

Reihe KLIMOPASS-Berichte

Projektnr.: 4500347087/23

Kann die Trockenstresstoleranz von Buchen über Durchforstungseingriffe erhöht werden?

von

M. Gerhardt, M. Kohler, J. Sohn, J. Bauhus

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

Mai 2016

KLIMOPASS

– Klimawandel und modellhafte Anpassung in Baden-Württemberg



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

HERAUSGEBER	LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg Postfach 100163, 76231 Karlsruhe
KONTAKT KLIMOPASS	Dr. Kai Höpker, Daniel Schulz-Engler Referat Medienübergreifende Umweltbeobachtung, Klimawandel; Tel.:0721/56001465, klimopass@lubw.bwl.de
FINANZIERUNG	Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg - Programm Klimawandel und modellhafte Anpassung in Baden-Württemberg (KLIMOPASS)
BEARBEITUNG UND VERANTWORTLICH FÜR DEN INHALT	Gerhardt, Magdalena; Kohler, Martin; Sohn, Julia; Bauhus, Jürgen. Professur für Waldbau, Universität Freiburg Tennenbacherstr. 4 79085 Freiburg
BEZUG	http://www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/91063/ ID Umweltbeobachtung U82-W03-N17
STAND	Mai 2016, Internetausgabe Mai 2016

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.

ZUSAMMENFASSUNG	4
1 HINTERGRUND UND ZIELSETZUNG	5
2 MATERIAL, METHODEN UND ANALYSE	8
2.1 Untersuchungsgebiete und Durchforstungskonzepte	8
2.2 Probennahme und Probenaufbereitung	10
2.3 Trockenheitsindizes und nutzbare Feldkapazität	12
2.4 Literaturrecherche zu Mastjahren	13
2.5 Beziehungen zwischen Radialzuwachs und Trockenheitsindizes	13
2.6 Identifikation von Trockenheitsereignissen	14
2.7 Analyse von Durchforstungseffekten auf Zuwächse während und nach Trockenjahren	14
3 ERGEBNISSE	16
3.1 Identifikation von Trockenjahren	16
3.2 Zuwachseinbruch und SPI	18
3.3 Klimatische Sensitivität (Korrelationsanalysen)	19
3.4 Mastjahre	20
3.5 Effekte von Durchforstungsart, Bestandesalter und Intensität der Trockenheit auf die Trockenstressreaktionen	21
4 DISKUSSION	24
4.1 Überblick	24
4.2 Klimasensitivität	24
4.2.1 Einfluss von Standort und Durchforstungsart	24
4.2.2 Einfluss der Stammhöhe auf Trockenstressreaktion des Radialwachstums	25
4.2.3 Effekte auf die Trockenstressreaktionen	25
5 SCHLUSSFOLGERUNGEN	27
6 QUELLEN	28
7 ABBILDUNGSVERZEICHNIS	34
8 ANHANG	36

ZUSAMMENFASSUNG

Bäume mit größerem Standraum und damit höherem Zugriff auf Bodenressourcen können Trockenstress möglicherweise besser durchstehen als Bäume mit geringem Standraum. Hier wurde der Einfluss von Standraumerweiterung auf die Trockenheitstoleranz oberständiger Einzelbäume in Buchenbeständen anhand dendro-ökologischer Methoden untersucht. Neben dem Einfluss der Intensität der Durchforstungseingriffe standen die Dauer, mit der etwaige positive Effekte der Durchforstung anhalten, und der mögliche Einfluss des Standortes auf diese Effekte im Fokus der vorliegenden Studie. Mit den Ergebnissen der Studie wird es möglich sein, Handlungsempfehlungen für Waldbesitzer und -bewirtschafter von Buchenbeständen auszuarbeiten.

Hierfür wurden in zwei Wuchsgebieten Baden-Württembergs Jahrring- und Bodenproben von unterschiedlich intensiv durchforsteten Buchenbeständen analysiert. In beiden Wuchsgebieten wurden zwei Standorte beprobt, auf denen jeweils zwei in Deutschland praktizierte Durchforstungskonzepte umgesetzt worden waren. Diese sind jeweils für die Optimierung der Wert- (Durchforstung nach Altherr) bzw. Volumenleistung (Durchforstung nach Assmann) von Buchen-Beständen entwickelt worden und unterscheiden sich in der Intensität ihrer Durchforstungseingriffe.

Mittels Bootstrapp-Korrelationen wurde der Einfluss von Durchforstungsarten, Wuchsgebieten und Stammhöhen auf die Klimasensitivität der Jahrringchronologien getestet. Mittels Varianzanalysen, Generalisierten Linearen Modellen (GLM) und Gemischten Linearen Modellen (LMM) wurden die Jahrringdaten auf Unterschiede in den Trockenstress-Reaktionen zwischen den Durchforstungsvarianten, den Standorten, dem Zeitraum zwischen Durchforstung und Trockenstress, dem Bestandesalter und der Intensität der Trockenheit untersucht. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass Durchforstungseingriffe sich grundsätzlich positiv auf die Erholung des radialen Zuwachses nach Trockenjahren auswirken, wobei keine signifikanten Unterschiede zwischen den untersuchten Durchforstungsvarianten festgestellt werden konnten. Die Korrelationsanalysen ergaben, dass die nach Altherr durchforsteten Buchenbestände grundsätzlich weniger witterungssensitives Radialwachstum zeigten als die nach Assmann behandelten Bestände. Die Korrelationsanalysen zeigten, dass das Radialwachstum in Brusthöhe ein geeigneter Proxy für die Abschätzung witterungs- und trockenheitsbedingter Zuwachssignale in den untersuchten Buchenbeständen darstellt.

1 Hintergrund und Zielsetzung

Die prognostizierten Klimaveränderungen (IPCC, 2013) werden auch in Baden-Württemberg zu gravierenden klimatischen Veränderungen führen. Neben den langfristig und schleichend verlaufenden Umweltveränderungen werden auch kurzfristige Extremereignisse, bspw. Dürreperioden, mit dem Klimawandel einhergehen (Weber & Komischke, 2008).

Waldökosysteme besitzen aufgrund ihrer hohen genetischen Vielfalt ein vergleichsweise gutes natürliches Anpassungspotenzial gegenüber den langfristigen und schleichend verlaufenden Umweltveränderungen. Gegenüber unregelmäßig auftretenden, verhältnismäßig plötzlich eintretenden Extremereignissen ist die natürliche Anpassungsfähigkeit von Wäldern dagegen gering (Shaw, 2012). Letzterem liegt u. a. zugrunde, dass die Frequenz der natürlichen Verjüngungszyklen der Waldbäume niedriger ist als die Frequenz des Auftretens von Extremereignissen (Weber & Komischke, 2008), sodass die jeweilige Zeitspanne für eine genetische Anpassung der Waldbäume nicht ausreicht. Insbesondere während der Vegetationsperiode hat extreme Trockenheit, wie zuletzt im Sommer 2015 auch in Baden-Württemberg erfahren, bereits zu verminderter Produktivität von Waldbeständen geführt (Ciais, et al., 2005). Trockenstress führt bei Bäumen im Extremfall zu vorzeitiger Mortalität. In den meisten Fällen führt er zu einer Reduktion des Wachstums (Sohn, et al., 2013). Diese Auswirkungen von Trockenstress auf Wachstum und Vitalität von Einzelbäumen werden i. d. R. durch hohe Bestandesdichten verstärkt (McDowell, et al., 2006). Daher werden Durchforstungseingriffe empfohlen, um aufgrund von reduzierter Konkurrenz um das Bodenwasser den Trockenstress für Einzelbäume zu minimieren (Mc Dowell, et al., 2003; Kohler, et al., 2010; Bréda, et al., 1995).

Wälder und Holzprodukte leisten einen Beitrag zur Reduktion von Treibhausgas-Emissionen, der in Deutschland gegenwärtig den Beitrag aller anderen erneuerbaren Energien um ein Vielfaches übersteigt (Osterburg, et al., 2013; Nabuurs, et al., kein Datum). Diese wichtige Funktion kann durch die oben genannten negativen Auswirkungen des Klimawandels auf die Stabilität und Produktivität der Wälder substanziell beeinträchtigt werden. Daher spielen hiesige Wälder in Anbetracht der gesetzlich festgeschriebenen Klimaschutzziele (Landtag von Baden-Württemberg, 2013) eine entscheidende Rolle, aufgrund welcher ihre Anpassung an Trockenstressereignisse von großer Dringlichkeit ist.

Während zukünftige Waldbestände durch das aktive Einbringen trockenheitstoleranterer Baumarten angepasst werden können (Bolte & Degen, 2010; Pretzsch, et al., 2013; Reif, et al., 2010), müssen bestehende Bestände durch waldbauliche Eingriffe stabilisiert werden (Spittlehouse & Stewart, 2004; Sohn, et al., 2013). Dass letzteres bei verschiedenen Baumarten über Durchforstungseingriffe erreicht werden kann, wurde bereits durch verschiedene Studien bestätigt (Sohn, et al., 2016; D'Amato, et al., 2013; Magruder, et al., 2013; Magruder, et al., 2012; Lloret, et al., 2011; Kohler, et al., 2010; Pretzsch, 2009; McDowell, et al., 2006; Legoff & Ottorini, 1993), jedoch auch widerlegt (Misson, et al., 2003). Da der Effekt der Durchforstung auf die Trockenstressreaktion von Bäumen jedoch stark von Baumalter (Pretzsch, 2002; Schröpfer & Utschig,

2009), Zeitspanne zwischen Durchforstungseingriff und Trockenheit (Sohn, et al., 2016), Intensität des Eingriffes (Sohn, et al., 2013; Magruder, et al., 2013; Magruder, et al., 2012) und weiteren Faktoren abhängt, besteht zu diesem Thema für die gesicherte Anwendung dieser kurzfristigen Anpassungsmaßnahme weiterhin großer Forschungsbedarf. Unklar ist auch, warum Durchforstungseingriffe in einigen Fällen eher die Resistenz der Zuwachsreaktion (Misson, et al., 2003; D'Amato, et al., 2013) während eines Trockenjahres stärkten, in anderen Fällen eher die Erholung/Resilienz (Lloret, et al., 2011; Sohn, et al., 2013) nach einem Trockenjahr verbesserten. Möglich ist, dass derartige Unterschiede morphologisch bedingt und somit v. a. artenspezifisch sind.

Da Studien zu diesem Thema jedoch meist an Nadelbaumarten durchgeführt wurden, mangelt es insbesondere bei Laubbaumarten an Informationen, nicht nur über Durchforstungseffekte auf grundlegende physiologische Mechanismen, sondern auch über die Dauer ihrer Wirkung. Da Laubbäume mit hoher Kronenplastizität - wie bspw. die Buche (*Fagus sylvatica* [L.]) - freiwerdende Räume im Bestandesgefüge rascher und effizienter besetzen als mit ihr vergesellschaftete Koniferen (Dieler & Pretzsch, 2013), können die für einige Nadelbaumarten vorliegenden Ergebnisse zur Dauer der positiven Effekte eines Durchforstungseingriffes nicht ohne weiteres auf die Buche übertragen werden. Bisher wurden Durchforstungskonzepte für Laubbaumarten in Mitteleuropa in erster Linie auf Qualitätsentwicklung und Massenleistung von Waldbeständen ausgerichtet, nicht aber auf die Stabilität gegenüber klimatischen Extrembedingungen.

Die schattentolerante Baumart Buche ist die auf den meisten Standorten Deutschlands natürlicherweise vorherrschende Baumart. Sie gilt aufgrund ihrer weiten ökologischen Amplitude auf vielen Standorten auch unter den zukünftigen Klimabedingungen als gut angepasst (Kölling, 2007). In Baden-Württemberg, wo sie etwa 21 Prozent der Gesamtwaldfläche einnimmt (Kändler & Cullmann, 2014), wird sich ihre Konkurrenzkraft in submontanen bis montanen Lagen unter dem Einfluss des Klimawandels voraussichtlich verstärken. In den wärmeren, tiefer gelegenen, kollinen Lagen mit geringen Sommer-Niederschlägen, muss dagegen von einer zunehmenden Trockenstressbelastung in extremen Trockenjahren ausgegangen werden (Kohnle, et al., 2008). Eine zusätzliche, möglicherweise u. a. durch Trockenheit und Wärme induzierte, Belastung für die Buche ist ihre vermehrte Fruchtbildung (Meining, et al., 2015; Drobyshev, et al., 2014). Da die Früchte der Buche relativ groß und energiehaltig sind, wird bei fruktifizierenden Buchen besonders viel Energie für diesen Prozess gebraucht, wodurch fruktifikationsbedingte Einbrüche des Durchmesserwachstums entstehen (Meining, et al., 2015). Da Buchen häufig in Folge eines warmen Vorjahressommers fruktifizieren, kann ein Trockenjahr u. U. eine langanhaltende Stresssituation hervorrufen, die zu mehrjährigen Zuwachseinbrüchen, und schwächebedingten Schädlingsanfälligkeiten führt (Schröter, et al., 2005). Aus diesen Gründen besteht besonders großer Bedarf an waldbaulichen Methoden, die zur kurz- bis mittelfristigen Stabilisierung von Buchenbeständen eingesetzt werden können.

Da Trockenstress bei Bäumen in der Regel zu einer Reduktion des Wachstums führt, eignen sich besonders retrospektive Analysen des radialen Stammwachstums zur Quantifizierung von Trockenstress (Fritts, 1976). Vor diesem Hintergrund sind im Rahmen der vorliegenden Studie an vor- und mitherrschenden Buchen von Durchforstungsversuchsflächen der FVA Baden-Württemberg folgende Arbeitshypothesen überprüft worden:

- Die Resistenz (Reaktion des Radialwachstums während der Trockenheit) ist in stark durchforsteten Buchenbeständen höher als in mäßig durchforsteten Beständen.
- Die Erholung bzw. Resilienz (Erholung des Radialwachstums in den Jahren nach der Trockenheit in Bezug zum Trockenjahr bzw. zu den Vortrockenjahren) ist in stark durchforsteten Buchenbeständen höher als in mäßig durchforsteten Beständen.
- Resistenz, Erholung und Resilienz werden durch die Dauer des Zeitraumes zwischen Durchforstung und Trockenjahr beeinflusst.
- Die Messung des Radialzuwachses in Brusthöhe ist ein geeigneter Proxy für die Beurteilung witterungs- und trockenheitsbedingter Zuwachssignale.

