierenden Konkurrenzindex nach Forrester et al. (2013) ist ein relativ einfaches, aber dennoch sehr robustes Maß zur Evaluation von inter- und intraspezifischen Konkurrenzsituationen (Huber et al. 2014, Del Rio et al. 2016). Ein weiter Index nutzt die jeweiligen Kronengrößen zur Herleitung der Konkurrenz (Pretzsch 1995) und benötigt zur Kalkulation zusätzlich den Öffnungswinkel des Zentralbaums in einer individuell bestimmten Baumhöhe sowie die Kronenquerschnittsflächen von Zentralbaum und Bedrängern. Die-

se deutlich modellhaftere Herleitung der Konkurrenzsituation scheint zunächst überaus komplex und etwas fern der realen Bedingungen, jedoch ließen sich mit diesem Pretzsch-Index in der Vergangenheit oftmals sehr gute Darstellungen der Konkurrenz berechnen (Neumann und Starlinger 2001). Als letzte numerische Darstellungsform der Konkurrenzbeziehungen um die Probebäume herum wurde noch die zuvor bereits für den Forrester-Index berechnete Grundfläche aller in die einzelnen Konkurrenzanalysen einbezogenen Bäume verwendet und auf die Fläche von einem Hektar bezogen. Diese individualisierte Form der Bestandesgrundfläche kann gleichermaßen als Beschreibung des Dichtstands von Bäumen, und somit der Konkurrenzsituation, herangezogen werden (Kramer und Akça 2008).

2.7 DATENANALYSE

Den Schwerpunkt der Datenauswertungen bildete die Erstellung von statistischen Modellen, die eine kausal-analytische Interpretation der Wachstumsreaktionen der Fichten aus den Reinbestandsituationen in und nach Trockenjahren ermöglichten. Dazu wurden lineare „Generalized-Least-Squares-Modelle“ und lineare „Mixed-Effect-Modelle“ eingesetzt, um den Einfluss von kategorialen Variablen (z.B. Behandlung, Standort) und kontinuierlichen Variablen (z.B. Bestandesalter zum Zeitpunkt des Trockenjahres, Standortsbonität (dGz100), Höhenlage, Zeitraum seit der ersten Kalkausbringung Δt) auf die Variabilität der Trockenheitstoleranz-Indizes (R) nach Lloret et. al (2011) zu analysieren. Darüber hinaus sollten ursprünglich auch der „Zeitraum in Jahren zwischen der letzten Kalkung und dem Trockenjahr“ und die „Gesamtdosis Kalk zum Zeitpunkt des Trockenjahres“ als Prädiktorvariablen überprüft werden. Da sich aber die Mehrzahl der an den einzelnen Standorten identifizierten Trockenjahre auf den Zeitraum bis zum Jahr 2003, also hauptsächlich auf die Jahre nach der ersten Kalkausbringung 1985 konzentrierte, war die Berücksichtigung der beiden letztgenannten Prädiktoren in den Modellen nicht möglich. Auch musste die ursprüngliche Absicht, den SPI als Prädiktorvariable zu berücksichtigen, verworfen werden, da dabei keine brauchbaren Modelle zur Erklärung der Zielvariablen etabliert werden konnten, was ein klarer Hinweis darauf ist, dass der Zusammenhang zwischen den Trockenheitstoleranz-Indizes nach Lloret und den SPI-Werten in einem linearen Modell nicht abgebildet werden kann. Daher wurden entsprechend der in Kap. 2.4 beschriebenen SPI-Klassifizierungen jeweils getrennte Modelle für die Jahre mit mäßiger, starker und extremer Trockenheit parametrisiert.

Die Analyse der Lloret'schen Kennwerte (R) kann somit über folgende Modellgleichung veranschaulicht werden:

$$R \sim \text{Beh} + \text{BA}_t + \text{dGz}_{100} + \text{HL} + \Delta t + (1|\text{Site})$$

- Beh Behandlung (gekalkt/ungekalkt)
- BA_t Bestandesalter zum Zeitpunkt des Trockenjahres
- dGz_{100} Standortbonität
- HL Höhenlage
- Δt Zeitraum in Jahren seit der ersten Kalkausbringung
- Site Standort

Der Term “1|Site” bezeichnete die Berücksichtigung eines „Random intercepts“ auf der Gruppierungsebene des Standorts bei Anwendung der linearen „Mixed-Effect-Modelle“.

In einem ersten Schritt wurden die linearen „Generalized-Least-Squares-Modelle“ mit der „Restricted-Maximum-Likelihood-Methode“ gefittet. Die Modellparametrisierung erfolgte, indem schrittweise alle verfügbaren kontinuierlichen und kategorialen Variablen berücksichtigt wurden. Nicht signifikante Variablen wurden wieder aus dem Model entfernt, wenn daraus einfachere Modelle mit günstigeren AIC-Werten resultierten. Über die oben angeführte Modellgleichung hinausgehend, wurden auch Interaktionen zwischen Variablen getestet, um dadurch, z.B. zwischen den Variablen Standort und Behandlung, auch mögliche standortspezifische Behandlungseffekte zu überprüfen.

Anschließend wurden dann für die jeweils besten Modelle aus dem ersten Schritt lineare „Mixed-Effect-Modelle“ gefittet, unter Berücksichtigung eines „Random intercept“ für die Variable Standort. Ob die Hinzunahme eines Random-Effekts auf Standortebene tatsächlich zu einer signifikanten Modellverbesserung führte, wurde schließlich über eine ANOVA der sich jeweils entsprechenden Modelle mit und ohne „Random intercept“ überprüft. Der Likelihood-ratio-Test („L-ratio“ im ANOVA-Output) fiel bei keinem einzigen Modellvergleich signifikant aus. Dies bedeutete, dass für alle modellierten Zielgrößen die Berücksichtigung eines „Random Effects“ auf der Ebene des Standorts zu keiner Modellverbesserung führte und daher ausschließlich die „einfacheren“, linearen „Generalized-Least-Squares-Modelle“ für die Ergebnisdarstellung verwendet wurden.

Die statistischen Auswertungen zu den Buchen-Fichten-Paaren erfolgte mit den Methoden der deskriptiven Statistik (Boxplots, nicht-parametrische Testverfahren wie. z.B. der Wilcoxon-Rangsummentest), da hier der geringere Stichprobenumfang eine ausreichende Parametrisierung mit den oben beschriebenen Modellen in den meisten Fällen unmöglich machte.

Alle Datenanalysen wurden mit R, Version 3.4.4 durchgeführt. Die linearen „Generalized-Least-Squares-Modelle“ wurden mit der „gls“ und die linearen „Mixed-Effect Modelle“ mit der „lme“-Funktion gefittet. Die Modellauswahl erfolgte mit Hilfe des „MuMIn“- Paketes auf Grundlage des AIC (Akaike information criterion). Für die Erstellung der Modellvisualisierungen wurde das „visreg“-Paket verwendet.

3 Ergebnisse

3.1 FICHTE IM REINBESTAND

Der zeitliche Verlauf der mittleren jährlichen Radialzuwächse ist für alle untersuchten Bestände in Abbildung 3 dargestellt. Insgesamt lag der mittlere Radialzuwachs für alle PDV-Flächen dauerhaft bei ungefähr 2 bis 3 mm pro Jahr. Ebenso konnte für die meisten Flächen kein positiver Effekt im Zuwachs für die seit Mitte der 1980er Jahre gekalkten Flächen festgestellt werden. Einzig in Herzogenweiler ließ sich ein Anstieg des Radialzuwachses infolge der Kalkung beobachten. Im Gegensatz dazu lag der mittlere Radialzuwachs der behandelten Fichten in Hospital meist unterhalb der nicht gekalkten Bäume, allerdings bestand dieser Unterschied auch bereits vor dem Beginn der Kalkungsmaßnahmen.

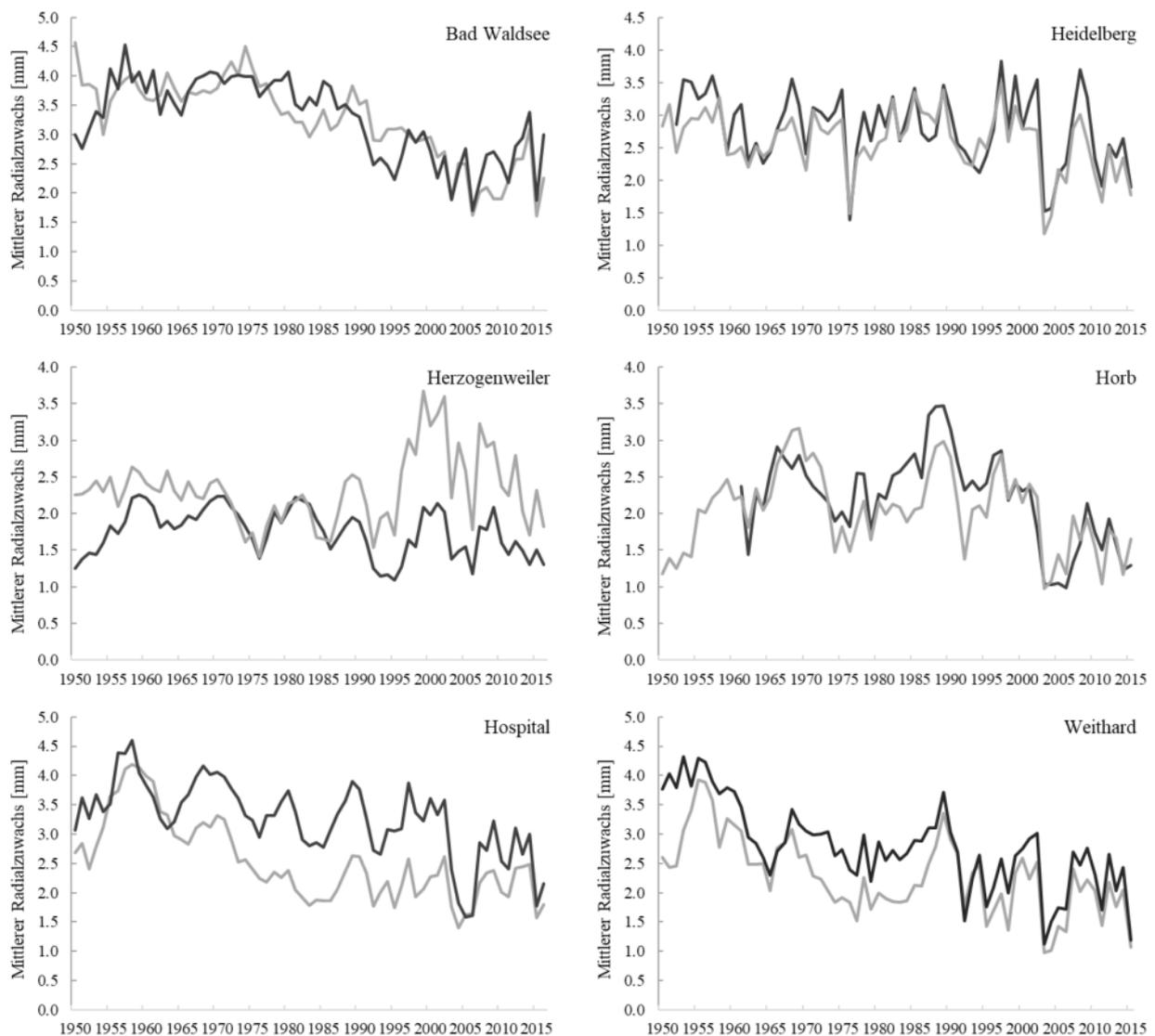


Abbildung 3: Mittlere Radialzuwächse seit dem Jahr 1950 für gekalkte (graue Linien) und unbehandelte (schwarze Linien) Fichten in den untersuchten Beständen.

