

Zum Einzelbaumwachstum von Eichen (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl. und *Quercus robur* L.) in Rein- und Mischbeständen in Abhängigkeit von der lokalen Bestandsstruktur

Kilian Stimm¹, Michael Heym¹, Christoph Hübner², Hans Pretzsch¹

¹Lehrstuhl für Waldwachstumskunde, Technische Universität München

²Bayerische Landesanstalt für Wald- und Forstwirtschaft, Abteilung Waldbau und Bergwald

1 Motivation und Forschungsfragen

Im Zuge des Waldumbaus sind vielerorts zunehmend klimatolerantere Mischbestände das Ziel waldbaulichen Handelns. Von den heimischen Baumarten haben insbesondere die beiden Eichenarten Stieleiche (*Quercus robur* L.) und Traubeneiche (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) mit die positivste Klimaprognose (KÖLLING 2012; KÖHL et al. 2010). Dabei sind beide Arten gegenüber vielen beigemischten Baumarten gegenwärtig auf den meisten Standorten verhältnismäßig konkurrenzschwach. Ungeachtet davon werden Eichenbestände oft in Mischung, z.B. mit dienendem Nebenbestand etwa zur Wertholzproduktion oder hinsichtlich ökologischer Vorteile begründet. Auf gut wasser- und nährstoffversorgten Standorten erfordert dies jedoch meist eine gezielte und konsequente Förderung zugunsten der Eiche. So geht zum Beispiel TOSHIHIKO (1993) davon aus, dass bei ausreichender Wasser- und Nährstoffversorgung die Konkurrenz um Licht ausschlaggebend ist. Andere Studien wiesen jedoch auch bei schlechteren Standortverhältnissen einen Einfluss des Lichts auf den Mischungseffekt aus (FORRESTER 2014; FORRESTER und ALBRECHT 2014). Somit wird die Eiche aufgrund ihrer positiven Eigenschaften in Bezug auf ihre höhere Trockenheitstoleranz im Vergleich zu weiteren heimischen Baumarten (ELLENBERG 2010; KÖLLING 2012; PRETZSCH et al. 2013a) zunehmend ein wichtiger Baustein im Aufbau klimatoleranterer Mischwälder sein (VANHELLEMONT et al. 2018; KÖLLING 2012).

Während über die bestandsweise Wuchleistung von Eichen- und Eichenmischbeständen schon einige Studien (PRETZSCH et al. 2013b; PRETZSCH und UTSCHIG 1995; UTSCHIG und PRETZSCH 2001) vorliegen, befassen sich wenige Studien mit der Zuwachsdynamik des Eichen-Einzelbaums, insbesondere in Abhängigkeit von Strukturvariablen und Konkurrenzsituation (VANHELLEMONT et al. 2018; MANSO et al. 2015). Baumartenspezifische Untersuchungen zum Einzelbaumwachstum der Eiche in Abhängigkeit von der Kronengröße (PRETZSCH und UTSCHIG 1995, NAGEL 2007) bzw. der Durchforstungsstärke (NAGEL 2007; PRETZSCH und UTSCHIG 1995; FREIST-DORR 1992) greifen diese Thematik teilweise auf und heben ihre hohe praktische Relevanz hervor. Insbesondere die einzelbaumweise Mischung wird hinsichtlich der prognostizierten klimatischen Entwicklung, aber auch unter ökonomischen sowie ökologischen Gesichtspunkten zukünftig von hoher Bedeutung sein (PAUL et al. 2019; KNOKE 2017).

Die vorliegende Studie erweitert die bestehende Forschung und nutzt Einzelbaumdaten von Naturwaldreservatsflächen (NWR) neben langfristigen forstlichen Versuchsflächen (VFL). Im Fokus liegt dabei die Analyse einzelbaumbezogener Zuwachsreaktionen, unter Berücksichtigung der lokalen Bestandsstruktur, beigemischter Baumarten und der sozialen Stellung.

Die so gewonnenen Erkenntnisse können waldbauliche Vorgehensweisen unterstützen und auch Grundlage für die Anpassung bzw. Verbesserung von Wachstumsmodellen liefern.

Ziele des vorliegenden Beitrags sind, (I) das Einzelbaumwachstum der Eiche in Abhängigkeit von der intra- und interspezifischen Konkurrenz zu analysieren, (II) die Modifikation des Einzelbaumzuwachses durch räumliche Strukturindizes (z.B. Durchmesservariation) und (III) den Effekt der sozialen Stellung des Eichen Zielbaums zu quantifizieren.

2 Material und Methoden

2.1 Langfristige Versuchsflächen (VFL) und Naturwaldreservate (NWR)

Die Auswertung umfasst 13 langfristige Eichen- und Eichenmischbestands Versuchsflächen (VFL) des Lehrstuhls für Waldwachstumskunde der TU München sowie 15 Naturwaldreservate, die von der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft betreut werden. Bis auf eine Versuchsfläche (Elmstein, Rheinland-Pfalz) liegen alle betrachteten VFL und NWR in Bayern (Abbildung 1). Dabei

verteilen sich die VFL schwerpunktmäßig in Unterfranken in den Wuchsgebieten Spessart und Fränkische Platte. Lediglich die südlichste VFL befindet sich im Tertiären Hügelland.

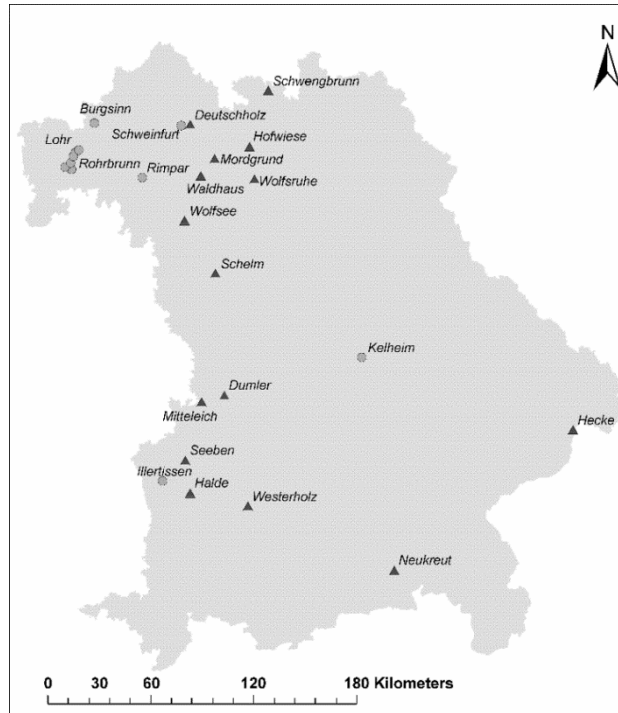


Abbildung 1: Lage der verwendeten langfristigen Versuchsflächen (Kreise, grau) sowie Naturwaldreservate (Dreiecke, schwarz) in Bayern

Während die Parzellen der VFL ausschließlich in Buchenwaldgesellschaften liegen, befinden sich die Flächen der NWR in Eichenwaldgesellschaften. Auf den betrachteten Parzellen sind die Stammfußkoordinaten aller Bäume bekannt.

