

# Effekt der Mischung auf die Bestandesstruktur, die Dichte und das Ertragsniveau von Waldbeständen

Hans Pretzsch  
Lehrstuhl f. Waldwachstumskunde, TU München

## Zusammenfassung

Basierend auf 141 Kombinationen aus Mischbeständen und benachbarten Reinbeständen wurde der Mischungseffekt auf die mittleren Baumdimensionen, die Dichte und das Ertragsniveau analysiert. Untersucht wurden langfristige Versuche und temporäre Probeflächen in Mitteleuropa mit gleichaltrigen Rein- und Mischbeständen aus Tanne/Fichte, Fichte/Kiefer, Fichte/Lärche, Fichte/Buche, Fichte/Erle, Kiefer/Buche, Lärche/Buche, Buche/Eiche und Buche/Douglasie, die die maximale Dichte repräsentieren.

Die Mittelhöhe (-2 %) und der Mitteldurchmesser (+1 %) von Mischbeständen weichen kaum vom gewichteten Mittel benachbarter Reinbestände ab. Demgegenüber liegen die Bestandesdichten, repräsentiert durch die Baumzahl, den Bestandesdichteindex nach Reineke, die Bestandesgrundfläche, und den Vorrat, um 8-22 % über benachbarten Reinbeständen. 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.

## 1 Baumartenmischung und Ertrag von Wäldern

Um den Effekt der Baumartenmischung 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.

*Tabelle 1 Übersicht über die Lage und Klimaverhältnisse der einbezogenen langfristigen Versuchsflächen und temporären Probeflächen gesondert nach Baumartenkombination und insgesamt.*

Artenkombination	Längengrad (°O)			Breitengrad (°N)			Höhe über NN (m)			Mitteltemperatur (°C)			Jahresniederschlag (mm Jahr <sup>-1</sup> )		
	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>	-3,172	9,604	10,519	41,895	46,928	47,097	20	325	435	4,0	5,3	7,5	552	711	810
Minimalwert	8,146	11,102	13,147	47,546	48,889	50,142	460	638	855	6,3	7,5	8,9	752	996	1232
Mittelwert	11,036	12,992	23,351	49,852	50,236	56,153	1245	1503	1715	8,4	8,4	10,5	1170	1790	2400
Maximalwert	-3,172	9,604	10,519	41,895	46,928	47,097	20	325	435	4,0	5,3	7,5	552	711	810

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 Potentialen 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 Längengrad  $-3,172^\circ$  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  $10,5^\circ$  C und die jährlichen Niederschläge 552 bis 2.400 mm. Die Vegetationszeit, definiert als die Anzahl von Tagen mit Mitteltemperaturen über  $10^\circ$ C, ist 151 bis 213 Tage lang.

*Tabelle 2 Ertragskundliche Charakteristika der Versuchs- und Probeflächen der Untersuchung gesondert nach Baumartenkombinationen und insgesamt. Neben dem mittleren Alter sind angegeben die 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,  $V$ .*

Artenkombinationen und insgesamt	Anzahl n	mittl. Alter Jahre	Bonität $h_{A80}$ m	$h_g$ m	$d_g$ cm	$N$ Bäume $ha^{-1}$	$G$ $m^2 ha^{-1}$	$V$ $m^3 ha^{-1}$
Artenkombinationen								
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
insgesamt	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

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, Rohrbrunn 620, Rohrmoos 107, Sachsenried 607, Selb 1013, Schongau 814, Spessart 1003, Starnberg 91, Traunstein 1025, Waldbrunn 105, 106, Waldleinigen 1001, Waldsassen 1024, Weiden 1014, Wieda 114, Wolfratshausen 97, Würzburg, 1002 und Zwiesel 111, 134, 135.

Die Flächengrößen liegen zwischen 0,05 ha and 0,6 ha, mit tendenziell eher geringeren Flächen bei den temporären Versuchsflächen und größeren bei den langfristigen 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; 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 Spannweite der Baumzahlen (62- 5.000 N ha<sup>-1</sup>), Bestandesgrundflächen (7,7-123,5 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>) und Vorräte (35-2.071 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>) resultiert ebenfalls aus dem breiten Rahmen von Bestandesaltern und Standortbedingungen.

