

Schlussbericht

zum Vorhaben

Thema:

Ableitung von Absterbewahrscheinlichkeiten der Baumartenverjüngung bei Buchen und Fichten durch Trockenheit im Zusammenhang mit dem Auftreten von Extremwetterereignissen in Deutschland

(Kurztitel: Absterbewahrscheinlichkeiten im Wald)

Autoren:

Tomasz Czajkowski, Harald Schill

Zuwendungsempfänger und ausführende Stelle:

Hochschule für Nachhaltige Entwicklung Eberswalde (FH), Fachbereich Wald und Umwelt, Professur für Forstbotanik (Prof. Dr. H. Schill)

Aktenzeichen:

314-06.01-2813HS0003

Förderkennzeichen:

2813HS003 (BMELV- Entscheidungshilfe-Vorhaben, Träger: BLE)

Laufzeit:

01.07.2013 bis 31.12.2013

Berichtszeitraum:

01.07.2013 bis 31.12.2013

Zusammenarbeit mit anderen Stellen:

Johann Heinrich von Thünen-Institut, Institut für Waldökosysteme

Gefördert durch:



Bundesministerium für
Ernährung, Landwirtschaft
und Verbraucherschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV) über die Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) als Projektträger des BMELV unterstützt.

1 Ziele und Aufgabenstellung des Vorhabens

Neben der Landwirtschaft ist die forstliche Bewirtschaftung von Wäldern die prägende Landnutzung in Deutschland. Trockenextreme wirken in Waldbeständen insbesondere durch die Erhöhung der Absterbewahrscheinlichkeit der trockenheitsempfindlichen Baumverjüngung (Jungbestände insbesondere von Fichte und Buche). Der Ausfall der Baumartenverjüngung führt zu erheblichen Mehrkosten bei der Begründung von Waldbeständen und bei mehrfacher Wiederholung zu einem generellen Verlust der Baumarteneignung. Zur Modellierung der Absterbewahrscheinlichkeiten von Baumverjüngungen (Buche, Fichte) fehlen noch grundlegende Daten und Informationen, da Trockenheitssimulationen bisher nur sehr selten bis zum Absterben der untersuchten Jungpflanzen fortgesetzt wurden. Solche Daten werden aber dringend benötigt, um abgesicherte Überlebensfunktionen für Baumartenverjüngung bei extremer Trockenheit modellieren zu können.

Aufgabenstellung:

- Entwicklung eines Simulations- und Versuchsdesigns mit dem Ziel, repräsentative Absterberaten von Buchen- und Fichtenjungpflanzen-Beständen zu definierten Behandlungszeitpunkten (bei zunehmender Trockenheitseinwirkung) zu erzielen.
- Vorbereitung der Buchen- und Fichtenpflanzen für die Trockenheitssimulation (Auswahl von einheitlichem Pflanzenmaterial aus vorangezogenen Beständen).
- Durchführung der Trockenheitssimulationen und Ableitung von Absterberaten.
- Modellierung von Absterbe/Überlebensfunktionen (Logistische Regression) aus den Versuchsdaten für Jungpflanzenbestände mit Buche und Fichte.

1.1 Planung und Ablauf des Vorhabens

Ziel der Arbeit war, in einem künstlich angelegten Bodentrockenheitsversuch (Austrocknungsversuch) den Verlauf der Mortalität (Sterberate) zu dokumentieren. Es wurde angestrebt, den zeitlichen Verlauf des Pflanzensterbens bei gleichzeitiger Aufnahme von pflanzenphysiologischen Merkmalen (Dunkel-Wasserpotential, Photosyntheserate, Blattleitfähigkeit, Transpirationsrate) zu untersuchen. Des Weiteren wurde untersucht, ob und wie die Sterberaten einzelner Herkünfte sich voneinander unterscheiden.

Die Feststellung der faktischen „Todesursache“ der Pflanzen („*carbon starvation*“, „*hydraulic failure*“, biotische Faktoren oder ein Zusammenspiel aller) war nicht Bestandteil dieses Experiments.

Für die Untersuchungen wurden Buchenjungpflanzen aus neun anerkannten Saatgutprovenienzen aus der Schweiz (2), Deutschland (2), Frankreich (1) und aus Polen (4) ausgewählt. Die Gattung Fichte wurde mit einer für Nord-Ost-Deutschland typischen Herkunft repräsentiert.

Für das Erreichen der angestrebten Ziele wurde ein spezielles Versuchsdesign entwickelt, das die Anwendung eine stufig ansteigende Trockenstressintensität ermöglicht.

1.2 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Buchen und Fichten sind wichtige Hauptbaumarten in Deutschland (BMELV 2005). Sie gelten aber auch als trockenheitsempfindliche Baumarten, die durch verstärkte Trockenheit und Hitze im Zuge des Klimawandels gefährdet sind (Geßler et al. 2007, Bolte et al. 2007, Hanewinkel et al. 2013). Trockenschäden sind besonders relevant für die Baumartenverjüngung, die noch kein tiefreichendes Wurzelsystem entwickelt haben (Czajkowski et al. 2005). Eine wissenschaftlich fundierte, quantitative Beurteilung einer letalen Trockenstress-Dosis für Jungpflanzen basierte bisher fast nur auf Ansätze zum pflanzeninternen Wasserstatus (z. B. LD50 von Kursar et al. 2009, Ψ_{50} , vgl. Choat et al. 2012, Lens et al. 2013, Urli et al. 2013). Eine Kopplung an das externe Bodenwasserangebot als Einflussgröße (vgl. Czajkowski et al. 2009) ist eine Herausforderung, die bisher nur wenig untersucht wurde (Plaut et al. 2012, Barigah et al. 2013). Der durchgeführte Versuchs- und Auswertungsansatz mit experimenteller Trockenheits-Applikation hat neue Erkenntnisse und Erfahrungen auf diesem Forschungsfeld geliefert.

2 Materialien und Methoden

2.1 Lage und Charakteristik des verwendeten Pflanzenmaterials

Für die Untersuchungen wurden Buchenjungpflanzen aus neun anerkannten Saatgutprovenienzen, zwei aus Deutschland, eine aus Frankreich, zwei aus der Schweiz und vier aus Polen ausgewählt. Die Gattung Fichte wird mit einer für das Mittel- und Ostdeutsche Tiefland typischen Herkunft (84002) repräsentiert (Abb.1).

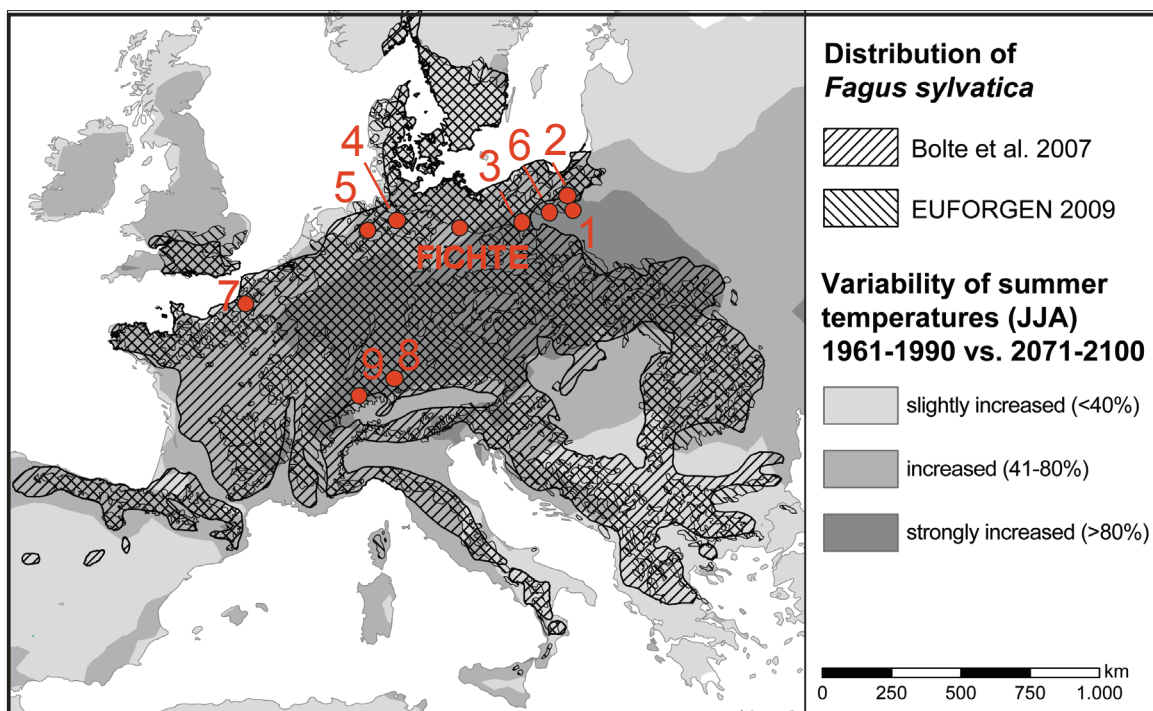


Abb.1. Die geographische Lage der untersuchten Herkünfte. (Variabilität nach Schär et al. 2004).

Eine klimatische Charakteristik der Herkunftsregionen zeigt die Tabelle 1. Die polnischen Tieflands-Herkünfte (H1 bis H3, H6) wachsen in den sommerwarm-trockenen Klimaten des Buchenverbreitungsgebietes. Die meernahen Herkunftsgebiete (H4, H7) im Tiefland unterliegen dagegen eher sommerkühl-feuchteren Klimaten. Die Herkünfte aus der Schweiz stellen durch ihre Lage Sonderfälle dar.

Tab.1. Lage und Klimaparameter der untersuchten Herkünfte.

Nr	Land	Herkunft	Geogr. Breite		Geogr. Länge		Lage [m.ü. N.N.]	Niederschlag / Jahr [mm]	Temp./ Jahr °C	Temp./ Juli °C	Klimastation
			°	'	°	'					
1	Polen	Buche/Skrwilno	53	1	19	36	<200	550 - 600	7,8	18,8	Torun
2	Polen	Buche/Brodnica	53	16	19	30	<200	550 - 600	7,8	18,8	Torun
3	Polen	Buche/Jamy	52	41	17	40	<200	500 - 550	8,2	18,2	Poznan
4	Deutschland	Buche/Sellhorn	53	24	9	50	<200	750 - 800	9,2	16,9	Hamburg-F.
5	Deutschland	Buche/Ahlhorn	52	57	8	21	<200	650 - 700	9,0	17,4	Bremen
6	Polen	Bu/Golub-Dobrzyn	53	5	18	56	<200	550 - 600	7,8	18,8	Torun
7	Frankreich	Buche/Crecy	50	15	1	53	<200	700 - 750	10,3	17,9	Lille
8	Schweiz	Buche/Neunkirch	47	41	8	32	463	883	8,5	17,8	Schaffhausen*
9	Schweiz	Buche/Tüscherz	47	8	7	12	918	1437	6,7	15,5	Biel*
10	Deutschland	Fichte/NO-dt. Tiefland	52	40	13	49	<200	550-600	8,6	17,7	Rüdnitz

*Hochaufgelöste Klimamodellierung anhand Meteoschweiz-Daten (Genossenschaft Meteotest).

