

ALLGEMEINE FORST UND JAGDZEITUNG

German Journal of Forest Research

INHALTSVERZEICHNIS

- H. Pretzsch, Chr. Ammer,
B. Wolff, M. Steckel,
S. Rukh
und M. Heym
- Zuwachsniveau, Wachstumstrend und episodische
Zuwachseinbrüche. Ein zusammenfassendes Bild
vom aktuellen Zuwachsgang in Rein- und Misch-
beständen aus Fichte, Kiefer, Buche und Eiche .. 1
(Current growth level, growth trend, and episodic
growth decline. A consolidated view of the
growth pattern of mono-specific and mixed
stands of Norway spruce, Scots pine,
European beech, and sessile oak)
DOI-Nummer: 10.23765/afjz0002055
- S. Hein, M. Hafner,
Chr. Schurr
und Y. Graf
- Zur rechtlichen Situation von Wuchshüllen in
der Waldbewirtschaftung in Deutschland –
Teil I: Definitionen, Rechtsrahmen, kreislauf-
wirtschaftsrechtliche Sicht und Bundesboden-
schutzgesetz 22
(Legal Situation of Treeshelters in Forest Manage-
ment in Germany – Part I: Definitions, Regula-
tory Framework, View Points from the Circular
Economy Law and the Federal Soil Protection
Act)
DOI-Nummer: 10.23765/afjz0002056
- S. Hein, M. Hafner,
Chr. Schurr
und Y. Graf
- Zur rechtlichen Situation von Wuchshüllen in
der Waldbewirtschaftung in Deutschland –
Teil II: Forst und naturschutzrechtliche Sicht,
Lösungsansätze und Folgerungen 31
(Legal Situation of Treeshelters in Forest Manage-
ment in Germany – Part II: View Points from
Forest Law and Nature Conservation Law, Solu-
tions and Consequences)
DOI-Nummer: 10.23765/afjz0002057

191. JAHRGANG 2020 HEFT 1/2
J. D. SAUERLÄNDER'S VERLAG · BAD ORB

Zuwachsniveau, Zuwachstrend und episodische Zuwachseinbrüche. Ein zusammenfassendes Bild vom aktuellen Zuwachsgang in Rein- und Mischbeständen aus Fichte, Kiefer, Buche und Eiche

(Mit 3 Abbildungen und 5 Tabellen)

HANS PRETZSCH^{1,*} , CHRISTIAN AMMER²⁾, BARBARA WOLFF³⁾, MATHIAS STECKEL¹⁾, SHAH RUKH⁵⁾ und MICHAEL HEYM⁴⁾

(Angenommen April 2020)

DOI-Nummer: 10.23765/afjz0002055

SCHLAGWÖRTER – KEY WORDS

Baumartenmischung; Mischungsanteile; Mischungsregulierung; generische Pflegeprogramme; Durchforstungsalgorithmen; Packungsdichte; Äquivalenz-Koeffizienten; Dichte-Steigerungs-Koeffizienten.

Tree species mixture; mixing proportions; regulation of mixing proportions; generic silvicultural guidelines; thinning algorithms; packing density; equivalence-coefficients; density-expansion-coefficients.

1. EINLEITUNG

Zur Gleichzeitigkeit von hohem absoluten Zuwachsniveau und relativ starken Zuwachseinbrüchen in Trockenjahren

Im Vergleich zur Vergangenheit, verläuft der Zuwachs von Waldbeständen gegenwärtig in vielen Regionen Europas auf einem deutlich höheren Niveau (KAUPPI et al., 2014; PRETZSCH et al., 2014; SPIECKER et al., 1996).

*) Korrespondierender Autor: HANS PRETZSCH, Lehrstuhl für Waldwachstumskunde, Technische Universität München.

Anschriften aller Mitautoren:

¹⁾ 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@tum.de, <http://www.wwk.forst.tu-muenchen.de>

MATHIAS STECKEL, 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: mathias.steckel@tum.de, <http://www.wwk.forst.tu-muenchen.de>

²⁾ Prof. Dr. CHRISTIAN AMMER, Abteilung Waldbau und Waldökologie der gemäßigten Zonen, Universität Göttingen und Zentrum für Biodiversität und nachhaltige Landnutzung, Universität Göttingen, Büsingenweg 1, D-37077 Göttingen, Germany, Tel.: ++49-551-3933671, Fax: ++49-551-3933270. E-Mail: christian.ammer@forst.uni-goettingen.de <http://www.uni-goettingen.de/de/67090.html>

³⁾ Prof. Dr. BARBARA WOLFF, Lehrgebiet Waldinventur und Planung, Fachbereich Wald und Umwelt, Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde, Alfred-Möller-Str. 1, D-16225 Eberswalde, Germany, Tel.: ++49-3334-657195, Fax: ++49-3334-657162. E-Mail: Barbara.Wolff@hnee.de, <http://www.hnee.de>

⁴⁾ MICHAEL HEYM, Bayerische Landesanstalt für Wald- und Forstwirtschaft, Hans-Carl-von-Carlowitz-Platz 1, D-85354 Freising, Tel.: ++49-8161-4591-314. E-Mail: Michael.hey@lwf.bayern.de

⁵⁾ SHAH RUKH, Thünen Institut, Alfred-Möller-Straße 1, Haus 41/42, D-16225 Eberswalde, Tel.: ++49 3334 3820 335. E-Mail: shah.rukh@thuenen.de

Auf diesem erhöhten Zuwachsniveau waren Bestände in den zurückliegenden Jahren 2003 und 2015 und nachfolgend auch in den Jahren 2018 und 2019 mit Trockenheit und damit verbundenen abrupten Zuwachsdepressionen konfrontiert. Solche episodischen Einbrüche werden als Stresssignal interpretiert, selbst wenn die Zuwächse noch weit über dem historischen Niveau verlaufen, das die Ertragstafeln repräsentieren. Die Gleichzeitigkeit von hohem absoluten Zuwachsniveau, im Vergleich zu den Referenzwerten der Ertragstafeln (MCMAHON et al., 2010; SILVA et al., 2016) und starken relativen Zuwachseinbrüchen in Trockenjahren (ALLEN et al., 2010; CHOAT et al., 2012), kann vor allem in der Öffentlichkeit zu widersprüchlichen Aussagen und Missverständnissen bezüglich des aktuellen Gesundheitszustands und der Vitalität von Wäldern führen. Gleiches gilt für die Beurteilung von Bäumen unterschiedlicher sozialer Stellung eines Bestandes. Auch dort werden die relativ und absolut oft stärkeren Zuwachseinbrüche dominanter Bäume, deren Zuwächse aber dennoch über jenen der beherrschten Individuen liegen, häufig als Ausdruck verminderter Vitalität interpretiert (LIU und MULLER, 1993).

Die meisten Ertragstafeln in mitteleuropäischen Ländern wurden im 20. Jahrhundert entwickelt und basieren auf langfristigen Versuchsflächen (KENK et al., 1991; PRETZSCH et al., 2014; SPIECKER, 1996). In der Folgezeit haben sich die Wuchsbedingungen auf diesen Flächen deutlich verändert, was dazu geführt hat, dass die Zuwachsgänge der Waldbestände häufig über dem Niveau der Ertragstafeln verlaufen (RÖHLE, 1994, 1997). Dieser Trend wird auch durch regionale und nationale Waldinventuren bestätigt (BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR WALD UND FORSTWIRTSCHAFT, 2005; KÜSTERS, 2001; PRETZSCH und UTSCHIG, 2000). Gleichwohl folgen die Bestände noch immer ähnlichen allometrischen Gesetzmäßigkeiten wie in der Vergangenheit. So haben sich die Beziehungen zwischen Baumzahl und Mitteldurchmesser (Selbstdurchforstungslinien) oder Mittelhöhe und Bestandesvorrat (Ertragsniveau) kaum verändert (PRETZSCH et al., 2014). Die jährlichen Zuwachsraten sind jedoch höher als in der Vergangenheit, d.h. die jährlichen Zuwachsraten sind gestiegen, die Bestände durchteilen die Ertragstafeln schneller als früher, und können in früherem Alter mehr stehenden Vorrat und höhere Gesamtwuchsleistungen ausbilden.

Bei Untersuchungen zur Zuwachsreaktion von Bäumen und Beständen auf Trockenjahre wird meistens das

Zuwachsverhalten in Trockenjahren in Relation zum langfristigen Niveau (PRETZSCH et al., 2018) oder zum Zuwachs in der zwei- bis dreijährigen Vorperiode der Trockenheit (LLORET et al., 2011) quantifiziert. Im Unterschied zur Quantifizierung des Bestandeszuwachses in $\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{Jahr}^{-1}$ oder Zuwachseinbrüchen in $\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{Jahr}^{-1}$, lässt ein solches Vorgehen Aussagen zum relativen Zuwachs zu. ZANG et al. (2011) zeigen mit dieser Methode eine artspezifische Rangordnung in den Zuwachseinbrüchen bei Trockenheit von Fichte (*Picea abies* [L.] KARST.) > Tanne (*Abies alba* MILL.), Douglasie (*Pseudotsuga menziesii* (MIRB.) FRANCO), Buche (*Fagus sylvatica* L.), Kiefer (*Pinus sylvestris* L.) > Eiche (*Quercus petraea* (MATT.)). Isohydriche Arten, wie u. a. Fichte reagieren bei episodischer Trockenheit häufig mit stärkeren Einbußen als anisohydriche Arten wie z. B. Buche oder Eiche (HARTMANN, 2011). Die Zuwachsverluste hängen u. a. von der Provenienz (ATZMON et al., 2004; AREND et al., 2011; ZANG et al., 2011), der Größe der Bäume (PRETZSCH et al., 2018), den Standortbedingungen (ZANG et al., 2011) sowie der Saisonalität der Trockeneignisse (SEIDLING et al., 2012) ab. Tritt Trockenheit wiederholt auf, können sich die Bäume z. B. durch holz-anatomische Modifikationen (Zahl und Größe der was-

serleitenden Gefäße) anpassen (SCHULDT et al., (2016) und ihre Zuwachseinbußen begrenzen (PRETZSCH et al., submitted).

Die vorliegende Untersuchung repräsentiert Rein- und Mischbestände der Baumarten Fichte, Buche, Kiefer und Eiche auf mittleren bis guten Standortbedingungen, die im mitteleuropäischen Flachland und Hügelland dominant und forstwirtschaftlich besonders relevant sind. Auf ärmeren Standorten können die hier berichteten Zuwachstrends geringer und die Trockenstressreaktionen deutlicher ausfallen. Auf den hier betrachteten Standorten stellen wir eine Gleichzeitigkeit von relativ hohem Zuwachsniveau in normalen Jahren und deutlichen Zuwachseinbrüchen in Trockenjahren fest. Um diesen Zusammenhang besser zu verstehen, wurden die Zuwächse von Rein- und Mischbeständen aus Fichten (*Picea abies* [L.] KARST.), Kiefern (*Pinus sylvestris* L.), Buchen (*Fagus sylvatica* L.) und Eichen (*Quercus petraea* (MATT.)) analysiert und den Erwartungswerten der Ertragstafeln gegenübergestellt. Basierend auf den Entwicklungsgängen des jährlichen Volumenzuwachses von Rein- und Mischbeständen aus Fichte, Kiefer und Buche werden folgende Fragen bearbeitet:

Tab. 1

Übersicht über die 19 Triplets aus Rein- und Mischbeständen aus Fichte/Buche (FiBu), Kiefer/Buche (KiBu) und Kiefer/Eiche (KiEi). Erklärung der Variablen: Art, Baumartenkombination; Triplet, Kennung der Triplets; Alter, mittleres Alter der Triplets (Jahre); L, Längengrad; B Breitengrad; NN, Lage über Meereshöhe (m); T, mittlere Jahrestemperatur (°C); N, mittlerer Jahresniederschlag (mm); M, Index von Martonne, $M = N / (T + 10)$; S, Substrat; B, Bodentyp nach FAO (IUSS Working Group WRB, 2015); I, Hangneigung (°); E, Exposition (°).

Overview of the 19 triplets of mono-specific and mixed-species stands of Norway spruce/European beech (FiBu), Scots pine/European beech (KiBu), and Scots pine/sessile oak (KiEi) included in this analysis. Explanation of variables: Art, species combination; Triplet identification code of the Triplets, Alter, average stand age of the triplet (years), L, longitude; B, latitude; NN, elevation above sea level (m), T, mean annual temperature (°C), N, mean annual precipitation (mm); M, de Martonne index (1926), $M = \text{annual precipitation (mm)} / (\text{mean annual temperature } ^\circ\text{C} + 10)$; S, substrate and B, soil type according to FAO (IUSS Working Group WRB, 2015); I, inclination (°); E, exposition (°).

| Art | Triplet | Alter (Jahre) | geografische Lage | | NN (m) | T °C | N (mm yr ⁻¹) | M (mm °C ⁻¹) | S | B | I (°) | E (°) |
|------|---------|------------------|-------------------|--------------|-----------|---------|-----------------------------|-----------------------------|-----------|-----------|----------|----------|
| | | | L | B | | | | | | | | |
| FiBu | 1021 | 82 | 09°58'37.20" | 49°54'10.80" | 330 | 9,3 | 694 | 36 | Kalkstein | Luvisol | 0 | |
| FiBu | 1022 | 89 | 11°49'19.20" | 48°56'08.16" | 550 | 9,0 | 820 | 43 | Kalkstein | Cambisol | 1 | 275 |
| FiBu | 1023 | 72 | 11°37'18.17" | 48°25'53.23" | 490 | 9,1 | 866 | 45 | Kalkstein | Luvisol | 0 | |
| FiBu | 1024 | 61 | 12°04'22.80" | 48°08'31.20" | 620 | 8,8 | 1079 | 57 | Moräne | Cambisol | 3 | 180 |
| FiBu | 1025 | 67 | 12°40'19.20" | 47°56'20.40" | 600 | 8,9 | 1200 | 63 | Moräne | Cambisol | 1 | 270 |
| KiBu | 1031 | 55 | 09°03'54.36" | 50°06'48.74" | 250 | 9,0 | 720 | 38 | Sandstein | Cambisol | 0 | |
| KiBu | 1032 | 47 | 10°58'13.12" | 49°53'11.64" | 250 | 8,0 | 650 | 36 | Sandstein | Cambisol | 2 | 30 |
| KiBu | 1033 | 57 | 11°14'12.49" | 48°34'57.95" | 450 | 8,5 | 700 | 38 | Sandstein | Cambisol | 1 | 45 |
| KiBu | 1034 | 57 | 08°10'48.58" | 48°59'11.66" | 125 | 10,0 | 675 | 34 | Sandstein | Cambisol | 3 | 0 |
| KiBu | 1061 | 80 | 13°37'06.05" | 52°04'45.55" | 60 | 8,6 | 520 | 28 | Sandstein | Cambisol | 0 | |
| KiBu | 1070 | 65 | 12°44'08.30" | 48°11'12.47" | 40 | 8,0 | 560 | 31 | Sandstein | Cambisol | 0 | |
| KiBu | 1071 | 65 | 08°01'03.88" | 49°24'57.77" | 400 | 9,0 | 675 | 36 | Sandstein | Cambisol | 1 | 60 |
| KiEi | 2001_0 | 108 | 10°50'36.00" | 49°56'51.00" | 330 | 9,1 | 728 | 38 | Sandstein | Cambisol | 17 | 225 |
| KiEi | 2001_1 | 108 | 10°50'35.00" | 49°56'51.00" | 330 | 9,1 | 728 | 38 | Sandstein | Cambisol | 17 | 225 |
| KiEi | 2002_0 | 108 | 10°57'26.00" | 49°42'55.00" | 335 | 9,3 | 718 | 37 | Sandstein | Cambisol | 9 | 315 |
| KiEi | 2003_0 | 46 | 10°33'32.00" | 49°13'45.00" | 467 | 8,5 | 744 | 40 | Sandstein | Stagnosol | 3 | 180 |
| KiEi | 2003_1 | 46 | 10°33'31.00" | 49°13'43.00" | 467 | 8,5 | 744 | 40 | Sandstein | Stagnosol | 2 | 180 |
| KiEi | 2007_1 | 82 | 14°03'59.00" | 52°53'39.40" | 27 | 9,4 | 558 | 29 | Sand | Cambisol | 0 | |

(i) Auf welchem Zuwachsniveau bewegen sich Rein- und Mischbestände dieser Baumarten auf ausgewählten Standorten in Deutschland?

(ii) Wie stark brechen die Bestandeszuwächse in Rein- und Mischbeständen in Trockenjahren ein?

(iii) Weichen die mittleren Zuwächse und/oder die Zuwächse in Trockenjahren statistisch gesichert von den Ertragstafeln oder dem langfristigen Wachstumstrend ab?

Die Ergebnisse werden in ihrer Bedeutung für das Biomonitoring, die Bestandesökologie und die praktische Bestandesbehandlung diskutiert.

2. MATERIAL UND METHODEN

2.1 Material

2.1.1 Triplets aus Rein- und Mischbeständen als Datengrundlage

Um verallgemeinerbare Aussagen über das Wachstum von Mischbeständen aus Fichte und Buche, Kiefer und Buche und Kiefer und Eiche zu erhalten, wurden in den vergangenen Jahren insgesamt 76 Triplets, jeweils bestehend aus Rein- und Mischbeständen der genannten Baumarten angelegt. Die Anlage erfolgte im Rahmen von DFG- und EU-Projekten (siehe Danksagung). Die Anlagen überspannten die meisten europäischen Länder, um einen möglichst weiten Gradienten verschiedener Standortbedingungen abzudecken. Für die folgende Untersuchung wurden die insgesamt 18 in Deutschland angelegten Triplets ausgewählt (*Tabelle 1*). Die Höhenlage der in der vorliegenden Untersuchung einbezogenen Beobachtungsflächen variiert zwischen 27 und 620 m über NN, die Jahresmitteltemperatur beträgt 8,0° bis 10,0° Celsius und der Jahresniederschlag 503 mm bis 1200 mm pro Jahr.

Die zu einem Triplet gehörigen Rein- und Mischbestände sind mehr oder weniger gleichaltrig (Altersunterschied bis maximal 10 Jahre), voll bestockt und vergleichbar hinsichtlich der Standortbedingungen, so dass beim Vergleich Unterschiede im Standort und in der bewirtschaftungsbedingten Bestockungsdichte weitgehend eliminiert und etwaige Mischungseffekte aufgedeckt werden können (STECKEL et al., 2019). Die letzten Eingriffe, falls vorhanden, liegen lange zurück, so dass alle Parzellen eine maximale Bestandesdichte repräsentieren. Ein geeigneter Anzeiger für die Annäherung an die maximale Dichte und ein Wachstum entlang der self-thinning-Linie ist das Vorkommen von Bäumen, die aufgrund von Konkurrenz absterben (PRETZSCH und BIBER, 2005).