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

## 2.2 Methoden

### *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  $SDIMAX_1, SDIMAX_2$  wurden 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 Standraumbedarf zu kombinieren ( $SDI_{1,2} = SDI_{1,(2)} + SDI_{(1),2} \times e_{2 \Rightarrow 1}$ ). Basierend auf dem standardisierten SDI, z.B. für die Art 1 ( $SDI_{1,2} = SDI_{1,(2)} + SDI_{(1),2} \times e_{2 \Rightarrow 1}$ ) und dem Anteil der Arten 1 und 2 an dieser standardisierten Dichte ( $SDI_{1,(2)} / SDI_{1,2}$  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).

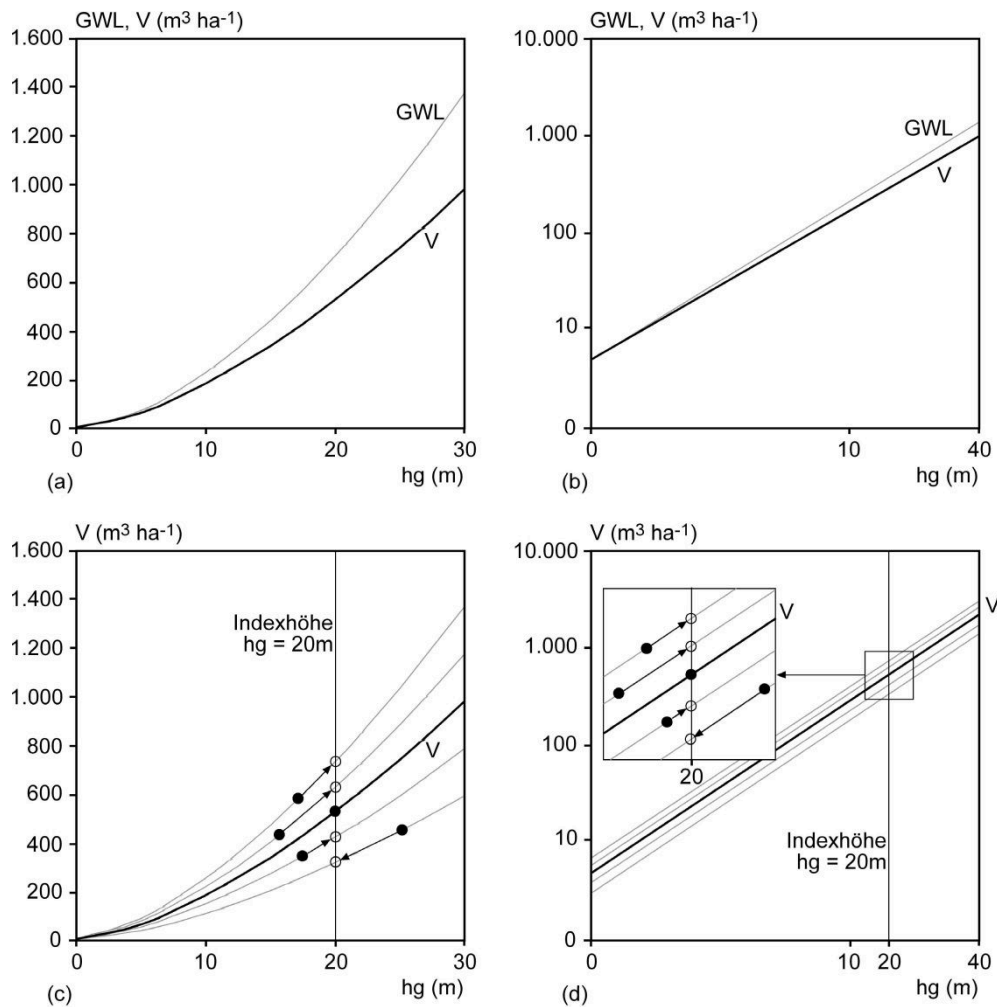


Abbildung 1 Beziehung zwischen Vorrat und Bestandeshöhe und Gesamtwuchsleistung und Bestandeshöhe in linearer (a und c) und doppel-logarithmischer (b und d) Darstellung und die Ableitung der Indizes  $V_{hg20}$  und  $GWL_{hg20}$  für die Charakterisierung des Mischungseffektes auf die Beziehung von EICHORN (1902) und das allgemeine Ertragsniveau nach ASSMANN (1961).