Die Bestände der VFL sind tendenziell jünger als die der NWR und zeichnen sich ebenso durch geringere Dimensionen des Mittelstammes aus. Während die Bestandesgrundflächen sowie Bestandesvorräte auf den VFL niedriger sind, ist die Standortsgüte, ausgedrückt durch die absolute Oberhöhenbonität im Alter 100, auf den VFL tendenziell besser. Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die ertragskundlichen Kenngrößen, basierend auf der jeweils letzten Aufnahme.

Tabelle 1: Übersicht ertragskundlicher Bestandesdaten mit: n, Anzahl der Flächen; Alter, Bestandesalter; N, Stammzahl/ha; d_g , Durchmesser des Grundflächenmittelstammes (cm); h_g , Höhe des Grundflächenmittelstammes (m); G, Bestandesgrundfläche (m^2/ha); V, Bestandesvolumen (m^3/ha) und Bonität, absolute Oberhöhenbonität im Alter 100. Dargestellt sind jeweils die Mittelwerte (arithmetisch) sowie Minimum und Maximum (kursiv unter dem Mittelwert).

	n	Alter (Jahre)	N (Bäume ha^{-1})	d_g (cm)	h_g (m)	G ($m^2 ha^{-1}$)	V ($m^3 ha^{-1}$)	Bonität (m)
VFL	13	126	926	28.8	23.8	28.8	366.7	27.2
		37-238	58-6555	6.2-63.9	8.1-33.7	12.9-45.1	42.8-848.5	22.1-32
NWR	15	152	471	39.1	24.9	37.6	589	25.5
		100-230	176-1227	16.1-62.2	9.4-34.5	16.8-51.9	120.1-939.5	21.1-29.5

Für die Analyse wurden die einzelbaumbezogenen Kreisflächenzuwächse der letzten Zuwachperiode von 1.424 Eichen auf den VFL und 735 Eichen in den NWR abgeleitet. Der mittlere BHD liegt bei den VFL mit 33,7 cm weit unter dem mittleren Durchmesser in den NWR'en (46,3 cm). Die mittleren jährlichen Kreisflächenzuwächse hingegen sind für die beiden Datensätze vergleichbar und liegen bei 20,0 cm^2 (Tabelle 2).

Aufgrund der unterschiedlichen Alter und Entwicklungsstadien sowie der verschiedenen natürlichen Waldgesellschaften und damit verbundenen Standortbedingungen für das Wachstum der Eiche und seine Mischbaumarten wurden die Datensätze der VFL und NWR zunächst getrennt betrachtet.

2.2 Definition der Konkurrenzzone

In einem ersten Schritt wurde ein Suchradius von 10 m für die Konkurrenzzone definiert und um jede Eiche (Zentralbaum) gelegt (Abbildung 2). Zur Vermeidung von Randeffekten wurden nur jene Kreise selektiert, welche gänzlich in der Versuchsfläche liegen.

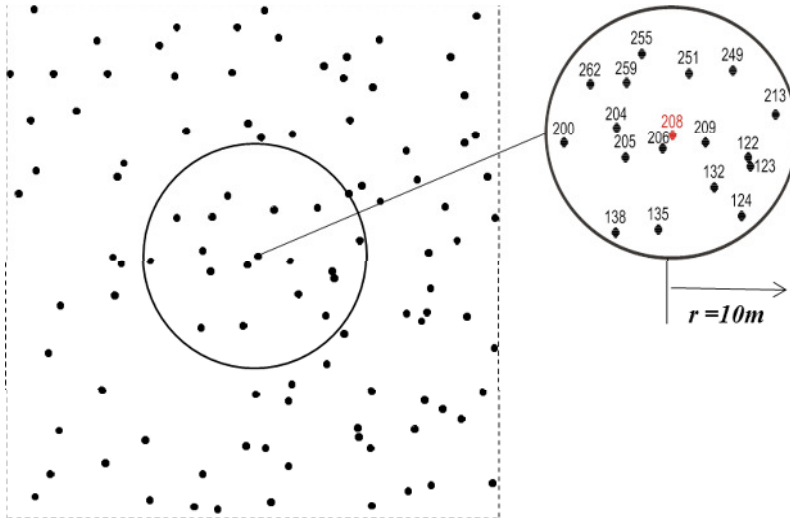


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Konkurrenzzone innerhalb einer Versuchsfläche; Bäume mit Position (schwarze Punkte), Zentralbaum (roter Punkt), Konkurrenzzone (schwarzer Kreis)

Für jeden Zentralbaum wurde die Struktur der Konkurrenz beschrieben. Zunächst wurden alle lebende Bäume in Hauptschicht (75-100% der Maximalhöhe) und Unter- und Zwischenschicht unterteilt. Die Berechnung der individuellen bzw. lokalen Konkurrenz erfolgt sowohl für die Oberschicht als auch schichtunabhängig.

Die Berechnung der lokalen Dichte, ausgedrückt als Stand Density Index (SDI) nach REINECKE (1933), erfolgt durch die Aufsummierung der baumartenspezifischen SDI zunächst aller der Oberschicht zugeordneten Bäume, außer dem Zentralbaum. Die Berücksichtigung potentiell unterschiedlicher baumartenspezifischer Maximaldichten erfolgt durch Korrekturfaktoren der hergeleiteten SDI-Werte (PRETZSCH und BIBER 2016).

$$SDI_i = \sum_1^j N_{ij} \times \left(\frac{25}{d_{g_{ij}}} \right)^{-1,605} \times E_j \quad (1)$$

SDI charakterisiert die lokale Dichte, N die Stammzahl je Hektar, d_g den Durchmesser des Grundflächenmittelstammes sowie E den Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der unterschiedlich potentiellen Maximaldichten. Die Indizes i und j beziehen sich auf den individuellen Kreis (i) bzw. die jeweilige Baumart (j).

Die Eichenanteile (MA) wurden mittels der baumartenspezifischen SDI-Werte im Suchkreis für die direkte Nachbarschaft der Zentralbäume berechnet.

$$MA_{ij} = \frac{SDI_{ij}}{SDI_i} \quad (2)$$

Die Indizes i und j beziehen sich auf den individuellen Kreis (i) bzw. die jeweilige Baumart (j).