Jedes Triplet besteht aus drei Parzellen. Diese weisen eine Flächengröße von 0,10–0,47 ha auf und repräsentieren Reinbestände der Art A und B sowie einen Mischbestand aus diesen Arten (A+B). Die Baumarten waren überwiegend einzeln oder truppweise gemischt und hatten etwa gleiche Mischungsanteile (vgl. *Tabelle 2*, Spalte 9). Für alle Bäume ab einem Brusthöhendurchmesser von 7 cm wurden neben Baumnummer, Baumart, Brusthöhendurchmesser und 4 Kronenablotungen (Nord, Ost, Süd und West) auch die Stammfußkoordinaten erfasst. Die Messung von Einzelbaum- und Kronenansatzhöhen erfolgte auf Basis einer repräsentativen

Stichprobe, so dass die Bestandesvorräte und Kronenindizes ermittelt werden können. Zur retrospektiven Berechnung des Bestandeszuwachses erfolgt zusätzlich eine Stockinventur, bei der noch vorhandene Stöcke nach Entnahmezeitpunkten eingeordnet und deren zugehöriger Brusthöhendurchmesser geschätzt wurde. Hierbei wurden artspezifische Funktionen zwischen $d_{1,30}$ und d_{Stock} aus Messungen stehender Bäume abgeleitet.

Die jährlichen Zuwachsanalysen decken mit 1997–2017 einen Zeitraum ab, in dem wiederholt Trockenjahre (z.B. 2003, 2015) aufgetreten sind. Für diese Flächen liegen im Unterschied zu den periodischen Zuwächsen, die aus langfristigen Versuchsflächen stammen, oder aus Wiederholungsinventuren abgeleitet werden, über 20 Jahre, jährliche Bestandeszuwächse der jeweiligen Rein- und Mischbestände vor. Deshalb eignen sie sich sowohl für Analysen des aktuellen Zuwachstrends im Vergleich zu Ertragstafeln, als auch zur Abschätzung der absoluten Einbußen am Bestandeszuwachs und schließlich für den Vergleich der Stressreaktionen der Baumarten in Rein- bzw. Mischbeständen.

2.2 Methoden der Bohrkernanalysen und Datenaufbereitung

2.1.2 Bohrkernanalysen

An einer Stichprobe von 15–20 Bäumen je Art und Parzelle erfolgten Zuwachsbohrungen aus jeweils nördlicher und östlicher Himmelsrichtung. Da größtenteils Kernbohrungen vorliegen, liefern die Bohrkernpräzise Altersangaben und Einblick in die Zuwachsentwicklung der zurückliegenden Jahrzehnte. Die retrospektive Analyse der Bohrkernpräzise erfolgte im Jahrringmesslabor. Für die weitere Auswertung des jährlichen Baum- und Bestandeszuwachses wurden die gemessenen Zeitreihen synchronisiert und die Mittelwerte der beiden Bohrkernpräzise je Baum verwendet. Die Bohrkernentnahmen erfolgten so über das Durchmesserspektrum der Bäume der Bestände verteilt, dass sie zur Hochrechnung auf den Zuwachs des Bestandes geeignet waren. Es erfolgte also eine Hochrechnung von den Zuwachsdaten der beprobten Einzelbäume auf den Zuwachs des Bestandes insgesamt; die Methode der Hochrechnung wird im Folgenden beschrieben.

2.1.3 Auswertung der Inventur und Zuwachsdaten

Basierend auf den Bestandesinventuren und Bohrkernanalysen erfolgte die Rekonstruktion der Zuwachsgänge aller Einzelbäume für die vergangenen 20 Jahre und der zurückliegenden Bestandesentwicklung nach dem von HEYM et al. (2017, 2018) entwickelten Verfahren.

Hierbei wird zunächst auf Basis der Jahrringdaten der zu erwartende jährliche Durchmesserzuwachs für einen gegebenen Brusthöhendurchmesser mittels linearer Regression berechnet. Die Gleichung der Form $\ln(zd_{\text{Jahr}}) = a_0 + a_1 \times \ln(d_{\text{Jahr}})$ schätzt dabei den Durchmesserzuwachs einer Vegetationsperiode auf Basis des Brusthöhendurchmessers am Ende dieser Periode, z.B. für das Jahr 2013: $\ln(zd_{2013}) = a_0 + a_1 \times \ln(d_{2013})$. Die Regressionskoeffizienten a_0 und a_1 repräsentieren die

Y-Achsenabschnitte bzw. Steigungen der jahresweise berechneten Durchmesserzuwachs-Durchmesser-Beziehungen und wurden hierbei für jede Baumart und Parzelle berechnet; aufgrund der großen Anzahl von Regressionskoeffizienten a_0 und a_1 (Anzahl Parzellen \times Anzahl der Jahre \times Anzahl der Parameter), werden diese nicht im Einzelnen tabellarisch dargestellt. Auf der Grundlage dieser zd-d-Beziehungen können die Durchmesserzuwächse aller Bäume, also auch die Zuwächse der Bäume, von denen keine Bohrkerne entnommen wurden, in den jeweiligen Zuwachsperioden geschätzt werden. Die Durchmesser d ergeben sich hierbei als $d_{\text{Jahr}-1} = d_{\text{Jahr}} - z d_{\text{Jahr}}$, z. B. für $d_{2016} = d_{2017} - z d_{2017}$. Dabei steht d_{2017} für den Stammdurchmesser am Ende der Vegetationsperiode des Jahres 2017 und $z d_{2017}$ für den Durchmesserzuwachs im Jahr 2019. Von allen über Bohrkernentnahmen beprobten Bäumen, wurden die gemessenen Jahrringbreiten für die Durchmesserrekonstruktion verwendet. Zusätzlich wird bei diesem Verfahren der Zuwachs der Rindenstärke mittels baumartenspezifischer Funktionen (Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, 2018, S. 269) berücksichtigt.

In einem zweiten Schritt erfolgte die jährliche Höhenrekonstruktion mittels einer Einheitshöhenkurve der Form

$$h_{\text{Jahr}} = 1.3 + \left(\frac{\text{bhd}_{\text{Jahr}}}{a \times \text{bhd}_{\text{Jahr}} + b} \right)^3$$

(PETTERSON, 1955).

Die Parameter a und b werden hierbei in Abhängigkeit der Baumart, deren jährlichen quadratischen Mitteldurchmesser dg (basierend auf den rekonstruierten Durchmessern) sowie dem zugehörigen Alter abgeleitet (KENNEL, 1972; FRANZ et al., 1973). Die Berechnung erfolgte für die Jahre der Durchmesserrekonstruktion.

Das individuelle jährliche Einzelbaumvolumen (Derbholz mit Rinde) wurde mittels baumartenspezifischen Formhöhen-Funktionen von FRANZ (1971) abgeleitet.

2.1.4 Vorbereitung der Daten

Alle für die Analyse notwendigen Bestandeskennwerte, wie der quadratische Mitteldurchmesser (dg), der Durchmesser der 100 stärksten Bäume pro Hektar (do), die Höhe des Grundflächenmittelstammes (hg) und die Oberhöhe (ho), die Bestandesgrundfläche (G) und der stehende Vorrat an Derbholz (V) wurden nach der DESER-Norm berechnet (JOHANN, 1993; PRETZSCH 2009, pp. 181–222). Die Berechnung erfolgte für den jeweiligen Aufnahmezeitpunkt sowie retrospektiv und auf jährlicher Basis, für die letzten 20 Jahre. Die jährlichen Grundflächenzuwächse (IG) und ebenso die Volumenzuwächse (ZV) ließen sich nun folgendermaßen für jedes Jahr berechnen: $ZG_i = G_i - G_{i-1} + G_{i,\text{ausscheidend}}$ beziehungsweise $ZV_i = V_i - V_{i-1} + V_{i,\text{ausscheidend}}$. Der Index i bezeichnet hierbei ein konkretes und $i-1$ das vorangegangene Jahr. Die ausscheidende Grundfläche $G_{\text{ausscheidend}}$ und der ausscheidende Vorrat $V_{\text{ausscheidend}}$ repräsentieren die natürlich ausgefallenen Bäume und wurden aus Stock-

analysen abgeleitet. Alle Angaben zum stehenden Volumen und zum Volumenzuwachs beziehen sich auf das Derbholzvolumen (ab 7 cm) mit Rinde.

Tabelle 2 zeigt die Bestandeskennwerte für die 18 Triplets aus Rein- und Mischbeständen (5 Triplets aus Fichte/Buche, 7 Triplets aus Kiefer/Buche und 6 Triplets aus Kiefer/Eiche). Die mittleren Bestandeskennwerte sind jeweils für die Reinbestände, für die beteiligten Arten in den Mischbeständen und die Mischbestände insgesamt angegeben. Die Mittelwerte (mittel) sind normal gesetzt, während die Bandbreite (min-max) in Kursivschrift angegeben ist.

2.2 Methoden der Datenauswertung

Der rekonstruierte Volumenzuwachs (ZV) der Bestände sollte mit den Erwartungswerten der jeweiligen Ertragstafeln verglichen werden. Zu diesem Zweck wurden die ZV -Werte der verschiedenen Bonitäten der Ertragstafeln digitalisiert und über die bewährte Zuwachsfunktion

$$\ln(ZV_{\text{ET}}) = a_0 + a_1 \times \ln(\text{Alter}) + a_2 \times (\ln(\text{Alter}))^2 \quad (1)$$

(ASSMANN und FRANZ, 1965) ausgeglichen. Tabelle 3 zeigt die Parameter a_0 , a_1 und a_2 gesondert nach Ertragstafeln, und verwendeten Bonitäten. Die Tabelle enthält nur die Regressionskoeffizienten für jene Bonitäten, die die Probestflächen haben. Alle Bestände lagen in den Höhenbonitäten in der oberen Hälfte der Bonitätsfächer der entsprechenden Ertragstafelwerke. Die Modellgleichungen wurden zum einen für die grafische Darstellung der Ergebnisse verwendet (Abbildung 1). Zum anderen dienten die Altersverläufe der jährlichen Volumenzuwächse als Referenzwerte für die Ableitung der relativen Abweichungen der auf den Triplets gemessenen Bestandeszuwächse von den jeweiligen Ertragstafeln.

Für die Reinbestände wurde der jährliche Volumenzuwachs in definiertem Alter über die Gleichung 1 mit den Parametern der jeweiligen Ertragstafeln und Bonitäten berechnet. Für die Mischbestände wurde das mit den Mischungsanteilen gewichtete Mittel aus den Volumenzuwächsen der jeweiligen Ertragstafel berechnet ($ZV_{\text{ET,Misch}} = ZV_{\text{ET,Art}_1} \times m_1 + ZV_{\text{ET,Art}_2} \times m_2$). Die wirklichen Bestandeszuwächse aus den Bohrkernanalysen wurden dann in Relation zu den Ertragstafelzuwächsen gesetzt. Durch Division der gemessenen jährlichen Zuwächse, ZV , durch die Zuwächse der entsprechenden Ertragstafel ZV_{ET} ergaben sich die relativen jährlichen Zuwächse

$$ZV_{\text{rel}} = ZV_{\text{beob}} / ZV_{\text{ET}} \quad (2)$$

im Vergleich zur Ertragstafel.

Die relativen Zuwachswerte sind damit vom Alterstrend bereinigt und eignen sich für Trendanalysen. Aus den relativen Abweichungen ZV_{rel} der letzten $i = 1 \dots 20$ Jahre wurden Kennwerte für das Zuwachsverhalten der Bestände in Relation zur Ertragstafel berechnet. Diese Kennwerte quantifizieren die mittleren Abweichungen des Bestandeszuwachses von den Ertragstafeln und den langfristigen Trend im Vergleich zu den Ertragstafeln, sowie die Zuwachsverluste in Trockenjahren im Ver-

Tab. 2

Bestandeskennwerte für die 18 Triplets aus Rein- und Mischbeständen. Insgesamt wurden in Deutschland 5 Triplets aus Fichte/Buche (Fi und Bu), 7 aus Kiefer/Buche (Ki und Bu) und 6 aus Kiefer/Eiche (Ki und Ei) angelegt.

Die mittleren Bestandeskennwerte sind jeweils für die Reinbestände (Bu, Fi und Ki), für die Arten in den Mischbeständen (Bu_{misch} , Fi_{misch} und Ki_{misch}), und die Mischbestände (Fi+Bu, Ki+Bu und Ki+Ei) insgesamt angegeben.

Die Mittelwerte (mittel) sind normal gesetzt, während die Bandbreite (min-max) in Kursivschrift angegeben ist.

N, Baumzahl (ha^{-1}); dg, Durchmesser des Grundflächenmittelstammes (cm); hg, Höhe des Grundflächenmittelstammes (m); G, Bestandesgrundfläche ($m^2 ha^{-1}$); V, stehender Vorrat ($m^3 ha^{-1}$); SDI, Bestandesdichteindex (ha^{-1});

Mischungsanteil (%); Bonität: absolute Mittelhöhenbonität im Alter 100 (m) nach ASSMANN und FRANZ 1963 (Fichte),

SCHÖBER 1967 (Buche), WIEDEMANN 1943 (Kiefer) und JÜTTNER 1955 (Eiche); PAZG, mittlerer periodischer

Grundflächenzuwachs in den letzten 20 Jahren ($m^2 ha^{-1} Jahr^{-1}$); PAZV, mittlerer periodischer Volumenzuwachs

in den letzten 20 Jahren ($m^3 ha^{-1} Jahr^{-1}$).

Overview of the stand characteristics of the 18 triplets of mono-specific and mixed-species stands of Norway spruce/European beech (Fi and Bu), Scots pine/European beech (Ki and Bu), and Scots pine/ sessile oak (Ki and Ei) included in this analysis. Average stand characteristics for the monospecific (Bu, Fi and Ki), for the species in mixed

(Bu_{misch} , Fi_{misch} and Ki_{misch}) and for the total mixed (Fi+Bu, Ki+Bu and Ki+Ei) stands. Explanation of variables:

Baumart, species (composition); Alter, average stand age of the triplet (years); N, tree number (ha^{-1}); dg, quadratic mean diameter (cm); hg, quadratic mean height (m); G, stand basal area ($m^2 ha^{-1}$); V standing volume ($m^3 ha^{-1}$);

SDI, stand density index (trees ha^{-1}); Mischungsanteil, mixing proportion based on the basal area of species in

mixed stands (%); Bonität: quadratic mean height at age 100 based on ASSMANN und FRANZ 1963 (Norway spruce),

SCHÖBER 1967 (European Beech), WIEDEMANN 1943 (Scots pine) and JÜTTNER 1955 (sessile oak); PAZG, mean periodic

stand basal area growth ($m^2 ha^{-1} Jahr^{-1}$); PAZV, mean periodic annual volume growth ($m^3 ha^{-1} Jahr^{-1}$).

| Baumart | Alter | N | dg | hg | G | V | SDI | Mischungsanteil | Bonität | PAZG | PAZV |
|---------------------|---------|-----------------|------------------|------------------|-------------------|--------------------|-----------------|-----------------|------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| | (Jahre) | (ha^{-1}) | (cm) | (m) | ($m^2 ha^{-1}$) | ($m^3 ha^{-1}$) | (ha^{-1}) | (%) | (m) | ($m^2 ha^{-1} Jahr^{-1}$) | ($m^3 ha^{-1} Jahr^{-1}$) |
| Fi+Bu | | 494 | | | 40,7 | 590 | 734,5 | | | 0,9 | 17,1 |
| | | <i>337-670</i> | | | <i>35,6-43,7</i> | <i>450,1-741</i> | <i>701-753</i> | | | <i>0,5-1,7</i> | <i>11,1-25,4</i> |
| Fi_{misch} | 80 | 470 | 36,4 | 30,6 | 48 | 702 | 847,9 | 0,44 | | 1,1 | 18,3 |
| | 65-95 | <i>402-614</i> | <i>31,7-44,1</i> | <i>27-34,8</i> | <i>39,6-61,6</i> | <i>538,7-979</i> | <i>726-1000</i> | <i>0,3-0,6</i> | | <i>0,4-2,0</i> | <i>10,5-29,3</i> |
| Bu_{misch} | 80 | 504 | 31,4 | 27,8 | 35 | 517 | 657,6 | 0,56 | | 0,9 | 16,5 |
| | 65-95 | <i>304-829</i> | <i>23,7-37,7</i> | <i>23,9-33,7</i> | <i>29,7-42</i> | <i>369,1-619,3</i> | <i>574-762</i> | <i>0,4-0,7</i> | | <i>0,3-2,0</i> | <i>8,4-31,5</i> |
| Fi | 62 | 701 | 31,2 | 27,1 | 51 | 673 | 954,7 | | 35,7 | 1,4 | 22,4 |
| | 55-75 | <i>463-952</i> | <i>24-35,9</i> | <i>22,2-31,3</i> | <i>43,2-63</i> | <i>475,9-919,2</i> | <i>827-1178</i> | | <i>31,1-35,3</i> | <i>0,4-2,4</i> | <i>12,1-34,5</i> |
| Bu | 76 | 684 | 27,8 | 25,9 | 38 | 512 | 745,1 | | 32,4 | 0,8 | 15,1 |
| | 59-100 | <i>365-1018</i> | <i>22,4-33,8</i> | <i>21,6-33,4</i> | <i>32,8-45,1</i> | <i>410,9-660,1</i> | <i>593-929</i> | | <i>25,4-35,3</i> | <i>0,3-1,5</i> | <i>9,2-28,4</i> |
| Ki+Bu | | 1281 | | | 38,8 | 414,8 | 859 | | | 1,1 | 14,3 |
| | | <i>409-2628</i> | | | <i>15,8-52,3</i> | <i>149,1-629,5</i> | <i>337-1174</i> | | | <i>0,2-2,0</i> | <i>3,0-27,9</i> |
| Ki_{misch} | 60 | 1101 | 24,4 | 23,2 | 43,9 | 463,0 | 927 | 0,47 | | 1,1 | 14,3 |
| | 45-79 | <i>446-2652</i> | <i>15,6-29,5</i> | <i>20,5-27,4</i> | <i>23,6-61,6</i> | <i>240,2-660,7</i> | <i>473-1258</i> | <i>0,2-0,6</i> | | <i>0,3-2,4</i> | <i>3,4-25,3</i> |
| Bu_{misch} | 60 | 1435 | 18,5 | 21,7 | 34,2 | 377,4 | 794 | 0,53 | | 1,1 | 14,5 |
| | 45-79 | <i>401-2595</i> | <i>13,5-21,9</i> | <i>17,3-26</i> | <i>14,1-46,0</i> | <i>128,6-598,5</i> | <i>307-1117</i> | <i>0,4-0,8</i> | | <i>0,2-2,2</i> | <i>2,6-30,1</i> |
| Ki | 62 | 1484 | 20,5 | 20,6 | 41,5 | 387,4 | 938 | | 28,3 | 1,2 | 13,2 |
| | 45-79 | <i>286-2368</i> | <i>13,8-33,2</i> | <i>15,5-26,2</i> | <i>23,4-61,8</i> | <i>161,6-580,5</i> | <i>450-1426</i> | | <i>14,9-37,5</i> | <i>0,3-2,3</i> | <i>2,9-24,4</i> |
| Bu | 60 | 1499 | 18,3 | 22,2 | 33,7 | 371,2 | 794 | | 32,7 | 1,0 | 13,3 |
| | 50-79 | <i>300-2350</i> | <i>14,2-29,5</i> | <i>18,1-25,9</i> | <i>20,6</i> | <i>205,5-532,6</i> | <i>392-1266</i> | | <i>21,0-43,1</i> | <i>0,2-2,3</i> | <i>4,5-24,6</i> |
| Ki+Ei | | 1043 | | | 43,0 | 455 | 991 | | | 0,9 | 11,4 |
| | | <i>603-2071</i> | | | <i>36,8-52,9</i> | <i>362,8-512,9</i> | <i>789-1244</i> | | | <i>0,5-1,8</i> | <i>6,9-19,5</i> |
| Ki_{misch} | 84 | 1027 | 27,2 | 24,1 | 47,0 | 501,8 | 1028 | 0,55 | | 0,5 | 6,4 |
| | 50-105 | <i>455-2097</i> | <i>19,5-34,2</i> | <i>20,8-28,4</i> | <i>40,5-62,7</i> | <i>400,0-589,7</i> | <i>751-1409</i> | <i>0,5-0,6</i> | | <i>0,1-1,2</i> | <i>2,2-12,9</i> |
| Ei_{misch} | 84 | 1100 | 24,1 | 21,6 | 38,6 | 400 | 968 | 0,45 | | 0,4 | 5,0 |
| | 50-105 | <i>746-2048</i> | <i>16,6-29,3</i> | <i>15,9-24,7</i> | <i>30,6-47,5</i> | <i>299,1-517,0</i> | <i>752-1322</i> | <i>0,4-0,5</i> | | <i>0,2-0,7</i> | <i>2,4-9,1</i> |
| Ki | 83 | 1062 | 26,1 | 21,9 | 41,8 | 405,1 | 928 | | 25,8 | 0,8 | 9,8 |
| | 45-110 | <i>421-2249</i> | <i>18,2-35</i> | <i>18,6-27,2</i> | <i>29,3-58,6</i> | <i>333,8-502,5</i> | <i>670-1354</i> | | <i>19,8-30,8</i> | <i>0,3-2,2</i> | <i>4,5-20,9</i> |
| Ei | 83 | 906 | 25,8 | 22,6 | 38,4 | 444,2 | 865 | | 25,6 | 0,9 | 11,0 |
| | 40-115 | <i>576-1370</i> | <i>17,1-33,7</i> | <i>17,6-27,9</i> | <i>30,4-50,6</i> | <i>268,3-647,7</i> | <i>738-1019</i> | | <i>19,3-31,3</i> | <i>0,4-1,7</i> | <i>6,3-16,8</i> |

