

Fichten und Buchen im Rein- und Mischbestand unter 5-jährigem Trockenstress. Ergebnisse des Austrocknungsexperiments KROOF

*Hans Pretzsch, Thomas Rötzer
Lehrstuhl für Waldwachstumskunde, TU München*

1 Einleitung

Neuere Untersuchungen zeigen, wie der nachteilige Effekt von episodischer Trockenheit auf das Bestandeswachstum durch die Mischung von Baumarten mit hydrologisch komplementären Eigenschaften gemindert werden kann (GROSSIORD 2019, LEBOURGEOIS et al. 2013, PRETZSCH et al. 2012). Wie allerdings längere Trockenperioden, wie sie in Zukunft erwartet werden, auf das Baumwachstum unter intra- oder inter-spezifischen Bedingungen wirken, ist bisher unklar. Angesichts des Klimawandels befassen sich zahlreiche Untersuchungen mit den Auswirkungen extremer Trockenheit auf das Baum- und Bestandeswachstum. Bisherige Arbeiten beziehen sich zumeist auf Reinbestände und auf singuläre Trockenjahre. Die Stress- oder Akklimatisierungsreaktionen auf längere Trockenheit wurden bisher, u. a. wegen des hohen experimentellen Aufwands, allenfalls an jungen Bäumen untersucht. In dieser Studie wurde das Wuchsverhalten von 60-80jährigen Fichten und Buchen im Rein- und Mischbestand im Kranzberger Forst bei Freising in den episodischen Trockenjahren 2003 und 2015 und bei 5jähriger experimenteller Austrocknung untersucht. Im Einzelnen wurden folgende Fragen bearbeitet:

F1: Wie hat der Zuwachs der zwei Arten im Reinbestand auf die Trockenjahre 2003 und 2015 im Vergleich zum Mischbestand reagiert?

F2: Wie hat der Zuwachs der zwei Arten im Rein- und Mischbestand auf die 5jährige Austrocknung reagiert?

F3: Welche Mortalitätsraten zeigten beide Arten unter normalen Bedingungen, unter episodischer Trockenheit und bei längerer experimenteller Austrocknung?

2 Material und Methoden

2.1 Material

Versuchsobjekte sind die Rein- und Mischbestände aus Fichten und Buchen im Kranzberger Forst, die von HÄBERLE et al. (2012) und PRETZSCH et al. (2014) eingehend beschrieben wurden. Die Bestände stocken auf nährstoffreichen Braunerden aus Feinlehm. Die Klimadaten für die Zeitperiode 1998 bis 2018 belaufen sich auf eine Mitteltemperatur im Jahr von 8,3° Celsius und in der Vegetationszeit von 14,4° Celsius. Die Niederschläge betragen 826 mm pro Jahr und 488 mm in der Vegetationsperiode. Der Index von DE MARTONNE (1926) lag bei 45,3 mm °C⁻¹ bzw. 20,1 mm °C⁻¹ in der Vegetationsperiode.

Die Versuchsflächen umfassen Parzellen mit Fichte und Buche im Rein- und Mischbestand. Bei der letzten Vollaufnahme der Versuchsflächen im Kranzberger Forst im Jahr 2016, waren die Fichten 65 und die Buchen 85 Jahre alt. Die Oberhöhen betragen im Mittel 34,3 m bei der Fichte und 33,0 m bei der Buche und zeigen sehr günstige Wuchsbedingungen der Bonität O40 der Fichtenertragstafel von ASSMANN und FRANZ (1963) und der I. Bonität der Buchenertragstafel von SCHÖBER (1975) an. Der Mitteldurchmesser betrug 27,1-36,4 cm, die Mittelhöhe 27,2-36,4 m und der Durchmesser des Grundflächenmittelstammes der 100 stärksten Bäume pro Hektar lag bei 41,4-44,9 cm. Die Baumzahlen betragen 639-926 Bäume pro Hektar und die Bestandesgrundflächen 54,0-60,1 m² ha⁻¹. Die Vorräte lagen bei 802-981 m³ ha⁻¹ und die mittleren periodischen Volumenzuwächse in der Periode 1998-2016 betragen 19,4-26,3 m³ ha⁻¹ Jahr⁻¹.

Vor Beginn der Austrocknung im Jahre 2014 wurden die Parzellen im Frühjahr 2010 mit Umfassungsgräben versehen, um seitlichen Wasseraustausch auszuschließen. Zu diesem Zweck wurden um die 12 Parzellen (6 Kontrollparzellen und 6 Austrocknungsparzellen) 1 m tiefe und 15 cm breite Gräben gezogen. In diese Gräben wurde eine beständige, wasserundurchlässige Plastikfolie eingebracht und dann beidseitig wieder mit Erde verfüllt (PRETZSCH et al. 2016). Eine dichte tertiäre Tonschicht in 1 m Tiefe dürfte die Parzellen nach unten hin abdichten (HÄBERLE et al. 2015).

Die Auswertung gründet auf zwei Datensätzen. Einen ersten Datensatz bilden Umfangmessungen seit 1998 mit permanenten Dendrometer (UMS, Deutschland) mit 1 mm Auflösung in der Stammhöhe 1,30

m. Diese lieferten für 268 und 214 Fichten und 141 and 108 Buchen Zuwachsmesswerte für die Trockenjahre 2003 bzw. 2015 zur Beantwortung von Frage F1.

Zur Analyse der Zuwachsreaktionen auf längere experimentelle Austrocknung (Frage F2), wurden weitere 51 Fichten und 51 Buchen seit 2011 mit permanenten Umfangmessbändern ausgestattet. Etwa die Hälfte davon wurden auf 6 Parzellen mit Dachkonstruktionen von 2014-2018 ausgetrocknet, die anderen Bäume wurden auf weiteren 6 Parzellen als Kontrolle gemessen (PRETZSCH et al. 2016).

Zur Quantifizierung der Mortalität (Frage F3) wurden beide Datensätze verwendet, das erstgenannte Kollektive zur Untersuchung der Wirkung episodischer Trockenheit in 2003 und 2015 und das zweitens genannte Kollektiv zur Wirkung der experimentellen Austrocknung auf die Mortalitätsrate von Fichten und Buchen.

Ausgehend vom Stammdurchmesser d_i zu Beginn eines jeden Jahres i und der jährlichen Zunahme an Umfang ic_i wurde der jährliche Durchmesserzuwachs ($id_i = ic_i / \pi$) und davon ausgehend, für die weiteren Auswertungen der jährliche Zuwachs an Grundfläche anhand der Formel

$$iba_i = \pi / 4 \times (d_i + id_i)^2 - \pi / 4 \times d_i^2 = \pi / 4 \times (2 \times d_i \times id_i + id_i^2)$$

berechnet (ASSMANN 1961, p. 52).