Zur Beschreibung der Durchmesservariation, ausgedrückt über den Variationskoeffizienten ($VarKoeff$), wurden alle in den Suchkreis fallenden Bäume berücksichtigt, auch der Zentralbaum. Der Variationskoeffizient beschreibt die Standardabweichung (SD) in Relation zum Mittelwert (\bar{d}), d.h. höhere Werte, beschreiben eine strukturreichere Situation innerhalb der Konkurrenzzone.

$$VarKoeff_i = \frac{SD}{\bar{d}} \quad (3)$$

Zusätzlich wurde die soziale Stellung des Zentralbaumes ($relBHD$) betrachtet. Hierzu wurde der BHD Zentralbaumes (BHD_{Zentral}) in Relation zum maximalen BHD der 4 nächsten Nachbarbäume (BHD_{max}) gesetzt.

$$relBHD = BHD_{zentral} / BHD_{max} \quad (4)$$

Die Einzelbaumdaten sowie die für die Konkurrenzzone berechneten Strukturvariablen sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2: Übersicht Einzelbaumdaten und Strukturgrößen für die Konkurrenzzone; n, Anzahl der analysierten Eichen; bhd, Brusthöhendurchmesser; g, Grundfläche des Einzelbaums; zd, mittlerer jährlicher Durchmesserzuwachs des Einzelbaums; zg, mittlerer jährlicher Grundflächenzuwachs des Einzelbaums; n Arten, Anzahl Baumarten; MA_{Eiche}, Mischungsanteil Eiche; SDI, Stand density Index (lokale Dichte); VarKoeff, Variationskoeffizient des BHD; relBHD, relativer BHD

	n	bhd (cm)	g (m ²)	zd (cm J ⁻¹)	zg (cm ² J ⁻¹)	n Arten	MA _{Eiche}	SDI	VarKoeff	relBHD
VFL	1424	33.7	0.11	0.29	20.0	2	0.82	1208	0.51	0.70
		7.5-96.2	0.004-0.73	0.01-1.07	0.1-95.3	1-7	0.09-1	97-2524	0.08-1.59	0.3-1
NWR	735	46.3	0.18	0.28	20.0	3	0.78	1191	0.49	0.80
		20.1-94.4	0.03-0.7	0.01-2.64	0.4-231.9	1-6	0.1-1	40-2428	0.03-0.91	0.3-1

2.3 Lineare gemischte Modelle

Für die Hypothesentests wurden jeweils lineare gemischte Modelle angepasst (ZUUR et al. 2009), da eine Unabhängigkeit der einzelnen Zentralbäume nicht gegeben ist (mehrere Zentralbäume je Parzelle). Um den Einfluss des Mischungsanteils in der direkten Nachbarschaft auf den Grundflächenzuwachs des Zentralbaumes (zg) zu analysieren, wurde folgendes Modell (Formel 5) für beide Datensätze angepasst (I).

$$\log(zg_{ij}) = a_0 + a_1 * \log(BHD_{ij}) + a_2 * \log(SDI_{ij}) \times a_3 * \log(MA_{ij}) + b_i + \varepsilon_{ij} \quad (5)$$

Wobei BHD dem Brusthöhendurchmesser des Zentralbaumes entspricht (cm), SDI der lokalen Dichte nach Formel 1 und MA den Mischungsanteil nach Formel 2. Der Parameter b quantifiziert den Zufallseffekt, die Indizes i und j bezeichnen die Parzelle bzw. Einzelbaum und ε_{ij} erfasst den Fehlerterm. Zur Beschreibung des Einflusses der räumlichen Struktur auf den Einzelbaumzuwachs (II), wurde der Mischungsanteil durch den Variationskoeffizienten des BHD (VarKoeff) als Erklärungsvariable ersetzt (Formel 6). Dieser geht hier jedoch nicht logarithmiert in das Modell ein. Die Erklärungsvariablen gehen in beiden Modellen in Wechselwirkung mit der lokalen Dichte in das Modell ein.

$$\log(zg_{ij}) = a_0 + a_1 * \log(BHD_{ij}) + a_2 * \log(SDI_{ij}) \times a_3 * VarKoeff_{ij} + b_i + \varepsilon_{ij} \quad (6)$$

Zur Beantwortung von Frage III (Einzelbaumzuwachs in Abhängigkeit von der sozialen Stellung) wird Modell 1 durch den relativen Durchmesser des Zentralbaumes nach Formel 4 (relBHD) erweitert.

$$\log(zg_{ij}) = a_0 + a_1 * \log(BHD_{ij}) + a_2 * \log(SDI_{ij}) \times a_3 * \log(MA_{ij}) + a_4 * \log(relBHD_{ij}) + b_i + \varepsilon_{ij} \quad (7)$$

Die statistischen Auswertungen wurden mit dem Statistikprogramm R, Paket lme4 durchgeführt (BATES et al. 2015; R CORE TEAM 2018).

3 Ergebnisse

3.1 Einfluss der beigemischten Baumartenanteile

Der BHD des Zentralbaumes hat auf den Grundflächenzuwachs sowohl auf den VFL als auch in den NWR einen signifikant positiven Einfluss. Während bei den VFL die lokale Dichte eine tendenzielle, jedoch statistisch nicht abgesicherte Wirkung aufweist, zeigt sich bei den NWR eine signifikant negative Wirkung (Tabelle 3). Die interspezifische Konkurrenz wirkt auf den VFL in Wechselwirkung mit hohen Dichten negativ, mit abnehmenden Dichten jedoch verstärkt positiv. In den NWR zeigt sich eine umgekehrte Tendenz, jedoch nicht statistisch abgesichert. Tabelle 3 zeigt die Ergebnisse von Modell 1 (Formel 5).

Tabelle 3: Ergebnisse von Modell 1 für die Versuchsflächen (VFL) und Naturwaldreservate (NWR). Fettgedruckt sind Signifikanzen auf den Niveaus 5% (*), 1% (**), sowie <0,1% (***).

Variable	VFL		NWR	
Intercept	- 17,29602	***	- 14,78339	***
log(BHD)	3,07264	***	2,42428	***
log(SDI)	- 0,05911	n.s.	- 0,17282	*
log(MA)	- 2,29314	*	1,46184	n.s.
log(SDI) x log(MA)	0,35347	*	- 0,22220	n.s.

Steigende Eichenanteile haben auf den VFL bei hohen Dichten eine positive Wirkung, währenddessen sie bei niedrigen Dichten den Zuwachs mindern. In den Naturwaldreservaten ist der Effekt der Mischung nicht statistisch abgesichert. In Abbildung 3 sind die modellierten Einzelbaumzuwächse beispielhaft für eine Eiche mit einem BHD von 30 cm, für drei verschiedene lokale Dichten abgebildet.