(a) Abhängigkeit des Vorrates,  $V$ , von der Mittelhöhe,  $h_g$ , spiegelt die Eichhorn'sche Beziehung (EICHORN 1902) wider und die Abhängigkeit der Gesamtwuchsleistung,  $GWL$ , von der Mittelhöhe zeigt das allgemeine Ertragsniveau (ASSMANN 1961) an.

(b) Eichhorn'sche Beziehung und allgemeines Ertragsniveau in doppel-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 doppel-logarithmischer Darstellung; im Nebenbild wird gezeigt, wie mit dem Ansatz  $V_{hg20} = V \times (20/h_g)^{\alpha_{V,h_g}}$  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 ASSMANN (1961) wird analog zu  $V_{hg20}$  abgeleitet. Weitere Erläuterungen im Text.

#### 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), das allgemeine Ertragsniveau ( $GWL=f(h)$ ) beschreibt ihn für die Gesamtwuchsleistung (ASSMANN 1961).

Für die vorliegende Untersuchung leiteten wir verallgemeinerte, baumartenspezifische Exponenten ( $\alpha_{V,h_g}$  bzw.  $\alpha_{GWL,h_g}$ ) 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 eine Standardhöhe von 20 m projiziert werden. Analog erfolgte das für gemessene Gesamtwuchsleistungen ( $GWL_{hg20} = GWL \times (20/h_g)^{\alpha_{GWL,h_g}}$ ). 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  $h_g$  ( $V \propto h_g^{\alpha_{V,h_g}}$  bzw.  $GWL \propto h_g^{\alpha_{GWL,h_g}}$ ). In der doppel-logarithmischer Darstellung auf Abbildung 1b ergeben sich daraus Geraden mit den Steigungen  $\alpha_{V,h_g}$  bzw.  $\alpha_{GWL,h_g}$ . Abbildung 1c und d zeigen am Beispiel des Bestandesvorrates im linearen bzw. doppel-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  $\alpha_{V,h_g}$  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, Gruppenunterschiede in der Höhenlage der Eichhorn'schen Beziehung und im allgemeinen Ertragsniveau geprüft werden.

Basis für diesen Ansatz war die regressionsanalytische Ableitung der allometrischen Exponenten  $\alpha_{V,h_g}$  und  $\alpha_{GWL,h_g}$  für die Hauptbaumarten aus dem Ertragstafelkompendium von SCHÖBER (1975). Das erbrachte für die Berechnung von  $V_{h20}$  auf der Basis mäßig durchforsteter Bestände der Bonitäten I., II. und III. 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) die benötigten allometrische Exponenten. Analog ergaben sich für die Ableitung von  $GWL_{h20}$  für Fichte ( $\alpha_{GWL,h_g} = 2,199$ ), Kiefer (1,998) Buche (2,335), Eiche (2,677), Douglasie (1,827) und Lärche (1,882).

#### *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. 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 benachbarter 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.

Die Spalten Gruppenmittelwerte (mixed bzw. mono) geben für Misch- bzw. Reinbestände die mittleren Charakteristika an. Die Quotienten (mixed/mono) repräsentieren den Mittelwert der paarweisen Divisi-

on der Charakteristika von Misch-/Reinbeständen, stimmen also nicht unbedingt mit dem Quotienten aus den Gruppenmitteln überein.