Abbildung 1 zeigt die Entwicklung der Niederschlags- und Temperaturwerte sowie des Martonne Indexes von 1998-2018. Demnach gab es in den zurückliegenden Jahren sowohl normale als auch besonders feuchte und besonders trockene Jahre; hervorzuheben sind die Trockenjahre 2003 und 2015. Die Trockenjahre 2003 und 2015 (vertikale Linien) standen im Mittelpunkt dieser Auswertung, ebenso die Jahre 2014-2018, in denen die Bäume während der Vegetationszeit auf 6 Parzellen mit automatisch schließenden Dächern ausgetrocknet wurden. Im Winterhalbjahr ermöglichte eine Öffnung der Dächer in gewissem Maße eine Wiederauffüllung des Wasserspeichers im Boden. Die meteorologischen Daten stammen von der Waldklimastation Freising und wurden dankenswerter Weise von der LWF in Freising/Weihestephan zur Verfügung gestellt. Weitere Informationen zur Versuchsanlage im Kranzberger Forst, zu den Standorten, der Technik der Austrocknung und zum Baum- und Bestandeswachstum finden sich bei GÖTTLEIN et al. (2012), HÄBERLE et al. (2012) bzw. PRETZSCH et al. (1998, 2018).

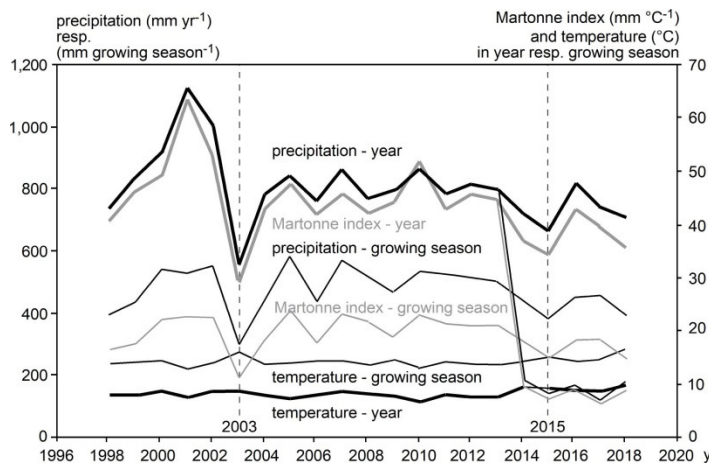


Abbildung 1 Niederschlag, Mitteltemperatur und Martonne Index für den Kranzberger Forst seit 1998 im gesamten Jahr und in der Vegetationsperiode von Mai-September. Die Trockenjahre 2003 und 2015 sind durch vertikale Linien hervorgehoben. Der Effekt der Austrocknung, beginnend im Jahr 2014, zeigt sich durch den deutlichen Rückgang des Niederschlages und des Martonne Indexes auf weniger als ein Viertel des vorherigen langjährigen Mittels.

2.2 Methoden

Die Charakterisierung der Artenzusammensetzung in der Nachbarschaft der einzelnen Bäume erfolgt über die Abfrage der Artzugehörigkeit der 6 nächsten Nachbarn. Daraus wurde abgeleitet, ob ein Baum der Gruppe FiFi, FiBu, BuBu oder BuFi zuzuordnen ist (in den Grafiken und Tabelle mit ss, sb, bb, und bs bezeichnet, wobei s für spruce und b für beech steht).

Im fortentwickelten Stadium stehen die Bäume in gleichaltrigen Beständen wie im Kranzberger Forst häufig im Hexagonalmuster, so dass jeder Baum im Durchschnitt sechs direkte Nachbarn hat (vgl. n=1...6 in Abbildung 2a). Auf Abbildung 2b ist eine Fichte als Zentralbaum gezeigt, die nur von Fichten umgeben ist. Sie wurde in die Gruppe FiFi (ss) eingeordnet und mit einem fremdartigen Mischungsanteil von 0 % charakterisiert, weil $m_{\text{fremd}} = 0 / 6 \times 100 = 0.0$ oder 0 %. Die Konstellation in

Abbildung 2c erbringt analog die Gruppenzuordnung von FiBu (sb) und $m_{\text{fremd}} = 3/6 \times 100 = 0.5$ oder 50 %. Abbildung 2d zeigt eine Nachbarschaft von BuFi (bs) und $m_{\text{fremd}} = 6/6 \times 100 = 1.0$ oder 100%. Sobald sich die Nachbarschaft nicht nur aus sechs gleichartigen Bäumen aufbaute, wurde der Zentralbaum also der Gruppe FiFi bzw. BuFi zugeordnet, nur bei völlig gleichartiger Nachbarschaft gehörte er in die Gruppen FiFi bzw. BuBu.

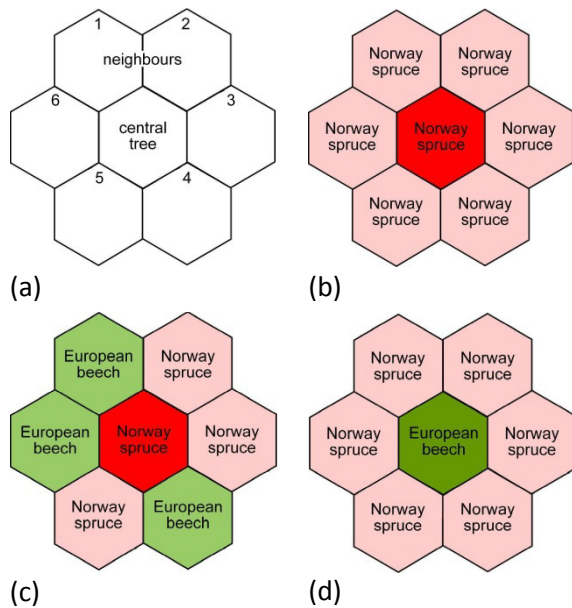


Abbildung 2: Die Charakterisierung der Artenzusammensetzung in der Nachbarschaft der einzelnen Bäume erfolgt über die Abfrage der Artzugehörigkeit der 6 nächsten Nachbarn. Daraus wurde die Gruppenzugehörigkeit FiFi, FiBu, BuBu oder BuFi abgeleitet (in den folgenden Grafiken und Tabelle mit ss, sb, bb, und bs bezeichnet, wobei s für spruce und b für beech steht).