Die morphologischen Herkunftsmerkmale sind in der Tabelle 2 und Abbildung 2 dargestellt.

Tab.2. Blattcharakteristik der untersuchten Buchenherkünfte; Mittelwerte von min. 5 Pflanzen pro Herkunft.

Herkunft		H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9	Mittelwert alle H.
Blattfläche	[cm ² /Pflanze]	136.9	143.8	221.4	230.7	136.4	137.5	170.2	267.5	186.4	181.2
Blattanzahl	[Stück/Pflanze]	27.2	35.8	40.2	47.6	38.2	31.2	38.8	42.6	33.0	37.2
Blattgröße	[cm ² /Blatt]	5.0	4.0	5.5	4.8	3.6	4.4	4.4	6.3	5.6	4.9

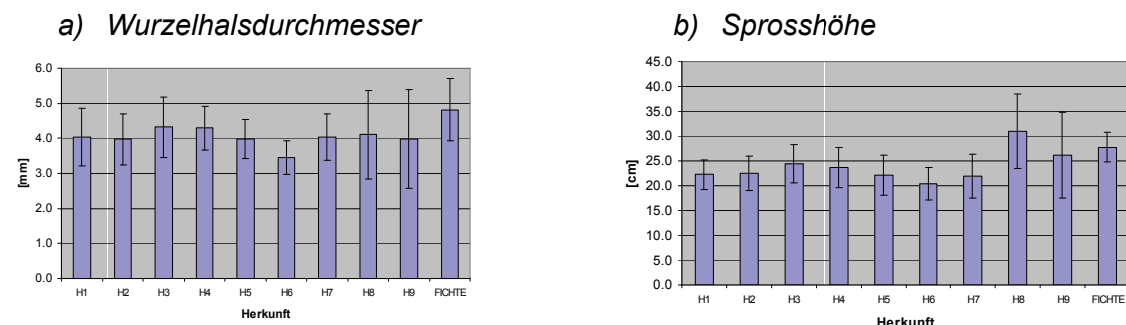


Abb.2. Wurzelhalsdurchmesser (a) und Sprosshöhe der untersuchten Pflanzen. Mittelwerte von min. 78 Pflanzen pro Herkunft.

2.2 Anzucht der Pflanzen

Die sieben Buchenprovenienzen wurden aus Bucheckern im Thünen-Institut (Institute für Forstgenetik sowie für Waldökosysteme) kultiviert. Die Herkünfte 8 und 9 wurden in der Schweiz kultiviert und als 2-jähriges Pflanzmaterial im Herbst 2012 nach Deutschland geliefert. Die 3-jährigen Fichtenpflanzen wurden von der Baumschule Rudolf Schrader GmbH & Co. angezogen und kultiviert. Im Spätherbst 2012 erfolgte die Umtopfung von jeweils 100 Pflanzen pro Herkunft in 2-Liter Gefäße, sog. Rosentöpfe (Firma - Hermann Meyer KG).

Das verwendete Pflanzensubstrat war ein mittelsandiger Feinsand (fSms) und wurde aus einem natürlichen M2 Buchenwaldbestand im Raum Eberswalde entnommen (Revier: Wildtränke, Finowtaler Sandbraunerde). Mit Hilfe eines Baggers wurden die Ah und Bv Horizonte aus dem o.g. Boden ausgehoben. Danach wurde der Aushub gesiebt und gemischt um die Homogenität des Substrates zu gewährleisten.

Um die Vergleichbarkeit aller Pflanzen zu garantieren wurde bei der Pflanzung jeder Topf (inkl. Pflanze und Substrat) auf ein Gewicht von 2.50 kg gebracht.

Die Korngrößenanalyse und entsprechende pF-Kurve des Substrates wurden im Thünen-Institut für Waldökosysteme in Eberswalde durchgeführt (Abb. 3). Die berechnete Trockenraumdichte in den Experimenttöpfen betrug ca. 1,35 Gramm/cm³ und die nutzbare Feldkapazität ca. 20% (Vol.-%). Letztere wurde definiert als Differenz zwischen Feldkapazität (FK: 23% und permanentem Welkepunkt (PWP: 3%, Abb. 3). Die am Messtag durchgeführte Wiegung der untersuchten Pflanzentöpfe ergab mit 22-23% höhere Werte der nutzbaren Feldkapazität (nFK). Für die Untersuchungen zur Bodenwasserverfügbarkeit wurde daher der Mittelwert von 22,5% als Maß für die nFK verwendet.

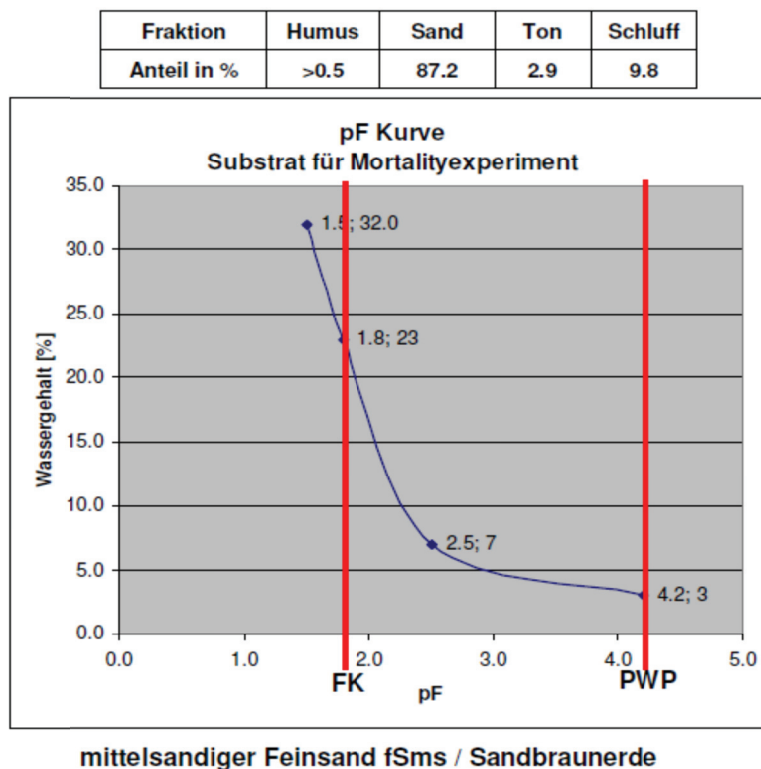
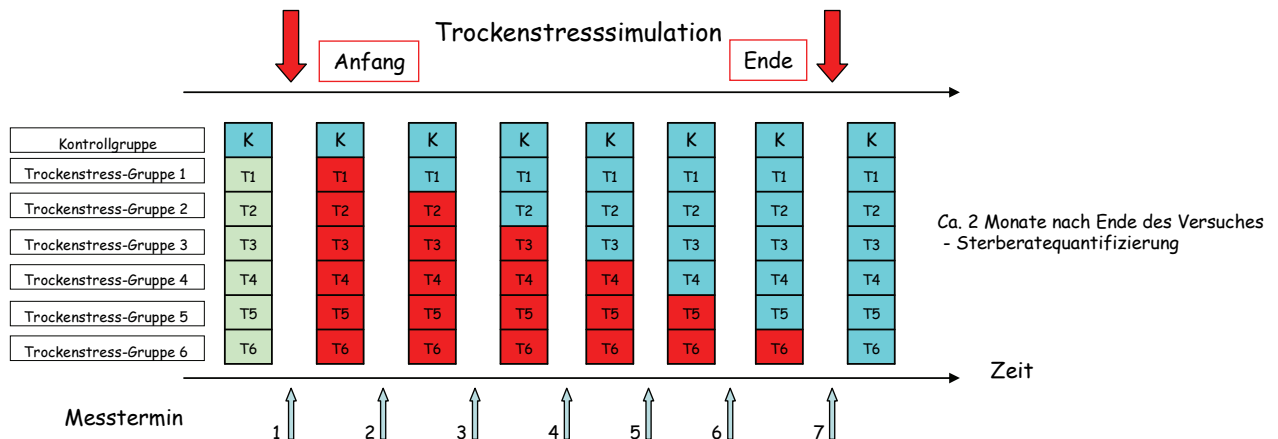


Abb.3. Die Körnung und pF Kurve des im Experiment verwendeten Substrates (Analysewerte).

Die Trockenstresssimulation wurde im Gewächshaus des Botanischen Gartens der Hochschule für nachhaltige Entwicklung (HNE) Eberswalde durchgeführt. Die Trockenstresssimulation fand zwischen 09. Juli und 16. August statt bei einer mittleren Lufttemperatur von 24,8°C (T_{\min} 16,6°C; T_{\max} 36,8°C) und einer mittleren relativen Luftfeuchtigkeit von 60,1% ($r.F._{\min}$ 23,9%; $r.F._{\max}$ 83,5%;).

2.3 Versuchsdesign der Trockenheitssimulation

Die Grundidee des Experimentdesigns basiert auf einer Frostresistenzprüfung nach Larsen (1978; vgl. auch Visnic und Dohrenbusch 2004, Czajkowski und Bolte 2006). Die Methode erlaubt eine Erfassung von pflanzlicher Reaktion (Tod) auf einen zeitlich ansteigenden Stressfaktor und wurde ursprünglich für Frostresistenztests angewendet. Für unsere Zwecke wurde die Methode entsprechend überarbeitet und angepasst.



Eine Herkunft= 100 Pflanzen (20 Kontroll- 80 Behandlungspflanzen in 6 Gruppen)
Am jedem Messtermin gemessen: Gewichtsveränderung, Wasserpotentiale, Gaswechsel



Abb.4. Schematische Darstellung des Versuchsdesigns.

Die Pflanzenpopulation (z.B. eine Herkunft =100 Pflanzen) wurde in 2 Gruppen eingeteilt: Kontrollpflanzen ohne jeglichen Stress und Behandlungspflanzen mit Trockenstress. Die Kontrollpflanzen (20 Stück) wurden während des Experimentes durchgängig mit optimaler Wasserversorgung kultiviert. Diese Pflanzen bildeten eine Referenzgruppe bei Messungen und Erhebungen zur Trockenstress-Reaktion. Die restlichen 80 Pflanzen wurden Trockenstress ausgesetzt, indem sie nicht bewässert wurden. Ursprünglich war es geplant, die restlichen Pflanzen auf 8 Gruppen (je 10 Pflanzen pro Gruppe zu teilen) und jede Gruppe Trockenstress in unterschiedlicher Dauer auszusetzen. Die Bestimmung des Ausgangsgewichtes jeder Pflanze (siehe Pkt. 2 Wasserverbrauch) bildete der Start des Experimentes. Ursprünglich waren 8 Messtermine mit 10 Pflanzen geplant. Ein Messtermin sollte die Erfassung der Gewichtsveränderung (Wasserverbrauch), des Gaswechsels und des Wasserpotentials beinhalten. Die letzte, achte Gruppe von Behandlungspflanzen stellte die Behandlungsvariante mit maximalem Stress dar. Eine so durchgeführte Trockenstresssimulation erlaubte den Versuch mit minimaler Zeitdauer und maximaler Stressintensität zu gestalten.