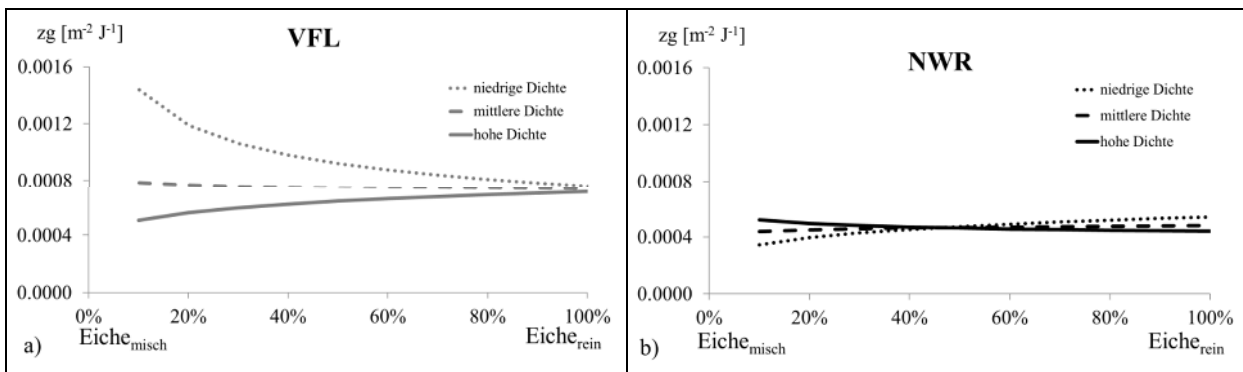


Abbildung 3: Einzelbaumzuwachs einer Eiche mit einem BHD von 30 cm in Abhängigkeit von der Durchmesservariation; dargestellt für drei verschiedene Dichten für Versuchsflächen (a) und Naturwaldreservate (b).

3.2 Einfluss der räumlichen Struktur

Der individuelle BHD des Zentralbaumes zeigt wie bei den Mischungsanteilen auch hier einen höheren Einfluss auf den Versuchsflächen (Tabelle 4). Mit steigendem BHD nimmt auch dessen Grundflächenzuwachs signifikant zu. Die lokale Dichte wirkt wiederum negativ und zeigt eine stärker den Zuwachs dämpfende Wirkung auf den Versuchsflächen. Der Variationskoeffizient des BHD zeigt einen signifikant negativen Effekt auf den Einzelbaumzuwachs der betrachteten Eichen. Dieser reduzierende Effekt konnte für Versuchsflächen sowie in abgeschwächter Form für die Naturwaldreservate beobachtet werden. Die Wechselwirkung zeigt, dass mit zunehmender Dichte der negative Effekt der Struktur abgemindert wird. Dieser Effekt ist auf den Versuchsflächen stärker als in den Naturwaldreservaten (Abbildung 4). Tabelle 4 gibt einen Überblick über die Ergebnisse von Modell 2 (Formel 6).

Tabelle 4: Ergebnisse von Modell 4 für die Versuchsflächen (VFL) und Naturwaldreservate (NWR). Fettgedruckt sind Signifikanzen auf den Niveaus 5% (*), 1% (**), sowie <0,1% (***).

Variable	VFL		NWR	
Intercept	- 16,52184	***	- 15,52600	***
log(BHD)	3,41443	***	2,44900	***
log(SDI) bzw. SDI	- 0,29672	*	- 0,00045	**
VarKoef	- 3,94412	**	- 1,09100	**
log(SDI) bzw. SDI x log(VarKoef)	0,46314	*	0,00057	.

Abbildung 4 zeigt beispielhaft für einen Zentralbaum mit BHD 30 cm den Einfluss der lokalen Dichte und Struktur sowie deren Wechselwirkung auf den Grundflächenzuwachs. Dieser BHD entspricht in etwa dem arithmetischen Mittel in beiden Datensätzen (Tabelle 1).

Bei den VFL (Abbildung 4a) zeigt sich ein höherer Einfluss der lokalen Dichte. Ab einem Variationskoeffizienten von etwa 0,6 zeigen sich höhere Zuwachsverluste bei geringerer Dichte. In den

Naturwaldreservaten (Abbildung 4b) führt die höhere Dichte ebenfalls zu einer Abschwächung des negativen Einflusses des Variationskoeffizienten, jedoch bleiben die Zuwächse hinter denen der geringen Dichten zurück.

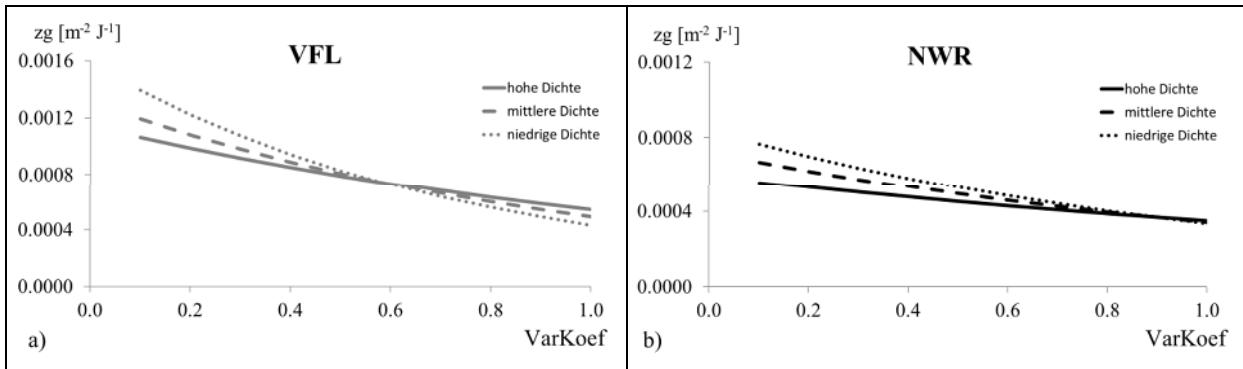


Abbildung 4: Einzelbaumzuwachs einer Eiche mit einem BHD von 30 cm bei mittlerer Dichte (SDI = 600) in Abhängigkeit von der Dominanz; dargestellt für drei verschiedene Mischungsanteile für Versuchsflächen (a) und Naturwaldreservate (b).

3.3 Einfluss der sozialen Stellung

Die soziale Stellung hat einen positiven Einfluss auf den Einzelbaumzuwachs, d.h. dominante Eichen leisten einen höheren Zuwachs als unterdrückte bzw. kleinere Bäume. Die Variablen Mischung und soziale Stellung gehen zusätzlich mit Wechselwirkung in das Modell 3 (Formel 7) ein. Tabelle 5 zeigt dessen Ergebnisse.

Tabelle 5: Ergebnisse von Modell 5 für die Versuchsflächen (VFL) und Naturwaldreservate (NWR). Fettgedruckt sind Signifikanzen auf den Niveaus 5% (*), <1% (**), sowie <1% (***).