In den meisten Fällen werden die wichtigsten Resultate dieses Projekts durch die Ergebnisse der in Kap. 2.7 vorgestellten Modelle dargestellt. Diese sind jedoch nicht immer einfach zu interpretieren. Da einige der verwendeten Abkürzungen sowie dargestellten Zahlenwerte nicht intuitiv nachvollziehbar sind, hier zunächst einige ergänzende Informationen zu den Ergebnissen der Modelle (Tab. 6, 7, 8): Die Auswahl und Reihenfolge der jeweils fünf in jeder Tabelle dargestellten Modelle hängt von deren Güte ab. Entsprechend werden die Modelle nach ihrer Qualität in absteigender Reihenfolge aufgeführt. Die Modellgüte wird maßgeblich durch das AIC (Akaike-Information-Criterion) und das gewichtete AIC (Errechnet aus AIC und Delta, der Maximalwert liegt bei 1) ausgedrückt. Dabei steigt die Güte eines Modells mit sinkendem AIC, wohingegen das gewichtete AIC höhere Werte zeigt. Ein anschauliches Beispiel hierfür ist das eindeutig beste Modell für die Resistenz von Fichten bei starken Trockenheiten mit einem AIC von -213 und einem gewichteten AIC von 0,97 (Tab. 6). Die in den Ergebnistabellen angegebenen Zahlenwerte zeigen die Steigung der Geraden des linearen Modells bei kontinuierlichen Prädiktoren an. Beispielhaft dargestellt für den signifikanten Prädiktor Höhenlage aus den Modellergebnissen für die Resistenz bei starken Trockenheiten ergibt sich ein Zahlenwert von 0,0005 (Tab. 6). Dieser Wert gibt an, dass pro Meter Höhenzunahme die modellierte Resistenz der Fichten um 0,0005 zunimmt, bei einem Höhenunterschied von 460 m zwischen den PDV-Flächen Heidelberg und Herzogenweiler (Tab. 2), steigt somit die modellierte Resistenz um 0,23 an.

Die Ergebnisse der Modelle zeigen deutlich, dass die Variable „Standort“ der insgesamt wichtigste Faktor war, um die Resistenz der Fichte in Trockenjahren auf den PDV-Flächen vorhersagen zu können (Tab. 6). „Standort“ ist hier jedoch nicht als zusammenfassende Bezeichnung für die Umweltbedingungen, die auf einen Organismus einwirken, zu sehen, sondern als eine faktorielle Einflussgröße wie beispielweise die Behandlung mit Kalk oder die Baumart aufzufassen. Bei einer einzelweisen Betrachtung der Modelle nach der Ausprägung der aufgetretenen Trockenheitsereignisse (moderat, stark und extrem) ließ sich für moderate Trockenheiten nur eine geringe Wuchsreduktion erkennen (die maximale Wuchsreduktion betrug auf der PDV-Fläche in Hospital 15 %), in Horb blieb ein Wuchseinbruch völlig aus. Insgesamt konnte für moderate Trockenheiten nur ein sehr geringer, positiver Effekt der Kalkung auf die Resistenz in Trockenjahren festgestellt werden.

Tabelle 6: Ergebnisse der linearen “Generalized-Least-Squares-Modelle“ für die Resistenz (Rt) des Radialzuwachses für Fichten. Nur die fünf besten Modelle wurden anhand der AIC-Werte für moderate, starke und extreme Trockenheiten aufgeführt. X indiziert signifikante faktorielle Prädiktoren, x kennzeichnet nicht signifikante faktorielle Prädiktoren, und fett unterlegte Zahlen benennen die Steigung eines signifikanten kontinuierlichen Prädiktors. In Modellen mit einem signifikanten Behandlungseffekt ist zur Veranschaulichung die prozentuale Interzept-Veränderung der Kontrolle (ungekalkt) im Vergleich zur Kalkung angeführt.

Prädiktor								
Trockenheit	Behandlung (Δ % ungekalkt)	Standort	dGZ ₁₀₀	Bestandesalter bei Trockenheit	Höhenlage	AIC	Delta	AIC gewichtet
Moderat		X				-318	0	0.66
	X (-3.3)	X		-0.0035		-316	2	0.30
	x	X				-312	6	0.03
				-0.0037		-279	39	0.00
	X(-3.5)			-0.0040		-277	41	0.00
Stark		X				-213	0	0.97
	x	X				-206	7	0.03
	x	X		-0.0017		-195	18	0.00
					0.0005	-122	91	0.00
	x				0.0005	-116	97	0.00
Extrem			-0.053			-46	0	0.39
		X				-45	1	0.28
	x	X		X		-45	1	0.21
	X (-9.1)	X				-43	3	0.09
	x			-0.050		-40	6	0.02

In Gegensatz dazu konnte in starken Trockenjahren kein Effekt der Kalkung auf die Resistenz der Fichten nachgewiesen werden. In Heidelberg, Horb und Weithard sank das Wachstum in starken Trockenjahren um bis zu 30 %, wohingegen in Bad Waldsee und Hospital nur geringe, in Herzogenweiler sogar keinerlei Wuchsreduktionen beobachtet wurden. Aufgrund der geringen Anzahl an extremen Trockenjahren nach Beginn der Kalkung konnten nur die Jahre 2003 und 2015 für die Bestände Horb und Bad Waldsee in die Analyse einfließen. In Horb konnten die höchsten Werte für die Resistenz der gekalkten Fichten ermittelt werden (+ 20 %), in Bad Waldsee war dieser Effekt nicht nachzuweisen.

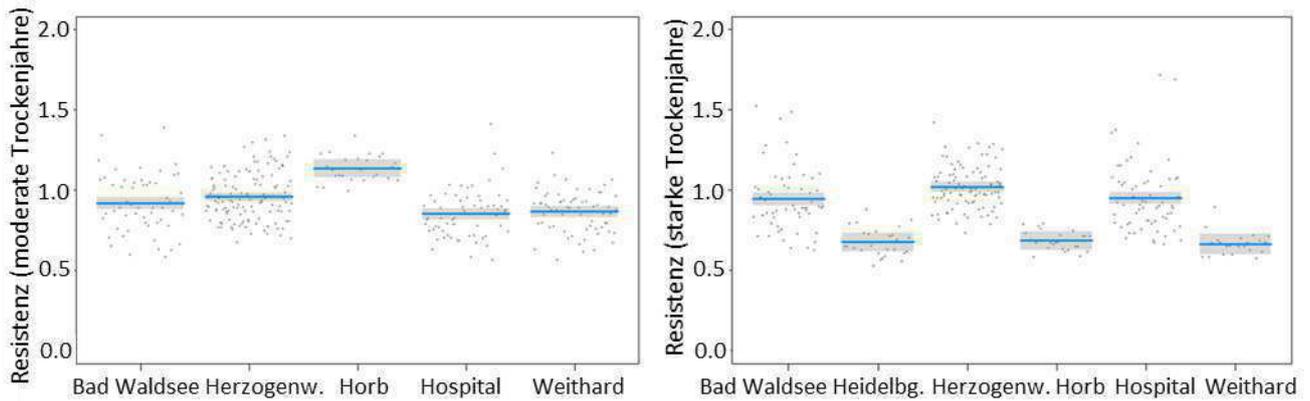


Abbildung 4: Modellierte Resistenz der Fichten in moderaten (links) und starken (rechts) Trockenjahren. Die blauen Linien stellen die modellierten Werte für die Resistenz (Rt) in Trockenjahren dar, die grauen Bänder indizieren die Konfidenzintervalle für die erwarteten Werte, die dunkelgrauen Punkte symbolisieren Residuen.

Die besondere Bedeutung des Standorts für die Resistenz der Fichten in Trockenjahren lässt sich auch klar in Abbildung 4 erkennen. Während bei moderaten Trockenheiten insbesondere der Standort Horb mit deutlich höheren Rt-Werten im Vergleich zu den verbleibenden PDV-Flächen heraussticht, neigen im Gegensatz dazu die Bestände in Heidelberg, Horb und Weithard in Jahren mit starken Trockenheiten zu eindeutig geringeren Werten für die Resistenz.

Tabelle 7: Ergebnisse der linearen „Generalized-Least-Squares-Modelle“ für die Erholung (Rc; Recovery) des Radialzuwachses für Fichten. Nur die fünf besten Modelle wurden anhand der AIC Werte für moderate, starke und extreme Trockenheiten aufgeführt. X indiziert signifikante faktorielle Prädiktoren, x kennzeichnet nicht signifikante faktorielle Prädiktoren, und fett unterlegte Zahlen benennen die Steigung eines signifikanten kontinuierlichen Prädiktors. In Modellen mit einem signifikanten Behandlungseffekt ist zur Veranschaulichung die prozentuale Interzept-Veränderung der Kontrolle (ungekalkt) im Vergleich zur Kalkung angeführt.

Prädiktor									
Trockenheit	Behandlung (Δ % ungekalkt)	Standort	dGZ ₁₀₀	Bestandesalter bei Trockenheit	Standort x Behandlung	Höhenlage	AIC	Delta	AIC gewichtet
Moderat		X					-99	0	0.98
	x	X					-91	7	0.02
	x	X		0.0011			-79	20	0.00
	x	X				X	-77	22	0.00
				0.014				-45	54
Stark		X					-161	0	0.99
		X					-152	9	0.01
	X (-8.1)	X		0.0007			-148	13	0.00
	x	X				X	-137	24	0.00
	X(-6.4)				-0.0003		-88	74	0.00

Für die Erholung (Tab. 7) sowie Resilienz (Tab. 8) der Fichten nach Trockenheitsereignissen konnten nur moderate und starke Trockenheiten in die Analyse aufgenommen werden, da nur zwei extreme Trockenjahre seit Beginn der Kalkung ermittelt werden konnten (2003 in Bad Waldsee und 2015 in Horb; Tab. 5), und aufgrund der fünfjährigen Referenzperiode für das extrem trockene Jahr 2015 weder Rc noch Rs berechnet werden können. Demnach würden unsere Aussagen einzig auf einem Ereignis (extreme Trockenheit 2003) und einem untersuchten Bestand (Bad Waldsee) basieren, was für eine Interpretation nach wissenschaftlichen Standards nicht haltbar wäre.

Tabelle 8: Ergebnisse der linearen „Generalized-Least-Squares-Modelle“ für die Resilienz (Rs) des Radialzuwachses für Fichten. Nur die fünf besten Modelle wurden anhand der AIC Werte für moderate, starke und extreme Trockenheiten aufgeführt. X indiziert signifikante faktorielle Prädiktoren, x kennzeichnet nicht signifikante faktorielle Prädiktoren, und fett unterlegte Zahlen benennen die Steigung eines signifikanten kontinuierlichen Prädiktors. In Modellen mit einem signifikanten Behandlungseffekt ist zur Veranschaulichung die prozentuale Interzept-Veränderung der Kontrolle (ungekalkt) im Vergleich zur Kalkung angeführt.

