

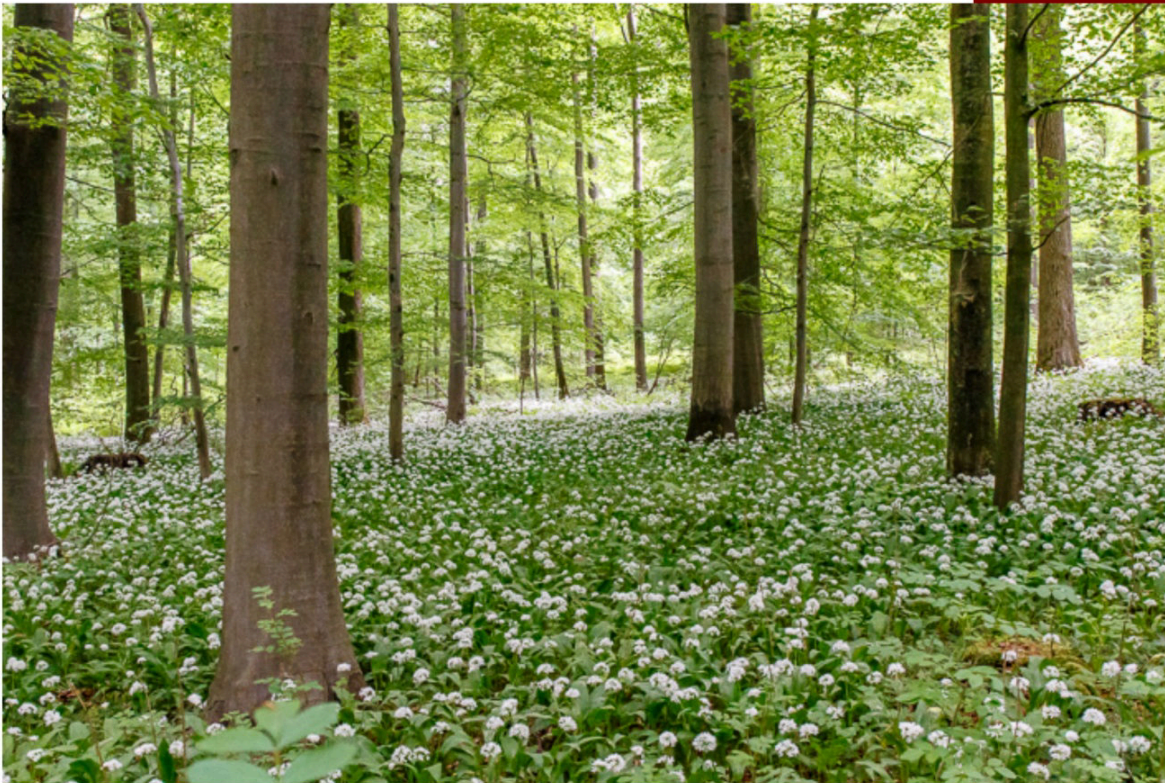


DEUTSCHER VERBAND  
FORSTLICHER FORSCHUNGSANSTALTEN

Sektion Ertragskunde

2015

# Tagungsbericht



Jahrestagung  
18. - 20. 05. 2015  
Kammerforst

Thüringen

# Produktivität und Klimasensitivität von Kiefer (*Pinus sylvestris* L.) und Fichte (*Picea abies* (L.) Karst.) im Rein- und Mischbestand - Untersuchungen entlang eines ökologischen Gradienten