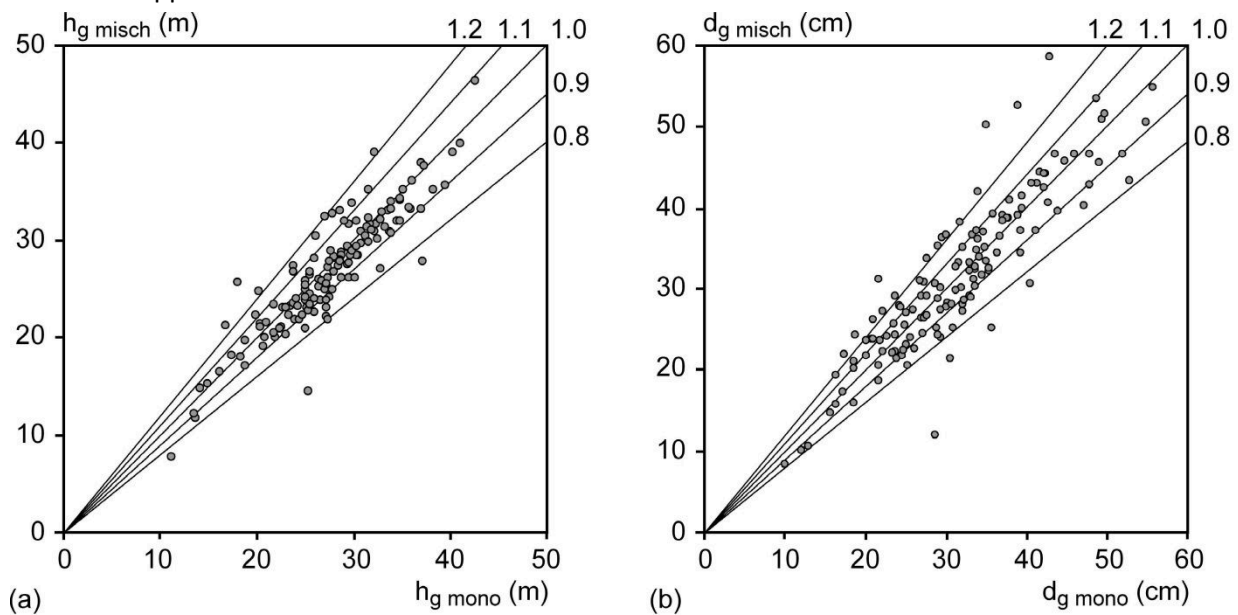


Abbildung 2 Mittelhöhe (a) und Mitteldurchmesser (b) der Bäume im Mischbestand unterscheiden sich im Mittel kaum von den entsprechenden Mittelwerten der benachbarten Reinbestände. Punkte nahe der Winkelhalbierenden (1,0-Linie) zeigen an, dass die Mittelwerte im Mischbestand ähnlich sind wie die gewichteten Mittelwerte in den benachbarten Reinbeständen.

Tabelle 3 Baumartenmischung kann die Dichte und den Vorrat gegenüber Mischbeständen signifikant erhöhen, lässt die Einzelbaumdimensionen aber eher unverändert. Gezeigt sind Bestandescharakteristika der Mischbestände (Gruppenmittelwerte mixed) im Vergleich zum gewichteten Mittel der Reinbestände (mono) sowie die Quotienten mixed/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.