2 Material, Methoden und Analyse

2.1 UNTERSUCHUNGSGEBIETE UND DURCHFÖRSTUNGSKONZEPTE

Die vorliegende Studie beruht auf Daten von Buchenbeständen zweier unterschiedlicher baden-württembergischer Wuchsgebiete (Abb. 1 und Tab. 2): zum einen das Wuchsgebiet der höher gelegenen Schwäbischen Alb, einem eher kühlen Buchen-Standort, dessen Eignung mit voranschreitendem Klimawandel vermutlich steigt und zum anderen das warme Neckarland, heute ein optimaler Buchen-Standort, dessen Eignung als solcher mit voranschreitendem Klimawandel voraussichtlich nachlassen wird (s. Kapitel 1). In den 1970er Jahren richtete die Forstliche Versuchsanstalt Baden-Württemberg (FVA BW) 13 verschiedene Dauerversuchsflächen mit insgesamt 31 Plots zur Durchforstung in Buchenbeständen in beiden Wuchsgebieten ein. Hier soll untersucht werden, wie verschiedene Durchforstungskonzepte die Zuwachsentwicklung und Qualität von Buchen beeinflussen.

Tabelle 1 Standorts- und Bestandes-Parameter (linke Spalte) der Versuchsflächen Neckarland (2. Spalte v. l.) mit den Versuchsflächen Nummer 224 und 225, sowie der Schwäbischen Alb (1. Spalte v. r.).

Parameter	Neckarland (Klimadaten aus Bad Mergentheim)		Schwäbische Alb (Klimadaten aus Heidenheim an der Brenz und Ellwangen)	
	224	225	226	230
Nummer der Fläche	224	225	226	230
Koordinaten	49°25'9"18'	49°21'9"22'	48°38'/10°3'	48°42'/10°16'
Jährliche Niederschlagssumme (mm) (& jährliche Niederschlagssumme der Vegetationsperiode)	734,13 (61,61)	734,13 (61,61)	818,37 (71,59)	818,37 (71,59)
Durchschnittliche Jahrestemperatur (°C)	9,14 (14,72)	9,14 (14,72)	8,29 (13,9)	8,29 (13,9)
Höhe (m ü. M.)	340	310	650	610
Bodentyp (nFk, Wurzelraum (cm))	Oberer Muschelkalk (kommt noch)	Oberer Muschelkalk (kommt noch)	Weißer Jura (kommt noch)	Weißer Jura (kommt noch)
Standortseinheit	Fr. Feinlehm m fr. Kalkverwitterung	M. fr. Fein-/Schichtlehm m. fr. Fein-/Decklehm	m. fr. Schlufflehm	Schicht-/Schlufflehm, teils m. fr. Kalkverwitterungslehm Schicht-/Schlufflehm, teils Feinlehm
Bestandesalter im Jahr 1970	Altherr: 63, Assmann: 58	Alt: 74, Ass: 74	Alt: 78, Ass: 78	Alt: 88, Ass: 88
Durchforstungsarten	Altherr / Assmann	Altherr / Assmann	Altherr / Assmann	Altherr / Assmann

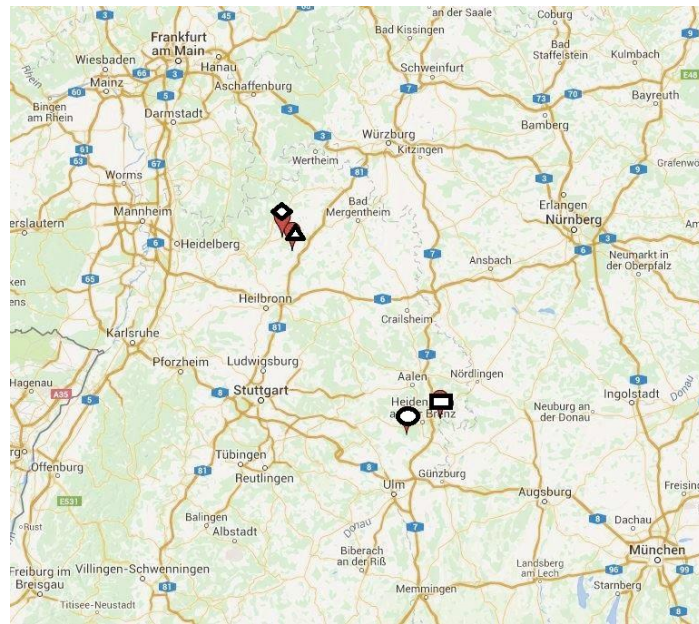


Abbildung 1 Lage der Versuchsflächen: Raute = Neckarland-Standort 224; Dreieck = Neckarland-Standort 225; Kreis = Schwäbische Alb-Standort 226; Viereck = Schwäbische Alb-Standort 226; Viereck = Schwäbische Alb Standort 230.

Für die vorliegende Studie wurden pro Wuchsgebiet zwei Standorte ausgewählt. Auf jedem dieser Standorte wurden jeweils zwei Dauerversuchsflächen mit den Buchen-Durchforstungskonzepten nach Assmann und nach Altherr beprobt. Diese Konzepte sind jeweils mit dem Ziel der Optimierung der Wertleistung (Durchforstung nach Altherr¹ (Altherr, 1971) bzw. der Volumenleistung (Durchforstung nach Assmann² (Hein, et al., 2006) von Buchen-Beständen entwickelt worden und unterscheiden sich in ihrer Durchforstungsintensität (s. Abb. 2 und Tab. 2). Die Bestände weisen einen durchschnittlichen jährlichen Gesamtwuchs zwischen 12 und 17 Vorratsfestmetern ha⁻¹ a⁻¹ (bezogen auf die Periode 1967-1985) auf und unterscheiden sich damit hinsichtlich der Standortsqualitäten beträchtlich. Am Anfang des Experiments waren die für die vorliegende Studie ausgewählten Bestände zwischen 58 und 88 (im Schnitt 73) Jahre alt, mit einer Oberhöhe (h₁₀₀) zwischen 19 und 28m (im Durchschnitt 23,5m, s. Tab. 2) (Hein, et al., 2006). Die Flächengröße der untersuchten Parzellen lag zwischen 0,15 und 0,5 ha (im Durchschnitt 0,3 ha). Die Durchforstungseingriffe wurden entsprechend des jeweiligen Konzepts in zwei bis dreifacher Wiederkehr innerhalb des Zeitraums von 1970 bis 1982 durchgeführt.

¹ Zukunftsbäume (*Z-Bäume*) werden über Z-Baum-orientierte Auslesedurchforstungen gefördert. Im vorliegenden Fall wurde ab einem Bestandesalter von ca. 55 Jahren die Grundfläche auf 20 m² stark abgesenkt und bis zum Alter von ca. 90 Jahren durch entsprechend starke Eingriffe auf diesem Niveaugehalten (*Lichtwuchsdurchforstung*), sodass die Grundfläche daraufhin und bis zum Erreichen der Zielstärke wieder zunimmt.

² Keine explizite Förderung von Zukunftsbäumen (*Z-Bäumen*). Die Grundfläche wird dauerhaft auf einem Niveau gehalten, ab dem eine maximale Volumenzuwachsleistung des Bestandes stattfindet. Im vorliegenden Fall wurden die Eingriffe in der Art einer mäßigen Niederdurchforstung durchgeführt.

Tabelle 2 Wachstumskundliche Kennwerte der Versuchsflächen. Wo L = Altherr, S = Assmann, B = Beginn, E = Ende, BB = bleibender Bestand, d_{100} = Mitteldurchmesser der 100 stärksten Stämme/ha, h_{100} = Mittelhöhe der 100 stärksten Stämme/ha, VfmD.m.R = Vorratsfestmeter Derbholz mit Rinde, ${}_iV$ = laufender jährlicher Volumenzuwachs, GWL = Standortsproduktivität (Quelle: Hein, et al., (2006).

Versuchs- feld	Beobachtungszeitraum		Alter		Baumzahl BB (N/ha)		d_{100} BB		h_{100} BB		Volumen BB Vfm _{D,m.R.}		${}_iV$ Vfm _{D,m.R.}		GWL
	B	E	B	E	B	E	B	E	B	E	B	E	min	max	E
224-1-L	1969	2004	54	89	2423	883	24	47	21,5	31,2	227	361,2	12,1	15,6	776
224-2-S	1969	2004	54	89	2270	533	22,3	40,4	19,6	29,9	195,5	432,4	10,8	16,3	725
225-1-L	1971	2004	63	98	2196	593	34,0	50,3	28,2	34,5	297,3	402,5	12,6	17,5	1074
225-2-S	1971	2004	58	93	2504	660	35,1	49,8	27,2	34,8	361,7	510,1	12,2	18,3	1070
226-1-L	1971	2004	78	111	920	418	29,1	48	24,7	32,8	224,9	440,5	12,3	15,7	919
226-2-S	1971	2004	78	111	934	410	30,8	45,2	24,3	33,6	277,4	522,8	12,1	15,3	933
230-1-L	1971	2004	88	121	700	370	29,5	46,5	25,6	34,3	239,7	455,7	12,1	13,8	944
230-2-S	1971	2004	88	121	868	366	29,2	43,5	25	34,8	303,9	526,3	12,3	14,7	934



Abbildung 2 Links: Zukunftsbaum-orientierte Lichtwuchsdurchforstung: Stark- (nach ALTHERR) durchforstete Versuchsfläche im Neckarland. Z-Bäume sind mit Ring dauerhaft markiert. Rechts: an der optimalen Grundflächenhaltung orientierte Durchforstung: moderat- (nach ASSMANN) durchforstete Versuchsfläche im Neckarland.

2.2 PROBENNAHME UND PROBENAUFBEREITUNG

Auf insgesamt acht Versuchspartellen (zwei Wuchsgebiete, pro Wuchsgebiet zwei Standorte, pro Standort eine Parzelle je Behandlung) wurden jeweils 9 bis 11 vor- und mitherrschende Buchen ausgewählt. Die ausgewählten Buchen waren gleichmäßig im Bestand verteilt, von wipfel- und gradschäftigem Wuchs und frei von äußeren Schäden. Sie repräsentierten damit die Wertträger des jeweiligen Bestandes. Aufgrund dieser Kriterien konnten lediglich auf einem Standort (einer Altherr- und einer Assmann-Versuchsfläche auf der Schwäbischen Alb) ausreichend Bäume gefunden werden, die im Zuge des regulären Einschlags (Zielstärkennutzung) eine **Entnahme von Stammscheiben aus drei verschiedenen Stammhöhen** (Brusthöhe, Kronenansatz und Stammmitte) erlaubten. Auf allen anderen Parzellen hatte das angestrebte Baumkollektiv im Jahre 2014 noch keine hiebsreifen Dimensionen erreicht, sodass auf diesen Flächen jeweils **Bohrkerne in Brusthöhe** (von der Nord- und Ostseite des Stammes) entnommen wurden.

Um die Bildung von Rissen im Holz zu vermindern, wurden die insgesamt 108 und 68 Stammscheiben bei Raumtemperatur getrocknet. Um jeden Jahrring erkennbar zu machen, wurden die Holzoberflächen anschließend einseitig glatt geschliffen und poliert. Da die Buche gemischtporiges Holz hat, sind die Abgrenzungen zwischen den einzelnen Jahrringen oftmals undeutlich, sodass das Herausarbeiten der einzelnen Jahrringe in den vorliegenden Holzproben sehr arbeits- bzw. zeitaufwändig war. Zur Vermessung und Datierung der Jahrringe wurden alle Bohrkerne und Stammscheiben eingescannt und mit dem Jahrringanalyse-System WINDENDRO (Regents Instruments, Quebec) analysiert. Anschließend wurden die Jahrringreihen, die aus den jeweils zwei Bohrkerne pro Baum hervorgingen, verglichen und entsprechend der Ähnlichkeit ihres Verlaufes entweder gemittelt oder korrigiert. Korrigiert wurden fehlerhafte Jahrringmessungen entweder indem der Fehler im direkten Vergleich der beiden zusammengehörigen Jahrringreihen eindeutig erkannt wurde oder, falls dieser Vergleich nicht ausreichte, indem sie neu präpariert wurden (durch erneutes Schleifen, Polieren, gegebenenfalls durch Anfertigung von Dünnschnitten, um nicht eindeutig datierbare Jahrringe von Scheinjahrringen unter dem Mikroskop abzugrenzen (Kohler, et al., 2010)). Um jede fehlerhafte Messung auch bestandesweit sicher identifizieren zu können, wurden außerdem die gemittelten, derselben Versuchsfläche und Durchforstungsart zugehörigen, Jahrringreihen mit dem Programm COFECHA (Holmes, 1983)³ wiederum untereinander kreuzvalidiert (crossdating). Besonders deutlich erkennbare Jahrringchronologien werden hierfür als Referenzen verwendet.

Anschließend wurden aus den Radialzuwachsreihen die jährlichen Grundflächenzuwächse berechnet, da diese in der Regel stärker mit dem Gesamtwachstum des Stammes korreliert sind als der Radialzuwachs (Leblanc, 1990). Dazu wurden die kreuzvalidierten Zuwachs-Chronologien von jährlichen Ringweiten (in mm) in GZ (in mm²/a) umgerechnet. Der Umfang des Baumes zum Zeitpunkt der Probenentnahme wird hierbei als Ausgangswert genutzt. Davon ausgehend wurden die jährlichen Ringweiten rückwärtsgerichtet in konzentrische Kreisflächen umgerechnet und die Ringflächen berechnet.