Für den Vergleich der Stressreaktionen zwischen den Baumarten, sowie zwischen Rein- und Mischbestand, kamen u. a. die Indizes Rt, Rc und Rs von LLORET et al. (2011) zur Anwendung. Diese Indizes wurden auf der Grundlage der jährlichen Grundflächenzuwächse ($\text{cm}^2 \text{Jahr}^{-1}$) berechnet. Die drei Indizes bauen sich aus folgenden Variablen auf: PreDr bezeichnet den mittleren Grundflächenzuwachs in einer Periode vor Eintritt eines Stressereignisses, Dr bezeichnet den Zuwachs innerhalb einer zuwachsschwachen Stressperiode und die Variable PostDr gibt den mittleren Grundflächenzuwachs in einer Periode nach dem Stressereignis an.

Der Index für Resistenz $R_t = \text{Dr} / \text{PreDr}$ quantifiziert den Abfall des Zuwachses von der Periode vor Eintritt des Stresses auf den Zuwachs in der Stressperiode. Der Index Recovery $R_c = \text{PostDr} / \text{Dr}$ beschreibt die Zuwachsreaktion nach der Stressperiode. Der Index Resilienz $R_s = \text{PostDr} / \text{PreDr}$ bezeichnet die Relation zwischen Zuwachsniveau nach der Stressperiode und Zuwachsniveau vor der Stressperiode.

Aus den gewonnenen Bohrkernen, die bis 1998 zurückreichen, greifen wir die Trockenjahre 2003 und 2015 als Stressereignisse heraus. Zur Berechnung der genannten Indizes verwenden wir die Jahre 2000-2002 als Referenzperiode (PreDr), das Jahr 2003 als Stressereignis (Dr) und die Jahre 2004 bis 2006 als Nach-Stressperiode (PostDr). Für das Stressereignis 2015 wurde analog gewählt PreDr=2012-2014, Dr=2015 und PostDr=2016-2018. Die Periodenlängen für die Vorperiode, die Nachperiode und das Stressjahr wurden in Testrechnungen in der Länge zwischen 2 bis 5 Jahre modifiziert, ohne dass sich gravierende Unterschiede in den Ergebnissen ergaben.

Für die Berechnung der Mortalitätsraten standen die Baumzahlen (N_b , N_e) zu Beginn und am Ende definierter Beobachtungsperioden zur Verfügung. Über die Zinseszinsformel können dann die Mortalitätsraten m oder Mortalitätsprozente $m\%$ wie folgt berechnet werden. $N_e = N_b \times 1.0m^n$, $1.0m = \sqrt[n]{N_e / N_b}$, $m = 1 - \sqrt[n]{N_e / N_b}$, $m\% = m \times 100$. Dabei bedeuten

N_e Anzahl der Bäume zu Beginn einer mehrjährigen Beobachtungsperiode, N_b Anzahl der Bäume am Ende einer mehrjährigen Beobachtungsperiode, n Länge der Periode in Jahren, m Mortalitätsrate, $m\%$ Mortalitätsprozent.

3 Ergebnisse

3.1 Effekt der Trockenjahre 2003 und 2015 auf den Zuwachs von Fichten und Buchen

Tabelle 1 zeigt einige Charakteristika der Fichten und Buchen, die für die Analyse der episodischen Trockenheit in 2003 und 2015 (Frage F1) verwendet wurden. Für beide Trockenperioden ist der Grundflächenzuwachs vor dem Trockenjahr, im Trockenjahr und in der 3jährigen Periode nach dem Trockenjahr angegeben.

Die Zahlen zeigen, dass der Grundflächenzuwachs der Fichten generell mehr als doppelt so hoch ist, wie der Zuwachs der Buche. Im Trockenjahr 2003 nimmt der Zuwachs der Fichte auf 41 %, jener der Buche auf 76 % der Vorperiode ab. Danach erholt sich die Fichte langsamer als die Buche. Im Jahr 2015 ist die Fichte wiederum weniger trockenheitsresistent als die Buche; der Zuwachs der Fichte nimmt auf 51 % der Vorperiode ab, während die Buche in diesem Jahr sogar leicht zunimmt. Die in Tabelle 1 fett gedruckten Zahlen geben das Zuwachsniveau in den Trockenjahren im Vergleich zu den jeweiligen Vorperioden an, repräsentieren also die Resistenz.

Tabelle 1 Kennwerte für die Fichten und Buchen, die in die Analyse der Trockenjahre 2003 und 2015 (Frage F1) einbezogen wurden. Dargestellt sind der Stammdurchmesser, d, die Baumhöhe, h, der lokale Bestandesdichteindex, SDI, jeweils zu Beginn der Trockenperiode (Herbst 2002 bzw. 2014). Der jährliche Zuwachs der Grundfläche, iba, ist für die 3-Jahres-Perioden vor den Trockenjahren, für die Trockenjahre selbst und für die 3-Jahres-Perioden nach den Trockenjahren angegeben.

year	n	mean	d ₂₀₀₂	h ₂₀₀₂	SDI ₂₀₀₂	iba ₂₀₀₀₋₂₀₀₂	iba ₂₀₀₃	iba ₂₀₀₃ / iba ₂₀₀₀₋₂₀₀₂	iba ₂₀₀₄₋₂₀₀₆
2003		± SE	cm	m	ha ⁻¹	cm ² year ⁻¹	cm ² year ⁻¹		cm ² year ⁻¹
N. spruce	268	mean	28.12	26.79	860	21.19	8.60	0.41	13.64
		± SE	0.56	0.26	18	1.01	0.40		0.71
E. beech	141	mean	22.76	24.59	805	8.95	6.84	0.76	8.58
		± SE	0.69	0.37	20	0.96	0.70		0.93

year	n	mean	d ₂₀₁₄	h ₂₀₁₄	SDI ₂₀₁₄	iba ₂₀₁₂₋₂₀₁₄	iba ₂₀₁₅	iba ₂₀₁₅ / iba ₂₀₁₂₋₂₀₁₄	iba ₂₀₁₆₋₂₀₁₈
2015			cm	m	ha ⁻¹	cm ² year ⁻¹	cm ² year ⁻¹		cm ² year ⁻¹
N. spruce	214	mean	34.26	32.00	1009	16.84	8.58	0.51	11.02
		± SE	0.61	0.29	22	0.97	0.44		0.65
E. beech	108	mean	27.00	21.10	898	6.53	7.03	1.08	6.75
		± SE	0.84	0.45	24	0.75	0.80		0.74

Abbildung 3 visualisiert die langfristige Entwicklung des jährlichen Grundflächenzuwachses aller mit Zuwachsmessbändern ausgestatteten Bäume im Kranzberger Forst seit 1998; weggelassen wurden nur die seit 2014 mit Hilfe von Dächern ausgetrockneten Bäume. Denn im hiesigen ersten Auswertungsschritt sollte der Effekt der natürlichen episodischen Trockenheit auf den Zuwachs untersucht werden. Die Entwicklungsgänge in Abbildung 3 zeigen, dass die Trockenjahre 2003 und 2015 bei der Fichte zu deutlich stärkeren Einbrüchen als bei Buche führen.