Variablen	Einheit	Stichprobe n	Gruppenmittelwerte ( $\pm$ SE) misch	mono	Quotient misch/mono ( $\pm$ SE)
mittlere Stammdimensionen					
$h_g$	m	141	29,25 ( $\pm$ 0,52)	29,85 ( $\pm$ 0,50)	0,98* ( $\pm$ 0,008)
$d_g$	cm	141	32,10 ( $\pm$ 0,88)	32,18 ( $\pm$ 0,85)	1,01 ( $\pm$ 0,100)
$v_g$	m <sup>3</sup>	141	1,36 ( $\pm$ 0,09)	1,37 ( $\pm$ 0,09)	1,05 ( $\pm$ 0,033)
Dichte und Vorrat					
N	Bäume ha <sup>-1</sup>	141	752 ( $\pm$ 54)	635 ( $\pm$ 40)	1,22*** ( $\pm$ 0,040)
G	m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup>	141	42,12 ( $\pm$ 1,43)	38,09 ( $\pm$ 1,12)	1,12** ( $\pm$ 0,024)
SDI	Bäume ha <sup>-1</sup>	141	793 ( $\pm$ 27)	717 ( $\pm$ 20)	1,16*** ( $\pm$ 0,025)
V	m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	141	561,38 ( $\pm$ 21,66)	525,59 ( $\pm$ 19,52)	1,08** ( $\pm$ 0,026)
Gesamtwuchsleistung					
GWL	m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	79	979,85 ( $\pm$ 42,50)	883,85 ( $\pm$ 37,61)	1,12** ( $\pm$ 0,027)
Eichhorn'sche Beziehung und Ertragsniveau					
$V_{h20}$	m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	141	325,57 ( $\pm$ 13,06)	282,06 ( $\pm$ 8,40)	1,16** ( $\pm$ 0,028)
$GWL_{h20}$	m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	79	509,42 ( $\pm$ 21,59)	419,78 ( $\pm$ 13,13)	1,21*** ( $\pm$ 0,030)

Für fünf ausgewählte, besonders weit verbreitete Mischungen, erfolgte der Vergleich zwischen Misch- und Reinbestand auch auf der Ebene der Artenkombination und der Arten. Tabelle 4 zeigt folgende Interaktionen zwischen den Arten 1 und 2, die für alle einbezogenen Artenkombinationen charakteristisch sind. 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, 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 keine signifikanten Differenzen

zwischen Misch- und Reinbestand bestehen. Eine Ausnahme bildet hier der Eichen/Buchen Mischbestand, der hinter dem Reinbestand in der Höhe und im Durchmesser um 5 % zurückbleibt.

Tabelle 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.

