

# Struktur und Wachstum von Kiefer und Eiche im Rein- und Mischbestand. Analyse entlang eines ökologischen Gradienten durch Europa

Pretzsch H<sup>1</sup>, del Río M, Steckel M, Heym M, Bielak K, Bravo F, Brazaitis G, Coll L, Collet C, Jansons A, Löff M, Nord-Larson Th, Pach M, Ponette Q, Sitko R, Svoboda M, Vallet P, Vospernik S, Wolff B

<sup>1</sup>Lehrstuhl f. Waldwachstumskunde, TU München

## 1 Einleitung

Auswertung von Waldinventurdaten weltweit zeigen überwiegend eine asymptotische Zunahme der Bestandesproduktivität mit Zunahme der Artenzahl von Wäldern (Liang et al. 2016). Ausnahmen bilden u. a. hochproduktive Plantagen aus Douglasie oder Eukalyptus, die von Mischbeständen in der Bestandesproduktivität kaum übertroffen werden können. Auch auf langfristigen Versuchsflächen zeigen sich häufig Mehrzuwächse von Misch- gegenüber Reinbeständen. Mischbestände können in der Produktivität das gewichtete Mittel benachbarter Reinbestände um 10% bis 30% überschreiten (Pretzsch et al. 2009, 2017). Artenkombinationen mit komplementärer Lichtnutzung, wie z. B. Lärche und Buche oder Kiefer und Buche, schneiden oft wesentlich günstiger ab als weniger komplementäre Arten, wie z. B. Fichte und Tanne. Übergreifende Analysen zum Zusammenhang zwischen den Standortbedingungen und Mischungseffekten erbrachten besonders häufig einen Anstieg der Mehrzuwächse mit zunehmender Wasserversorgung (Jactel et al. 2018). Offenbar gründen Mehrzuwächse besonders häufig auf einer komplementären und verbesserten Lichtnutzung. Mehrzuwächse in Mischbeständen gegenüber Reinbeständen können dort, wo keine Limitierung durch Wasser oder mineralische Nährstoffe besteht, durch räumlich und zeitlich komplementäre Lichtnutzung und morphologische Komplementarität der Kronen entstehen (Abbildung 1).

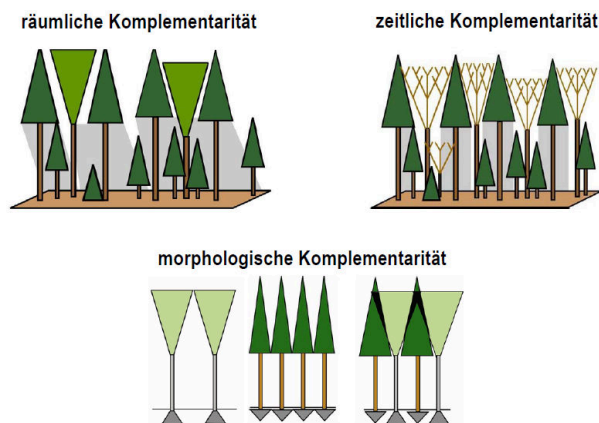


Abbildung 1: Räumliche Komplementarität kann durch Schichtung von schattentoleranten Baumarten unter Lichtbaumarten entstehen. Zeitliche Komplementarität ergibt sich z.B. durch die Bestrahlung unterständiger Bäume im Frühjahr, wenn oberständige Laubbäume noch unbelaubt sind. Morphologische Komplementarität entsteht durch unterschiedliche Kronenformen und erlaubt eine dichtere Packung des Kronenraumes.

Komplementäre Nutzung von Licht und Kronenraum ist insbesondere auf Standorten mit ausreichender Wasser- und Nährstoffversorgung möglich (Forrester 2013). Auf ärmeren Standorten können die Vorteile einer komplementären Lichtökologie weniger gut ausgeschöpft werden, weil dort eben Wasser oder mineralische Nährelemente und weniger das Licht den Zuwachs limitieren. Die Meta-Analyse von Jactel et al. (2018) zeigt weiter, dass auch der überschreitende Mehrzuwachs mit zunehmender Wasserversorgung ansteigt, und dass in Mischbeständen keine signifikanten Minderzuwächse gegenüber der bestwüchsigsten Art in den benachbarten Reinbeständen festzustellen ist.

Die Zusammenhänge zwischen Standortbedingungen und Mehr- bzw. Minderzuwächsen können konzeptionell folgendermaßen generalisiert werden (Abbildung 2). Artenkombinationen mit einer Verbesserung der Lichtausnutzung, also Minderung der Lichtlimitierung des Zuwachses, können diese Eigenschaft besonders gut auf reichen Standorten ausschöpfen, denn dort sind genügend Wasser und Nähr-

stoffe vorhanden und damit die Voraussetzungen für eine verbesserte Lichtausnutzung gegeben. Artenkombinationen mit komplementärer Ausschöpfung der Bodenressourcen Wasser und Nährstoffe können besonders wirkungsvoll zur Zuwachssteigerung auf solchen Standorten beitragen, auf denen diese Ressourcen limitiert sind, und wo deshalb der Grenznutzen einer verbesserten Erschließung von Wasser und Nährstoffen besonders hoch ist.

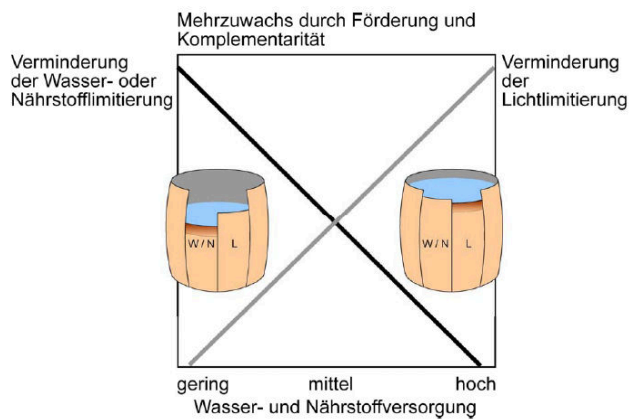


Abbildung 2: Positive Mischungseffekte und Mehrzuwächse entstehen vor allem dann, wenn durch eine Baumartenmischung der zuwachslimitierende Faktor vermindert wird. Auf Standorten mit geringer Wasser- und Nährstoffversorgung können vor allem solche Baumartenmischungen, die das Wasser aus größeren Tiefen erschließen, eine Verbesserung des Humuszustandes verursachen oder Luftstickstoff binden, zu Mehrzuwächsen führen. Diese Wirkung nimmt mit Verbesserung der Wasser- und Nährstoffversorgung ab. Demgegenüber ist eine verbesserte Lichtnutzung nur dann möglich, wenn eine ausreichende Wasser- und Nährstoffversorgung gegeben ist. Deshalb nehmen Mehrzuwächse, die auf einer verbesserten Lichtnutzung beruhen, häufig mit zunehmender Wasser- und Nährstoffversorgung zu (nach Pretzsch et al. 2017).

Um die verschiedenartigen Reaktionsmuster bei unterschiedlichen Artenkombinationen auf unterschiedlichen Standorten besser zu verstehen, sollten möglichst viele Artenkombinationen (funktionelle Gruppe) entlang ökologischer Gradienten (auf Standorten mit unterschiedlicher Wasser- und Nährstoffversorgung) untersucht werden. Im Mittelpunkt dieser Untersuchung steht deshalb die bisher kaum erforschte Kombination aus Kiefer und Eiche. Diese Artenkombination ist schon in der Gegenwart mit  $1,3 \times 10^6$  ha eine wichtige Mischung (Brus et al. 2011), sie dürfte aber in Zukunft wegen ihrer Trockenheitsresistenz angesichts des Klimawandels weiter an Bedeutung zunehmen.