gleich zum langfristigen Trend und zu den Ertrags- tafeln. Im Einzelnen wurden folgende Indizes berechnet.

MZVREL: Arithmetischer Mittelwert des beobachteten jährlichen Volumenzuwachse in Relation zum entsprechenden Volumenzuwachs der jeweiligen Ertragstafel.

Ein Wert von MZVREL = 1,25 bedeutet beispielsweise eine Überlegenheit der Bestände gegenüber den Ertragstafeln von 25 %.

SZVREL: Dieser Kennwert bezeichnet die Steigung b0 der linearen Regression $ZV_{\text{rel}} = b_0 + b_1 \times \text{Alter}$. Eine

Tab. 3

Übersicht über die in dieser Untersuchung verwendeten Ertragstafeln und hergeleiteten Regressionskoeffizienten a_0 , a_1 und a_2 der Funktionen für den laufenden jährlichen Volumenzuwachs ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{Jahr}^{-1}$), ZV, verschiedener Bonitäten (relative Bonitäten I-IV. und absolute Bonitäten M14-M40) der Baumarten Fichte, Kiefer, Buche und Eiche. Die Regressionskoeffizienten gelten für die Zuwachsfunktionen $\ln(\text{ZV}_{\text{ET}}) = a_0 + a_1 \times \ln(\text{Alter}) + a_2 \times (\ln(\text{Alter}))^2$. ZV_{ET} , jährlicher Volumenzuwachs eines Bestandes; Alter, Bestandesalter.

Overview of the applied yield tables and the derived regression coefficients a_0 , a_1 and a_2 of the function $\ln(\text{IV}_{\text{yt}}) = a_0 + a_1 \times \ln(\text{age}) + a_2 \times (\ln(\text{age}))^2$ for predicting the annual stand volume growth (in $\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$) of Norway spruce, Scots pine, European beech and Sessile oak in dependence of stand age. The coefficients were calculated for different site conditions (relative site indexes I-IV. resp. absolute site indexes M14-M40). ZV_{ET} , annual volume growth of yield table; Alter, stand age.

| Baumart | Ertragstafel | Bonität | $\ln(\text{ZV}_{\text{ET}}) = a_0 + a_1 \times \ln(\text{Alter}) + a_2 \times (\ln(\text{Alter}))^2$ | | |
|---------|--|---------|--|---------|---------|
| | | | a_0 | a_1 | a_2 |
| Fichte | Wiedemann (1936/42), mä. Df. | I. | -8.6093 | 5.9005 | -0.7607 |
| Fichte | | II. | -19.7531 | 11.1242 | -1.3786 |
| Fichte | | III. | -35.2381 | 18.0916 | -2.1645 |
| Fichte | Assmann u. Franz (1963), gest. Df. | M40 | -6.2030 | 5.0937 | -0.6883 |
| Fichte | | M36 | -8.4997 | 6.1178 | -0.8116 |
| Fichte | | M32 | -11.2624 | 7.3173 | -0.9509 |
| Fichte | | M28 | -14.5234 | 8.6820 | -1.1026 |
| Fichte | | M24 | -18.4176 | 10.2406 | -1.2667 |
| Fichte | | M20 | -23.1868 | 12.0695 | -1.4494 |
| Kiefer | Wiedemann (1943), mä. Df. | I. | -1.5688 | 2.4764 | -0.3774 |
| Kiefer | | II. | -2.7635 | 2.8989 | -0.4208 |
| Kiefer | | III. | -1.8715 | 2.2707 | -0.3356 |
| Kiefer | Lembcke, Knapp, Dittmar (1975) mä. Df. | M34 | -3.4286 | 3.5090 | -0.4974 |
| Kiefer | | M30 | -3.7720 | 3.5712 | -0.5012 |
| Kiefer | | M26 | -3.8879 | 3.5120 | -0.4904 |
| Kiefer | | M22 | -4.1349 | 3.5000 | -0.4850 |
| Kiefer | | M18 | -4.4320 | 3.4788 | -0.4768 |
| Kiefer | | M14 | -4.0222 | 3.0907 | -0.4251 |
| Buche | Schober (1967) mä. Df. | I. | -16.0593 | 8.4028 | -0.9505 |
| Buche | | II. | -17.2764 | 8.8316 | -0.9931 |
| Buche | | III. | -18.8359 | 9.9170 | -1.0558 |
| Eiche | Jüttner (1955) mä. Df. | I. | -4.3476 | 3.2313 | -0.4005 |
| Eiche | | II. | -5.5313 | 3.6388 | -0.4424 |
| Eiche | | III. | -12.9724 | 6.6319 | -0.7532 |
| Eiche | Erteld (1961) mä. Df. | I. | -5,2399 | 3,7022 | -0,4583 |
| Eiche | | II. | -7,6399 | 4,6656 | -0,5647 |
| Eiche | | III. | -10,1333 | 5,5651 | -0,6530 |
| Eiche | Jüttner (1955) mä. Df. | IV. | -25,3520 | 12,1008 | -1,3712 |

Steigung von $b_0 = 1,2$ bedeutet beispielsweise, dass der relative Zuwachs in der betrachteten zwanzigjährigen Periode durchschnittlich um 20 % pro Jahr über das Niveau der Ertragstafel angestiegen ist.

MINZVREL: Hierbei handelt es sich um den relativen Zuwachs in dem Jahr, in dem der beobachtete relative Volumenzuwachs das Zuwachsniveau der Trendregression am stärksten unterschreitet. Zu solchen maximalen Unterschreitungen kam es in den Trockenjahren 2003 und 2015. Ein Wert von $\text{MINZVREL} = 0,80$ zeigt an, dass der jährliche Zuwachs in einem solchen ungünstigen Jahr um 20 % unter dem langfristigen Trend liegt.

TZVREL: Für das Jahr mit der stärksten Unterschreitung des langfristigen Trends, also für das Jahr für das MINZVREL gilt, wurde der Kennwert TZVREL berechnet. Dieser Wert stellt den relativen Volumenzuwachs in

Relation zur Ertragstafel in diesem Extremjahr dar. Ein Wert von $\text{TZVREL} = 1,10$ zeigt an, dass der jährliche Volumenzuwachs in diesem Extremjahr (z.B. Trockenjahr 2003 oder 2015) noch immer um 10 % über dem Niveau der Ertragstafel lag. Die genannten vier Kennwerte wurden gesondert für Rein- und Mischbestände ermittelt (vgl. *Tabelle 4*).

2.2.1 Statistische Prüfungen

Um die Zuwachsverläufe weiter zu analysieren und Rein- und Mischbestände miteinander zu vergleichen, wurden zwei Variationen des t-Tests gerechnet. Bei beiden Varianten enthielten die Modelle lme (Mittelwert ~ Gruppe, random = ~1|Triplet) auf der Ebene der Triplets Zufallseffekte, um eventuelle statistische Abhängigkeiten zwischen den plots der Triplets zu berücksichtigen.

Zum einen wurde mit dem Einstichproben t-Test geprüft, ob die Kennwerte MZVREL, SZVREL, MINZVREL und TZVREL der Rein- und Mischbestände den zu erwartenden Werten der Ertragstafeln gleichen (Tabelle 4). Für die Kennwerte MZVREL, MINZVREL und TZVREL wurde geprüft, ob sie vom Wert 1 abweichen. Als Nullhypothese wurde angenommen, dass die Kenn-

werte im Durchschnitt nicht von jenen der betreffenden Ertragstafel verschieden sind (MZVREL = 1,0), dass die relativen Zuwächse in Trockenjahren nicht vom langfristigen Trend abweichen (MINZVREL = 1,0) und die Volumenzuwächse in Trockenjahren nicht von der betreffenden Ertragstafel abweichen (TZVREL = 1,0). Für die Steigung des relativen Volumenzuwachses

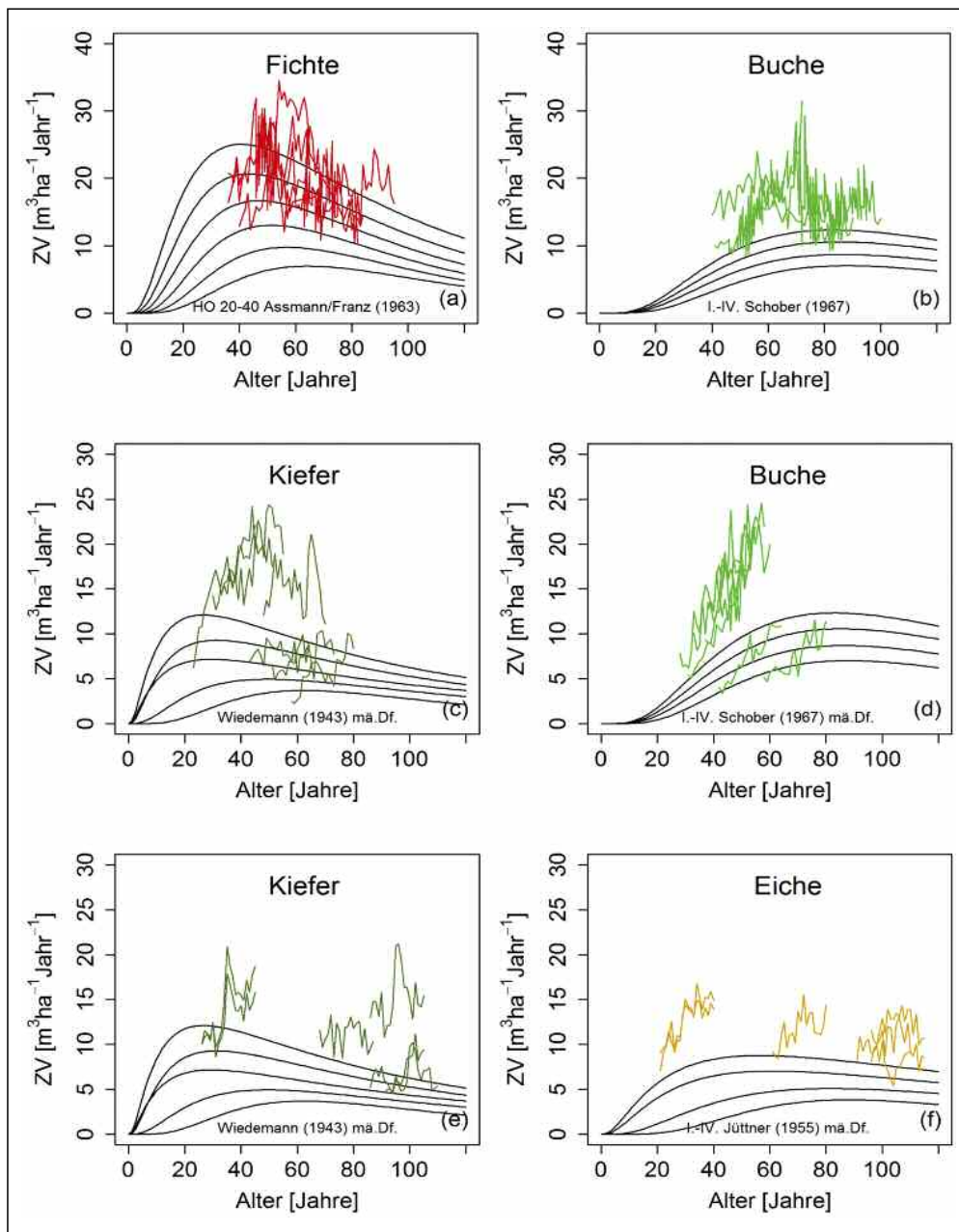


Abb. 1

Verlauf des absoluten jährlichen Volumenzuwachses (Vorratsfestmeter Derbholz mit Rinde $\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{Jahr}^{-1}$) in den Reinbeständen der Triplets aus (a und b) Fichte und Buche, (c und d) Kiefer und Buche und (e und f) Kiefer und Eiche im Zeitraum 1997–2018 im Vergleich zu den Ertragstafeln von ASSMANN und FRANZ (1963, HO 20-40), SCHOBER (1967, I.-IV.), WIEDEMANN (1943, I.-V.) und JÜTTNER (1955, I.-IV.).

Courses of the absolute annual volume growth (merchantable wood with > 7 cm at the smaller end and bark) of mono-specific stands of the triplets of (a and b) Norway spruce and European beech, (c and d) Scots pine and European beech, and (e and f) Scots pine and sessile oak in the period 1997–2018 compared with the courses of the yield tables for moderate thinning by ASSMANN and FRANZ (1963, HO 20-40), SCHOBER (1967, I.-IV.), WIEDEMANN (1943, I.-V.), and JÜTTNER (1955, I.-IV.).

wurde geprüft, ob sie parallel zur x-Achse verläuft (SZVREL = 0,0), was auf eine gleichbleibende Abweichung vom Ertragstafelverlauf hindeuten würde.

Zum anderen wurde mit dem Zwei-Stichproben t-Test geprüft, ob sich die Kennwerte MZVREL, VKZVREL, SZVREL, MINZVREL oder TZVREL von Rein- und Mischbeständen unterscheiden. In Tabelle 5 werden die fixen Effekte berichtet.

Für alle Auswertungen wurde das Programm R (R Core Team 2019) verwendet.

3. ERGEBNISSE

Tabellen 1 und 2 geben eine Übersicht über die Standorteigenschaften und Bestandescharakteristika der in die Untersuchung einbezogenen Rein- und Mischbestände. Die Bestände repräsentieren ein relativ breites Spektrum von Standorten unterschiedlicher Qualität (Bonitäten I.-III. bzw. M17-M35) und Bestandesdichten (SDI-Werte von 337-1426). Entsprechend stark variieren die mittleren jährlichen Volumenzuwächse ($2,6\text{--}34,5\text{ m}^3\text{ ha}^{-1}\text{ Jahr}^{-1}$). Zu Tiefstwerten der jährlichen Zuwächse

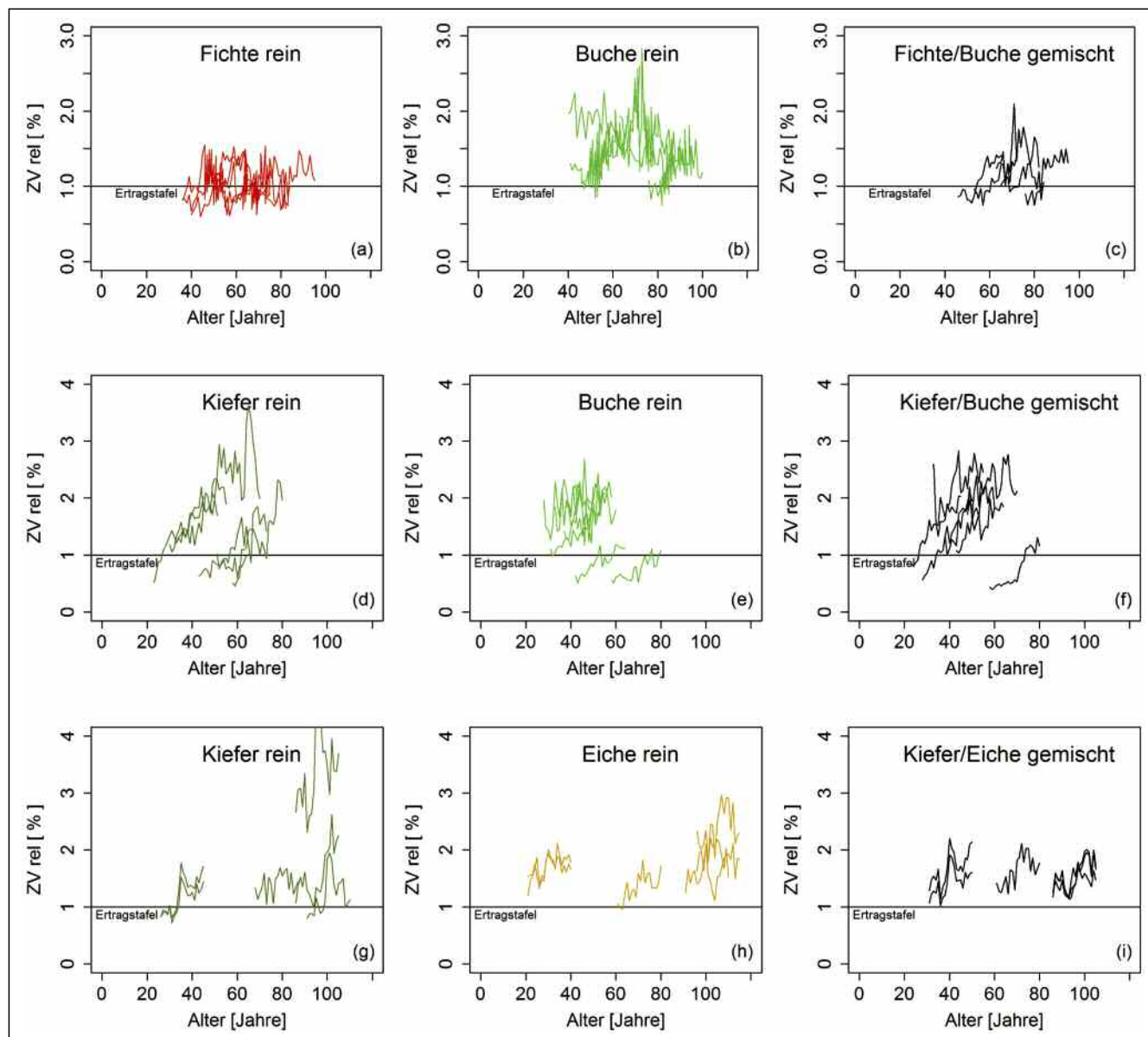


Abb. 2

Verlauf des relativen jährlichen Volumenzuwachses der Rein- und Mischbestände der Triplets aus (a-c) Fichte und Buche, (d-f) Kiefer und Buche und (g-i) Kiefer und Eiche im Zeitraum 1997–2018 im Vergleich zu den Ertragstafeln (1.0-Linie) von WIEDEMANN (1943), WIEDEMANN (1936/42), SCHOBER (1967) bzw. JÜTTNER (1955), jeweils für mäßige Durchforstung.

