

Zum Einfluss der Baumartenmischung auf die Ertragskomponenten von Waldbeständen

Aus dem Lehrstuhl für Waldwachstumskunde der Technischen Universität München

(Mit 5 Abbildungen und 5 Tabellen)

H. PRETZSCH^{*)}, G. SCHÜTZE¹⁾ und P. BIBER¹⁾

(Angenommen Juli 2016)

SCHLAGWÖRTER – KEY WORDS

Nischenkomplementarität; multiplikativer Mischungseffekt; standortspezifische Tragfähigkeit; Eichhorn'sche Regel; allgemeines Ertragsniveau.

Niche complementarity; multiplicative mixing effect; site-specific carrying capacity; Eichhorn's rule; general yield level.

1. BAUMARTENMISCHUNG UND ERTRAG VON WÄLDERN

Untersuchungen zur Struktur und zum Ertrag von Mischbeständen haben gegenwärtig Konjunktur. Sie unterstützen, begleiten und fördern den vermehrten Übergang von Monokulturen zu Waldbeständen aus mehreren Arten. Die Mehrzahl der neueren Arbeiten stellen die Produktivität von Mischbeständen im Vergleich zu Reinbeständen in den Mittelpunkt. Sie vergleichen meistens den mittleren periodischen Zuwachs in Zwei-Arten-Mischbeständen mit dem gewichteten mittleren Zuwachs benachbarter Reinbestände der entsprechenden Arten (HEIN und DHÔTE, 2006; PIOTTO, 2007; RÍO und STERBA, 2009). Für aussagekräftige Vergleiche wurden wichtige methodische Grundlagen erarbeitet, u. a. Versuchsanlagen, die neben Mischbeständen auch die entsprechenden Reinbestände repräsentieren und neben verschiedenen Dichten auch unbehandelte Parzellen mit maximaler Dichte als Referenz enthalten (KELTY und CAMERON, 1995; PRETZSCH und BIBER, 2016). Weiter wurden methodische Ansätze zur Bestimmung der

Mischungsanteile (STERBA et al., 2014), der Mehr- und Minderzuwächse (RÍO et al., 2016), und der räumlichen (BIELAK et al., 2014) und zeitlichen Variation (RÍO et al., 2014) von Mischungseffekten erprobt. Um Zusammenhänge zwischen Mischungseffekten und Standortbedingungen abzuleiten, wurden Versuchsreihen und übergreifende Analysen entlang ökologischer Gradienten ausgeführt (PRETZSCH et al., 2015, 2016).

Das vielleicht wichtigste Ergebnis der bisherigen Untersuchungen zum Zusammenhang zwischen Mischung und Ertrag in Mitteleuropa ist, dass Artenmischung den Zuwachs im Vergleich zum gewichteten Mittel benachbarter Reinbestände häufig um 10–30% erhöht (PIOTTO, 2007; ZHANG et al., 2012). Werden Baumarten mit relativ ähnlichen ökologischen Nischen gemischt (z. B. Fichte und Buche, Fichte und Tanne), so liegen die Mehrzuwächse eher im unteren Bereich dieses Rahmens (10%). In sehr komplementären Mischungen (z. B. Kiefer und Buche, Lärche und Buche) werden höhere Werte erreicht (20–30%).

Die genannten Mehrzuwächse gelten für die am häufigsten vorkommenden Mischbestände aus zwei Arten. Mit zunehmender Artenzahl nimmt der Mischungseffekt auf die Produktivität nur degressiv zu und nähert sich asymptotisch einem Maximalwert (ZHANG et al., 2012). Während also eine 2-Arten-Mischung gegenüber Reinbeständen besonders merkliche Mehrzuwächse (z. B. 10–30%) auslösen kann, steigt der Mehrzuwachs bei Beimischung einer zusätzlichen Art nicht in gleichem Maße weiter an (z. B. nur um weitere 5%). Denn die ökologischen Nischen werden mit jeder neu hinzukommenden Art immer vollständiger ausgefüllt, sodass immer weniger zusätzliche Ressourcen ausgeschöpft und damit auch weniger Mehrzuwachs erbracht werden kann. In Mischbeständen aus drei bis vier Arten (z. B. Eiche/Kiefer/Buche, Fichte/Tanne/Buche/Ahorn) wurden in Süddeutschland Mehrzuwächse gegenüber dem gewichteten Mittel benachbarter Reinbestände von 24–43% gemessen (LIANG, 2016; PRETZSCH, 2013, 2016).

Für die Stärke der Mischungseffekte auf den Zuwachs auf Bestandesebene erbrachten die genannten Arbeiten

¹⁾ GERHARD SCHÜTZE und DR. PETER BIBER, Lehrstuhl für Waldwachstumskunde, Wissenschaftszentrum Weihenstephan. Technische Universität München, Hans-Carl-von-Carlowitz-Platz 2, D-85354 Freising, Germany.

^{*)} Korrespondierender Autor: Prof. Dr. Dr. h. c. HANS PRETZSCH, Lehrstuhl für Waldwachstumskunde, Wissenschaftszentrum Weihenstephan. Technische Universität München, Hans-Carl-von-Carlowitz-Platz 2, D-85354 Freising, Germany. Tel.: +49-8161-714710, Fax: +49-8161-714721. E-Mail: H.Pretzsch@lrz.tum.de. Web: <http://www.wkk.forst.tu-muenchen.de>

eine zunehmend solidere Datenbasis. Dagegen befassen sich nur wenige Untersuchungen mit den Effekten der Mischung auf die mittleren Baumdimensionen (DEBELL et al., 1997; BINKLEY et al., 2003), die Bestandesdichte (BINKLEY, 1984; RÍO und STERBA, 2009), die Bestandesstruktur (PRETZSCH, 2014; PRETZSCH et al., 2016) oder das Einzelbaumwachstum (BOLTE et al., 2004; RÍO et al., 2014). Die Effekte der Mischung auf die mittleren Stammdimensionen, die Bestandesstruktur und Dichte sind deshalb noch kaum erforscht. Grund hierfür ist vor allem die noch immer spärliche Datenbasis mit einem besonderen Mangel an langfristigen Mischbestandsuntersuchungen auch auf unbehandelten Flächen mit maximaler Dichte. Denn solche Flächen sind für die Analyse der Mischungseffekte auf die Bestandesdichte, die Gesamtwuchsleistung, die Vornutzungen und das Ertragsniveau unverzichtbar.

Um über den Zuwachs hinaus auch ein besseres Verständnis von dem Mischungseffekt auf die Bestandesmittelwerte, Summenwerte und ertragskundlichen Grundbeziehungen wie Ertragsniveau, Bonität und Eichhorn'sche Regel zu gewinnen, wurde eine übergreifende Analyse durchgeführt. Sie basiert auf langfristigen Mischbestandsversuchen und temporären Versuchsflächen, die verschiedene 2-Arten-Mischungen jeweils in Misch- und Reinbeständen repräsentieren und die Entwicklung voll bestockter Bestände, also die maximale Tragfähigkeit, widerspiegeln. Die insgesamt 141 kombinierten Aufnahmen von Mischbeständen und benachbarten Reinbeständen der entsprechenden Arten erlauben Aussagen zum Mischungseffekt auf (i) die Mittelhöhe und den Mitteldurchmesser, (ii) die Bestandesdichte und den stehenden Vorrat, (iii) die Gesamtwuchsleistung sowie (iv) auf die Eichhorn'sche Beziehung und das allgemeine Ertragsniveau im Vergleich zu Reinbeständen.

2. MATERIAL UND METHODEN

2.1. Material

In den Mittelpunkt der vorliegenden Untersuchung wurden gleichaltrige und damit im Wesentlichen einschichtige Mischbestände aus zwei Arten gestellt. Insgesamt konnten die 9 Artenkombinationen Fichte/Tanne, Fichte/Kiefer, Fichte/Lärche, Fichte/Buche, Fichte/Erle, Kiefer/Buche, Lärche/Buche, Buche/Eiche und Buche/Douglasie einbezogen werden. Für die vergleichenden Analysen von Misch- mit Reinbeständen waren jeweils Kombinationen aus Aufnahmedaten von Misch- und Reinbeständen der entsprechenden Arten auf demselben Standort erforderlich. Weil wir nach der Tragfähigkeit von Mischbeständen im Vergleich zu Reinbeständen und den ertragskundlichen Potenzialen fragten, wurden nur Bestände einbezogen die möglichst maximale Bestandesdichten repräsentieren und in der Vergangenheit nicht oder nur schwach behandelt worden sind.

Zur Beantwortung der Fragestellungen konnte ein Datensatz aus langfristigen Versuchsflächen und temporären Probeflächen zusammengestellt werden, der insgesamt 141 Kombinationen aus Aufnahmen von Mischbeständen und benachbarten Reinbeständen der entsprechenden Arten enthält. Davon repräsentieren 79 Kombinationen Versuchsflächen, von denen neben den aktuellen Bestandesdaten auch die Geschichte und Gesamtwuchsleistungen bekannt sind. Von 62 Kombinationen lagen nur temporäre Aufnahmedaten im mittleren oder fortgeschrittenem Alter vor.

Die einbezogenen Kombinationen aus Rein- und Mischbeständen liegen überwiegend in Deutschland, repräsentieren aber auch einige andere Regionen in Mitteleuropa (Tabelle 1). Sie reichen von Längen-

Tab. 1

Übersicht über die Lage und Klimaverhältnisse der einbezogenen langfristigen Versuchsflächen und temporären Probeflächen gesondert nach Baumartenkombination und insgesamt.
Overview of the location and climatic conditions of the included long-term experimental plots and temporary plots separately for different species assemblages and in total.

Artenkombination	Längengrad (°O)			Breitengrad (°N)			Höhe über NN (m)			Mitteltemperatur (°C)			Jahresniederschlag (mm Jahr ⁻¹)		
	min	mittel	max	min	mittel	max	min	mittel	max	min	mittel	max	min	mittel	max
<i>Artenkombination</i>															
Fichte/Tanne	10,144	11,078	11,720	47,398	47,665	47,941	650	1020	1280	4	5,3	7,5	1170	1790	2400
Fichte/Kiefer	9,079	11,012	12,318	48,567	49,292	50,146	250	401	550	6,7	7,9	9,3	625	711	810
Fichte/Lärche	10,779	12,686	13,639	46,590	46,928	47,097	1245	1503	1715	5,5	7,3	10,4	552	917	1100
Fichte/Buche	9,930	11,807	13,309	47,867	48,896	51,637	340	614	785	5,5	7,1	8,7	620	1018	1350
Fichte/Erle	11,036	11,036	11,036	47,938	47,938	47,938	585	585	585	8,4	8,4	8,4	1003	1003	1003
Kiefer/Buche	-3,172	12,992	23,351	41,895	50,236	56,153	20	325	1290	6	8,2	10,5	560	760	1175
Lärche/Buche	9,441	9,834	10,519	49,852	50,002	50,197	380	405	435	6,5	7,3	7,7	900	1000	1200
Buche/Eiche	9,336	9,604	10,519	49,685	49,865	49,992	340	416	470	7	7,4	8,5	690	936	1120
Buche/Douglasie	6,743	9,871	11,909	48,121	49,179	50,173	330	473	588	7,5	8,3	9,4	651	826	927
<i>insgesamt</i>															
Mittelwert	8,146	11,102	13,147	47,546	48,889	50,142	460	638	855	6,3	7,5	8,9	752	996	1232
Maximalwert	11,036	12,992	23,351	49,852	50,236	56,153	1245	1503	1715	8,4	8,4	10,5	1170	1790	2400
Minimalwert	-3,172	9,604	10,519	41,895	46,928	47,097	20	325	435	4,0	5,3	7,5	552	711	810

grad $-3,172^\circ$ bis $23,351^\circ$ Ost und von Breitengrad $41,895^\circ$ bis $56,153^\circ$ Nord. Ihre Höhenlage bewegt sich zwischen 20 und 1.715 m über N.N. Die mittleren Jahrestemperaturen betragen 4,0 bis $10,5^\circ\text{C}$ und die jährlichen Niederschläge 552 bis 2.400 mm. Die Vegetationszeit, definiert als die Anzahl von Tagen mit Mitteltemperaturen über 10°C , ist 151 bis 213 Tage lang.