Prädiktor								
Trockenheit	Behandlung (Δ % ungekalkt)	Standort	dGZ ₁₀₀	Bestandesalter bei Trockenheit	Höhenlage	AIC	Delta	AIC gewichtet
Moderat	x		-0.0014			-192	0	0.75
						-188	3	0.13
				-0.0011		-186	5	0.06
		X				-186	5	0.05
	x		-0.0012			-181	11	0.00
Stark		X				-172	0	0.85
	X(-5.8)	X				-169	3	0.15
	x	X		0.0012		-156	16	0.00
					0.0004	-153	19	0.00
	X(-5.2)				0.0004	-149	24	0.00

Ebenso wie bei der Modellierung der Rt-Werte (Tab. 6), war auch für die Vorhersage der Erholung der Fichten nach moderaten wie starken Trockenheiten, der Standort der wichtigste Prädiktor (Tab. 7). Allerdings konnte für moderate Trockenheiten kein Effekt der Kalkung auf Rc der Fichten festgestellt werden. Ebenso korrespondiert bei moderaten Trockenheiten die Reduktion von Rc exakt mit dem zusätzlichen Wuchs bei Rt, ein Effekt der eine einzelweises Betrachtung der Erholung nach Stressereignissen ohne die Einbeziehung der Resilienz als kritisch erachten ließe (Kunz et al. 2018). Für starke Trockenheiten konnte mit den Modellen ein eindeutiger Behandlungs- und Standorteffekt zur Vorhersage der Erholung nachgewiesen werden. Insgesamt lagen die Rc-Werte der gekalkten Bäume etwa 8 % über denen des unbehandelten Kollektivs. Allerdings war die Variation der modellierten Rc innerhalb der einzelnen Bestände sehr hoch, bei deutlich geringerer Modellgüte im Vergleich zur Resistenz.

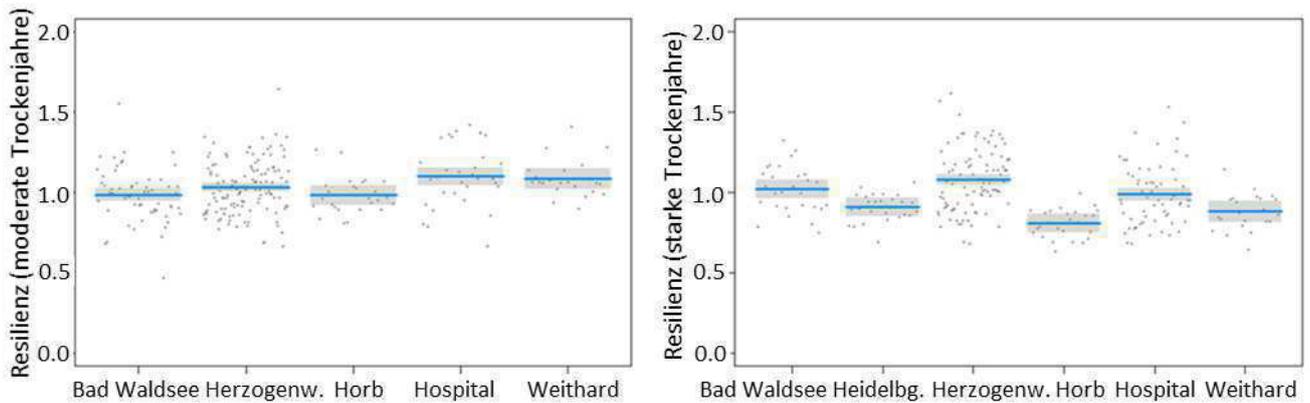


Abbildung 5: Modellierte Resilienz der Fichten nach moderaten (links) und starken (rechts) Trockenjahren. Die blauen Linien stellen die modellierten Werte für die Resilienz (R_s) nach Trockenjahren dar, die grauen Bänder indizieren die Konfidenzintervalle für die erwarteten Werte, die dunkelgrauen Punkte symbolisieren Residuen.

Wiederum konnte der Standort als der bedeutsamste Faktor auch für die Vorhersage der Resilienz der Fichten ausgemacht werden (Tab. 8). Für moderate Trockenheiten konnte kein Behandlungseffekt für R_s nachgewiesen werden. Im Gegensatz dazu konnte für starke Trockenheiten nachgewiesen werden, dass die Gabe von Kalk bzw. Dolomit einen positiven Effekt auf die Resilienz von Fichten hat. Demnach lagen die R_s -Werte gekalkter Fichten 6 % über den unbehandelten Individuen. Darüber hinaus konnte ähnlich wie bei der Erholung eine hohe standortsabhängige Variabilität der vorhergesagten Resilienz beobachtet werden (Abb. 5). Während die Fichten auf den PDV-Flächen in Bad Waldsee, Herzogenweiler und Hospital innerhalb von fünf Jahren nach den Trockenheitsereignissen ein mindestens gleichwertiges Wachstum wie vor den Trockenjahren erreichten (R_s -Werte ≥ 1), trat dies in den Beständen Horb ($R_s = 0,8$), Weithard ($R_s = 0,9$) und Heidelberg ($R_s = 0,9$) nicht ein. Interessanterweise zeigten die PDV-Flächen mit erhöhter Resistenz bei starken Trockenheiten (Bad Waldsee, Herzogenweiler, Hospital), auch eine erhöhte Resilienz.

3.2 BUCHE UND FICHTE IN MISCHUNG

Konkurrenzsituation der Fichten- Buchenpaare

Wie bereits in Abschnitt 2.6 dargelegt, ist für die Herleitung und Bewertung der Trockenheitstoleranz von Buchen und Fichten in Mischung eine Darstellung und Analyse der jeweiligen Konkurrenzsituation als mögliche erklärende Variable von großer Bedeutung. Eine vertiefende Untersuchung der angewandten Indizes konnte jedoch an beiden Standorten (Bad Waldsee und Hospital) keine statistisch signifikanten Unterschiede der Konkurrenz zwischen den analysierten Buchen und Fichten bei allen berücksichtigten Konkurrenzindizes aufzeigen (Abb. 6). Unterschiede in der Konkurrenzsituation können damit als mögliche Einflussvariable auf die Ausprägung der Radialzuwachsreaktion in und nach Trockenjahren bei den untersuchten Fichten-Buchenpaaren weitgehend ausgeschlossen werden.

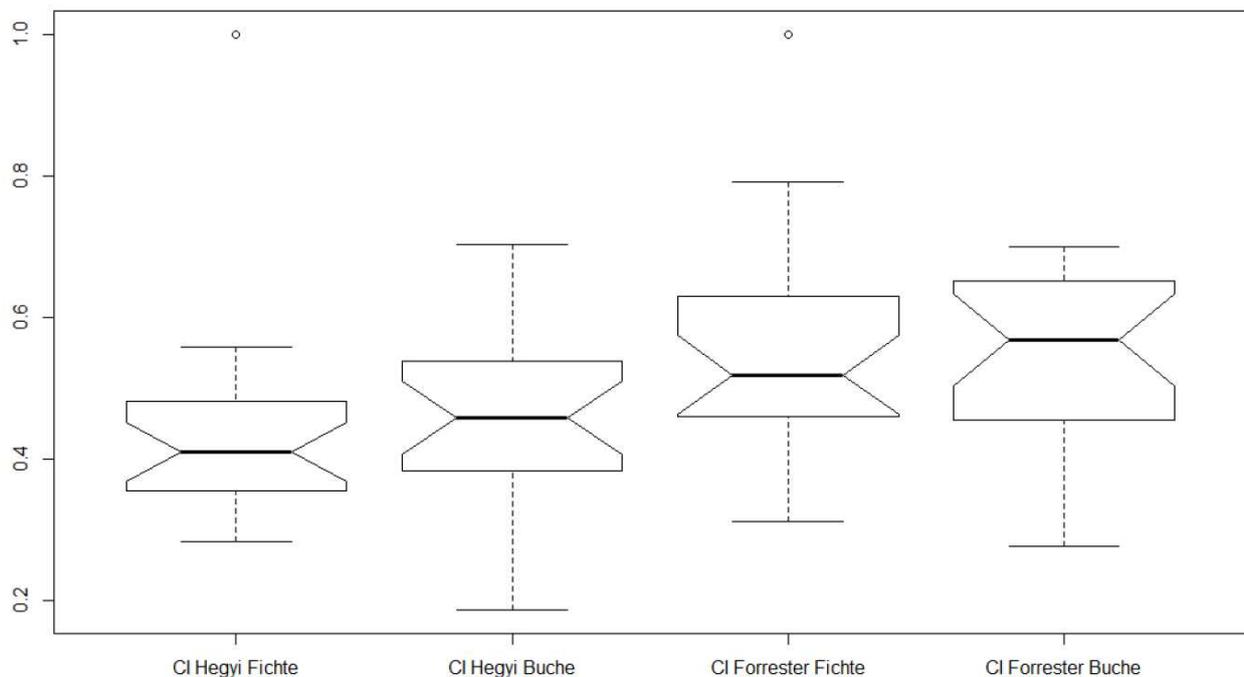


Abbildung 6: Darstellung der Konkurrenzsituation nach Baumarten getrennt auf der PDV-Fläche in Bad Waldsee mit Boxplots. Die Analyse der Konkurrenz bei Buchen und Fichten als jeweilige Zentralbäume wurde exemplarisch mit standardisierten Konkurrenzindizes (CI; Competition Index) nach Hegyi (1974) und Forrester et al. (2013) durchgeführt. Es konnten keine statistisch signifikanten Unterschiede ($p < 0,05$) zwischen den Baumarten und Konkurrenzindizes ermittelt werden.

Lloret-Indizes der Fichten-Buchenpaare

Die Analyse der Indizes nach Lloret et al. (2011) belegte signifikante Unterschiede zwischen gleich behandelten Buchen und Fichten sowohl für die Resistenz im, als auch die Erholung und Resilienz nach Trockenjahren am Standort Bad Waldsee (Abb. 7). Hier zeigten die Buchen auch bei extremer Trockenheit (Trockenjahr 2003) keinerlei Zuwachseinbrüche (Resistenz-Index = 1,0), während die benachbarten Fichten eine massive Abnahme des Radialzuwachs um ca. 50 % erlitten. Signifikante Unterschiede in der Resistenz aufgrund von Kalkung konnten weder auf der Ebene der beiden Baumarten noch der Trockenheitskategorien festgestellt werden. Nach den hohen Zuwachseinbrüchen der Fichte in Jahren extremer Trockenheit zeigte diese im Vergleich zur Buche signifikant höhere Recovery-Werte, was allerdings dadurch relativiert wird, dass das Radialwachstum der Buchen nicht nur im Trockenjahr selbst, sondern auch in den Jahren nach der Trockenheit nahezu im „Normalbereich“ (Index 0,8 bis 1,0) verlief. Am Standort Bad Waldsee konnten auch bei der Erholung und Resilienz kein signifikanter Einfluss der Kalkung beobachtet werden.

Im Gegensatz zu Bad Waldsee konnten am Standort Hospital keinerlei Unterschiede in der Trockenheitstoleranz der beiden Baumarten – unabhängig von Behandlung und Kategorie der Trockenheit – gefunden werden (ohne Abbildung). Dieses Ergebnis belegt die wiederholt festgestellte, deutliche Abhängigkeit der Trockenheitsreaktion der untersuchten Bäume vom jeweiligen Standort.