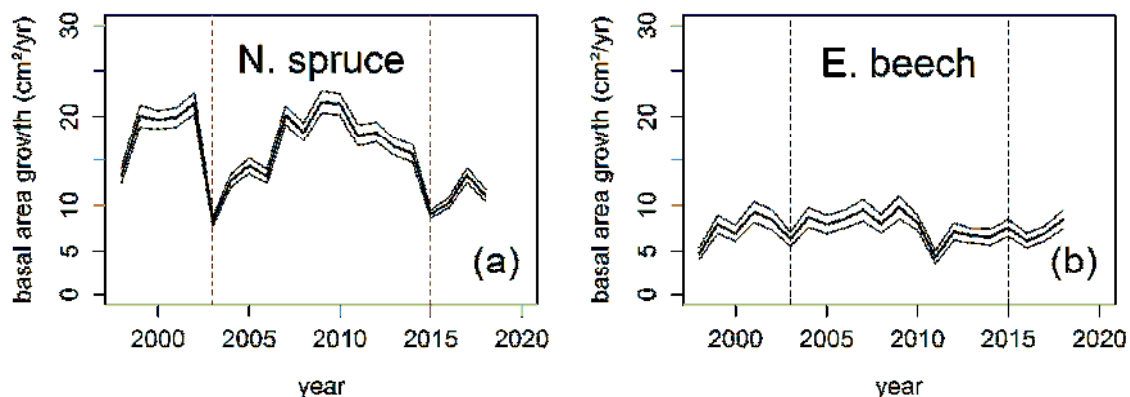


Abbildung 3 Mittlerer jährlicher Grundflächenzuwachs (± SE) aller (a) Fichten (n= 268) und (b) Buchen (n= 141) außer jenen auf den Parzellen mit experimenteller Austrocknung seit 2014 (die Baumzahlen beziehen sich auf die 2003 vorhandenen Bäume). Die Fichten zeigen eine deutliche Zuwachsreduktion in den Trockenjahren 2003 und 2015, während die Buchen im Jahr 2003 nur leicht einbrechen und 2015 im Zuwachs sogar leicht ansteigen.

Um das Stressverhalten bei interspezifischer, im Vergleich zu intra-spezifischer Nachbarschaft von Fichte und Buche, unter Trockenheit aufzudecken, wurde das Zuwachsverhalten in den Trockenjahren 2003 und 2015 im Vergleich zu den entsprechenden Vor- und Folgeperioden analysiert (Abbildung 4).

Wir zeigen die Ergebnisse nur für das Trockenjahr 2003. Für das Jahr 2015 fiel die Analyse tendenziell ähnlich, aber weniger deutlich als 2003 aus. Abbildung 4a unterstreicht den wesentlich stärkeren Zuwachseinbruch von Fichten im Vergleich zu Buchen im Trockenjahr, zunächst für die Arten insgesamt, also ohne Unterscheidung der Nachbarschaftsverhältnisse.

Interessanterweise litt der Grundflächenzuwachs der Fichten um 10-20 % weniger unter der Trockenheit im Jahr 2003, wenn diese in Nachbarschaft von Buchen wachsen (vgl. Abbildung 4b, Linien für Mittelwert und Standardfehler für sb im Vergleich zu ss). Die Zuwachsverluste der Fichte im Jahr 2003 waren also im Reinbestand höher als im Mischbestand.

Der relative Grundflächenzuwachs in der Gruppe mit intra-spezifischer Konkurrenz (Gruppe ss, n= 192, Mittelwert (Standardfehler) $0,43\pm 0,02$, war signifikant ($p < 0,05$) niedriger als der relative Grundflächenzuwachs in der Gruppe mit inter-spezifischer Nachbarschaft (Gruppe sb, n= 62, Mittelwert (Standardfehler) $0,56\pm 0,05$).

Das Verhalten der Buche wich deutlich davon ab (Abbildung 4c). Die Buche litt im Mischbestand tendenziell stärker als im Reinbestand aber erholte sich vom Trockenjahr 2003 deutlich schneller (vgl. Abbildung 4c, Linien für Mittelwert und Standardfehler für bs). In der Nachbarschaft von Buchen waren Buchen tendenziell weniger von Trockenheit beeinträchtigt (vgl. Abbildung 4c, Linien für Mittelwert und Standardfehler für bb). Der relative Grundflächenzuwachs bei intra-spezifischer Konkurrenz (Gruppe bb, n= 93, Mittelwert (Standardfehler) $0,87\pm 0,07$) war tendenziell, aber nicht signifikant höher als der relative Grundflächenzuwachs in der Gruppe mit inter-spezifischer Nachbarschaft (Gruppe bs, n= 23, Mittelwert (Standardfehler) $0,67\pm 0,05$).

Während wir also bei der Fichte signifikant günstigere Stressreaktionen in Misch- gegenüber Reinbeständen fanden, erbrachte die Analyse für die Buche keine derartigen Unterschiede. Demnach ziehen die Fichten in Trockenjahren einen signifikanten Vorteil aus der Nachbarschaft zu Buchen, aber ohne Nachteil für die Buchen, denn diese haben ihr Zuwachsverhalten im Vergleich zum Reinbestand kaum verändert.