In der Praxis stellte sich heraus, dass die Reaktion der 80 Behandlungspflanzen sehr unterschiedlich ausfällt. Dies bedeutete, dass keine festen acht Gruppen für einzelne Messtermine gebildet werden konnten, sondern es mussten vier bis sieben flexible Gruppen anhand von äußeren Merkmalen wie der Vitalität von Belaubung und Substratfeuchtigkeit gebildet werden. Dazu kam noch, dass manche der Pflanzen zwischen zwei Messterminen (also binnen zwei bis vier Tagen) gestorben sind. Bei Pflanzen mit trockenen Blättern war die Durchführung von Gaswechsel- und Wasserpotentialmessungen unmöglich. In solchen Fällen wurde dann lediglich die Gewichtsabnahme bis zum Tod der Pflanze registriert. Als Zeitpunkt des Todes wurde in solchen Fällen das mittlere Datum zwischen dem früheren und dem folgenden Messpunkt genannt. Als tot wurden Pflanzen mit stark geschädigtem (trockenen) Assimilationsapparat eingestuft. Die Überlebensratequantifizierung erfolgte eine Woche nach dem letzten Messtermin jeder Gruppe.

Nach der durchgeführten Trockenstresssimulation für jede Behandlungsgruppe, wurden die untersuchten Pflanzen bis zur Feldkapazität aufgesättigt und regelmäßig bewässert. Nach ca. 2 Monaten nach dem letzten Messtermin wurde eine zweite Einschätzung der abgestorbenen Pflanzenanzahl durchgeführt.

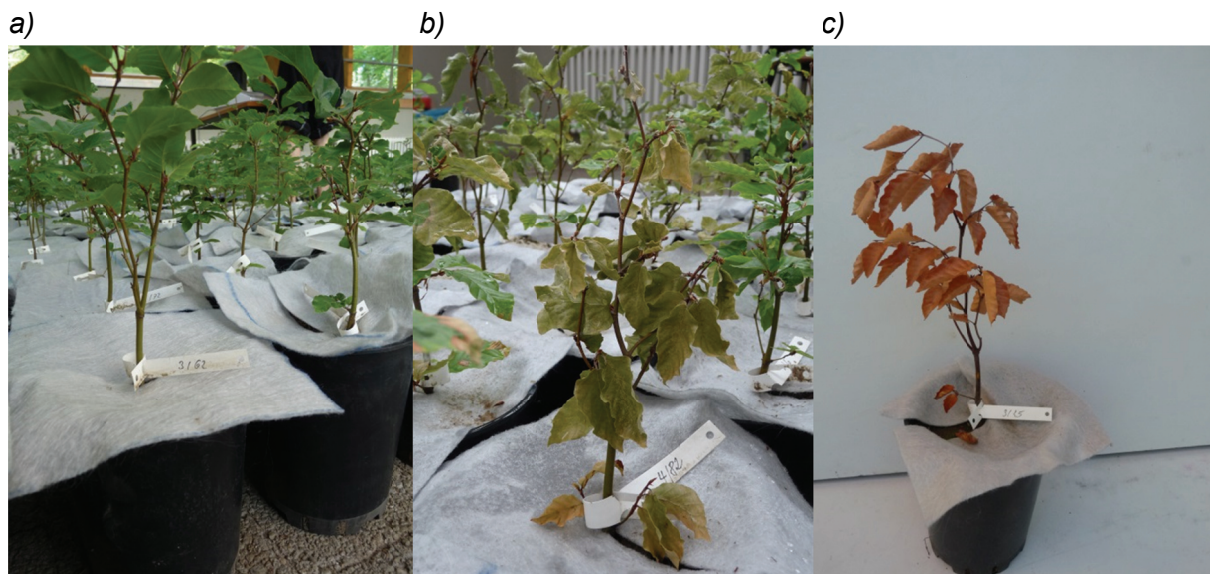


Abb.4. Untersuchte Buchen am Anfang (a), während (b) und am Ende der Trockenstresssimulation (c).

2.4 Bestimmung des Wasserverbrauchs

Der Wasserverbrauch jeder Pflanze wurde gravimetrisch bestimmt. Am Anfang des Versuches wurden alle Pflanzen voll mit Wasser aufgesättigt. Nach 24 Stunden und nach Abfluss vom ungebundenen Wasser aus dem Töpfen wurden alle Töpfe mit Pflanzen gewogen. Dieses Gewicht entsprach dem Zustand des Bodens mit voller Feldkapazität und wurde als Ausgangsgewicht registriert.

Im Folgenden wurden alle Kontrollpflanzen regelmäßig mit festgelegten Wassermengen gegossen, während die Behandlungspflanzen kein Wasser erhielten. Bei jedem Messtermin

wurden alle Kontrollpflanzen und die ausgewählten Behandlungs-Pflanzen gewogen und so der Wasserverbrauch für jede Pflanze bestimmt.

Um die Evaporation von der Topfoberfläche während des Experiments zu minimieren, wurde die Oberfläche aller Töpfe mit Vliesmaterial abgedeckt.

2.5 Gaswechsel-Messungen

Für die Bestimmung der Gaswechselprozesse in den untersuchten Pflanzen wurde ein Porometer GFS-3000 (Heinz Walz GmbH Effeltrich Germany) eingesetzt. Die Messapparatur wurde dem Projekt auf Leihbasis vom Thünen-Institut für Waldökosysteme in Eberswalde zur Verfügung gestellt.

Gemessen wurden Netto-Photosyntheserate ($\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$), Transpirationsrate ($\text{mmol}/\text{m}^2\text{s}$) und Blattleitfähigkeit ($\text{mmol}/\text{m}^2\text{s}$). Die Messungen wurden in einer Messkuvette mit stabilen Parametern durchgeführt: Temperatur 25°C , Lichtintensität PAR $1500 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$, CO_2 Konzentration 360 ppm, Gasfluss (Flow) $750 \mu\text{mol}/\text{s}$. Der Gaswechsel bei der Buche wurde durch die Anwendung eines speziellen Blattadapters für die Messkuvette auf einer Fläche von 3 cm^2 bestimmt.

Bei der Fichte war es notwendig, eine spezielle Koniferenkuvette anzuwenden. Analysiert wurden ca. 3-5 cm lange Fichtenzweige. Um die Messkuvette mit dem eingeschlossenen Fichtenzweig von der Umgebungsatmosphäre abzudichten, mussten die Messzweige speziell präpariert werden. Dafür wurden an der Eingangsstelle in die Kuvette (auf ca. 0.5 cm Länge) alle Nadeln mittels eines Skalpells entfernt. Um die Wundatmung zu verhindern und die Abdichtung der Kuvette zu gewährleisten, wurde die Stelle mit einer Dichtungsmasse (Terostat IX, Terrosion) umgeschlossen. Nach der Gaswechsellmessung wurde der untersuchte Zweig abgeschnitten und zu weiteren Analysen verpackt. Um die Gaswechsellmessungen in den richtigen Einheiten darzustellen war die Berechnung der Nadeloberfläche der untersuchten Zweige notwendig. Dafür wurde jeder Zweig mit 600 dpi Auflösung gescannt (Microtek ScanWhizardPro, Scan Maker 9800XL). Für die weiteren Arbeitsschritte wurde ein Bildverarbeitungsprogramm (ImageJ, Open-Source-Programm) genutzt, das für wissenschaftliche und medizinische Zwecke verwendet werden darf (<http://rsb.info.nih.gov/ij/disclaimer.html>). ImageJ bietet u.a. die Möglichkeit, eine Berechnung von markierter Fläche durchzuführen. Unter Anwendung von verschiedenen Filtern war es möglich, die photosynthetisch aktiven grünen Nadeln der Fichte von Hintergrund sowie Zweig- und Borkenteilen abzugrenzen und die Fläche zu berechnen. Die so entstandenen Werte der projizierten Nadeloberfläche des Astes (in mm^2) wurden mit dem entsprechenden Porometer-Daten kombiniert um die Gaswechsellergebnisse auf die faktische Assimilationsfläche zu beziehen.

Die Blattflächenbestimmung für die morphologische Herkunftsbeschreibung der Buche (Tab.2, Abb.2) wurde in gleicher Weise durchgeführt.

2.6 Ermittlung des Wasserpotentials

Die Messungen erfolgten mit Hilfe der Druckbombenmethode nach Scholander et al. (1965), der sog. Scholanderbombe. Angewendet wurde das Messgerät SKPM 1410 der Firma Skye Instruments Ltd. aus England.

Gemessen wurden ausschließlich die Dunkel-Wasserpotenziale (Pre-Dawn-Potenziale). Diese vor Sonnenaufgang gemessenen Wasserpotenziale liefern einen maximalen Pflanzenpotenzialwert, der bei einem Potenzialausgleich zwischen Boden und Pflanze die pflanzenverfügbare Restfeuchte im Wurzelraum charakterisiert (Ehlers, 1996).

2.7 Ableitung von Überlebensraten und Modellierung der Überlebensfunktionen

Die Informationen zur Mortalität der Jungpflanzen wurden in Form von Absterbe- bzw. Überlebensraten der Pflanzenpopulation unterschiedlicher Herkunft zusammengefasst. Da die Populationsgröße während des Experiments durch die geplante Entnahme von Teilpopulationen und zusätzlichen Ausfällen durch Mortalität variabel war, wurde der arithmetische Mittelwert der insgesamt im Versuch verbliebenen Pflanzenanzahl (\bar{x}_{arithm}) gebildet (Gl. 1). Dieser lag zwischen 45 und 60 Pflanzen. Die Mortalitätsrate (M_k) der einzelnen Populationen (Herkünfte) ergab sich durch die Aufsummierung der abgestorbenen Pflanzenanzahl (m_i) zum Erhebungszeitpunkt k und die Bildung des Quotienten von Anzahl abgestorbener Pflanzen und dem arithmetischen Mittelwert der Versuchspflanzen-Anzahl (\bar{x}_{arithm}).

$$M_k = \frac{\sum_{i=1}^k m_i}{\bar{x}_{arithm}} \quad (1)$$

Die Überlebensrate (S_k) zu einem bestimmten Erhebungszeitpunkt ergibt sich nach Gl. (2).

$$S_k = 1 - M_k \quad (2)$$

Aus den Überlebensraten wurden Überlebensfunktionen (S) mit Hilfe einer logistischen Regression und dem Statistik-Programmpaket JMP 9 abgeleitet (nicht-lineare Anpassung). Hierzu wurde die folgende Funktion (Gl. 3) iterativ aus Startwerten angepasst. Als Eingangsvariable x für die logistische Regression wurde (1) die Anzahl von Tagen ohne Bewässerung und (2) die Ausschöpfung des Bodenwasserhaushaltes gewählt.

$$S = \frac{1}{1 + \beta_0 e^{(\beta_1 x)}} \quad (3)$$

Aus den Überlebensfunktionen konnte die lethale Dosis an Trockenheit ($L50: S = 0,5$) bezogen auf (1) die Dauer an Trockenheit und (2) auf den restlichen Bodenwasservorrat abgeleitet werden.