In einem weiteren Schritt wurden die Zuwachschronologien mit einer *Cubic Smoothing Spline-Funktion* mit 50 Prozent Wellenlänge trendbereinigt, um die langfristigen, altersbedingten Trends zu entfernen (Cook & Holmes, 1999). Dieser Schritt wurde als Vorbereitung für die Klimasensitivitätsanalyse durchgeführt, da hier längere Zeitreihen berücksichtigt werden, bei denen andernfalls der Alterstrend etwaige Umwelteinflüsse überlagern könnte (Cook & Holmes, 1999; Speer, 2010).

³ *Cofecha* is a computer program that assesses the quality of crossdating and measurement accuracy of tree-ring series. Written by Richard L. Holmes in 1982, the program has evolved into one of the most important and widely used in dendrochronology (Grissino-Mayer, 2001).

2.3 TROCKENHEITSINDIZES UND NUTZBARE FELDKAPAZITÄT

Für die Identifizierung von Trockenjahren war es wichtig, Trockenheitsindizes basierend auf Klimawerten benachbarter Stationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) zu berechnen. Diese geben Aufschluss über Zeitpunkt, Dauer und Intensität der vor Ort aufgetretenen Trockenheit. Im Rahmen einer Pilotstudie (Dörr, 2015), wurden die infrage kommenden Trockenheitsindizes - der *Palmer Drought Severity Index* (PDSI)⁴, der *Standardized Precipitation Index* (SPI)⁵, der *deMartonne Aridity Index* (Idm)⁶ und der *Müller Climate Moisture Index* (CMIm)⁷ - verglichen. Hierbei wurde nach folgenden Kriterien vorgegangen: Identifikation der Weiserjahre (der bereits bekannten Trockenjahre) 1976, 1991/1992 und 2003; Klassifikation dieser Weiserjahre als mindestens stark-trocken und Beurteilung der Gleichläufigkeit mit den jährlichen Zuwachsdaten der Prohebäume sowie den Klimadaten der örtlichen Wetterstationen. Basierend auf den Ergebnissen der Pilotstudie wurde der SPI (für die Monate Juni bis August des laufenden Jahres) als Trockenheitsindex für die vorliegende Studie ausgewählt und nach folgender Formel für die Periode 1973 bis 2002 berechnet:

$$\text{SPI} = \frac{xp - xm}{s};$$

⁴ **PDSI**: ein im Jahre 1965 von Palmer (Palmer, 1965) entwickelter, dimensionsloser, meteorologischer Trockenheitsindex. Die Input-Variablen sind die Jahresniederschlagssumme, die Jahresmitteltemperatur und ein generisches Boden-Modell (Heim, 2002). Der PDSI berechnet alle grundlegenden Faktoren der Wasser-Balance-Gleichung, bspw. die Evapotranspiration, Bodenwasserstand und Bodenwasserabfluss - und vergleicht diese mit dem Referenz-Modell CAFEC (*Climatologically Appropriate For Existing Conditions*) (Keyantash & Dracup, 2002). (Trotz seiner vielfachen Verwendung in ähnlichen Studien ist der PDSI für die vorliegende Studie verworfen worden, da CAFEC auf Klimadaten nordamerikanischer Gebiete beruht und somit als Referenz für Baden-Württemberg ggf. nicht angemessen ist.)

⁵ **SPI**: ein im Jahre 1993 von McKee (McKee, et al., 1993) entwickelter, multidisziplinärer (Meteorologie, Hydrologie, Landwirtschaft) Trockenheitsindex, der räumlich unabhängig sein und die Wichtigkeit der Dauer von Wasserangebot und -aufnahmen berücksichtigen soll (Guttmann, 1999). Die einzige Input-Variable ist die monatliche Niederschlagssumme, aus welcher mittels einer Wahrscheinlichkeits-Verteilungs-Gleichung die Index-Werte für jeden Monat berechnet werden, woraufhin sie anschließend für einzelne Perioden zusammengefasst werden können. (Aufgrund der räumlichen Unabhängigkeit, der zeitlichen Flexibilität, der Berechenbarkeit und hoher Korrelation mit den Zuwachsdaten, ist der SPI als Trockenheitsindex für die vorliegende Studie ausgewählt worden.)

⁶ **Idm**: ein im Jahre 1926 von deMartonne (deMartonne, 1926) entwickelter, meteorologischer und landwirtschaftlicher Trockenheitsindex, der auf Temperatur und Niederschlagsdaten basiert (Cernescu, 1934; Botzan, et al., 1998; Licada & Assimakopoulos, 2007; Paltineanu, et al., 2007; Paltineanu, et al., 2007). Der Idm wird auf der Basis der monatlichen Niederschlagssumme und der monatlichen Durchschnittstemperatur berechnet. (deMartonne, 1926). Er ist zwar räumlich unabhängiger als der PDSI, dabei jedoch räumlich sehr unspezifisch.

⁷ **CMIm**: ein im Jahre 2008 von Müller (Müller, et al., 2008) entwickelter, bodenabhängiger, meteorologischer und landwirtschaftlicher Trockenheitsindex. Mittels dieses Indexes kann das landwirtschaftliche Potenzial einzelner Regionen in Deutschland quantifiziert und die Regionen sollen nach Feuchtigkeit/Trockenheit in Klassen unterteilt werden, anhand derer die Sensitivität gegenüber Klimaänderungen ermittelt werden kann (*ebd.*). Die Berechnung dieses Indexes basiert auf den Input-Variablen jährliche Niederschlagssumme, mittleres jährliches Sättigungsdefizit am Mittag und nutzbarer Feldkapazität und basiert auf einem Wasser-Gehalts-Modell von J. und G. Müller (Müller & Müller, 1988a; Müller & Müller, 1988b; Müller & Müller, 1989). (Als Trockenheitsindex für die vorliegende Studie ist der CMIm ausgeschlossen worden, da die Korrelation mit den Zuwachsdaten des SPI höher war.)

Wo: x_p = Niederschlagssumme der Periode (in mm); x_m = durchschnittliche jährliche Niederschlagssumme (in mm); s = Standardabweichung.

Da die letztendlichen Auswirkungen dieser Faktoren auf die jährlichen Zuwächse jedoch von der Bodenbeschaffenheit ausschlaggebend beeinflusst werden können, wurden an jedem Standort Bodenprobe entnommen und, wenn möglich, ein Leit-Bodenprofil angelegt. Die Bodenproben wurden bis zu der tiefst möglichen Bodentiefe entnommen, sodass der Hauptwurzelraum in die Analyse einbezogen werden konnte. Die Proben wurden auf der Fläche mit einem Wurzelbohrer nach dem Zufallsprinzip entnommen. Anschließend wurden sie bei 40°C getrocknet, und im Labor Bodenart, Humusgehalt, Feinbodenanteil und Skelettanteil der einzelnen Standorte bestimmt. Auch die nutzbare Feldkapazität (nFk) der einzelnen Standorte wurde hergeleitet.

2.4 LITERATURRECHERCHE ZU MASTJAHREN

Ein weiterer Faktor, der bei Buchen häufig für Variation im Durchmesserzuwachs führt, ist ihre Fruchtbildung. Da dieser Faktor, aufgrund steigender Fruktifikationsfrequenz, besonders in den letzten Jahrzehnten eine zunehmende Rolle spielt (s. Kapitel 1), wurde Literatur aus dem Zeitraum 1970 bis 2014 analysiert, um die wichtigsten Fruktifikationsereignisse mit den Zuwachsdaten in einen zeitlichen Zusammenhang zu stellen. Allerdings war mit dem vorliegenden Quellen keine eindeutige Zuordnung von Fruchtjahren bzw. ihrer Ausprägung (z.B. Voll-, Spreng- oder Teilmasten) auf die untersuchten Standorte möglich, sodass die Informationen der Literaturrecherche nur qualitativ bei der Interpretation der Zuwachsdaten verwendet werden konnten.

2.5 BEZIEHUNGEN ZWISCHEN RADIALZUWACHS UND TROCKENHEITSINDIZES

Um witterungsbedingte Zuwachsschwankungen in den einzelnen Buchen-Beständen herauszuarbeiten, wurden für jeden Buchenbestand Zuwachs-Witterungs-Korrelationskoeffizienten berechnet. Diese wurden, mittels Bootstrapping, für standardisierte Chronologien der Grundflächenzuwächse berechnet. Die Korrelationskoeffizienten wurden mit dem DENDROCLIM-Programm (Biondi & Waikul, 2004)⁸ jeweils getrennt nach Standorten und nach Stammhöhen für den Zeitraum 1973 bis 2002 für einmonatige, dreimonatige, sechsmonatige, achtmonatige und zwölfmonatige Perioden des Vorjahrs und des laufenden Jahres ermittelt.

⁸ Ein Programm zur Berechnung verschiedener Witterungs-Zuwachs-Verhältnisse, u. a. die Klima-Zuwachs-Daten-Korrelationskoeffizienten mittels Bootstrapping für mindestens 30-jährige Zeitreihen. Für weitere Details s. (Biondi & Waikul, 2004).

2.6 IDENTIFIKATION VON TROCKENHEITSEREIGNISSEN

Eine Standardmethode zur die Identifizierung von Trockenjahren gibt es für Jahrringchronologien nicht. Grundsätzlich können Trockenjahre jedoch anhand von Klimaaufzeichnungen erkannt werden, wobei jedoch die Gefahr besteht, dass lokale Klima-Besonderheiten übersehen werden. Diese Gefahr besteht nicht, wenn Trockenheiten basierend auf signifikanten Zuwachseinbrüchen der Jahrringchronologien ausgemacht werden. Dabei können jedoch Jahre als Trockenjahr identifiziert werden, die aufgrund anderer Einflüsse zu einem Zuwachseinbruch geführt haben (z. B. Mastjahre bei Buchen). Da somit beide Vorgehensweisen Nachteile haben, wurde hier eine Kombination der beiden Ansätze gewählt. Daher sind in die Trockenreaktionsanalyse für die vorliegende Studie diejenigen Jahre als Trockenjahre eingeflossen, bei denen der SPI für Juni bis August des jeweiligen laufenden Jahres unter $-0,5$ lag. Dieser SPI-Wert gilt als Grenze zwischen noch humiden Bedingungen ($>-0,5$) und Trockenheit ($<-0,5$)⁹ (McKee, et al., 1993; Guttman, 1999). Darüber hinaus wurden die Jahre bei der Trockenheitsanalyse berücksichtigt, bei denen es eine Reduktion des GZ-Einbruchs von mindestens zehn Prozent gegenüber dem Mittelwert der jeweiligen drei Vorjahre gab. Längere Vorjahresperioden sollten nicht berücksichtigt werden, da diese durch die sich mittelfristig auswirkenden Durchforstungseffekte überlagert sein könnten (Sohn, et al., 2016). Dieser Grenzwert von zehn Prozent hat sich in ähnlichen Studien bewährt (z. B. (Sohn, et al., 2016; Lebourgeois, et al., 2005) und wurde aus diesem Grunde und für eine gute Vergleichbarkeit ähnlicher Studien untereinander für die Daten der vorliegenden Studie tabellarisch dargestellt. In die Berechnung der statistischen Modelle (s. Kapitel 2.5) wurde im Rahmen der vorliegenden Studie die Methode der Identifikation der Trockenjahre über den Trockenheitsindex gewählt, da hierbei auch leichte Trockenheit berücksichtigt werden sollte, die in den Zuwächsen u. U. nicht zu 10 Prozentigen Einbrüchen geführt hatte.

2.7 ANALYSE VON DURCHFORSTUNGSEFFEKTEN AUF ZUWÄCHSE WÄHREND UND NACH TROCKENJAHREN

Um die Effekte von Durchforstungseingriffen auf die Trockenheitsreaktion der Probebäume zu testen, wurde das Lloret-Konzept (Lloret, et al., 2011) angewandt, da sich dieses in zahlreichen Studien (Kohler, et al., 2010; Sohn, et al., 2016) bereits bewährt hat. Demnach wird die Zuwachsreaktion unterteilt in Resistenz (*res*), Erholung (*rec*) und Resilienz (*rel*). *Res*, *rec* und *rel* sind hierbei wie folgt berechnet worden:

$$res = \frac{GZ_{TJ}}{GZ_{pre}}$$

$$rec = \frac{GZ_{post}}{GZ_{TJ}}$$

⁹ SPI-Trockenheitsklassen: $-0,5$ bis $-0,79$ = schwache Trockenheit; $-0,8$ bis $-1,29$ = moderate Trockenheit; $-1,3$ bis $-1,59$ = starke Trockenheit; $-1,6$ bis $-1,99$ = extreme Trockenheit; <-2 = außergewöhnliche Trockenheit (McKee, et al., 1993).

$$rel = \frac{GZ_post}{GZ_pre}$$

Wobei: GZ_TJ ist der GZ-Wert Trockenjahr (TJ), GZ_pre ist der mittlere GZ-Wert der vier Vortrockenjahre und GZ_post ist der mittlere GZ-Wert der vier Nachtrockenjahre. Hierbei wurden vier Vor- und Nachtrockenjahre einbezogen, da bei einer kürzeren Vor- bzw. Nachtrockenheitsperiode das Risiko von Verzerrungen durch Ausnahmejahre und bei längeren Perioden das Risiko von Effekten des Alterstrends zu hoch wäre.

Da mehrere Trockenjahre aller Standorte in die Lloret-Berechnungen eingingen, konnten Variablen wie Zeitspanne zwischen erstem Durchforstungseingriff und Trockenjahr, Bestandesalter zum Zeitpunkt der Trockenheit, Schwere der Trockenheit und Durchforstungsintensität bei der Berechnung der Modelle einfließen. Bei der Modellierung wurde im ersten Schritt mit einem Generalisierten Linearen Modell (GLM) die Variabilität der Zielgrößen untersucht:

$Res \sim area + treat + SPI3 + dt$;

$Rec \sim area + treat + SPI3 + dt$;

$Rel \sim area + treat + SPI3 + dt$.