Im Einzelnen handelt es sich um folgende langfristige Versuchsflächen und temporäre Probeflächen Allershausen 1012, Alzenau 1015, Arnstein 1021, Bischbrunn 311, Bodenwöhr 1011, Daun 1005, Dießen 777, Ebersberg 1044, EuMixFor 1004, 1031, 1032, 1033, 1036, 1037, 1040, 1042, 1043, 1044, 1045, 1047, 1051, 1052, 1054, 1057, 1063, 1070, Freising 1023, Geisenfeld 1016, Gemünden 871, Hain 27, Schlanders/Vinschgau 1000, 2000, 3000, Hirschwald 1006, Kelheim 1022, Kreuth 122, Krumbach 861, Mitterteich 101, Neuburg 841, Pfalz 1007, Ramingstein-Thomatal/Lungau 1-11, Rothenbuch 313 334, Rohrbrunn 90, 620, Rohrmoos 107, Sachsenried 607, Selb 1013, Schongau 814, Spessart 1003, Starnberg 91, Traunstein 1025, Waldbrunn 105, 106, Waldleinig 1001, Waldsassen 1024, Weiden 1014, Wieda 114, Wolfratshausen 97, Würzburg, 1002 und Zwiesel 111, 134, 135.

Die Flächengrößen liegen zwischen 0,05 ha und 0,6 ha, mit tendenziell eher geringeren Flächen bei den temporären Versuchsflächen und größeren bei den lang-

fristigen Versuchsflächen. Detailinformationen über diese Flächen finden sich bei PRETZSCH und BIBER (2016).

Tabelle 2 zeigt, dass die Untersuchung die wichtigsten 2-Arten-Mischungen in Mitteleuropa abdeckt. Die Informationen über manche Baumartenkombinationen (z. B. Fichte/Kiefer, Fichte/Erle, Lärche/Buche) sind aber noch spärlich. Das mittlere Alter der Kombinationen beträgt 80 Jahre, und deshalb wurde auch die Mittelhöhe im Alter 80 für die Bonitierung gewählt. Dass die Rein- und Mischbestände in diesem Alter Mittelhöhen zwischen 10,6 und 52,0 m erreichen (*Tabelle 2*, Zeilen Minimalwert, Mittelwert, Maximalwert), spiegelt die große Breite des mit ihnen abgedeckten Standortspektrums wider. Entsprechend breit ist der Wertebereich der Mittelhöhen und Mitteldurchmesser. Die ebenfalls große Spannbreite der Baumzahlen ($62-5.000 \text{ N ha}^{-1}$), Bestandesgrundflächen ($7,7-123,5 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$) und Vorräte ($35-2.071 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) resultiert ebenfalls aus dem breiten Rahmen von Bestandesaltern und Standortbedingungen.

Insbesondere die Minimal- und Maximalwerte dürften auch auf die eher kleineren Flächengrößen der temporären Probeflächen (minimal 0,05 ha, d. h. Hochrechnungsfaktor auf Hektarwerte beträgt 20) und die entsprechend hohen Hochrechnungsfaktoren zurückzuführen sein.

Tab. 2

Ertragskundliche Charakteristika der Versuchs- und Probeflächen der Untersuchung gesondert nach Baumartenkombinationen und insgesamt. Neben dem mittleren Alter sind die anhand der Höhenbonität geschätzte Mittelhöhe im Alter von 80 Jahren, h_{A80} , die aktuelle Mittelhöhe, h_g , der quadratische Mitteldurchmesser, d_g , die Baumzahl pro ha, N, die Bestandesgrundfläche, G, und der stehende Vorrat, V, angegeben.
Growth and yield characteristics of the included long-term experimental plots and temporary plots separately for different species assemblages and in total. The table displays the mean stand age, mean stand height at an age of 80 years, h_{A80} , current mean stand height, h_g , quadratic mean tree diameter, d_g , tree number per hectare, N, stand basal area, G, and standing stand volume, V.

Artenkombinationen und insgesamt	Anzahl n	mittl. Alter Jahre	Bonität h_{A80} m	h_g m	d_g cm	N Bäume ha^{-1}	G $\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$	V $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$
<i>Artenkombinationen</i>								
Fichte/Tanne	8	113	27,3	33,5	44,9	361	53,0	777
Fichte/Kiefer	7	74	26,7	25,2	27,0	999	49,4	598
Fichte/Lärche	10	110	22,0	24,5	30,6	910	59,1	752
Fichte/Buche	52	86	28,2	28,7	33,1	537	43,7	532
Fichte/Erle	3	52	28,0	20,3	22,4	1.929	48,2	493
Kiefer/Buche	17	74	27,0	23,8	27,0	915	36,3	415
Lärche/Buche	1	64	30,3	26,2	28,4	487	29,4	385
Buche/Eiche	24	83	26,2	25,8	30,3	418	23,6	329
Buche/Douglasie	19	64	36,4	28,7	35,6	915	49,1	707
<i>insgesamt</i>	141							
Minimalwert		25	10,6	7,3	7,8	62	7,7	35
Mittelwert		80	28,0	26,3	31,0	830	43,5	554
Maximalwert		241	52,0	50,5	83,2	5.000	123,5	2.071

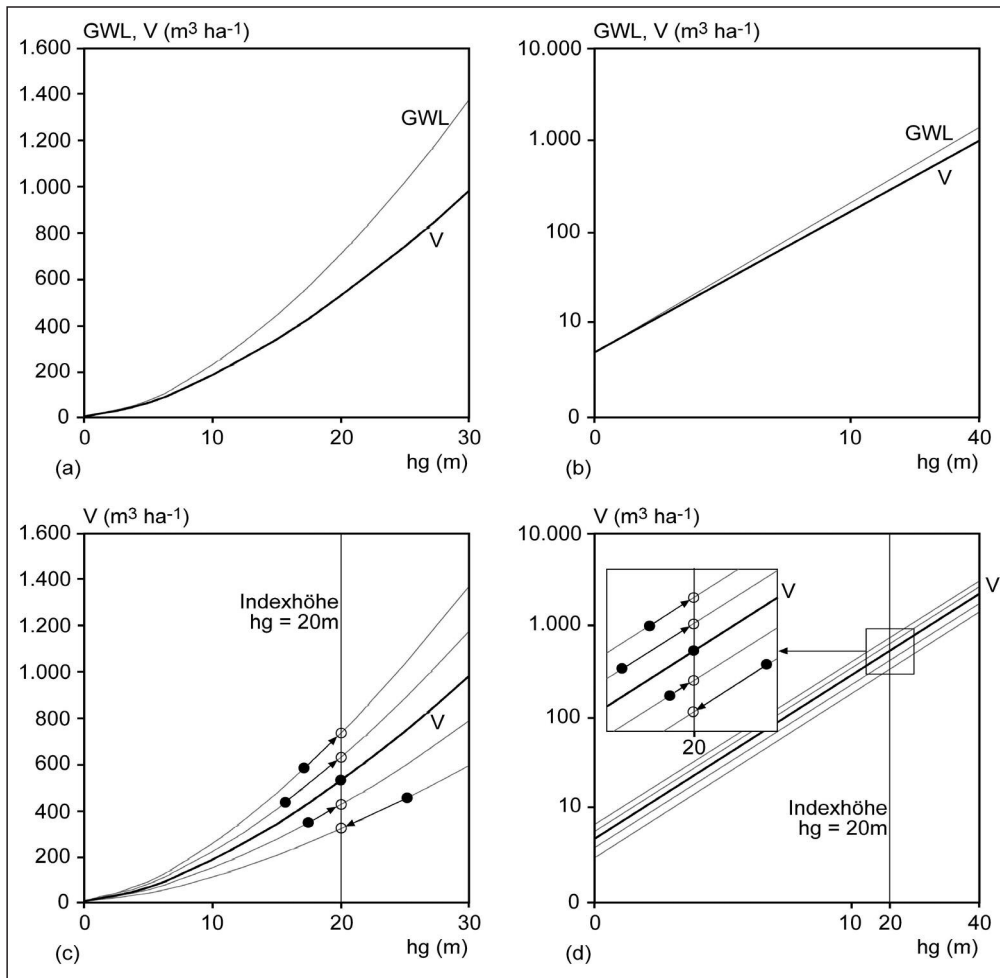


Abb. 1

Beziehung zwischen Vorrat und Bestandeshöhe und Gesamtwuchsleistung und Bestandeshöhe in linearer (a und c) und doppelt-logarithmischer (b und d) Darstellung. Ableitung der Indizes V_{hg20} und GWL_{hg20} für die Charakterisierung des Mischungseffektes auf die Beziehung von EICHHORN (1902) und das allgemeine Ertragsniveau nach GEHRHARDT (1923) (vgl. ASSMANN 1961, S. 158–160).

- (a) Abhängigkeit des Vorrates, V , von der Mittelhöhe, h_g , spiegelt die Eichhorn'sche Beziehung (EICHHORN, 1902) wider und die Abhängigkeit der Gesamtwuchsleistung, GWL , von der Mittelhöhe zeigt das allgemeine Ertragsniveau nach GEHRHARDT (1923) an.
- (b) EICHHORN'sche Beziehung und allgemeines Ertragsniveau in doppelt-logarithmischer Darstellung.
- (c) Ableitung des Index V_{hg20} für die Charakterisierung des Mischungseffektes auf die Beziehung von Eichhorn in linearer Darstellung.
- (d) Ableitung des Index V_{hg20} in doppelt-logarithmischer Darstellung; im Nebenbild wird gezeigt, wie mit dem Ansatz $V_{hg20} = V \times (20/h_g)^{\alpha_{V,hg20}}$ beobachtete Vorratswerte, V , und Höhenwerte, h_g , im Richtungsfeld auf die Indexhöhe $h_g = 20$ m projiziert werden.

Der Index GWL_{hg20} für die Charakterisierung des Mischungseffektes auf das allgemeine Ertragsniveau nach Gehrhardt (1923) wird analog zu V_{hg20} abgeleitet. Weitere Erläuterungen im Text.

Relationship between standing volume and mean tree height and total yield and mean tree height in linear (a and c) and double-logarithmic (b and d) representation and derivation of the indices V_{hg20} and GWL_{hg20} for quantifying the mixing effect on the relationship by EICHHORN (1902) and on the general yield level by GEHRHARDT (1923) (see ASSMANN 1961, pp. 158–160).