Courses of the relative annual volume growth of the mono-specific and mixed-species stands of the triplets of (a-c) Norway spruce and European beech, (d-f) Scots pine and European beech, and (g-i) Scots pine and sessile oak in the period 1997–2018 compared with the courses of the yield tables (1.0-line) for moderate thinning by WIEDEMANN (1943), WIEDEMANN (1936/42), SCHOBER (1967), and JÜTTNER (1955), respectively.

kommt es vor allem in Trockenjahren (z.B. 2003 oder 2015). In den Entwicklungsgängen der Zuwächse (*Abbildung 1*) sind diese Trockenjahre durch abwärts gerichtete Zuwachsausschläge sichtbar.

3.1 Wirkliche Bestandeszuwächse im Vergleich zu den Ertragstafeln

Abbildung 1 zeigt die gemessenen jährlichen Volumenzuwächse der Reinbestände auf den Triplets im Vergleich zu den Zuwächsen der jeweiligen Ertragstafeln. Bei der Fichte (*Abbildung 1a*) stehen die gemessenen und erwarteten absoluten Zuwächse noch am ehesten im Einklang. Bei der Buche (*Abbildung 1, b und d*) bestehen sowohl auf den Triplets aus Fichte und Buche als auch auf den Triplets aus Kiefer und Buche zumeist große Abweichungen von den Ertragstafeln. Die meisten Bestände zeigen ein erhöhtes Zuwachsniveau und einen deutlichen Aufwärtstrend des Zuwachses im Vergleich zu den Ertragstafeln. Selbst die abwärts gerichteten Zuwachsausschläge in Trockenjahren unterschreiten zumeist nicht den Rahmen der Ertragstafel. Auch bei der Kiefer (*Abbildung 1, c und e*) sind Aufwärtstrends im Zuwachs und deutliche positive Abweichungen von den Ertragstafeln zu erkennen. In den letzten Jahren werden diese positiven Trends allerdings von Jahren mit geringen Zuwächsen unterbrochen. Ebenfalls positiv stellen sich das Niveau und der Trend bei der Eiche dar (*Abbildung 1f*). Auch hier überschreiten die Zuwächse die Ertragstafel, sind aufwärtsgerichtet und wurden kaum von den zurückliegenden Trockenjahren 2003 und 2015 reduziert.

Der Blick auf *Abbildung 2* zeigt, dass die jährlichen Volumenzuwächse der Rein- und Mischbestände in Relation zu den jeweiligen Ertragstafeln (1,0 Linie) meistens

höher liegen und einen steigenden Trend aufweisen. Für jede der einbezogenen Parzellen wurde der ihrer Höhenbonität entsprechende Volumenzuwachs der Ertragstafel als Referenz (1,0 Linie) gewählt; deshalb lassen sich die Ergebnisse jeder Tripletserie (d.h. Fichte/Buche, Kiefer/Buche und Kiefer/Eiche) jeweils in Grafiken zusammenfassend darstellen. In Fichtenreinbeständen (*Abbildung 2a*) schwanken die relativen Zuwächse erheblich, liegen aber im Mittel in etwa auf dem Zuwachsniveau der Ertragstafeln. Die Buchenreinbestände (*Abbildung 2, b und e*) sind im Zuwachs gegenüber der Ertragstafel deutlich erhöht, aber nicht immer mit ansteigender Tendenz. Besonders auffallend sind das erhöhte Zuwachsniveau und die weiteren Zuwachsanstiege bei der Kiefer (*Abbildung 2, d und g*) und Eiche (*Abbildung 2h*) in den Reinbeständen. Die Zuwachsgänge der Mischbestände (*Abbildung 2, c, f und i*) sind ebenfalls gegenüber den Erwartungswerten der Tafeln erhöht und ansteigend; im Vergleich zu den Reinbeständen scheinen die Verläufe aber weniger zu oszillieren.

3.2 Aufwärtsgerichteter Zuwachstrend unterbrochen von Jahren mit niedrigen Zuwächsen

Die Kennwerte MZVREL, SZVREL quantifizieren die mittleren Abweichungen des Bestandeszuwachses von den Ertragstafeln und den langfristigen Trend im Vergleich zu den Ertragstafeln. Die Kennwerte MINZVREL und TZVREL geben Aufschluss über die Zuwachsverluste in Trockenjahren im Vergleich zum langfristigen Trend und zu den Ertragstafeln.

Aus den oberen drei Zeilen von *Tabelle 4* (Mittelwert MZVREL = 1,48) geht hervor, dass die Volumenzuwächse der untersuchten Rein- und Mischbestände im Mittel über alle einbezogenen Parzellen um 48% über den

Tab. 4

Kennwerte für die Entwicklung des Bestandesvolumenzuwachses der Rein- und Mischbestände der Triplets aus Fichte und Buche, Kiefer und Buche und Kiefer und Eiche. Signifikante Abweichungen von den erwarteten Werten (MZVREL=1, SZVREL=0, MINZVREL=1, TZVREL=1) sind fett gesetzt. FG, Freiheitsgrade; MZVREL, mittlere relative Abweichung von der entsprechenden Ertragstafel; SZVREL, Steigungskoeffizient der Abweichung; MINZVREL, relative Abweichung vom Trend im Trockenjahr; TZVREL, relative Abweichung von der Ertragstafel im Trockenjahr. Weitere Erklärungen zu den Variablen werden im Text in Abschnitt 2.2 gegeben.

Characteristics of the stand volume growth of the monospecific and mixed-species stands of the triplets of Norway spruce and European beech, Scots pine and European beech, and Scots pine and sessile oak. Significant deviations from expected values (MZVREL=1, SZVREL=0, MINZVREL=1, TZVREL=1) are set in bold numbers. FG, degrees of freedom; MZVREL, mean relative deviation from the respective yield table; SZVREL, slope of the deviation from the yield table; MINZVREL, relative deviation of the growth in dry year from the trend; TZVREL, relative deviation from the volume growth of yield table. For further explanation of variables see text, section 2.2.

| Triplets | Art | FG | MZVREL H ₀ : mittel=1 | | | SZVREL H ₀ : mittel=0 | | | MINZVREL H ₀ : mittel=1 | | | TZVREL H ₀ : mittel=1 | | |
|----------|------|----|----------------------------------|------|---------|----------------------------------|-------|---------|------------------------------------|------|---------|----------------------------------|------|-------|
| | | | mittel | se | p | mittel | se | p | mittel | se | p | mittel | se | p |
| Mittel | | 53 | 1,48 | 0,07 | <0,0001 | 0,026 | 0,002 | <0,0001 | 0,72 | 0,01 | <0,0001 | 1,07 | 0,05 | 0,126 |
| min | | | 1,05 | | | 0,026 | | | 0,63 | | | 0,78 | | |
| max | | | 1,77 | | | 0,014 | | | 0,81 | | | 1,33 | | |
| FiBu | Fi | 4 | 1,05 | 0,08 | 0,545 | 0,014 | 0,002 | 0,004 | 0,68 | 0,03 | 0,003 | 0,78 | 0,07 | 0,030 |
| FiBu | Bu | 4 | 1,50 | 0,13 | 0,017 | 0,018 | 0,010 | 0,146 | 0,69 | 0,05 | 0,003 | 1,14 | 0,13 | 0,354 |
| FiBu | FiBu | 4 | 1,17 | 0,07 | 0,073 | 0,023 | 0,007 | 0,027 | 0,63 | 0,04 | 0,001 | 0,84 | 0,05 | 0,026 |
| KiBu | Ki | 6 | 1,51 | 0,21 | 0,049 | 0,037 | 0,007 | 0,002 | 0,70 | 0,03 | <0,0001 | 1,14 | 0,22 | 0,560 |
| KiBu | Bu | 6 | 1,47 | 0,19 | 0,043 | 0,018 | 0,007 | 0,032 | 0,73 | 0,04 | 0,001 | 1,04 | 0,15 | 0,778 |
| KiBu | KiBu | 6 | 1,60 | 0,20 | 0,024 | 0,042 | 0,005 | <0,0001 | 0,81 | 0,02 | <0,0001 | 1,09 | 0,16 | 0,606 |
| KiEi | Ki | 5 | 1,66 | 0,35 | 0,118 | 0,037 | 0,007 | 0,004 | 0,72 | 0,02 | <0,0001 | 1,14 | 0,24 | 0,577 |
| KiEi | Ei | 5 | 1,77 | 0,14 | 0,003 | 0,021 | 0,004 | 0,003 | 0,78 | 0,03 | <0,0001 | 1,33 | 0,12 | 0,042 |
| KiEi | KiEi | 5 | 1,56 | 0,04 | <0,0001 | 0,027 | 0,003 | <0,0001 | 0,78 | 0,01 | <0,0001 | 1,16 | 0,04 | 0,008 |

Erwartungswerten der entsprechenden Ertragstafeln liegen. Die minimalen Abweichungen betragen 5% die maximalen Abweichungen 77% (Minimum und Maximum von MZVREL = 1,05 bzw. 1,77). Besonders deutlich sind die positiven Abweichungen von den Ertragstafeln bei Eiche (MZVREL = 1,77), Kiefer (MZVREL = 1,51–1,66) und Buche (MZVREL = 1,47–1,50) ausgeprägt. Die Fichte weicht mit MZVREL = 1,05 am geringsten und nicht signifikant von den Werten der Ertragstafeln ab.

Die mittlere Steigung der Abweichungen beträgt $b_0 = 0,026$ (SZVREL), d. h. die Abweichung ist in dem betrachteten 20-jährigen Untersuchungszeitraum im Durchschnitt um 2,60% pro Jahr angestiegen. Die höchsten Steigungskoeffizienten hat die Kiefer, die geringsten die Fichte.

In dem Jahr mit dem stärksten Zuwachseinbruch in der 20-jährigen Periode (Trockenjahr 2003 bzw. 2015) geht der Volumenzuwachs im Mittel auf 0,72% des Normalwertes des langfristigen Trends zurück. Im Vergleich zu der langfristigen, positiven Trendlinie, ergibt sich in Jahren mit niedrigstem Zuwachs demnach ein Verlust von 28% (MINZVREL = 0,72). Die Zuwachsrückgänge sind in den Rein- und Mischbeständen mit Fichten besonders deutlich (MINZVREL = 0,63–0,68). Die geringsten Einbrüche zeigen die Mischbestände aus Kiefer und Buche und Kiefer und Eiche (MINZVREL = 0,78–0,81). Bei den zuletzt genannten Mischbeständen kommt es, selbst in den Jahren mit großer Trockenheit, zu vergleichsweise geringen Einbrüchen um lediglich 19–22% unterhalb des langfristigen Trends.

In den Jahren mit den stärksten Zuwachseinbrüchen in der 20-jährigen Untersuchungsperiode, liegen die Zuwächse im Vergleich zur Ertragstafel im Mittel immer noch bei 1,07, d. h. um 7% über dem Niveau der Tafeln (TZVREL = 1,07). Hier zeigt sich, dass die aktuellen Zuwächse in Extremjahren zwar deutlich unter das derzeit normale laufende Niveau absinken, dass sie aber trotz dieser Verluste von 28% (Minimum und Maximumwerte MINZVREL = 0,63–0,81, d. h. Verluste von 19–37%) im Durchschnitt, noch immer über den

Ertragstafelwerten verlaufen. Im ungünstigsten Fall, nämlich in Fichtenreinbeständen, sinken sie auf TZVREL = 0,78 ab, unterschreiten also das Ertragstafelniveau um 22%. Im günstigsten Fall, in Eichenreinbeständen, liegen sie dagegen bei TZVREL = 1,33, d. h. trotz der Einbrüche unter den gegenwärtigen Trend, liegen die Zuwächse dort noch immer um 33% über den Erwartungswerten der entsprechenden Ertragstafeln.

3.3 Statistische Prüfung des artspezifischen Zuwachsverhaltens in Rein- und Mischbeständen

Die zunächst grafisch und tabellarisch dargestellten Vergleiche zwischen gemessenen und erwarteten Zuwächsen, wurden statistisch analysiert. *Tabelle 4* (fett gedruckte Zahlen) zeigt, welche Variablen signifikant (zumindest auf dem Niveau $p < 0,05$) von den erwarteten Zuwachsverläufen abweichen.

Der mittlere relative Zuwachs im Vergleich zu den Ertragstafeln liegt bei 1,48. Der erwartete Wert von MZVREL = 1,0, der bei ertragstafeltreuem Zuwachs zu erwarten wäre, liegt signifikant unterhalb des Konfidenzintervalls von MZVREL. Die Spalten MZVREL (mittel, se, p) zeigen, dass die MZVREL-Werte in 6 von 9 Prüfungen signifikant über den Erwartungswerten der Ertragstafel liegen. Die Steigung der Zuwächse wurde gegen 0 getestet, d. h. in diesem Fall wird geprüft, ob der Steigungsfaktor SZVREL des Zuwachsganges signifikant von SZVREL = 0 (Parallelität zur Ertragstafel) abweicht. Die Spalten SZVREL (mittel, se, p) in *Tabelle 4* zeigen, dass die Steigung in 8 von 9 Fällen signifikant über SZVREL = 0 liegt.

Für die Variable MINZRELVT wurde getestet, ob sie signifikant von dem mittleren Niveau des Zuwachstrends MINZRELVT = 1,0 abweicht. Das war in allen Fällen gegeben, d. h. der Zuwachs liegt in Trockenjahren (2003 oder 2015) signifikant unter dem langfristigen Wachstumstrend.

Die Variable TZVREL zeigt den relativen Zuwachs im Vergleich zur Ertragstafel an. Hier wurde getestet, ob dieser Wert in Trockenjahren von den Ertragstafeln abweicht. Die Werte für TZVREL (mittel, se, p) in *Tabelle*

Tab. 5

Kennwerte für die Entwicklung des Bestandesvolumenzuwachses in den Reinbeständen im Vergleich zu den Mischbeständen. Angegeben sind die Mittelwerte und Standardfehler der Kennwerte MZVREL, VKZVREL, SZVREL, MINZVREL und TZVREL. Zusätzlich sind die t-Werte, die Freiheitsgrade und die p-Werte des t-Testes auf Gruppenunterschiede zwischen Rein- und Mischbeständen angegeben. Zur Erklärung des zugrundeliegenden Modells und der Variablen siehe Legende der *Tabelle 4* und Abschnitt 2.2 im Text.

Characteristics of the stand volume growth of the monospecific versus mixed-species stands. The table present the means and standard errors for the variables MZVREL, VKZVREL, SZVREL, MINZVREL and TZVREL. Furthermore, the t-values, degrees of freedom and p-tail values of the t-test are presented. For explanation of the underlying model and variables see *Table 4* and main text, section 2.2.

| Gruppen | Werte | MZVREL | | SZVREL | | MINZVREL | | TZVREL | |
|----------|------------|--------|------|--------|-------|----------|------|--------|------|
| | | mittel | se | mittel | se | mittel | se | mittel | se |
| rein | mittel, se | 1,51 | 0,09 | 0,025 | 0,003 | 0,72 | 0,01 | 1,10 | 0,07 |
| misch | mittel, se | 1,47 | 0,09 | 0,032 | 0,003 | 0,75 | 0,02 | 1,04 | 0,07 |
| | t-Wert | 0,294 | | -1,376 | | -1,292 | | 0,544 | |
| rein vs. | n | 52 | | 52 | | 52 | | 52 | |
| Misch | p-Wert | 0,770 | | 0,175 | | 0,202 | | 0,589 | |

le 4 zeigen, dass insgesamt, sowie für 5 Baumarten(kombinationen), keine signifikanten Abweichungen von den Erwartungswerten der Ertragstafeln (TZVREL=1) gefunden wurden. In den Fichten-Buchen-Triplets (Fichte rein und Fichte/Buche) fallen die Zuwächse in Trockenjahren dagegen unter das Niveau der Ertragstafel ab. In den Kiefern-Eichen-Triplets (Eiche rein, Kiefer/Eiche) sowie Kiefer-Buchen-Triplets (Kiefer rein, Kiefer/Buche) liegen die Zuwächse selbst in den Trockenjahren noch über den Erwartungswerten der Ertragstafel. In extremen Trockenjahren der gewählten Periode fallen also nur die Fichtenbestände und die Fichten-Buchen-Mischbestände signifikant (auf TZVREL = 0,78 bzw. 0,84) unter das Niveau der Ertragstafel ab. Das heißt, die Zuwachseinbußen im Vergleich zum Niveau der Ertragstafeln liegen zwischen 16 und 22%.