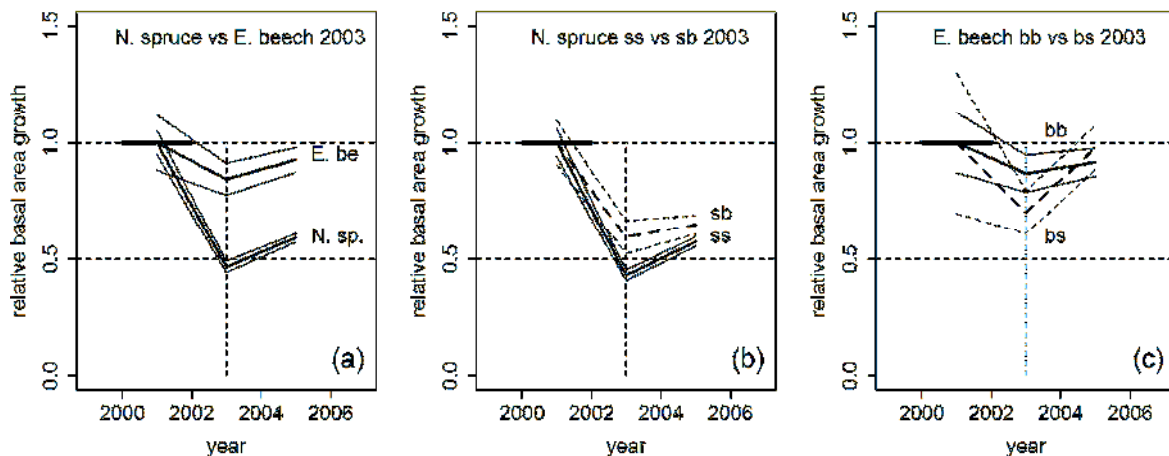


Abbildung 4 Visualisierung der Resistenz und Resilienz des Grundflächenzuwachses (\pm SE im Trockenjahr 2003). Der Zuwachs in der Vorperiode 2000-2002, wurde als Referenz (1,0-Linie) gewählt und der Zuwachs im Trockenjahr 2003 und in der Folgeperiode 2004-2006, in Relation zu dieser Referenz dargestellt.

- (a) Der Zuwachs der Fichten (Fi, N. sp.) sank abrupt ab und erholte sich nur langsam; der Zuwachs der Buchen (Bu, E. be.) war weniger stark von der Trockenheit beeinträchtigt.
- (b) Fichten in der Nachbarschaft von Buchen (FiBu, sb, gestrichelte Linien) litten um circa 20 % weniger unter Trockenheit als Fichten in gleichartiger Nachbarschaft (FiFi, ss).
- (c) Buchen neben Fichten (BuFi, bs, gestrichelte Linien) waren um 20 % stärker von der Trockenheit betroffen als Buchen in gleichartiger Nachbarschaft (BuBu, bb). Die Erholung der Buchen vollzog sich allerdings bei inter-spezifischer Konkurrenz schneller als bei intra-spezifischer Konkurrenz.

3.2 Effekt der experimentellen, langfristigen Austrocknung

Das Austrocknungsexperiment (Kontroll- und Behandlungspartellen) umfasst insgesamt 102 Bäume, deren jährlicher Grundflächenzuwachs mit permanenten Umfangsmessbändern erfasst und auf Abbildung 5 für den Zeitraum 2010 bis 2018 dargestellt ist. Mit Beginn der Austrocknung (gestrichelte Linien 2014), bricht der Zuwachs bei der Fichte stark, bei der Buche nur geringfügig, ein. Interessant ist, dass nach den ersten zwei bis drei Jahren der Zuwachsabnahme bei einigen Bäumen eine Stabilisierung und bei der Buche sogar eine deutliche Erholung eintritt, obwohl die Austrocknung ja über den gesamten Zeitraum 2014-2018 andauerte.

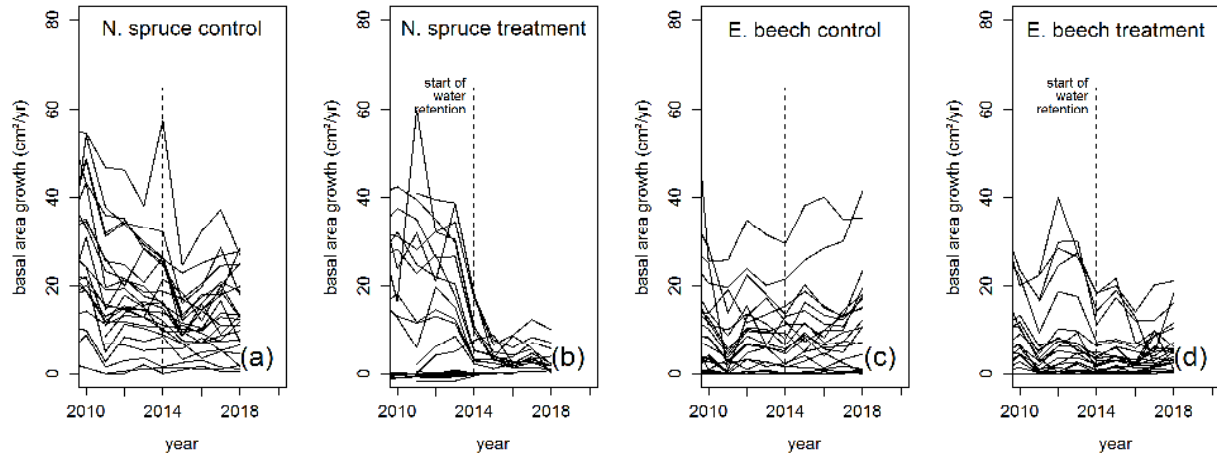


Abbildung 5 Jährliche Grundflächenzuwächse der Fichten (a und b) und Buchen (c und d) des Austrocknungsexperiments KROOF, dargestellt von 2010 bis 2018. Die vertikalen Linien zeigen den Beginn der Austrocknung im Jahr 2014. Im Vergleich zu den Bäumen auf den Kontrollpartellen (a) und (c) reagieren die Fichten auf die Austrocknung mit starker Zuwachsreduktion, die Buchen dagegen mit nur geringfügigem Zuwachsrückgang.

Tabelle 2 stellt die Zuwächse im Referenzzeitraum vor der Austrocknung 2011-2013 den Zuwächsen 2014-2018 gegenüber. Wohl bedingt durch das Trockenjahr 2015 geht bei der Fichte auch auf den Kontrollpartellen der Zuwachs leicht von 17,4 auf 13,4 cm² Jahr⁻¹ zurück. Die Austrocknung verursachte aber einen Rückgang auf etwa ein Viertel des ursprünglichen Niveaus (0,23). Bei der Buche geht der Zuwachs nur auf circa zwei Drittel (0,69) des Ausgangsniveaus zurück. Auf den Kontrollpartellen geht es mit dem Zuwachs der Buche im Zeitraum 2014-2018, trotz des Trockenjahres 2015, noch von 6,8 auf 8,5 cm² Jahr⁻¹ aufwärts.