- (a) The dependency of the standing volume, V , of the mean tree height, h_g , reflects EICHHORN's (1902) relationship, and the dependency of total yield, GWL , of the mean tree height represents GEHRHARDT's general yield level.
 - (b) EICHHORN's rule and GEHRHARDT's yield level in double-logarithmic representation.
 - (c) Derivation of the index V_{hg20} for the quantification of the mixing effect on EICHHORN's rule in linear representation.
 - (d) Derivation of the index V_{hg20} in the double-logarithmic scale; the inset shows graphically how observed standing volumes, V , and mean tree heights, h_g , are projected to the index height $h_g = 20$ m by the approach $V_{hg20} = V \times (20/h_g)^{\alpha_{V,hg20}}$.
- The index GWL_{hg20} for characterizing the mixing effect on the general yield level (GEHRHARDT, 1923) was derived analogously to V_{hg20} . For further explanations see text.

2.2. Methoden

2.2.1. Vergleich der Bestandeskennwerte im Mischbestand mit dem gewichteten Mittelwerten benachbarter Reinbestände

Für den Vergleich der Mittel- und Summenwerte (Mittelhöhe, Mitteldurchmesser, stehender Vorrat, Bestandesdichte oder Bestandesvolumen) wurde der gemessene Wert des Mischbestandes in Relation gesetzt zum gewichteten Mittel der benachbarten Reinbestände, wobei die Gewichtung mit den Mischungsanteilen m_1 und m_2 erfolgte. Im Falle des Bestandesvolumens ergab sich beispielsweise $\hat{V}_{1,2} = V_1 \times m_1 + V_2 \times m_2$ für das gewichtete Mittel. Das gewichtete Mittel bildete den erwarteten Referenzwert und wurde dem entsprechenden Beobachtungswert des benachbarten Mischbestandes gegenübergestellt. Für den Vergleich auf Ebene der Baumarten wurde der Beitrag der Baumarten zum Mischbestand mit dem Mischungsanteil auf einen Hektar hochskaliert und dann mit den entsprechenden Summenwerten des benachbarten Reinbestandes verglichen. Wiederum am Beispiel des stehenden Volumens ergab das $RV_{1,2} = VV_{1,2} / m_1 / V_1$ bzw. $RV_{1,2} = VV_{1,2} / m_2 / V_2$.

Für die Berechnung der Mischungsanteile m_1 und m_2 wurden zunächst die Stand-Density-Indizes für beide Baumarten im Reinbestand berechnet ($SDIMAX_1$, $SDIMAX_2$). Sie repräsentieren den regionaltypischen maximalen SDI und den Standflächenbedarf der jeweiligen Baumart. Die Werte $SDIMAX_1$ und $SDIMAX_2$ wurden dann verwendet, um den SDI einer Art in jenen der anderen umzurechnen ($e_{2 \rightarrow 1} = SDIMAX_1 / SDIMAX_2$ und $e_{1 \rightarrow 2} = SDIMAX_2 / SDIMAX_1$). Die Äquivalenzkoeffizienten e_1 und e_2 konnten dazu verwendet werden, die SDI-Werte von zwei Arten mit unterschiedlichem Stand-

raumbedarf zu kombinieren ($SDI_{1,2} = SDI_{1,(2)} + SDI_{(1),2} \times e_{2 \rightarrow 1}$). Basierend auf diesem standardisierten SDI und den Anteilen der Arten 1 und 2 daran ($SDI_{1,(2)} / SDI_{1,2}$ bzw. $(SDI_{(1),2} \times e_{2 \rightarrow 1}) / SDI_{1,2}$) konnten dann die Mischungsanteile der Arten 1 und 2

$$m_1 = SDI_{1,(2)} / (SDI_{1,(2)} + SDI_{(1),2} \times SDIMAX_1 / SDIMAX_2)$$

$$m_2 = SDI_{(1),2} \times SDIMAX_1 / SDIMAX_2 / (SDI_{1,(2)} + SDI_{(1),2} \times SDIMAX_1 / SDIMAX_2)$$

berechnet werden. Auf diese Weise floss der unterschiedliche Standraumbedarf der Arten in die Berechnung der Mischungsanteile m_1 und m_2 mit ein (STERBA et al., 2014).

2.2.2. Analyse des Mischungseffektes auf die Eichhorn'sche Beziehung und das allgemeine Ertragsniveau

Der Bestandesvorrat und die Gesamtwuchsleistung nehmen mit fortschreitender Höhe progressiv zu (vgl. *Abbildungen 1a* und *5*). Das Eichhorn'sche Gesetz beschreibt diesen Zusammenhang ($V = f(h)$) für den Vorrat (Eichhorn 1902) und das allgemeine Ertragsniveau ($GWL = f(h)$) beschreibt ihn für die Gesamtwuchsleistung (GEHRHARDT, 1923).

Für die vorliegende Untersuchung leiteten wir verallgemeinerte, baumartenspezifische Exponenten (α_{V,h_g} bzw. α_{GWL,h_g}) für den allometrischen Zusammenhang zwischen Vorrat und Mittelhöhe ($V \propto h_g^{\alpha_{V,h_g}}$) sowie für den Zusammenhang zwischen Gesamtwuchsleistung und Mittelhöhe ($GWL \propto h_g^{\alpha_{GWL,h_g}}$) ab. Ausgehend von diesen Exponenten konnte ein bei Mittelhöhe h_g festgestellter Vorrat V über den Ansatz $V_{hg20} = V \times (20/h_g)^{\alpha_{V,h_g}}$ auf

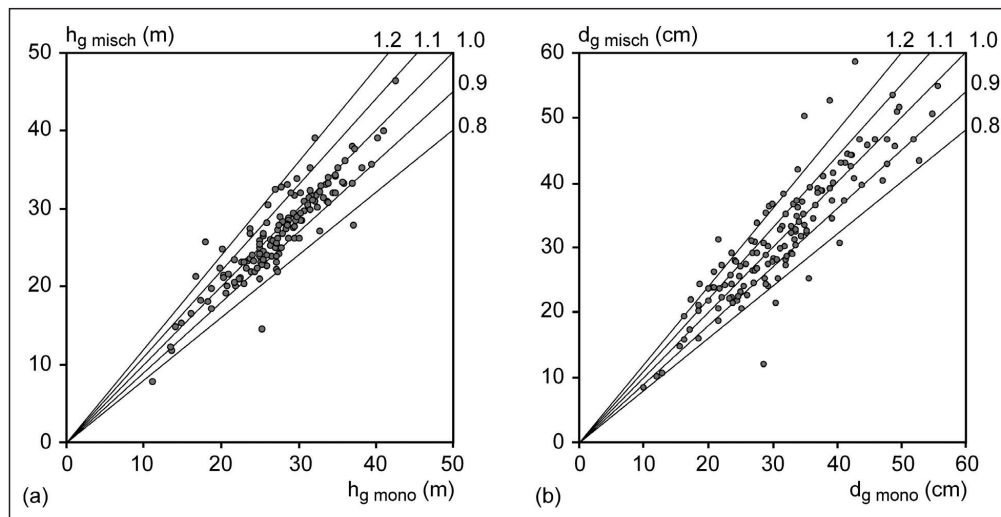


Abb. 2

Die Mittelhöhe (a) und der Mitteldurchmesser (b) der Bäume im Mischbestand unterscheiden sich im Mittel kaum von den entsprechenden Mittelwerten der benachbarten Reinbestände. Punkte nahe der Winkelhalbierenden (1,0-Linie) zeigen an, dass die Mittelwerte im Mischbestand ähnlich sind wie die gewichteten Mittelwerte in den benachbarten Reinbeständen.

Mean tree height (a) and quadratic mean tree diameter (b) in mixed-species stands are on average rather similar to the respective mean tree dimensions in the neighbouring monocultures.

Values near the bisector line (1.0-line) indicate similarity of the mean tree dimensions in the mixed-species stands and the weighted mean tree dimensions of the neighbouring monocultures.

eine Standardhöhe von 20 m projiziert werden. Analog erfolgte das für gemessene Gesamtwuchsleistungen ($GWL_{hg20} = GWL \times (20/h_g)^{\alpha_{GWL,hg20}}$). Die Werte V_{hg20} und GWL_{hg20} gaben dann an, mit welchem Vorrat bzw. welcher Gesamtwuchsleistung bei einer Indexhöhe von 20 m zu rechnen ist.

Abbildung 1 verdeutlicht den methodischen Ansatz, der analog der Ableitung des SDI von REINEKE (1933) ist, in grafischer Form. Die Basis bildeten die in Abbildung 1a dargestellten allometrischen Zusammenhänge zwischen Vorrat, V, und Mittelhöhe h_g sowie zwischen GWL und h_g ($V \propto h_g^{\alpha_{V,hg}}$ bzw. $GWL \propto h_g^{\alpha_{GWL,hg}}$). In der doppelt-logarithmischen Darstellung auf Abbildung 1b erge-

ben sich daraus Geraden mit den Steigungen $\alpha_{V,hg}$ bzw. $\alpha_{GWL,hg}$. Abbildung 1c und d zeigen am Beispiel des Bestandesvorrates im linearen bzw. doppelt-logarithmischen System, wie für Bestände mit gemessener Mittelhöhe, h_g , und gemessenem Vorrat, V, der entsprechende Vorrat bei der Indexhöhe von 20 m durch Extrapolation entlang des Richtungsfeldes mit der Steigung $\alpha_{V,hg}$ abgelesen wird. Analog erfolgte das für die Gesamtwuchsleistungen (nicht grafisch dargestellt). Aufbauend auf den Werten V_{hg20} und GWL_{hg20} aller Rein- und Mischbestände konnten dann durch Gruppenvergleiche wie im folgenden Abschnitt „Statistische Vergleiche zwischen Rein- und Mischbestand“ ausgeführt, Gruppenunter-

Tab. 3

Die Baumartenmischung kann die Dichte und den Vorrat gegenüber Mischbeständen signifikant erhöhen, lässt die Einzelbaumdimensionen aber eher unverändert. Gezeigt sind Bestandescharakteristika der Mischbestände (Gruppenmittelwerte misch) im Vergleich zum gewichteten Mittel der Reinbestände (mono) sowie die Quotienten misch/mono. Quotienten über/unter 1,00 zeigen eine Über-/Unterlegenheit der Mischbestände gegenüber benachbarten Reinbeständen an. Fett gedruckte Quotienten zeigen signifikante ($p < 0,05$) Unterschiede zwischen Misch- und Reinbeständen an. Die Spalten Gruppenmittelwerte (misch bzw. mono) geben für Misch- bzw. Reinbestände die mittleren Charakteristika an. Die Quotienten (misch/mono) repräsentieren den Mittelwert der paarweisen Division der Charakteristika von Misch-/Reinbeständen, stimmen also nicht unbedingt mit dem Quotienten aus den Gruppenmitteln überein. Weitere Erläuterung im Text. Durchmesser, Höhe und Volumen des Grundflächenmittelstammes, d_g, h_g, v_g ; Baumzahl pro Hektar, N; Bestandesdichteindex nach REINEKE (1933), SDI; Bestandesvorrat, V; Gesamtwuchsleistung, GWL; Bestandesvorrat bei Indexhöhe 20 m, V_{hg20} ; Gesamtwuchsleistung bei Indexhöhe 20 m, GWL_{hg20} .