Im Mittelpunkt der folgenden Untersuchung stehen die Fragen (i) Wie schneiden Kiefer und Eiche in den Bestandesmittelwerten und –summenwerten im Mischbestand gegenüber benachbarten Reinbeständen ab, (ii) Wie produktiv sind Mischbestände aus Kiefer und Eiche im Vergleich zu benachbarten Reinbeständen, und wie tragen Kiefer und Eiche zu eventuellen Mehr- oder Minderzuwächsen bei, (iii) Wie verändern sich die Produktivität des Mischbestandes insgesamt und die Beiträge der beiden Baumarten entlang eines Produktivitätsgradienten von trockenen, nährstoffarmen bis feuchten, nährstoffreichen Standorten?

Die Untersuchung basiert auf gegenwärtig 16 Triplets aus Rein- und Mischbeständen aus Kiefer und Eiche. Im Rahmen des EU Projektes REFORM (# 2816ERA02S) werden letztendlich 36 Triplets für die Auswertung verfügbar sein, so dass die hier vorgestellte Auswertung und Berichterstattung zunächst vorläufigen Charakter hat. Erste Ausweitungen der Auswertung auf einen größeren Datensatz haben aber gezeigt, dass die hier berichteten Mischungsreaktionen auf der Ebene von Baum, Mittelstämmen und Bestand, sich in den Tendenzen kaum stärker verändern werden.

## 2 Material und Methoden

### Design der Serie von Triplets

Um verallgemeinerbare Aussagen über die Produktivität von Kiefer und Eiche im Rein- und Mischbestand zu erhalten, werden insgesamt 36 Triplets, jeweils bestehend aus Rein- und Mischbeständen aus Kiefer und Eiche angelegt. Die Anlage erfolgte im Rahmen des EU-Projektes REFORM (#2816ERA02S) und überspannt die folgenden 16 Länder: Belgien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, England, Estland, Frankreich, Lettland, Litauen, Niederlande, Österreich, Polen, Slowakei, Schweden, Spanien, Tschechien. Die Höhenlage variiert zwischen 0 und 785 m über NN, die Jahresmitteltemperatur beträgt  $6,6^\circ$  bis  $11,1^\circ$  Celsius und der Jahresniederschlag 454 mm bis 846 mm pro Jahr.

In die vorliegende Untersuchung wurden die folgenden 16 von insgesamt 36 geplanten Triplets einbezogen: aus Deutschland (2 x GER\_1, GER\_2, 2 x GER\_3 und GER\_4), aus Tschechien (CZE\_1 und CZE\_2), aus der Slowakei (SLO\_1 und SLO\_2), Dänemark (DEN\_1), Litauen (LIT\_1), Frankreich (FRA\_1), Polen (POL\_1 und POL\_2) und Spanien (SP\_1). An den Standorten GER\_1 und GER\_3 wurden jeweils zwei Triplets angelegt.

Die zu einem Triplet gehörigen Rein- und Mischbestände sind mehr oder weniger gleichaltrig, 60- bis 80jährig, voll bestockt und sehr ähnlich in den Standortbedingungen. Falls überhaupt behandelt, liegen die letzten Eingriffe lange zurück, so dass alle Parzellen maximale Bestandesdichte repräsentieren. Ein geeigneter Anzeiger für die Annäherung an die maximale Dichte und ein Wachstum entlang der self-thinning Linie, ist das gehäufte Vorkommen von Bäumen, die aufgrund von Konkurrenz absterben.

Die Parzellen haben eine Flächengröße von 0,05 und 0,5 ha. Auf ihnen erfolgte eine Vollaufnahme der Brusthöhendurchmesser und eine stichprobenweise Messung von Höhen und Kronenansatzhöhen, so dass die Bestandesvorräte ermittelt werden können. Für weitergehende Analysen wurden auf einem Teil der Triplets auch Stammfußkoordinaten eingemessen, Kronen abgelotet, Lichtmessungen durchgeführt und Strukturhebungen mit einem terrestrischen Laser-Scanner vorgenommen. Weiter wurden Probenahmen des Bodens und der Nährelemente in Nadeln und Laub ausgeführt.

An einer Stichprobe von mindestens 30 Bäumen pro Art erfolgten in den Rein- und Mischbeständen Zuwachsbohrungen. Indem bis zum Kern gebohrt wurde, liefern die Bohrkernpräparate präzise Altersangaben, aber auch Einblick in die Zuwachsentwicklung in den zurückliegenden Jahrzehnten. Zur retrospektiven Berechnung des Bestandeszuwachses erfolgt zusätzlich eine Stockinventur, bei der evtl. vorhandene Stöcke in 5-Jahres-Stufen eingeordnet wurden.

#### *Auswertung der Inventur und Zuwachsdaten*

Basierend auf den Bestandesinventuren und Bohrkernanalysen erfolgte die Rekonstruktion des zurückliegenden Bestandeszuwachses in folgenden Schritten (Heym et al. 2017):

- (1) Zuwachsbohrung von 30 bis 50 Bäumen pro Plot, Jahrringanalyse und Synchronisation der Zeitreihen.
- (2) Berechnung jährlicher Regressionen zum Zusammenhang zwischen Durchmesserzuwachs und Enddurchmesser der Bäume. Diese Regressionen dienen der Berechnung der Zuwächse jener Bäume, von denen der Zuwachs nicht aus Bohrkernanalysen bekannt ist.
- (3) Anwendung von Rindenzuwachs-Funktionen, um neben dem Zuwachs an Xylem retrospektiv auch die Entwicklung der Rinde zu berücksichtigen.
- (4) Anwendung von Altershöhenkurven zur Rückrechnung der Mittelhöhe vor  $i=1$ ..... bis  $n$  Jahren.
- (5) Anwendung von Einheitshöhenkurven, in die der Mitteldurchmesser, die Mittelhöhe und das Bestandesalter einfließen, so dass individuelle Höhen in Abhängigkeit vom Baumdurchmesser abgegriffen werden können.
- (6) Anwendung von Derbholzformzahl-Funktionen für die einzelbaumweise Berechnung des Stammvolumens.
- (7) Berechnung des Volumenzuwachses aller Bäume, retrospektiv für 40 Jahre, in Abhängigkeit von ihrem jeweiligen Durchmesser, ihrer Höhe und aktuellen Formzahl.
- (8) Berechnung des Bestandeszuwachses durch Summation der Volumenzuwächse aller Einzelbäume. Für die Berechnung der Mehr- und Minderzuwächse in Misch- gegenüber Reinbeständen, wurde der mittlere periodische Zuwachs an Grundfläche und Stammvolumen des Bestandes über die letzten 5 Jahre verwendet, also in der Periode 2013 bis 2017.

### Vergleich der Bestandesmittel- und Bestandessummenwerte im Mischbestand mit den benachbarten Reinbeständen

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 Triplets  $\pm$  Standardfehler dient dann der Prüfung, ob die Mittelwerte im Mischbestand größer sind als jene im Reinbestand. Das trifft dann zu, wenn die Konfidenzintervalle den Wert von 1,0 nicht mit einschließen. Quotienten mit ihren Konfidenzintervallen ( $\pm 2 \times SE$ ,  $\pm 3 \times SE$ ,  $\pm 4 \times SE$ ) lassen erkennen, ob signifikante Unterschiede (auf dem Niveau  $p \leq 0,05^*$ ,  $p \leq 0,01^{**}$  oder sogar auf dem Niveau  $p \leq 0,001^{***}$ ) bestehen. Liegt das Konfidenzintervall über 1,0, so ist der Mischbestand dem Reinbestand in der entsprechenden Dimensionsgröße überlegen, liegt das Konfidenzintervall unter 1,0, so ist die Größenentwicklung im Mischbestand langsamer als im Reinbestand.