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

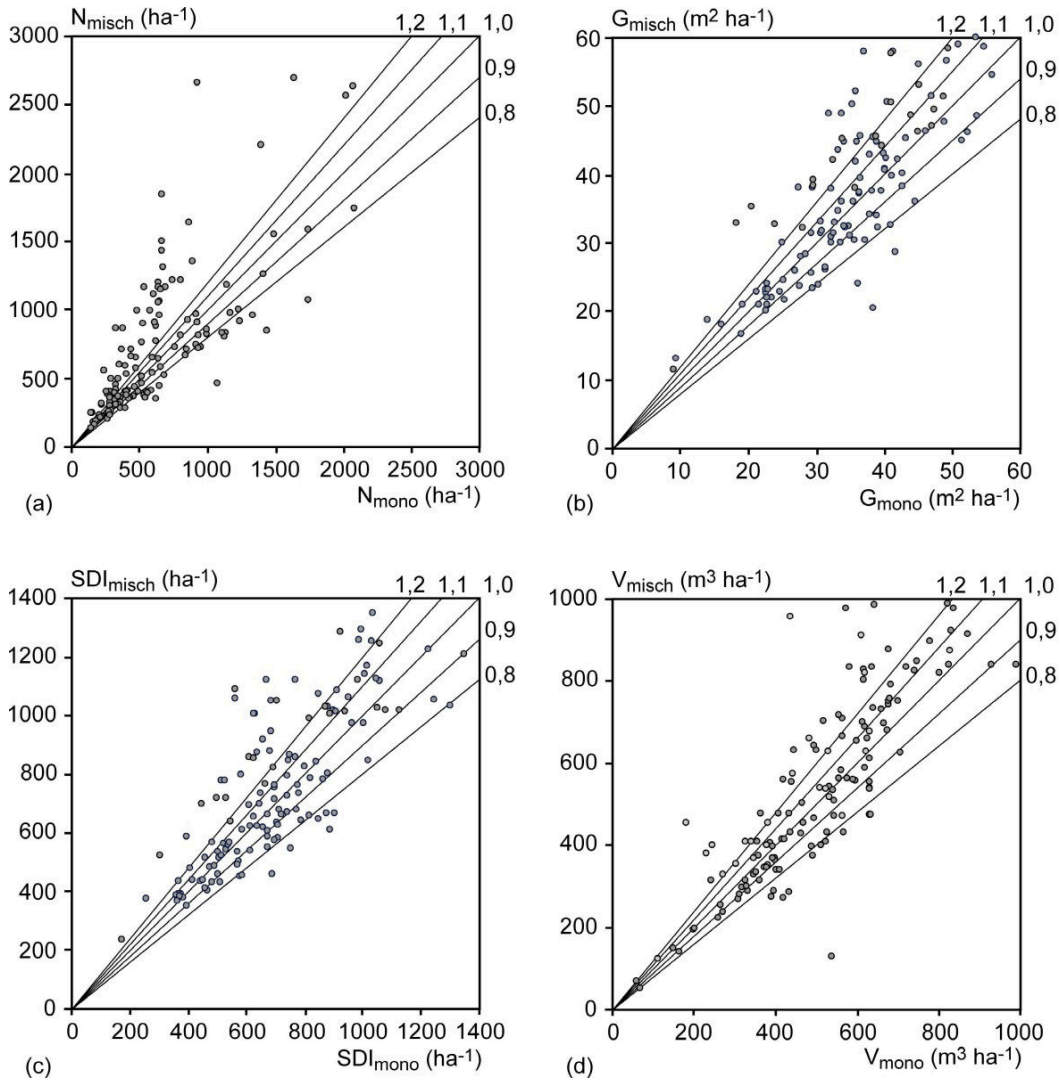


Abbildung 3 Baumzahl (a), Bestandesgrundfläche (b), Bestandesdichteindex (c) und stehender Vorrat (d) der Mischbestände liegen häufig deutlich über den entsprechenden Dichte- und Vorratswerten benachbarter Reinbestände. Punkte nahe der Winkelhalbierenden (1,0-Linie) zeigen an, dass die Dichte- und Vorratswerte im Mischbestand ähnlich sind wie das gewichtete Mittel der benachbarten Reinbestände.

### 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).

### 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).

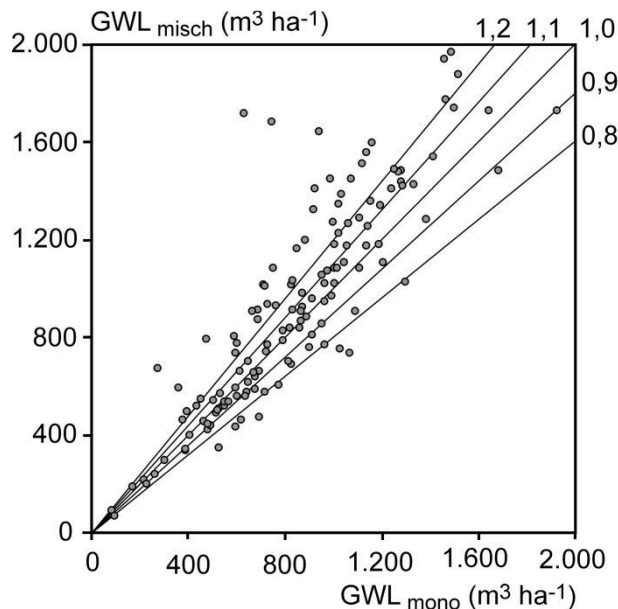


Abbildung 4 Die Gesamtwuchsleistung in Mischbeständen übertrifft im Durchschnitt das Niveau benachbarter Reinbestände. Punkte nahe der Winkelhalbierenden (1,0-Linie) zeigen an, dass die Gesamtwuchsleistungen im Misch- und Reinbestand ähnlich sind. Punkte oberhalb der Winkelhalbierenden zeigen eine Überlegenheit der Mischbestände an.

### 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  $V = e^{1,13} \times h^{1,526} \times e^{mixmono}$ , wobei für Mischbestände gilt  $mixmono=1$ , so dass  $e^{0,086 \times mixmono} = 1,09$ . 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  $\alpha_{V,h_g} = 1,526$ .