Tree species mixing can significantly increase the stand density and standing stock but leaves the mean tree values rather unchanged compared with neighbouring monocultures. The table displays the stand characteristics for mixed-species stands (group mean mixed) in relation to the weighted mean of neighbouring monocultures (group mean mono) and ratios mixed/mono. Ratios above/below 1,00 indicate a superiority/inferiority of the species' performance in mixed-species stands versus monoculture. Ratios in bold numbers indicate significant differences ($p < 0.05$) between mixed-species stands and monocultures. The mean of the ratios (mixed/mono) is not necessarily equal to the ratio of the means (mean mixed/mean mono). So, we report both the group-wise arithmetic means (mean mixed and mean mono) as well as the mean ratios of the pair-wise comparison (mixed/mono). The mean ratios of the pair-wise comparison (mixed/mono) were used for testing group differences. Further explanation in the text. Mean of the tree height, diameter, and individual tree volume, d_g, h_g, v_g ; tree number per hectare, N; Stand Density Index by REINEKE (1933), SDI; standing stock of volume, V; total yield GWL; standing volume at index stand height 20 m, V_{hg20} ; total yield at index stand height 20 m, GWL_{hg20} .

Variablen	Einheit	Stichprobe n	Gruppenmittelwerte (± SE)		Quotient	
			misch	mono	misch/mono (± SE)	
<i>mittlere Stammdimensionen</i>						
h_g	m	141	29,25 (± 0,52)	29,85 (± 0,50)	0,98*	(± 0,008)
d_g	cm	141	32,10 (± 0,88)	32,18 (± 0,85)	1,01	(± 0,100)
v_g	m ³	141	1,36 (± 0,09)	1,37 (± 0,09)	1,05	(± 0,033)
<i>Dichte und Vorrat</i>						
N	Bäume ha ⁻¹	141	752 (± 54)	635 (± 40)	1,22***	(± 0,040)
G	m ² ha ⁻¹	141	42,12 (± 1,43)	38,09 (± 1,12)	1,12**	(± 0,024)
SDI	Bäume ha ⁻¹	141	793 (± 27)	717 (± 20)	1,16***	(± 0,025)
V	m ³ ha ⁻¹	141	561,38 (± 21,66)	525,59 (± 19,52)	1,08**	(± 0,026)
<i>Gesamtwuchsleistung</i>						
GWL	m ³ ha ⁻¹	79	979,85 (± 42,50)	883,85 (± 37,61)	1,12**	(± 0,027)
<i>Eichhorn'sche Beziehung und Ertragsniveau</i>						
V_{hg20}	m ³ ha ⁻¹	141	325,57 (± 13,06)	282,06 (± 8,40)	1,16**	(± 0,028)
GWL_{hg20}	m ³ ha ⁻¹	79	509,42 (± 21,59)	419,78 (± 13,13)	1,21***	(± 0,030)

schiede in der Höhenlage der Eichhorn'schen Beziehung und im allgemeinen Ertragsniveau geprüft werden.

Basis für diesen Ansatz war die regressionsanalytische Ableitung der allometrischen Exponenten α_{V,h_g} und α_{GWL,h_g} ($V \propto h_g^{\alpha_{V,h_g}}$ bzw. $GWL \propto h_g^{\alpha_{GWL,h_g}}$) für die Hauptbaumarten aus dem Ertragstafelkompodium von SCHÖBER (1975). Die Regressionsanalysen basierten auf den Tafelwerten mäßig durchforsteter Bestände der Bonitäten I., II. und III. Sie erbrachten die allometrischen Exponenten α_{V,h_g} für die Arten Fichte ($\alpha_{V,h_g}=1,899$), Kiefer (1,398), Buche (2,165), Eiche (2,017), Douglasie (1,491) und Lärche (1,481). Analog wurden die allometrischen Exponenten α_{GWL,h_g} für Fichte ($\alpha_{GWL,h_g}=2,199$), Kiefer (1,998), Buche (2,335), Eiche (2,677), Douglasie (1,827) und Lärche (1,882) abgeleitet.

2.2.3. Statistische Vergleiche zwischen Rein- und Mischbestand

Zum Vergleich der Bestandesmittelwerte (Mittelhöhe, Mitteldurchmesser, mittlerer Schlankheitsgrad) wurden die entsprechenden Werte des Mischbestandes durch jene des Reinbestandes der gleichen Art geteilt. Der mittlere Quotient über alle Kombinationen \pm Standardfehler dient dann der Prüfung, ob die Mittelwerte im Mischbestand größer sind als jene im Reinbestand. Wenn $1,0$ jenseits der Konfidenzintervalle mittl. Quotient $\pm t_{n-1,\alpha=0,05} \times SE$, mittl. Quotient $\pm t_{n-1,\alpha=0,01} \times SE$ und mittl. Quotient $\pm t_{n-1,\alpha=0,001} \times SE$, lag (mit t als Wert der t -Verteilung mit $n-1$ Freiheitsgraden und einer Überschreitungswahrscheinlichkeit von α) konnten die Gruppenunterschiede als signifikant auf dem Niveau $p \leq 0,05^*$, $p \leq 0,01^{**}$ bzw. $p \leq 0,001^{***}$ betrachtet werden. Liegt das Konfidenzintervall über $1,0$, so ist der Misch-

bestand dem Reinbestand in der entsprechenden Dimensionsgröße überlegen, liegt das Konfidenzintervall unter $1,0$, so ist die Größenentwicklung im Mischbestand langsamer als im Reinbestand (vergleiche *Tabelle 2*).

Die statistischen Auswertungen, wie die Gruppenvergleiche, linearen und nichtlinearen Regressionsrechnungen erfolgten mit IBM SPSS Statistics (Version 23).

3. ERGEBNISSE

3.1. Mittelhöhe und Mitteldurchmesser

Abbildung 2 zeigt, dass die Mittelhöhen und Mitteldurchmesser in den Mischbeständen dem gewichteten Mittel der benachbarten Reinbestände ähneln. Im Einzelnen kommt es zu deutlichen Abweichungen, im Durchschnitt liegen die Mittelhöhen im Mischbestand aber nur um 2% unter den entsprechenden Dimensionen der benachbarten Reinbestände (*Tabelle 3*, Zeile h_g). Die Stammdurchmesser und Stammvolumina sind im Mischbestand um durchschnittlich 1 bzw. 5% höher als in den benachbarten Reinbeständen (*Tabelle 3*, Zeilen d_g und v_g). Die Überlegenheiten gegenüber dem Reinbestand sind aber nicht signifikant.

Für fünf ausgewählte, besonders weit verbreitete Mischungen, erfolgte der Vergleich zwischen Misch- und Reinbestand auch auf der Ebene der Artenkombination und der Arten. Ähnlich wie bei der übergreifenden Analyse über alle Artenkombinationen hinweg, zeigen sich auch auf der Ebene der einzelnen Artenkombinationen kaum Unterschiede zwischen den mittleren Bestandeshöhen und Durchmessern im Misch- gegenüber dem Reinbestand (*Tabelle 4*, Spalte Gesamtbestand misch/mono). Die Analyse auf Ebene der Arten zeigt,

Tab. 4

Mittelhöhe, h_g , und Mitteldurchmesser, d_g , im Mischbestand in Relation zum Reinbestand, gesondert für fünf Artenkombinationen. Quotienten über/unter $1,00$ zeigen eine Über-/Unterlegenheit der Mischbestände gegenüber benachbarten Reinbeständen an. Fett gedruckte Quotienten zeigen signifikante ($p < 0,05$) Unterschiede zwischen Misch- und Reinbeständen an.
Mean tree height, h_g , and mean tree diameter, d_g , in mixed-species stands in relation to the neighbouring monocultures calculated separately for five selected species assemblages. Ratios mixed/mono above/below 1.00 indicate a superiority/inferiority of the species' performance in mixed-species stands versus monocultures. Ratios in bold numbers indicate significant differences ($p < 0.05$) between mixed-species stands and monocultures.

Variablen	Artenkombination	n	Art 1 misch/mono (\pm SE)	Art 2 misch/mono (\pm SE)	Gesamtbestand misch/mono (\pm SE)
<i>Mittelhöhe h_g (m)</i>					
	Fichte/Kiefer	7	0,86 ($\pm 0,06$)	1,05 ($\pm 0,03$)	0,94 ($\pm 0,04$)
	Fichte/Lärche	10	0,71 ($\pm 0,31$)	1,07 ($\pm 0,10$)	0,95 ($\pm 0,10$)
	Fichte/Buche	52	1,01 ($\pm 0,01$)	0,99 ($\pm 0,02$)	1,00 ($\pm 0,01$)
	Kiefer/Buche	17	1,04 ($\pm 0,03$)	0,97 ($\pm 0,05$)	1,01 ($\pm 0,04$)
	Eiche/Buche	24	0,98 ($\pm 0,01$)	0,90 ($\pm 0,02$)	0,95 ($\pm 0,01$)
<i>Mitteldurchmesser d_g (cm)</i>					
	Fichte/Kiefer	7	0,82 ($\pm 0,09$)	1,03 ($\pm 0,03$)	0,89 ($\pm 0,05$)
	Fichte/Lärche	10	0,74 ($\pm 0,21$)	1,11 ($\pm 0,08$)	1,08 ($\pm 0,13$)
	Fichte/Buche	28	1,12 ($\pm 0,02$)	0,95 ($\pm 0,02$)	1,05 ($\pm 0,02$)
	Kiefer/Buche	9	1,13 ($\pm 0,06$)	0,94 ($\pm 0,04$)	1,04 ($\pm 0,04$)
	Eiche/Buche	12	0,94 ($\pm 0,02$)	0,95 ($\pm 0,03$)	0,95 ($\pm 0,02$)