Für den Vergleich der Summenwerte (stehender Vorrat, Bestandesdichte, mittlerer periodischer Zuwachs an Bestandesgrundfläche und Bestandesvolumen), wird der gemessene Wert des Mischbestandes in Relation gesetzt zum gewichteten Mittel der benachbarten Reinbestände, wobei die Gewichtung mit den Mischungsanteilen  $m_1$  und  $m_2$  erfolgt. Im Falle des Bestandesvolumens ergibt sich beispielsweise  $\hat{V}_{1,2} = V_1 \times m_1 + V_2 \times m_2$  für das gewichtete Mittel; es bildet den erwarteten Referenzwert und wird dem entsprechenden Beobachtungswert des benachbarten Mischbestandes gegenübergestellt. Für den Vergleich auf Ebene der Baumarten wird 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 ergibt 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 des Mehr- oder Minderzuwachses erfolgt dieser Vergleich anhand des mittleren periodischen Zuwachses an Bestandesgrundfläche und an Bestandesvolumen, also auf der Basis der Produktivität, wie folgt. Die erwartete Produktivität des Mischbestandes wird als Referenz verwendet, und der Quotient aus gemessener Produktivität und erwarteter Produktivität resultiert in dem Wert für Overyielding ( $RP_{1,2} = p_{1,2}/\hat{p}_{1,2}$ , wobei  $\hat{p}_{1,2} = m_1 \times p_1 + m_2 \times p_2$ ). Der analoge Vergleich auf der Artenebene erfolgt nach Hochskalierung auf Hektarwerte durch Verwendung der Mischungsanteile  $m_1$  und  $m_2$  ( $RP_{1,(2)} = pp_{1,(2)}/m_1/p_1$  und  $RP_{(1),2} = pp_{(1),2}/m_2/p_2$ , wobei  $p_{1,2} = pp_{1,(2)} + pp_{(1),2}$ )

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  $e_2$  können dazu verwendet werden, die SDI-Werte von zwei Arten mit unterschiedlichem Standraumbedarf zu kombinieren ( $SDI_{1,2} = SDI_{1,(2)} + SDI_{(1),2} \times e_{2 \rightarrow 1}$ ). Hierdurch wird der Bestandesdichteindex im Mischbestand vergleichbar mit dem Index im Reinbestand. Auf diese Weise kann eine eventuelle Über- bzw. Unterdichte im Mischbestand gegenüber benachbarten Reinbeständen aufgedeckt werden. So wird der Stand-Density-Index des Mischbestandes z. B. auf die Art 1 normiert und mit der Bestandesdichte des Reinbestandes der Art 1 vergleichbar ( $SDI_{1,2} = SDI_{1,(2)} + SDI_{(1),2} \times e_{2 \rightarrow 1}$ ,  $RD_{1,2} = SDI_{1,2}/SDI_1$ ).

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.  $(SDI_{(1),2} \times e_{2 \rightarrow 1})/SDI_{1,2}$ ), können die Mischungsanteile der Arten 1 und 2

$$m_1 = \text{SDI}_{1,(2)} / (\text{SDI}_{1,(2)} + \text{SDI}_{(1),2} \times \text{SDIMAX}_1 / \text{SDIMAX}_2)$$

$$m_2 = (\text{SDI}_{(1),2} \times \text{SDIMAX}_1 / \text{SDIMAX}_2) / (\text{SDI}_{1,(2)} + \text{SDI}_{(1),2} \times \text{SDIMAX}_1 / \text{SDIMAX}_2)$$

berechnet werden. Auf diese Weise fließt der unterschiedliche Standraumbedarf von Kiefer und Eiche in die Berechnung der Mischungsanteile  $m_1$  und  $m_2$  mit ein (Sterba et al. 2014).

### Indikatoren für die Standortbedingungen

Zur Analyse vermuteter Abhängigkeiten des Over- und Underyieldings von den Standortbedingungen wurden die Höhen der Bäume mit den quadratischen Mitteldurchmessern von Kiefer bzw. Eiche im Reinbestand im Alter 100 als unspezifische Weiserwert für die Standortbedingungen verwendet. Weil die meisten der Triplets 60 bis 80 Jahre alt sind, wurde die Höhe im Alter 100 als Referenzgröße festgelegt.

Darüber hinaus wurde der Index de Martonne (1926) M verwendet;  $M = P / (T + 10)$  mit P als Summe des jährlichen Niederschlages und T als Jahresmitteltemperatur. Er charakterisiert die klimatischen Wuchsbedingungen an den 36 Standorten. Ferner wurde die Produktivität der benachbarten Reinbestände (mittlerer periodischer Volumenzuwachs zwischen 2013 und 2017) als Maß für die Standortbedingungen in die statistische Analyse eingeführt. Als Bestandescharakteristika verwendeten wir in den statistischen Analysen neben der relativen Produktivität (Over- bzw. Underyielding) die Mischungsproportionen, den Quotienten zwischen der Mittelhöhe der Kiefer und der Eiche und die relative Bestandesdichte.

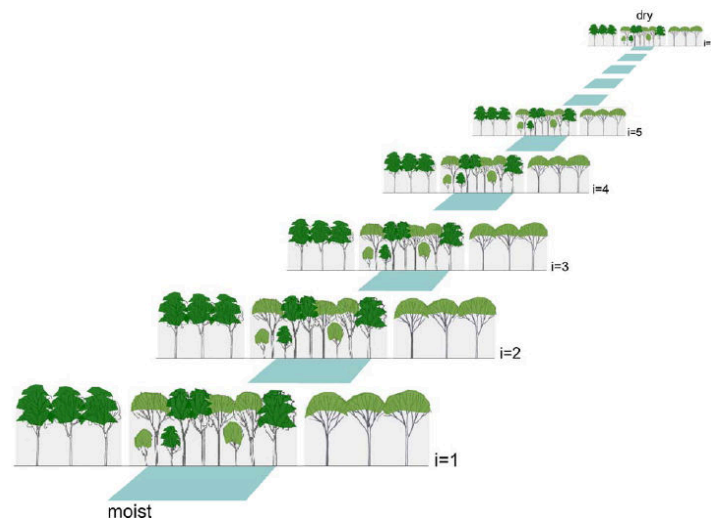


Abbildung 3: Entlang eines ökologischen Gradienten durch Europa, von Spanien im Südwesten bis Estland im Nordosten und Bulgarien im Südosten, bis Dänemark im Nordwesten, werden Triplets aus Rein- und Mischbeständen aus Kiefer und Eiche angelegt. Die Höhenlage variiert zwischen 0 und 785 m über NN, die Jahresmitteltemperatur beträgt  $6,6^\circ$  bis  $11,1^\circ$  Celsius und der Jahresniederschlag 454 mm bis 846 mm pro Jahr.

## 3 Ergebnisse

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die ertragskundlichen Charakteristika der Rein- und Mischbestände aus Kiefer und Eiche. Besonders bemerkenswert ist das sehr ähnliche Abschneiden von beiden Baumarten in diesem Alter in den Stammzahlen, dem Mitteldurchmesser, der Mittelhöhe, den Bestandesdichtewerten, dem Vorrat und dem Volumenzuwachs. Das gilt sowohl für die Mittelwerte als auch für die Minimal- und Maximalwerte. Die Mischbestände weichen insbesondere in den Minimal- und Maximalwerten stark von den Reinbeständen ab, während die Mittelwerte in den meisten Fällen nur geringfügig über den Werten der Reinbestände liegen.

Tabelle 1: Bestandescharakteristika der Reinbestände aus Kiefer und Eiche, der Kiefern-Eichen-Mischbestände und der Baumarten Kiefer und Eiche in der Mischung (Angaben hochgerechnet auf ha-Werte).