---

Klaas Wellhausen

Lehrstuhl für Waldwachstumskunde, Technische Universität München

## 1 Zusammenfassung

Die Baumarten Kiefer und Fichte haben in Deutschland sowohl im Rein-, als auch im Mischbestand eine hohe waldbauliche und ökonomische Bedeutung. Auf Basis von acht neu angelegten temporären Versuchen (Triplets) konnte gezeigt werden, dass Kiefern-Fichten-Mischbestände gegenüber korrespondierenden Reinbeständen eine um mindestens 5,0% beziehungsweise  $0,8 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  höhere relative Bestandesproduktivität aufweisen. Diese höhere Bestandesproduktivität wird im Wesentlichen von der Baumart Fichte getragen und äußert sich in höheren Bestandesdichten (+17,9%) und höheren Einzelbaumzuwächsen (+18,5% in den Mischbeständen). Im vorliegenden Beitrag wurde untersucht, ob der Mehrzuwachs gegebenenfalls auch auf eine bessere Abpufferung von ungünstigen Witterungsbedingungen beziehungsweise eine bessere Ausschöpfung von günstigen Bedingungen zurückzuführen ist. Aufbauend auf Analysen von Bohrspänen- und Stammscheiben von insgesamt 571 herrschenden und mitherrschenden Bäumen konnte in ersten Ergebnissen gezeigt werden, dass das Untersuchungsmaterial den dendrochronologischen Grundanforderungen genügt und sich darauf aufbauend baumartenspezifische Klima-(Witterungs-)Zuwachsbeziehungen ableiten lassen. Mit Blick auf die Identifizierung von wachstums-beeinflussenden monatlichen Klimaparametern konnten die in anderen Studien gewonnenen Erkenntnisse auf Basis von baumweisen Regressionskoeffizienten (*response coefficients*) bestätigt werden. So hatten neben den Frühsommerniederschlägen im Juni, die Temperaturen im März des aktuellen Jahres und bei der Fichte zusätzlich die Temperaturen im Oktober des vorangehenden Jahres den größten positiven Einfluss auf das Durchmesserwachstum. In diesem Zusammenhang ließ sich allerdings nicht die angestrebte Differenzierung von Rein- und Mischbestand erreichen. Vor diesem Hintergrund wurde die klimatische Wasserbilanz als aggregierende Größe über der Vegetationszeit in einem generalisierten additiven gemischten Modell (*GAMM response function*) verwendet. Hierbei zeigte sich der erwartete signifikante positive Zusammenhang von Wasserverfügbarkeit (klimatischer Wasserbilanz) in der Vegetationszeit und Durchmesserwachstum. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass die Baumart Kiefer im Verhältnis zu ihrem individuellen Zuwachsniveau im Vergleich zur Fichte weniger sensibel auf Wasserlimitierung reagiert (+2.5%). Eine Differenzierung von Rein- und Mischbestand war allerdings auch in diesem zweiten Untersuchungsteil nicht möglich. Gleichzeitig zeigten sich erste Hinweise, dass es offenbar standortspezifische Modifikationen der allgemeingültigen Klima-Zuwachsbeziehungen gibt. So reagierten besser wasserversorgte Standorte tendenziell schneller auf Wasserlimitierung. Diese ersten Befunde müssen im weiteren Verlauf der Untersuchung überprüft und weiter analysiert werden. Darüber hinaus sollen unter anderem noch einzelne Trocken beziehungsweise Extremjahre und das Verhalten von unterständigen Bäumen untersucht werden.

## 2 Einleitung

Bayern weist gemäß der Bundeswaldinventur 3 mit 417.000 ha fast ein Fünftel der gesamten Kiefernfläche der Bundesrepublik Deutschland auf (BMEL 2014, LWF 2014). Nach der Stichprobeninventur im Bayerischen Staatswald kommt die Kiefer inzwischen häufig in Mischbeständen vor, dabei zu überwiegenden Anteilen in Mischung mit Fichte.

Wissenschaftliche Untersuchungen und Theorien heben die Bedeutung und Vorteile von Artmischungen hervor (HARPER 1977, JUCKER et al. 2014, KELTY 1992, MORIN 2011, OLSTHOORN 1999, PIOTTO 2008, SCHERER-LORENZEN et al. 2005, VANDERMEER 1992). Positive Wechselwirkungen in Mischbeständen werden dabei unter anderem auf folgende Ursachen zurückgeführt: komplementäre ober- und unterirdische Raumbesetzung, abweichende baumartenspezifische jahreszeitliche Phänologie sowie Veränderung des Bestandesinnenklimas und Stoffumsatzes. Idealtypisch führen diese Ursachen zu einer erhöhten Bereitstellung und Ausschöpfung von Licht-, Wasser- und Nährstoffressourcen und damit zu einer höheren Produktivität und gegebenenfalls auch zu einer verbesserten Stabilität und Habitatqualität von Mischbeständen.