Tabelle 5 zeigt die Ergebnisse der Prüfung eventueller Unterschiede im Zuwachsverhalten von Rein- und Mischbeständen.

Über alle Bestände hinweg betrachtet, gibt es keine signifikanten Gruppenunterschiede zwischen Rein- und Mischbeständen hinsichtlich der Kennwerte MZVREL, SZVREL, MINZVREL und TZVREL. Tendenzielle Gruppenunterschiede zeigen sich nur bei den Kennwerten SZVREL und MINZVREL. Der mittlere Anstieg gegenüber den Erwartungswerten der Ertragstafeln ist in den Mischbeständen mit SZVREL=0,032 gegenüber den Reinbeständen mit SZVREL=0,025 tendenziell um 28% steiler. Die mittleren Zuwachsverluste in Trockenjahren gegenüber dem langfristigen Trend sind in Mischbeständen mit MINZVREL=0,75 gegenüber

Reinbeständen mit MINZVREL=0,72 um 4% geringer. Die Unterschiede waren aber in keinem Fall signifikant (Tabelle 5, letzte Zeile).

4. DISKUSSION

Der Untersuchung liegen Bestände zugrunde, die mittlere bis gute Standortbedingungen und Zuwachsleistungen repräsentieren. Diese Zuwächse können vor allem auf ausreichende bis gute mittlere Niederschläge von 503–1200 mm Jahr⁻¹, Temperaturen von 8,0–10,0°C, relativ gute Standorte und daher Höhenbonitäten von I.-III. bzw. M17-M35 zurückgeführt werden und kommen in Werten von 2,6–34,5m³ ha⁻¹ Jahr⁻¹ zum Ausdruck. Standorte mit dieser Qualität und Produktivität dominieren im mitteleuropäischen Flachland und Hügelland. Auf ärmeren Standorten können die hier berichteten Zuwachstrends dagegen geringer (PRETZSCH et al., 2014; SPIECKER et al., 1996) und die Trockenstressreaktionen deutlicher ausfallen (BORCHERT, 2004; REMUND und AUGUSTIN, 2015; ZANG et al., 2011).

Bisherige Auswertungen von Tripletanlagen zeigten deutliche Unterschiede in den Zuwachsreaktionen auf episodischen Trockenstress zwischen Rein- und Mischbeständen (DEL RÍO et al., 2014; PRETZSCH et al., 2012; STECKEL et al., 2020), die Abhängigkeit der Zuwachseinbußen von den Standortbedingungen und dem Bestandesalter (THURM et al., 2016, 2017; DING et al., 2017), die Anpassung an mehrjährigen Trockenstress (PRETZSCH et al., 2020) und die Stabilisierung des Zuwachses durch Mischung (DEL RÍO et al., 2017). Demgegenüber stellt die vorliegende Arbeit die Reaktion zwi-

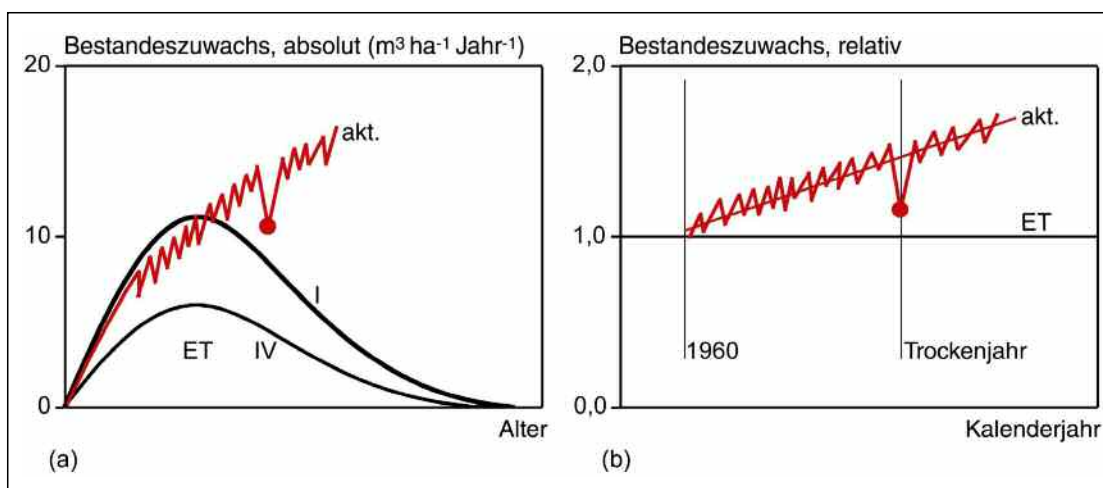


Abb. 3

Aktuell vorherrschender Bestandeszuwachs im Vergleich zur Ertragstafeln in schematischer Darstellung. (a) Zuwachsniveau der Ertragstafeln (ET I. und IV), aktueller langfristiger Zuwachsanstieg (akt.) und Zuwachseinbruch (z. B. durch Trockenjahre, Ausschlag nach unten und durch Kreis markierter Tiefpunkt). (b) Im gekennzeichneten Trockenjahr würde der Zuwachs unter normalen aktuellen Bedingungen weit über der Ertragstafel liegen, wird durch den Trockenstress zwar reduziert, liegt aber noch immer über dem Niveau der Ertragstafel (1.0-Linie).

Currently observed stand growth compared with the growth prediction based on yield tables in schematic representation. (a) Growth predicted by yield tables (ET I. und IV), current growth trend (akt.), and low growth events (e.g. caused by drought years, decrease marked by filled circle). (b) In the marked drought year the stand growth would lie, under raised conditions, far above the level of the yield table. Although growth is reduced by drought stress, it is still above the level suggested by the yield tables (1.0-line).

schen dem langfristigen Zuwachstrend und den durchschnittlichen Zuwachseinbrüchen in den Mittelpunkt.

4.1 Gesamtbild des Zuwachsgangs in Rein- und Mischbeständen

Die gezeigten langfristigen Aufwärtstrends der Volumenzuwachsgänge auf den hier untersuchten Triplets, im Vergleich zu den gängigen Ertragstafeln, stimmen mit Untersuchungsergebnissen auf der Grundlage langfristiger Versuchsflächen überein (KENK et al., 1991; PRETZSCH et al., 2019; SPIECKER et al., 1996). Sie treffen auf Rein- und Mischbestände gleichermaßen zu. Bei den Baumarten Kiefer und Eiche, die zumeist auf vergleichsweise ärmeren Standorten stocken (STECKEL et al., 2019), sind sie stärker ausgeprägt als bei Fichte und Buche. Beim Vergleich des Zuwachstrends der Fichte mit der älteren Ertragstafel von WIEDEMANN (1936/42) (nicht gezeigt) ergaben sich selbst in Trockenjahren (TZVREL = 1,05) noch deutlich höhere mittlere Abweichungen (MZVREL = 1,39) und günstigere Zuwächse als bei Verwendung der neueren Ertragstafel von ASSMANN and FRANZ (1963) (MZVREL = 1,05 bzw. TZVREL = 0,78). Das Alter der Tafel spielt daher offenbar für das Ausmaß der Abweichung der gemessenen Werte vom Ertragstafelniveau eine entscheidende Rolle, was für die Interpretation der hier für Kiefer und Eiche berichteten Ergebnisse zu beachten ist.

Zusätzlich zum langfristigen Trend liefern die hier analysierten Bestände den Zuwachs auch in jährlicher Auflösung; damit geht ihr Informationsgehalt über zumeist nur periodisch aufgenommene Versuchsflächen hinaus. Die Zuwachsrückgänge des jährlichen Bestandeszuwachses von im Mittel 28% (32% bei Fichte und 22% bei Eiche), in Trockenjahren im Vergleich zum langfristigen Trend, fallen eher moderat aus. Die meisten Untersuchungen beziehen sich auf Zuwachsrückgänge einzelner Bäume, zumeist in dominanter Stellung. In solchen Fällen werden für Trockenjahre wesentlich höhere Zuwachsverluste berichtet, die über 50% hinausgehen können (PRETZSCH et al., 2012; PRETZSCH et al., submitted; STECKEL et al., in press; ZANG et al., 2011); von einzelnen Bäumen kann allerdings nicht ohne Weiteres auf den Zuwachs des Bestandes insgesamt geschlossen werden. Dieser ist vielmehr durch zusätzliche Faktoren beeinflusst. Hierzu kommen insbesondere folgende Aspekte in Frage: (1) der Bestandeszuwachs kann durch stressbedingte Mortalität, also Ausfälle, mitbestimmt werden (DEL RÍO et al., 2017), (2) kleine Bäume einer Art können die Zuwachsverluste von großen Bäumen in gewissem Umfang kompensieren (PRETZSCH et al., 2018), (3) durch artspezifische zeitliche Asynchronität der Stressreaktion kann der Zuwachs in Misch- im Vergleich zu Reinbeständen stabilisiert werden (DEL RÍO et al., 2014; JUCKER et al., 2014), (4) durch Kombination von Arten mit unterschiedlicher Reaktion auf Trockenstress, z.B. Fichte und Buche oder Buche und Eiche können Verluste einer Art durch eine weniger empfindliche zweite Art vermindert oder sogar kompensiert werden (HILMERS et al., 2019).

Besonders interessant ist das in *Abbildung 3* schematisch dargestellte Gesamtbild des Zuwachsverhaltens.

Abbildung 3a zeigt den Zuwachsgang der Ertragstafel (Bonitäten I und IV), den aktueller langfristigen Zuwachsanstieg (akt.) und einen Zuwachseinbruch (Aus-schlag nach unten und durch Kreis markierter Tiefpunkt) in absolutem Maßstab. *Abbildung 3b* zeigt denselben Zusammenhang der Anschaulichkeit halber in relativer Darstellung. Sie unterstreicht, dass der Zuwachs im gekennzeichneten Trockenjahr zwar unter dem aktuellen ansteigenden Trend, aber noch immer über dem Niveau der Ertragstafel, liegt. Die Zuwächse werden demnach durch den Trockenstress reduziert, leisten aber, außer in Fichtenbeständen, noch immer einen Zuwachs, der das historische Zuwachsniveau, das die Ertragstafeln repräsentieren, überschreitet (*Abbildung 3b*, 1.0-Linie).

Für das langfristige Umweltmonitoring und die forstliche Praxis signalisiert die im Mittel 48%ige Erhöhung des Zuwachses gegenüber dem historischen Niveau eine grundlegende Veränderung der Wuchsbedingungen und des Nutzungspotenzials der Wälder. Die Zuwächse der Untersuchungsbestände verlaufen auf einem erhöhten und weiter steigenden Niveau, das als neue Normalität angesehen werden kann. In den zurückliegenden Trockenjahren sank der Bestandeszuwachs im Mittel auf 72% des langfristigen Trends, in ungünstigen Fällen auf 63% und in günstigen auf lediglich 81% ab. Dies bedeutet, dass in Trockenjahren etwa mit einer um ein Viertel geringeren Zuwachsleistung gerechnet werden muss, selbst wenn diese absolut betrachtet immer noch über dem von der Ertragstafel repräsentierten historischen Niveau liegen.

Die Zuwachseinbußen sind bei Fichte am höchsten, bei Eiche am geringsten, und Buche und Kiefer liegen dazwischen. Mischbestände schneiden in den Zuwachseinbußen tendenziell, aber nicht signifikant besser ab. Die Befunde gelten, wie eingangs erwähnt, für mittlere bis gute Standortbedingungen (Bonitäten I. bis III.). Eine geplante Ausdehnung der Untersuchung auf international verfügbare Triplets mit einem noch breiteren Spektrum von Standortbedingungen dürfte eventuelle Abhängigkeiten des Zuwachsverlaufs in Relation zu den Ertragstafeln und beim Auftreten von Trockenjahren aufdecken.

4.2 Erklärung der aufgedeckten Zuwachsmuster

Die Ursachen für den langfristigen Anstieg des Zuwachses liegen vermutlich in einer Kombinationswirkung aus Temperaturanstieg und der Verlängerung der Vegetationszeit (MCMAHON et al., 2010; MENZEL and FABIAN, 1999), der Erhöhung der atmosphärischen CO₂-Konzentration (Körner et al., 2005; NORBY et al., 1999), der großregionalen Stickstoffdeposition (BINKLEY and HÖGBERG, 1997; HOFMANN et al., 1990) und, insbesondere bei der Kiefer, in dem Rückgang der Streunutzung (KREUTZER, 1972; PRETZSCH et al., 1996), der zu einer Revitalisierung der Standorte beigetragen hat. Insbesondere bei steigenden Temperaturen könnten auch negative Wachstumsreaktionen auftreten, sofern keine ausreichende Wasserverfügbarkeit vorliegt. Dies zeigen die Befunde aus trockeneren Zonen, z.B. mediterranen oder kontinentalen Regionen, in denen die Limitierung des

Wachstums durch Wasser, einer Ausschöpfung der wachstumsförderlichen Effekte des Klimawandels schon jetzt entgegensteht. Demgegenüber fallen die Zuwachsreaktionen in den hier betrachteten Beständen der temperierten Region derzeit eher positiv aus; bei ausreichender Wasserversorgung können die wachstumsförderlichen Effekte des Klimawandels, wie die verbesserte N- und CO₂-Versorgung sowie die verlängerte Vegetationszeit zuwachssteigernd wirksam werden. Vor dem Hintergrund der für wahrscheinlich gehaltenen Häufung sommerlicher Trockenphasen durch den fortschreitenden Klimawandel (DAI, 2011), ist allerdings zu befürchten, dass sich diese wuchsfördernden Effekte verlieren oder zumindest abschwächen werden. Die Abhängigkeit des Zuwachstrends von den jeweiligen Standortbedingungen zeigte u. a. eine Studie über den Zuwachstrend von Stadtbäumen. Demnach können die genannten zuwachsförderlichen Effekte des Klimawandels in Regionen mit Wasserlimitierung nicht wirksam werden oder in eine Verlangsamung des Zuwachses aufgrund vermehrter Trockenheit umschlagen (PRETZSCH et al., 2017b).

Der Nettoeffekt der zuwachsförderlichen und -hemmenden Einflussfaktoren hängt auch von den physiologischen Eigenschaften der Baumart ab. Von den hier untersuchten Baumarten ist der Nettoeffekt in Fichtenbeständen am geringsten. Auf den meisten einbezogenen Standorten befindet sich die Fichte am Rande ihres natürlichen Verbreitungsgebiets und dürfte deshalb in der Wasserversorgung so limitiert sein, dass sie eventuelle positive Effekte des Klimawandels kaum abschöpfen kann und daher auf Trockenstress deutlich reagiert. Im Gegensatz dazu zeigte die Eiche in der vorliegenden Untersuchung die höchsten Nettoeffekte im Zuwachs.

Die Volumenzuwächse der Mischbestände zeigen ein ähnliches Trend- und Stressverhalten wie die Reinbestände (*Abbildung 2* und *Tabelle 5*). Auch bei Mischungen von vergleichsweise zuwachsschwachen und zuwachsstarken Arten, wie z. B. Buche und Fichte, liegen die Bestandeszuwächse auf ähnlich hohem Niveau wie in den besserwüchsigen Reinbeständen der jeweiligen Triplets. Die Zuwachsverluste bei Trockenheit fallen in Reinbeständen nur geringfügig schwächer aus als in den Mischbeständen.

Vergleichende Untersuchungen von Trockenstressreaktionen in Rein- und Mischbeständen von u. a. AMMER (2019), GROSSIORD et al. (2014, 2018), PRETZSCH et al. (2013), THURM et al. (2016) und STECKEL et al. (in press) zeigen, dass einige Baumartenkombinationen zur Reduktion von Trockenstress beitragen können. Die Mischung von zwei Arten mit unterschiedlichen funktionellen und morphologischen Eigenschaften kann zur Reduktion der zwischenartlichen, im Vergleich zur innerartlichen, Konkurrenz oder sogar zur gegenseitigen Förderung (z. B. durch hydraulische Umverteilung, Fixierung von Luftstickstoff) und zu Zuwachsvorteilen einer oder beider Arten führen (AMMER, 2019). Durch asynchrone Stressreaktionen können Risiken verteilt und der Zuwachsgang auf Bestandesebene stabilisiert werden (JUCKER et al., 2014; DEL RÍO et al., 2017). Selbst bei signifikanter Zuwachsreduktion oder dem Ausfall

einer Art, können die verbleibenden Arten Zuwachsverluste längerfristig abpuffern oder sogar kompensieren (BAUHUS et al., 2017; HILMERS et al., 2019) und damit die Ökosystemintegrität sichern.

4.3 Kritische Diskussion der Aufnahme- und Auswertungsmethoden

Möglicherweise haben die retrospektive Schätzung von Stockalter, Rindenzuwachs und Höhenentwicklung sowie die Nichtberücksichtigung von umweltbedingten Änderungen der Formzahl und Holzdichte zu einer gewissen Unterschätzung des wirklichen Zuwachses und damit auch zu einer Unterschätzung der Abweichungen zwischen den wirklichen Zuwächsen und den Ertrags tafeln geführt. Träfe dies zu, wären die hier gefundenen Unterschiede also als eher konservativ einzuordnen.

Die Anschätzung des in der Vergangenheit ausgeschiedenen Bestandes über das Stockalter birgt eine gewisse Unsicherheit. Da Bestände ausgewählt wurden, in denen in den zurückliegenden Jahren keine, oder nur schwache Entnahmen erfolgten, war die Anzahl der Stöcke und der erforderlichen Altersschätzungen allerdings gering. Zur Absicherung der Einschätzung, ob etwaige Stöcke und Entnahmen dem betrachteten 20-jährigen Zeitraum zuzurechnen oder früher zu datieren waren, wurden weiter forstamtliche Unterlagen zur Bestandese-geschichte gesichtet. Im Zweifelsfall wurden Stöcke weiter als 20 Jahre zurückdatiert. Werden Stöcke oder stehendes Totholz unterschätzt, so verursacht das auch immer eine Unterschätzung des stehenden Bestandesvolumens und Bestandeszuwachses. Ungenauigkeiten in diesem Verfahrensabschnitt bewirken also immer eine Unterschätzung des Zuwachses und damit auch eine Unterschätzung der Abweichung zwischen wirklichem Zuwachs und dem Zuwachs der Ertragstafel. Ungenauigkeiten in dem Punkt dürften sich also auf die Ergebnisse eher konservativ auswirken; in Wirklichkeit liegen die Überlegenheit vermutlich noch um einige Prozentpunkte höher.