3 Ergebnisse

Die Ergebnisse umfassen zum einen die Betrachtung der Trockenheitswirkung auf den internen Pflanzenwasserhaushalt und die Mortalität der Jungpflanzen. Zum anderen werden die Überlebensfunktionen für die einzelnen Baumarten und ausgewählte Herkünfte dargestellt.

Es ist wichtig zu betonen, dass mit Hilfe der dargestellten Methodik die physiologische Todesursache nicht ermittelt werden kann. Es wurden hier lediglich die Reaktionen der Baumarten auf extremen Trockenstress untersucht. Vor allem die Unterschiede zwischen Buche und Fichte in den Durchwurzelungstiefen und die Anfälligkeit für biotische Schädlinge (Insekten, Pilze) beeinflussen das Überleben während Trockenperioden in der freien Natur maßgeblich.

3.1 Ausführliche Darstellung der wichtigsten Ergebnisse

Trockenheitsbedingte Mortalität der Jungpflanzen

Die ersten trockenstressbedingten Todesfälle bei der Buche traten nach 14 (Herkünfte H1, H2, H4), 17 (H3, H5, H6, H8, H9) und 21 Tagen (H7) ohne Wasser auf. Die Gesamtdauer der Trockensimulation betrug 24 Tage (H4), 28 Tage (H3, H8), 31 Tage (H1, H2, H5), 35 Tage (H7, H9) und 38 Tage (H6). Die niedrigste Sterberate im Untersuchungszeitraum wurde registriert bei Herkunft 6 (26 tote Pflanzen) gefolgt von den Herkünften 5 und 9 (35 Tote), dann Herkunft 1 (36 Tote), Herkünfte 2 und 7 (37 Tote), dann Herkunft 3 (44 Tote), Herkunft 8 (45 Tote) und schließlich Herkunft 4 mit 46 toten Individuen.

Bei der Baumart Fichte wurden die ersten toten Pflanzen nach 21 Tage ohne Wasser registriert. Die gesamte Stresssimulation dauerte 31 Tage und im Verlauf starben 20 Pflanzen ab. Zwischen den untersuchten Buchenpflanzen sticht deutlich die Herkunft 6 heraus, die die niedrigste Sterberate beim längsten Untersuchungszeitraum gezeigt hat. Die restlichen Buchen kann man in 2 Gruppen einordnen: (1) sehr sensibel (die meisten Toten bei kürzester Untersuchungszeit) bei H4, H8, H3 und (2) weniger sensibel bei Herkünften H1, H2, H5, H7, H9. Die Fichte überraschte mit vergleichsweise niedrigen Anzahlen von toten Pflanzen (siehe Abb.6).

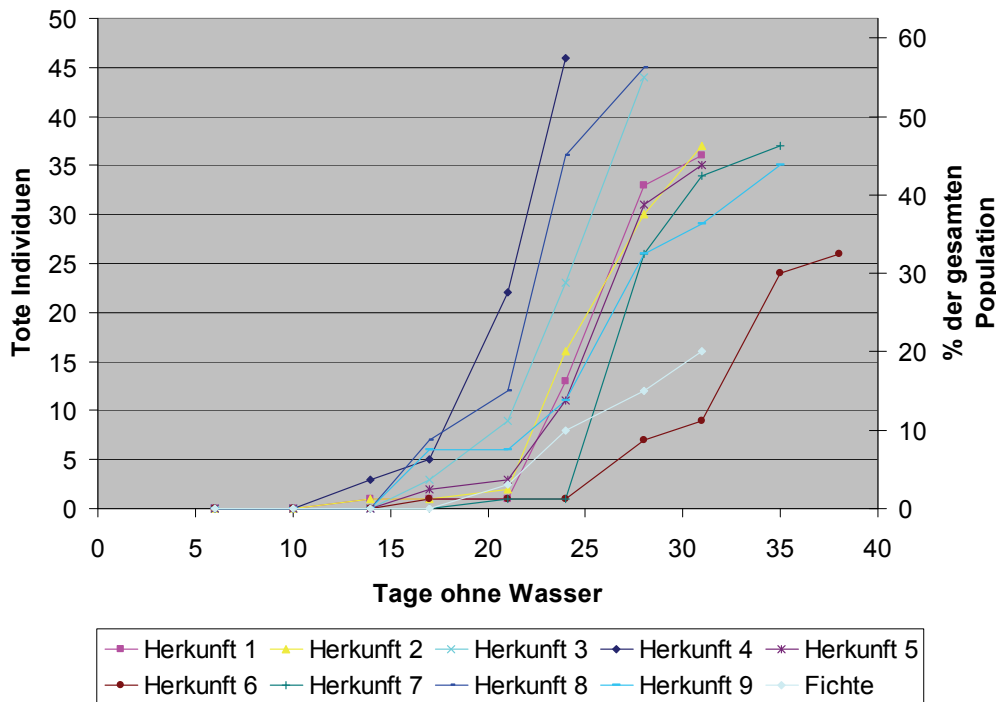


Abb.6. Mortalitätsverlauf der unterschiedlichen Herkünfte und Baumarten

Mortalität im Vergleich zur Bodentrockenheit

Sehr interessant scheint der Zusammenhang zwischen Mortalität und dem abnehmenden Bodenwassergehalt. Dies erlaubt einen kritischen Bodenwassergehalt für die Baumart und Herkunft zu definieren, ab welchem Sterbeprozesse anfangen und/oder schnell zunehmen. Dieser Wert kann mit aktuellen Messungen im Freiland oder mit Modellen für die Zukunft verglichen werden, um so das Mortalitätsrisiko auf Grund von Bodenwasseraus schöpfung für Wälder zu erkennen bzw. prognostizieren. Diese Möglichkeit kann eine Schlüsselfunktion sowohl von ökonomischer als auch von ökologischer Seite der Bewirtschaftung und Erhaltung in den vom Klimawandel beeinflussten Wäldern der Zukunft spielen und die Ökosystemstabilität deutlich erhöhen.

Der Sterbeprozess von Untersuchungspflanzen setzte am frühesten bei der Herkunft 9 ein bei nur 70% relativer Bodenwasserverfügbarkeit (rBV), während der späteste Zeitpunkt bei Herkunft 7 beobachtet werden konnte- die bei 37% rBV einsetzte. Die relative Bodenwasserverfügbarkeit (rBV) ist definiert als aktueller Anteil der nutzbaren Feldkapazität (nFK) in %. Für die Berechnung von rBV wurde eine nFK in Höhe von 22,5% des Bodenporenvolumens verwendet.

Der Verlauf von den Sterbevorgängen ist ein nicht-linearer Prozess (Allen & Breshears 1998, Franklin et al. 1987, Moorcroft et al. 2001) zitiert in (Adams et al. 2009). Nach (Allen & Breshears 1998) kann diese Reaktion am besten mit der Weibull-Funktion beschrieben werden. Diese wird als S-Kurve definiert: Sie fängt langsam an (flacher Kurvenanstieg) und dann, ab einem bestimmten Punkt wird die Sterbekurve steiler, was der rapiden Erhöhung von Todesfällen entspricht. Das Auslaufen der Kurve am Ende soll wieder flacher werden, was aber in diesem Versuch auf Grund von fehlender Pflanzenzahl nicht beobachtet werden konnte. Der steile Kurvenabschnitt ist bei allen Buchenherkünften (außer H 6) ähnlich und befindet im Bereich von ca. 35-20% rBV. Diese Reaktion wurde am frühesten bei Herkunft 4 beobachtet.

tet. Schon ab 48% bis 43% rBV nimmt die Mortalität deutlich zu. Danach folgt eine kurze Entspannung (weniger Todesfälle), und dann ab 35% folgt ein intensives Pflanzensterben. Die Herkunft 1 reagiert als letzte auf Trockenstress mit erhöhter Mortalität erst ab ca. 22% rBV, wobei die Intensität dann umso stärker ansteigt. Die ersten Todesfälle treten bei Herkunft 6 relativ früh schon bei ca. 35% rBV auf, dann aber ist die Sterbeintensität deutlich niedriger als bei allen anderen untersuchten Buchen.

Die ersten Fichten sterben bei ca. 52% rBV. Der Verlauf der Mortalität ist ähnlich wie bei Buche Herkunft 6, allerdings mit noch weniger Todesfällen (siehe Abb.7).