Lloret-Indizes von Fichten aus Reinbestandsituationen und Fichten mit Buchenumgebung

An den Standorten Bad Waldsee und Hospital war es möglich, die Lloret-Indizes für Fichten aus Reinbestandsituationen und Fichten mit Buchenumgebung gegenüberzustellen. Durch den Vergleich dieser beiden Kollektive können Aussagen darüber getroffen werden, inwieweit die Beimischung von einzelnen Buchen im Zusammenspiel mit der Kalkung das Radialwachstum der Fichte in und nach Trockenjahren beeinflusst.

Auch bei diesem Vergleich konnten nur am Standort Bad Waldsee (Abb. 8) statistische Unterschiede gefunden werden. Hier zeigten die Fichten aus Reinbestandsituationen bei extremer Trockenheit geringere Zuwachseinbrüche und damit eine höhere Resistenz als Fichten mit direkter Buchenumgebung. Allerdings war dieser Unterschied nur für die beiden Kollektive auf der gekalkten Fläche statistisch signifikant. Beim direkten Vergleich der jeweiligen Mischungssituation zwischen „ungekalkt“ und „gekalkt“ konnten dagegen keine signifikanten Unterschiede der Resistenz in extremen Trockenjahren festgestellt werden. Nach den hohen Zuwachseinbrüchen der Fichten in Buchenumgebung in Jahren extremer Trockenheit zeigte dieses Kollektiv im Vergleich zu den Reinbestandsfichten auf der gekalkten Fläche signifikant höhere Recovery-Werte. Diese bessere Erholung der Fichten in Buchenumgebung auf der gekalkten Fläche war auch signifikant höher als die Erholung des entsprechenden Kollektivs auf der ungekalkten Fläche. Für die Resilienz der beiden Kollektive konnten dagegen keinerlei Unterschiede unabhängig von Behandlung und Trockenheitskategorie gefunden werden (Abb. 8).

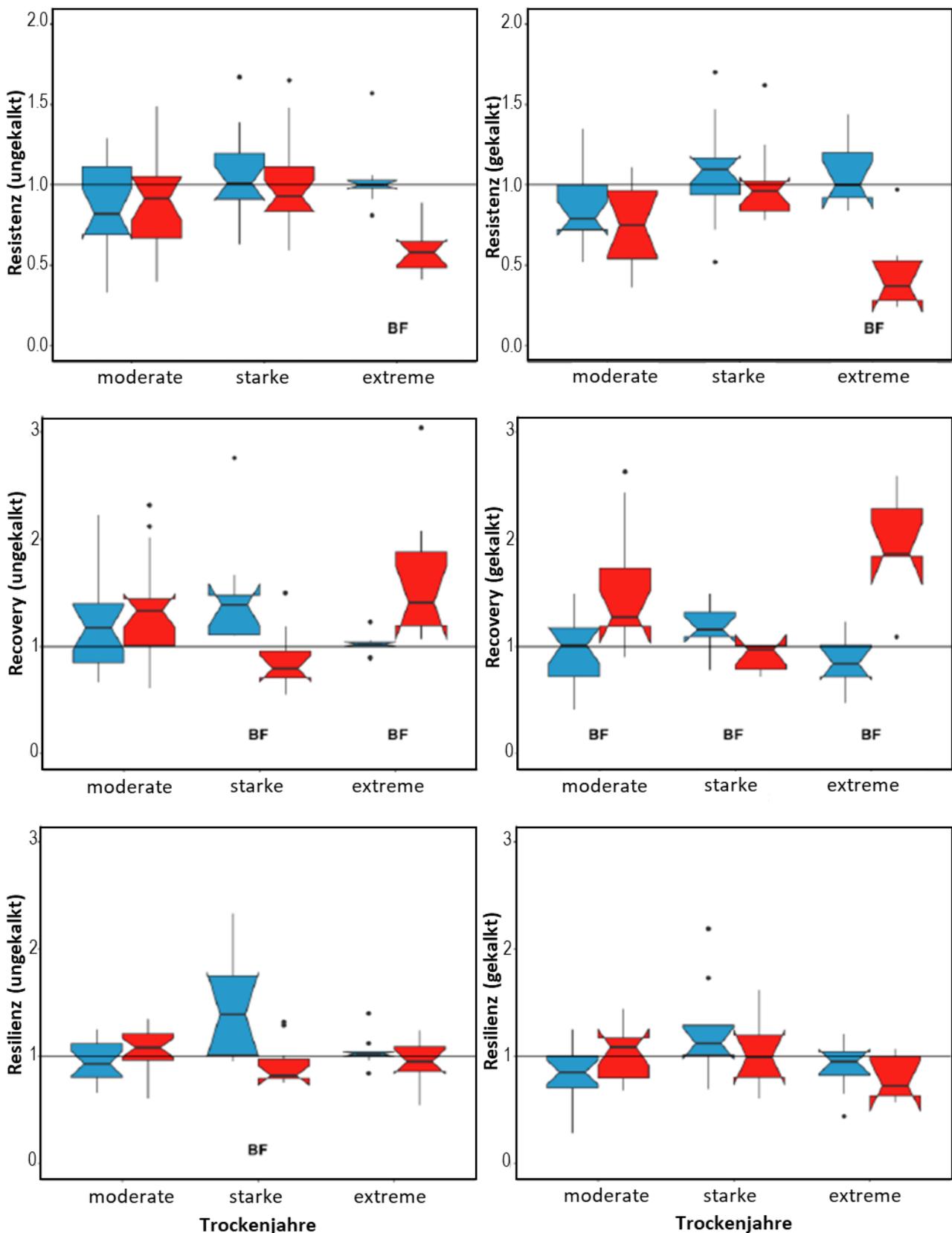


Abbildung 7: Boxplots der Resistenz, Erholung (Recovery) und Resilienz der Buchen- (blau) und Fichtenpaare (rot) in den Trockenheitskategorien moderat, stark und extrem für die PDV-Fläche Bad Waldsee. Unbehandelte Bestände sind links, gekalkte Bestände rechts dargestellt. Die Abkürzung BF indiziert einen statistisch signifikanten Unterschied ($p < 0,05$) zwischen Buche und Fichte innerhalb einer Behandlung. Ein statistisch signifikanter Effekt der Kalkung konnte nicht nachgewiesen werden.

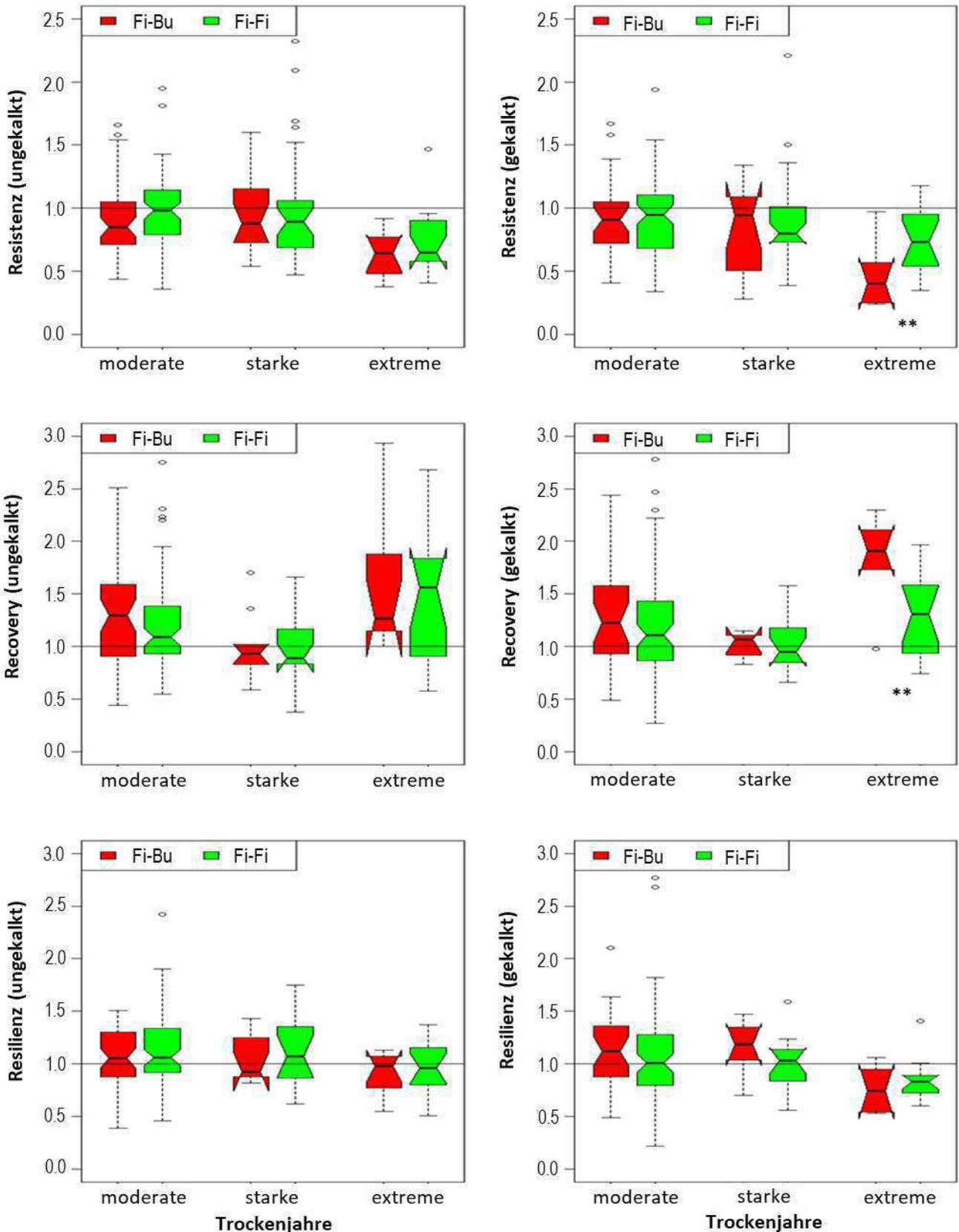


Abbildung 8: Boxplots der Resistenz, Erholung (Recovery) und Resilienz von Fichten aus Reinbestandsituationen (Fi-Fi) und Fichten mit Buchenumgebung (Fi-Bu) in den Trockenheitskategorien moderat, stark und extrem für die PDV-Fläche Bad Waldsee. Unbehandelte Bestände sind links, gekalkte Bestände rechts dargestellt. Das Symbol ** indiziert einen statistisch signifikanten Unterschied ($p < 0,05$) zwischen „Fi-Fi“ und „Fi-Bu“ innerhalb einer Behandlung. Ein statistisch signifikanter Effekt der Kalkung konnte nicht nachgewiesen werden.

4 Diskussion

Die Ergebnisse der Zuwachsanalysen zeigten, dass auf den insgesamt sechs untersuchten Standorten des Praxisdüngerversuchs der FVA Baden-Württemberg keine generelle Verbesserung der Trockenheitstoleranz von Fichten und Buchen nach Kalkung zu beobachten war. Die Variabilität der Zuwachsreaktion in und nach Trockenjahren hing von der Intensität der Trockenheit ab und konnte in der statistischen Analyse in den meisten Fällen zu einem weit größeren Anteil durch den Standort als durch die Kalkung selbst erklärt werden. Für eine tiefergehende Interpretation der Ergebnisse muss darüber hinaus auch der genaue Zeitpunkt der identifizierten Trockenheitsereignisse unterschiedlicher Intensität in Verbindung mit der bis dahin ausgebrachten Gesamtdosis an Kalk berücksichtigt werden.