Aktuell verläuft die Höhenentwicklung von Beständen steiler als in den Ertragstafeln angenommen (PRETZSCH et al., 2019). Die Rekonstruktion der Höhen- und Volumenentwicklung auf der Grundlage der flacheren Alters-Höhen-Verläufe der Ertragstafel führt also zu einer Unterschätzung der Höhenzuwächse damit ebenfalls zu einer Unterschätzung der daraus berechneten Volumenzuwächse der Bestände.

Trockenheit kann Zuwachsreduktionen oder Jahrringausfälle vor allem im unteren Stammbereich (VAN DER MAATEN-THEUNISSEN und BOURIAUD, 2012; HOFFMANN et al., 2019) bewirken und damit zu einer Zunahme der Formzahl bei gegebenen Höhen- und Durchmesserwerten des Stammes führen. Werden solche Formzahländerungen durch Trockenheit nicht berücksichtigt, so führt auch dies zu einer Unterschätzung von Vorrat und Volumen; die Berücksichtigung der Zunahme von $f_{1,30}$ dürfte in Trockenjahren also um einige Prozentpunkte höhere Vorrats- und Zuwachswerte erbringen. Die Nichtberücksichtigung solcher stressbedingten $f_{1,30}$ -Zunahmen führt also ebenso zu eher konservativen

Schätzungen der Abweichungen zwischen Ertragstafel und wirklichem Zuwachs.

Eine weitere Ungenauigkeit bei den hier vorgenommenen Vergleichen entsteht dadurch, dass der Zuwachs voll bestockter, nicht oder nur schwach durchforsteter Versuchsflächen mit dem Zuwachs von Ertragstafeln für mäßige Durchforstung verglichen wird. Nach ASSMANN (1961) würde eine mäßige Durchforstung den periodischen Volumenzuwachs der Untersuchungsbestände um 10–20% steigern können. Die Überlegenheit der Untersuchungsbestände gegenüber der Ertragstafel würde sich also vermutlich weiter erhöht haben, hätte man die Bestände der Triplets ertragstafelkonform behandelt.

Auf Basis einer Stichprobe von langfristigen Versuchsflächen zu Fichte, Kiefer, Buche und Eiche fanden PRETZSCH et al. (2018) eine Abnahme der Holzdichte des Stammes von 8–12 seit 1900. Demnach wachsen die Bestände und Bäume gegenwärtig wesentlich schneller im Holzvolumen als in der Vergangenheit, allerdings nimmt die Biomasse nicht im selben Maße zu. So erwies sich der Biomassenzuwachs in der betreffenden Untersuchung um 9–24% geringer als der Volumenzuwachs. Demnach fällt die hier auf Basis der Bestandesvolumenzuwächse festgestellte positive Abweichung vom Ertragstafelniveau unter Berücksichtigung der Biomasse vermutlich deutlich geringer aus. Die abnehmende Holzdichte geht einher mit einer Zunahme des Frühholzanteils. Dies legt die verlängerte Vegetationszeit und die düngende Wirkung von N Depositionen als Ursache für die beobachteten positiven Zuwachstrends nahe.

Zusammenfassend ist also auf der einen Seite von einer gewissen Unterschätzung des Unterschieds zwischen tatsächlichem Volumenzuwachs und Ertragstafelzuwachs auszugehen, auf Basis der Biomasse könnte die hier vorgenommene Abschätzung durch den zuvor genannten Befund der Absenkung der Holzdichte aber vermutlich doch in etwa der Realität entsprechen.

4.4 Praktische Konsequenzen

Die Quantifizierung des langfristigen Zuwachstrends und seine Überlagerung durch Trockenjahre erfordern unbehandelte Referenzflächen mit jährlichen Zuwachsinformationen, wie sie für diese Untersuchung zur Verfügung standen. Untersuchungen in solchen Beständen konnten schon in der Vergangenheit wirkungsvoll zur Versachlichung widersprüchlicher Debatten zum Gesundheitszustand der Wälder beitragen.

Solche Referenzflächen zeigten u. a., dass die durch Luftschadstoffe bedingten Waldschäden vor allem in den Kuppenlagen der Mittelgebirge zu schwerwiegenden Zuwachsverlusten führten (KENK et al., 1991). Zusätzliche Beobachtungsflächen zeigten aber schon damals, als die Öffentlichkeit das großflächige Absterben des Waldes in ganz Mitteleuropa befürchtete (ULRICH, 1990; SKELLY und INNES, 1994; SCHÄFER und METZGER, 2009), dass die Wälder im Flachland seit den 1960er-Jahren überwiegend signifikant schneller wachsen und dichter werden können als in den Jahrzehnten davor (z. B. PRETZSCH et al., 2014a). Die hier berichteten ansteigenden Zuwächse waren also vielerorts bereits 1960–1980

registriert worden (SCHMIDT, 1969, 1971) und unterstrichen die große Abhängigkeit der Vitalität und Stressbelastung der Wälder von den Standortbedingungen. Gegenwärtig halten die Folgen der Trockenjahre 2003, 2015 und 2018/2019 die Öffentlichkeit und Forstwirtschaft in Atem, wobei neben Zuwachseinbrüchen und Ausfällen von Bäumen und ganzen Beständen mitten in einer Phase erhöhter Zuwachseleistung, angesichts der weiteren Klimaprognosen, Anlass zur Sorge geben.

Obwohl die Zuwächse gegenwärtig im langfristigen Mittel noch über dem historischen Niveau der Ertragstafeln liegen, bedeuten die Zuwachsrückgänge in Trockenjahren Zuwachseinbußen von im Mittel 28% (19–37%) im Vergleich zur neuen Normalität. Bei einem jährlichen Volumenzuwachs von $15 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$ ist das gleichbedeutend mit absoluten Zuwachseinbußen von im Mittel $4,20 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$ (bzw. $2,85\text{--}5,55 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$). Im Hinblick auf die prognostizierte Häufung von Trockenheitsperioden in der Vegetationszeit ist daher fraglich, wie lange das hier festgestellte Zuwachshoch anhalten wird. Eine regelmäßige Anpassung der jeweils für real angenommenen Zuwachsdaten, z. B. aus mit Korrekturfaktoren versehenen Ertragstafeln anhand von Referenzflächen, ist daher nötig. Ein Beispiel für die Berechnung von Korrekturfaktoren zur Quantifizierung von Abweichungen zu quantifizieren, haben u. a. REIMEIER (2001), REIMEIER und KENNEL (2001) und BÖSCH (2001) vorgestellt, die Hilfen zur Bonitierung und Zuwachsschätzung erarbeitet haben. Von PRETZSCH (2016) wurden Korrekturfaktoren publiziert, nach denen die Bestände der Hauptbaumarten 10–33% höhere Volumenzuwächse leisten, als von den gängigen Ertragstafeln vorhergesagt. PRETZSCH et al. (2019) zeigten, wie auch die stehenden Vorräte und maximalen Dichten durch Klimafolgen zunehmen können. Solche Zunahmen der Zuwachsraten, Dichten und Vorräte im Vergleich zu historischen Beständen oder Ertragstafeln bei gleichem Alter, bedeuten eine Erhöhung der C-Aufnahme und Speicherung, Beschleunigung der Nährstoffumsätze, sowie Potenziale für die Erhöhung der Holznutzung und eine Verkürzung der Umtriebszeit. Die Erhöhung der Vorräte und Bestandesdichten dürfte allerdings auch den Wasserverbrauch erhöhen (vgl. GEBHARDT et al., 2014) und damit den Trockenstress in niederschlagsarmen Jahren erhöhen.

Um die gezeigten Zuwachseinbrüche in und nach Trockenjahren zu reduzieren, sind mehrere Optionen denkbar (AMMER, 2017). Zum einen könnten stressresilientere Arten und Provenienzen gewählt werden (ATZMON et al., 2004; AREND et al., 2011; ZANG et al., 2011). Zum Zweiten könnten, vor allem bei isohydrischen Arten die Bestandesdichten reduziert und damit das Wasserangebot der verbleibenden Bäume verbessert werden (BOTTERO et al., 2017; D'AMATO et al., 2013; GEBHARDT et al., 2014; SOHN et al., 2016). Drittens könnten sich Durchforstungseingriffe insbesondere auf die Entnahme von kleineren Bäumen mit ineffizienter Wassernutzung konzentrieren (GEBHARDT et al., 2014; PRETZSCH et al., 2018; RODRÍGUEZ-CALCERRADA et al., 2011). Schließlich kann auch, besonders bei Baumarten mit komplemen-

tärer Ressourcennutzung, die oft zuwachsstabilisierende Wirkung von Baumartenmischung genutzt werden (METZ et al., 2016, 2019; GROSSIORD, 2018).

In jedem Fall scheint auch bei Maßnahmen zur Vermeidung von Trockenstress eine Berücksichtigung des Standorts ratsam. So konnten PRETZSCH et al. (2014) zeigen, dass Bestände auf trockenen Standorten weniger an Zuwachs, Bestandesdichte und Vorrat zugenommen haben. Das Wachstum solcher Bestände wird möglicherweise durch Trockenheit weniger abgebremst werden. Gründe dafür könnten in einer besseren physiologischen und morphologischen Anpassung (z. B. Anpassungen des Wasserleitungssystems (vgl. SCHULDT et al., 2016), der Durchwurzelungstiefe, des Sproß-Wurzel-Verhältnisses, d. h. höherer Wurzelanteil und der Kronengröße) und geringeren Bestandesdichten liegen. Ziel weiterführender Untersuchungen auf der Grundlage einer noch größeren Anzahl von Triplets entlang eines Standortgradienten durch Europa wird es daher sein zu klären, inwieweit der positive Zuwachstrend und die negativ gerichteten Zuwachsreaktionen in Trockenjahren von den spezifischen Standortbedingungen abhängen.

5. ZUSAMMENFASSUNG

Der Hintergrund für die Auswertung waren folgende zunächst widersprüchlich anmutende Fakten zum aktuellen Zuwachsverhalten mitteleuropäischer Waldbestände: Einerseits liegen die jährlichen Zuwächse des Bestandesvolumens vieler Baumarten deutlich über den Erwartungswerten der gängigen Ertragstafeln. Andererseits haben solche Bestände auf die zurückliegenden Trockenjahre mit erheblichen Zuwachseinbrüchen unter ihr langfristiges Zuwachsniveau reagiert. Der Aufsatz quantifiziert, wie die Bestandeszuwächse seit Mitte des zurückliegenden Jahrhunderts immer weiter über das Niveau der Tafeln fortwährend angestiegen sind, und dass sie in Trockenjahren wie 2003 und 2015 zurückgehen, gleichwohl auch in solchen Jahren bislang über dem historischen Zuwachsniveau liegen, welches die Ertragstafeln abbilden.

Die Auswertung basiert auf insgesamt 54 mittelalten, vollbestockten und nicht oder nur schwach durchforsteten Rein- und Mischbeständen aus Fichten (*Picea abies* [L.] KARST.), Kiefern (*Pinus sylvestris* L.), Buchen (*Fagus sylvatica* L.) und Eichen (*Quercus petraea* (MATT.)) in Deutschland. Die Untersuchung baut auf deren jährlichen Volumenzuwächsen in den zurückliegenden 20 Jahren auf, einem Zeitraum, in den die Trockenjahre 2003 und 2015 fallen.

Die gemessenen jährlichen Volumenzuwächse liegen um 5–77% und im Mittel um 48% über den jeweiligen Ertragstafeln (Abbildung 2 und Tabelle 4). Besonders deutlich sind die positiven Abweichungen von den Ertragstafeln bei Eiche, Kiefer und Buche (+47–77%) ausgeprägt; die Fichte weicht mit +5% am geringsten von den Werten der Ertragstafeln ab. Rein- (im Mittel 51%) und Mischbestände (im Mittel 47%) unterscheiden sich nicht signifikant in den Abweichungen ihrer jährlichen Volumenzuwächse von den Ertragstafeln (Abbildung 2 und Tabelle 5).

Die Zuwächse der meisten Rein- und Mischbestände steigen im Vergleich zu den Ertragstafeln seit 20 Jahren an (Abbildung 1–2 und Tabelle 4). Die Abweichung ist in dem betrachteten 20-jährigen Untersuchungszeitraum im Durchschnitt um 2,60% pro Jahr angestiegen. Die höchsten Anstiege weist die Kiefer auf, die geringsten wurden für die Fichte beobachtet. Die Anstiege sind in den Mischbeständen tendenziell, aber nicht signifikant steiler.

In den Jahren mit der stärksten Stressreaktion auf Trockenheit (2003, 2015) geht der Volumenzuwachs im Mittel auf 0,72 des Normalwertes des langfristigen Trends (1,0) zurück; d. h. im Vergleich zu der langfristigen, positiven Trendlinie ergibt sich in Jahren mit niedrigstem Zuwachs ein Verlust von 28% (Tabelle 4). Die Zuwachsrückgänge sind in den Rein- und Mischbeständen mit Fichten besonders deutlich (Rückgang auf 0,63–0,68). Die geringsten Einbrüche zeigen die Mischbestände aus Kiefer und Buche und Kiefer und Eiche (0,78–0,81).

In den zuletzt genannten Beständen kommt es, im Vergleich zum langfristigen Trend, in Jahren mit großer Trockenheit zwar zu Einbrüchen um 19–22%, die erreichten Zuwächse liegen aber immer noch über dem von den Ertragstafeln prognostizierten Werten. So betrogen die Zuwächse in den Jahren mit den stärksten Zuwachseinbrüchen in der 20-jährigen Untersuchungsperiode im Vergleich zur Ertragstafel im Mittel immer noch 1,07, d. h. sie lagen um 7% über dem Niveau der Tafeln (Tabelle 4). Das bedeutet, dass die Zuwächse in Extremjahren zwar deutlich unter das normale laufende Niveau absinken, dass sie aber trotz dieser Verluste im Durchschnitt noch immer über den Werten der Ertragstafeln verlaufen. Nur in wenigen ungünstigsten Fällen, nämlich in Fichtenreinbeständen, sinken die Zuwächse in Trockenjahren auf 78% der Ertragstafel ab. Im günstigsten Fall, in Eichenreinbeständen, liegen sie auch in Trockenjahren noch immer bei 133% der Ertragstafel, d. h. trotz der Einbrüche unter den gegenwärtigen Trend noch immer um 33% über den Erwartungswerten der entsprechenden Ertragstafeln (Abbildung 3). Dabei muss allerdings berücksichtigt werden, dass die für die Eiche verfügbaren Ertragstafeln älter sind als die Fichtentafeln, die zumindest zum Teil, die schon in den 60er-Jahren anlaufende Zuwachssteigerung besser abgebildet haben als die alten Tafeln.

Die Diskussion unterstreicht die Relevanz sowohl der langfristigen Abweichungen von der Ertragstafel als auch der episodischen Abweichungen von dem Aufwärtstrend. Die langfristigen Anstiege über das historische Niveau der Ertragstafeln indizieren grundlegende Veränderungen der Umweltbedingungen durch u. a. Temperaturerhöhung, Verlängerung der Vegetationszeit, eutrophierende N-Deposition und Anstiege der atmosphärischen CO₂-Konzentration. Die episodischen Zuwachseinbrüche indizieren Reaktionen auf Trockenstress. Die Untersuchung zeigt, dass langfristige Zuwachszeitreihen aufschlussreiche Kennwerte der Produktivität für die Forstwirtschaft und der Vitalität für das Umweltmonitoring liefern können. Solche Zeitreihen erschienen nicht zuletzt vor dem Hintergrund einer

wahrscheinlichen Zunahme von längeren Trockenereignissen während der Vegetationsperiode für eine Abschätzung der Folgen des Klimawandels als unabdingbar.

6. SUMMARY

Title of the paper: *Current growth level, growth trend, and episodic growth decline. A consolidated view of the growth pattern of mono-specific and mixed species stands of Norway spruce, Scots pine, European beech, and sessile oak.*

The presented here was based on seemingly contradictory findings of the growth behaviour of central European forest stands: On the one hand the course of the annual volume growth of forest stands is reported to proceed much higher than predicted by the yield tables. On the other hand, forest stands suffered considerable growth slumps below their long term trend. Here we show, how the growth rates of forest stands continuously exceed the level of the common yield tables since the middle of the last century, how they decrease in drought years such as 2003 and 2015, and report that even in years of severe drought growth losses are still continuously proceeding on a level above the yield tables of most forest types.

The study is based on 57 middle aged, fully stocked, non-thinned or only slightly thinned mono-specific and mixed species stands of Norway spruce (*Picea abies* [L.] KARST.), Scots pine (*Pinus sylvestris* L.), European beech (*Fagus sylvatica* L.), and sessile oak (*Quercus petraea* (MATT.)) in Germany. We use the annual stand volume growth of the last 20 years. This period covers the extremely dry years 2003 and 2015.

We found that the mean annual stand volume growth lay 5–77 % and on average 48 % above the level predicted by the respective yield tables (Figure 1–2 and Table 4). The deviations from the yield tables are most distinctive for sessile oak, Scots pine and European beech (+47–77%) and less for Norway spruce (+5%). Mono-specific stands (+51%) and mixed-species stands (47%) did not differ significantly regarding their deviation from the stand volume growth of the yield tables (Figure 2 and Table 4).

The growth of most of the stands has increased in relation to the yield tables in the last 20 years (Figure 2 and Table 4). The deviation from the yield table increased on average by 2.60% per year. We found the steepest increase for Scots pine and the lowest for Norway spruce. There was a tendency that the increase was stronger in mixed than in mono-specific stands, however, the slopes did not differ significantly.

In the years 2003, 2015 with the strongest growth reactions on drought stress the stand volume growth was reduced to 0.72 of the normal long-term level (1.0); this means a growth loss in relation to the long-term trend of 28% (Table 4). The growth reductions were most severe in mono- and mixed-species stands of Norway spruce (decrease to 0.63–0.68, i. e. losses of 32–37%). The slightest stress reactions were found in mixed stands of Scots pine and European beech and Scots pine and sessile oak (decrease to 0.78–0.81, i. e. losses of 19–22%) compared with the long-term trend.

In dry years, growth decreased by 19–22% under the long-term trend. In the years with the strongest slumps below the long-term trend the growth still lied by 1.07 compared to the yield tables, i.e. by 7% above the growth level predicted by the yield tables (Table 4). This means that the growth falls significantly below the normal long-term trend in dry years, but growth was still significantly higher than suggested by the yield tables, which represent the historic growth level. Only in a few cases, namely in monospecific Norway spruce stands, growth decreased to 78% of the values reported in the yield table in dry years. In the most favourable cases, in monospecific sessile oak stands, the growth even in dry years still amounted to 133% of the values reported in the yield tables, indicating that the stands still exceed the yield tables by 33% in their stand volume growth despite the slumps caused by drought stress (Table 4).