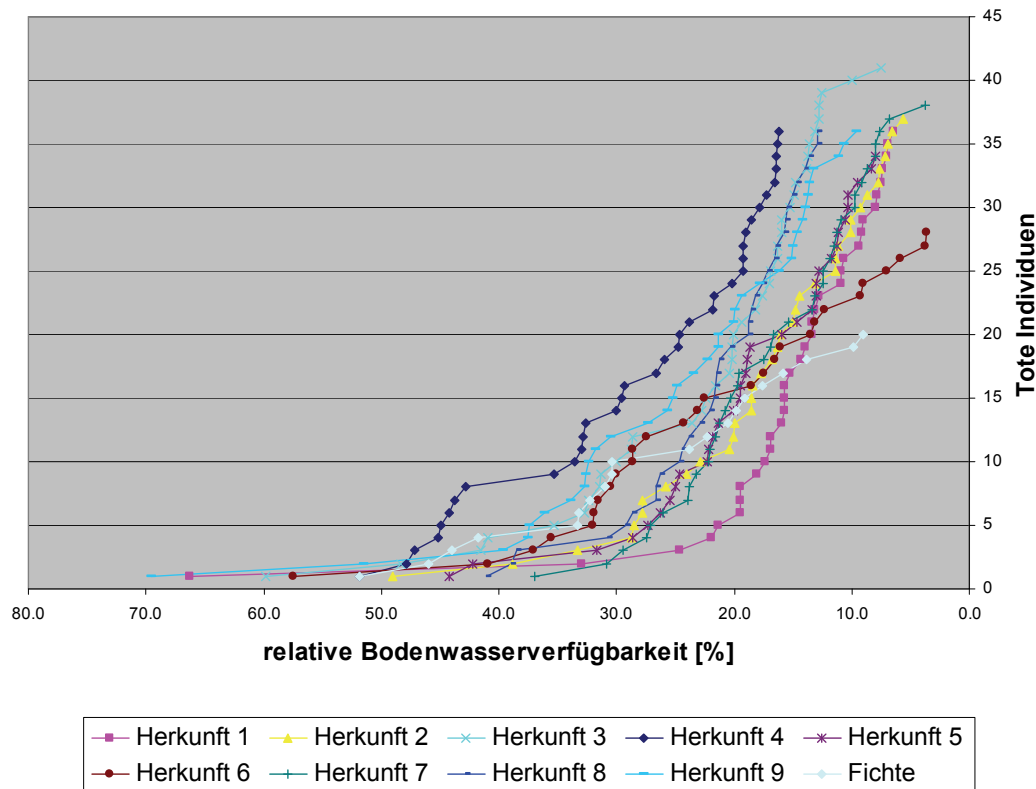


Abb. 7. Pflanzenmortalität in Bezug auf den relativen Bodenwassergehalt

Mortalität im Vergleich zu Wasserpotentialen

Die Dunkel-Wasserpotentiale sind Mittelwerte von 3 bis 10 Pflanzen pro Herkunft pro Mess-tag. Bei der Buche zeigt sich im Verlauf von Wasserpotentialen ein deutlicher Zusammenhang mit der zeitlichen Verteilung der Sterberate. Die Herkunft 6 weist an fast allen Mess-tagen der Trockenstresssimulation die höchsten Wasserpotentiale (niedrigster Stress = niedrigste Sterberate) auf. Dagegen erreichen Herkünfte 4 und 8 als erste schon nach 17 Tagen ohne Wasser entsprechend Potentiale von -27,2 und -24,4 bar, was auf einen 50%igen Verlust der Xylemleitfähigkeit bei Buche und auf einen hohen Wasserstress (inkl. Stressschäden und/ oder Tod der Pflanze) hindeutet (Czajkowski et al. 2009). Die absolut niedrigsten Werte wurden bei der Herkunft 1 nach 31 Tage ohne Wasser gemessen und betragen -41,7 bar.

Die Fichte zeigte ein ganz anderes Reaktionsverhalten auf Trockenstress als die Buche. Abgesehen von der Messung am 28 Tag zeigte die Fichte mit Abstand die niedrigsten Wasserpotentiale im Laufe des Versuches. Auch die absolut niedrigsten Werte von -50,4 bar nach 31 Tagen ohne Wasser deuten auf eine sehr starke Stressreaktion der Gattung und können mit 90-100% Verlust der Xylemleitfähigkeit bei der Gattung verbunden werden (siehe Abb.8).

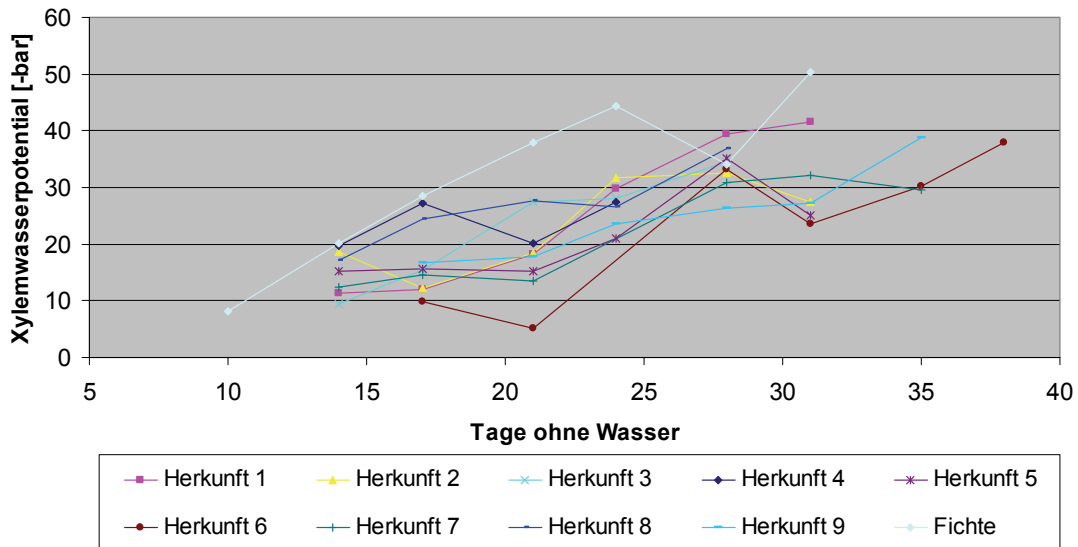


Abb. 8. Verteilung der pre dawn Wasserpotentiale.

Mortalität im Vergleich zum Gaswechsel

Die Ergebnisse des Gaswechsels sind als Mittelwerte von 2-3 Kontroll- und 5-8 Behandlungspflanzen pro Herkunft pro Messtag entstanden.

Die Anwendung von Gaswechsellmesssystemen in Trockenstressexperimenten ist ein Standardverfahren. In vorliegendem Experiment hat sich allerdings herausgestellt, dass bei der Betrachtung von letalen Stresssimulationen die Anwendung des Porometers nur begrenzt sinnvoll ist. Dies hat zwei Gründe. Zum einen zeigen die Pflanzen mit ihren Gaswechselprozessen eine rasche Reaktion auf unzureichendes Wasserangebot. Die Warnsignale bei mangelndem Feuchtigkeitszustand des Bodens werden von der Wurzel zum Assimilationsapparat (den Blättern) geschickt. Dort werden die Spaltöffnungen (Stomata) geschlossen, um den Wasserverbrauch (die Transpiration) zu reduzieren. Gleichzeitig wird auch die CO₂ Zufuhr begrenzt und so wird auch die Photosynthese reduziert. Die Reaktionsgeschwindigkeit vom Warnsignal bis zum Stomataschluss kann eine entscheidende Rolle bei der Anpassungsfähigkeit der Pflanze auf auftretende Trockenperioden spielen. Zum anderen zeigen die gemessenen Pflanzen deutliche Streuungen in der Reaktion auf Trockenstress. Da die Gaswechselraten bei den stark gestressten Pflanzen sehr gering waren, reichte schon eine einzige Pflanze mit besserer Vitalität um die Mittelwerte für den Gaswechsel zu „verfälschen“. In solchen Fällen wäre die Gewichtung von einzelnen Messungen notwendig. Kleine Pflanzen zeigten besonders hohe Streuwerte, da deren relativ niedrige Blattfläche in viel langsamerem Wasserverbrauch resultierte, was die Gaswechselprozesse, Wasserpotentiale und letztendlich auch die Sterberate beeinflusste. Dieses Phänomen trat vor allem bei den Buchen aus der Schweiz auf, die sehr hohe Standardabweichungen in der Blattfläche zeigten.

Aus den oben genannten Gründen sind die Porometer-Messungen vor allem bei den Pflanzen mit Trockenstress kritisch zu betrachten und die starken Ausreißer zu erklären.

Hinzu kommt noch ein Faktor der große Schwankungen bei Gaswechsellmessungen, insbesondere bei Transpirationsrate und Blattleitfähigkeit, hervorrufen könnte. Die unterschiedlichen Außenbedingungen im Gewächshaus, wie Temperatur, Luftfeuchte und das daraus

folgende Sättigungsdefizits der Luft (VPD), konnten durch Beschattung und Lüftung nur begrenzt beeinflusst werden um die Vergleichbarkeit der Messungen zu gewährleisten. Das ist ein genereller Nachteil bei der Lokalisation von solchen Versuchen im Gewächshaus. Empfehlungswert für die Durchführung von solchen Experimenten sind Klimakammern mit der Steuerungsmöglichkeit für die wichtigsten Außenfaktoren. Die Schlüsselrolle der VPD im Trockenstress und Überlebenswahrscheinlichkeiten der Pflanzen wurde ausführlich in Brethairs et al. (2013) angesprochen.

Die Transpirationsrate der Kontrollpflanzen (Buche und Fichte) während des Versuches lag zwischen ca. 1- 2,5 mmol/m²s. Die Blattleitfähigkeitswerte waren ziemlich verstreut und lagen zwischen 60-180 mmol/m²s.

Die Photosynthese bei Buchenkontrollpflanzen betrug ca. 4-7 μmol/m²s, während die Fichte ca. 10-12 μmol/m²s aufwies. (Abb.9).

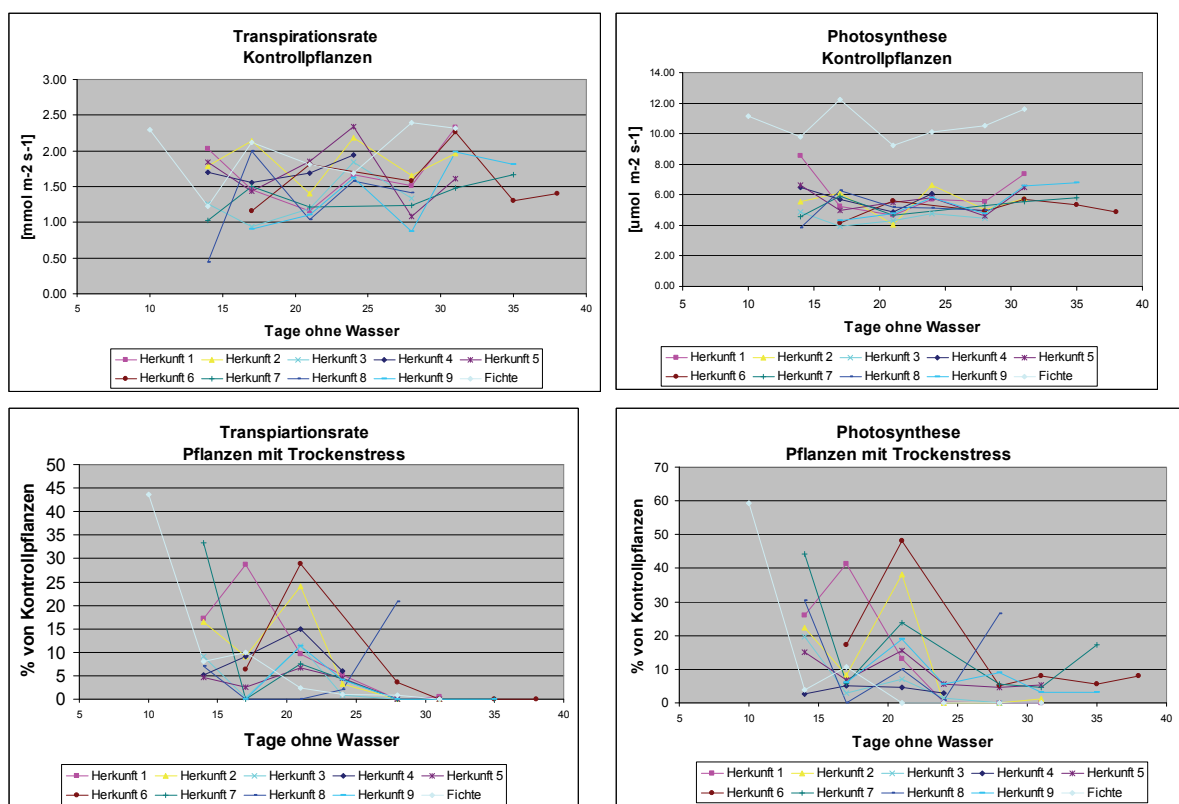


Abb. 9. Transpiration und Photosynthese von behandelten Pflanzen und Kontrollpflanzen.