4.1 WIRKUNGEN DER KALKUNG AUF DIE RESISTENZ VON FICHTEN UND BUCHEN BEI TROCKENHEIT

Die Trockenheitsresistenz des Radialwachstums der untersuchten Fichten und Buchen konnte durch die Kalkung nicht bzw. nur sehr geringfügig verbessert werden. Bei **moderater Trockenheit** wurde eine lediglich um 3 % höhere Resistenz der gekalkten Fichten im Vergleich zu Kontrolle festgestellt. Diese fast vernachlässigbare Erhöhung der Resistenz korrespondierte mit insgesamt äußerst geringen Wachstumsveränderungen in moderat-trockenen Jahren auf allen Standorten.

Im Gegensatz dazu waren bei **starker Trockenheit** die standortspezifischen Wachstumseinbrüche zum Teil erheblich und erreichten in Heidelberg, Horb und Weithard Werte von mehr als 40 %. Ein Kalkungseffekt konnte hier nicht festgestellt werden. Für die weitere Interpretation dieser Befunde ist die zeitliche Lage der mittels des „Standardized Precipitation Index“ (SPI) klassifizierten Trockenjahre zu beachten. Intensiver Trockenstress wurden für die Jahre 1985 und 2003 identifiziert, lediglich am Standort Bad Waldsee fand auch im Jahr 2015 eine intensive Trockenphase statt. Dies bedeutet, dass in der statistischen Modellanalyse hauptsächlich Daten der ersten 18 Jahre seit Versuchsbeginn Berücksichtigung fanden und somit in erster Linie Aussagen zu den kurz- bis mittelfristigen Effekten der Kalkung aus dem Jahr 1985 erlauben. Von Bedeutung ist in diesem Zusammenhang, dass die vorliegende Studie damit Befunde aus früheren Untersuchungen nicht bestätigen kann, in denen eine Zunahme der Trockenheitssensitivität des Radialwachstums bei Fichte nach einmaliger Kalkung beobachtet wurde. Begründet wurde dies mit dem flachen Wurzelsystem der Fichte und dem begrenzten Effekt einer nur einmaligen Ausbringung von Kalk (van der Perre et al. 2012). In anderen Untersuchungen wurde sogar eine Verflachung des Wurzelsystems von Fichten nach Kalkung beobachtet und als Hinweis auf eine mögliche Erhöhung des Trockenstressrisikos durch nur einmalige Kalkung betrachtet (Kreutzer 1995; Helmisaari and Hallbäck 1999). Die Ergebnisse der vorliegenden Studie zeigten dagegen, dass eine kurz- bis mittelfristige Erhöhung des Trockenstressrisikos durch eine nur einmalige Kalkung an allen untersuchten Standorten weitgehend ausgeschlossen werden kann. Leider liegen keinen Daten über mögliche Veränderungen der Feinwurzelverteilungen für den Zeitraum zwischen 1985 und 2003 vor. In einer anderen Studie konnte aber bereits gezeigt werden, dass auch nach nur einmaliger Kalkgabe die Durchwurzelungstiefe und Feinwurzelichte von Fichten langfristig erhöht werden kann (Schäffer, 2006). Allerdings lag die Kalkdosierung in dieser Studie mit 10 t ha^{-1} deutlich über den sonst üblichen 3 bis 4 t ha^{-1} .

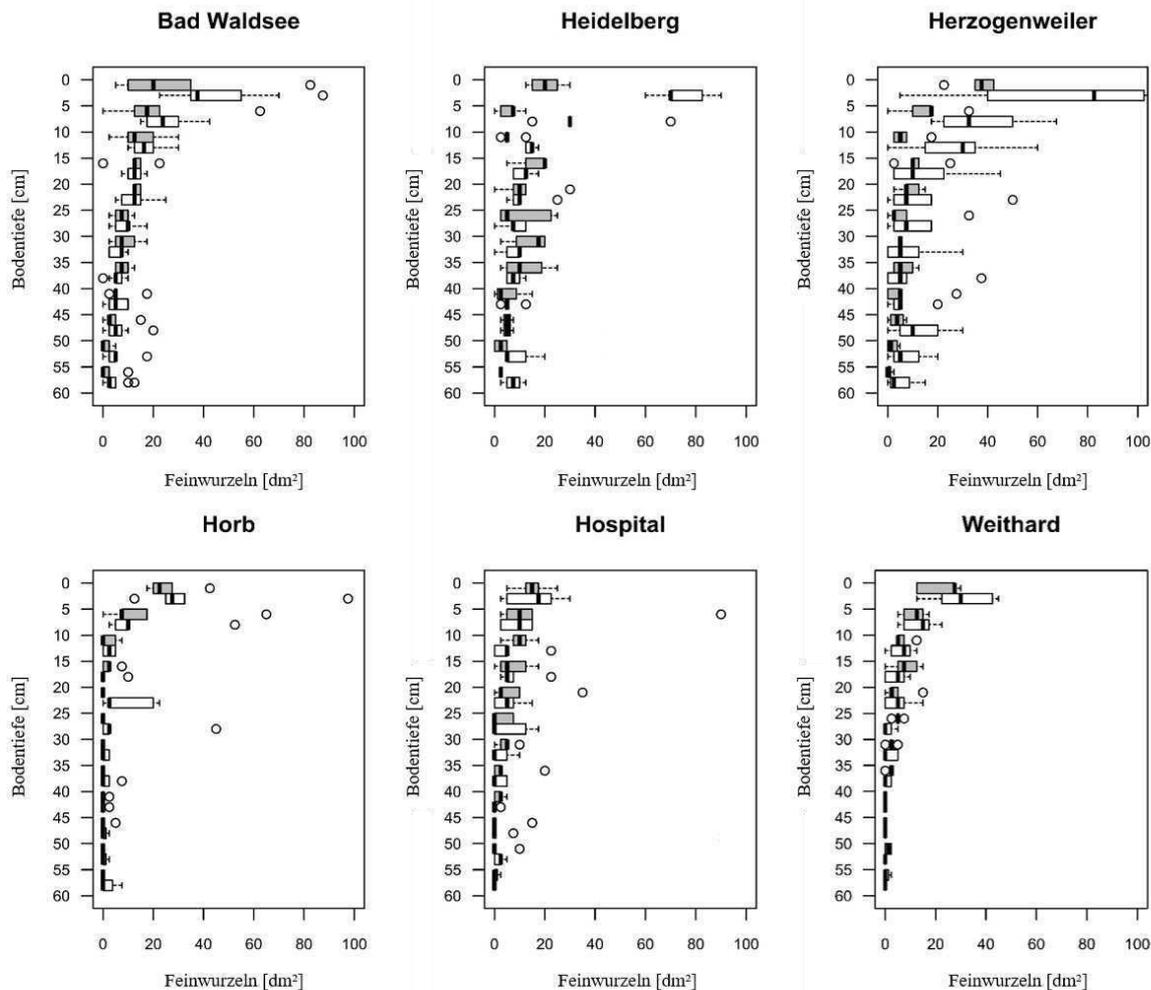


Abbildung 9: Anzahl an Feinwurzeln ($\varnothing < 2$ mm) im Mineralboden der untersuchten Standorte, ausgezählt in 5 cm Stufen bis in eine Tiefe von 60 cm. Weiße Boxplots indizieren gekalkte, graue Boxplots unbehandelte Versuchsfelder. FVA unveröffentlicht.

Extreme Trockenheit wurde innerhalb des 30-jährigen Beobachtungszeitraumes nur im Jahr 2003 am Standort Bad Waldsee und im Jahr 2015 am Standort Horb identifiziert. Doch nur am Standort Horb konnte ein statistisch signifikanter und positiver Einfluss der Kalkung auf die Resistenz des Radialwachstums der untersuchten Fichten gefunden werden. Für dieses sehr stark ausgeprägte „Kalkungssignal“ – das Radialwachstum der gekalkten Fichten lag in Horb im Jahr 2015 ca. 20 % über dem Wachstum der Kontrollbäume – kommen verschiedene Erklärungen in Betracht. So zeigen die Erhebungen zur Feinwurzelverteilung aus dem Jahr 2015 in Horb nach den Kalkungen der Jahre 1985 und 2003 erhöhte Feinwurzel-dichten im oberen (0-5 cm), aber auch tieferen Mineralboden (20-25 cm), was die erhöhte Resistenz der gekalkten Fichten erklären könnte (Abb. 9). Insbesondere die erhöhte Feinwurzel-dichten im tieferen Mineralboden könnten zu einem späteren Beginn von Trockenstress bei den gekalkten Fichten geführt haben.

Eine weitere Ursache für die stark erhöhte Resistenz der gekalkten Fichten in Horb im extremen Trockenjahr 2015 könnte in der im Frühjahr desselben Jahres durchgeführten Kalkung liegen, bei der zusätzlich auch Holzasche ausgebracht wurde. Holzasche gilt als sehr leicht löslich und kann zu einer sehr schnellen Erhöhung des Kaliumangebots im Boden führen (von Wilpert et al. 2013). In früheren Untersuchungen wurde

nach Holzaschesaubringung ein sehr schneller und deutlicher Anstieg der Kalium-Blattspiegelwerte bereits belegt (Schäffer 2002, von Wilpert 2002). Eine verbesserte Dürre-resistenz in Horb im Trockensommer 2015 aufgrund einer kurzfristig verbesserten Kaliumversorgung im Vergleich zur Nullfläche wäre denkbar, da das Nährelement Kalium den Schluss der Spaltöffnungen von Blättern bzw. Nadeln bei Trockenstress steuert (Kadereit und Strasburger 2013) und andererseits auf vielen, insbesondere lehmigen Waldstandorten in Baden-Württemberg durch selektive Verarmung der Aggregatoberflächen im Boden nur eingeschränkt verfügbar ist (Hildebrand 1990, von Wilpert et al. 1993, von Wilpert und Hildebrand 1994). Am Standort Horb weist der Boden eine lehmig-tonige Textur auf, während auf den meisten verbleibenden PDV-Flächen vornehmlich sandigere Bodenarten vorherrschen.

Auch der Altersunterschied der beiden Flächen könnte eine Erklärung für die deutlich bessere Resistenz der gekalkten Fichten in Horb im extremen Trockenjahr 2015 sein, da die gekalkten Fichten in Horb deutlich jünger waren (35 Jahre) als die unbehandelten Bäume. Ein Alterseffekt kann allerdings weitgehend ausgeschlossen werden, da in den Modellanalysen das Bestandesalter zum Zeitpunkt der Trockenheit berücksichtigt wurde und - unabhängig von der Trockenheitsintensität - in keinem der getesteten Resistenzmodelle als signifikanter Prädiktor identifiziert werden konnte.