Die Fragen zum Wachstum von Kiefer und Fichte im Rein- und Mischbestand sind zwar nicht grundsätzlich neu, allerdings gibt es hierzu bis dato nur wenige systematische Untersuchungen (BIELAK et al. 2014, BIELAK 2013, KÜSTERS et al. 2004, PRETZSCH et al. 2002, PRETZSCH et al. 2013). Zudem spiegeln die bisherigen Untersuchungen überwiegend Einzelfallstudien wider (LINDÉN UND AGESTAM 2003, MASON UND CONNOLLY 2013). Grundproblem all dieser Untersuchungen ist es, dass nur wenige langfristige Versuche zur Verfügung stehen, die sowohl Mischbestände als auch Reinbestände beider Baumarten abdecken und zugleich die Anforderungen nach wissenschaftlicher Vergleichbarkeit gewährleisten.

Vor diesem Hintergrund wird in der vorliegenden Untersuchung die Zuwachsrelation und Witterungssensitivität der Baumarten Kiefer und Fichte im Rein- und Mischbestand auf Basis von acht neuangelegten temporären Versuchen (Triplets) untersucht. Das Versuchsdesign orientiert sich dabei an den Untersuchungen von KENNEL (1965), PRETZSCH UND SCHÜTZE (2009) und LEBOURGEOIS et al. (2013). Die Untersuchungsflächen wurden entlang eines klimatischen Gradienten in den Hauptverbreitungsgebieten von Kiefern-Fichten-Mischbeständen in Bayern und im nordöstlichen Niedersachsen angelegt. Auf Basis von Bohrspänen und Stammscheiben sowie Höhen- und Triebhöhenrückmessungen konnte die Jahring-, Durchmesser- und Volumenentwicklung baumindividuell nachgebildet werden (Berechnungs- und Darstellungsverfahren nach BIBER 2013).

Für die untersuchten Kiefern-Fichten-Mischbestände konnte so im Vergleich zu den korrespondierenden Reinbeständen ein relativer Mehrzuwachs von etwa 5,0% beziehungsweise  $0,8 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  beobachtet werden (s. hierzu und zur Methodik Abbildung 1c und WELLHAUSEN 2014<sup>1</sup>). Dieser beobachtete relative Mehrzuwachs wird maßgeblich von der Baumart Fichte getragen (+3,8%, Abbildung 1a), und stellt nach weitergehenden statistischen Analysen eine eher konservative Abschätzung des Mehrzuwachse von insgesamt rund 8% dar.