Variable	VFL		NWR	
Intercept	- 15,87089	***	- 14,87083	***
log(BHD)	2,66864	***	2,12702	***
log(SDI)	- 0,10447	*	- 0,08593	n.s.
log(MA)	0,58465	**	- 0,79605	**
relDBH	0,46557	**	0,84881	***
log(MA) x relDBH	- 0,68973	*	0,97684	***

Hinsichtlich BHD und lokaler Dichte zeigt sich wiederum ein signifikant positiver Einfluss (BHD) bzw. eine negative Tendenz (SDI). Auf den Versuchsflächen wirken die intra-spezifische Konkurrenz sowie die soziale Stellung des Zentralbaumes zunächst positiv. In Wechselwirkung kehrt sich dies jedoch um, d.h. erhöht sich bei dominanten Bäumen der Anteil an Eichen in der lokalen Konkurrenz, wirkt dies zuwachsmindernd. Im Umkehrschluss profitieren die dominantesten Eichen von der Mischung. In den Naturwaldreservaten führen ebenso höhere Eichenanteile zu Zuwachsverlusten, was jedoch durch die soziale Stellung sowie die Wechselwirkung kompensiert wird.

Abbildung 5 visualisiert beispielhaft den Zuwachs über der Dominanz bzw. soziale Stellung bei einem BHD von 30 cm sowie einer Dichte von 600 Bäumen pro ha. Beides entspricht in etwa den arithmetischen Mittelwerten der Datensätze (Tabelle 1). In den VFL (Abbildung 5a) zeigen sich höhere Zuwächse bei einem hohen Mischungsanteil an Eiche. Mit einer Zunahme der Dominanz lässt sich zeigen, dass Mischbaumarten einen positiven Einfluss haben und bei hoher sozialer Dominanz der Zuwachs höher ausfällt als bei verstärkter intra-spezifischer Konkurrenz. In den NWR (Abbildung 5b) ist dies Tendenz in umgekehrter Richtung zu beobachten, d.h. die Beimischung anderer Arten führt mit Zunahme der Dominanz zu einer Dämpfung des Zuwachses.

Insgesamt kann man für VFL und NWR einen mit der Dominanz zunehmenden Einzelbaumzuwachs erkennen, dieser variiert jedoch mit sich änderndem Mischungsanteil. Der positive Effekt der sozialen Stellung ist auf den VFL verstärkt sobald Mischbaumarten in direkter Nachbarschaft vorkommen. Schwächere Bäume bezahlen sozusagen die Mischung mit Zuwachseinbußen. In den NWR ist diese Beobachtung, der Einfluss der Einzelbaumdominanz, abgeschwächt.

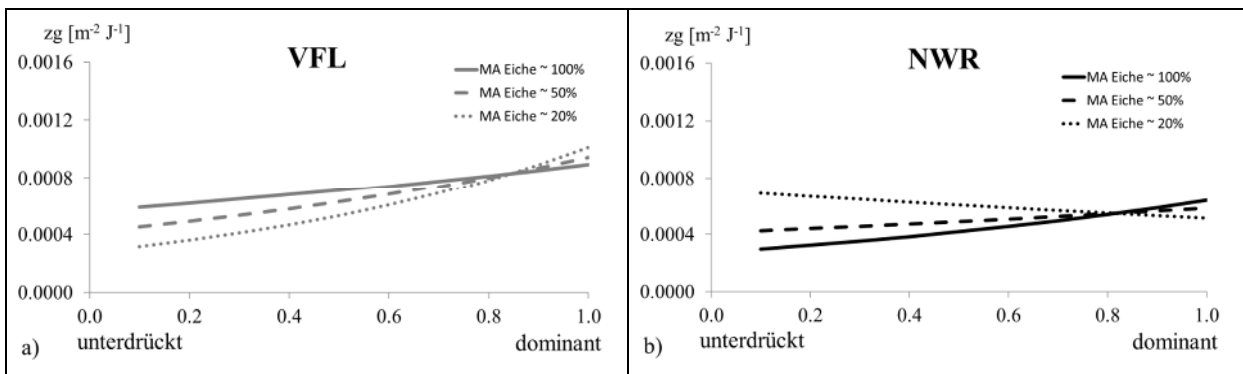


Abbildung 5: Einzelbaumzuwachs einer Eiche mit einem BHD von 30 cm bei mittlerer Dichte ($SDI = 600$) in Abhängigkeit von der Dominanz; dargestellt für drei verschiedene Mischungsanteile für Versuchsflächen (a) und Naturwaldreservate (b).

4 Diskussion

4.1 Datenaufbereitung

In der Studie wurden zwei Datensätze (VFL und NWR) getrennt voneinander betrachtet. Dieses Vorgehen scheint aufgrund der unterschiedlichen Entwicklungsstadien von Versuchsflächen und Naturwaldreservaten vertretbar. Neben den verschiedenen Entwicklungsphasen liegt die überwiegende Zahl der betrachteten Naturwaldreservate in natürlichen Eichenwaldgesellschaften. Ebenso können über die vergangene Bewirtschaftung vor Ausweisung als Naturwaldreservat nur teilweise Aussagen getroffen werden. Beispielsweise handelt es sich bei einigen Reservaten um durchgewachsene Mittelwälder, mit kaum dokumentierter Nutzungshistorie und damit ggf. unterschiedlicher Zuwachsreaktion.

In vorliegender Studie wurde zunächst der Kreisradius auf einen festen Wert (10 m) gesetzt. Dieser Wert wurde gewählt, da bei Anwendung des 100-Baum-Konzepts (UTSCHIG und NEUFANGER 2009) der mittlere Endabstand der Bäume bei etwa 10 m liegt. Ein außerhalb des Kreisradius stehender Baum wird demnach nicht mehr als Konkurrent im engeren Sinne betrachtet.