4.2 WIRKUNGEN DER KALKUNG AUF ERHOLUNG UND RESILIENZ VON FICHTEN UND BUCHEN NACH TROCKENHEIT

Bei der zusammenfassenden Betrachtung von Erholung und Resilienz konnten nur für starke Trockenheitsergebnisse Behandlungseffekte in den Fichtenreinbeständen nachgewiesen werden. In unserer Untersuchung führte die Applikation von Kalk bzw. Dolomit zu einer Erhöhung der Rc- und Rs-Werte von 8 % bzw. 6 %. Eine Interaktion zwischen Behandlung und Standort, das heißt ein standortspezifischer Kalkungseffekt konnte in den statistischen Modellanalysen dabei nicht beobachtet werden. Da weder in dieser Studie noch in anderen physiologische Prozesse in Bäumen während und nach extremen Trockenjahren auf vergleichbaren, gekalkten und ungekalkten Flächen analysiert wurden, kann über die Ursachen für diesen Einfluss nur spekuliert werden. Möglicherweise lassen sich die verbesserten Wuchsreaktionen nach starken Trockenheiten mit einer erhöhten Basensättigung und erhöhten Feinwurzelverteilung auf den behandelten Flächen erklären (von Wilpert 2014). Leider liegen derzeit keine Blatt- bzw. Nadelspiegelwerte für die untersuchten Bestände in der notwendigen zeitlichen Auflösung vor, die als Belege für diese Annahmen herangezogen werden könnten.

Die Auswertungen der Fichten-Buchenpaare in Bad Waldsee zeigten, dass die Fichte hier nach deutlichem Zuwachseinbruch im Jahr der extremen Trockenheit im Vergleich zur Buche zwar keine höhere Resilienz, aber signifikant höhere Rc-Werte erreichte, was allerdings dadurch relativiert wird, dass das Radialwachstum der Buchen nicht nur im Trockenjahr selbst, sondern auch in den Jahren nach der Trockenheit nahezu im „Normalbereich“ (Index 0,8 bis 1,0) verlief. Diese vergleichsweise gute Erholungsfähigkeit der Fichten nach Trockenjahren wurde bereits in früheren Untersuchungen belegt (Pretzsch et al. 2013, Zang et al. 2014). Auch war in Bad Waldsee eine tendenziell bessere Erholung der Fichten in Buchenumgebung nach starker Trockenheit zu beobachten (Abb. 8). Ein solch begünstigenden Effekt zwischen zwei Baumarten wird auch als „facilitation“ bezeichnet (Vandermer 1989) und ist für die Mischung von Fichten und Buchen nicht untypisch (Pretzsch et al. 2013). Aber auch hier darf dieser Effekt nicht ohne Betrachtung der vorangegangenen

Zuwachseinbrüche im Trockenjahr selbst bewertet werden. Dabei fällt auf, dass die Resistenz der Fichten in Buchenumgebung – unabhängig von der Behandlung – in Bad Waldsee schlechter ausfiel als bei den Fichten aus Reinbestandssituationen (Abb.8). Daher kann nach den Befunden am Standort Bad Waldsee eine Mischung dieser beiden Baumarten zur Verbesserung der Trockenstresstoleranz nicht generell empfohlen werden, wenn auch dies aus anderen Gründen sinnvoll erscheint (Pretzsch et al. 2017). Ein signifikanter Einfluss der Kalkung auf die beobachteten „Baumarteneffekte“ konnte nicht festgestellt werden.

4.3 EINFLUSS DER DOSIERUNG UND ANZAHL DER KALKUNGEN, SOWIE DIE DAUER DES ZEITRAUMS ZWISCHEN KALKUNG UND TROCKENJAHR

Zur Beantwortung dieser Forschungsfrage konnte das Projekt leider keine abschließende Antwort geben. Dies lag insbesondere an dem Umstand, dass die für die einzelnen Standorte identifizierten Trockenheit überwiegend in den Zeitraum 1985 - 2003 fielen und damit in den statistischen Modellen der vorliegenden Studie vor allem die kurz bis mittelfristigen Auswirkungen einer einmaligen Kalkung berücksichtigt wurden. Eine Wiederholung dieser Studie in zehn bis fünfzehn Jahren wäre daher sinnvoll, da dann nicht nur mittel- sondern auch langfristige Auswirkungen der Kalkung analysiert werden könnten. Dann ließe sich auch das landesweit sehr extrem ausgeprägte Trockenjahr 2018, das drei Jahre nach der dritten Kalkausbringung im Jahr 2015 auftrat, umfassend auswerten. Diese Situation ist zwar für den aktuellen Projektstand bedauerlich, sollte aber bei der Planung von weiteren, zukünftigen Forschungsvorhaben berücksichtigt werden.

4.4 VERÄNDERT KALKUNG DIE TROCKENHEITSTOLERANZ DER FICHTE STÄRKER ALS DIE DER BUCHE?

Als generelles Muster - über alle Standorte hinweg - hatte die Kalkung bei den Fichten aus Reinbestandssituationen einen schwach positiven Einfluss auf die Erholung (Tab. 7) und Resilienz des Radialzuwachses (Tab. 8) nach extremen Trockenheitsereignissen. Im Gegensatz dazu konnte dieser positive Effekt der Kalkung nicht für Fichten in Mischung mit Buchen nachgewiesen werden (Abb. 7). Der Einfluss der Mischung bzw. Baumnachbarschaft war insgesamt deutlich ausgeprägter als der eigentliche Behandlungseffekt in Form der Gabe von Kalk bzw. Dolomit. Beim Vergleich der beiden untersuchten Baumarten zeigte sich die Buche am Standort Bad Waldsee insgesamt resistenter gegenüber Trockenheit als die Fichte, was auch in früheren Studien bereits beobachtet werden konnte (Zang et al. 2011, Hanewinkel et al. 2013, Pretzsch et al. 2013, Zang et al. 2014). Für das untersuchte Buchenkollektiv konnten keine Effekte der Kalkung auf Resistenz, Erholung oder Resilienz bei unterschiedlich ausgeprägten Trockenheiten nachgewiesen werden. (Abb. 7). Anhand der nur an zwei Standorten in einem relativ begrenzten Stichprobenumfang untersuchten Fichten-Buchenpaare kann daher keine abschließende Aussage darüber getroffen werden, welcher der beiden Baumarten hinsichtlich der Trockenheitstoleranz womöglich stärker von Kalkung profitieren könnte. Hierzu wäre auch die Untersuchung von Buchenreinbestandssituationen hilfreich, die im Versuchsdesign des Praxisflächenkalkungsprogramms der FVA Baden-Württemberg allerdings nicht enthalten sind.

5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Diese retrospektive Analyse der Radialzuwächse an gekalkten und unbehandelten Fichten in Reinbeständen ist nach unserem Kenntnisstand die erste wissenschaftlich belastbare Untersuchung dieser Art. Die hier gewonnenen Erkenntnisse basieren auf Analysen von 6 Standorten des Praxiskalkungsflächen-Programms der FVA Baden-Württemberg und repräsentieren damit typische Fichtenstandorte innerhalb der Kalkungskulisse dieses Bundeslandes. Dabei handelt es sich ausnahmslos um im gesamten Hauptwurzelraum stark versauerte Standorte in Höhenlagen von meist deutlich über 500 m. Eine direkte Übertragung der hier vorgestellten Ergebnisse auf typische Fichtenstandorte anderer Regionen ist daher nur unter Vorbehalt möglich. Dies wird auch dadurch deutlich, dass bereits innerhalb der hier untersuchten Standorte beträchtliche Unterschiede in der Trockenheitsreaktion des Radialwachstums festgestellt wurden und in der statistischen Analyse dem Einflussfaktor Standort meist mehr Gewicht als der Kalkung zukam.

Obwohl zum jetzigen Zeitpunkt insgesamt nur vergleichsweise geringe, positive Effekte der Kalkung auf die Trockenheitstoleranz der untersuchten Fichten nachgewiesen werden konnten, wurden im Umkehrschluss auch keinerlei negative Effekte der Kalkung auf die Trockenstresstoleranz der untersuchten Fichten und Buchen festgestellt, wie dies in früheren Untersuchungen bereits für die Baumart Fichte konstatiert wurde (vgl. Kap. 4.1.) Die Kalkung kann daher, vor dem Hintergrund der Anpassung der Wälder an vermehrte und intensivere Trockenstressereignisse als so genannte „No-Regret-Strategie“ betrachtet werden. Dies bedeutet aber auch, dass Kalkung als alleinige Maßnahme nicht dazu geeignet ist, Fichten auf von Wassermangel geprägten – und für den Anbau der Baumart nicht primär geeigneten Standorten – dauerhaft zu stabilisieren. Die Durchführung von Kalkungsmaßnahmen einzig zur Erhöhung der Trockenheitstoleranz kann nach den Erkenntnissen der vorliegenden Studie daher nicht empfohlen werden.

Die Behandlung von Waldböden mit Kalk bzw. Dolomit stellt damit nur eine von vielen, weiteren waldbaulichen Maßnahmen zur Reduktion der negativen Wirkungen von Trockenstress auf Bäume dar. Hierzu gehören das Einbringen trockenheitstoleranterer Provenienzen (Rose et al. 2009, Kapeller et al. 2012, Schüler et al. 2013, Thiel et al. 2014) und Baumarten (Vitali et al. 2017, Kunz et al. 2018), die Begründung bzw. Förderung von Mischbeständen (Lindner 2000, Bolte et al. 2009, Pretzsch et al. 2017) sowie die Intensivierung von waldbaulichen Pflegeeingriffen zur Förderung der Vitalität und Stabilität (Kohler et al. 2010, Sohn et al. 2012).

Der für diese Studie vorgesehene, langfristige Betrachtungszeitraum von 30 Jahren (1985-2015) konnte in den statistischen Auswertungen nur sehr eingeschränkt berücksichtigt werden, da sich die an den einzelnen Standorten identifizierten Trockenheiten überwiegend auf den Zeitraum bis 2003 konzentrierten. Die hier vorgestellten Ergebnisse stellen damit eine fundierte Analyse der kurz bis mittelfristigen Auswirkungen einer einmaligen Kalkung dar. Aussagen zu den langfristigen Effekten der Kalkung auf die Trockenheitstoleranz von Fichten und Buchen sind im Rahmen dieser Untersuchung daher nicht möglich. Die am Standort Horb festgestellte, massive Erhöhung der Resistenz des Radialwachstums im Trockenjahr 2015 ist möglicherweise ein Hinweis darauf, dass auf bestimmten Standorten durch die langfristige Gabe von Kalk deutlich stärkere Effekte zu erwarten sind. Es wird daher empfohlen, dieser Studie in zehn bis fünfzehn Jahren zu wiederholen.