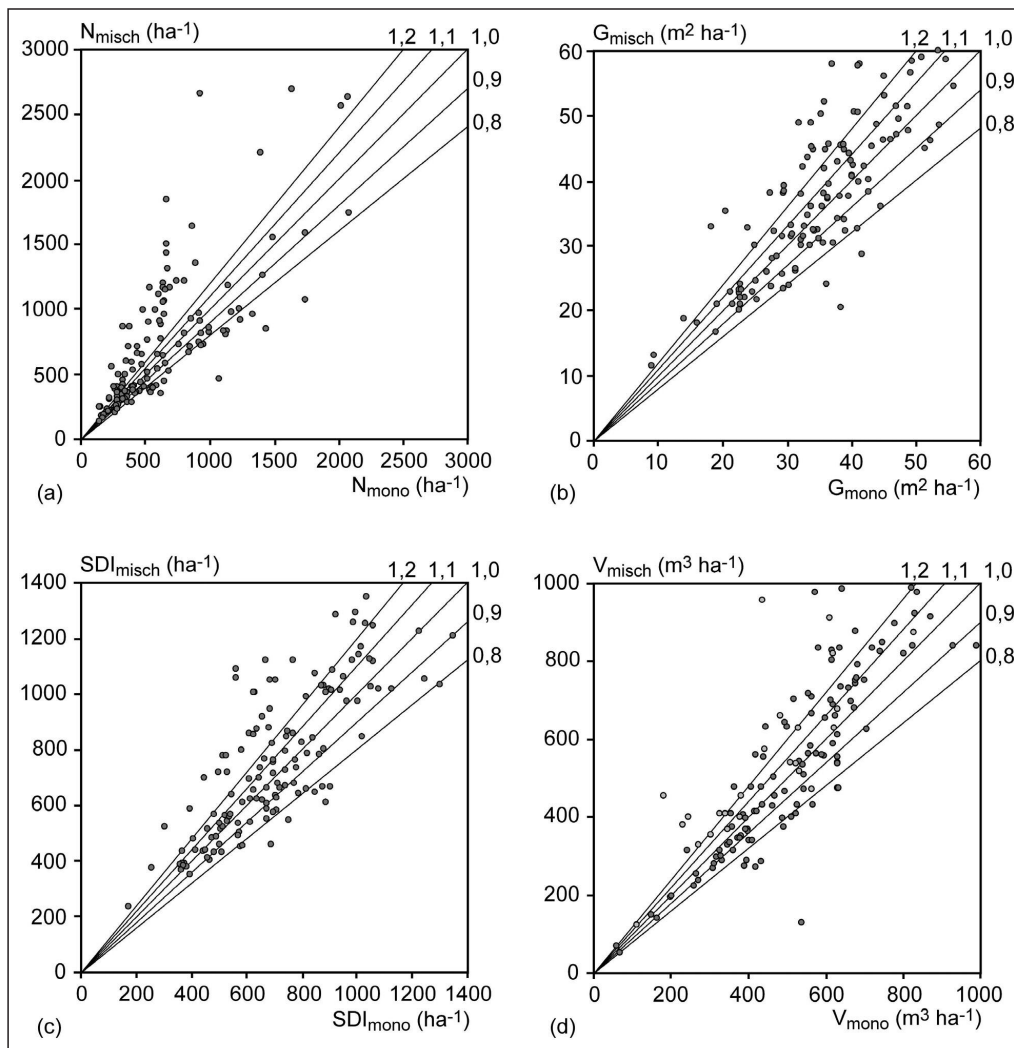


Abb. 3

Die Baumzahl (a), die Bestandesgrundfläche (b), der Bestandesdichteindex (c) und der stehende Vorrat (d) der Mischbestände liegen häufig deutlich über den entsprechenden Werten benachbarter Reinbestände.

Punkte nahe der Winkelhalbierenden (1,0-Linie) zeigen an, dass die Dichte- und Vorratswerte im Mischbestand ähnlich sind wie das gewichtete Mittel der benachbarten Reinbestände.

Tree number (a), stand basal area (b), stand density index (c), and standing volume stock are on average higher in mixed-species stands compared with neighbouring monocultures.

Values near the bisector line (1.0-line) indicate similar levels in mixed-species stands and monocultures regarding the stand density and standing stock.

dass geringfügige Vorteile der einen Art in den meisten Fällen durch Nachteile der zweiten Art kompensiert werden (Tabelle 4, Spalten Art 1 misch/mono und Art 2 misch/mono), sodass für den Bestand insgesamt kaum signifikante Differenzen zwischen Misch- und Reinbestand entstehen. Eine Ausnahme bildet hier der Eichen/Buchen Mischbestand der hinter dem Reinbestand in der Höhe und im Durchmesser um 5% zurückbleibt.

3.2. Bestandesdichte und Vorrat

Ähnlich wie bei der Mittelhöhe und dem Mitteldurchmesser streuen die einzelnen Versuchsflächen in ihren

Dichten und Vorräten in breitem Rahmen. Abbildung 3 zeigt, dass die Mehrzahl der Beobachtungswerte über der 1:1-Linie liegt. Wie aus Tabelle 3 hervorgeht, liegen die Baumzahlen (+22%), Bestandesgrundflächen (+12%), Bestandesdichtewerte (+16%) und Vorräte (+8%) in Mischbeständen im Mittel signifikant (mindestens $p < 0,05$) höher als das gewichtete Mittel der benachbarten Reinbestände (Abbildung 3, Tabelle 3, Zeilen N, G, SDI und V). Die Mischung steigert also weniger das Größenwachstum der Einzelbäume, sondern erhöht ihre Packungsdichte auf der Fläche. Vereinzelt besonders geringe oder hohe Werte dürften durch die mitunter relativ geringen Flächengrößen und dadurch besonders großen Hochrechnungsfaktoren bedingt sein.

3.3. GESAMTWUCHSLEISTUNG

Weil die Quantifizierung der Gesamtwuchsleistung (Summe aus stehendem Vorrat und Vornutzungen seit Bestandesbegründung) langfristiger Versuche bedarf, und diese in Mischbeständen eher rar sind, war bisher wenig darüber bekannt, wie Misch- gegenüber Reinbeständen in der Gesamtwuchsleistung abschneiden. *Abbildung 4* zeigt eine tendenzielle Überlegenheit der in diese Untersuchung einbezogenen Mischbestände gegenüber Reinbeständen in der Gesamtwuchsleistung. Nach *Tabelle 3* (*Tabelle 3*, Zeile GWL) übertreffen Mischbestände das gewichtete Mittel benachbarter Reinbestände in der Gesamtwuchsleistung signifikant ($p < 0,01$) um 12%. Die Überlegenheit der Mischbestände in der Gesamtwuchsleistung ist also noch etwas größer als die ihres Vorrates (+8%) (*Tabelle 3*, Zeile V).

Auf der Basis von $n=141$ Reinbeständen und $n=62$ Mischbeständen für die sowohl die Vorräte, als auch die Gesamtwuchsleistungen vorlagen wurden die mittleren Vornutzungsprozente ($VNP = (GWL - V) / GWL \times 100$) im Alter 80–120 berechnet. Sie betragen im Mittel (\pm Standardfehler) für die Reinbestände $39,9 (\pm 3,7)\%$ und für die Mischbestände $39,7 (\pm 4,8)\%$. Die Vorräte und Gesamtwuchsleistungen liegen in den Mischbeständen also um 8 bzw. 12 % höher als im Mischbestand, die prozentischen Anteile der Vornutzung (abgestorbenes oder entnommenes Volumen) unterscheiden sich aber nicht

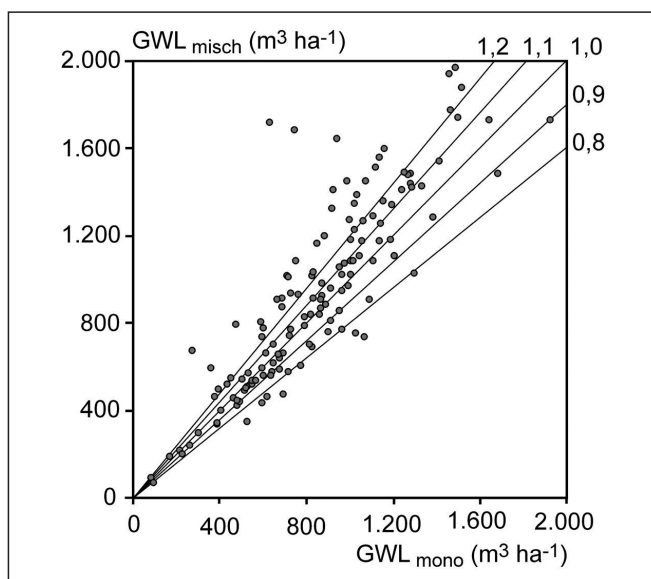


Abb. 4

Die Gesamtwuchsleistung in Mischbeständen übertrifft im Durchschnitt das Niveau benachbarter Reinbestände. Punkte nahe der Winkelhalbierenden (1,0-Linie) zeigen an, dass die Gesamtwuchsleistungen im Misch- und Reinbestand ähnlich sind. Punkte oberhalb der Winkelhalbierenden zeigen eine Überlegenheit der Mischbestände an.

Total volume yield is on average higher in mixed-species stands than in neighbouring monocultures. Values near the bisector line (1.0-line) indicate similarity of the total yield in mixed-species stands and monocultures. Values above the bisector line indicate superiority of mixed-species stands compared with monocultures.

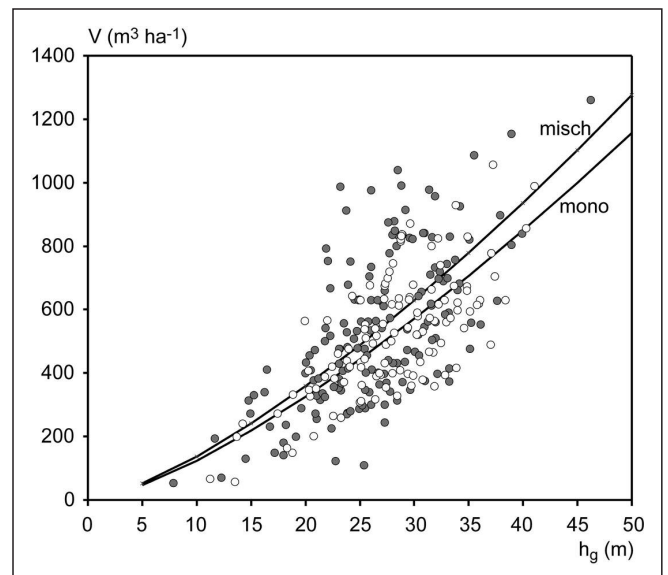


Abb. 5

Darstellung der Bestandessvorräte, V , über der Mittelhöhe, h_g , in den Reinbeständen (leere Symbole) im Vergleich zu benachbarten Mischbeständen (ausgefüllte Symbole). Den Regressionslinien liegt das Modell $\ln(V) = 1,13 (\pm 0,282) + 1,526 (\pm 0,085) \times \ln(h) + 0,086 (\pm 0,041) \times \text{mischmono}$ zugrunde, mit $\text{mischmono} = 0$ für Reinbestände und $\text{mischmono} = 1$ für Mischbestände ($n = 282$, $R^2 = 0,536$, $p < 0,001$ ***).

Standing volume, V , over stand mean height, h_g , for monoculture (empty symbols) compared with mixed-species stands (filled symbols). The regression lines are based on the model $\ln(V) = 1,13 (\pm 0,282) + 1,526 (\pm 0,085) \times \ln(h) + 0,086 (\pm 0,041) \times \text{mischmono}$ with $\text{mischmono} = 0$ for monocultures and $\text{mischmono} = 1$ for mixed-species stands ($n = 282$, $R^2 = 0,536$, $p < 0,001$ ***).

signifikant voneinander, sondern betragen im Alter 80–120 in Misch- wie Reinbeständen durchschnittlich circa 40%.

3.4. Eichhorn'sche Beziehung und Ertragsniveau

Abbildung 5 zeigt die in den Mischbeständen (graue Kreise) und Reinbeständen (weiße Kreise) gemessenen Vorräte über der Mittelhöhe und die Eichhorn'sche V - h_g -Beziehung als Ergebnis der Regressionsanalyse. In delogarithmierter Form ergibt sich $V = e^{1,13} \times h^{1,526} \times e^{\text{mischmono} \times 0,086}$, wobei für Mischbestände gilt $\text{mischmono} = 1$, sodass $e^{0,086 \times \text{mischmono}} = 1,09$. Gegenüber dem Reinbestand liegt die Eichhorn'sche Beziehung nach dieser Auswertung also um etwa 9% höher als im Reinbestand. Weiter zeigt die Gleichung für die V - h_g -Beziehung einen mittleren Steigungswert von $\alpha_{V,h_g} = 1,526$.

Die auf die Standardhöhe von 20 m bezogenen Vorräte V_{h20} und Gesamtwuchsleistungen GWL_{h20} untermauern das überlegene Niveau der Mischbestände in den V - h_g - und GWL - h_g -Beziehungen. *Tabelle 3* zeigt für V_{hg20} und GWL_{hg20} eine Überlegenheit von 16 bzw. 21% an.