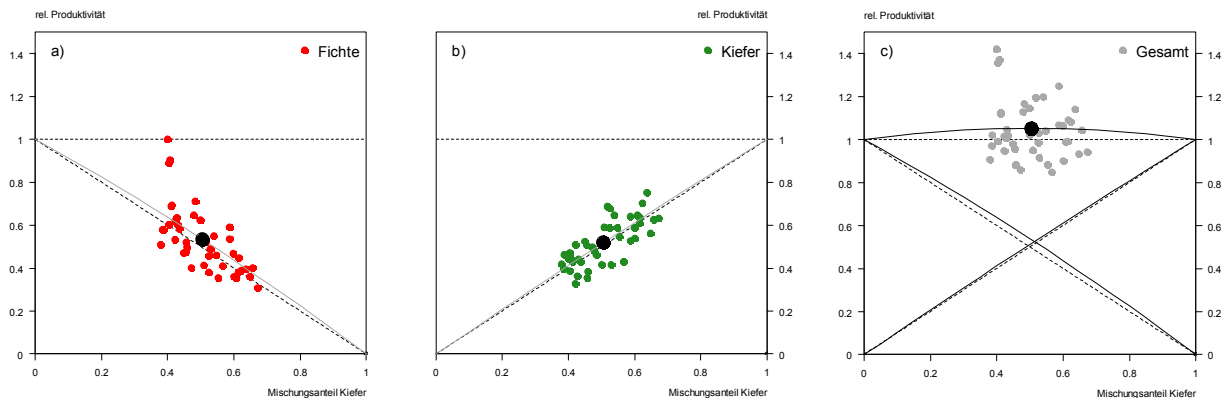


Abbildung 1: Vergleich der relativen Produktivität von Fichte (a) und Kiefer (b) sowie Gesamt (c) im Mischbestand für durchschnittlich sechs rechnerische Aufnahmezeitpunkte je Versuchsstandort. Mittelwerte sind jeweils durch fettgedruckte schwarze Punkte gekennzeichnet. Die durchgezogenen schwarzen Linien geben einen nichtlinearen funktionalen Ausgleich der Punktwolke wider.

Die relative Mehrproduktion äußert sich insbesondere in einer signifikant höheren Bestandesdichte und in einem höheren Einzelbaumzuwachs der Fichte im Mischbestand. Die beobachtete Stammzahl der Fichte im Mischbestand, ausgedrückt über den Stand-Density-Index nach REINEKE (1933), beträgt  $551 \text{ Nha}^{-1}$  (+ 17,9%) gegenüber dem Erwartungswert von  $467 \text{ Nha}^{-1}$  (s. Abbildung 2a).

<sup>1</sup> Ergebnisse in WELLHAUSEN (2014) ohne Versuchsstandorte Unterlüß und Schrobenhausen

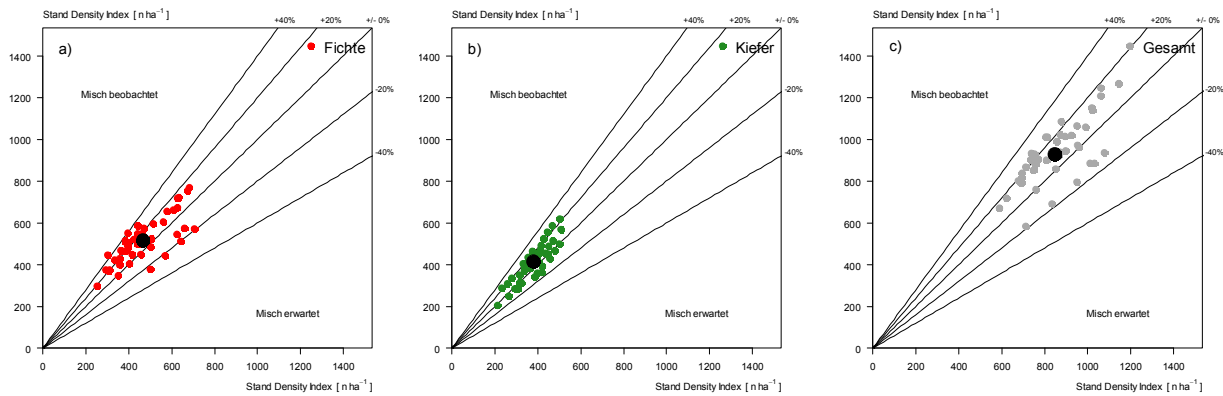


Abbildung 2: Gegenüberstellung der beobachteten und erwarteten Bestandesdichte (Stand Density Index (SDI) nach REINEKE (1933) im Mischbestand: a) Fichte, b) Kiefer und c) gesamter Mischbestand. Der Erwartungswert der Bestandesdichte im Mischbestand ergibt sich aus der auf Basis des Mischungsanteils reduzierten beobachteten Dichte im korrespondierenden Reinbestand (zur Methodik s. u. a. PRETZSCH et al. (2015), WELLHAUSEN (2014))