6 Literaturverzeichnis

- Adams, H.D., Guardiola-Claramonte, M., Barron-Gafford, G.A., Villegas, J.C., Breshears, D.D., Zou, C.B., Troch, P.A., Huxman, T.E. (2009) Temperature sensitivity of drought-induced tree mortality portends increased regional die-off under global-change-type drought. *PNAS* 106(17): 7063-7066.
- Ammer, C., Albrecht, L., Borchert, H., Brosinger, F., Dittmar, C., Elling, W., Ewald, J., Felbermeier, B., von Gilsa, H., Huss, J., Kenk, G., Kölling, C., Kohnle, U., Meyer, P., Mosandl, R., Moosmayer, H.U., Palmer, S., Reif, A., Rehfuess, K.E., Stimm, B. (2005) Zur Zukunft der Buche (*Fagus sylvatica* L.) in Mitteleuropa. *AFJZ* 176(4): 60-67.
- Ammer, C., Bredemeier, M., von Arnim, G. (2018) Forstwissenschaftliche Tagung 2018 in Göttingen. Programm und Abstracts. Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme der Universität Göttingen, Reihe B, Band 83, Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie der Georg-August-Universität, Göttingen, 446 S.
- Archaux, F., Wolters, V. (2006) Impact of summer drought on forest biodiversity: what do we know? *Ann For Sci* 63(6): 645-652.
- Asche, N. (1999) Bodenschutzkalkung und das Wurzelsystem der Rotbuche (*Fagus sylvatica*) Eine Fallstudie im Sauerland. *Forstwiss Centralbl* 118: 294-301.
- Bachmann, M. (1998) Indizes zur Erfassung der Konkurrenz von Einzelbäumen: methodische Untersuchung in Bergmischwäldern. *Forstliche Forschungsberichte München, München*, 235 S.
- Beniston, M. (2004) The 2003 heat wave in Europe: A shape of things to come? An analysis based on Swiss climatological data and model simulations. *Geophys Res Lett* 31(2): 2022-2026.
- Bigler, C., Bugmann, H. (2003) Growth-dependent tree mortality models based on tree rings. *Can J For Res* 33(2): 210-221.
- Bittner, S., Talkner, U., Krämer, I., Beese, F., Hölscher, D., Priesack, E. (2010) Modeling stand water budgets of mixed temperate broad-leaved forest stands by considering variations in species specific drought response. *Agric For Meteorol* 150(10): 1347-1357.
- Bolte, A., Ammer, C., Löff, M., Madsen, P., Nabuurs, G.-J., Schall, P., Spathelf, P., Rock, J. (2009) Adaptive forest management in central Europe: Climate change impacts, strategies and integrative concept. *Scand J Forest Res* 24(6): 473-482.
- Bouriaud, O., Popa, I. (2009) Comparative dendroclimatic study of Scots pine, Norway spruce, and silver fir in the Vrancea Range, Eastern Carpathian Mountains. *Trees* 23(1): 95-106.

- Bréda, N., Huc, R., Granier, A., Dreyer, E. (2006) Temperate forest trees and stands under severe drought: a review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences. *Ann For Sci* 63(6): 625-644.
- Cavin, L., Mountford, E.P., Peterken, G.F., Jump, A.S. (2013) Extreme drought alters competitive dominance within and between tree species in a mixed forest stand. *Funct Ecol* 27(6): 1424-1435.
- 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., Martínez-Vilalta, J., Mayr, S., Mencuccini, M., Mitchell, P.J., Nardini, A., Pittermann, J., Pratt, R.B., Sperry, J.S., Westoby, M., Wright, I.J., 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., Ogé, J., Allard, V., Aubinet, M., Buchmann, N., Bernhofer, C., Carrara, A., Chevallier, F., De Noblet, N., Friend, A.D., Friedlingstein, P., Grünwald, T., Heinesch, B., Keronen, 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, J.M., Schulze, E.D., Vesala, T., Valentini, R. (2005) Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature* 437: 529-533.
- Cook, E.R., Briffa, K.R., Shiyatov, S.G., Mazepa, V., Jones, P.D. (1990) Data Analysis. In: Cook, E.R., Kairiukstis, L.A. (Hrsg.) *Methods of Dendrochronology*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, London. S. 97-162.
- De Silva, D.L.R., Hetherington, A.M., Mansfield, T.A. (1985) Synergism between calcium ions and abscisic acid in preventing stomatal opening. *New Phytol* 100(4): 473-482.
- Del Rio, M., Pretzsch, H., Alberdi, I., Bielak, K., Bravo, F., Brunner, A., Condés, S., Ducey, M.J., Fonseca, T., von Lüpke, N., Pach, M., Peric, S., Perot, T., Souidi, Z., Spathelf, P., Sterba, H., Tijardovic, M., Tomé, M., Vallet, P., Bravo-Oviedo, A. (2016) Characterization of the structure, dynamics, and productivity of mixed-species stands: review and perspectives. *Eur J Forest Res* 135(1): 23-49.
- Deutscher Wetterdienst - DWD (2016) Jahresbericht 2015. Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main, 65 S.
- Eilmann, B., Weber, P., Rigling, A., Eckstein, D. (2006) Growth reactions of *Pinus sylvestris* L. and *Quercus pubescens* Willd. to drought years at a xeric site in Valais, Switzerland. *Dendrochronologia* 23(3): 121-132.
- Fink, A.H., Brücher, T., Krüger, A., Leckebusch, G.C., Pinto, J.G., Ulbrich, U. (2004) The 2003 European summer heatwaves and drought - synoptic diagnosis and impacts. *Weather* 59(8): 209-216.
- Fonti, P., Cherubini, P., Rigling, A., Weber, P., Biging, G. (2006) Tree rings show competition dynamics in abandoned *Castanea sativa* coppices after land-use changes. *J Veg Sci* 17(1): 103-112.

- Forrester, D.I., Kohnle, U., Albrecht A.T., Bauhus, J. (2013) Complementarity in mixed-species stands of *Abies alba* and *Picea abies* varies with climate, site quality and stand density. *For Ecol Manag* 304: 233-242.
- Fritts, H.C. (1976) *Tree rings and climate*. Academic Press, London, 567 S.
- Gaylord, M.L., Kolb, T.E., McDowell, N.G. (2015) Mechanisms of piñon pine mortality after severe drought: a retrospective study of mature trees. *Tree Physiol* 35(8): 806-816.
- Gebhardt, T., Häberle, K-H., Matyssek, R., Schulz, C., Ammer, C. (2014) The more, the better? Water relations of Norway spruce stands after progressive thinning. *Agric For Meteorol* 197: 235-243.
- Hanewinkel, M., Cullmann, D.A., Schelhaas, M.-J., Nabuurs, G.-J., Zimmermann, N.E. (2013) Climate change may cause severe loss in the economic value of European forest land. *Nat Clim Chang* 3(3): 203-207.
- Hartmann, H. (2011) Will a 385 million year-struggle for light become a struggle for water and for carbon? How trees may cope with more frequent climate change-type drought events. *Glob Change Biol* 17(1): 642-655.
- Hegy, F. (1974) A simulation model for managing jack-pine stands. In: Fries, J. (Hrsg.) *Growth Models for Tree and Stand Simulation*. Royal Collage of Forestry, Stockholm, S. 74-90.
- Helmisaari, H.S., Hallbäcken, L. (1999) Fine-root biomass and necromass in limed and fertilized Norway spruce (*Picea abies* (L.) KARST.) stands. *For Ecol Manag* 119: 99-110.
- Hildebrand, E.E. (1990) Die Bedeutung der Bodenstruktur für die Waldernährung, dargestellt am Beispiel des Kaliums. *Forstw Cbl* 109(1): 2-12.
- Huber, M.O., Sterba, H., Bernhard, L. (2014) Site conditions and definition of compositional proportion modify mixture effects in *Picea abies* – *Abies alba* stands. *Can J For Res* 44(10): 1281-1291.
- Humble, G.D., Raschke, K. (1971) Stomatal Opening Quantitatively Related to Potassium Transport: Evidence from Electron Probe Analysis. *Plant Physiol* 48(4): 447-453.
- Huettl, R.F. (1989) Liming and fertilization as mitigation tools in declining forest ecosystems. *Water Air Soil Poll* 44(1): 93-118.
- Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC (2013) *Climate Change 2013. The Physical Science Basis Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, 1535 S.
- Ives, A.R., Carpenter, S.R. (2007) Stability and Diversity of Ecosystems. *Science* 317: 58-62.

- Jonard, M., André, F., Giot, P., Weissen, F., van der Perre, R., Ponette, Q. (2010) Thirteen-year monitoring of liming and PK fertilization effects on tree vitality in Norway spruce and European beech stands. *Eur J For Res* 129(6): 1203-1211.
- Kadereit, J.W., Strasburger, E. (2013) *Strasburger's Plant Sciences*. Springer, Heidelberg, New York, Dordrecht, London, 1302 S.
- Kane, J.M., Kolb, T.E. (2010) Importance of resin ducts in reducing ponderosa pine mortality from bark beetle attack. *Oecologia* 164(3): 601-609.
- Kapeller, S., Lexer, M.J., Geburek, T., Hiebl, J., Schüler, S (2012) Intraspecific variation in climate response of Norway spruce in the eastern Alpine range. Selecting appropriate provenances for future climate. *For Ecol Manag* 271: 46-57.
- Klimawandel und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft - KLIWA (2016) Klimawandel in Süddeutschland. Veränderungen von meteorologischen und hydrologischen Kenngrößen. Monitoringbericht 2016. Arbeitskreis Klimaveränderung und Wasserwirtschaft, Augsburg, 60 S.
- Kohler, M., Nägele, G., Sohn, S., Bauhus J. (2010) Can drought tolerance of Norway spruce (*Picea abies* (L.) KARST.) be increased through thinning? *Eur J For Res* 129(6): 1109-1118.
- Kraft, G. (1884) *Beiträge zur Lehre von den Durchforstungen, Schlagstellungen und Lichtungshieben*. Klindworth, Hannover, 147 S.
- Kramer, H., Akça, A. (2008) *Leitfaden zur Waldmesslehre*. Sauerländer, Frankfurt am Main, 226 S.
- Kreutzer, K. (1995) Effects of forest liming on soil processes. *Plant Soil* 168: 447-470.
- Kunz, J. Löffler, G., Bauhus, J. (2018) Minor European broadleaved tree species are more drought-tolerant than *Fagus sylvatica* but not more tolerant than *Quercus petraea*. *For Ecol Manag* 414: 15-27.
- Kutschera, L., Lichtenegger, E. (2002) *Wurzelatlas mitteleuropäischer Waldbäume und Sträucher*. Leopold Stocker Verlag, Graz, Stuttgart, 604 S.
- Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg - LUBW (2019) Zu warm, zu heiß, zu trocken? Eine klimatische Einordnung des Jahres 2018 für Baden-Württemberg. Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg, Karlsruhe, 25 S.
- Lindner, M. (2000) Developing adaptive forest management strategies to cope with climate change. *Tree Physiol* 20: 299-307.
- Lloret, F., Keeling, E.G., Sala, A. (2011) Components of tree resilience: effects of successive low-growth episodes in old ponderosa pine forests. *Oikos* 120(12): 1909-1920.
- Lloret, F., Escudero, A., Iriondo, J.M., Martínez-Vilalta, J., Valladares, F. (2012) Extreme climatic events and vegetation: the role of stabilizing processes. *Glob Change Biol* 18(3): 797-805.