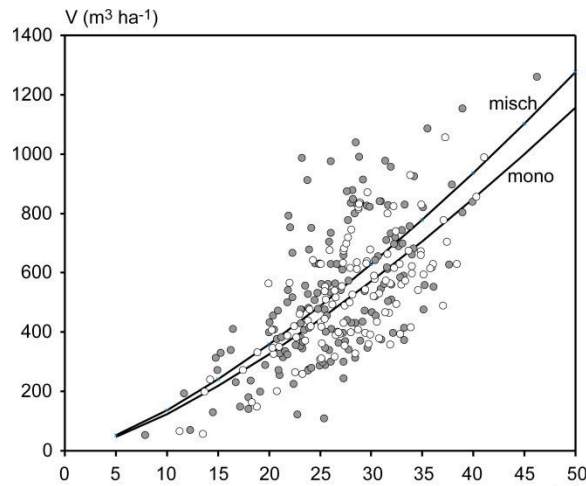


Abbildung 5 Darstellung der Bestandesvorräte,  $V$ , über der Mittelhöhe,  $h_g$ , in den Reinbeständen (leere Symbole) im Vergleich zu benachbarten Mischbeständen (ausgefüllte Symbole). Den Regressionslinien liegt das Modell  $\ln(V) = 1,13(\pm 0,282) + 1,526(\pm 0,085) \times \ln(h) + 0,086(\pm 0,041) \times \text{mischmono}$  zugrunde, mit  $\text{mischmono}=0$  für Reinbestände und  $\text{mischmono}=1$  für Mischbestände ( $n=282$ ,  $R^2=0,536$ ,  $p>0,001$  \*\*\*).

Tabelle 5 Vorrat bei Mittelhöhe 20 m,  $V_{hg20}$ , und Gesamtwuchsleistung bei Mittelhöhe 20 m,  $GWL_{hg20}$ , im Mischbestand in Relation zum Reinbestand, gesondert für fünf Artenkombinationen. Liegen die Quotienten zwischen gemischt und mono über/unter 1,00, so zeigen sie eine Über-/Unterlegenheit der Eichhorn'schen Beziehung bzw. des allgemeinen Ertragsniveaus in Mischbeständen gegenüber benachbarten Reinbeständen an. Fett gedruckte Quotienten zeigen signifikante ( $p<0,05$ ) Unterschiede zwischen Misch- und Reinbeständen an.

Variablen	Artenkombination	n	Art 1 misch/mono (± SE)	Art 2 misch/mono (± SE)	Gesamtbestand misch/mono (± SE)
$V_{h20}$ ( $m^3 ha^{-1}$ )	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)
$GWL_{h20}$ ( $m^3 ha^{-1}$ )	Fichte/Kiefer	5	2,10 (±0,29)	1,43 (±0,16)	1,31 (±0,04)
	Fichte/Lärche	6	1,26 (±0,36)	1,37 (±0,18)	1,55 (±0,40)
	Fichte/Buche	32	1,01 (±0,06)	1,11 (±0,05)	1,07 (±0,03)
	Kiefer/Buche	9	1,86 (±0,31)	1,48 (±0,11)	1,43 (±0,08)
	Eiche/Buche	18	1,07 (±0,03)	1,11 (±0,07)	1,17 (±0,05)

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  $V_{h20}$  und  $GWL_{h20}$  eine Überlegenheit von 16 bzw. 21 % an.

Tabelle 5 zeigt auch für alle fünf ausgewählten Mischungen deutliche Anhebungen der Eichhorn'schen Beziehung ( $V_{h20}$ ) und des allgemeinen Ertragsniveaus ( $GWL_{h20}$ ). 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  $V-h_g$ - und  $GWL-h_g$ -Relation als die weniger komplementären Artenkombinationen (z.B. Fichte/Tanne, Buche/Douglasie).

## 4 Diskussion

### *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, so dass 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 Steigerung der Höhenwuchsleistung und Bonitätserhöhung festgestellt werden, wie sie nach Düngungsmaßnahmen festzustellen ist (FOERSTER 1990, WITTICH 1954). Trotz etwa gleich bleibender 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.