Gleichzeitig beträgt der beobachtete Einzelbaumzuwachs der Fichte bei einem mittleren Baumvolumen von  $1,0 \text{ m}^3$  und einer lokalen 50%-igen Kiefernbeimischung im Mischbestand rund  $0,032 \text{ m}^3 \text{ a}^{-1}$  (+18,5%) anstelle von  $0,027 \text{ m}^3 \text{ a}^{-1}$  im Reinbestand. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 3 modellhaft wiedergegeben. Die Kiefer profitiert dahingegen offenbar weniger vom Wachstum im Mischbestand und zeigt daher eine nur geringfügig erhöhte Bestandesdichte (+8,4 %) und sogar ein verringertes Einzelbaumwachstum (-7,1%) und folglich eine nur leicht erhöhte relative Produktivität (+ 1,2%).

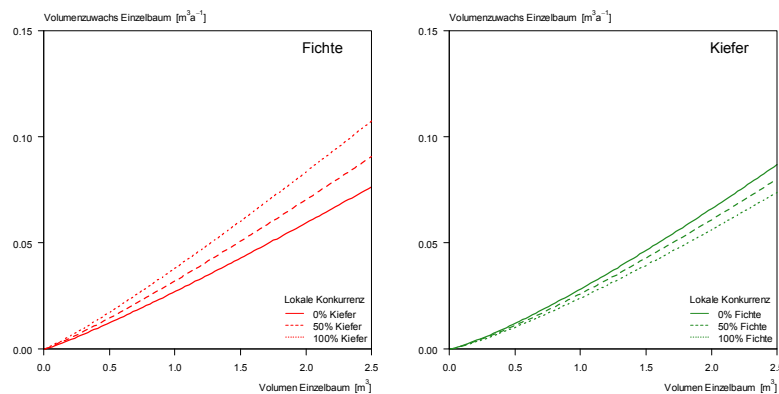


Abbildung 3: Modellhafte Darstellung des Zusammenhangs zwischen volumenbezogenem Einzelbaumzuwachs von Fichte (a) und Kiefer (b) und lokaler baumartenspezifischer Konkurrenzsituation.

In diesem Zusammenhang stellt sich die weiterführende Frage, ob der in den Mischbeständen beobachtete Mehrzuwachs gegebenenfalls auch auf eine bessere Abpufferung von ungünstigen Witterungsbedingungen beziehungsweise eine bessere Ausschöpfung von günstigen Bedingungen zurückzuführen ist (s. hierzu a. Pretzsch et al. 2014). Die Klimasensitivität der Baumarten Kiefer und Fichte ist zwar bereits seit längerem Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen (LEBOURGEOIS et al. 2010, Mäkinen et al. 2002, MARTIN-BENITO et al. 2013, OBERHUBER et al. 1998, ZANG 2011, ZANG et al. 2012) in Wissenschaft und Praxis wird die aktuelle und zukünftige Eignung der beiden Baumarten allerdings weiterhin kontrovers diskutiert; insbesondere die zukünftige Rolle der Kiefer ist dabei strittig (BOURIAUD UND POPA 2008, GRUBER et al. 2012, KÖLLING UND ZIMMERMANN 2007, MARTINEZ-VILALTA et al. 2012). Auch die Frage der Wirkung von Mischbeständen ist in diesem Zusammenhang nicht abschließend geklärt (MARTINEZ-VILALTA et al. 2012,). Vor diesem Hintergrund werden im vorliegenden Beitrag erste Ergebnisse zu folgenden Fragen vorgestellt:

- i. Wie beeinflussen klimatische Umweltfaktoren das Durchmesserwachstum von Kiefer und Fichte?
- ii. Unterscheidet sich die Reaktion auf die identifizierten klimatischen Umweltfaktoren zwischen Kiefer und Fichte und zwischen Rein- und Mischbestand?
- iii. Sind die beobachteten Wachstumsreaktionen von Kiefer und Fichte standortspezifisch?