Variable	Einheit	Mittel min, max	Kiefer rein	Eiche rein	Kiefer+Eiche gemischt insgesamt	Kiefer in Mischung hochgerechnet auf ha	Eiche in Mischung hochgerechnet auf ha
N	ha <sup>-1</sup>	Mittel	853	876	864	796	969
		min	423	464	432	316	360
		max	1606	2537	1805	1383	2680
d <sub>g</sub>	cm	Mittel	26,5	25,1		27,7	23,4
		min	18,7	14,6		20,2	15,7
		max	35,5	37,6		37,8	38,3
h <sub>g</sub>	m	Mittel	22	21,2		22,9	19,9
		min	15,2	13,7		15,4	14,4
		max	28,6	27,9		29,5	26,2
SDI	ha <sup>-1</sup>	Mittel	861	761		881	786
		min	560	480		613	447
		max	1084	1069		1283	1275
V	m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	Mittel	418,5	366,7	416,2	460,3	357,3
		min	284	221,8	219,9	261	181
		max	621,3	515,5	571,3	585	579,2
ZV	m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> yr <sup>-1</sup>	Mittel	11,46	10,06	11,45	12,25	10,81
		min	6,15	4,65	7,16	4,77	5,38
		max	16,29	14,75	17,03	19,94	14,76

### 3.1 Bestandesmittel- und Summenwerte

Auf Abbildung 4 sind die Mittelhöhen und Mitteldurchmesser von Kiefer und Eiche im Mischbestand den entsprechenden Charakteristika im Reinbestand gegenübergestellt. Die Kiefer im Mischbestand ist jener im Reinbestand in der Höhe um 5% und in dem Durchmesser um 6% vorweg. Demgegenüber wird die Eiche im Mischbestand gegenüber dem Reinbestand in der Höhe um 5% und in dem Durchmesser ebenfalls um 5% abgebremst. Auf den einzelnen Flächen streuen die Höhen- und Durchmesserbefunde relativ breit um diese Mittelwerte. Im Durchschnitt scheint die Kiefer durch das Wachstum in der Mischung beschleunigt zu werden, während die Eiche durch die vorwüchsige Kiefer bis zu dem hier betrachteten Alter von 60 bis 80 Jahren in der Größenentwicklung abgebremst wird.

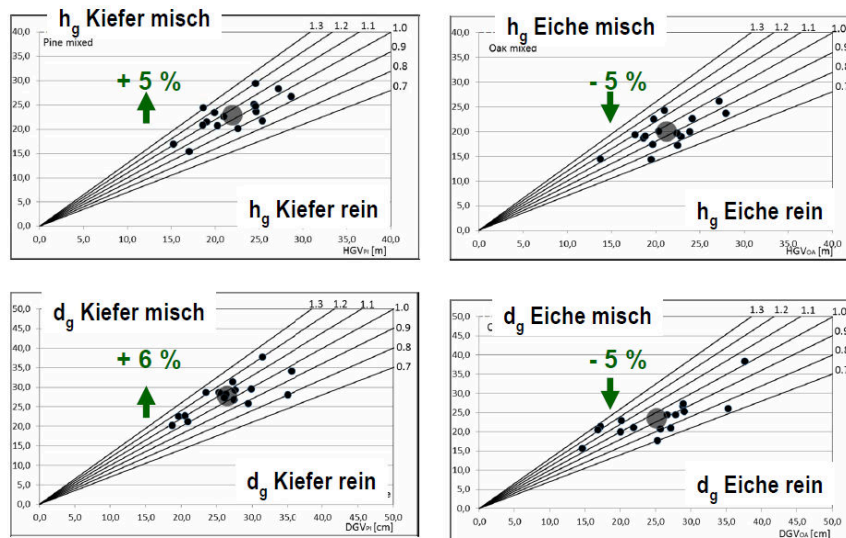


Abbildung 4: Mittelhöhe und Mitteldurchmesser von Kiefer und Eiche im Mischbestand gegenüber dem Reinbestand. Dargestellt sind die Einzelwerte auf den aufgenommenen Triplets (kleine Kreise) und die Mittelwerte über alle Triplets (große Kreise). Die Mittelhöhe und der Mitteldurchmesser der Kiefer ist in der Mischung um 5% bzw. 6% höher als im Reinbestand. Bei der Eiche sind Mittelhöhe und Mitteldurchmesser im Mischbestand jeweils um 5% niedriger als im Reinbestand.



Mischbestände besitzen höhere Bestandesdichten als Reinbestände. Abbildung 5 zeigt diesen Befund auf der Grundlage des Stand Density Indexes (Reineke 1933) der Bestandesgrundfläche und des Bestandesvolumens. Für die Untersuchung wurden durchweg vollbestockte, allenfalls leicht durchforstete Bestände ausgewählt, die bei den Rein- und Mischbeständen die maximale Dichte repräsentieren. Demnach ist die maximale Dichte in der Mischung höher als im Reinbestand.

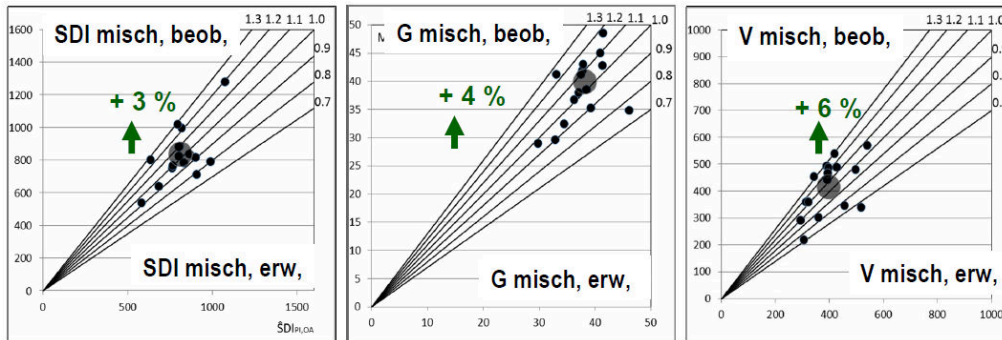


Abbildung 5: Stand Density Index, SDI, Bestandesgrundfläche, G, und Bestandesvorrat, V, im Mischbestand gegenüber dem Reinbestand. Gegenüber den Erwartungswerten (gewichtetes Mittel der Reinbestände) sind in den Mischbeständen der SDI um 3%, die Bestandesgrundfläche um 4% und der Bestandesvorrat um 6% höher.

### 3.2 Bestandeszuwächse von Kiefer und Eiche

Im Durchschnitt liegt der Bestandeszuwachs des Kiefern-Eichen-Mischbestandes um 6% über dem gewichteten Mittel der entsprechenden Reinbestände. In der Mischung gewinnt die Kiefer um 5% und die Eiche um 9% gegenüber ihrer Zuwachsleistung im Reinbestand (Abbildung 6). Wieder streuen die Einzelbefunde, insbesondere beim Gesamtbestand und bei der Eiche in relativ breitem Rahmen um diese Mittelwerte. Das ist angesichts des breiten Standortspektrums (Höhenlage von 0 bis 485 m über NN, Jahresmitteltemperatur von 6,6° bis 11,1° Celsius und Jahresniederschlag von 454 bis 846 mm pro Jahr) zu erwarten.