In Fällen, in denen die Berücksichtigung von zufälligen Effekten auf der Parzellenebene (plot) zu einer signifikanten Modellverbesserung führte, kamen lineare gemischte Modelle (LMM) zum Einsatz:

$res \sim area + treat + SPI3 + dt, random = \sim 1 | plot$.

$rec \sim area + treat + SPI3 + dt, random = \sim 1 | plot$.

$rel \sim area + treat + SPI3 + dt, random = \sim 1 | plot$.

Wobei Res = Resistenz; rec = Erholung; rel = Resilienz; $area$ = Wuchsgebiet; $treat$ = Durchforstungsart; $SPI3$ = Trockenheitsindex SPI bezogen auf Juni bis August des laufenden Jahres; dt = Zeitspanne zwischen dem ersten Durchforstungseingriff und dem Trockenjahr; $random = \sim 1 | plot$ bedeutet, dass die Parzelle als Variable mit zufälligen Effekten in das Modell einging

Konnte keine signifikante Modellverbesserung durch die Berücksichtigung zufälliger Effekte auf der Ebene der Parzelle festgestellt werden, wurden ausschließlich GLM zur Modellbildung eingesetzt. Diesem Vorgehen liegt zugrunde, dass zwar die Wahl der Standorte im Rahmen der vorliegenden Studie nicht zufällig war (es wurden bewusst jeweils zwei ähnliche Standorte pro Wuchsgebiet gewählt, s. Kapitel 2.1), die Vorgehensweise bei der Wahl der Parzellen (=Plots) innerhalb eines jeden Standortes jedoch als zufällig bezeichnet werden kann, da hierbei auf keine weiteren Umweltfaktoren eingegangen wurde. Die Modellauswahl erfolgte anhand des Akaike-Informationskriteriums (AIC) (Akaike, 1974).

3 Ergebnisse

3.1 IDENTIFIKATION VON TROCKENJAHREN

Tatsächlich führten die beiden unterschiedlichen Vorgehensweise der Identifikation von Trockenjahren (s. Kapitel 2.4) zu unterschiedlichen Ergebnissen (Tab. 3): Aufgrund des SPIs sind 10 Trockenjahre (beide Wuchsgebiete zusammengenommen) identifiziert worden. Aufgrund der Zuwachsreduktion des Radialwachstums wurden hingegen 18 Jahre mit einem Zuwachseinbruch <10% identifiziert (alle Bestände zusammengenommen). Wurden beide Methoden kombiniert, wurden sieben dieser Jahre als Trockenjahre identifiziert. In die statistische Modellierung (GLMs und LLMs) wurden lediglich die durch den SPI identifizierten Trockenjahre mit einbezogen, um nicht-trockenheits-induzierte Zuwachseinbrüche in der Datenauswertung mit größtmöglicher Sicherheit auszuschließen.

Tabelle 3 Überblick über die Identifikation der Trockenjahre (*linke Spalte*), unterteilt nach Parzellen (*2. Spalte v. l. - 9. Spalte v. l.*) und Trockenheitsindizes (*1. und 2. Spalte v. r.*).

TJ	Reduktion des Grundflächenzuwachses (>10% gegenüber dem Wert der 3 Vorjahre)								SPI < -0,5	
	ave 230-2	ave 230-1	ave225-2	ave 225-1	ave 224-2	ave 224-1	ave 226-1	ave 226-2	NL	SA
1976	0.689	0.667	0.556	0.524	0.559	0.638	0.401	0.529	-2.2	-2.1
1981			0.804	0.882				0.822	-0.500	-1.400
1983		0.805		0.882		0.891	0.756	0.636	-2.400	-2.600
1984		0.856					0.658	0.737		
1985							0.821	0.767	-0.500	-0.500
1990									-0.500	-0.900
1991		0.887			0.788	0.886	0.597	0.702	-1.100	-1.200
1992		0.847				0.893		0.855		
1995	0.783	0.832	0.692	0.749		0.780	0.634	0.688		
1996			0.761	0.736			0.549	0.643		
1998									-1.4	
2000		0.866	0.820		0.834		0.874	0.707		
2001									-0.5	-1.3
2003	0.879	0.852	0.895		0.837	0.759	0.647	0.792	-2.000	-1.900
2004	0.707	0.978	0.635	0.687	0.443	0.700				-0.7
2005	0.892	0.980						0.856		
2006	0.812	0.745					0.725	0.797		
2009	0.991	1.172	0.758	0.780			0.723			
2010	0.810	0.913	0.781	0.858	0.819	0.656	0.649	0.472		
2011	0.397	0.507	0.564	0.624	0.537	0.629	0.363	0.465		
2014	0.867	0.863					0.776			

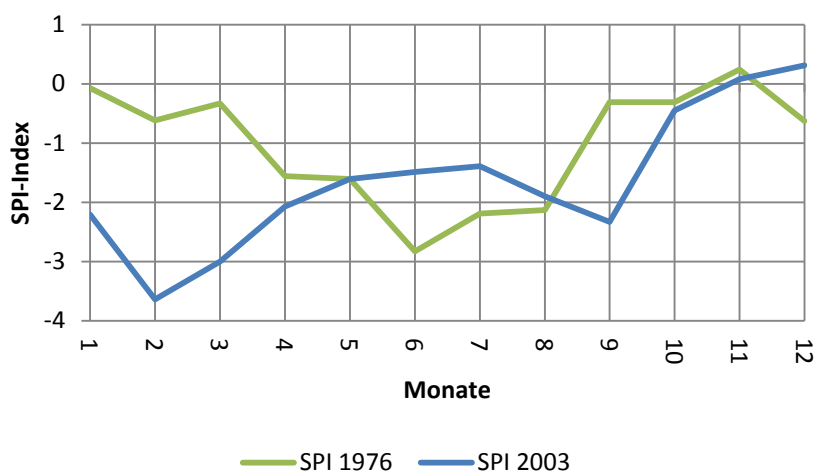


Abbildung 3 Verlauf der Trockenheit (laufender SPI für drei Monate) in den Weiserjahren 1976 und 2003. Je negativer der SPI-Wert (*Y-Achse*), desto trockener der Monat (*X-Achse*).

Der Verlauf der Trockenheit in den verschiedenen Trockenjahren war relativ unterschiedlich. So war in manchen Jahren der Anfang der Vegetationsperiode (März/April bis September) und in anderen Jahren eher die zweite Hälfte der Vegetationsperiode besonders trocken, wie dies beispielhaft für das Wuchsgebiet Schwäbische Alb in Abb. 3 dargestellt ist.

Der durchschnittliche Radialzuwachs der untersuchten vor- und mitherrschenden Buchen lag je nach Parzelle bis 1970 zwischen 1,7 bis 3,2 mm/a, wobei sich die damals zukünftigen Altherr- und Assmann-Bestände noch nicht nach Durchforstungsarten unterscheiden ließen: der durchschnittliche Radialzuwachs des untersuchten Baumkollektivs in zukünftigen Altherr-Beständen lag bei 2,26 mm/a und in zukünftigen Assmann-Beständen bei 2,28 mm/a. Die durchschnittlichen Zuwachsraten im Zeitraum nach Beginn der Durchforstungseingriffe (1971 bis 1990) zeigten dagegen einen leichten Unterschied im Radialwachstum zwischen den stark (durchschnittlich 3,19 mm/a) und den moderat (durchschnittlich 2,52 mm/a) durchforsteten Parzellen. Nach diesem Zeitraum blieb dieser Unterschied bestehen (Altherr: durchschnittlich 3,0 mm/a; Assmann 2,45 mm/a) und auch in der aktuellen Periode lassen sich die Radialzuwächse der untersuchten Buchen nach Durchforstungsart unterscheiden (Altherr: 2,73; Assmann: 2,17 mm/a). Darüber hinaus ist ein leichter Unterschied zwischen den beiden Wuchsgebieten ersichtlich: während die durchschnittlichen Radialzuwächse auf der Schwäbischen Alb bei 2,38 mm/a lagen, waren es im Neckarland 2,77. In Tab. 4 sind die Radialzuwächse, die den oben genannten Durchschnittswerten zugrunde liegen, auf der Ebene der einzelnen Parzellen dargestellt.

Parzelle	Durchschnittlicher Radialzuwachs (mm/a), unterteilt nach Perioden			
	1910-1970	1971-1990	1991-2000	2001-2014
226_ALT	2,26	3,05	2,75	2,62
226_ASS	1,98	2,41	1,96	1,98
230_ALT	2,06	2,75	2,52	2,22
230_ASS	2,24	2,40	2,76	2,16
225_ALT	2,58	3,57	3,49	3,24
225_ASS	3,18	2,64	2,52	2,26
224_ALT	2,17	3,42	3,27	2,84
224_ASS	1,74	2,65	2,56	2,28

Tabelle 4 Durchschnittliche Radialzuwächse (mm/a) des untersuchten Baumkollektivs innerhalb der Perioden vor den Durchforstungseingriffen (1910-1970), während und kurz nach den Eingriffen (1971 bis 1990), nach den Eingriffen für die Perioden 1991-2000 und 2001-2014, dargestellt für die Standorte 224 und 225 im Neckarland und 226 und 230 auf der Schwäbischen Alb für jeweils die beiden Durchforstungsvarianten Altherr (ALT) und Assmann (ASS).

3.2 ZUWACHSEINBRUCH UND SPI

Die Zuwachschronologien zeichnen den Verlauf des Trockenheitsindex SPI₃ in beiden Wuchsgebieten nach. Das Trockenjahr 1976 ist in beiden Wuchsgebieten und Durchforstungsarten als deutlicher Einbruch sichtbar, das extreme Trockenjahr 2003 hingegen äußerte sich in den meisten Zuwachschronologien mit einem Zuwachseinbruch im Folgejahr (Abb. 4).

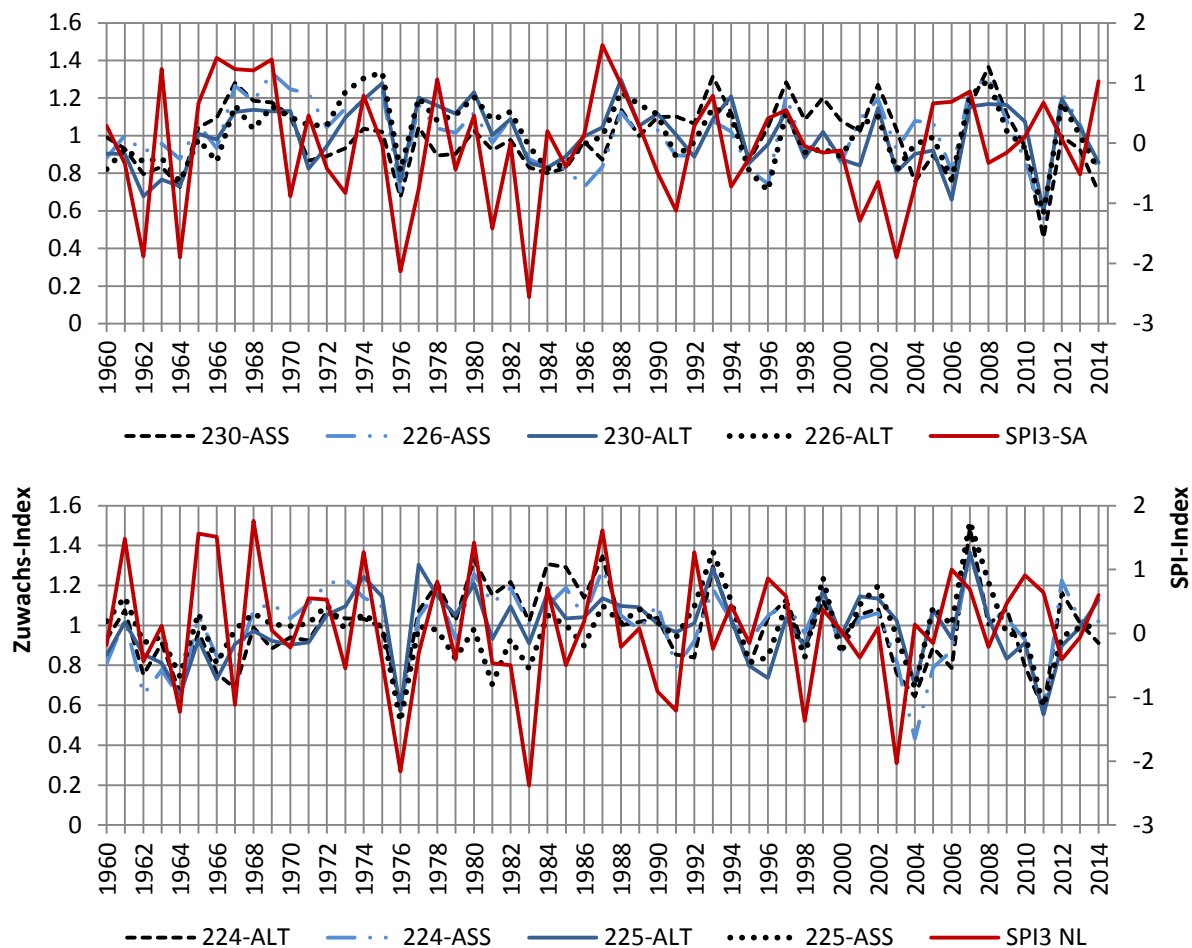


Abbildung 4 Die mittleren standardisierten Zuwachschronologien (linke Y-Achse) der Altherr (ALT)- und der Assmann (ASS)-Plots dargestellt mit der entsprechenden Zeitreihe des SPI₃ (rechte Y-Achse) für die Periode 1960 bis 2014. *Oben:* Neckarland (NL). *Unten:* Schwäbischen Alb (SA).