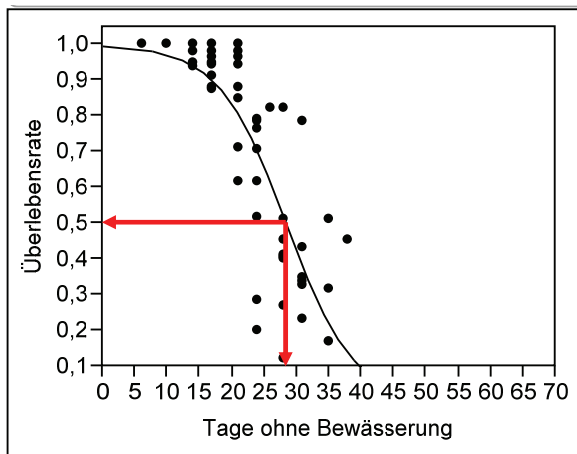
Die Werte von Gaswechselprozessen bei den Pflanzen mit Trockenstress wurden in % von entsprechenden Kontrollpflanzen gleicher Herkunft und gemessen am gleichen Messtag dargestellt.

Abgesehen von den o.g. Gründen für die Ausreißerwerte, wurde nach ca. 14 Tagen ohne Wasser (ca. 60% von rBV) eine starke Reduzierung der Messwerte (ca. 90% bei Transpiration und ca. 80% bei der Photosynthese) beobachtet. Trotz deutlichen Schwankungen zwischen den Buchenherkünften, lässt sich die besondere Stellung der Herkunft 6 bestätigen, die die niedrigsten Einbußen aufweist. Die Fichte zeigt im Vergleich mit Buche eine sehr starke und homogene Reaktion.

Überlebensfunktionen 1 (Bezug: Länge der Trockenphase)

Die Überlebensfunktionen für Buche (zusammengefasste Herkünfte) und Fichte zeigen Unterschiede. Während die Überlebensrate für Buche nach etwa 20 Tagen ohne Wasserzufuhr deutlich abnimmt, ist für Fichte erst nach 25 bis 30 Tagen eine starke Abnahme der Überlebensrate zu verzeichnen. Der Abfall ist für Buche auch steiler und erreicht bei etwa 28 Tagen eine Mortalitätsrate von 50% der Population (L50). Bei Fichte werden 50% Mortalität erst nach etwa 32 Tagen ohne Wasserzufuhr erreicht. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass es unter extremen Trockenstress bei Buche zu einem Versagen des Wasserleitsystems („Hydraulic failiure“) kommen kann. Das Wasserleitsystem der Fichte mit kleineren Tracheiden scheint dafür weniger anfällig zu sein. Allerdings zeigen sich bei Buche erhebliche Herkunftsunterschiede bei der Trockenstress-Anfälligkeit.

Buche (alle Herkünfte)



Fichte (eine Herkunft)

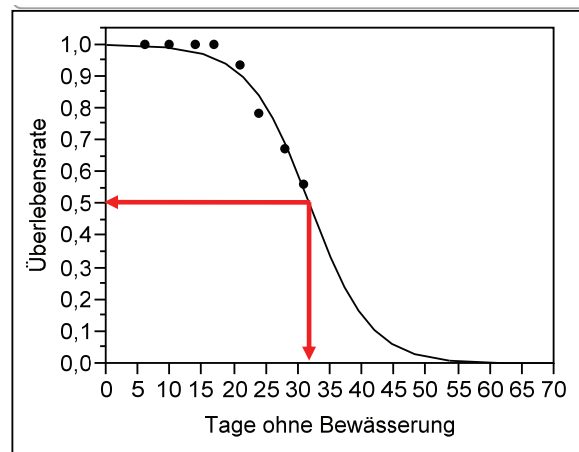


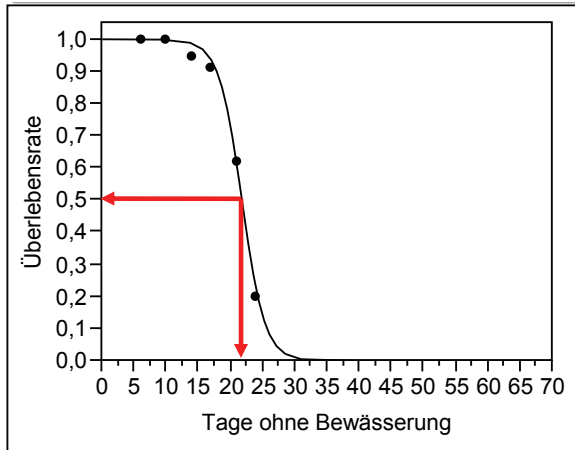
Abb. 10. Überlebensfunktion für Buche (alle Herkünfte) und Fichte (Parameter der Anpassung in Tab. 3)

Tab. 3. Parameter der logistischen Regression für die Baumarten Buche und Fichte (Nicht-lineare Anpassung (Logistische Regression), Formel: $y = 1/(1+\beta_0 \cdot \text{Exp}(\beta_1 \cdot x))$, Lösung: Gauss-Newton

Nr	Baumart	β_0	Stdf	β_1	Stdf	SSE	MSE	RMSE	N	DFE
1	Buche	0,004193663	0,002698274	0,193245567	0,024009431	1,540576185	0,0220082	0,1483517	72	70
2	Fichte	0,00028071	0,00027161	0,29360407	0,03521361	0,01196658	0,0019944	0,044659	8	6

Die größten Spannweiten in der Überlebensfunktion zeigen sich bei Buche zwischen der Herkunft 4 (Nord-Deutschland) und der Herkunft 6 (Mittleres Polen). Hier liegen bei Betrachtung der Tagesanzahl ohne Wasserzufuhr bis zum Erreichen von 50% Mortalität (LD 50) 14 Tage zwischen den Herkünften (Herkunft 4: 22 Tage, Herkunft 6: 36 Tage; Abb. 11). Die polnische Herkunft zeigt sich damit weniger sensitiv gegenüber Trockenheit als die Fichte.

Herkunft 4: Buche/Sellhorn



Herkunft 6: Buche/Golub-Dobrzyn

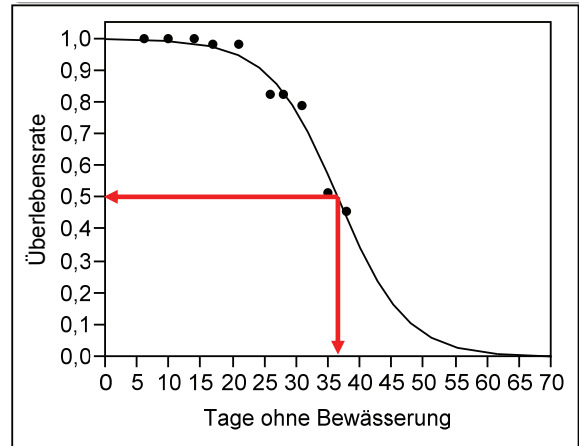


Abb. 11. Überlebensfunktion für zwei ausgewählte Buchenherkünfte (Parameter der Anpassung für alle Buchenherkünfte in Tab. 4).

Tab. 4. Parameter der logistischen Regression für Buchenherkünfte (Nichtlineare Anpassung (Logistische Regression), Formel: $y = 1/(1+\beta_0 \cdot \text{Exp}(\beta_1 \cdot x))$), Lösung: Gauss-Newton

Nr	Herkunft	β_0	Stdf	β_1	Stdf	SSE	MSE	RMSE	N	DFE
1	Buche/Skrwilno	0,00013072	0,00018571	0,32120312	0,05141676	0,0209105	0,0034851	0,0590346	8	6
2	Buche/Brodnica	0,00028071	0,00027161	0,29360407	0,03521361	0,01196658	0,0019944	0,044659	8	6
3	Buche/Jamy	6,0846E-05	1,62E-05	0,38305201	0,01071602	0,00045398	0,0000908	0,0095287	7	5
4	Buche/Sellhorn	5,0239E-06	5,38471E-06	0,56227107	0,04909124	0,0026414	0,0006603	0,0256973	6	4
5	Buche/Ahlhorn	0,00015853	0,0001771	0,31368586	0,0404324	0,0135163	0,0022527	0,0474628	8	6
6	Bu/Golub-Dobrzyn	0,00111245	0,00071654	0,1866333	0,01902398	0,01028492	0,0012856	0,0358555	8	6
7	Buche/Crecy	0,00041423	0,00070551	0,29249917	0,06348001	0,0652695	0,0093242	0,096562	9	7
8	Buche/Neuenkirch	3,4657E-05	0,00004784	0,45669959	0,06116317	0,01019473	0,0020389	0,0451547	7	5
9	Buche/Tüscherz	0,0038488	0,002009915	0,18660473	0,01815003	0,0123303	0,0017615	0,0419699	9	7

Überlebensfunktionen 2 (Bezug: Relative Bodenwasserverfügbarkeit)

Durch die enge statistische Beziehung zwischen der Länge der Trockenphase und der relativen Bodenwasserverfügbarkeit (Abb. 12) lassen sich die Überlebensfunktionen auch auf die Wasserverfügbarkeit im Boden beziehen.