- Mayer, H., Holst, T., Brugger, U., Kirchgässner, A. (2005) Trends der forstlich relevanten Klimavariablen Lufttemperatur und Niederschlag im Südwesten Deutschlands von 1950 bis 2000. *AFJZ* 176: 45-56.
- McKee, T.B., Doesken, N.J., Kleist, J. (1993) The relationship of drought frequency and duration to time scales. 8th Conference on Applied Climatology. American Meteorological Society, Anaheim, S. 179-184.
- Mc Tague, J.P., Weiskittel, A.R. (2016) Individual-Tree Competition Indices and Improved Compatibility with Stand-Level Estimates of Stem Density and Long-Term Production. *Forests* 7(10): 238.
- Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg - UM (2015) Strategie zur Anpassung an den Klimawandel in Baden-Württemberg. Vulnerabilitäten und Anpassungsmaßnahmen in relevanten Handlungsfeldern. Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, Stuttgart, 176 S.
- Münder, K. (2005) Konkurrenzuntersuchungen und Wachstumsmodellierung in Waldumbaubeständen des Mittleren Erzgebirges. Dissertation, Fakultät für Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften der Technischen Universität, Dresden, 160 S.
- Neumann, M., Starlinger, F. (2001) The significance of different indices for stand structure and diversity in forests. *For Ecol Manag* 145: 91-106.
- Pretzsch, H. (1995) Zum Einfluß des Baumverteilungsmusters auf den Bestandeszuwachs. *AFJZ* 166: 190-201.
- Pretzsch, H., Schütze, G., Uhl, E. (2013) Resistance of European tree species to drought stress in mixed versus pure forests: evidence of stress release by inter-specific facilitation. *Plant Biol* 15(3): 483-495.
- Pretzsch, H., Forrester, D.I., Bausch, J. (2017) Mixed-species forests: ecology and management. Springer, Berlin, Heidelberg, 653 S.
- Ponette, Q., Dufey, J.E., Weissen, F. (1997) Downward movements of dolomite, kieserite or a mixture of CaCO₃ and kieserite through the upper layers of an acid forest soil. *Water Air Soil Pollut* 95: 353-379.
- Rebetez, M., Mayer, H., Dupont, O., Schindler, D., Gartner, K., Kropp, J.P., Menzel, A. (2006) Heat and drought 2003 in Europe: a climate synthesis. *Ann For Sci* 63(6): 569-577.
- Rennenberg, H., Seiler, W., Matyssek, R., Geßler, A., Kreuzwieser, J. (2004) Die Buche (*Fagus sylvatica* L.) – ein Waldbaum ohne Zukunft im südlichen Mitteleuropa? *AFJZ* 175: 210-224.
- Rineau, F., Rose, C., Le Thiec, D., Garbaye, J. (2010) Liming in a beech forest results in more mineral elements stored in the mantle of *Lactarius subdulcis* ectomycorrhizas. *Fungal Biol* 114: 1007-1014.
- Rose, L., Leuschner, C., Köckemann, B., Buschmann, H. (2009) Are marginal beech (*Fagus sylvatica* L.) provenances a source for drought tolerant ecotypes? *Eur J For Res* 128(4): 335-343.

- Rumberger, M.D., Münzenberger, B., Bens, O., Ehrig, F., Lentzsch, P., Hüttl, R.F. (2004) Changes in diversity and storage function of ectomycorrhiza and soil organoprofile dynamics after introduction of beech into Scots pine forests. *Plant Soil* 264: 111-126.
- Saxe, H., Cannell, M.G.R., Johnsen, Ø., Ryan, M.G., Vourlitis, G. (2001) Tree and forest functioning in response to global warming. *New Phytol* 149(3): 369-400.
- Schaaf, W., Hüttl, R.F. (2006) Experiences with liming in European countries – results of long-term experiments. *J For Sci* 52: 35-44.
- Schäffer, J. (2002) Meliorationswirkung und ökosystemare Risiken von Holzascheausbringung auf Waldböden Südwestdeutschlands. *Berichte Freiburger Forstliche Forschung* 43: 39-52.
- Schäffer, J. (2006) Brauchen wir ein langfristiges Kalkungskonzept? *FVA Einblick*: 7-10.
- Schär, C., Vidale, P.L., Lüthi, D., Frei, C., Häberli, C., Liniger, M.A., Appenzeller, C. (2004) The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature* 427: 332-336.
- Scheffer, F., Schachtschabel, P. (2002) *Lehrbuch der Bodenkunde*. 15. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Berlin, 593 S.
- Schüler, S., Kapeller, S., Konrad, H., Geburek, T., Mengl, M., Bozzano, M., Koskela, J., Lefèvre, F., Hubert, J., Kraigher, H., Longauer, R., Olrik, D.C. (2013) Adaptive genetic diversity of trees for forest conservation in a future climate. A case study on Norway spruce in Austria. *Biodivers Conserv* 22(5): 1151-1166.
- Schweingruber, F.H. (1983) *Der Jahrring. Standort, Methodik, Zeit und Klima in der Dendrochronologie*. Haupt, Bern, Stuttgart, 234 S.
- Sohn, J.A., Kohler, M., Gessler, A., Bauhus, J. (2012) Interactions of thinning and stem height on the drought response of radial stem growth and isotopic composition of Norway spruce (*Picea abies*). *Tree Physiol* 32(10): 1199-1213.
- Sohn, J.A., Hartig, F., Kohler, M., Huss, J., Bauhus, J. (2016) Heavy and frequent thinning promotes drought adaptation in *Pinus sylvestris* forests. *Ecol Appl* 26(7): 2190-2205.
- Spiecker, H. (1991) Liming, nitrogen and phosphorus fertilization and the annual volume increment of Norway spruce stands on long-term permanent plots in Southwestern Germany. *Fertil Res* 27(1): 87-93.
- Thiel, D., Kreyling, J., Backhaus, S., Beierkuhnlein, C., Buhk, C., Egen, K., Huber, G., Konnert, M., Nagy, L., Jentsch, A. (2014) Different reactions of central and marginal provenances of *Fagus sylvatica* to experimental drought. *Eur J For Res* 133(2): 247-260.
- Ulrich, B. (1986) Die Rolle der Bodenversauerung beim Waldsterben. Langfristige Konsequenzen und forstliche Möglichkeiten. *Forstw Cbl* 105(1): 421-435.

- van der Perre, R., Jonard, M., André, F., Nys, C., Legout, A., Ponette, Q. (2012) Liming effect on radial growth depends on time since application and on climate in Norway spruce stands. *For Ecol Manag* 281: 59-67.
- Vandermer, J. (1989) *The ecology of intercropping*. Cambridge University Press, Cambridge, 237 S.
- Vitali, V., Büntgen, U., Bauhus, J. (2017) Silver fir and Douglas fir are more tolerant to extreme droughts than Norway spruce in south-western Germany. *Glob Change Biol* 23(12): 5108-5119.
- Wang, W., Peng, C., Kneeshaw, D.D., Larocque, G.R., Luo, Z. (2012) Drought-induced tree mortality: ecological consequences, causes, and modeling. *Environ Rev* 20(2): 109-121.
- von Wilpert, K., Hildebrand, E.E., Huth, T. (1993) Ergebnisse des Praxis-Großdüngerversuches - Abchlußbericht über die Anfangsaufnahmen (1985/86) und die Endaufnahmen (1989/90). *Mitteilungen der FVA Baden-Württemberg, Heft 171, FVA Freiburg*. Freiburg, 133S.
- von Wilpert, K., Hildebrand, E.E. (1994) Stoffeintrag und Waldernährung in Fichtenbeständen Baden-Württembergs. *Forst Holz* 49: 629-632.
- von Wilpert, K. (2002) Eckpunkte und wissenschaftliche Begründung eines Holzasche-Kreislaufkonzepts. *Berichte Freiburger Forstlicher Forschung* 43: 17-28.
- von Wilpert, K., Hartmann, P., Schaeffer, J. (2013) Regenerationsorientierte Bodenschutzkalkung. Hg. v. Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (Hrsg.). *Merkblatt* 54, 48 S.
- von Wilpert, K. (2014) Begründung, Technik und Wirkung der Bodenschutzkalkung. *FVA Einblick*: 10-13.
- Williams, A.P., Allen, C.D., Macalady, A.K., Griffin, D., Woodhouse, C.A., Meko, D.M., Swetnam, T.S., Rauscher, S.A., Seager, R., Grissino-Mayer, H.D., Dean, J.S., Cook, E.R., Gangodagamage, C., Cai, M., McDowell, N.G., (2013) Temperature as a potent driver of regional forest drought stress and tree mortality. *Nat Clim Change* 3: 292-297.
- Zang, C., Rothe, A., Weis, W., Pretzsch, H. (2011) Zur Baumarteneignung bei Klimawandel: Ableitung der Trockenstressanfälligkeit wichtiger Waldbaumarten aus Jahrringbreiten. *AFJZ* 182: 98-112.
- Zang, C., Hartl-Meier, C., Dittmar, C., Rothe, A., Menzel, A. (2014) Patterns of drought tolerance in major European temperate forest trees: climatic drivers and levels of variability. *Glob Change Biol* 20(12): 3767-3779.

7 Anhang

In Ammer et al. (2018) auf Seite 103 veröffentlichter Abstract im Rahmen eines Vortrags bei der Forstwissenschaftlichen Tagung (FowiTa) 2018 vom 24. bis 27. September 2018 in Göttingen.

Session 7-O5 - Kann mittels Bodenschutzkalkungen die Trockenheitstoleranz der Fichte verbessert werden?

Jörg Kunz¹, Martin Kohler¹, Johannes Herrmann¹, Peter Hartmann², Lelde Jansone², Heike Puhlmann², Klaus von Wilpert², Jürgen Bauhus¹

¹Universität Freiburg, Professur für Waldbau, Freiburg im Breisgau, DE,
joerg.kunz@waldbau.uni-freiburg.de

²Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, Abteilung Boden und Umwelt, Freiburg im Breisgau, DE

Seit den 1980er Jahren werden in Deutschland in zahlreichen Bundesländern Bodenschutzkalkungen durchgeführt. Dabei ist das primäre Ziel, eine weitere Abnahme der Bodenqualität über die Pufferung der aktuellen Säureinträge zu stoppen. Diese Maßnahmen können zu einem verbesserten Nährstoffangebot, zu günstigeren Humusformen, höheren Humusgehalten im Mineralboden und einer Vertiefung der Durchwurzelung führen, wodurch eine langfristige Regeneration der Böden möglich ist und sich möglicherweise auch die Trockenstresstoleranz von Wäldern erhöhen könnte.

Inwieweit die wiederholte Ausbringung von Kalk bzw. Dolomit tatsächlich zu einer Erhöhung der Trockenstresstoleranz von Bäumen führt, wurde allerdings bisher kaum untersucht. Hierzu wurden in Kooperation mit der FVA Baden-Württemberg die Auswirkungen von mehrfacher, jahrzehntelanger Kalkung auf die Trockenheitstoleranz von Fichte auf insgesamt 6 verschiedenen Standorten analysiert. Dabei wurde eine retrospektive Analyse der Radialzuwachsreaktionen von vorherrschenden Fichten in den letzten 30 Jahren durchgeführt. Mittels generalisierter und gemischter linearer Modelle wurden die kurz- und langfristigen Effekte der Kalkung auf Resistenz und Resilienz des Radialzuwachses von vorherrschenden Fichten in und nach Trockenjahren überprüft.

Grundsätzlich konnte kein signifikanter Effekt der Kalkung auf die Radialzuwachsresistenz der Fichten in Trockenjahren festgestellt werden. Die Erholung der Zuwächse (Resilienz) war nach stärkeren Trockenjahren auf den gekalkten Flächen allerdings signifikant besser. Ein Einfluss der Zeitspanne seit der ersten Kalkung oder der Gesamtdosis der ausgebrachten Kalkmenge auf die Trockenheitstoleranz der untersuchten Fichten konnte (noch) nicht nachgewiesen werden. Die beobachtete Erhöhung der Zuwachs-Resilienz ist aber ein klares Indiz für das Potential der Bodenschutzkalkung zur langfristige Verbesserung der Trockenstresstoleranz von Fichtenbeständen.