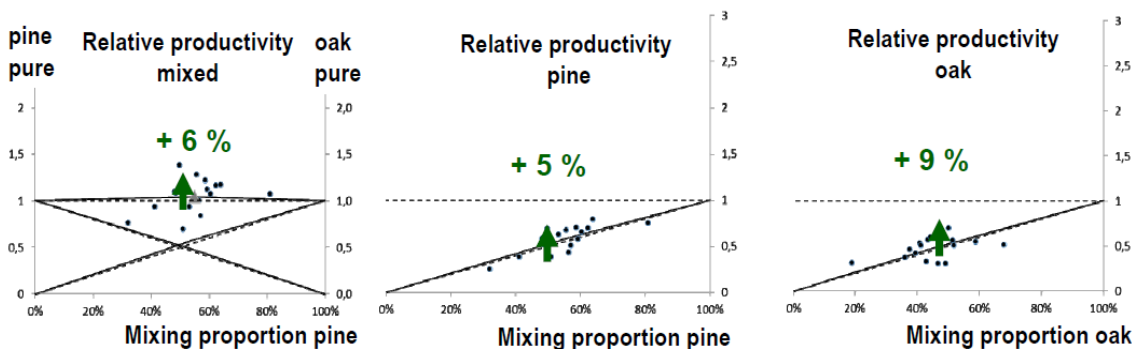


Abbildung 6: Bestandeszuwachs im Mischbestand und Zuwächse von Kiefer und Eiche im Mischbestand in Relation zu den jeweiligen Reinbeständen. Dargestellt ist die relative Produktivität für den Mischbestand insgesamt (+6%) für die Kiefer im Mischbestand (+5%) und für die Eiche (+9%).

Sowohl Kiefer als auch Eiche haben im Mischbestand deutlich größere Kronen. Abbildung 7 zeigt, dass bei Bäumen mit einem Durchmesser von 20 cm bis 30 cm beide Baumarten im Mischbestand um 5 m<sup>2</sup> bis 10 m<sup>2</sup> größere Kronen besitzen.

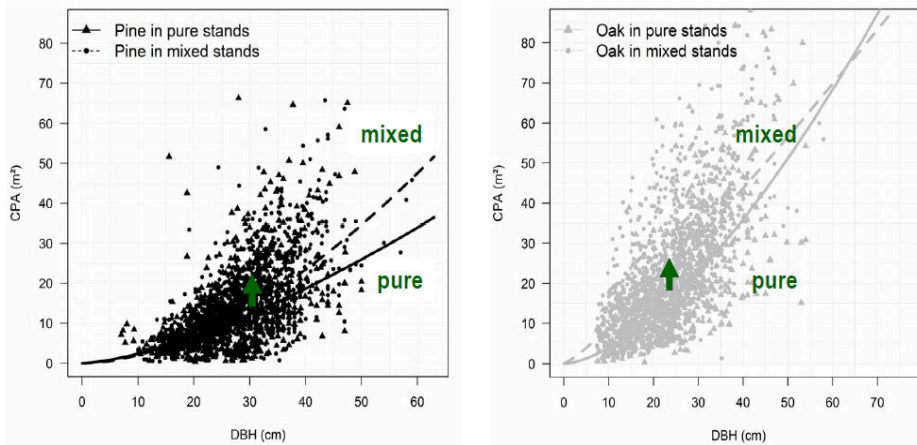


Abbildung 7: Kronenprojektionsfläche (CPA in  $m^2$ ) über dem Stammdurchmesser (DBH in cm) für Kiefer und Eiche im Mischbestand gegenüber dem Reinbestand. Beide Baumarten können ihre Kronen im Mischbestand weiter ausdehnen als im Reinbestand.

### 3.3 Mischungsreaktionen entlang des ökologischen Gradienten

Auf Abbildung 8 ist die relative Produktivität der Kiefern-Eichen-Mischbestände über der Mittelhöhe im Alter 100 dargestellt. Auf der x-Achse ist die Mittelhöhe der Kiefer im Alter 100 aufgetragen. Die Abbildung illustriert, dass der Kiefern-Eichen-Mischbestand durchschnittlich über der Referenzlinie von 1,0 (Gleichheit zwischen Misch- und Reinbestand) liegt. Außerdem zeigt die Abbildung, dass es keinen Zusammenhang zwischen der Bonität des Standortes und evtl. Mehr- und Minderzuwächsen gibt.

Das Bild ändert sich, wenn diese Betrachtung baumartenweise angestellt wird. Für die Kiefer deutet sich an, dass sie insbesondere auf besseren Standorten Mehrzuwächse zeigt. Bei der Eiche ist der Trend andersherum; mit zunehmender Standortgüte schlagen Mehrzuwächse in Minderzuwächse der Eiche im Mischbestand um. Durch diese Gegenläufigkeit zwischen mit der Bonität ansteigendem Mehrzuwachs bei der Kiefer und mit der Bonität abnehmendem Mehrzuwachs bzw. Minderzuwachs bei der Eiche, ergibt sich das neutrale Verhalten des Mischbestandes, das im oberen Teil von Abbildung 8 illustriert ist.

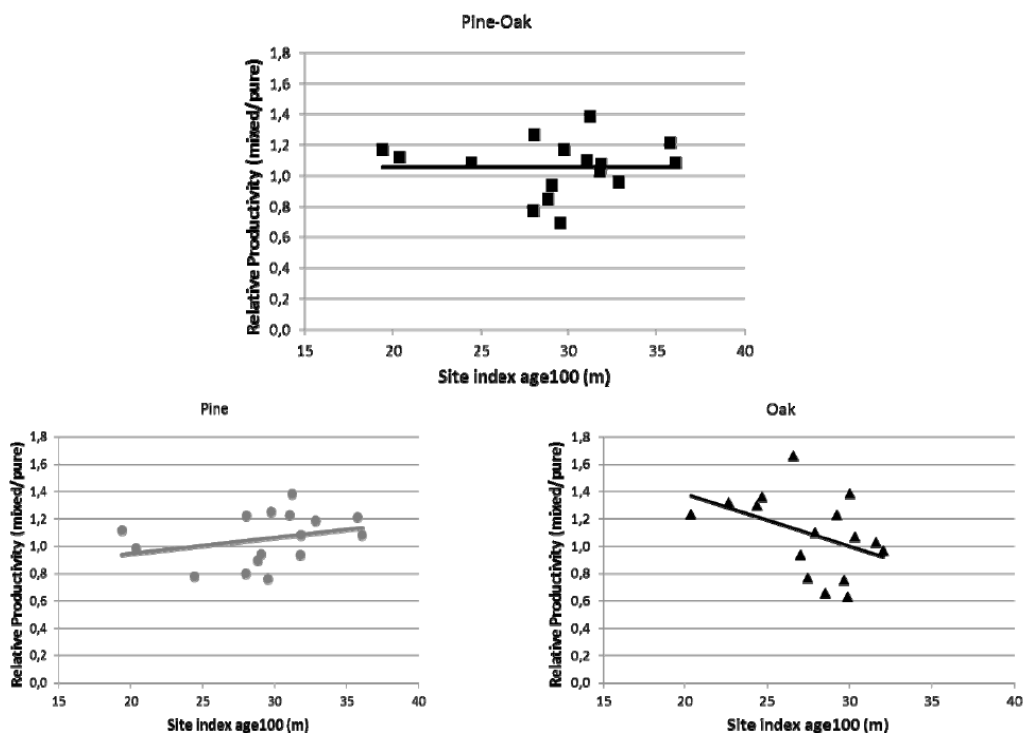


Abbildung 8: Relative Produktivität des Gesamtbestandes aus Kiefer und Eiche und relative Produktivität von Kiefer und Eiche separat, dargestellt über der Höhenbonität in Form der Mittelhöhe der Kiefer bzw. Eiche im Alter von 100 Jahren.