4.2 Langfristige Versuchsflächen (VFL)

Für die Versuchsflächen hat sich ein negativer Effekt der Mischung auf den Einzelbaumzuwachs der Eiche gezeigt, welcher jedoch insbesondere in Wechselwirkung mit der lokalen Dichte variiert. Der im Allgemeinen gut beschriebene Zusammenhang zwischen Dichte und Einzelbaumzuwachs der Eiche kann mit den gefundenen Ergebnissen bestätigt werden (VANHELLEMONT et al. 2018). Bei abnehmenden lokalen Dichten wirkt die Mischung positiv auf den Zuwachs der Eiche. Dies scheint aus dem herabgesetzten Konkurrenzdruck durch die Mischbaumart zu resultieren. Die einzelne Eiche kann die verminderte ober- wie unterirdische Konkurrenz verstärkt in Zuwachs umsetzen. Dagegen scheint bei höheren Dichten die interspezifische Konkurrenz um Licht durch die standörtlich konkurrenzkräftigeren Baumarten (insb. durch Buche) zu überwiegen und die Eiche in ihrem Zuwachs zu dämpfen. Ähnliche Ergebnisse zu den Effekten der Mischbaumart, insbesondere der Buche auf den Zuwachs der Eiche stellten auch schon vorherige Studien fest (HEIN und DHÔTE 2006; PRETZSCH et al. 2013b; MANSO et al. 2015; PRETZSCH 2019; RÍO et al. 2014). Wie SCHON PRETZSCH und BIBER (2010) zwischen größen-asymmetrischer und größen-symmetrischer Konkurrenz unterschieden haben, führen wir die Beobachtungen darauf zurück, dass bei hohen Dichten neben einer oberirdischen auch verstärkt eine unterirdische Konkurrenz besteht. LEUSCHNER et al. (2001) führen beispielsweise aus, dass die unterirdische Konkurrenz das Wachstum sogar stärker mindern kann als die oberirdische Konkurrenz. Dabei sehen sie das Wurzelwachstum der Eiche durch die Wurzelkonkurrenz durch Buche stark eingeschränkt. Der sich abzeichnende Wechsel von Konkurrenz hin zur Förderung der Eiche bei geringeren Dichten unterstreicht diese Theorie.

Der beobachtete negative Effekt der Struktur wirkt mit zunehmenden Dichten schwächer. Wir schließen daraus, dass die oberirdische Konkurrenz um Licht (PRETZSCH und BIBER 2010; PRETZSCH et al. 2013b) durch eine stärkere Strukturierung abgeschwächt ist. Die dadurch entstehenden Räume

scheint die Eiche verstärkt im Zuwachs nutzen zu können. Insbesondere in den meist gleichaltrigen Mischungen auf den Versuchsflächen ist dieser Effekt zu beobachten (PRETZSCH et al. 2016).

Die untersuchte soziale Stellung zeigt einen positiven Einfluss auf den Zuwachs der Eiche. Dominante Eichen leisten demnach einen höheren Zuwachs. In Verbindung mit einem hohen Mischbaumartenanteil können die untersuchten dominanten Eichen scheinbar die Komplementarität zur Mischbaumart effektiver in einen Mehrzuwachs ummünzen. Dagegen bezahlen die schwächeren Eichen die Mischung vermehrt mit Minderzuwächsen. Wir erklären uns diese Reaktion durch die relativ hohe Konkurrenzkraft der Mischbaumart Buche auf den überwiegend guten Standorten (PRETZSCH et al. 2013b; ELLENBERG 2010). Weitere Arbeiten zeigten ebenso einen verstärkten Einfluss der Konkurrenz auf die Zuwachsreaktion unterständiger Eichen (MANSO et al. 2015; VANHELLEMONT et al. 2018).

4.3 Naturwaldreservate (NWR)

In den Naturwaldreservaten zeigt lediglich die lokale Dichte einen signifikanten Effekt auf den Einzelbaumzuwachs. Die oberirdische Konkurrenz um Licht durch die beigemischten Baumarten scheint gegenüber der unterirdischen Konkurrenz an Bedeutung zu verlieren. Scheinbar sind die betrachteten Eichen „etabliert“ und die ausschlaggebenden Effekte der Mischbaumart durch interspezifische Konkurrenz haben in vorliegendem, vergleichsweise spätem Entwicklungsstadium schon stattgefunden. ZELLER und PRETZSCH (2019) fanden in ihrer Arbeit ebenfalls einen über die verschiedenen Waldentwicklungsstadien veränderten Einfluss der Struktur. Des Weiteren werden die Mischungsanteile in den NWR zu großen Teilen von schwächeren Mischbaumarten gebildet. Dies begründet sich auch aus der Nutzungsgeschichte vor Ausweisung der NWR, die meist als Mittelwälder bewirtschaftet wurden (ENDRES und FÖRSTER 2014; MOSANDL und ABT 2016) und aufgrund dessen ggf. schon wiederholt auf den Stock gesetzt wurden und so physiologisch älter waren. Zusätzlich kann der natürliche Eichenwaldstandort die Konkurrenzkraft der beigemischten Baumart dämpfend wirken und den negativen Effekt auf den Zuwachs neutralisieren.

Ähnlich wie auf den analysierten VFL hat auch in den NWR die Struktur grundsätzlich einen negativen Effekt auf den Einzelbaumzuwachs der Eichen. Andere Arbeiten konnten in ihren Untersuchungen, jedoch für meist andere Baumartenmischungen, einen gegenteiligen Effekt beobachten (VANHELLEMONT et al. 2018; DĂNESCU et al. 2016). Eine Erklärung hierfür scheint zu sein, dass die Bestandsstruktur der Konkurrenzzone durch viele schwache, in den Unterstand einwachsende und wenige starke Bäume gebildet wird. So scheint in den betrachteten Naturwaldreservaten für den Zuwachs der Eiche weniger das Licht, als vielmehr der Standort limitierend zu sein. Die kaum erkennbare Interaktion zwischen der Dichte und der Struktur ist auch Indiz dafür, dass die Eiche die erhöhte Verfügbarkeit an Licht nicht entsprechend in gesteigertem Zuwachs nutzen kann.

In den Naturwaldreservaten ist der Effekt der sozialen Stellung ebenfalls positiv mit dem Zuwachs verknüpft. Dominante Eichen leisten demnach höhere Zuwächse, wohingegen schwache Eichen im Zuwachs zurückbleiben. Ähnliche Beobachtungen für unterständige Eichen in der Zuwachsreaktion konnten auch VANHELLEMONT et al. (2018) in belgischen und niederländischen NWR machen. Des Weiteren konnten ROHNER et al. (2012; 2013) für unterständige Eichen eine verstärkte Mortalität feststellen. MEYER und MÖLDER (2017) hingegen konnten in Eichenwaldgesellschaften keine konkurrenzbedingte Mortalität von Eichen in niedersächsischen Naturwäldern finden. Schwer zu erklären ist jedoch, dass sich in Kombination mit einem erhöhten Anteil an Mischbaumarten in der direkten Umgebung der Effekt der sozialen Stellung abschwächt und auf einem vergleichbaren Niveau bleibt. Grund hierfür könnte wiederum die, durch Nutzungsgeschichte und standörtliche Eichenwaldgesellschaft modifizierte geringere Konkurrenzkraft der Mischbaumart sein. Die Mischung hat in diesem Fall keine zusätzlich negative, sondern eine verstärkt positive Wirkung.