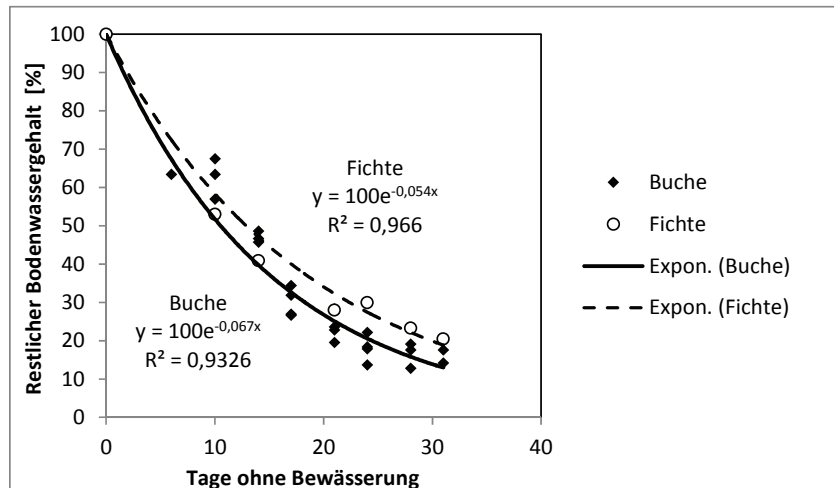


Abb. 12. Zusammenhang zwischen Länge der Trockenheit und der relativen Bodenwasserverfügbarkeit

Die Unterschiede in der Überlebensrate zwischen Buche und Fichte gleichen sich bei Betrachtung der relativen Bodenwasserverfügbarkeit an. Beide Baumarten erreichen 50% Mortalität (*LD 50*) bei 17% bis 18% relativer Bodenwasserverfügbarkeit (Abb. 13). Damit kann unter Einbeziehung von Unsicherheiten eine **kritische Schwelle von 20% relativer Bodenwasserverfügbarkeit** (bezogen auf die nutzbare Feldkapazität, nFK) bestätigt werden. Beim Unterschreiten dieser Schwelle ist mit erheblichen Ausfällen der Verjüngung zu rechnen. Die höhere Trockenheitstoleranz der Fichtenjungpflanzen in Bezug auf die Länge der Trockenphase liegt hauptsächlich im höheren Bodenwasserverbrauch der Buchenjungpflanzen im Vergleich zur Fichte begründet (Abb. 12).

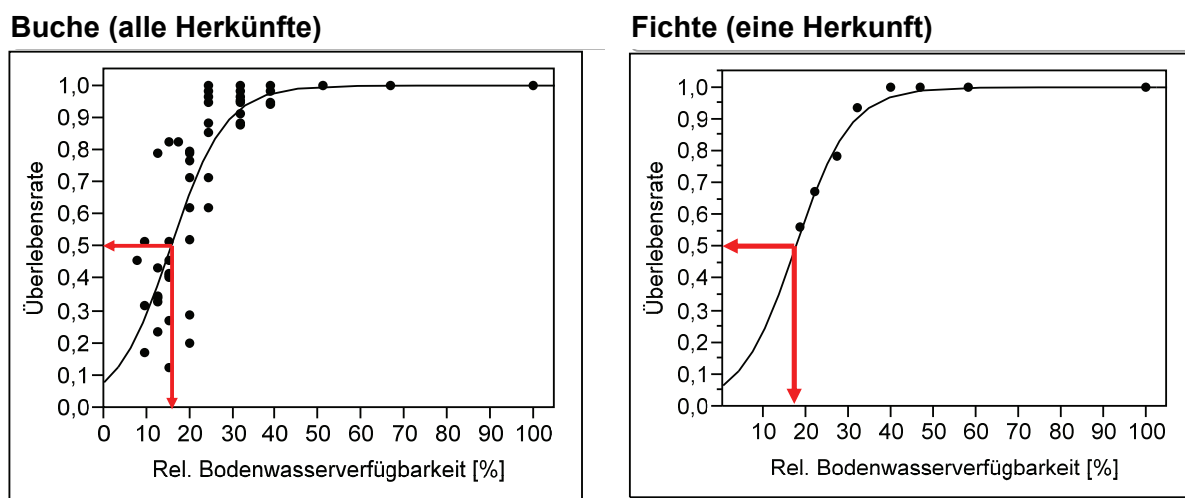


Abb. 13. Überlebensfunktion für Buche (alle Herkünfte) und Fichte (Parameter der Anpassung in Tab. 4

Tab. 5. Parameter der logistischen Regression für die Baumarten Buche und Fichte (Nicht-lineare Anpassung (Logistische Regression), Formel: $y = 1/(1+\beta_0 \cdot \text{Exp}(\beta_1 \cdot x))$, Lösung: Gauss-Newton

Nr	Baumart	β_0	Stdf	β_1	Stdf	SSE	MSE	RMSE	N	DFE
1	Buche	11,51491496	4,25817393	-0,15743131	0,02081738	1,35249447	0,01932130	0,13900130	72	70
2	Fichte	14,93931873	5,38761879	-0,15476374	0,01607352	0,00363187	0,00060531	0,02460308	8	6

3.2 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Allgemeiner Nutzen

Die vorhergesagten Klimaänderungen (u.a. Temperaturerhöhung, geänderte Niederschlagsmenge und -verteilung, Zunahme von Klimaextremen wie Hitze- und Trockenperioden (IPCC 2007, Jentsch et al. 2007, Meehl & Tebaldi 2004, Schar et al. 2004)) werden sich mit hoher Wahrscheinlichkeit negativ auf die Produktivität (Ciais et al. 2005, Hoog et al. 2008, Eilmann & Rigling 2012), Stabilität und Vitalität (Breshears et al. 2005, Bigler et al. 2006, Gitlin et al. 2006) vorkommender Ökosysteme auswirken.

Die zukunftsorientierte Walderhaltung und Bewirtschaftung wird unter einem neuen, zunehmend wichtigen Kriterium betrachtet – die der Anpassungsfähigkeit der verwendeten Baum-

arten (Bolte & Degen 2010, Bolte et al. 2010, Jensen et al. 2008, Kölling & Ammer 2006, Kölling et al. 2009, Roloff & Grundmann 2008, Zebisch et al. 2005).

Diese Herausforderung kann nur dann aufgearbeitet werden wenn:

- Sterbeprozesse von Bäumen vollständig verstanden werden können. Diese Prozesse sollten in engem Zusammenhang mit Standortfaktoren (wie Bodenwassergehalt) analysiert werden. Dies erlaubt bei der Klimamodellierung die kritischen Grenzen für Baumarten früh zu erkennen und durch Verwendung von anderen (mehr resistenten) Baumarten oder besser angepassten Herkünften das Baum- und Waldsterberisiko zu minimieren.
- die Anfälligkeit der Baumarten für Absterben in Folge von Trockenstress untersucht wird. Auch die Unterschiede innerhalb einer Art können eine wichtige Rolle bei spielen.

Durch die Arbeit und Ergebnisse dieses Projektes wurden sowohl theoretische (Experimentdesign) wie auch praktische Erkenntnisse zu den o.g. Herausforderungen geliefert. Diese Basis sollte das Ausgangspotential für weitere Baumexperimenten bilden, die den Erhalt des Waldes für zukünftige Generationen gewährleisten helfen.

Nutzen für das Verbund-Projekt „Agrarrelevante Extremwetterlagen“

Der entscheidende Nutzen des EH-Vorhabens für das Projekt „Agrarrelevante Extremwetterlagen“ besteht darin, dass durch die Experimente eine **kritische Schwelle von 20% der relativen Bodenwasserverfügbarkeit** abgeleitet werden konnte, bei deren Unterschreiten eine hohe Gefahr des Ausfalls der Naturverjüngung an Buche und Fichte gegeben ist (*LD50*). Dieser Wert wird im Folgenden für Modellierungen des Trockenrisikos für Buche und Fichte im Projekt verwendet. Zudem sind die Ergebnisse zum unterschiedlichen Anpassungsstatus von Buche (geringere Regulation des Wasserverbrauchs) und Fichte (stärkere Regulation des Wasserverbrauchs) wichtig.

4 Zusammenfassung

Die Reaktion von Baumverjüngungen der Baumarten Buche und Fichte auf extreme Trockenheit wurde in einem Trockenstress-Experiment unter kontrollierten Bedingungen untersucht. Ziel war, die kritische Grenze von Trockenheit zu ermitteln, die zu einem Absterben der Verjüngung führt. Dazu wurde ein neues Versuchsdesign entwickelt. Dies erlaubt die Absterberaten von getopften Jungpflanzen bei letalem Trockenstress zu bestimmen. Die Mortalität wurde sowohl mit pflanzenphysiologischen Faktoren (Gaswechsel und Wasserpotentiale) als auch standörtlichen Faktoren (Bodenwassergehalt) korreliert. Untersucht wurden neun Buchenherkünfte aus einem klimatischen Gradienten von Frankreich bis Polen wie der Schweiz sowie eine lokale Fichtenherkunft aus dem ostdeutschen Tiefland.

Die Buchenherkünfte zeigten unterschiedliche Reaktionen auf letalen Trockenstress. Die höchste Mortalität wurde bei Buchen aus dem Norden Deutschlands (H4, Sellhorn) beobachtet, die niedrigste bei polnischen Buchen aus Golub-Dobrzyn (H6). Eine kritische Mortalitätsrate von 50% der Population (*L50*) wurde bei Buche im Durchschnitt aller Herkünfte nach 28 Tagen ohne Wasserzufuhr erreicht (H4: 22 Tage bis H6: 36 Tage), bei Fichte erst nach 32 Tagen. Die *L50*-Werte bezogen auf die relative Wasserverfügbarkeit sind jedoch zwischen

Fichte und Buche vergleichbar und liegen bei 17% bis 18% Verfügbarkeit (bezogen auf die nutzbare Feldkapazität, nFK). Daraus wurde für Buche und Fichte eine kritische Schwelle von 20% relativer Bodenwasserverfügbarkeit abgeleitet. Beim Unterschreiten dieser Schwelle ist mit dem Ausfall der Verjüngung zu rechnen. Die Fähigkeit von Fichte, im Durchschnitt länger als Buche Trockenheit zu ertragen, ist in einem geringeren Wasserverbrauch unter Trockenheitseinfluss begründet.

Die Ergebnisse zeigen, dass es möglich ist, mit waldbaulichen Maßnahmen und strategischer Planung, wie der gezielten Auswahl von Herkünften bzw. Arten das Risiko von Mortalitätsschäden bei extremem Trockenstress zu minimieren.

5 Gegenüberstellung der ursprünglich geplanten zu den tatsächlich erreichten Zielen; mit Hinweisen auf weiterführende Fragestellungen

Ziel 1: *Entwicklung eines Simulations- und Versuchsdesigns mit dem Ziel, repräsentative Absterberaten von Buchen- und Fichtenjungpflanzen-Beständen zu definierten Behandlungszeitpunkten (zunehmende Trockenheitseinwirkung) zu erzielen.*

Ziel wurde erreicht. Das theoretische Verfahren konnte im Einsatz noch korrigiert und verbessert werden. Die Methode beinhaltet ein relativ einfaches Design, das sich angesichts aktueller Fragestellungen in der Pflanzenphysiologie und Biologie als Standardverfahren etablieren könnte. Zu Bedenken ist eine Variation von Trockenheitsintensität und -dauer (z.B. durch eine zwischenzeitliche Wasserzufuhr für Behandlungspflanzen). Intensität und Dauer sind die entscheidenden Faktoren bei Auswirkung von Stress auf Pflanzen

Ziel 2: *Vorbereitung der Buchen- und Fichtenpflanzen für die Trockenheitssimulation (Auswahl von einheitlichem Pflanzenmaterial aus vorangezogenen Beständen).*

Ziel wurde erreicht. Um die Homogenität und Vergleichbarkeit der untersuchten Pflanzen zu gewährleisten, ist zu empfehlen, Saatgut und Pflanzen mit einem standardisierten Verfahren zu behandeln und am besten an einem Standort zu kultivieren. Auch die Unterschiede zwischen den Herkünften in der Blattfläche pro Pflanze und den hier nicht untersuchten anderen morphologischen Merkmalen (wie z.B. Stomataanzahl) sollten noch genauer untersucht werden, um deren Einfluss auf den Wasserverbrauch zu präzisieren.