Tabelle 5 zeigt auch für alle fünf ausgewählten Mischungen deutliche Anhebungen der Eichhorn'schen Beziehung (V_{h20}). Das gilt sowohl für die Ebene der Baumart, als auch für den Bestand insgesamt. Gleiches

galt für die hier nicht im Einzelnen behandelten Mischungen Fichte/Tanne, Fichte/Erle, Lärche/Buche, und Buche/Douglasie. Die hinsichtlich der Lichtökologie besonders komplementären Artenkombinationen (z.B. Fichte/Lärche, Fichte/Kiefer, Kiefer/Buche) zeigen tendenziell größere Anhebungen der V_{hg} -Relation als die weniger komplementären Artenkombinationen (z.B. Fichte/Tanne, Buche/Douglasie).

Weil für die mehrere Artenkombinationen, wie z.B. Kiefer/Fichte, Fichte/Lärche oder Kiefer/Buche, die Anzahl der langfristigen Versuchsflächen mit Angaben über die Gesamtwuchsleistung noch zu gering ist, beschränkte sich hier die artspezifische Auswertung auf die V_{hg} -Beziehung.

4. DISKUSSION

4.1. Gleiche Höhenleistung aber Anhebung der maximalen Dichte und des Ertragsniveaus durch Baumartenmischung

Für in Mitteleuropa weit verbreitete Baumartenmischungen konnte gezeigt werden, dass sie die Mittelhöhe im Vergleich zu Reinbeständen nur geringfügig verändern, die Bestandesdichte und das Ertragsniveau aber deutlich anheben können. Der Untersuchung liegen voll bestockte Bestände zugrunde, sodass aus den Ergebnissen auf eine erhöhte Tragfähigkeit von Mischbeständen im Vergleich zu benachbarten Reinbeständen geschlossen werden kann.

Durch die Mischung kann eine Art, z.B. die in der Jugend schneller wüchsige Kiefer, zwar zeitweilig im Höhenwachstum gefördert, und die andere Art, z.B. die eher später kulminierende Buche, in der Entwicklung abgebremst werden. D.h. eine Art kann auf Kosten der anderen höher werden (PRETZSCH et al., 2015). Die mittlere Bestandeshöhe wird dadurch aber kaum verändert. Es konnte also keine dauerhafte Steigerung der Höhenwuchsleistung und Bonitätserhöhung der Bestände fest-

gestellt werden, wie sie für Düngungsmaßnahmen nachgewiesen ist (FOERSTER, 1990; WITTICH, 1954).

Trotz etwa gleichbleibender Höhenleistung äußert sich die Mischung aber in einer signifikanten Erhöhung der Bestandesdichte, d.h., die Eichhorn'sche Beziehung (+16%) und das allgemeine Ertragsniveau (+21%) steigen deutlich an.

Der Anstieg des Ertragsniveaus um circa 20% entspricht etwa der Relation zwischen dem mittleren und oberen Ertragsniveau, die ASSMANN (1961) für Fichten- und Buchenreinbestände gezeigt hat. Assmann (1961, S. 164–174) führt den Anstieg von Vorrat und GWL bei gegebener Höhe und Bonität auf Verbesserungen der Wasserversorgung wegen erhöhter Wasserspeicherkapazität der Böden zurück. Im Falle der Mischbestände bestehen aber keine Unterschiede zu den Böden oder der Wasserspeicherkapazität der Reinbestände, sondern die Wuchsbedingungen sind vergleichbar. Es bestehen also keine grundlegenden Unterschiede im Ressourcenangebot. Unterschiede dürften daher eher in der Aufnahme und Nutzungseffizienz der Ressourcen Licht und Wasser bestehen (FORRESTER, 2014; FORRESTER und ALBRECHT, 2014).

Weil die Datenbasis für die Analyse von Mischungseffekten auf die Ertragskomponenten von Waldbeständen noch sehr begrenzt ist, bezogen wir in die vorliegende Untersuchung auch Versuchsflächen ein, die nicht von ihrer Begründung an, sondern erst 2–3 Jahrzehnte danach, unter kontinuierlicher Beobachtung gestellt wurden. Von solchen Versuchsflächen konnten die Ertragskomponenten des verbleibenden Bestandes in die Auswertung mit einbezogen werden, nicht aber die Gesamtwuchsleistung. Denn diese ist nur dann vollständig bekannt, wenn seit Bestandesbegründung turnusmäßig aufgenommen wird. Aus diesem Grund ist der Stichprobenumfang bei den Variablen des verbleibenden Bestandes (n=141) höher als beim Gesamtbestand (n=79) (Tabelle 3). Für mehrere Artenkombinationen,

Tab. 5

Vorrat bei Mittelhöhe 20 m, V_{hg20} im Mischbestand in Relation zum Reinbestand, gesondert für fünf Artenkombination. Liegen die Quotienten zwischen gemischt und mono über/unter 1,00, so zeigen sie eine Über-/Untergehenheit der Eichhorn'schen Beziehung in Mischbeständen gegenüber benachbarten Reinbeständen an. Fett gedruckte Quotienten zeigen signifikante ($p < 0,05$) Unterschiede zwischen Misch- und Reinbeständen an.
Standing stock at mean tree height of 20 m of mixed-species stands in relation to the neighbouring monocultures calculated separately for five selected species assemblages. Ratios mixed/mono above/below 1.00 indicate a superiority/inferiority of Eichhorn's relationship in mixed-species stands versus monoculture. Ratios in bold numbers indicate significant differences ($p < 0.05$) between mixed-species stands and monocultures.

Variablen	Artenkombination	n	Art 1	Art 2	Gesamtbestand
			misch/mono (± SE)	misch/mono (± SE)	misch/mono (± SE)
$V_{hg20}(m^3 ha^{-1})$					
	Fichte/Kiefer	7	1,19 (±0,07)	1,38 (±0,04)	1,22 (±0,04)
	Fichte/Lärche	10	1,84 (±0,94)	1,32 (±0,19)	1,43 (±0,31)
	Fichte/Buche	52	1,07 (±0,04)	1,05 (±0,04)	1,05 (±0,03)
	Kiefer/Buche	17	1,41 (±0,07)	1,40 (±0,09)	1,40 (±0,07)
	Eiche/Buche	24	1,02 (±0,04)	1,21 (±0,07)	1,11 (±0,04)

wie z. B. Kiefer/Fichte, Fichte/Lärche oder Kiefer/Buche, war die Anzahl der langfristigen Versuchsflächen mit vollständigen Angaben über die Gesamtwuchsleistung zu gering, um analog zur artspezifischen Analyse der $V-h_g$ -Beziehung (Tabelle 5) auch die Reaktion der Mischung auf die $GWL-h_g$ -Beziehung zu untersuchen.

Unsere Untersuchung basiert neben langfristigen Versuchsflächen auch auf temporären Probestflächen. Die in manchen Fällen kleinen Größen der temporären Probestflächen (minimal 0,05 ha, d. h. Hochrechnungsfaktor auf Hektarwerte beträgt 20) erbrachten ertragskundliche Werte die z. T. am unteren oder oberen Rand des aus Erfahrung bekannten Wertebereiches liegen. Solche Minimal- und Maximalwerte dürften auf die eher kleineren Flächengrößen der temporären Probestflächen und die entsprechend hohen Hochrechnungsfaktoren zurückzuführen sein; da Minimal- wie Maximalwerte in der Auswertung belassen wurden, dürften daraus repräsentative Mittelwerte resultieren.

4.2. Mischung als wachststeigernde waldbauliche Maßnahme

Mischbestände können viele Funktionen und Leistungen von Wäldern, wie z. B. Stabilität (GRIESS und KNOKE, 2011; JACTEL und BROCKERHOFF, 2007), Habitat- und Biodiversität (TEWS et al., 2004) oder Ästhetik und Erholungsfunktionen (SCHÜTZ, 2002; STÖLB, 2005) häufig besser erfüllen als Reinbestände. Die vorliegende Untersuchung unterstreicht, dass durch Mischung komplementärer Baumarten auch eine dauerhafte Erhöhung von Zuwachs und Dichte erreicht werden kann. Die Mischungseffekte fallen bei einer Kombination von Licht- mit Schattenbaumarten, Koniferen mit Laubbaumarten oder Pionier- mit Klimaxbaumarten besonders deutlich aus. Dieser Vorteil entsteht aus der überlegten Kombination von Baumarten, die die verfügbaren Ressourcen aufgrund ihrer ökologischen Komplementarität besser aufnehmen oder effizienter nutzen (LIANG et al., 2016). Die Voraussetzung für die Ausschöpfung des Potenzials von Mischbeständen im Sinne einer Erhöhungen der Produktivität oder Dichte ist ökologisches Wissen, wie es die vorliegende Untersuchung vermitteln will. Im Vergleich zu Maßnahmen wie Durchforstung, Düngung, oder Astung, bildet die Baumartenmischung eine besonders effiziente Maßnahme der Verbesserung der Funktionen und Leistungen von Wäldern.

4.3. Praktische Relevanz der Ergebnisse

Bei Bestandesaufnahmen und Betriebsinventuren erfolgt die Vorratsermittlung häufig über Bonitierung der Bestände und Abgriff ihres Vorrates aus Tabellenwerken in Abhängigkeit von Alter und Höhe der Bestände. Die entsprechenden Tafelwerke wurden durchweg für Reinbestände entwickelt und repräsentieren demnach auch die Eichhorn'sche Beziehung und das Ertragsniveau von Reinbeständen. Bei ihrer Anwendung für die Vorratsschätzung von Mischbeständen, in welchen die genannten Beziehungen auf höherem Niveau liegen können, sollten die aus der Tafel abgegriffenen Werte deshalb mit dem Bestockungsgrad korrigiert werden ($Vorrat_{\text{geschätzt}} = Vorrat_{\text{ET}} \times BG_G$). Der grundflächen-

bezogene Bestockungsgrad (BG_G) lässt sich besonders einfach über Winkelzählproben in dem betreffenden Bestand ermitteln ($BG_G = G_{\text{WZP}}/G_{\text{ET}}$), wobei G_{WZP} und G_{ET} für die Bestandesgrundflächen aus der Winkelzählprobe bzw. Ertragstafel stehen. Auf Basis von Ertragstafeln ermittelte Vorräte sollten dann nach Ermittlungen des Bestockungsgrades bei überlegenen Dichten der Mischbestände auf eine wirklichkeitsnähere Dichte erhöht werden, die den gemessenen Bestockungsgrad ($BG_G = G_{\text{WZP}}/G_{\text{ET}} > 1,0$) berücksichtigt.

Die Erhöhung der Tragfähigkeit durch Baumartenmischung ist eine wichtige Information, die in die Entwicklung von waldbaulichen Pflegerichtlinien einfließen sollte (SCHÜTZ und ZINGG, 2010). Werden für Mischbestände, wie bisher üblich, dieselben maximalen Bestandesdichten wie für Reinbestände unterstellt, und erfolgen in ihnen ähnliche Dichteabsenkungen im Zuge von Durchforstungen wie in Reinbeständen, dann besteht die Gefahr suboptimaler Dichtehaltung. Die Tragfähigkeit könnte dann durch zu starke Dichteabsenkungen nicht voll ausgeschöpft werden und es könnten Produktionsverluste entstehen. Die Mischungseffekte würden quasi durch Unterschreitung der wachsoptimalen Dichte eliminiert. Die gezeigte erhöhte Tragfähigkeit erlaubt vielmehr höhere Stammzahlhaltungen und höhere Anzahlen von Z- oder Auslesebäumen als in Reinbeständen.