We discuss the relevance of both, the long-term deviation of the stand growth from the yield tables and the episodic deviation of the growth from the current upwards trend of stand growth. The long-term increase above the historic level of the yield tables indicates significant changes of the environmental conditions by rise of temperature, extension of the length of the growing season, eutrophic N-deposition and rise of the atmospheric CO₂-concentration. The episodic growth slumps indicate severe stress reactions to drought. The study underlines the relevance of long-term stand growth series for provision of forest management with productivity data and environmental monitoring with quantitative information of the current vitality and stress situation of forest stands. Against the background of the predicted increasing frequency of years with long drought periods during the vegetation period, such long-term data is urgently needed to adequately appraise possible future developments.

7. RÉSUMÉ

Titre de l'article: *Niveau d'accroissement, tendance d'accroissement et effondrements épisodiques de l'accroissement. Un aperçu de l'accroissement actuel dans des peuplements monospécifiques et des peuplements mélangés d'épicéa, de pin, de hêtre et de chêne.*

Le contexte pour l'évaluation portait sur les faits contradictoires suivants concernant le comportement de l'accroissement actuel de peuplements forestiers d'Europe centrale: d'une part, l'accroissement annuel en volume du peuplement présentant de nombreuses espèces ligneuses est nettement supérieur aux valeurs attendues dans les tables de production communes. D'autre part, de tels peuplements ont réagi aux dernières années de sécheresse par des baisses d'accroissement considérables en dessous de leur niveau d'accroissement à long terme. Le document quantifie la façon dont l'accroissement du peuplement a continuellement dépassé le niveau des tables de production depuis le milieu du siècle dernier et qu'il diminue durant les années sèches comme 2003 et 2015, pourtant même durant ces années-là, il était toujours supérieur au niveau d'accroissement historique indiqué dans les tables de production.

L'évaluation est basée sur un total de 54 peuplements monospécifiques et mélangés d'épicéa (*Picea abies* [L.] KARST.), de pin (*Pinus sylvestris* L.), de hêtre (*Fagus sylvatica* L.) et de chêne (*Quercus petraea* (MATT.)) d'âge moyen, entièrement boisés et pas ou très faiblement éclaircis, en Allemagne. L'étude se base sur les accroissements annuels en volume au cours des 20 dernières années, période qui a inclus les années sèches de 2003 et 2015.

Les accroissements annuels en volume mesurés sont de 5 à 77% et en moyenne de 48% supérieurs aux tables de production respectives (Figure 2 et Tableau 4). Les écarts positifs par rapport aux tables de production sont particulièrement prononcés pour le chêne, le pin et le hêtre (+47–77%); l'épicéa, à +5%, s'écarte le moins des valeurs des tables de production. Peuplements monospécifiques (51% en moyenne) et peuplements mixtes (47% en moyenne) ne diffèrent pas de manière significative dans les écarts de leur accroissement en volume annuel par rapport aux tables de production (Figure 2 et Tableau 5).

Les accroissements de la plupart des peuplements monospécifiques et mélangés augmentent par rapport aux tables de production depuis 20 ans (Figure 1–2 et Tableau 4). L'écart a augmenté de 2,60% en moyenne par an, au cours de la période de recherche de 20 ans. Les plus fortes augmentations ont été observées pour le pin, les plus faibles pour l'épicéa. Les augmentations ont tendance à être tendanciellement plus fortes dans les peuplements mélangés, mais pas de manière significative.

Au cours des années où la réaction de stress à la sécheresse a été la plus forte (2003, 2015), l'accroissement du volume a diminué en moyenne de 0,72 de la valeur normale de la tendance à long terme (1,0); c'est-à-dire qu'en comparaison avec la ligne de tendance positive à long terme, il y a une perte de 28% durant les années où l'accroissement est le plus faible (Tableau 4). Les baisses d'accroissement sont particulièrement marquées dans les peuplements monospécifiques et les peuplements mélangés d'épicéa (baisse jusqu'à 0,63–0,68). Les plus faibles baisses apparaissent dans les peuplements mélangés de pin et de hêtre, et de pin et de chêne (0,78–0,81).

Dans les derniers peuplements mentionnés, en comparaison avec la tendance à long terme, il y a eu des baisses de 19–22% durant les années de forte sécheresse, mais les augmentations d'accroissements obtenues sont toujours supérieures aux valeurs prévues par les tables de production. Ainsi, dans les années où l'accroissement a connu les plus fortes baisses au cours de la période de 20 ans étudiée, l'augmentation moyenne par rapport aux tables de production était encore de 1,07, soit 7% au-dessus du niveau des tables (Tableau 4). Cela signifie que les accroissements en années extrêmes s'abaissent considérablement au-dessous du niveau normal actuel, mais malgré ces pertes, ils restent en moyenne toujours supérieurs aux valeurs des tables de production. Ce n'est que dans quelques cas défavorables, à savoir dans les peuplements monospécifiques d'épicéa, que les accroissements en années sèches tombent à 78%

par rapport aux valeurs des tables de production. Dans le cas le plus favorable, dans des peuplements monospécifiques de chêne, ils se situent encore à 133% de la table de production, même en années sèches, c'est-à-dire que malgré les baisses inférieures à la tendance actuelle, ils sont encore 33% au-dessus des valeurs attendues dans les tables de production correspondantes (Figure 3). Toutefois, il faut tenir compte du fait que les tables de production disponibles pour le chêne sont plus anciennes que les tables de l'épicéa, qui reflètent mieux, du moins en partie, l'augmentation de l'accroissement qui a commencé dans les années 1960, que les anciennes tables.

La discussion souligne la pertinence tant des écarts à long terme par rapport à la table de production, que des écarts épisodiques par rapport à la tendance à la hausse. Les augmentations à long terme au-dessus du niveau historique des tables de production indiquent des changements fondamentaux dans les conditions environnementales dus, entre autres, à l'augmentation de la température, à la prolongation de la période de végétation, à l'eutrophisation par les dépôts d'azote et à l'augmentation de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère. Les baisses d'accroissement épisodiques indiquent des réactions aux stress de sécheresse. L'étude montre que les séries chronologiques d'accroissement à long terme peuvent fournir des paramètres informatifs sur la productivité de la gestion forestière et la vitalité pour le *monitoring* environnemental. De telles séries chronologiques sont apparues indispensables pour évaluer les conséquences du changement climatique, notamment dans le contexte d'une augmentation vraisemblable des épisodes de sécheresse prolongée pendant la période de végétation.

8. DANKSAGUNG

Dank geht an die Europäische Union für die Förderung des Projektes "Mixed species forest management. Lowering risk, increasing resilience (REFORM, Sumforest ERA-NET)" (# 2816ERA02S). Weiter sei der DFG für die Förderung des Projekts "Structure and dynamics of mixed-species stands of Scots pine and European beech compared with monospecific stands. Analysis along an ecological gradient through Europe" (# DFG 292/15-1) gedankt.

An das Bayerische Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten geht Dank für die Unterstützung des Projektes W07 „Betreuung der Langfristigen ertragskundlichen Versuchsflächen“ and an die Bayerischen Staatsforsten (BaySF) für die Bereitstellung von über 200 ha Fläche für die Langfristigen Versuchsflächen in Bayern. Dank gilt außerdem ULRICH KERN für die Anfertigung der Grafiken, BEATE FELSL für die Textkorrekturen und anonymen Gutachtern für ihre Hinweise zur Überarbeitung des Manuskriptes.

9. LITERATUR

ALLEN, C. D., D. D. BRESHEARS und N. G. McDowell (2015): On underestimation of global vulnerability to tree mortality and forest die-off from hotter drought in the Anthropocene. *Ecosphere* **6**(8): S. 1–55.

- AMMER, C. (2017): Unraveling the importance of inter- and intraspecific competition for the adaptation of forests to climate change. *In: CÁNOVAS, F. M., LÜTTGE, U., MATYSSEK, R.* (eds) *Progress in Botany* Vol. **78**, Springer. S. 345–367.
- AMMER, C. (2019): Diversity and forest productivity in a changing climate. *New Phytologist* **221**(1), S. 50–66.
- AREND, M., T. KUSTER, M. S. GÜNTHARDT-GOERG und M. DOBBERTIN (2011): Provenance-specific growth responses to drought and air warming in three European oak species (*Quercus robur*, *Q. petraea* and *Q. pubescens*). *Tree Phys* **31**(3): S. 287–297.
- ATZMON, N., Y. MOSHE und G. SCHILLER (2004): Eco-physiological response to severe drought in *Pinus halepensis* Mill. trees of two provenances. *Plant Ecol* **171**(1–2): S. 15–22.
- BAUHUS, J., D. I. FORRESTER, B. GARDINER, H. JACTEL, R. VALLEJO und H. PRETZSCH (2017): Ecological stability of mixed-species forests. In *Mixed-Species Forests* (pp. 337–382). Springer, Berlin, Heidelberg.
- BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR WALD UND FORSTWIRTSCHAFT (2005): Die zweite Bundeswaldinventur 2002, LWF Wissen 49.
- BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN (2018): Hilfstafeln für die Forsteinrichtung, München, 352 S.
- BELLO, J., N. J. HASSELQUIST, P. VALLET, A. KAHMEN, T. PEROT und N. KORBOULEWSKY (2019): Complementary water uptake depth of *Quercus petraea* and *Pinus sylvestris* in mixed stands during an extreme drought. *Plant and Soil*, S. 1–23.
- BINKLEY, D. und P. HÖGBERG (1997): Does atmospheric deposition of nitrogen threaten Swedish forests? *Forest Ecology and Management* **92**(1–3), S. 119–152.
- BORCHERT, H. (2004): Ökonomische Folgen des Trockenjahres 2003 und Kosten des Waldumbaus. LWF aktuell **43**, S. 31–32.
- BÖSCH, B. (2001): Neue Bonitierungs- und Zuwachshilfen. Wissenstransfer in Praxis und Gesellschaft–FVA Forschungstage, 2001, 5. Jg., Nr. 06.
- BOTTERO, A., A. W. D'AMATO, B. J. PALIK, J. B. BRADFORD, S. FRAVER, M. A. BATTAGLIA und L. A. ASHERIN (2017): Density-dependent vulnerability of forest ecosystems to drought. *J Appl Ecol* **54**(6): S. 1605–1614.
- CHOAT, B., S. JANSEN, T. J. BRODRIBB, H. COCHARD, S. DELZON, R. BHASKAR und A. L. JACOBSEN (2012): Global convergence in the vulnerability of forests to drought. *Nature* **491**(7426), S. 752.
- DAI, A. (2011): Drought under global warming: a review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change* **2**(1), S. 45–65.
- D'AMATO, A. W., J. B. BRADFORD, S. FRAVER und B. J. PALIK (2013): Effects of thinning on drought vulnerability and climate response in north temperate forest ecosystems. *Ecol Appl* **23**(8): S. 1735–1742.
- DE STREEL, G., C. COLLET, I. BARBEITO, K. BIELAK, A. BRAVO-OVIEDO, G. BRAZAITIS und M. LÖF (2019): Contrasting patterns of tree species mixture effects on wood – 13 C along an environmental gradient. *European Journal of Forest Research* (2020) **139**: S. 229–245, <https://doi.org/10.1007/s10342-019-01224-z>
- DEL RÍO GAZTELURRUTIA, M., J. A. B. OVIEDO, H. PRETZSCH, M. LÖF und R. RUIZ-PEINADO (2017): A review of thinning effects on Scots pine stands: From growth and yield to new challenges under global change. *Forest systems*, **26**(2), S. 9.
- DEL RÍO, M., G. SCHÜTZE und H. PRETZSCH (2014): Temporal variation of competition and facilitation in mixed species forests in Central Europe. *Plant Biol* **16**(1): S. 166–176.
- DEL RIO, M., H. PRETZSCH, R. RUIZ-PEINADO, E. AMPOORTER, P. ANNIGHÖFER, I. BARBEITO, K. BIELAK, G. BRAZAITIS, L. COLL, L. DRÖSSLER, M. FABRIKA, D. I. FORRESTER, M. HEYM, V. HURT, V. KURYLYAK, M. LÖF, F. LOMBARDI, E. MADRICKIERE, B. MATOVIC, F. MOHREN, R. MOTTA, J. DEN OUDEN, M. PACK, QU. PONETTE, G. SCHÜTZE, J. SKRZYSZEWSKI, V. SRAMEK, H. STERBA, D. STOJANOVIC, M. SVOBODA, T. M. ZLATANOV und A. BRAVO-OVIEDO (2017): Species interactions increase the temporal stability of community productivity in *Pinus sylvestris*-*Fagus sylvatica* mixtures across Europe. *Journal of Ecology* **105**(4): S. 1032–1043.
- DEL RIO, M., H. PRETZSCH, R. RUIZ-PEINADO, E. AMPOORTER, P. ANNIGHÖFER, I. BARBEITO, K. BIELAK, G. BRAZAITIS, L. COLL, L. DRÖSSLER, M. FABRIKA, D. I. FORRESTER, M. HEYM, V. HURT, V. KURYLYAK, M. LÖF, F. LOMBARDI, E. MADRICKIERE, B. MATOVIC, F. MOHREN, R. MOTTA, J. DEN OUDEN, M. PACK, QU. PONETTE, G. SCHÜTZE, J. SKRZYSZEWSKI, V. SRAMEK, H. STERBA, D. STOJANOVIC, M. SVOBODA, T. M. ZLATANOV und A. BRAVO-OVIEDO (2017): Species interactions increase the temporal stability of community productivity in *Pinus sylvestris*-*Fagus sylvatica* mixtures across Europe. *Journal of Ecology* **105**(4): S. 1032–1043.
- DEL RÍO, 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.
- DE STREEL, G., C. COLLET, I. BARBEITO, K. BIELAK, A. BRAVO-OVIEDO, G. BRAZAITIS und M. LÖF (2019): Contrasting patterns of tree species mixture effects on wood δ 13 C along an environmental gradient. *European Journal of Forest Research*, S. 1–17.
- DING, H., H. PRETZSCH, G. SCHÜTZE und T. RÖTZER (2017): Size dependency of tree growth response to drought among Norway spruce and European beech individuals in monospecific and mixed-species stands. *Plant Biology* **19**(5): S. 709–719 DOI 10.1111/1365-2745.12727
- DOBBERTIN, M. (2005): Tree growth as indicator of tree vitality and of tree reaction to environmental stress: a review. *European Journal of Forest Research* **124**(4), S. 319–333.
- DRÖSSLER, L., E. AGESTAM, K. BIELAK, M. DUDZINSKA, J. KORICHEVA, M. LIZINIEWICZ, M. LÖF, B. MASON, H. PRETZSCH, S. VALKONEN und K. WELLHAUSEN (2018): Over- and Underyielding in Time and Space in Experiments with Mixed Stands of Scots Pine and Norway Spruce. *Forests* **9**(8): S. 18. doi.org/10.3390/f9080495
- ERTELD, W. (1963): Ertragstafelauszüge für den Gebrauch in der Praxis. 2. neu bearbeitete und ergänzte Auflage, Neumann Verlag, Radebeul, 170 p.
- ERTELD, W. (1961): Ertragstafel der Eichen, mäßige Durchforstung. *In: (Hrsg.) ERTELD, W.* (1963): Ertragstafelauszüge. Für den Gebrauch in der Praxis, 2.
- FORRESTER, D. I. und H. PRETZSCH (2015): Tamm Review: On the strength of evidence when comparing ecosystem functions of mixtures with monocultures. *Forest Ecology and Management* **356**, S. 41–53.
- FRANZ, F. (1971): Funktionen und Tabellen der Derbholzformhöhen für die wichtigsten Baumarten in Bayern. 137 München, Manuskriptdruck, unpublished; 1971.