3.3 KLIMATISCHE SENSITIVITÄT (KORRELATIONSANALYSEN)

Die Korrelationsanalysen zeigten, dass die Bestände auf der Schwäbischen Alb empfindlicher auf hohe Maximaltemperaturen und die Bestände im Neckarland auf verringerte Niederschlagssummen reagierten (Tab. 5). Die Unterschiede zwischen den beiden Wuchsgebieten waren sehr deutlich. Die Unterschiede zwischen den beiden Durchforstungsarten waren hingegen klein. Die nach Assmann durchforsteten Flächen zeigten gerade im Neckarland eine höhere Sensitivität gegenüber Niederschlagsarmut (Summe der Korrelationen für Niederschlag im Neckarland: Assmann=2,3; Altherr =1,2). Dagegen wiesen die nach Altherr durchforsteten Parzellen eine höhere Sensibilität gegenüber Extremtemperaturen im Neckarland auf (Summe der Korrelationen für Maximaltemperatur im Neckarland: Altherr = 1,0; Assmann = 0) (s. Tab. 5).

Die verschiedenen Stammhöhen (Brusthöhe, Stammmitte und Kronenansatz) zeigten keine Unterschiede hinsichtlich ihrer Witterungssensitivität. Bei allen Höhen zeigte sich jedoch eine deutlich höhere Sensitivität gegenüber der Vorjahreswitterung als gegenüber zur Witterung des laufenden Jahres (s. Tab. 6).

		SA		NL	
		ALT	ASS	ALT	ASS
Nied.Schlg.	-1				
	-6		-0.40		
	-9		0.39		
	-10		0.35		
	-11		0.50	0.30	0.50
	-12	0.45	0.43		0.37
	6				0.43
	7			0.43	0.49
	8	0.33		0.49	0.54
	Tmax	-3			-0.30
-4				-0.29	
-6			0.28		
-8		-0.46			
-9		-0.55	-0.38	-0.45	
-10		-0.58			
-11		-0.46	-0.35		
2			0.32		
3			0.49		
4			0.39		
5		0.30			
8	-0.32	-0.30			
SPI3	-6		-0.39		
	-9		0.38		
	-10		0.36		
	-11	0.38	0.53		0.53
	-12	0.48	0.46		0.39
	6			0.48	0.52
	7			0.45	0.53
	8	0.34		0.52	0.58

Tabelle 5 Signifikante (0.3 bis 0.4 bzw. -0.3 bis -0.4, helle Hinterlegung) und stark signifikante (<-0.4 bzw. >0.4, dunkle Hinterlegung) Korrelationskoeffizienten zwischen den zeitlichen Verläufen monatlicher Witterungsgrößen bzw. Trockheitsindizes (SPI) und den standardisierten Grundflächenzuwächsen für die unterschiedlichen Wuchsgebiete Neckarland (NL) und Schwäbische Alb (SA) sowie Durchforstungsvarianten Altherr (ALT) und Assmann (ASS). Die Monate des Vorjahres sind mit einem „-“, gekennzeichnet, während die des laufenden Jahres kein Vorzeichen haben (Zah-

Tabelle 6 Signifikante (0.3 bis 0.4 bzw. -0.3 bis -0.4, helle Hinterlegung) und stark signifikante (<-0.4 bzw. >0.4, dunkle Hinterlegung) Korrelationskoeffizienten zwischen den zeitlichen Verläufen monatlicher Witterungsgrößen bzw. Trockenheitsindizes (SPI) und den standardisierten GZ für die unterschiedlichen Durchforstungen Altherr (ALT und Assmann (ASS) und Höhen (Höhe) Brusthöhe (dbh), Stammmitthöhe (mid) und Kronenansatzhöhe (ch). Die Monate des Vorjahres sind mit einem „-“, gekennzeichnet, während die des laufenden Jahres kein Vorzeichen haben (Zahlen in der obersten Zeile).

Klima-Parameter	Behandlung	Höhe	-3	-5	-6	-7	-8	-9	-10	-11	-12	2	3	4	6	7	8	
SPI3	ALT	dbh									0.41							
		mid																
		ch				0.31												0.37
	ASS	dbh																
		mid										0.38						
		ch																
Tmin	ALT	dbh				-0.35	-0.38	-0.36	-0.37									
		mid				-0.39	-0.44	-0.41	-0.40			0.32	0.38		-0.35	-0.35		
		ch		-0.36		-0.38	-0.47	-0.48	-0.49	-0.39								
	ASS	dbh			-0.33	-0.44	-0.47	-0.46	-0.40				0.35			-0.41	-0.36	
		mid				-0.43	-0.44	-0.44	-0.41				0.36					
		ch		-0.38	-0.40	-0.50	-0.48	-0.47	-0.41									
Tmax	ALT	dbh					-0.42	-0.48	-0.53	-0.37			0.34					
		mid					-0.40	-0.49	-0.47	-0.37		0.34	0.43					
		ch		-0.37			-0.48	-0.55	-0.45									
	ASS	dbh					-0.42	-0.58	-0.52									-0.30
		mid					-0.35	-0.57	-0.51	-0.34		0.34	0.48	0.37				
		ch					-0.41	-0.56	-0.45				0.38					
Nied.Schlg.	ALT	dbh									0.44							
		mid					0.38				0.36							
		ch				0.33	0.41	0.36										0.37
	ASS	dbh						0.34	0.33	0.34								
		mid						0.34			0.40							
		ch					0.37	0.37			0.38			0.33				

3.4 MASTJAHRE

Die zu den Mastjahren in den Wuchsgebieten Neckarland und Schwäbische Alb gefundene Literatur ist erst seit den 1990er Jahren ausreichend spezifisch. In den Jahren 1988 bis 2010 hat im Schnitt alle 2,6 Jahre eine Mast stattgefunden (Innes, 1994). Die Beschreibungen früherer Mastjahre sind nicht präzise und übereinstimmend genug in Hinsicht auf Intensität, Zeitpunkt und Region der jeweiligen Mast (Tab. 7). Von einer Miteinbeziehung der aus der Literaturrecherche gewonnenen Fruktifikations-Daten in die GLMs- und LLMs-Berechnungen wurde daher abgesehen. Grundsätzlich wurde in der Literatur die These unterstützt, dass Zusammenhänge zwischen der Witterung und der Fruktifikation bei Buchen bestehen (Paar, et al., 2011). Demnach fördern warm-trockene Sommer im Vorjahr die Blütenbildung; und feucht-kühle Witterung scheint die Fruchtbildung voranzutreiben.

Tabelle 7 Darstellung der Mastereignisse in der Periode vom dem Zeitpunkt der ersten Durchforstungseingriffe (1970) bis 2015 mit der Intensität der Mast (wenn angegeben) und den Veröffentlichungen. Mit „*“ gekennzeichnete Veröffentlichungen sind nicht aus Baden-Württemberg und daher wenig aussagekräftig im Zusammenhang mit der vorliegenden Studie.

Jahr	Intensität	Autor
1970	n. a.	Hacket-Pain (2015)*
1976	n.a.	Hacket-Pain (2015)*
1980	n.a.	Hacket-Pain (2015)*
1982	n.a.	Hacket-Pain (2015)*
1983	n. a. / >150 Eckern/m ²	Paar et al. (2011), Schmidt (2005)*
1984	>150 Eckern/m ²	Hacket-Pain (2015)*
1987	Mittel-stark: 34-90% / >150 Eckern/m ²	Paar et al. (2011)*, Schmidt (2005)*
1990	Mittel-stark: 34-90% / >300 Eckern/m ² / n. a. / n. a.	Paar et al. (2011)*, Schmidt (2005)*, Lüschna (1990), Hacket-Pain (2015)*
1992	Mittel-stark: 34-90% / >300 Eckern/m ²	Paar et al. (2011)*, Schmidt (2005)*
1995	Mittel-stark: 34-90% / >786 Eckern/m ² / n. a.	Paar et al. (2011)*, Schmidt (2005)*, Hacket-Pain (2015)*
1998	n. a.	Paar et al. (2011)*, Eichhorn (2008)*
2000	n.a / >150 Eckern/m ² / n. a. / n. a.	Eichhorn (2008)*, Schmidt (2005)*, Paar et al. (2011), Hacket-Pain (2015)*
2002	n. a.	Hacket-Pain (2015)*
2004	stark : 6%, mittel: 21%, schwach: 55% / >150 Eckern/m ² / n. a. / n. a. / n. a. / n. a.	Meining et al. (2004), Schmidt (2005)*, Paar et al. (2011)*, Eichhorn (2008)*, Mund (2010)*, Hacket-Pain (2015)*
2006	stark: 50%, mittel: 50%	Mund (2010)*
2009	stark 20%, mittel: 50%, schwach: 20%	Meining et al. (2009)
2011	stark: 20%, mittel: 50%, schwach: 20%	Meining et al. (2011)
2013	n. a.	Meining (2013)
2014	stark: 6%, mittel: 21%, schwach: 55% (stark verschlechterter Kronenzustand auf Schwäb. Alb und Neckarland)	Meining (2014)

3.5 EFFEKTE VON DURCHFORSTUNGSART, BESTANDEALTER UND INTENSITÄT DER TROCKENHEIT AUF DIE TROCKENSTRESSREAKTIONEN

Die Berücksichtigung von zufälligen Effekten auf Plot-Ebene führte nur für die Resilienz zu einer signifikanten Modellverbesserung. Die statistische Analyse erfolgte daher für die Resistenz und Erholung ausschließlich mit Generalisierten Linearen Modellen (GLM). Für die Resistenz wurden dagegen auch Gemischte Lineare Modell (LMM) verwendet.

Die in Tab. 8 aufgeführten Ergebnisse der statistischen Analysen zeigen, dass der Trockenheitsindex (SPI) und das Wuchsgebiet, nicht aber die Durchforstungsart oder die Zeitspanne zwischen der ersten Durchforstung und dem Trockenjahr einen signifikanten Einfluss auf die **Resistenz** des Jahrringwachstums während der Trockenheiten hatten.

Die Erholung der Grundflächenzuwächse nach dem Trockenjahr wurde von den Variablen Wuchsgebiet, der Intensität des Trockenheit (SPI) und der Zeitspanne zwischen der ersten Durchforstung und dem jeweiligen

Trockenjahr (Variable *time from first thinning*) hoch signifikant beeinflusst. Das negative Vorzeichen des Wertes dieser Variablen bedeutet, dass die Erholung mit zunehmender Zeitspanne zwischen erster Durchforstung und jeweiligem Trockenheitsereignis geringer wird. Um zu überprüfen, ob der Zusammenhang zwischen Erholung und dem Zeitraum seit der ersten Durchforstung möglicherweise ein Effekt des Bestandesalters ist, wurde in einem weiteren Modell auch die Variable *stand age* geprüft, welche allerdings keinen signifikanten Beitrag zur Erklärung der Variabilität der Erholung der Grundflächenzuwächse nach Trockenjahren lieferte.

Auch bei der statistischen Analyse der **Resilienz** der Grundflächenzuwächse konnte kein Effekt der Durchforstungsart, allerdings - wie bereits bei der Erholung der Zuwächse – ein signifikanter Einfluss des Wuchsgebietes, der Intensität der Trockenheit sowie des Zeitraums zwischen erster Durchforstung und Trockenjahr beobachtet werden.

Die oben genannten Ergebnisse basieren auf der statistischen Analyse unter Berücksichtigung aller vorliegenden Intensitäten von Trockenheiten (ca. 700 Datensätze). In einem weiteren Schritt wurde daher geprüft, welche Veränderungen sich ergeben, wenn für die statistische Analyse ausschließlich starke bis extreme Trockenheiten berücksichtigt werden (ca. 300 Datensätze). Wie aus Tab. 8 hervorgeht, konnte auch in diesem Fall für keine der Lloret-Variablen ein signifikanter Effekt der Durchforstungsart festgestellt werden. Allerdings wurde wiederum ein negativer Effekt einer zunehmenden Zeitspanne zwischen der ersten Durchforstung und einem Trockenjahr auf die Erholung und Resilienz der Grundflächenzuwächse beobachtet.

Tabelle 8 Ergebnisse der statistischen Analyse von Resistenz, Erholung und Resilienz der Grundflächenzuwächse mit Generalisierten Linearen Modellen (GLM) und Linearen Gemischten Modellen (LMM). Die Modell-Ergebnisse beziehen sich auf Trockenjahre die nach dem SPI_{Juni bis August} mild bis extrem (graue Hinterlegung) bzw. stark bis extrem waren (rechts, ohne farbliche Hinterlegung.) LMM wurden nur dann verwendet, wenn der zufällige Effekt auf Plot-Ebene signifikant zur Modellverbesserung beitrug (dies war nur für die Resistenz der Fall).

Lloret- Variable	Modell	Trockenjahre ab milder Trockenheit (SPI3 = <0,5)		Trockenjahre ab starker Trockenheit (SPI3 = <-1,3)		
		Variable	Wert	p-Wert	Wert	p-Wert
Resistenz	GLM mit restricted maximum likelihood (ohne zufällige Effekte)	area	0.044	0.039**	-0.031	0.242
		treat	0.02	0.339	0.013	0.242
		SPI3	0.125	0.000***	0.131	0.000***
		time from first thinning	0.0004	0.754	0.005	0.000***
	Random effect signifikant? (ANOVA Likelihood)	nein	0.928	nein	0.202	
Erholung	GLM mit restricted maximum likelihood (ohne zufällige Effekte)	area	-0.195	0.000***	-0.193	0.000***
		treat	-0.032	0.386	-0.099	0.066
		SPI3	-0.105	0.000***	-0.066	0.344
		time from first thinning	-0.005	0.012*	-0.019	0.000***
	Random effect signifikant? (ANOVA Likelihood)	nein	0.999	nein	0.999	
Erholung	GLM mit restricted maximum likelihood (ohne zufällige Effekte)	area	-167	0.000***		
		treat	-0.029	0.428		
		SPI3	-0.12	0.000***		
		stand.age	-0.002	0.164		
	Random effect signifikant? (ANOVA Likelihood)	nein	0.999			
Resilienz	GLM mit restricted maximum likelihood (ohne zufällige Effekte)	area	-0.146	0.000***	-0.237	0.000***
		treat	0.026	0.171	-0.08	0.005**
		SPI3	0.021	0.060*	0.061	0.101
		time from first thinning	-0.002	0.064*	-0.004	0.003**
	Random effect signifikant? (ANOVA Likelihood)	ja	0.049**	ja	0.013*	
Resilienz	LMM mit plot als zufälliger Faktor	area	-0.142	0.007**	-0.232	0.006**
		treat	-0.028	0.425	-0.09	0.138
		SPI3	0.022	0.055*	0.063	0.083
		time from first thinning	-0.002	0.055*	-0.004	0.000***

Res, Rec & Rel: Gruppen: Standort = 4, Plot = 8; Trockenjahre = 11 & 6; Signifikanzkennzeichen: ***für p<0,0001; **für p<0,05; *für p<0,1.