Abbildung 9 zeigt die Höhenrelation zwischen Misch- und Reinbestand für die Kiefer und Eiche. Auf schlecht wasserversorgten Standorten gewinnt die Kiefer in der Mischung an Höhe, während es bei der Eiche andersherum ist. Die Grafik zeigt, dass die auf Abbildung 8 gezeigten Mehr- und Minderzuwächse bei Kiefer und Eiche nicht von einer Höhenüberlegenheit resultieren können. Denn auf den günstigen Standorten, auf denen die Kiefer Mehrzuwächse verzeichnet, ist sie in der Höhe gegenüber dem Reinbestand unterlegen. Auf den ungünstigen Standorten, auf denen die Eiche maximale Mehrzuwächse zeigt, ist sie in der Mischung dem Reinbestand unterlegen. Die Mischungseffekte können also nicht von einer einfachen Höhenüberlegenheit der Kiefer bzw. der Eiche auf günstigen bzw. ungünstigen Standorten herrühren, sondern es müssen andere Ursachen hinter den Mischungseffekten stecken.

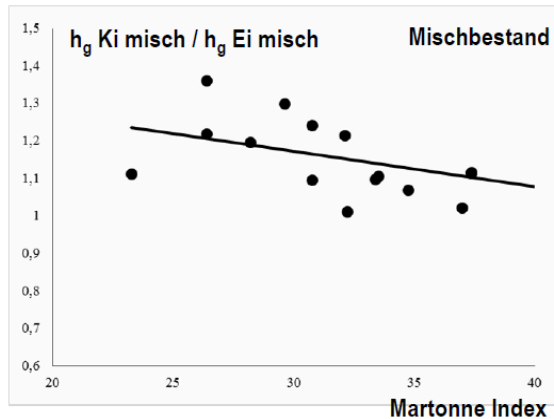


Abbildung 9: Quotient aus der Mittelhöhe der Kiefer in der Mischung und der Mittelhöhe der Eiche in Mischung, dargestellt über den Martonne Index. Die Grafik lässt erkennen, dass die Kiefer auf ungünstigen Standorten um 20% bis 30% über der Höhe der Eiche liegt, während das auf günstigen Standorten andersherum ist.

Tabelle 2 zeigt die Quotienten zwischen Mischbestand und Reinbestand für die wichtigsten ertragskundlichen Charakteristika. Besonders bemerkenswert ist die höhere Dichte der Misch- gegenüber den Reinbeständen und der höhere Grundflächen- und Volumenzuwachs. Die Werte auf Bestandesebene sind allerdings nur in wenigen Fällen signifikant. Deutlicher und zum Teil signifikant werden die Unterschiede zwischen Misch- und Reinbestand auf der Ebene der Baumarten. Hier fallen besonders die höheren Stammdimensionen und Vorräte der Kiefer im Misch- gegenüber dem Reinbestand auf und auch die niedrigeren Dimensionswerte, aber höheren Zuwachswerte der Eiche im Misch- gegenüber dem Reinbestand.

Tabelle 2: Bestandescharakteristika von Kiefer und Eiche insgesamt und Kiefer und Eiche gesondert im Mischbestand gegenüber dem Reinbestand, dargestellt in Relativwerten. Ein Quotient von 1,05 für die Baumzahl von Kiefer und Eiche gesamt, zeigt an, dass im Mischbestand um 5% mehr Bäume vorhanden sind, als es das gewichtete Mittel aus Kiefer und Eiche der Reinbestände erwarten lassen würde.

Bestandeswerte	Kiefer+Eiche Gesamt		Kiefer misch/rein		Eiche misch/rein	
	mittel	SE(±)	mean	SE(±)	mean	SE(±)
N (trees ha <sup>-1</sup> )	1,05	0,06	0,96	0,05	1,18	0,09
dg (cm)			1,06	0,03	0,95	0,04
do (cm)			1,07	0,03	1,01	0,03
hg (m)			1,05	0,03	0,95	0,03
ho (m)			1,05	0,03	0,96	0,03
hg/dg			1,01	0,06	1,02	0,03
ho/do			1,03	0,08	1,04	0,05
G (m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> )	1,04	0,03	1,06	0,03	1,03	0,04
V (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )	1,06	0,05	1,12	0,05	1,00	0,07
SDI (ha <sup>-1</sup> )	1,03	0,04	1,03	0,04	1,03	0,04
IG (m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> yr <sup>-1</sup> )	1,07	0,04	1,06	0,08	1,15	0,08
IV (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> yr <sup>-1</sup> )	1,06	0,05	1,05	0,05	1,09	0,07

## 4 Diskussion

Die Kiefer nimmt in Europa eine Fläche von  $49 \times 10^6$  ha ein (Brus et al. 2011). Ihre Klimahülle reicht im Wesentlichen von Temperaturen von  $-3^\circ$  bis  $+15^\circ$  Celsius und hinsichtlich der Jahresniederschläge von 500 mm bis 1.200 mm pro Jahr. Die Eiche nimmt eine Fläche von  $13 \times 10^6$  ha ein (Brus et al. 2011), und ihr Verbreitungsgebiet ist auf die wärmeren Bereiche zwischen  $5^\circ$  und  $12^\circ$  Celsius Jahresmitteltemperatur begrenzt, wobei die Amplitude der Jahresniederschläge ähnlich ist wie bei der Kiefer, nämlich von 500 mm bis 1.200 mm reicht. Kiefern-Eichen-Mischbestände nehmen gegenwärtig  $1,3 \times 10^6$  ha in Europa ein; die potentielle Fläche solcher Bestände beträgt  $35 \times 10^6$  ha. Die jetzige Fläche dürfte angesichts des Klimawandels, gegenüber dem gerade Kiefer und Eiche eher unempfindlich sind, in Zukunft weiter ansteigen. Die in diese Untersuchung einbezogenen Triplets aus Kiefer und Eiche reichen vom atlantischen über den kontinentalen bis zum borealen Klima. Sie liegen in einer Höhenlage von 0 bis 785 m über NN, repräsentieren eine Jahresmitteltemperatur von  $6,6^\circ$  bis  $11,1^\circ$  Celsius und einen Jahresniederschlag von 454 mm bis 846 mm pro Jahr. Die Flächen decken damit einen beträchtlichen Bereich der Klimahüllen beider Baumarten ab.

Die Komplementarität von Kiefer und Eiche besteht insbesondere darin, dass die Kiefer eine Konifere und die Eiche eine Laubbaumart ist. Gegenüber anderen Baumartenkombinationen, wie z.B. Lärche und Buche, oder Kiefer und Buche, ist die Komplementarität um Lichtbedarf, in der Kronenmorphologie oder der Durchwurzelungstiefe bei Kiefer und Eiche eher geringer (del Río et al. 2013, Pretzsch et al. 2013, 2015).

In der Mittelstammdimension ist die Kiefer im Mischbestand der Eiche leicht vorweg; während die Eiche gegenüber dem Reinbestand etwas abgebremst wird. Die  $h/d$ -Werte zeigen größere Schlankheit im Mischbestand an. In dem SDI der Grundfläche und dem Bestandesvorrat ist der Mischbestand dem Reinbestand leicht überlegen.

Der Mischbestand aus Kiefer und Eiche ist um einige Prozentpunkte produktiver als das gewichtete Mittel der Reinbestände. Die Kiefer gewinnt durchschnittlich 5%, die Eiche 9% an Volumenzuwachs. Beide Baumarten vergrößern ihre Kronenbreite im Mischbestand, wie das auch bei anderen Artenkombinationen gefunden wurde (Thurm und Pretzsch 2016). Bei der Eiche ist das stärker ausgeprägt als bei der Kiefer.

Die Kiefer gewinnt insbesondere auf besseren Standorten, während die Eiche einen größeren Mehrzuwachs in der Mischung auf ärmeren Standorten zeigt. Das Zuwachsplus des Gesamtbestandes ist auf allen Standorten ähnlich, denn Zuwachsgewinne der Eiche auf armen Standorten werden durch Zuwachsdrosselung der Kiefer auf armen Standorten kompensiert.