### 3 Material und Methoden

#### 3.1 Temporäre Versuchsflächen

Die vorliegende Untersuchung basiert auf acht neu angelegten temporären Versuchen (Tripletts) in Rein- und Mischbeständen aus Kiefer und Fichte. Die acht Tripletts wurden in den Jahren 2013 und 2014 in bedeutsamen Verbreitungsgebieten von Kiefer und Fichte in Bayern und im nordöstlichen Niedersachsen angelegt und umfassen jeweils drei rechteckige Parzellen: je eine Kiefern- und eine Fichten-Reinbestandsparzelle sowie eine korrespondierende Parzelle der beiden Baumarten in einzelstammweiser Mischung. Die Reinbestandsparzellen sind im Mittel 400 Quadratmeter groß und die Mischbestandsparzellen rund 800 Quadratmeter. Das Alter der Bestände liegt zwischen 65 und 95 Jahren. Grundsätzlich wurden pro Tripletts nur Parzellen etwa gleichen Alters ausgewählt. Aufgrund von Unsicherheiten bei der Altersbestimmung im Gelände ergaben sich aber vereinzelt baumartenbezogene Altersabweichungen von bis zu 15 Jahren (s. Tabelle 6 im Anhang).

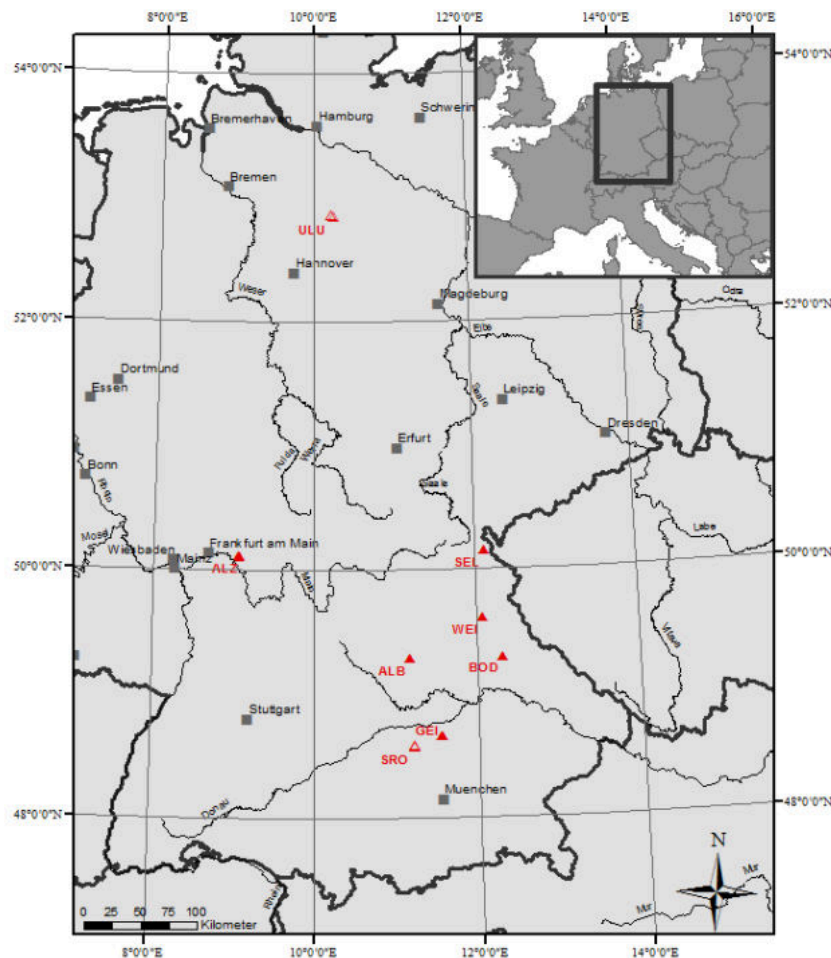


Abbildung 4: Karte der in den Jahren 2013 und 2014 angelegten acht temporären Kiefern-Fichten-Versuchsstandorte (Tripletts). Standorte an denen die insgesamt 1.300 Stammscheiben gewonnen wurden, sind in der Karte durch ausgefüllte Dreiecke gekennzeichnet.