4 Diskussion

4.1 ÜBERBLICK

In der vorliegenden Studie wurden die Effekte von Durchforstungsintensität, Bestandesalter und Witterung auf das Radialwachstum einzelner Buchen vor, während und nach ausgeprägten Trockenjahren untersucht. Die Arbeitshypothesen besagten, dass die Resistenz von vor- und mitherrschenden Buchen in stark durchforsteten Buchenbeständen höher ist als in mäßig durchforsteten Beständen (H1); dass die Erholung bzw. Resilienz von vor- und mitherrschenden Buchen in stark durchforsteten Buchenbeständen höher ist als in mäßig durchforsteten Beständen (H2); dass Resistenz, Erholung und Resilienz durch die Dauer des Zeitraumes zwischen Durchforstung und Trockenjahr beeinflusst werden (H3) und, dass die Messung des Radialzuwachses in Brusthöhe ein geeigneter Proxy für die Beurteilung der Witterungssensitivität und der Trockenstressreaktion ist (H4).

Die Hauptergebnisse waren, dass sich die erste Durchforstung positiv auf die Erholung des Radialwachstums nach Trockenheit auswirkt, dieser Effekt mit zunehmender Zeitspanne zwischen Durchforstung und Trockenheit aber geringer wird. Dabei schien die Art des Eingriffes (Assmann oder Altherr) eine untergeordnete Rolle zu spielen. Die Resistenz dagegen war in erster Linie beeinflusst durch die Intensität der Trockenheit und das Wuchsgebiet, wobei die Neckarland-Bestände etwas höhere Resistenzen zeigten.

Die Resilienz war maßgeblich abhängig vom Wuchsgebiet, wobei die Neckarland-Bestände insgesamt zu einem etwas höheren jährlichen Zuwachs tendierten. Darüber hinaus neigten die untersuchten Buchen der stark durchforsteten Bestände zu einem höheren jährlichen Radialzuwachs als jene der moderat durchforsteten Bestände, wie dies in anderen Studien bereits gezeigt wurde (Diaconu, et al., 2015).

4.2 KLIMASENSITIVITÄT

4.2.1 EINFLUSS VON STANDORT UND DURCHFORSTUNGSART

Die zeitlichen Verläufe des Grundflächenzuwachses folgten weitgehend den Verläufen des Trockenheitsindex'. Die beiden Weiserjahre 1976 (mittlerer Zuwachseinbruch bei 50 Prozent gegenüber den drei Jahren vor der Trockenheit) und 2003 bewirkten die stärksten Zuwachsreduktionen in beiden Wuchsgebieten und Durchforstungsarten. Das Jahr 2003 (mittlerer Zuwachseinbruch von 20 Prozent gegenüber den drei Jahren vor der Trockenheit) hatte einen starken Zuwachseinbruch im Folgejahr 2004 (mittlerer Zuwachseinbruch bei 30 Prozent gegenüber den drei Jahren vor der Trockenheit) bewirkt. Dies könnte sowohl am späten Zeitpunkt der Trockenheit im Verlauf des Jahres 2003 liegen als auch an der Tatsache, dass es auch im Sommer 2004 eine leichte Trockenheit und eine starke Fruktifikation (Halbmast) gab (Meining, et al., 2004). So lässt sich auch der Zuwachseinbruch 2011 mit der Kombination aus leichter Trockenheit und Buchen-Vollmast in Baden-Württemberg erklären.

Die Bestände auf der Schwäbischen Alb reagierten sensibler als die Bestände im Neckarland auf hohe Maximaltemperaturen (in der Periode 1973 bis 2002). Dies könnte daran liegen, dass diese Bestände an frischeres Klima angepasst und daher besonders empfindlich gegenüber Hitze sind (Collin, 2016). Die Bestände im Neckarland reagierten dagegen sensitiver auf verringerte Niederschlagssummen (in derselben Periode), was damit zusammenhängen könnte, dass die Jahresniederschlagssummen auf diesem Standort auch in klimatischen Normaljahren für Buchen relativ niedrig sind. Die Unterschiede zwischen den beiden Wuchsgebieten sind demnach sehr deutlich.

Die Unterschiede zwischen den beiden Durchforstungsarten waren hingegen gering. Die nach Assmann durchforsteten Bestände zeigten, gerade im Neckarland, eine etwas höhere Sensitivität gegenüber Niederschlagsarmut (Summe der Korrelationen für Niederschlag im Neckarland: Assmann=2,3; Altherr =1,2). Dieses Ergebnis stimmt überein mit dem Ergebnis einer vorherigen Studie, wo die stärkere Durchforstungsart dazu beiträgt, dass Buchen auf wärmeren Standorten bessere Zuwächse haben (Diaconu, et al., 2015). Dagegen wiesen die Altherr-Bestände eine höhere Sensitivität gegenüber Extremtemperaturen im Neckarland auf (Summe der Korrelationen für Maximaltemperatur im Neckarland: Altherr = 1,0; Assmann = 0). Über die Ursachen kann man hier nur spekulieren. Möglicherweise reagieren die freigestellten, groß-kronigen Bäume besonders stark auf den höheren Transpirationsstress.

4.2.2 EINFLUSS DER STAMMHÖHE AUF TROCKENSTRESSREAKTION DES RADIALWACHSTUMS

Die Witterungssensitivität an den drei Stammhöhen (Brusthöhe, Stammmitte und Kronenansatz) nicht signifikant unterschiedlich. Dieses Ergebnis entspricht nicht den Ergebnissen einer früheren Studie zur Klimasensitivität des Radialwachstums in verschiedenen Stammhöhen bei Fichte (*Picea abies*) (Sohn, et al., 2012). Darüber hinaus erwähnenswert ist, dass die Witterungsverhältnisse des Vorjahres maßgeblichen Einfluss auf die Zuwächse im Betrachtungsjahr zu haben scheinen.

4.2.3 EFFEKTE AUF DIE TROCKENSTRESSREAKTIONEN

Da die Resistenz des Radialwachstums maßgeblich durch den SPI und dem Wuchsgebiet beeinflusst wurde, ist davon auszugehen, dass sie durch Durchforstungsmaßnahmen nicht verbessert werden kann. Die erste Hypothese konnte somit verworfen werden. Dieser Befund wird auch durch die Untersuchungen für Fichte und Kiefer (Sohn, et al., 2016; Kohler, et al., 2010) bestätigt.

Auch die Erholung des Radialwachstums reagierte signifikant auf die Variablen Wuchsgebiet und SPI3, wobei der Faktor Wuchsgebiet eine deutlich wichtigere Rolle zu spielen scheint. Darüber hinaus konnte die Erholung durch Durchforstungseingriffe verbessert werden, wenn diese nicht zu weit in der Vergangenheit zurück lagen. Hierbei spielte die Intensität der Durchforstungseingriffe eine untergeordnete Rolle. Diese Ergebnisse entsprechen weiteren Studien, in denen Durchforstungseingriffe unter bestimmten Voraussetzungen (hoher Frequenz und Intensität bei der Kiefer (Sohn, et al., 2016; Kohler, et al., 2010), intensiv und auf warmen Standorten bei der Buche (Diaconu, et al., 2015)) die Trockenstressreaktion von Bäumen verbessert haben. Die Erholung kann entweder durch höhere Mengen eingelagerter Reservestoffe der durch Durchfors-

tung geförderten Bäume oder durch ihre größeren Kronen- und Wurzelsysteme befördert werden, die es ihnen erlauben schneller auf günstigere Bedingungen nach Trockenheit zu reagieren.

5 Schlussfolgerungen

Dies ist eine der ersten Studien, in der mitteleuropäische Buchenbestände auf die Effekte von Durchforstungseingriffen auf die Trockenstressreaktion untersucht wurden. Frühere Studien stammen entweder aus mediterraneren Gebieten (Cescatti & Piutti, 1998; Piutti & Cescatti, 1997; Legoff & Ottorini, 1993), oder die Durchforstungseingriffe liegen nicht derartig weit in der Vergangenheit (Diaconu, et al., 2015). Aufgrund fehlender undurchforsteter Kontrollflächen konnte hier leider die Effektstärke von Durchforstung auf die Trockenheitsreaktion an sich nicht quantifiziert werden.

Die Ergebnisse der vorliegenden Studie stimmen mit den Ergebnissen vorangegangener Studien zu anderen Baumarten darin überein, dass Zuwachseinbrüche während eines extremen Trockenjahrs nicht signifikant durch Durchforstungseingriffe reduziert werden können, die Durchforstung für die Erholung jedoch eine wichtige Rolle spielt (Sohn, et al., 2016). Möglicherweise können dadurch Folgeschäden von Trockenstress reduziert werden. Dazu gibt es aber bisher keine Untersuchungen. Da die gegenwärtig in Buchenwäldern angewandten Durchforstungskonzepte eine insgesamt etwas geringere Anzahl von Z-Bäumen (60-80 St/ha) anstreben, als das noch in den Altherr-Versuchsflächen der Fall war (ca. 100 St/ha), kann man davon ausgehen, dass mit diesen Konzepten die Vitalität der Wertträger in diesen Beständen in Trockenstresssituationen so gut wie möglich gewährleistet ist. Ob eine weitere Reduktion der Anzahl der Z-Bäume die Trockenstresstoleranz weiter erhöhen würde, ist nicht bekannt. Um diese Frage beantworten zu können, fehlen bisher geeignete Versuchsflächen.

Die vorliegende Studie hat sich auf die Trockenstressreaktion von vor- und mitherrschenden Einzelbäumen in unterschiedlich durchforsteten Beständen konzentriert. Von diesen Ergebnissen kann nicht auf die Trockenstressreaktion der gesamten Baumpopulation geschlossen werden. Es ist folglich nicht klar, wie sich unterschiedlich durchforstete Bestände hinsichtlich der Kohlenstoffsequestrierung bzw. Freisetzung in extremen Trockenjahren unterscheiden.

6 Quellen

- Akaike, H., 1974. A new look at the statistical model information. *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. ac-19, pp. 716-723.
- Altherr, E., 1971. Wege zur Buchenstarkholzproduktion.. *Festschr z 15. Hauptvers d Bad-Württ Forstvereins und 100 Jahr Feier der Bad-Württ Fortl Vers-Anst Freiburg*, pp. 123-127.
- Biondi, F. & Waikul, K., 2004. DENDROCLIM2002: A C ++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies. *Compuerts & Geosciences 30*, pp. 303-311.
- Bolte, A. & Degen, B., 2010. Anpassung der Wälder an den Klimawandel: Optionen und Grenzen. *Landbauforschung vTI - Agriculture and Forestry Research 60*, pp. 111-117.
- Botzan, T. M., Mariño, M. A. & Necula, A. I., 1998. Modified deMartonne Aridity Index: Application to the Napa Basin, California. *Physical Geography 19 (1)*, pp. 55-70.
- Bréda, N., Granier, A. & Aussenac, G., 1995. Effects of thinning on soil and tree water relations, transpiration and growth in an oak forest (*Quercus petrea* (Matt) Liebl.). *Tree Physiol 15*, pp. 295-306.
- Cernescu, N., 1934. Facteurs de climat et zones de sol en Roumanie (Climatic zones and soil factors of Romania). *Studii tehnice si economice. Bucharest, Romania: Geological Institute, Publ. No C-2*, pp. 21-36.
- Cescatti, A. & Piutti, E., 1998. Silvicultural alternatives, competition regime and sensitivity to climate in a European beech forest. *For. Ecol. mamage. 102*, pp. 213-223.
- Ciais, P., Reichstein, M. & Viovy, N. e. a., 2005. Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature 437*, pp. 529-533.
- Collin, S., 2016. *waldwissen.net*. [Online] Available at: http://www.waldwissen.net/waldwirtschaft/schaden/trockenheit/fva_trockenheit_w2_1/index_DE [Zugriff am 20 05 2016].
- Cook, E. R. & Holmes, R. L., 1999. *User's manual for program ARSTAN*. Tucson, Arizona, USA: Laboratory of Tree Ring research. University of Arizona.
- D'Amato, A. W., Bradford, J. B., Fraver, S. & Palik, B. J., 2013. Effects of thinning on drought vulnerability and climate response in north temperate forest ecosystems. *Ecological Applications 23*, p. 1735–1742.
- deMartonne, E., 1926. Une nouvelle fonction climatologique: L'indice d'aridité.. *La Météorologie*, pp. 449-458.