Als Ursachen für den Mehrzuwachs kommen in Betracht, dass die Kiefer insbesondere im Frühjahr, wenn die Eiche noch nicht ausgetrieben ist, im Mischbestand eine bessere Lichtversorgung hat. Weiter könnten die häufig etwas niedrigeren Eichen im Mischbestand die dort ineffizienten Kiefern ersetzen, so dass die Ressourcen im Mischbestand besser ausgenutzt werden (Kelty 1992). Die Eiche dürfte insbesondere auf armen Standorten von einer verbesserten Nährstoffversorgung profitieren; die Kiefer kämmt aufgrund ihrer ganzjährigen Benadelung und ihrer höheren Blattfläche mehr düngende Deposition aus der Luft aus. Weiter dürfte die Mischung aus Kiefer und Eiche eine bessere Streu erbringen, wovon die Eiche insbesondere auf ärmeren Standorten profitiert. Untersuchungen hierzu wurden durch Kaneko und Salamanka (1999), Prietzel (2004), Mammen et al. (2003), Noack (2006), Schröder (2008, 2009) ausgeführt.

Die ausgesuchten Triplets sind durchweg einschichtige Mischbestände mit Standortgleichheit zwischen Rein- und Mischbeständen. Deshalb dürften die Unterschiede in der Produktivität kaum auf Unter-

schiede im Alter oder in dem Standort zurückgehen, sondern vielmehr auf echte Mischungseffekte wie Konkurrenzreduktion und Fazilitation zurückzuführen sein. Es handelt sich um eine vorläufige Auswertung von letztlich 30 bis 40 Triplets, von denen bisher aufgrund des Standes der Beprobungen nur 16 ausgewertet und einbezogen werden können. Ergänzend zu den hier ausgewerteten undurchforsteten Triplets, wird in einer Paralleluntersuchung in der Nähe eine entsprechende Reihe von Triplets durchforstet, um die Durchforstungsreaktion im Rein- und Mischbestand miteinander vergleichen zu können. Künftige standörtliche Aufnahmen werden evtl. doch vorhandene Unterschiede in den Standorten zwischen Rein- und Mischbeständen und zwischen undurchforsteten und durchforsteten Triplets aufdecken.

Ein Nachteil von temporären Probeflächen, wie den hier angelegten Triplets, ist immer die unbekannte Historie mit Blick auf zurückliegende waldbauliche Behandlung, Dichtesteuerung, Düngung usw. Triplets in engem Umfeld und mit möglichst guter Standortgleichheit sind im bewirtschafteten Wald immer schwer zu finden, sodass die Anlagen nur in wenigen Fällen wiederholt werden konnten (z.B. in Deutschland und Polen). Die hiesige Auswertung fasst beide Eichenarten, also die Stieleiche und Traubeneiche zusammen, weil auf der Mehrzahl der Fläche keine eindeutige Artzugehörigkeit festgestellt werden konnte, vielmehr sind insbesondere in Mitteleuropa immer Mischformen aus Stiel- und Traubeneiche vertreten.

Zu der Baumartenkombination Kiefer und Eiche mit gleichem Alter gibt es fast keine Untersuchungen. Nach Auswertung aller quer durch Europa angelegten Triplets, wird eine erste solide Datenbasis über das Wachstum und die Mischungsreaktion dieser Baumartkombination vorliegen. Von besonderem Interesse sind die Mischungsreaktionen auf den unterschiedlichen Standorten. Während bisher einerseits zunehmende Mischungseffekte mit zunehmender Wasserversorgung, andererseits aber auch zunehmende Mischungseffekte mit abnehmender Bodenqualität, beobachtet wurden, treffen offenbar auf den Kiefern-Eichen-Triplets gegenläufige Mischungsreaktionen zusammen. Die Kiefer gewinnt mit zunehmender Wasserversorgung im Mischbestand, die Eiche gewinnt mit abnehmender Wasser- und Nährstoffversorgung.

Bisher besteht noch ein sehr unvollständiges Bild von den Mischungsreaktionen verschiedener Baumartenkombinationen auf unterschiedlichen Standorten. Die hiesige Untersuchung trägt zu einer Vervollständigung des Bildes bei. Je mehr Baumartenkombinationen auf unterschiedlichen Standorten untersucht und in ihren Mischungsreaktionen verstanden werden, desto eher entsteht ein generelles Bild und eine konzeptionelle Vorstellung von den Mischungseffekten in Abhängigkeit von Artenkombinationen und Standortbedingungen. Erst wenn ein solches übergeordnetes Bild entsteht, kann von der Analyse zum systematischen Design von Mischbeständen übergegangen werden (Pretzsch und Zenner 2017). Vertiefte Informationen über die Wachstumsreaktionen in Misch- gegenüber Reinbeständen sind essentiell für die Begründung, die Behandlung, die Modellierung und die Prognose von Mischbeständen, die gegenwärtig in der praktischen Bedeutung immer mehr zunehmen.

## 5 Zusammenfassung

Die Produktivitätsrelation zwischen Mischbeständen und Reinbeständen spiegelt den Nettoeffekt der förderlichen und hinderlichen Interaktionen, der beteiligten Arten im Mischbestand im Vergleich zum Reinbestand, wider. Viele neuere Untersuchungen berichten Mehrzuwächse von Misch- gegenüber Reinbeständen von 10-30%. Bei welchen Baumartenkombinationen die Mehrzuwächse allerdings relevant sind, und wie sie von den jeweiligen Standortbedingungen abhängen, ist noch weitgehend ungeklärt.

Im Rahmen des EU-Projektes REFORM (#2816ERA02S) wurden insgesamt 36 Triplets, bestehend aus Rein- und Mischbeständen, aus Kiefer und Eiche entlang eines ökologischen Gradienten in 15 europäi-

schen Ländern angelegt. Es handelt sich dabei um überwiegend 40 bis 80jährige gleichaltrige Rein- und Mischbestände, die voll bestockt sind, in denen Kiefer und Eiche in Einzelmischung vorkommen, und in denen die Zuwachsverhältnisse Vollbestockung widerspiegeln. Die Bestände wurden in den zurückliegenden 5 bis 10 Jahren nicht oder nur schwach durchforstet. Alle Parzellen wurden nach einheitlichem ertragskundlichen Standard aufgenommen, über Zuwachsbohrungen beprobt und dazu verwendet, ertragskundliche Zustands- und Produktivitätsgrößen pro Hektar zu errechnen. In dem Beitrag werden erstens die Mischbestände mit benachbarten Reinbeständen hinsichtlich ihrer ertragskundlichen Zustandswerte verglichen. Zweitens wird gezeigt, wie die Mischbestände aus Kiefer und Eiche in ihrer Produktivität im Vergleich zu benachbarten Reinbeständen abschneiden. Drittens wird gezeigt, wie die Mischungseffekte von den Standortbedingungen abhängen. Die Diskussion ordnet die aufgedeckten Mischungseffekte in andere Mischbestandsuntersuchungen ein, beleuchtet die Ursachen und skizziert die waldbaulichen Konsequenzen.

## 6 Danksagung

Dank für die Unterstützung der Mischbestandsforschung am Lehrstuhl für Waldwachstumskunde geht an die Deutsche Forschungsgemeinschaft (# DFG 292/15-1), Europäische Union (REFORM # 2816ERA02S und CARE4C # GA 778322), das Bayerische Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (W07 # 7831-26625-2017) und an die Bayerischen Staatsforsten BaySF.