5 Schlussfolgerung und Ausblick

Diese ersten Ergebnisse zeigen die Notwendigkeit der waldbaulichen Förderung der vergleichsweise konkurrenzschwachen Eiche auf, insbesondere bei der aktuell vielfach angewandten naturnahen Forstwirtschaft. Die Förderung sollte insbesondere in frühen bis mittleren Entwicklungsstadien beachtet werden (OTTO et al. 2009). Durch eine Absenkung der lokalen Dichte können die Zuwächse

des Eichen-Zielbaums, bei gleichzeitiger Aufrechterhaltung der Mischungsanteile auf gleichbleibendem Niveau gehalten werden. Dagegen scheint man den Zuwachs der Eiche - insbesondere in Eichenwaldgesellschaften - bei fortgeschrittener Waldentwicklungsphase kaum mehr durch Steuerung der Mischungsverhältnisse beeinflussen zu können. Wird zusätzlich mit regelmäßigen hochdurchforstungsartigen Eingriffen die lokale Struktur hochgehalten, können hohe Einzelbaumzuwächse der Eiche erzielt werden, bei gleichzeitig vergleichsweise hoher Dichte. Dies gilt insbesondere auf mittleren bis guten Standorten, auf denen vermehrt Licht der limitierende Faktor ist. Dominante Bäume leisten auch die höchsten Zuwächse. Durch eine frühzeitige und konsequente waldbauliche Förderung lassen sich dominante Eichen erzielen, die dann verstärkt - auch in Mischung - hohe Zuwächse leisten können. Inwieweit dies auf ältere Eichenbestände, wie sie in NWR vorkommen übertragbar ist kann in der Studie nicht abschließend beantwortet werden.

Zusammenfassend lässt sich jedoch sagen, dass mit der Einbeziehung von Naturwaldreservaten der betrachtete Existenzbereich auf extremere Standorte und auf fortgeschrittene Waldentwicklungstypen ausgeweitet werden kann. Insbesondere hinsichtlich klimatischer Veränderungen mit einer prognostizierten Verschiebung von natürlichen Waldgesellschaften (FISCHER et al. 2018) spielen Naturwaldreservate als Forschungsobjekt eine wichtige Rolle. Ebenso liefern sie für die Ziele einer „naturnahen Waldbewirtschaftung“ bis hin zum Waldumbau mit klimatoleranten (heimischen) Baumarten eine sehr wertvolle Forschungsgrundlage.

Eine jedoch nur bedingte Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit den Versuchsflächen, auch aufgrund ihrer Nutzungsgeschichte macht wiederum die Bedeutung langfristiger ertragskundlicher Versuchsflächen deutlich. Eine Ausweitung der Standortamplitude auch auf extremere Bereiche bzw. unterschiedliche natürlichen Waldgesellschaften kann hier wertvolle Erkenntnisse liefern.

Zu Komplettierung, speziell der Abdeckung einer größeren Standortsamplitude ist eine Ausweitung der Methodik auf weitere Versuchsflächen sowie Inventurdaten angedacht. In weiteren Analysen sollen die Untersuchungen auf variable Kreisradien sowie distanzabhängigen Struktur- und Konkurrenzindizes ausgeweitet werden.

Die vorgestellten Untersuchungen wurden anhand von 13 langfristigen Versuchsflächen des Lehrstuhls für Waldwachstumskunde und 15 Naturwaldreservaten durchgeführt. Der Beitrag ist Bestandteil eines Forschungsprojekts zum Entwicklungspotenzial der Eiche, das von der Bayerischen Forstverwaltung als Kuratoriumsprojekt gefördert wird.

6 Literaturverzeichnis

- BATES, DOUGLAS; MÄCHLER, MARTIN; BOLKER, BEN; WALKER, STEVE (2015): Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. In: J. Stat. Soft. 67 (1). DOI: 10.18637/jss.v067.i01.
- DĂNESCU, ADRIAN; ALBRECHT, AXEL T.; BAUHUS, J. (2016): Structural diversity promotes productivity of mixed, uneven-aged forests in southwestern Germany. In: Oecologia 182 (2), S. 319–333. DOI: 10.1007/s00442-016-3623-4.
- ELLENBERG, HEINZ (2010): Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen in ökologischer, dynamischer und historischer Sicht. Unter Mitarbeit von Christoph Leuschner und Hartmut Dierschke. 6., vollständig neu bearbeitete und stark erweiterte Aufl. / von Christoph Leuschner ; mit einem Beitr. von Hartmut Dierschke (synsystematische Gliederung). Stuttgart: E. Ulmer (UTB, 8104).
- ENDRES, UDO; FÖRSTER, BERNHARD (2014): Die Eiche in Naturwaldreservaten – auf dem absteigenden Ast? In: LWF Wissen 75, S. 70–73.
- FISCHER, HAGEN S.; MICHLER, BARBARA; FISCHER, ANTON (2018): Die zukünftige pnV Bayerns. Wie man sich Vorstellungen über die Standortsituation der Zukunft erarbeiten kann. In: LWF Aktuell (4), S. 46–49.
- FORRESTER, DAVID I. (2014): The spatial and temporal dynamics of species interactions in mixed-species forests: From pattern to process. In: Forest Ecology and Management 312, S. 282–292. DOI: 10.1016/j.foreco.2013.10.003.
- FORRESTER, DAVID I.; ALBRECHT, AXEL T. (2014): Light absorption and light-use efficiency in mixtures of *Abies alba* and *Picea abies* along a productivity gradient. In: Forest Ecology and Management 328, S. 94–102. DOI: 10.1016/j.foreco.2014.05.026.