Reinbestandsertragstafeln werden mangels besser geeigneter Informationsgrundlagen häufig auch auf Mischbestände angewendet. Dabei werden die Anteile der einzelnen Baumarten (Mischungsanteile m_1, m_2, \dots, m_n) und der Bestockungsgrad des gesamten Bestandes von Mischbeständen durch einen Vergleich der gemessenen Grundfläche mit den entsprechenden Angaben der Ertragstafeln für Reinbestände berechnet (siehe beispielsweise die Anteilsflächenberechnung nach KRAMER und AKÇA, 1995). Weitere Charakteristika der Mischbestände werden dann üblicherweise aus den Reinbestandstafeln abgegriffen und mit den berechneten Mischungsanteilen und dem Bestockungsgrad gewichtet, um Schätzwerte für Mischbestände zu erhalten (KRAMER und AKÇA, 1995).

Bei diesem Vorgehen wird unterstellt, dass sich die Zustands- und Entwicklungsgrößen von Mischbeständen als gewichtetes Mittel der Reinbestände ergeben, dass die Mischung also lediglich einen additiven Effekt auf den Zuwachs und andere Bestandescharakteristika hat. Vorliegende und viele andere Untersuchungen (HEIN und DHÔTE, 2006; LIANG et al., 2016; PIOTTO, 2007; RÍO und STERBA, 2009; ZHANG et al., 2012) belegen aber multiplikative Effekte und Mehrzuwächse von 10 bis 30%. Die Analyse der Gesamtwuchsleistung in Misch- gegenüber Reinbeständen bestätigte Mehrzuwächse in Mischbeständen von durchschnittlich 10% (Abbildung 4). Werden Zuwachsschätzungen von Reinbestandsmodellen auf Mischbestände der entsprechenden Baumarten übertragen, sollten sie also mit Korrekturfaktoren adjustiert werden, die zwischen 1,10 und 1,30 liegen können. Der Zuwachs und die Bestandesdichte von Mischbeständen können demnach das gewichtete Mittel von benachbarten Reinbeständen signifikant übertreffen.

4.4. Konsequenzen für die Modellbildung

Dass der Zuwachs, die Dichte, das Ertragsniveau und weitere Bestandescharakteristika von Mischbeständen signifikant vom gewichteten Mittel benachbarter Reinbestände abweichen, unterstreicht, dass Mischungseffekt nicht rein additiv, sondern multiplikativ wirken. Die inter-spezifische Nachbarschaft löst Interaktionen aus, erzeugt Prozesse und Strukturen, die aus Reinbeständen allein nicht abgeleitet werden können. Die Abweichungen der Mischbestände z. B. im Zuwachs und in der Bestandesdichte von benachbarten Reinbeständen können 10–30% betragen und sind damit wissenschaftlich und praktisch relevant. Die Vorhersagen von Prognosemodellen (z. B. Ertragstabellen oder Simulatoren für Reinbestände), die auf Reinbeständen basieren, bedürfen der Korrektur, z. B. über Multiplikatoren, die die mischungs- und artenspezifischen Effekte berücksichtigen (PRETZSCH et al., 2015). Solche Korrekturfaktoren bilden aber allenfalls eine Übergangslösung. Längerfristig sollten die Effekte der Mischung auf die Prozesse (z. B. Angebot, Aufnahme und Nutzungseffizienz von Ressourcen) und Strukturen (z. B. Baummorphologie, Bestandesstruktur, Größenzusammensetzung) modellhaft abgebildet werden. Denn nur so können dauerhaft verlässliche waldwachstumskundliche Informationsgrundlagen für die künftig immer weiter verbreiteten Mischbestände bereitgestellt werden.

5. DANKSAGUNG

Dank geht an die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung des Projektes PR 292/12-1 "Tree and stand-level growth reactions on drought in mixed versus pure forests of Norway spruce and European beech", an das Bayerische Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten für die Unterstützung des Projektes W07 „Betreuung der Langfristigen Ertragskundlichen Versuchsflächen“ und an die Europäische Union für die Förderung der COST Action FP1206 EuMIXFOR, aus welcher einige der Kiefern/Buchen Rein- und Mischbestände stammen. Dank gilt außerdem MARTIN NICKEL und LEONHARD STEINACKER für die Zusammenstellung der Daten, ULRICH KERN für die Anfertigung der Grafiken, ROBERT BEYER für die französische Übersetzung der Zusammenfassung und anonymen Gutachtern für ihre Hinweise zur Überarbeitung des Manuskriptes.

6. ZUSAMMENFASSUNG

Neuere Arbeiten über Mischbestände berichten Mehrzuwächse gegenüber Reinbeständen von 10–30%, quantifizieren aber kaum andere ertragskundliche Bestandesmerkmale. Basierend auf 141 Kombinationen aus Mischbeständen und benachbarten Reinbeständen (Tabelle 1) wurden in der vorliegenden Studie die Mischungseffekte auf die mittleren Baumdimensionen, Dichte und Ertragsniveau analysiert.

Untersucht wurden langfristige Versuche und temporäre Probestandflächen in Mitteleuropa mit gleichaltrigen Rein- und Mischbeständen aus Tanne/Fichte, Fichte/Kiefer, Fichte/Lärche, Fichte/Buche, Fichte/Erle, Kie-

fer/Buche, Lärche/Buche, Buche/Eiche und Buche/Douglasie, die die maximale Dichte repräsentieren (Tabelle 2).

Die Mittelhöhe (–2%) und der Mitteldurchmesser (+1%) von Mischbeständen weichen kaum vom gewichteten Mittel benachbarter Reinbestände ab (Tabelle 3). Geringfügige Unterlegenheiten der einen Art, werden meist durch Überlegenheit der anderen kompensiert (Tabelle 4). Demgegenüber liegen die Bestandesdichten, repräsentiert durch die Baumzahl, den Bestandesdichteindex nach Reineke, die Bestandesgrundfläche, und den Vorrat um 8–22% über benachbarten Reinbeständen (Abbildung 3, Tabelle 3). Bei der Mehrzahl der Baumartenkombinationen erhöht sich die Dichte beider Arten. Weil die Mittelhöhen weitgehend unverändert bleiben, die Vorräte und Gesamtwuchsleistungen aber merklich ansteigen, liegen in Mischbeständen das Niveau der Beziehung von Eichhorn (+16%) und das allgemeine Ertragsniveau nach Assmann (+21%) über den entsprechenden Beziehungen in benachbarten Reinbeständen (Abbildung 5, Tabelle 3).

Während übergreifende Aussagen für mehrere Baumarten schon abgesichert werden können, ist die Datenbasis für Detailbetrachtungen einzelner Artenkombinationen noch unzureichend (Tabellen 4 und 5).

Die Diskussion richtet sich auf die Ursachen der erhöhten Tragfähigkeit von Mischbeständen bei gleicher Höhenleistung sowie die Konsequenzen für Inventur, waldbauliche Behandlung, modellhafte Abbildung und Prognose.

7. SUMMARY

Title of the paper: *On the effect of tree species mixing on the yield components at the stand level.*

A string of recent publications quantifies overyielding of mixed-species stands versus monocultures of 10–30% but hardly considers other stand characteristics relevant for science and practice. Based on 141 combinations of mixed-stand plots and neighbouring monocultures of the respective species (Table 1) we show the effect of mixing on the mean tree dimensions, the stand density, and the yield level.

We analyzed long-term experimental plots and temporary plots in Central Europe in even-aged mixed stands and monocultures of silver fir/Norway spruce, Norway spruce/Scots pine, Norway spruce/European larch, Norway spruce/European beech, Norway spruce/red alder, Scots pine/European beech, European larch/European beech, European beech/sessile oak, European beech/Douglas-fir that represent maximum stand density and carrying capacity (Table 2).

The mean stand height (–2%) and tree diameter (+1%) of mixed stands hardly differ from the weighted mean values of the neighbouring monocultures (Table 3). Minor inferiorities in the mean dimension of one species are mostly compensated by a minor superiority of the other species (Table 4). The stand density, indicated by the tree number, Stand Density Index, the stand basal area, and the standing volume, in contrast, are 8–22% higher in mixed stands compared with monocultures

(Figure 3, Table 3). In most mixtures both species increase their stand density compared with the neighbouring monocultures. The combination of invariable mean height and increase of stand density and total yield results in a significant increase of the level of the relationship by Eichhorn (+16%) and the general yield level by Assmann (+21%) in mixed versus pure stands (Figure 5, Table 3).

Whereas, such general findings of mixed-species versus monocultures' characteristics became obvious, evidence of the various reaction patterns of different species assemblages still need more empirical effort (Tables 4 and 5).

The discussion addresses the causes of the increased carrying capacity but invariant mean tree height in mixed stands and the consequences for forest mensuration, inventory, silvicultural guidelines, stand modelling, and prognosis.

8. RÉSUMÉ

Titre de l'article: *L'influence des mélanges d'essences sur les composantes de rendement de peuplements forestiers.*

Des travaux récents sur les peuplements forestiers mélangés constatent une croissance additionnelle de 10–30% par rapport aux peuplements purs. D'autres caractéristiques relevantes du peuplement sont pourtant rarement considérées. Basé sur 141 combinaisons de peuplement mélangés et de peuplement purs voisins (tableau 1), nous avons examiné l'effet d'un mélange des essences sur les proportions moyennes des arbres, la densité du peuplement, et le niveau de rendement.

Nous avons analysé des placettes à court et long terme en Europe Centrale avec des peuplements mélangés et purs de sapin blanc/épicéa de Norvège, épicéa de Norvège/pin sylvestre, épicéa de Norvège/mélèze européen, épicéa de Norvège/hêtre européen, épicéa de Norvège/aulne rouge, pin sylvestre/hêtre européen, mélèze européen/hêtre européen, hêtre européen/chêne rouvre, hêtre européen/sapin de Douglas, représentant la densité maximale du peuplement (tableau 2).

La hauteur moyenne (–2%) et le diamètre moyen (+1%) des peuplements mélangés se distinguent à peine de ceux des peuplements purs (tableau 3). Des infériorités mineurs d'un espèce sont très souvent compensé par une supériorité mineure de l'autre espèce (tableau 4). En revanche, la densité du peuplement, représenté par le nombre d'arbres, l'indice de densité du peuplement selon Reineke, la surface terrière et le volume sur pied, des peuplements mélangés est supérieur de 8–22% par rapport aux peuplements purs (figure 3, tableau 3). Pour la plupart des peuplements mélangés, la densité du peuplement de chacun des deux espèces augmente comparé aux peuplements purs. L'invariabilité de la hauteur moyenne en combinaison avec l'augmentation de la densité du peuplement et du niveau de rendement ont pour résultat une augmentation significative du niveau de la relation d'Eichhorn (+16%) et du niveau général de rendement selon Assmann (+21%) dans les peuplements mélangés par rapport aux peuplements purs voisins.

Tandis que des résultats généraux sur des caractéristiques des peuplements mélangés par rapport aux peuplements purs sont bien établis, il reste un manque de preuves empiriques concernant les détails des différents assemblages d'espèces.

La discussion aborde les causes d'une capacité de charge augmentée et une hauteur d'arbre invariante dans les peuplements mélangés, et leurs conséquences pour la mesurage des forêts, l'inventaire forestier, la sylviculture, ainsi que la modélisation et la prévision des peuplements forestiers.