- FRANZ, F., J. BACHLER, E. DECKELMANN, E. KENNEL, R. KENNEL, A. SCHMIDT und U. WOTSCHIKOWSKY (1973): Bayerische Waldinventur 1970/71. Inventurabschnitt I: Großrauminventur Aufnahme- und Auswertungsverfahren. Forstliche Versuchsanstalt München, Vol. 11, 143 p. für Wald, L. B. L. Forstwirtschaft (2005): Die zweite Bundeswaldinventur 2002: Ergebnisse für Bayern. LWF Wissen **49**, S. 99.
- GEBHARDT, T., K. H. HÄBERLE, R. MATYSSEK, C. SCHULZ und C. AMMER (2014): The more, the better? Water relations of Norway spruce stands after progressive thinning. *Agr For Met* **197**: S. 235–243.
- GIMMI, U., B. POULTER, A. WOLF, H. PORTNER, P. WEBER und M. BÜRGI (2013): Soil carbon pools in Swiss forests show legacy effects from historic forest litter raking. *Landscape Ecology* **28**(5), S. 835–846.
- GROSSIORD, C. (2018): Having the right neighbors: how tree species diversity modulates drought impacts on forests. *New Phytol* <https://doi.org/10.1111/nph.15667>
- GROSSIORD, C., A. GRANIER, S. RATCLIFFE, O. BOURIAUD, H. BRUELHEIDE, E. CHEČKO und M. SCHERER-LORENZEN (2014): Tree diversity does not always improve resistance of forest ecosystems to drought. *PNAS* **111**(41): S. 14812–14815.
- HARTMANN, H. (2011): Will a 385 million year-struggle for light become a struggle for water and for carbon? – How trees may cope with more frequent climate change-type drought events. *Glob Chang Biol* **17**(1): S. 642–655.
- HEYM, M., K. BIELAK, K. WELLHAUSEN, E. UHL, P. BIBER, D. PERKINS, M. STECKEL, E. A. THURM, A. RAIS und H. PRETZSCH (2018): A New Method to Reconstruct Recent Tree and Stand Attributes of Temporary Research Plots: New Opportunity to Analyse Mixed Forest Stands. *IntechOpen, Conifers*, Chapter 2, DOI: 10.5772/intechopen.79682.
- HEYM, M., R. RUIZ-PEINADO, M. DEL RIO, K. BIELAK, D. I. FORRESTER, G. DIRNBERGER, I. BARBEITO, G. BRAZAITIS, I. RUSKYTKE, L. COLL, M. FABRIKA, L. DRÖSSLER, M. LÖF, H. STERBA, V. HURT, V. KURYLYAK, F. LOMBARDI, D. STOJANOVIC, J. DEN OUDEN, R. MOTTA, M. PACH, J. SKRZYSZEWSKI, Q. PONETTE, G. DE STREEL, V. SRAMEK, T. CIHAK, T. M. ZLATANOV, A. AVDAGIC, CH. AMMER, K. VERHEYEN, B. WLODZIMIERZ, A. BRAVO-OVIEDO und H. PRETZSCH (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.
- HILMERS, T., A. AVDAGIĆ, L. BARTKOWICZ, K. BIELAK, F. BINDER, A. BONČINA, L. DOBOR, D. I. FORRESTER, M. L. HOBI, A. IBRAHIMPAGIĆ, A. JAWORSKI, M. KLOPČIČ, B. MATOVIĆ, T. A. NAGEL, R. PETRÁŠ, M. DEL RIO, B. STAJIĆ, E. UHL, T. ZLATANOV, R. TOGNETTI und H. PRETZSCH (2019): The productivity of mixed mountain forests comprised of *Fagus sylvatica*, *Picea abies*, and *Abies alba* across Europe. *Forestry* (Lond). <https://doi.org/10.1093/forestry/cpz035>
- HOFFMANN, N., P. SCHALL, C. AMMER, B. LEDER und T. VOR (2018): Drought sensitivity and stem growth variation of nine alien and native tree species on a productive forest site in Germany. *Agricultural and Forest Meteorology*, **256**, S. 431–444.
- HOFMANN, G., D. HEINSDORF und H. H. KRAUSS (1990): Wirkung atmosphärischer Stickstoffeinträge auf Produktivität und Stabilität von Kiefern-Forstökosystemen. *Beiträge für die Forstwirtschaft* **24**(2), S. 59–73.
- JACTEL, H. und E. G. BROCKERHOFF (2007): Tree diversity reduces herbivory by forest insects. *Ecol letters* **10**(9): S. 835–848
- JACTEL, H., B. C. NICOLL, M. BRANCO, J. R. GONZALEZ-OLABARRIA, W. GRODZKI, B. LÄNGSTRÖM und H. SANTOS (2009): The influences of forest stand management on biotic and abiotic risks of damage. *Ann For Sci* **66**(7): S. 701–701.
- JOHANN, K. (1993): DESER-Norm 1993. Normen der Sektion Ertragskunde im Deutschen Verband Forstlicher Forschungsanstalten zur Aufbereitung von waldwachstumskundlichen Dauerversuchen. *Proc Dt Verb Forstl Forschungsanst, Sek Ertragskd*, in Unterreichenbach-Kapfenhardt: S. 96–104.
- JUCKER, T., O. BOURIAUD, D. AVACARITEI und D. A. COOMES (2014): Stabilizing effects of diversity on aboveground wood production in forest ecosystems: linking patterns and processes. *Ecology Letters* **17**(12), S. 1560–1569.
- JÜTTNER, O. (1955): Eichen-ertragstafeln. In: SCHÖBER, R. (ed) (1971): Ertragstafeln der wichtigsten Baumarten. J.D. Sauerländer's Verlag, Frankfurt am Main, pp. 12–25, 134–138.
- KAUPPI, P. E., M. POSCH und P. PIRINEN (2014): Large impacts of climatic warming on growth of boreal forests since 1960. *PLoS One* **9**(11), e111340.
- KENK, G., H. SPIECKER und G. DIENER (1991): Referenzdaten zum Waldwachstum. Kernforschungszentrum Karlsruhe, KfK-PEF **82**, 59 p.
- KENNEL, R. (1972): Die Buchendurchforstungsversuche in Bayern von 1870 bis 1970. Forstliche Versuchsanstalt München **7**, S. 77–80.
- KNOKE, Th. (2018): Zuwachstafeln für ausgewählte Baumarten. Einordnung der korrigierten Zuwachsprognosen, S. 31–32. In: (Hrsg.) Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Hilfstafeln für die Forsteinrichtung, München, 352 S.
- KÖRNER, C., R. ASSHOFF, O. BIGNUCOLO, S. HÄTTENSCHWILER, S. G. KEEL, S. PELÁEZ-RIEDL und G. ZOTZ (2005): Carbon flux and growth in mature deciduous forest trees exposed to elevated CO₂. *Science* **309**(5739), S. 1360–1362.
- KREUTZER, K. (1972): Über den Einfluß der Streunutzung auf den Stickstoffhaushalt von Kiefernbeständen (*Pinus silvestris* L.). *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, **91**(1), S. 263–270.
- KÜSTERS, E. (2001): Wachstumstrends der Kiefer in Bayern (Doctoral dissertation, Technische Universität München).
- KÜSTERS, E., M. BACHMANN, G. SCHÜTZE, H. UTSCHIG und H. PRETZSCH (2004): Die Kiefer im Rein- und Mischbestand: Produktivität, Variabilität, Wachstumstrend. *Mitteilungen aus der Bayerischen Staatsforstverwaltung* **52**: S. 345, ISSN 1616-511X.
- LEMBCKE, G., E. KNAPP und O. DITTMAR (1975): DDR-Kiefern-Ertragstafel. Institut für Forstwissenschaften Eberswalde.
- LIU, Y., und R. N. MULLER (1993): Effect of Drought and Frost on Radial Growth of Overstory and Understory Stems in a Deciduous Forest. *American Midland Naturalist* **129**: S. 19–25.
- LLORET, F., E. G. KEELING und A. SALA (2011): Components of tree resilience: effects of successive low-growth episodes in old ponderosa pine forests. *Oikos* **120**(12), S. 1909–1920.
- LUNDSTRÖM, U. S., D. C. BAIN, A. F. S. TAYLOR und P. A. W. VAN HEES (2003): Effects of acidification and its mitiga-

- tion with lime and wood ash on forest soil processes: a review. *Water, Air and Soil Pollution: Focus* **3**(4), S. 5–28.
- MATYSSEK, R. und H. SANDERMANN (2003): Impact of ozone on trees: an ecophysiological perspective. In *Progress in botany* (pp. 349–404). Springer, Berlin, Heidelberg.
- MATYSSEK, R., G. H. R. CEULEMANS, H. RENNENBERG, H. PRETZSCH, K. HABERER und W. OBWALD (2010): Enhanced ozone strongly reduces carbon sink strength of adult beech (*Fagus sylvatica*) – Resume from the free-air fumigation study at Kranzberg Forest. *Environmental Pollution* **158**(8), S. 2527–2532.
- MCMAHON, S. M., G. G. PARKER und D. R. MILLER (2010): Evidence for a recent increase in forest growth. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **107**(8), S. 3611–3615.
- MENZEL, A. and P. FABIAN (1999): Growing season extended in Europe, *Nature* **397**: S. 659.
- METZ, J., P. ANNIGHÖFER, P. SCHALL, J. ZIMMERMANN, T. KAHL, E. D. SCHULZE und C. AMMER (2016): Site-adapted admixed tree species reduce drought susceptibility of mature European beech. *Global change biology* **22**(2), S. 903–920.
- METZ, J., P. ANNIGHÖFER, K. WESTEKEMPER, P. SCHALL, E. D. SCHULZE und C. AMMER (2019): Less is more: Effects of competition reduction and facilitation on intra-annual (basal area) growth of mature European beech. *Trees*, doi.org/10.1007/s00468-019-01894-7.
- NORBY, R. J., S. D. WULLSCHLEGER, C. A. GUNDERSON, D. W. JOHNSON und R. CEULEMANS (1999): Tree responses to rising CO₂ in field experiments: implications for the future forest. *Plant, Cell & Environment* **22**(6), S. 683–714.
- PETTERSON, H. (1955): Die Massenproduktion des Nadelwaldes. *Mitt Schwed Forstl Forschungsanst, Stockholm*, vol 45 (IB), 391 p.
- PRETZSCH, H., M. STECKEL, M. HEYM, P. BIBER, C. AMMER, M. EHBRECHT und F. VAST (2019): Stand growth and structure of mixed-species and monospecific stands of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and oak (*Q. robur* L., *Quercus petraea* (MATT.) Liebl.) analysed along a productivity gradient through Europe. *European Journal of Forest Research* (2020) **139**: S. 349–367, <https://doi.org/10.1007/s10342-019-01233-y>
- PRETZSCH, H., M. DEL RIO, P. BIBER, C. ARCANGELI, K. BIELAK, P. BRANG, M. DUDZINSKA, D. I. FORRESTER, J. KLÄDTKE, U. KOHNLE, TH. LEDERMANN, R. MATTHEWS, J. NAGEL, R. NAGEL, U. NILSSON, F. NINGRE, TH. NORD-LARSEN, H. WERNSDÖRFER und E. SYCHEVA (2019): Maintenance of long-term experiments for unique insights into forest growth dynamics and trends: review and perspectives. *European Journal of Forest Research* **138**(1): S. 165–185, <https://doi.org/10.1007/s10342-018-1151-y>.
- PRETZSCH, H., T. GRAMS, K. H. HÄBERLE, K. PRITSCH, T. BAUERLE und T. RÖTZER (2020): Growth and mortality of Norway spruce and European beech in mono-specific and mixed-species stands under natural episodic and experimentally extended drought. Results of the KROOF rainfall exclusion experiment. *Tress Structure and Function*. DOI: 10.1007/s00468-020-01973-0.
- PRETZSCH, H. (1992): Zunehmende Unstimmigkeiten zwischen erwartetem und wirklichem Wachstum unserer Waldbestände. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* **111**(6): S. 366–382.
- PRETZSCH, H., G. SCHÜTZE und E. UHL (2013): Resistance of European tree species to drought stress in mixed versus pure forests: evidence of stress release by inter-specific facilitation. *Plant Biology* **15**(3), S. 483–495.
- PRETZSCH, H. (1996): Growth trends of forests in Southern Germany. In: SPIECKER, H., MIELIKAINEN, K., KÖHL, M., SKOSVSGAARD, J.P. (eds.): *Growth Trends in European Forests*. European Forest Inst. Res. Rep. **5**: S. 107–131.
- PRETZSCH, H. (2009): *Forest Dynamics, Growth and Yield*. Springer Verlag, Berlin, S. 664, ISBN 978-3-540-88306-7
- PRETZSCH, H. (2016): Ertragstafel-Korrekturfaktoren für Umwelt- und Mischungseffekte. *AFZ-Der Wald* **187**(14): S. 47–50.
- PRETZSCH, H. und H. UTSCHIG (2000): Wachstumstrends der Fichte in Bayern. Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Referat V 2.
- PRETZSCH, H. und P. BIBER (2005): A Re-Evaluation of Reinekes Rule and Stand Density Index. *Forest Science* **51**(4): S. 304–320.
- PRETZSCH, H., P. BIBER, G. SCHÜTZE und K. BIELAK (2014): Changes of forest stand dynamics in Europe. Facts from long-term observational plots and their relevance for forest ecology and management. *Forest Ecology and Management* **316**: S. 65–77.
- PRETZSCH, H., P. BIBER, G. SCHÜTZE, E. UHL und T. RÖTZER (2014): Forest stand growth dynamics in Central Europe have accelerated since 1870. *Nature Communications* **5**(4957): S. 1–10.
- PRETZSCH, H., P. BIBER, E. UHL, J. DAHLHAUSEN, G. SCHÜTZE, D. PERKINS, T. RÖTZER, J. CALDENTY, T. KOIKE, T. VAN CON, A. CHAVANNE, B. DU TOIT, K. FOSTER und B. LEFER (2017): Climate change accelerates growth of urban trees in metropolises worldwide. *Scientific Reports* **7**: S. 10 DOI:10.1038/s41598-017-14831-w.
- PRETZSCH, H., J. BLOCK, J. DIELER, P. H. DONG, U. KOHNLE, J. NAGEL und A. ZINGG (2010): Comparison between the productivity of pure and mixed stands of Norway spruce and European beech along an ecological gradient. *Annals of Forest Science* **67**(7), S. 712.
- 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. SKRZYSEWSKI, 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. und M. KÖLBEL (1988): Einfluß von Grundwasserabsenkungen auf das Wuchsverhalten der Kiefernbestände im Gebiet des Nürnberger Hafens – Ergebnisse ertragskundlicher Untersuchungen auf der Weiserflächenreihe Nürnberg 317. *Forstarchiv* **59**(3): S. 89–96.
- PRETZSCH, H., G. SCHÜTZE und P. BIBER (2018): Drought can favour the growth of small in relation to tall trees in mature stands of Norway spruce and European beech. *Forest Ecosystems* **5**(20): S. 19. <https://doi.org/10.1186/s40663-018-0139-x>

- PRETZSCH, H., G. SCHÜTZE und E. UHL (2012): Resistance of European tree species to drought stress in mixed versus pure forests: evidence of stress release by inter-specific facilitation. *Plant Biology* **15**(3): S. 483–495.
- PRETZSCH, H., M. STECKEL, M. HEYM, P. BIBER, C. AMMER, M. EHBRECHT und F. VAST (2019): Stand growth and structure of mixed-species and monospecific stands of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and oak (*Q. robur* L., *Quercus petraea* (MATT.) L. iubl.) analysed along a productivity gradient through Europe. *European Journal of Forest Research*, S. 1–19.
- PRETZSCH, H. und H. UTSCHIG (2000): Wachstumstrends der Fichte in Bayern. Mitteilungen aus der Bayerischen Staatsforstverwaltung, Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, München, **49**: S. 170.
- R CORE TEAM (2019): R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>
- REIMEIER, S. und E. KENNEL (2001): Zuwachstafeln für ausgewählte Baumarten, Dr. Norbert Kessel Verlag, Remagen-Oberwinter, 93 S.
- REIMEIER, S. (2001): Analyse der Zuwachsveränderungen von Waldbeständen und Möglichkeiten der Prognose aus Daten permanenter Stichprobeninventuren, Dissertation. Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt d. Techn. Univ. München, 141 S.
- REMUND, J. und S. AUGUSTIN (2015): Zustand und Entwicklung der Trockenheit in Schweizer Wäldern. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* **166**(6), S. 352–360.
- RODRIGUEZ-CALCERRADA, J., I. M. PÉREZ-RAMOS, J. M. OURCIVAL, J. M. LIMOUSIN, R. JOFFRE und S. RAMBAL (2011): Is selective thinning an adequate practice for adapting *Quercus ilex* coppices to climate change? *Ann For Sci* **68**(3): S. 575.
- RÖHLE, H. (1994): Zum Wachstum der Fichte auf Hochleistungsstandorten in Südbayern. Ertragskundliche Auswertung langfristiger beobachteter Versuchsreihen unter besonderer Berücksichtigung von Trendänderungen im Wuchsverhalten. Habil Forstwiss Fak, LMU München, 249 p.
- RÖHLE, H. (1997): Änderung von Bonität und Ertragsniveau in südbayerischen Fichtenbeständen. *AFJZ* **168** (6/7): S. 110–114.
- SCHÄFER, R. und B. METZGER (2009): Was macht eigentlich das Waldsterben. MASIUS, PATRICK et al. (Hg.): Umweltgeschichte und Umweltzukunft. Zur gesellschaftlichen Relevanz einer jungen Disziplin. Göttingen, S. 201–227.
- SCHMIDT, A. (1969): Der Verlauf des Höhenwachstums von Kiefern auf einigen Standorten der Oberpfalz. *Forstw Cbl* **88**: S. 33–40.
- SCHMIDT, A. (1971): Wachstum und Ertrag der Kiefer auf wirtschaftlich wichtigen Standorteinheiten der Oberpfalz. *Forstl Forschungsber München* **1**, 187 p.
- SCHOBER, R. (1967): Buchen-Ertragstafel für mäßige und starke Durchforstung. In: SCHOBER, R. (1972) Die Rotbuche 1971. *Schr. Forstl. Fak. Univ. Göttingen u. Niedersächs. Forstl. Versuchsanst.* 43/44, J.D. Sauerländer's Verlag, Frankfurt am Main, 333 p.
- SCHULDT, B., F. KNUTZEN, S. DELZON, S. JANSEN, H. MÜLLER-HAUBOLD, R. BURLETT, Y. CLOUGH und C. LEUSCHNER (2016): How adaptable is the hydraulic system of European beech in the face of climate change-related precipitation reduction?. *New Phytologist* **210**(2), S. 443–458.
- SEIDLING, W., D. ZICHE und W. BECK (2012): Climate responses and interrelations of stem increment and crown transparency in Norway spruce, Scots pine, and common beech. *Forest Ecology and Management* **284**, S. 196–204.
- SKELLY, J. M. und J. L. INNES (1994): Waldsterben in the forests of central Europe and eastern North America: Fantasy or reality?. *Plant Disease* **78**(11), S. 1021–1032.
- SOHN, J. A., S. SAHA und J. BAUHUS (2016): Potential of forest thinning to mitigate drought stress: A meta-analysis. *For Ecol Manage* **380**: S. 261–273.
- STECKEL, M., M. DEL RIO, C. AMMER, K. BIELAK, G. BRAZAITIS, L. COLL, C. COLLET, A. JANSONS, P. VALLET, M. LÖF, A. NOTHDURFT, M. PACH, M. PARDOS, Q. PONETTE, D. O. J. REVENTLOW, R. SITKO, M. SVOBODA, B. WOLFF, J. CERNY und H. PRETZSCH (2020): Species mixing reduces drought stress of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and oak (*Quercus petraea* (MATT.) Liebl., *Quercus robur* L.) – climate and site fertility modify the mixing effect. *Forest Ecology and Management* **461**, doi.org/10.1016/j.foreco.2020.117908
- STECKEL, M., M. HEYM, B. WOLFF, D. O. J. REVENTLOW und H. PRETZSCH (2019): Transgressive overyielding in mixed compared with monospecific Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and oak (*Quercus robur* L., *Quercus petraea* (MATT.) Liebl.) stands – Productivity gains increase with annual water supply. *Forest Ecology and Management* **439**, S. 81–96.
- THURM, E. A., P. BIBER und H. PRETZSCH (2017): Stem growth is favored at expenses of root growth in mixed stands and humid conditions for Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*) and European beech (*Fagus sylvatica*). *Trees* **31**(1), S. 349–365.
- THURM, E. A., E. UHL und H. PRETZSCH (2016): Mixture reduces climate sensitivity of Douglas-fir stem growth. *Forest Ecology and Management* **376**, S. 205–220.
- ULRICH, B. (1990): Waldsterben: forest decline in West Germany. *Environmental science & technology* **24**(4), S. 436–441.
- VAN DER MAATEN-THEUNISSEN, M. und O. BOURIAUD (2012): Climate-growth relationships at different stem heights in silver fir and Norway spruce. *Canadian Journal of Forest Research* **42**(5), S. 958–969.
- WELLHAUSEN, K., M. HEYM und H. PRETZSCH (2017): Mischbestände aus Kiefer (*Pinus sylvestris* L.) und Fichte (*Picea abies* (KARST.) L.): Ökologie, Ertrag und waldbauliche Behandlung. *Allgemeine Forst- u. Jagdzeitung* **188**(1/2): S. 3–34.
- WIEDEMANN, E. (1943): Kiefern-Ertragstafel für mäßige Durchforstung, starke Durchforstung und Lichtung. In: WIEDEMANN, E. (1948) Die Kiefer 1948. Verlag M & H Schaper, Hannover, 337 p.
- ZANG, C., A. ROTHE, W. WEIS und H. PRETZSCH (2011): Zur Baumarteneignung bei Klimawandel: Ableitung der Trockenstress-Anfälligkeit wichtiger Waldbaumarten aus Jahrringbreiten. *Environmental Science & Policy* **14**: S. 100–110.