- FREIST-DORR, MECHTHILD (1992): Das Einzelbaumwachstum in langfristig beobachteten Mischbestandsversuchen, dargestellt am Beispiel der Eichen-Buchen-Versuchsfläche Waldbrunn 105. In: Forstwissenschaftliches Centralblatt 111 (1), S. 106–116.
- HEIN, SEBASTIAN; DHÔTE, JEAN-FRANÇOIS (2006): Effect of species composition, stand density and site index on the basal area increment of oak trees (*Quercus sp.*) in mixed stands with beech (*Fagus sylvatica* L.) in northern France. In: Annals of Forest Science 63 (5), S. 457–467. DOI: 10.1051/forest:2006026.
- KNOKE, THOMAS (2017): Economics of Mixed Forests. In: Hans PRETZSCH, DAVID I. FORRESTER und JÜRGEN Bauhus (Hg.): Mixed-species forests. Ecology and management. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; Imprint: Springer, S. 545–577. Online verfügbar unter https://doi.org/10.1007/978-3-662-54553-9_11.
- KÖHL, MICHAEL; HILDEBRANDT, RÜDIGER; OLSCHOFKSY, KONSTANTIN; KÖHLER, RAUL; RÖTZER, THOMAS; METTE, TOBIAS et al. (2010): Combating the effects of climatic change on forests by mitigation strategies. In: Carbon balance and management 5, S. 8. DOI: 10.1186/1750-0680-5-8.
- KÖLLING, CHRISTIAN (2012): Muss es immer Eiche sein? Baumartenalternativen für warm-trockene Regionen. In: LWF Aktuell 88, S. 28–30, zuletzt geprüft am 23.11.2017.
- LEUSCHNER, CHRISTOPH; HERTEL, DIETRICH; CONERS, HEINZ; BÜTTNER, VOLKER (2001): Root competition between beech and oak: a hypothesis. In: Oecologia 126 (2), S. 276–284. DOI: 10.1007/s004420000507.
- MANSO, RUBÉN; MORNEAU, FRANÇOIS; NINGRE, FRANÇOIS; FORTIN, Mathieu (2015): Effect of climate and intra- and inter-specific competition on diameter increment in beech and oak stands. In: Forestry 88 (5), S. 540–551. DOI: 10.1093/forestry/cpv020.
- MEYER, PETER; MÖLDER, ANDREAS (2017): Mortalität von Buchen und Eichen in niedersächsischen Naturwäldern [Beech and oak mortality in strict forest reserves, Lower Saxony, Germany]. In: Forstarchiv 88 (Heft 3), S. 127–130.
- MOSANDL, REINHARD; ABT, ALEXANDER (2016): Waldbauverfahren in Eichenwäldern gestern und heute. In: AFZ - Der Wald (20), S. 28–32, zuletzt geprüft am 05.12.2017.
- NAGEL, RALF-VOLKER (2007): Bestandesentwicklung, Einzelbaumwachstum und Qualitätsentwicklung von Stiel- und Traubeneichenbeständen in Nordwestdeutschland unter dem Einfluss unterschiedlicher Durchforstungsstärken. In: DVFFA - Tagungsband 2007, S. 114–132, zuletzt geprüft am 26.03.2019.
- OTTO, DANIEL; WAGNER, SVEN; BRANG, PETER (2009): Konkurrenz zwischen Stieleiche und Buche auf Lothar-Sturmflächen | Competition between pedunculate oak and European beech on Lothar windthrow areas. In: Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen 160 (5), S. 114–123. DOI: 10.3188/szf.2009.0114.
- Paul, Carola; Brandl, Susanne; Friedrich, Stefan; Härtl, Fabian; Falk, Wolfgang; Knoke, Thomas (2019): Der Einfluss des Klimawandels auf die Baumartenwahl. In: AFZ - Der Wald (2), S. 21–23.
- PRETZSCH, H.; DEL RÍO, M.; SCHÜTZE, G.; AMMER, CH.; ANNIGHÖFER, P.; AVDAGIC, A. et al. (2016): Mixing of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and European beech (*Fagus sylvatica* L.) enhances structural heterogeneity, and the effect increases with water availability. In: Forest Ecology and Management 373, S. 149–166. DOI: 10.1016/j.foreco.2016.04.043.
- PRETZSCH, H.; SCHÜTZE, G.; UHL, E. (2013a): Resistance of European tree species to drought stress in mixed versus pure forests. Evidence of stress release by inter-specific facilitation: Drought stress release by inter-specific facilitation. In: Plant Biology 15 (3), S. 483–495. DOI: 10.1111/j.1438-8677.2012.00670.x.
- PRETZSCH, HANS (2019): Grundlagen der Waldwachstumsforschung. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, zuletzt geprüft am 26.03.2019.
- PRETZSCH, HANS; BIBER, PETER (2010): Size-symmetric versus size-asymmetric competition and growth partitioning among trees in forest stands along an ecological gradient in central Europe. In: Canadian Journal of Forest Research 40 (2), S. 370–384.

- PRETZSCH, HANS; BIBER, PETER (2016): Tree species mixing can increase maximum stand density. In: Can. J. For. Res. 46 (10), S. 1179–1193. DOI: 10.1139/cjfr-2015-0413.
- PRETZSCH, HANS; BIELAK, K.; DIELER, JOCHEN; SPELLMANN, HERRMANN; BLOCK, JOACHIM; EHRHART, HANS-PETER et al. (2013b): 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. In: Eur J Forest Res.
- PRETZSCH, HANS; UTSCHIG, HEINZ (1995): Die Eichen-Versuchsflächen im Forstamt Elmstein-Nord. In: AFZ - Sonderdruck aus Allgemeine Forst Zeitschrift Nr.2/1995 (2), zuletzt geprüft am 27.03.2019.
- R CORE TEAM (2018): R: A language and environment for statistical computing. Version. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing.
- RÍO, M. DEL; SCHÜTZE, G.; PRETZSCH, H. (2014): Temporal variation of competition and facilitation in mixed species forests in Central Europe. In: Plant Biology 16 (1), S. 166–176. Online verfügbar unter <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/plb.12029/full>.
- ROHNER, BRIGITTE; BIGLER, CHRISTOF; WUNDER, JAN; BRANG, PETER; BUGMANN, HARALD (2012): Fifty years of natural succession in Swiss forest reserves: changes in stand structure and mortality rates of oak and beech. In: J Veg Sci 23 (5), S. 892–905. DOI: 10.1111/j.1654-1103.2012.01408.x.
- ROHNER, BRIGITTE; BUGMANN, HARALD; BRANG, PETER; WUNDER, JAN; BIGLER, CHRISTOF (2013): Eichenrückgang in Schweizer Naturwaldreservaten. In: Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen 164 (11), S. 328–336. DOI: 10.3188/szf.2013.0328.
- TOSHIHIKO, HARA (1993): Mode of Competition and Size-structure Dynamics in Plant Communities. In: Plant Species Biol. 8, S. 75–84.
- UTSCHIG, HEINZ; NEUFANGER, MARKUS (2009): Das 100-Baum-Konzept als Einstieg für Durchforstungsregeln in Mischbeständen. In: Tagungsband 2009 DVFFA, S. 50–60.
- UTSCHIG, HEINZ; PRETZSCH, HANS (2001): Der Eichen-Durchforstungsversuch Waldleiningen 88. Auswirkungen unterschiedlicher Eingriffsstärken nach 65 Jahren Beobachtung. In: Forstw Cbl 120 (1-6), S. 90–113.
- VANHELLEMONT, MARGOT; BIJLSMA, RIENK-JAN; KEERSMAEKER, LUC DE; VANDEKERKHOVE, KRIS; VERHEYEN, KRIS (2018): Species and structural diversity affect growth of oak, but not pine, in uneven-aged mature forests. In: Basic and Applied Ecology 27, S. 41–50. DOI: 10.1016/j.baae.2018.01.003.
- ZELLER, LAURA; PRETZSCH, HANS (2019): Effect of forest structure on stand productivity in Central European forests depends on developmental stage and tree species diversity. In: Forest Ecology and Management 434, S. 193–204. DOI: 10.1016/j.foreco.2018.12.024.
- ZUUR, ALAIN F.; IENO, ELENA N.; WALKER, NEIL; SAVELIEV, ANATOLY A.; SMITH, GRAHAM M. (Hg.) (2009): Mixed effects models and extensions in ecology with R. New York: Springer (Statistics for Biology and Health).