Die fett und kursiv gesetzten Zahlen **0,30** und **0,55** in Tabelle 2 zeigen das Zuwachsniveau in der Austrocknungsperiode für Fichten und Buchen bei Berücksichtigung des allgemeinen Zuwachstrends von 2011-2018 (doppelte Prozentuierung: zunächst Trockenperiode/ Vorperiode, dann Behandlung/Kontrolle).

Tabelle 2 Kennwerte für die Fichten und Buchen, die von 2014-2018 in das Austrocknungsexperiment KROOF einbezogen wurden.

Die Stammdurchmesser, *d*, die Baumhöhen, *h*, und die lokalen Dichten an den Standpunkten der Bäume, *SDI*, sind für Herbst 2013, also den Ausgangszeitpunkt vor Beginn der Austrocknung angegeben. Die jährlichen Grundflächenzuwächse, *iba*, sind sowohl für die 3-Jahres-Periode vor Beginn der Austrocknung 2011-2013 als auch für die Austrocknungsperiode 2014-2018 angegeben.

group	n	mean	<i>d</i> ₂₀₁₃	<i>h</i> ₂₀₁₃	<i>SDI</i> ₂₀₁₃	<i>iba</i> ₂₀₁₁₋₂₀₁₃	<i>iba</i> ₂₀₁₄₋₂₀₁₈	<i>iba</i> ₂₀₁₄₋₂₀₁₈ / <i>iba</i> ₂₀₁₁₋₂₀₁₃
		± SE	cm	m	ha ⁻¹	cm ² year ⁻¹	cm ² year ⁻¹	
N. spruce control	25	mean	35.80	31.80	777	17.4	13.4	0.77
		± SE	1.56	0.37	73	1.3	0.8	
N. spruce treatment	26	mean	35.00	32.00	816	19.9	4.6	0.23
		± SE	1.80	0.42	35	1.7	0.4	
Growth loss								0.30
E. beech control	25	mean	28.20	28.30	851	6.8	8.5	1.25
		± SE	1.80	0.68	44	0.9	0.9	
E. beech treatment	26	mean	28.80	27.90	823	7.1	4.9	0.69
		± SE	1.80	0.65	43	1.1	0.5	
Growth loss								0.55

Abbildung 6 zeigt das Zuwachsverhalten der Bäume auf den ausgetrockneten Parzellen im Vergleich zur Vorperiode 2011-2013. (a) Insgesamt bricht die Fichte, wie in 2003 und 2015 bei natürlicher episodischer Trockenheit, auch bei längerer experimenteller Austrocknung im Zeitraum 2014-2018 deutlich ein. Der Zuwachsverlust von 50-60 % ist höher als bei der Buche, die aber auch zunächst um circa 40 % zurückgeht. Beide Arten stabilisieren sich dann aber auf niedrigem Niveau. Die Buche steigt nach 2-3 Jahren sogar wieder auf das Niveau der Vorperiode an.

Die Fichten neben Buche (b) erholten sich nach einigen Jahren, die Fichten neben Fichten sinken im Zuwachs weiter ab und stabilisieren sich auf geringem Niveau.

Die Buchen (c) erholten sich nach wenigen Jahren; die Buchen im Reinbestand, bb, erholen sich schneller und deutlicher als die Buchen neben Fichten, bs.

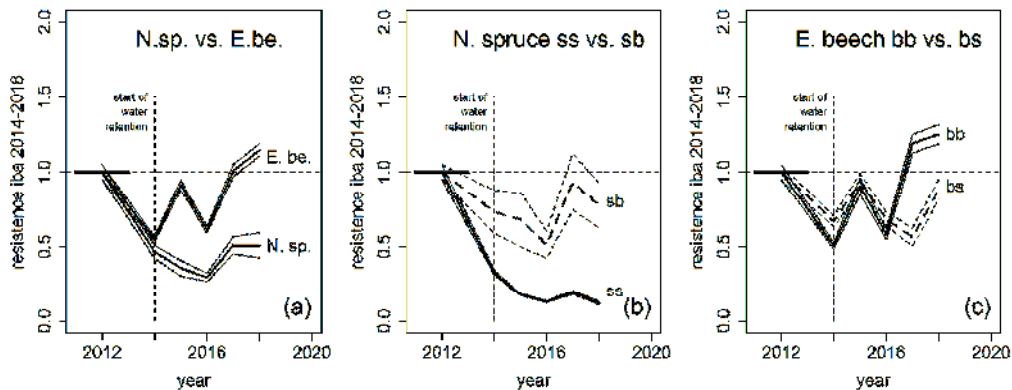


Abbildung 6 Visualisierung der Zuwachsresistenz in der Phase der Austrocknung von 2014-2018 (\pm SE). Der Zuwachs in der Vorperiode 2011-2013 wurde als Referenz gewählt und 1,0 gesetzt (1,0-Linie, schwarz, durchgezogen). Der Zuwachs in der Austrocknungsphase seit 2014 ist in Relation zu dieser Referenz aufgetragen.

- (a) Im Mittel fiel der Zuwachs der Fichte mit Beginn der Austrocknung steil ab, und er erholte sich nur langsam. Der Zuwachs der Buche geht weniger stark zurück und steigt wenige Jahre danach, über das ursprüngliche Niveau der Vorperiode hinaus, an.
- (b) Fichten, die in Nachbarschaft von Fichten wachsen (sb, gestrichelte Linien) waren weniger von der Austrocknung beeinträchtigt, und sie erholten sich auch deutlich schneller als Fichten neben Fichten (ss).
- (c) Buchen neben Fichten (bs gestrichelte Linien) wuchsen in den ersten Jahren besser als Buchen neben Buchen, mit anhaltender Austrocknung fielen sie aber unter das Niveau bei intra-spezifischer Konkurrenz ab.

Tabelle 3 vergleicht die Kontrollbäume mit den ausgetrockneten Bäumen von 2014-2018 auf jährlicher Basis. Bei diesem Vergleich auf jährlicher Basis, bestehen in den meisten Fällen signifikante Unterschiede zwischen dem Verhalten von Fichte und Buche und dem Zuwachsrückgang bei intra- und interspezifischer Nachbarschaft. Die Fichten fallen im Zuwachs insgesamt stärker ab als die Buchen. Die Fichten neben Buchen gewinnen gegenüber Fichte im Reinbestand. Die Buchen waren im Zuwachs nur im Jahr 2017 in inter-spezifischer Nachbarschaft sign. höher als in intra-spezifischer Nachbarschaft. In den anderen Jahren erbrachten benachbarte Fichten eher Nachteile in der Resistenz gegenüber Trockenheit.