Ziel 3: *Durchführung der Trockenheitssimulationen und Ableitung von Absterberaten.*

Ziel wurde erreicht. Ein relativ einfaches Verfahren mit sehr hoher Arbeitsintensität wurde erarbeitet und durchgeführt. Die Anwendung des Porometers bei extremem Trockenstress muss kritisch beurteilt werden. Als Ergänzungsmessung scheint die Ableitung von „*vulnerability curves*“ (Verlust der Xylemleitfähigkeit bei ansteigendem Druck durchfallende Wasserpotenziale) von großer Bedeutung. Auf diesem Weg gewonnene Erkenntnisse könnten noch mehr zum Thema trockenheitsbedingtes Pflanzensterben beisteuern.

Eine zusätzliche Bestimmung des Bodenwassergehaltes wäre vom großen Nutzen. Es gibt zwar viele Meßsysteme, die aber leider nicht bei kleinen Töpfen eingesetzt werden können.

Die Korrektur der Sterberate beim Austrieb im nächsten Frühling sollte mit einbezogen werden.

Ziel 4: Modellierung von Absterbe/Überlebensfunktionen (Logistische Regression) aus den Versuchsdaten für Jungpflanzenbestände mit Buche und Fichte.

Ziel wurde erreicht. Die Überlebensfunktionen konnten mit Hilfe einer logistischen Regressionsanalyse abgeleitet werden. Die Funktionen wurden sowohl auf die Dauer der Trockenheitswirkung als auch die relative Bodenwasserverfügbarkeit bezogen. Hierdurch konnten Unterschiede in der Anpassung der beiden Baumarten und der Buchenherkünfte herausgearbeitet werden. Ein viel versprechender Ansatz ist die Anwendung des L50-Konzeptes (50% Mortalität der untersuchten Population) in der Trockenstress-Bewertung.

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.

Allen, C. D., Breshears, D. D. (1998): Drought-induced shift of a forest-woodland ecotone: Rapid landscape response to climate variation. Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 95, 14839-14842.

Barigah, T.S., Charrier, O., Douris, M., Bonhomme, M., Herbette, S., Améglio, T., Fichot, R., Brignolas, F., Cochard, H. (2013): Water stress-induced xylem hydraulic failure is a causal factor of tree mortality in beech and poplar. Annals of Botany 112: 1431-1437.

Bigler, C., Bräker, O.U., Bugmann, H., Dobbertin, M., Rigling, A. (2006): Drought as an inciting mortality factor in Scots pine stands of the Valais, Switzerland. Ecosystems 9:330–343.
BMELV (Hrsg.) (2005): Die zweite Bundeswaldinventur – BWI2: Der Inventurbericht, Bonn.

Bolte, A., Degen, B. (2010): Anpassung der Wälder an den Klimawandel: Optionen und Grenzen. Landbauforschung - vTI Agriculture and Forestry Research 60, 3: 111-117.

Bolte, A., Ammer, C., Löf, M., Nabuurs, G.J., Schall, P., Spathelf, P. (2010): Adaptive forest management – a prerequisite of sustainable forestry in the face of climate change. In: Spathelf, P. (ed.): Sustainable forest management in a changing world: European perspective. Managing forest ecosystems 19, Springer, Dordrecht, Heidelberg: 115-139.

Choat, B., Jansen, S., Brodribb, T.J., Cochard, H., Delzon, S., Bhaskar, R., Bucci, S.J., Field, 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.

Bolte, A., Czajkowski, T., Kompa, T. (2007): The north-eastern distribution area of European beech – a review. *Forestry* 80, 4: 413-429.

Breshears, D. D., Adams, H.D., Eamus, D., McDowell, N., Law, D.J., Will, R.E. Williams, A.P., Zou, C.B. (2013): The critical amplifying role of increasing atmospheric moisture demand on tree mortality and associated regional die-off. *Front Plant Sci.* 2013; 4: 266.

Ciais, P., Reichstein, M., Viovy, N. et al. (2005): Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature* 437:529–533.

Czajkowski, T., Kühling, M., Bolte, A. (2005) Einfluss der Sommertrockenheit im Jahre 2003 auf das Wachstum von Naturverjüngungen der Buche (*Fagus sylvatica* L.) im nordöstlichen Mitteleuropa. *Allg. Forst- u. Jagdztg.* 176: 133-143.

Czajkowski, T., Bolte, A. (2006): Frosttoleranz deutscher und polnischer Herkünfte der Buche (*Fagus sylvatica* L.) und ihre Beeinflussung durch Trockenheit. *Archiv f. Forstwesen u. Landsch. Ökol.* 40(3):119-126.

Czajkowski, T., Ahrends B., Bolte, A. (2009): Critical limits of soil water availability (CL-SWA) in forest trees - an approach based on plant water status. *vTI agriculture and forest research*, 59, (2): 87-93.

Ehlers, W. (1996): Wasser in Pflanze und Boden. Dynamik des Wasserhaushalts als Grundlage von Pflanzenwachstum und Ertrag. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart (Hohenheim), S. 272.

Eilmann, B., Rigling, A. (2012): Tree-growth analyses to estimate tree species' drought tolerance. *Tree Physiol* 32:178–187.

EUFORGEN (2009): Distribution map of Beech (*Fagus sylvatica*), www.euforgen.org.

Franklin, J. F., Shugart, H. H., Harmon, M. E. (1987): Tree death as an ecological process. *BioScience*, 37, 550-556.

Geßler, A.; Keitel, C.; Kreuzwieser, J.; Matyssek, R.; Seiler, W., Rennenberg, H. (2007) Potential risks for European beech (*Fagus sylvatica* L.) in a changing climate. *Trees* 21: 1-11.

Gitlin, A.R., Sthultz, C.M., Bowker, M.A., Stumpf, S., Paxton, K.L., Kennedy, K., Munoz, A., Bailey, J.K., Whitham, T.G. (2006): Mortality gradients within and among dominant plant populations as barometers of ecosystem change during extreme drought. *Conserv Biol* 20:1477–1486.

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. *Nature Climate Change* 3: 203–207.

Hogg, E., Brandt, J., Michaellian, M. (2008): Impacts of a regional drought on the productivity, dieback, and biomass of western Canadian aspen forests. *Can J For Res* 38:1373–1384.
IPCC (2007) *Climate Change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* pp. 1009. Cambridge University Press, Cambridge.

Jansen, M., C. Döring, B. Ahrends, A. Bolte, T. Czajkowski, O. Panferov, M. Aalbert, H. Spellmann, J. Nagel, H. Lemme, M. Habermann, K. Staupendahl, B. Möhring, M. Böcher, S. Storch, M. Krott, R. Nuske, J. C. Thiele, J. Nieschulze, J. Saborowski, Beese, F. (2008): Anpassungsstrategien für eine nachhaltige Waldbewirtschaftung unter sich wandelnden Klimabedingungen - Entwicklung eines Entscheidungsunterstützungssystems Wald und Klimawandel (DSS-WuK). *Forstarchiv* 79, 131-142.

Jentsch, A., Kreyling, J., Beierkuhnlein, C. (2007): A new generation of climate-change experiments: events, not trends. *Front Ecol Environ* 5:365–374.

Kursar, T. A., Engelbrecht, B.M.J., Burke, A., Tyree, M.T., El Omari, B., Giraldo, J.P. (2009): Tolerance to low leaf water status of tropical tree seedlings is related to drought performance and distribution. *Funct. Ecol.* 23, 93–102.

Kölling, C., Ammer, C. (2006): Waldumbau unter den Vorzeichen des Klimawandels. Zahlen der Bundeswaldinventur zeigen Anpassungsschwerpunkte. *AFZ-DerWald* 61. Jg. Nr. 20, S. 1086-1089.

Kölling, C., Knoke, T., Ammer, C., Schall, P. (2009): Überlegungen zum Risiko des Fichtenanbaus in Deutschland vor dem Hintergrund des Klimawandels. *Forstarchiv* 80 H. 2, S. 42-54.

Larsen, J. B. (1978): Frostresistenz der Douglasie. Dissertation, In : *Schriften a. d. Forstl. Fak. d. Univ. Göttingen*, Bd. 52.

Lens, F., Tixier, A., Cochard, H., Sperry, J.S., Jansen, S., Herbette, S. (2013): Embolism resistance as a key mechanism to understand adaptive plant strategies. *Curr Opin Plant Biol.* 16(3):287-92.

Meehl, G.A., Tebaldi, C. (2004): More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century. *Science* 305:994–997.

Moorcroft, P. R., Hurtt G. C., Pacala S. W. (2001): A method for scaling vegetation dynamics: The ecosystem demography model (ED). *Ecol. Monogr.*, 71, 557-585.

Plaut, J.A., Yopez, E.A., Hill, J., Pangle, R., Sperry, J.S., Pockman, W.T., McDowell, N.G.(2012): Hydraulic limits preceding mortality in a piñon-juniper woodland under experimental drought. *Plant Cell Environ.* 35(9):1601-1617.

Roloff, A., Grundmann, B. (2008): Klimawandel und Baumarten-Verwendung für Waldökosysteme. Forschungsbericht. Technische Universität Dresden, Institut für Forstbotanik und Forstzoologie. Tharandt. 46 S.

Scholander, P.F., Hammel, H.T., Bradstreet, E.D., Hemmons, E.A. (1965). Sap pressure in vascular plants. *Science* 148: 339-346.

Schär, Ch., Vidale, P.L., Lüthi, D., Frei, Ch., Häberli, Ch., Liniger, M.A., Appenzeller, Ch. (2004): The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature* 427, 332-336.

Urli, M., Porté, A.J., Cochard, H., Guengant, Y., Burlett, R. Delzon, S. (2013): Xylem embolism threshold for catastrophic hydraulic failure in angiosperm trees. *Tree Physiol* 33 (7): 672-683.

Višnjić, C., Dohrenbusch, A. (2004): Frostresistenz und Phanologie europäischer Buchenprovenienzen. *Allg. Forst- u. J.-Ztg.* 175: 101–108.

Zebisch, M., Grothmann, T., Schröter, D., Haße, C., Fritsch, U., Cramer, W. (2005): Climate change in Germany. Vulnerability and adaptation of climate sensitive sectors / Klimawandel in Deutschland – Vulnerabilität und Anpassungsstrategien klimasensitiver Systeme. Report 201 41 253. Dessau: Federal Environmental Agency Germany / Umweltbundesamt.