- Diaconu, D., Kahle, H.-P. & Spiecker, H., 2015. Tree- and stand-level thinning effects on growth of European beech (*Fagus sylvatica* L.) on a Northeast- and a Southwest-facing slope in Southwest Germany. *Forests* 6 (9), pp. 3256-3277.
- Dieler, J. & Pretzsch, H., 2013. Morphological plasticity of European beech (*Fagus sylvatica* L.) in pure and mixed-species stands. *Forest Ecology & Management* 295, pp. 97-108.
- Dörr, S., 2015. *Comarison of 3 different drought indices for the identification and quelification of drought events in beech stands.*, Freiburg im Breisgau, Deutschland: Waldbau-Institut Uni-Freiburg, unveröffentlicht.
- Drobyshev, I., Niklasson, M., Mazerolle, M. J. & Bergeron, Y., 2014. Reconstructions f a 253-year long mast record of European beech reveals its association with large scale temperature variability an dno long-term trend in mast frequencies. *Agricultural and Forest Meteorology* 192-193, pp. 9-17.
- Eichhorn, J. et al., 2008. Untersuchungen zur Trockenheitstoleranz der Buche am Beispiel des witterungsextremen Jahres 2003. *Beiträge aus der NW-FVA, Band 3*, pp. 109-134.
- Fritts, H. C., 1976. *Tree rings and climate*. London, New York, San Francisco: Academic Press.
- Grissino-Mayer, H. D., 2001. Evaluating crossdating accuracy: a manual and tutorial for the computer program cofecha. *Tree-ring research* 57, pp. 205-221.
- Guttman, N. B., 1999. Accepting the Standardized Precipitation Index: A calculation algorithm. *J. Am. Water Resour. Assoc.* 35, pp. 311-121.
- Hacket-Pain, A., Friend, A., Lageard, J. & Thomas, P., 2015. The influence of masting phenomenon on growth-climate relationships in trees: explaining the influence of previous summers' climate on ring width. *Tree Physiology* 00, pp. 1-12.
- Heim, R., 2002. A review of twentieth-century drought indices used in the United States. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 83, pp. 1149-1165.
- Hein, S., Lenk, E., Klädtke, J. & Kohnle, U., 2006. Z-Baum orientierte Auslesedurchforstung in Buche (*Fagus sylvatica* (L.)): Auswirkungen auf Qualität, Sortenstruktur und Wertleistung. *Allg Forst u J Ztg* 1, pp. 8-20.
- Holmes, R. L., 1983. Computer-assited quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree Ring Bulletin* 43, pp. 69-78.
- Innes, J. L., 1994. The occurrence of flowering and fruiting on individual trees over 3 years and their effects on subsequent crown condition. *Trees* 8, pp. 139-150.
- IPCC, 2013. Climate Chnage 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T. F.; Qin, D.; Plattner, G.-K.; Tignor, M.; Allen, S. K.; Boschung, J.; et. al.. In: I. P. o. C. C. 2013, Hrsg. *Climate Change 2013*. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press, p. 1535 pp..

- Kändler, G. & Cullmann, D., 2014. *Der Wald in Baden-Württemberg*. Freiburg i. Brsg., Deutschland: Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (FVA).
- Keyantash, J. & Dracup, J. A., 2002. The quantification of drought: an evaluation of drought indices. The drought monitor. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 83 (8), pp. 1167-1180.
- Kohler, M., Sohn, A. J., Nägele, G. & Bauhus, J., 2010. Can drought tolerance of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) be increased through thinning?. *European Journal of Forest Research* 129, pp. 1109-1118.
- Kohler, M., Sohn, J. A., Nägele, G. & Bauhus, J., 2010. Can drought tolerance of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) be increased through thinning?. *Eur J Forest Res* 129, pp. 1109-1118.
- Kohnle, U., Hein, S. & Michiels, H. G., 2008. Waldbauliche Handlungsmöglichkeiten angesichts des Klimawandels. *FVA-Einblick*, pp. 52-55.
- Kölling, C., 2007. Klimahüllen für 27 Waldbaumarten. *AFT derWald* 23, pp. 1242-1245.
- Leblanc, D. C., 1990. Relationships between breast-height and whole-stem growth indices for Red spruce on Whiteface Mountain, New York. *Can J For Res.* 20, pp. 1399 - 1407.
- Lebourgeois, F., Bréda, E., Ulrich, E. & Granier, A., 2005. Climate-tree-growth relationships of European beech (*Fagus sylvatica* (L.)) in the French Permanent Plot Network (RENECOFOR). *Trees* 19, pp. 385-401.
- Legoff, N. & Ottorini, J. M., 1993. Thinning and climate effects on growth of beech (*Fagus sylvatica* L) in experimental stands. *Forest Ecology and Management*, Band 62, pp. 1-14.
- Licada, I. & Assimakopoulus, V. D., 2007. Spatial and temporal analysis of drought in Greece using the Standardized Precipitation Index (SPI). *Theor. Appl. Climatol.* 89, pp. 143-153.
- 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, pp. 1909-1920.
- Lüschner, D., 1990. Die Blütenbildung bei Bäumen und ihre Auswirkung auf die Struktur der Krone: IV. Die Buche (*Fagus sylvatica* L.). *Schweiz. Z. Forstwes.*, 141:2, pp. 147-154.
- Magruder, M. S., Chhin, S., Monks, A. & O'Brian, J., 2012. Effects of initial stand density and climate on red pine productivity within Huron National Forest, Michigan, USA. *Forests* 3, pp. 10 86-1103.
- Magruder, M. S., Chhin, S., Palik, B. & Bradford, J. B., 2013. Thinning increases climatic resilience of red pine. *Canadian Journal of Forest Research* 43, p. 878.889.
- Mc Dowell, N., Brooks, J. R., Fitzgerald, S. A. & Bond, B. J., 2003. Carbon isotopediscrimination and growth response of old *Pinus ponderosa* trees to stand density reductions. *Plant Cell Environ.* 26, pp. 631-644.

- McDowell, N. G. et al., 2006. Homeostatic maintenance of ponderosa pine gas exchange in response to stand density changes. *Ecological Applications* 16, pp. 1164-1182.
- McKee, T. B., Doesken, N. J. & Kleist, J., 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales.. *Preprints, Eighth Conf. on Applied Climatology, Anaheim, CA, Amer. Meteor. Soc.*, pp. 179-184.
- Meining, S., Schröter, H. & v. Wilpert, K., 2004. Methodik und Durchführung der terrestrischen Waldschadensinventur. *TWI 2004*, pp. 4-26.
- Meining, S. & v. Wilpert, K., 2006. *Waldzustandsbericht 2006*. s.l.:Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg.
- Meining, S. et al., 2015. *Waldzustandsbericht 2015*. ISSN: 1862-863X Hrsg. Freiburg i. Brsg., Deutschland: Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (FVA).
- Meining, S. et al., 2011. *Waldzustandsbericht 2011*. Freiburg i. Brsg.: Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg.
- Meining, S. et al., 2009. *Waldzustandsbericht 2009*. Freiburg i. Brsg.: Forstliche Forschungs- und Versuchsanstalt.
- Meining, S. et al., 2013. *Waldzustandsbericht 2013*. Freiburg i. Brsg.: Forstlich Verushcs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg.
- Meining, S. et al., 2014. *Waldzustandsbericht 2014*. Freiburg i. Brsg.: Forstliche Verusuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg.
- Misson, L., Antoine, N. & Joel, G., 2003. Effects of thinning intensities on drought response in Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). *Forest Ecology and Management* 183, pp. 47-60.
- Müller, J., Böttcher, F. & Schmidt, M., 2008. Classification of a soil addicted climate-moisture-index for different places in middle and north-eastern regions of Germany. *Hercynia N.F.* 41, pp. 189-200.
- Müller, j. & Müller, G., 1988a. Berechnung der Verdunstung landwirtschaftlicher Produktionsgebiete. 1. Mitt.: Beschreibung des zur Bestimmung der aktuellen Evapotranspiration von Kulturpflanzen erarbeiteten Modells. *Z. Meteorol.* 38, pp. 332-337.
- Müller, J. & Müller, G., 1988b. Berechnung der Verdunstung landwirtschaftlicher Produktionsgebiete. 2. Mitt.: Überprüfung des Modells von J. u. G. Müller am beispiel Kartoffel auf lehmigem Sand. *Z. Meteorol.* 38, pp. 361-365.
- Müller, J. & Müller, G., 1989. Berechnung der Verdunstung landwirtschaftlicher Produktionsgebiete. 3. Mitt.: Ermittlung gebietsbezogener Verdunstungswerte durch Anwendung des Modells von J. u. G. Müller. *Z. Meteorol.* 39, pp. 142-149.

- Mund, M. et al., 2010. The influence of climate change and fructification on the inter-annual variability of stem growth and net primary production in an old-growth, mixed beech forest. *Tree Physiology* 30, pp. 689-704.
- Nabuurs, G. J. et al., kein Datum Forestry. In *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Metz, B.; Davidson, O. R.; Bosch, P. R.; Dave, R.; Meyer, L. A. (eds.)]. *Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA*.
- Osterburg, B. et al., 2013. *Handlungsoptionen für den Klimaschutz in der deutschen Agrar- und Forstwirtschaft*. J. H. von Thünen-Institut Hrsg. Braunschweig, Deutschland: Thünen Report 11.
- Paar, U. et al., 2011. Häufigkeit und Intensität der Fruktifikation der Buche. *AFZ-DerWald* 6, pp. 26-29.
- Palmer, W. C., 1965. *Meteorological drought. Research Paper No. 45*, Washington D.C., USA: U.S. Weather Bureau.
- Paltineanu, >. et al., 2007. Using aridity indices to describe some climate and soil features in Eastern Europe: a Romanian case study. *Theor. Appl. Climatol.* 90, pp. 263-274.
- Paltineanu, C., Tanasescu, N., Chitu, E. & Mihailescu, I. F., 2007. Relationships between the deMartonne Aridity Index and water requirements of some representative crops: A case study from Romania. *Int. Agrophysics* 21, pp. 81-93.
- Piutti, E. & Cescatti, A., 1997. A quantitative analysis of the interactions between climatic response and intraspecific competition in European beech. *Can J For Res* 27, pp. 277-284.
- Pretzsch, H., 2002. *Grundlagen der Waldwachstumsforschung: mit 33 Tabellen*. s.l.:Parey.
- Pretzsch, H. et al., 2013. Productivity of mixed versus pure stands of oak (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl. and *Quercus robur* L.) and European beech (*Fagus sylvatica* L.) along an ecological gradient. *Europ. J. For. Res* 132, pp. 263-280.
- Reif, A. et al., 2010. Waldbewirtschaftung in Zeiten des Klimawandels - Synergien und Konfliktpotenziale zwischen Forstwirtschaft und Naturschutz. *Naturschutz und Landschaftsplanung* 42, pp. 261-266.
- Schmidt, W., 2005. Zeitliche Veränderung der Fruktifikation bei der Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.) in einem Kalbuchenwald. *Allg. Forst- u. J.-Ztg.*, 177. Jg., 1, pp. 9-19.
- Schröpfer, R. & Utschig, H. Z. T., 2009. Das Fichten-Konzept der BaySF.. *Aktuell* 68, p. 7.
- Schröter, H. J., Elb, D. & Metzler, H., 2005. Waldschutzsituation 2004/2005 in Baden-Württemberg. *AFZ der Wald* 60, pp. 338-340.
- Shaw, R. E. J., 2012. Rapid climate change and the rate of adaptation: insight from experimental quantitative genetics. *New Phytol.* 195, pp. 725-765.

- Sohn, J. A., Gebhardt, T., Ammer, C. & al., e., 2013. Mitigation of drought by thinning: Short-term and long-term effects on growth and physiological performance of Norway spruce (*Picea abies*). *Forest Ecology and Management* 308, pp. 188-197.
- Sohn, J. A., Hartig, F., Kohler, M. & Bauhus, J., 2016. Heavy and frequent thinning promotes drought adaptation in *Pinus sylvestris* forests. *Ecological Applications (accepted article)*: doi: 10.1002/eap.1373.
- 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 Physiology* 32/10, pp. 1199-1213.
- Speer, J. H., 2010. *Fundamentals of tree-ring research*.. Tucson, USA: The University of Arizona Press.
- Spittlehouse, D. L. & Stewart, R. B., 2004. Adaptation of climate change in forest management. *J of Ecosystems and Management* 4:1.
- Weber, H. & Komischke, H., 2008. Klimawandel in Süddeutschland - Veränderungen der Kenngrößen Lufttemperatur, Niederschlag und Hochwasserabfluss.. *KLIWA-Monitoringbericht*.