Tabelle 3 Vergleich der Resistenz der Kontrollbäume mit den ausgetrockneten Bäumen auf jährlicher Basis von 2014-2018. Im ersten Teil werden alle ausgetrockneten Fichten und Buchen miteinander verglichen und die Mittel gegeneinander getestet. Im zweiten Teil wird der Zuwachs von Fichten neben Fichten mit dem Zuwachs von Fichten neben Buchen verglichen (ss vs. sb). Im dritten Teil erfolgt der analoge Vergleich für die Baumart Buche (bb vs. bs).

Groups	n	statistics	resistance iba[year]/ iba[in pre-drought years 2011-2013]				
			2014	2015	2016	2017	2018
N.sp. all	14	mean	0.46	0.36	0.29	0.51	0.51
		se	\pm 0.04	\pm 0.05	\pm 0.03	\pm 0.06	\pm 0.08
E.be. all	21	mean	0.55	0.91	0.61	1.01	1.14
		se	\pm 0.01	\pm 0.03	\pm 0.02	\pm 0.04	\pm 0.04
		sign	n. sig.	p<0.01	p<0.01	p<0.05	p<0.05
N.sp. ss	8	mean	0.32	0.18	0.13	0.19	0.12
		se	\pm 0.01	\pm 0.01	\pm 0.01	\pm 0.01	\pm 0.01
N.sp. sb	6	mean	0.73	0.68	0.51	0.93	0.77
		se	\pm 0.03	\pm 0.03	\pm 0.09	\pm 0.09	\pm 0.06
		sign	p<0.01	p<0.01	p<0.05	p<0.05	p<0.05
E.be. bb	15	mean	0.67	0.94	0.68	0.56	1.25
		se	\pm 0.02	\pm 0.05	\pm 0.03	\pm 0.06	\pm 0.06
E.be. bs	6	mean	0.50	0.91	0.58	1.19	0.88
		se	\pm 0.04	\pm 0.06	\pm 0.04	\pm 0.06	\pm 0.07
		sign	n. sig.	n. sig.	p<0.01	p<0.01	p<0.05

3.3 Mortalität von Fichte und Buche bei episodischer und experimentell ausgedehnter Trockenheit

Über den längeren Zeitraum 1998-2018 lag die Mortalitätsrate von Fichte und Buche bei 1,24 – 2,00 % (Tabelle 4). In diesem Zeitraum wurde auf der Fläche nicht aktiv durchforstet, d.h. diese Raten repräsentieren etwa Bedingungen der Selbstdurchforstung. Die jährlichen Raten auf den Kontrollparzellen in der Zeit 2011-2018, ebenfalls unter undurchforsteten Bedingungen, liegen etwa halb so hoch.

Demgegenüber war die Mortalitätsrate der Fichte auf den ausgetrockneten Parzellen mit 7,45 % wesentlich erhöht; die Buche liegt mit 1,46 auf ähnlichem Niveau wie die unbehandelten Flächen (Tabelle 4).

Demnach kommt zum Zuwachsrückgang der Fichte auf den Behandlungsparzellen auch noch ein deutlich erhöhter Ausfall hinzu. Durch diesen Ausfall könnten sich die Zuwachsbedingungen der verbleibenden Bäume verbessert haben. Jeder Ausfall auf einer Parzelle kann letztlich eine Entspannung des Wasserstress bewirken, weil sich die gleiche Menge Wasser auf weniger Bäume verteilt.

Tabelle 4 Baumzahlen zu Beginn, N_b , und am Ende, N_e , definierter Beobachtungsperioden für alle Bäume des Versuchs Kranzberger Forst ohne Behandlung, für die Bäume mit Austrocknung von 2014-2018 und für die Kontrollbäume. Aufbauend auf den Baumzahlen und der Periodenlänge n wurden nach der Zinseszinsformel $N_e = N_b \times 1.0m^n$ $1.0m = \sqrt[n]{N_e / N_b}$, $m = 1 - \sqrt[n]{N_e / N_b}$ die Mortalitätsraten m und die prozentische Mortalität $m_{\%} = m \times 100$ berechnet.

Gruppe	Baumart	Beginn	N_b	Ende	N_e	Anzahl Jahre n	Mortalitätsrate in % $m_{\%}$
alle ohne Beh.	Fichte	1998	277	2018	213	21	1,24
alle ohne Beh.	Buche	1998	156	2018	102	21	2,00
alle ohne Beh.	gesamt	1998	433	2018	315	21	1,50
Behandlung	Fichte	2011	26	2018	14	8	7,45
Behandlung	Buche	2011	27	2018	24	8	1,46
Behandlung	gesamt	2011	53	2018	38	8	4,07
Kontrolle	Fichte	2011	26	2018	26	8	0,00
Kontrolle	Buche	2011	31	2018	29	8	0,83
Kontrolle	gesamt	2011	57	2018	55	8	0,45

4 Diskussion

Für die Analyse der Zuwachsreaktionen von Fichte und Buche auf natürliche, episodische und experimentell ausgedehnte Trockenheit in mittelalten Rein- und Mischbeständen im Kranzberger Forst standen von 254 Fichten und 116 Buchen jährliche Zuwachsmessungen über Umfangmessbänder seit 1998 zur Verfügung. Die Zuwachsmessungen geben Aufschluss über die Stressreaktionen in den Trockenjahren 2003 und 2015. Um den Effekt längerer Trockenheit zu analysieren, wurden weitere 51 Fichten und 51 Buchen mit Umfangmessbändern ausgestattet, die Hälfte davon unter automatisch schließenden Dächern zur Austrocknung, die andere Hälfte als Kontrolle unter Normalbedingungen; alle plots wurden für diesen Zweck getrennt.

Generell sank der Zuwachs der Fichten, im Vergleich zu Buchen, deutlich stärker ab und erholte sich langsamer. Die Buchen gingen weniger stark im Zuwachs zurück und erholten sich schneller. Wenn Fichten in der Nachbarschaft von Buchen wachsen, war ihre Zuwachsreduktion im Vergleich zum Reinbestand geringer. Buchen im Mischbestand hingegen gehen im Zuwachs mehr zurück, und ihre Erholungsreaktion kann im Vergleich zum Reinbestand langsamer sein.

Die experimentell verursachte Trockenphase von 2014-2018 erbrachte in den ersten 2 Jahren einen Zuwachseinbruch wie bei episodischer Trockenheit. In den Folgejahren akklimatisieren sich aber beide Arten. Der experimentell verursachte Zuwachseinbruch lässt bei Buche schneller nach als bei der Fichte.