#### 3.2 Boden und Klima

Die temporären Versuchsflächen decken ein enges und hinsichtlich Textur und Nährstoffangebot weitestgehend homogenes Standortspektrum schwach lehmiger Sande (Bodenart) beziehungsweise schwach podsolierter Braunerden (Bodentyp) mit moder- bis rohumusartigen Auflagehorizonten ab. Die auf den Parzellen durchgeführten BZE-konformen Bodenanalysen<sup>2</sup> weisen für die Versuchsstandorte einen mittleren Schluffanteil von 8,1% und einen mittleren Tonanteil von 6,1% aus (Abbildung 5).

<sup>2</sup> Versuchsstandort Schrobenhausen nicht bodenkundlich beprobt.

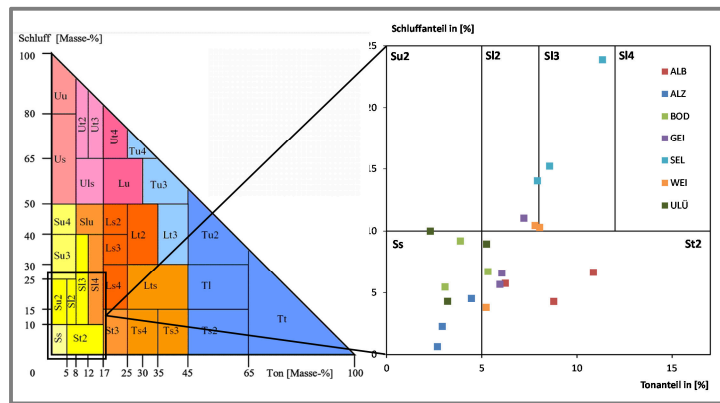


Abbildung 5: Links Korngrößendreieck nach KA5 (AG Boden 2005); rechts Ergebnisse der Korngrößenanalyse für die Versuchsstandorte der vorliegenden Untersuchung (Darstellung nach DAÜLLARY 2015, verändert)

Hinsichtlich des Klimas beziehungsweise der Witterung weisen die Versuchsstandorte im Bezugszeitraum von 1940 bis 2013 folgende Charakteristika auf: Jahresmitteltemperatur von 6,7°C in Selb bis hin zu 9,4°C in Alzenau; mittlere Niederschlagssumme in der Vegetationszeit von 330 mm in Selb bis hin zu 437 mm in Geisenfeld (Datengrundlage DWD 2014).

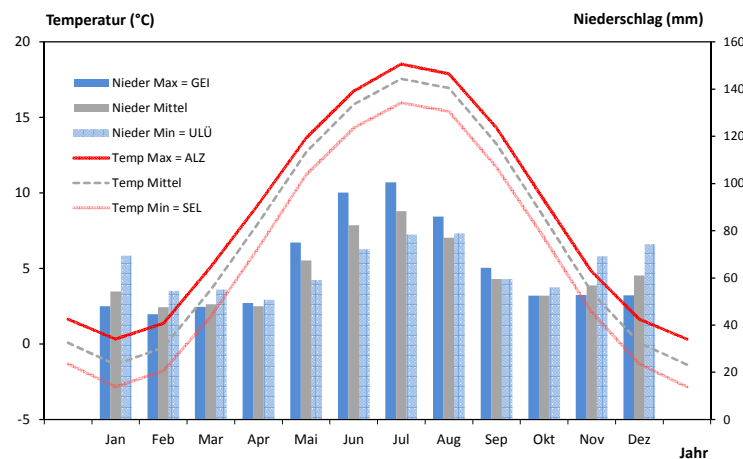


Abbildung 6: Klimaspektrum der untersuchten Versuchsstandorte (Daten: DWD 2014)