## 7 Literatur

- Brus, D.J., G.M. Hengeveld, D.J.J. Walvoort, P.W. Goedhart, A.H. Heidema, G.J. Nabuurs, K. Gunia, 2011. Statistical mapping of tree species over Europe. *European Journal of Forest Research* 131 (1): 145–157.
- del Río, M., Schütze, G., Pretzsch, H., 2013. Temporal variation of competition and facilitation in mixed species forests in Central Europe, *Plant Biology*, 16(1): 166-176
- Forrester DI 2013. The spatial and temporal dynamics of species interactions in mixed-species forests: From pattern to process. *For. Ecol. Manage.* 312: 282-292.
- Heym, M., Ruiz-Peinado, R., del Rio, M., Bielak, K., Forrester, D.I., Dirnberger, G., Barbeito, I., Brazaitis, G., Ruskytko, I., Coll, L., Fabrika, M., Drössler, L., Löf, M., Sterba, H., Hurt, V., Kurylyak, V., Lombardi, F., Stojanovic, D., den Ouden, J., Motta, R., Pach, M., Skrzyszewski, J., Ponette, Q., de Streel, G., Sramek, V., Cihak, T., Zlatanov, T.M., Avdagic, A., Ammer, Ch., Verheyen, K., Wlodzimierz, B., Bravo-Oviedo, A., Pretzsch, H. (2017): EuMIXFOR empirical forest mensuration and ring width data from pure and mixed stands of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and European beech (*Fagus sylvatica* L.) through Europe. *Annals of Forest Science* 74(63): S. 9 DOI 10.1007/s13595-017-0660-z.
- Jactel H, Gritti E S, Drössler L, Forrester D I, Mason W L, Pretzsch H, Castagneyrol, B (2018) Positive diversity-productivity relationships in forests: climate matters, *Biology Letters* 20170747, <http://dx.doi.org/10.1098/rsbl.2017.0747>
- Kaneko, N., und Salamanca, E. (1999). Mixed leaf litter effects on decomposition rates and soil microarthropod communities in an oak–pine stand in Japan. *Ecological Research*, 14(2), 131-138.
- Kelty, M. J., 1992. Comparative productivity of monocultures and mixed stands. In: Kelty, M. J., Larson, B. C., Oliver, C. D. (Eds.), *The ecology and silviculture of mixed-species forests*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 125-141.
- Liang J, Crowther TW, Picard N, Wiser S, Zhou M, Alberti G, Schulze E-D, McGuire AD, Bozzato F, Pretzsch H, de-Miguel S, Paquette A, Hérault B, Scherer-Lorenzen M, Barrett CB, Glick HB, Hengeveld GM, Nabuurs G-J, Pfautsch S, Viana H, Vibrans AC, Ammer C, Schall P, Verbyla D, Tchebakova N, Fischer M, Watson JV, Chen HYH, Lei X, Schelhaas M-J, Lu H, Gianelle D, Parfenova EI, Salas C, Lee E, Lee B, Kim HS, Bruelheide H, Coomes DA, Piotto D, Sunderland T, Schmid B, Gourlet-Fleury S, Sonké B, Tavani R, Zhu J, Brandl S, Vayreda J, Kitahara F, Searle EB, Neldner VJ, Ngugi MR, Baraloto C, Frizzera L, Bałazy R, Oleksyn J, Zawila-Niedzwiecki T, Bouriaud O, Bussotti F, Finér L, Jaroszewicz B, Jucker T, Valladares F, Jagodzinski AM, Peri PL, Gonmadje C, Marthy W, O'Brien T, Martin EH, Marshall AR,

- Rovero F, Bitariho R, Niklaus PA, Alvarez-Loayza P, Chamuya N, Valencia R, Mortier F, Wortel V, Engone-Obiang NL, Ferreira LV, Odeke DE, Vasquez RM, Lewis SL, Reich PB (2016) Positive biodiversity-productivity relationship predominant in global forests. *Science* 354 (6309). doi:10.1126/science.aaf8957
- Mammen, A. V., Bachmann, M., Prietzel, J., Pretzsch, H., & Rehfuess, K. E. (2003). Bodenzustand, Ernährungszustand und Wachstum von Fichten (*Picea abies* Karst.) auf Probeflächen des Friedenfelser Verfahrens in der Oberpfalz. *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, 122(2), 99-114.
- Martonne de E. 1926. Une nouvelle fonction climatologique : L'indice d'aridité. *La Météorologie* 21, 449-458.
- Noack, M. (2006). Wachstumsgesetzmäßigkeiten der Trauben-Eiche unter Kiefernschirm: waldwachstumskundliche Untersuchungen zum Voranbau der Trauben-Eiche in Kiefernbeständen des Nordostdeutschen Tieflandes auf standörtlicher Grundlage. In: Schriftenreihe Agrarwissenschaftliche Forschungsergebnisse Bd. 28. In: Schriftenreihe Agrarwissenschaftliche Forschungsergebnisse Bd. 28. Verlag Dr. Kovae, Hamburg.
- Pretzsch, H., Zenner, E.K. (2017) Toward managing mixed-species stands: from parametrization to prescription. *Forest Ecosystems* 4:19
- Pretzsch, H, Forrester, D, Bauhus, J (2017) *Mixed-species Forests, Ecology and Management*, Springer, Berlin, 653 p
- Pretzsch, H., Schütze, G. (2009): Transgressive overyielding in mixed compared with pure stands of Norway spruce and European beech in Central Europe: evidence on stand level and explanation on individual tree level. *Eur J Forest Res* 128(2):183-204
- Pretzsch, H., Bielak, K., Block, J., Bruchwald, A., Dieler, J., Ehrhart, H.P., Kohnle, U., Nagel, J., Spellmann, H., Zasada, M., Zingg, A. (2013): Productivity of mixed versus pure stands of oak (*Quercus pretraea* (Matt.) Liebl. and *Quercus robur* L.) and European beech (*Fagus sylvatica* L.) along an ecological gradient. *European Journal of Forest Research* 132(2):263-280
- Pretzsch, H., del Río, M., Ammer, Ch., Avdagic, A., Barbeito, I., Bielak, K., Brazaitis, G., Coll, L., Dirnberger, G., Drössler, L., Fabrika, M., Forrester, D. I., Godvod, K., Heym, M., Hurt, V., Kurylyak, V., Löf, M., Lombardi, F., Matović, B., Mohren, F., Motta, R., den Ouden, J., Pach, M., Ponette, Q., Schütze, G., Schweig, J., Skrzyszewski, J., Sramek, V., Sterba, H., Stojanović, D., Svoboda, M., Vanhellemont, M., Verheyen, K., Wellhausen, K., Zlatanov, T., Bravo-Oviedo, A. (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): 927-947
- Prietzel, J. (2004). Humusveränderungen nach Einbringung von Buche und Eiche in Kiefernreinbestände. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 167(4), 428-438.
- Reineke LH (1933) Perfecting a stand-density index for even-aged forests. *J Agr Res* 46: 627-638
- Schröder, J. (2009). Risiken durch Witterungsextreme für Kiefer und Eiche in Nordostdeutschland: Ansätze zur Schätzung des Gefährdungspotenzials. *Wald im Klimawandel—Risiken und Anpassungsstrategien*, 35.
- Schröder, J. (2008). Kiefer und Eiche in Mischbeständen—Konkurrenz oder Partnerschaft in einer Lebensgemeinschaft?. *Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde*, 50.
- Sterba, H., del Rio, M., Brunner, A., and Condes, S. 2014. Effect of species proportion definition on the evaluation of growth in pure vs. mixed stands. *Forest Systems*, 23(3), 547-559.
- Thurm, E.A., Pretzsch, H. (2016): Improved productivity and modified tree morphology of mixed versus pure stands of European beech (*Fagus sylvatica*) and Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*) with increasing precipitation and age. *Annals of Forest Science* 73(4):1047-1061