### *Mischung als wachstumssteigernde waldbauliche Maßnahme*

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. Die Voraussetzung für die Ausschöpfung des Potentials von Mischbeständen im Sinne einer Erhöhung 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.

### *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 ( $\text{Vorrat}_{\text{geschätzt}} = \text{Vorrat}_{\text{ET}} \times \text{BG}_G$ ). Der grundflächenbezogene Bestockungsgrad ( $\text{BG}_G$ ) lässt sich besonders einfach über Winkelzählproben in dem betreffenden Bestand ermitteln ( $\text{BG}_G = G_{\text{WZP}} / G_{\text{ET}}$ ), wobei  $G_{\text{WZP}}$  und  $G_{\text{ET}}$  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 wirklichkeitsnähere Dichte mit dem gemessenen Bestockungsgrad ( $\text{BG}_G = G_{\text{WZP}} / G_{\text{ET}} > 1.0$ ) erhöht werden.

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 Ausleseebäumen als in Reinbeständen.

### *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 Mischungseffekte 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 Prozess (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 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 Rein- und Mischbestände auf Kiefer und Buche stammen.

## 6 Literatur

- Assmann E (1961) Waldertragskunde. Organische Produktion, Struktur, Zuwachs und Ertrag von Waldbeständen. BLV Verlagsgesellschaft, München, Bonn, Wien, 490 p
- EICHORN F (1902) Ertragstabellen für die Weißtanne. Verlag Julius Springer, Berlin, 81 p + annex
- FOERSTER W (1990) Zusammenfassende ertragskundliche Auswertung der Kiefern-Düngungsversuchsflächen in Bayern. Forstl Forschungsber München 105, pp 1-328 p
- KRAMER, H., AKÇA, A. (1995) Leitfaden zur Waldmeßlehre. JD Sauerländer's Verlag, Frankfurt am Main, 266 S.
- PRETZSCH, H. (2013) Facilitation and competition in mixed-species forests analysed along an ecological gradient. *Nova Acta Leopoldina* 114 (391): 159-174
- PRETZSCH, H. (2014) Canopy space filling and tree crown morphology in mixed-species stands compared with monocultures. *Forest Ecology and Management*, 327: 251-264.
- PRETZSCH, H., BIBER, P. (2016) Tree species mixing can increase maximum stand density. *Canadian Journal of Forest Research*, DOI: 10.1139/cjfr-2015-0413
- PRETZSCH, H., FORRESTER, D. I., RÖTZER, T. (2015). Representation of species mixing in forest growth models. A review and perspective. *Ecological Modelling*, 313, 276-292.
- PRETZSCH, H., RAIS, A. (2016) Wood quality in complex forests versus even-aged monocultures. Review and perspectives, *Wood science and technology*, DOI: 10.1007/s00226-016-0827-z
- REINEKE, L. H. 1933. Perfecting a stand-density index for even-aged forests. *J Agr Res* 46: 627-638.
- RÍO M., PRETZSCH H., ALBERDI I., BIELAK K., BRAVO, F., BRUNNER A., CONDÉS S., DUCEY M.J., FONSECA T., VON LÜPKE N., PACH M., PERIC S., PEROT T., SOUIDI Z., SPATHELF P., STERBA H., TIJARDOVIC M., TOMÉ M., VALLET P., BRAVO-OVIEDO A. (2016) Characterization of the structure, dynamics, and productivity of mixed-species stands: Review and perspectives. *European Journal of Forest Research, Eur J Forest Res*, 135:23–49, DOI 10.1007/s10342-015-0927-6
- SCHÖBER R (1975) Ertragstabellen wichtiger Baumarten. JD Sauerländer's Verlag, Frankfurt am Main
- STERBA, H., DEL RIO, M., BRUNNER, A., CONDES, S. (2014). Effect of species proportion definition on the evaluation of growth in pure vs. mixed stands. *Forest Systems*, 23(3), 547-559.
- WITTICH, W. (1954) Die Melioration streugennutzter Böden, *Forstw. Cbl.* 73: 211-232