9. LITERATUR

- ASSMANN, E. (1961): Waldertragskunde. Organische Produktion, Struktur, Zuwachs und Ertrag von Waldbeständen. BLV Verlagsgesellschaft, München, Bonn, Wien, 490 S.
- BIELAK, K., M. DUDZIŃSKA und H. PRETZSCH (2014): Mixed stands of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst) can be more productive than monocultures. Evidence from over 100 years of observation of long-term experiments. *Forest Systems* **23**(3): S. 573–589.
- BINKLEY, D. (1984): Importance of size-density relationships in mixed stands of Douglas-fir and red alder. *Forest Ecology and Management* **9**(2): S. 81–85.
- BINKLEY, D., R. SENOCK, S. BIRD und T. G. COLE (2003): Twenty years of stand development in pure and mixed stands of *Eucalyptus saligna* and nitrogen-fixing *Facaltaria moluccana*. *Forest Ecology and Management* **182**(1): S. 93–102.
- BOLTE, A., T. RAHMANN, M. KUHR, P. POGODA, D. MURACH und K. v. GADOW (2004): Relationships between tree dimension and coarse root biomass in mixed stands of European beech (*Fagus sylvatica* L.) and Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst.). *Plant and Soil* **264**(1–2): S. 1–11.
- DEBELL, D. S., T. G. COLE und C. D. WHITESELL (1997): Growth, development, and yield in pure and mixed stands of *Eucalyptus* and *Albizia*. *Forest Science* **43**(2): S. 286–298.
- EICHORN, F. (1902): Ertragstabellen für die Weißtanne. Verlag Julius Springer, Berlin, 81 S. + Anhang.
- FOERSTER, W. (1990): Zusammenfassende ertragskundliche Auswertung der Kiefern-Düngungsversuchflächen in Bayern. *Forstl Forschungsber München* **105**, 328 S.
- FORRESTER, D. I. (2014): The spatial and temporal dynamics of species interactions in mixed-species forests: from pattern to process. *Forest Ecology and Management* **312**: S. 282–292.
- FORRESTER, D. I. und A. T. ALBRECHT (2014): Light absorption and light-use efficiency in mixtures of *Abies alba* and *Picea abies* along a productivity gradient. *Forest Ecology and Management* **328**: S. 94–102.
- GEHRHARDT, E. (1923): Ertragstabellen für Eiche, Buche, Tanne, Fichte und Kiefer. Berlin, Julius Springer, 46 S.
- GRIESS, V. C. und TH. KNOKE (2011): Growth performance, windthrow, and insects: meta-analyses of parameters influencing performance of mixed-species stands in boreal and northern temperate biomes. *Canadian Journal of Forest Research* **41**: S. 1141–1159.
- HEIN, S. und J. F. DHÔTE (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. *Annals of forest science* **63**(5): S. 457–467.
- JACTEL, H. und E. G. BROCKERHOFF (2007): Tree diversity reduces herbivory by forest insects. *Ecology Letters* **10**(9): S. 835–848.
- KELTY, M. J. und I. R. CAMERON (1995): Plot design for the analysis of species interactions in mixed stands. *Commonwealth Forestry Review* **74**(4): S. 322–332.
- KRAMER, H. und A. AKÇA (1995): Leitfaden zur Waldmessenlehre. JD Sauerländer's Verlag, Frankfurt am Main, 266 S.
- LIANG, J., TH. W. CROWTHER, N. PICARD, S. WISER, M. ZHOU, G. ALBERTI, E.-D. SCHULZE, A. D. MCGUIRE, F. BOZZATO, H. PRETZSCH, S. DE MIGUEL, A. PAQUETTE, B. HÉRAULT, M. SCHERER-LORENZEN, CH. B. BARRETT, H. GLICK, G. M. HENGEVELD, G.-J. NABUURS, S. PFAUTSCH, H. VIANA, A. C. VIBRANS, CH. AMMER, P. SCHALL, D. VERBYLA, N. TCHEBAKOVA, M. FISCHER, J. V. WATSAN, H. CHEN, X. LEI, M.-J. SCHELHAAS, H. LU, D. GIANELLE, E. I. PARFENOVA, CH. S. ELJATIB, E. LEE, B. LEE, H.-A. KIM, H. BRUELHEIDE, D. A. COOMES, D. PIOTTO, T. SUNDERLAND, B. SCHMID, M. RAUTIAINEN, S. GOURLET-FLEURY, B. SINKÉ, E. B. SEARLE, V. J. NELDER, M. R. NGUGI, CH. BARALOTO, L. FRIZZERA, R. BALAZY, J. OLEKSYN, T. ZAWILA-NIEDZWIECKI, O. BOURIAUD, F. BUSSOTTI, L. FINÉR, B. JAROSZEWICZ, T. JUCKER, F. VALLADARES, A. M. JAGODZINSKI, P. P. LUIS, CH. GONMADJE, W. MARTHY, T. O'BRIEN, E. H. MARTIN, A. MARSHALL, F. ROVERO, R. BITARIHO, P. A. NIKLAUS, P. ALVAREZ-LOAYZA, N. CHAMUYA, R. VALENCIA, F. MORTIER, V. WORTTEL, N. E. OBIANG, L. V. FERREIRA, D. E. ODEKE, R. M. VASQUEZ und P. B. REICH (2016): Positive Biodiversity-Productivity Relationship predominant in global forests. *Science*, accepted.
- PIOTTO, D. (2007): A meta-analysis comparing tree growth in monocultures and mixed plantations. *Forest Ecology and Management* **255**: S. 781–786.
- PRETZSCH, H. (2013): Facilitation and competition in mixed-species forests analysed along an ecological gradient. *Nova Acta Leopoldina* **114**(391): S. 159–174.
- PRETZSCH, H. (2014): Canopy space filling and tree crown morphology in mixed-species stands compared with monocultures. *Forest Ecology and Management* **327**: S. 251–264.
- PRETZSCH, H. und P. BIBER (2016): Tree species mixing can increase maximum stand density. *Canadian Journal of Forest Research* **46**: S. 1–15, DOI: 10.1139/cjfr-2015-0413.
- PRETZSCH, H. (2016): Ertragstafel-Korrekturfaktoren für Umwelt- und Mischungseffekte. *AFZ-Der Wald* **187**(14): S. 44–47.
- PRETZSCH, H., D. I. FORRESTER und T. RÖTZER (2015): Representation of species mixing in forest growth models. A review and perspective. *Ecological Modelling* **313**: S. 276–292.
- PRETZSCH, H. und A. RAIS (2016): Wood quality in complex forests versus even-aged monocultures. Review and perspectives, *Wood science and technology* **50**(4): S. 845–880.
- PRETZSCH, H., M. DEL RÍO, CH. AMMER, A. AVDAGIC, I. BARBEITO, K. BIELAK, G. BRAZAITIS, L. COLL, G. DIRNBERGER, L. DRÖSSLER, M. FABRIKA, D. I. FORRESTER, K. GODVOD, M. HEYM, V. HURT, V. KURYLYAK, M. LÖF, F. LOMBARDI, B. MATOVIĆ, F. MOHREN, R. MOTTA, J. DEN OUDEN, M. PACH, Q. PONETTE, G. SCHÜTZE, J. SCHWEIG, J. SKRZYSZEWSKI, V. SRAMEK, H. STERBA, D. STOJANOVIĆ, M. SVOBODA, M. VANHELLEMONT, K. VERHEYEN, K. WELLHAUSEN, T. ZLATANOV und A. BRAVO-OVIEDO (2015): Growth and yield of mixed versus pure stands of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and European beech (*Fagus sylvatica* L.) analysed along a productivity gradient through Europe. *Eur J Forest Res* **134**(5): S. 927–947.
- PRETZSCH, H., M. DEL RÍO, G. SCHÜTZE, CH. AMMER, P. ANNIGHÖFER, A. AVDAGIC, I. BARBEITO, K. BIELAK, G. BRAZAITIS, L. COLL, L. DRÖSSLER, M. FABRIKA, D. I. FORRESTER, V. KURYLYAK, M. LÖF, F. LOMBARDI, B. MATOVIĆ, F. MOHREN, R. MOTTA, J. DEN OUDEN, M. PACH, Q. PONETTE, J. SKRZYSZEWSKI, V. SRAMEK, H. STERBA, M. SVOBODA, K. VERHEYEN, T. ZLATANOV und A. BRAVO-OVIEDO (2016): Mixing of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and European beech (*Fagus sylvatica* L.) enhances structural heterogeneity, and the effect increases with water availability, *Forest Ecology and Management* **373**: S. 149–166.
- REINEKE, L. H. (1933): Perfecting a stand-density index for even-aged forests. *J Agr Res* **46**: S. 627–638.
- RÍO, DEL M., H. PRETZSCH, I. ALBERDI, K. BIELAK, F. BRAVO, A. BRUNNER, S. CONDÉS, M. J. DUCÉY, T. FONSECA, N. VON LÜPKE, M. PACH, S. PERIC, T. PEROT, Z. SOUIDI, P. SPATHELF, H. STERBA, M. TIJARDOVIC, M. TOMÉ, P. VALLET und A. BRAVO-OVIEDO (2016): Characterization of the structure, dynamics, and productivity of mixed-species stands: Review and perspectives. *Eur J Forest Res* **135**: S. 23–49.
- RÍO, DEL M., G. SCHÜTZE und H. PRETZSCH (2014): Temporal variation of competition and facilitation in mixed species forests in Central Europe. *Plant Biology* **16**(1): S. 166–176.
- RÍO, DEL M. und H. STERBA (2009): Comparing volume growth in pure and mixed stands of *Pinus sylvestris* and *Quercus pyrenaica*. *Annals of Forest Science* **66**(5): S. 1–11.
- SCHOBER, R. (1975): Ertragstafeln wichtiger Baumarten. JD Sauerländer's Verlag, Frankfurt am Main, 154 S.
- SCHÜTZ, J. P. (2002): Silvicultural tools to develop irregular and diverse forest structures. *Forestry* **75**(4): S. 329–337.
- SCHÜTZ, J. P. und A. ZINGG (2010): Improving estimations of maximal stand density by combining Reineke's size-density rule and the yield level, using the example of spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) and European Beech (*Fagus sylvatica* L.). *Annals of Forest Science* **67**(5): S. 507.
- STERBA, H., M. DEL RÍO, A. BRUNNER und S. CONDES (2014): Effect of species proportion definition on the evaluation of growth in pure vs. mixed stands. *Forest Systems* **23**(3): S. 547–559.
- STÖLB, W. (2005): Waldästhetik: über Forstwirtschaft, Naturschutz und die Menschenseele. Kessel, 400 S.
- TEWS, J., U. BROSE, V. GRIMM, K. TIELBÖRGER, M. C. WICHMANN, M. SCHWAGER und F. JELTSCH (2004): Animal species diversity driven by habitat heterogeneity/diversity: the importance of keystone structures. *Journal of biogeography* **31**(1): S. 79–92.
- WITTICH, W. (1954): Die Melioration streugennutzter Böden, *Forstw. Cbl.* **73**: S. 211–232.
- ZHANG, Y., H. Y. CHEN und P. B. REICH (2012): Forest productivity increases with evenness, species richness and trait variation: a global meta-analysis. *Journal of Ecology* **100**(3): S. 742–749.