Wir vermuten, dass die Fichten neben Buchen von einer besseren Wasserversorgung im Frühjahr profitieren, solange die Buchen noch blattlos sind (GOISSER et al. 2016, RÖTZER et al. 2017). Dieser

frühere Zugriff der Fichte auf das Bodenwasser, dürfte das verringere Wasserangebot und Wachstum der Buche in Trockenjahren erklären. Die Zuwachserholung an längerer Trockenheit erst nach zwei Jahren deutlicher Reduktion, könnte durch eine allmähliche Anpassung der ober- und unterirdischen Organe, insbesondere eine verbesserte Wasserversorgung durch die Ausdehnung der Wurzeln und Mykorrhiza im Boden, zu erklären sein.

Sollten sich die für den Mischbestand gezeigte Resilienz und Akklimatisierung an Trockenheit in weiteren Untersuchungen bestätigen, so könnte das Eingang finden in die Überlegungen zur Entwicklung von klimaresistenten, ressourceneffizienten und produktiven Koniferen-Laubholz-Mischbeständen.

5 Danksagung

Dank geht an die Deutsche Forschungsgemeinschaft für die Förderung der Projekte "Structure and dynamics of mixed-species stands of Scots pine and European beech compared with monospecific stands. Analysis along an ecological gradient through Europe" (# DFG PR 292/15-1) und "From near-death back to life: Mixed stands of spruce and beech under drought stress and stress recovery. From pattern to process (# DFG PR 292/22-1). Dank geht außerdem an das Bayerische Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz für die Förderung des Projektes "Pine (*Pinus sylvestris*) and beech (*Fagus sylvatica*) in mixed stands: Suitable partners to ensure productivity on dry sites in times of climate change (KROOF II), (# GZ: TKP01KPB-73853), an das Bayerische Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten für die Finanzierung der Projektes „W047“ (# GZ: 7831-28160-2018) und an die Bayerischen Staatsforsten BaySF für die Bereitstellung der Flächen für die Versuchsanlagen.

6 Literatur

- ASSMANN E, FRANZ F (1963) Vorläufige Fichten-Ertragstafel für Bayern. Forstl Forschungsanst München, Inst Ertragskd, 104 p
- ASSMANN E (1961) Waldertragskunde. Organische Produktion, Struktur, Zuwachs und Ertrag von Waldbeständen. BLV Verlagsgesellschaft, München, Bonn, Wien, 490 p
- GÖTTLEIN A, BAUMGARTEN M, DIELER J (2012) Site conditions and tree-internal nutrient partitioning in mature European beech and Norway spruce at the Kranzberger Forst. In: Matyssek R, Schnyder H, Osswald W, Ernst D, Munch J C, Pretzsch H (eds.): Growth and Defence in Plants – Resource Allocation at Multiple Scales. Ecological Studies 220, Springer, Berlin, pp. 193-211.
- GOISSER, M., GEPPERT, U., RÖTZER, T., PAYA, A., HUBER, A., KERNER, R., BAUERLE, T., PRETZSCH, H., PRITSCH, K., HÄBERLE, K.H., MATYSSEK, R., GRAMS, T.E.E. (2016) Does belowground interaction with *Fagus sylvatica* increase drought susceptibility of photosynthesis and stem growth in *Picea abies*? *Forest Ecology and Management* 375:268-278.
- GROSSIORD, C. (2019) Having the right neighbors: how tree species diversity modulates drought impacts on forests. *New Phytologist*, doi: 10.1111/nph.15667
- Häberle, K.-H., Weigt, R., Nikolova, P.S., Reiter, I.M., Cermak, J., Wieser, G., Blaschke, H., Rötzer, T., Pretzsch, H., Matyssek, R. (2012): Case Study "Kranzberger Forst": Growth and Defence in European Beech (*Fagus sylvatica* L.) and Norway Spruce (*Picea abies* (L.) Karst). In R. Matyssek et al. (eds.), *Growth and Defence in Plants*, Ecological Studies 220, DOI 10.1007/978-3-642-30645-7_11. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012. 243-271
- LEBOURGEOIS, F., GOMEZ, N., PINTO, P., & MÉRIAN, P. (2013). Mixed stands reduce *Abies alba* tree-ring sensitivity to summer drought in the Vosges mountains, western Europe. *Forest ecology and management*, 303, 61-71.
- 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, 1909-1920.
- MARTONNE DE E. 1926. Une nouvelle fonction climatologique : L'indice d'aridité. *La Météorologie* 21, 449-458.
- PRETZSCH, H., SCHÜTZE, G., BIBER, P. (2018) Drought can favour the growth of small in relation to tall trees in mature stands of Norway spruce and European beech. *Forest Ecosystems*, 5(1), 20.

- PRETZSCH, H., SCHÜTZE, G., UHL, E. (2012): Resistance of European tree species to drought stress in mixed versus pure forests: evidence of stress release by inter-specific facilitation. *Plant Biology* 15(3):483-495
- PRETZSCH, H., RÖTZER, T., MATYSSEK, R., GRAMS, T. E. E., HÄBERLE, K. H., PRITSCH, K., KERNER, R., MUNCH, J. C. (2014). Mixed Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst) and European beech (*Fagus sylvatica* [L.] stands under drought: from reaction pattern to mechanism. *Trees Structure and Function*, 28:1305-1321
- PRETZSCH, H., BAUERLE, T., HÄBERLE, K.H., MATYSSEK, R., SCHÜTZE, G., RÖTZER, T. (2016) Tree diameter growth after root trenching in a mature mixed stand of Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst) and European beech (*Fagus sylvatica* [L.]). *Trees* 30(5):1761-1773
- PRETZSCH, H., KAHN, M., GROTE, R. (1998) Die Fichten-Buchen-Mischbestände des Sonderforschungsbereiches »Wachstum oder Parasitenabwehr?« im Kranzberger Forst. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 117(1):241-257
- RÖTZER, T., HÄBERLE, K.H., KALLENBACH, C., MATYSSEK, R., PRETZSCH, H. (2017) Tree species and size drive water consumption of beech/spruce forests (*Fagus sylvatica*/*Picea abies*) – a simulation study highlighting growth under water limitation. *Plant and Soil*, 418(1), 337-356.
- SCHÖBER R (1975) Ertragstabeln wichtiger Baumarten. JD Sauerländer's Verlag, Frankfurt am Main