7 Abbildungsverzeichnis

TABELLE 1 STANDORTS- UND BESTANDES-PARAMETER (LINKE SPALTE) DER VERSUCHSFLÄCHEN NECKARLAND (2. SPALTE V. L.) MIT DEN VERSUCHSFLÄCHEN NUMMER 224 UND 225, SOWIE DER SCHWÄBISCHEN ALB (1. SPALTE V. R.).....	8
TABELLE 2 WACHSTUMSKUNDLICHE KENNWERTE DER VERSUCHSFLÄCHEN. WO L = ALTHERR, S = ASSMANN, B = BEGINN, E = ENDE, BB = BLEIBENDER BESTAND, D_{100} = MITTELDURCHMESSER DER 100 STÄRKSTEN STÄMME/HA, H_{100} = MITTELHÖHE DER 100 STÄRKSTEN STÄMME/HA, VFMD.M.R = VORRATSFESTMETER DERBOLZ MIT RINDE, V = LAUFENDER JÄHRLICHER VOLUMENZUWACHS, GWL = STANDORTSPRODUKTIVITÄT (QUELLE: HEIN, ET AL., (2006).	10
TABELLE 3 ÜBERBLICK ÜBER DIE IDENTIFIKATION DER TROCKENJAHRE (LINKE SPALTE), UNTEREILT NACH PARZELLEN (2. SPALTE V. L. - 9. SPALTE V. L.) UND TROCKENHEITSINDIZES (1. UND 2. SPALTE V. R.).....	16
TABELLE 4 DURCHSCHNITTLICHE RADIALZUWÄCHSE (MM/A) DES UNTERSUCHTEN BAUMKOLLEKTIVS INNERHALB DER PERIODEN VOR DEN DURCHFÖRSTUNGSEINGRIFFEN (1910-1970), WÄHREND UND KURZ NACH DEN EINGRIFFEN (1970 BIS 1990), NACH DEN EINGRIFFEN FÜR DIE PERIODEN 1990-2000 UND 2001-2014, DARGESTELLT FÜR DIE STANDORTE 224 UND 225 IM NECKARLAND UND 226 UND 230 AUF DER SCHWÄBISCHEN ALB FÜR JEWEILS DIE BEIDEN DURCHFÖRSTUNGSVARIANTEN ALTHERR (ALT) UND ASSMANN (ASS).....	18
TABELLE 5 SIGNIFIKANTE (0.3 BIS 0.4 BZW. -0.3 BIS -0.4, HELLE HINTERLEGUNG) UND STARK SIGNIFIKANTE (<-0.4 BZW. >0.4, DUNKLE HINTERLEGUNG) KORRELATIONSKOEFFIZIENTEN ZWISCHEN DEN ZEITLICHEN VERLÄUFEN MONATLICHER WITTERUNGSGRÖßEN BZW. TROCKENHEITSINDIZES (SPI) UND DEN STANDARDISIERTEN GRUNDFLÄCHENZUWÄCHSEN FÜR DIE UNTERSCHIEDLICHEN WUCHSGEBIETE NECKARLAND (NL) UND SCHWÄBISCHE ALB (SA) SOWIE DURCHFÖRSTUNGSVARIANTEN ALTHERR (ALT) UND ASSMANN (ASS). DIE MONATE DES VORJAHRES SIND MIT EINEM „-“ GEKENNZEICHNET, WÄHREND DIE DES LAUFENDEN JAHRES KEIN VORZEICHEN HABEN (ZAHLEN IN DER ZWEITEN SPALTE).....	19
TABELLE 6 SIGNIFIKANTE (0.3 BIS 0.4 BZW. -0.3 BIS -0.4, HELLE HINTERLEGUNG) UND STARK SIGNIFIKANTE (<-0.4 BZW. >0.4, DUNKLE HINTERLEGUNG) KORRELATIONSKOEFFIZIENTEN ZWISCHEN DEN ZEITLICHEN VERLÄUFEN MONATLICHER WITTERUNGSGRÖßEN BZW. TROCKENHEITSINDIZES (SPI) UND DEN STANDARDISIERTEN GZ FÜR DIE UNTERSCHIEDLICHEN DURCHFÖRSTUNGEN ALTHERR (ALT UND ASSMANN (ASS) UND HÖHEN (HÖHE) BRUSTHÖHE (DBH), STAMMITTHÖHE (MID) UND KRONENANSATZHÖHE (CH). DIE MONATE DES VORJAHRES SIND MIT EINEM „-“ GEKENNZEICHNET, WÄHREND DIE DES LAUFENDEN JAHRES KEIN VORZEICHEN HABEN (ZAHLEN IN DER OBERSTEN ZEILE).....	20
TABELLE 7 DARSTELLUNG DER MASTEREIGNISSE IN DER PERIODE VOM DEM ZEITPUNKT DER ERSTEN DURCHFÖRSTUNGSEINGRIFFE (1970) BIS 2015 MIT DER INTENSITÄT DER MAST (WENN ANGEGEBEN) UND DEN VERÖFFENTLICHUNGEN. MIT „*“ GEKENNZEICHNETE VERÖFFENTLICHUNGEN SIND NICHT AUS BADEN-WÜRTTEMBERG UND DAHER WENIG AUSSAGEKRÄFTIG IM ZUSAMMENHANG MIT DER VORLIEGENDEN STUDIE.	21
TABELLE 8 ERGEBNISSE DER STATISTISCHEN ANALYSE VON RESISTENZ, ERHOLUNG UND RESILIENZ DER GRUNDFLÄCHENZUWÄCHSE MIT GENERALISIERTEN LINEAREN MODELLEN (GLM) UND LINEAREN GEMISCHTEN MODELLEN (LMM). DIE MODELL-ERGEBNISSE BEZIEHEN SICH AUF TROCKENJAHRE DIE NACH DEM SPI _{JUNI BIS AUGUST} MILD BIS EXTREM (GRAUE HINTERLEGUNG) BZW. STARK BIS EXTREM WAREN (RECHTS, OHNE FARBBLICHE HINTERLEGUNG.) LMM WURDEN NUR DANN VERWENDET, WENN DER ZUFÄLLIGE EFFEKT AUF PLOT-EBENE SIGNIFIKANT ZUR MODELLVERBESSERUNG BEITRUG (DIES WAR NUR FÜR DIE RESISTENZ DER FALL).....	23
ABBILDUNG 1 LAGE DER VERSUCHSFLÄCHEN: RAUTE = NECKARLAND-STANDORT 224; DREIECK = NECKARLAND-STANDORT 225; KREIS = SCHWÄBISCHE ALB-STANDORT 226; VIERECK = SCHWÄBISCHE ALB-STANDORT 226; VIERECK = SCHWÄBISCHE ALB STANDORT 230. ..	9
ABBILDUNG 2 LINKS: ZUKUNFTSBAUM-ORIENTIERTE LICHTWUCHSDURCHFÖRSTUNG: STARK- (NACH ALTHERR) DURCHFÖRSTETE VERSUCHSFLÄCHE IM NECKARLAND. Z-BÄUME SIND MIT RING DAUERHAFT MARKIERT. RECHTS: AN DER OPTIMALEN GRUNDFLÄCHENHALTUNG ORIENTIERTE DURCHFÖRSTUNG: MODERAT- (NACH ASSMANN) DURCHFÖRSTETE VERSUCHSFLÄCHE IM NECKARLAND.	10
ABBILDUNG 3 VERLAUF DER TROCKENHEIT (LAUFENDER SPI FÜR DREI MONATE) IN DEN WEISERJAHREN 1976 UND 2003. JE NEGATIVER DER SPI-WERT (Y-ACHSE), DESTO TROCKENER DER MONAT (X-ACHSE).	17

ABBILDUNG 4 DIE MITTLEREN STANDARDISIERTEN ZUWACHSCHRONOLOGIEN (LINKE Y-ACHSE) DER ALTHERR (ALT)- UND DER ASSMANN (ASS)-PLOTS DARGESTELLT MIT DER ENTSPRECHENDEN ZEITREIHE DES SPI3 (RECHTE Y-ACHSE) FÜR DIE PERIODE 1960 BIS 2014. OBEEN: NECKARLAND (NL). UNTEN: SCHWÄBISCHEN ALB (SA). 18

ABBILDUNG 5 BOXPLOTS MIT MITTELWERTEN ZUR DARSTELLUNG DER LLORET-INDIZES (AUF DER Y-ACHSE) RESISTENZ (OBEEN LINKS), ERHOLUNG (OBEEN RECHTS) UND RESILIENZ (UNTEN LINKS) DER VERSCHIEDENEN HÖHEN (AUF DER X-ACHSE: BRUSTHÖHE – DBH, STAMMMITTHÖHE - MID, KRONENANSATZHÖHE – CH) UND DER BEIDEN DURCHFORSTUNGSVARIANTEN ALTHERR (HELLGRAU) UND ASSMANN (DUNKELGRAU) IN DEN TROCKENJAHREN 1976 UND 2003. DIE UNTERSCHIEDE SIND NICHT SIGNIFIKANT. 37

8 Anhang

**Abstract für das 10. IUFRO Buchensymposium in Kastamonu, Türkei:
CAN THE DROUGHT TOLERANCE OF EUROPEAN BEECH BE
INCREASED BY THINNING INTERVENTIONS?**

**Structure and dynamics of beech stands including silvicultural systems, approaches
and thinning**

Oral presentation

Authors: Magdalena Gerhardt¹, Julia Sohn¹, Martin Kohler¹, Jürgen Bauhus¹

¹Chair of Silviculture, Faculty of Environment and Natural Resources, University of Freiburg, D-79085
Freiburg, Germany

magdalena.gerhardt@waldbau.uni-freiburg.de, julia.sohn@waldbau.uni-freiburg.de,
martin.kohler@waldbau.uni-freiburg.de, juergen.bauhus@waldbau.uni-freiburg.de

Abstract

Climate change is predicted to intensify summer droughts in Central Europe. In the long term, adaption may be achieved through changes in species and genetic composition of forests. In the short-term, adaptation measure must also reduce drought stress for existing forests. The reduction of stand density through thinning has been identified as a promising means to reduce drought-effects for even-aged stands from several tree genera. Despite the fact that the drought-sensitive European beech (*Fagus sylvatica*) is the naturally predominant and most important broadleaved tree species in Central Europe, knowledge concerning the suitability of thinning to enhance its drought-tolerance is lacking. We analyzed tree-ring data from a number of long-term thinning experiments in European beech stands in Southern Germany to determine the effects of two thinning intensities on the growth response during extreme drought-events (resistance) and afterwards (recovery and resilience). Radial growth of dominant trees (with a diameter > 70 % of all trees in a given stand) recovered significantly faster in heavily thinned stands compared to moderately thinned stands. However, for the same trees, thinning intensity had no influence on growth depressions during droughts, and the resilience of radial growth, i. e., the relative growth level after drought events compared to that before the event. Furthermore, smaller trees (diameter < 65 % of all trees in a given stand) displayed a similar drought response of radial growth during and after a drought event in the differently thinned stands. The results support the development of more intensive thinning regimes in Central European beech forests.

Key words: radial growth, water stress, tree rings, resistance, recovery, resilience

Zusammenfassung der Präsentation auf der 30. Jahrestagung der Sektion Waldbau in Eberswalde, Deutschland:

Vorträge am 15.09.2015

Kann die Trockenheitstoleranz von *Fagus sylvatica* durch Durchforstungseingriffe erhöht werden?

Magdalena Gerhardt, Martin Kohler, Julia Sohn, Jürgen Bauhus

Extreme Trockenheit während der Vegetationsperiode, wie z. B. im Sommer 2015 vielerorts in Deutschland erfahren, wird infolge des Klimawandels mit zunehmender Intensität und gehäuft auftreten. Daher ist die Anpassung von bestehenden und zukünftigen Waldbeständen an Trockenheit eine vordringliche Aufgabe im Waldbau. Während zukünftige Waldbestände durch das Einbringen trockenheitstoleranterer Baumarten langfristig angepasst werden können, müssen bestehende Bestände möglichst kurzfristig stabilisiert werden. Im Falle einiger Nadelbaumarten konnte bereits gezeigt werden, dass eine großzügige Erweiterung des Standraumes von Einzelbäumen die Erholung des Dickenwachstums nach extremer Trockenheit verbessern kann. Angesichts der hohen Kronenplastizität der Buche (*Fagus sylvatica*), stellt sich nun die Frage, inwiefern auch bei dieser Baumart die Trockenheitstoleranz durch starke Durchforstungseingriffe erhöht werden kann.

An Bohrkernen aus oberständigen Buchen von zwei verschiedenen Standorten in Baden-Württemberg wird mittels dendroökologischer Methoden der Einfluss von Standraumerweiterung auf das Radialwachstum während und nach extremer Trockenheit untersucht. Auf jedem Standort sind zwei in Deutschland praktizierte Durchforstungskonzepte umgesetzt worden. Diese sind jeweils mit dem Ziel der Optimierung der Wert- (Durchforstung nach ALTHERR)- bzw. Volumenleistung (Durchforstung nach ASSMANN) von Buchen-Beständen entwickelt worden und unterscheiden sich in ihrer Durchforstungsstärke beträchtlich. Neben den Effekten der Intensität der Durchforstungseingriffe werden auch die Dauer, mit der mögliche positive Effekte der Eingriffe anhalten; und der mögliche Einfluss des Standortes auf diese Effekte untersucht.

Erste Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Reaktion von Buchen auf starke Durchforstungen jener von Nadelbäumen ähnelt. Während keine Durchforstungsart zu einer Verbesserung der Resistenz (verringertes Einbruch des Radialzuwachses im Trockenjahr) führte, verbesserte sich die Erholung des Radialwachstums in den Jahren nach der Trockenheit in den stark durchforsteten Buchenbeständen.

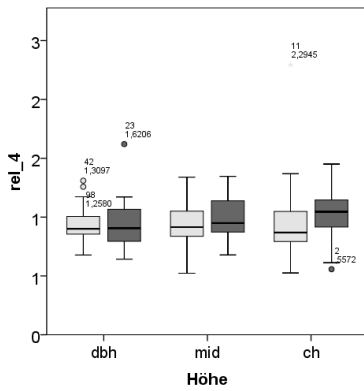
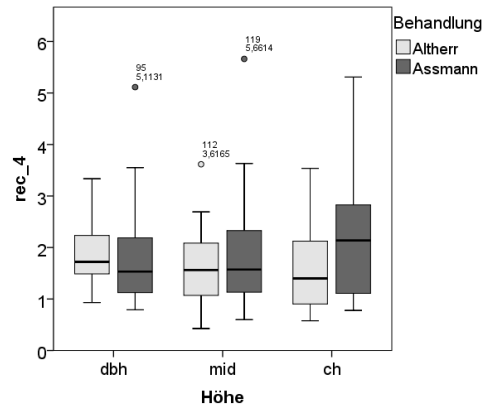
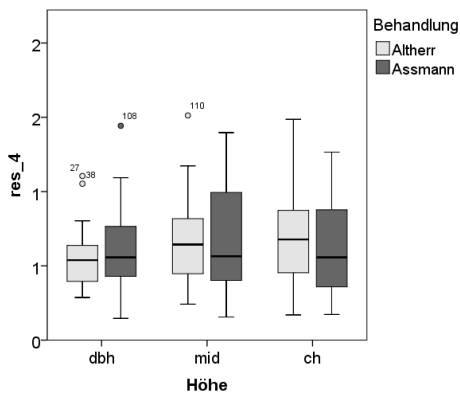


Abbildung 5 Boxplots mit Mittelwerten zur Darstellung der Lloret-Indizes (*auf der Y-Achse*) Resistenz (*oben links*), Erholung (*oben rechts*) und Resilienz (*unten links*) der verschiedenen Höhen (*auf der X-Achse*: Brusthöhe – *dbh*, Stammmitthöhe – *mid*, Kronenansatzhöhe – *ch*) und der beiden Durchforstungsvarianten Altherr (*hellgrau*) und Assmann (*dunkelgrau*) in den Trockenjahren 1976 und 2003. Die Unterschiede sind nicht signifikant.