### 3.3 Erhebungs- und Auswertungsmethoden

Der Baumbestand (N=2.750) auf den Versuchsparzellen und in der Parzellenumfassung wurde mit waldmesskundlichen Standardmethoden erfasst (Brusthöhen- und Stockdurchmesser, Baumhöhen, Kronenansatz und -radien, Stammfußkoordinaten). Ergänzend wurden erkennbare Stöcke ausgeschiedener Parzellenbäume (N=305) vermessen und der Ausscheidezeitpunkt anhand des Zersetzungsgrades bis zu 20 Jahre zurückdatiert. Weiterhin wurden von mindestens 20 herrschenden, und wenn vorhanden, von weiteren zehn unter- und zwischenständigen Bäumen (N=800) jeweils zwei Bohrkerne in Nord- und Ostrichtung oder eine Stammscheibe auf Brusthöhe gewonnen. Die Stammscheiben wurden an mindestens fünf herrschenden Fällungsbäumen je Parzelle gewonnen (insgesamt N=199). An diesen Bäumen wurden zudem Triebblängenrückmessungen entlang der Stammachse durchgeführt und sektionsweise Stammscheiben bis in die Krone entnommen sowie Nadelproben gewonnen.

Die Bohrspäne und Stammscheiben wurden mit einem Digitalpositiometer nach Johan (Fa. Biritz) mit einer Genauigkeit von einem Hundertstel Millimeter gemessen und anschließend auf Basis von lokalen „Weiserjahren“ visuell synchronisiert. Die bei Bohrspänen in zwei und bei Stammscheiben in vier Himmelsrichtungen ermittelten Radialzuwächse wurden baumweise zu jährlichen Durchmesserzuwächsen gemittelt. Die Durchmesserentwicklung von nicht gebohrten, überwiegend unter- und zwischenständigen oder bereits ausgeschiedenen Bäumen wurde für die retrospektive Volumenberechnung auf Be-

standesebene einzeljahresweise auf Basis von Durchmesser-Zuwachs-Funktionen geschätzt (zur Methodik s. PRETZSCH et al. 2015).

Auf Basis der Bohrspäne und Stammscheiben sowie der Höhen- und Triebblängenrückmessungen konnten die Jahrring-, Durchmesser- und Volumenentwicklung auf Baum- und Bestandesebene für sechs zurückliegende rechnerische Aufnahmezeitpunkte beziehungsweise einen insgesamt 30 jährigen Betrachtungszeitraum nachgebildet werden. (Berechnungs- und Darstellungsverfahren der Höhen- und Volumenentwicklung nach BIBER 2013). Für den letzten Aufnahmezeitpunkt, in der Regel die Jahre 2013 oder 2014 (s. Tabelle 6 im Anhang), ergab sich ein durchschnittlicher Bestandesvorrat von  $512 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  für Kiefer,  $630 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  für Fichte und  $589 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  für die Mischbestände. Die Bestandesgrundfläche betrug dabei in den Mischbeständen durchschnittlich  $50,6 \text{ m}^2$  sowie  $50,8 \text{ m}^2$  in den Fichten- und  $43,7 \text{ m}^2$  in den Kiefernreinbeständen. Der jährliche Volumenzuwachs in der letzten fünfjährigen Aufnahmeperiode lag für Kiefer bei  $15,2 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  und für Fichte bei  $19,2 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ . Der entsprechende Zuwachs in den Mischbeständen lag bei durchschnittlich  $18,5 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ .

Mit Blick auf die Analyse von Klima-Zuwachsbeziehungen wurden die Jahrringmessdaten in ein möglichst homogenes Untersuchungskollektiv aufgeteilt. Untersucht wurden 571 herrschende und mitherrschende Bäume die zum letzten Aufnahmezeitpunkt mindestens 75% der Bestandesoberhöhe erreicht hatten. Weiterhin wurden an diesen Bäumen nur die Jahre untersucht, die zum einen durch die klimatischen Referenzdaten von 1940-2013 abgedeckt sind und zum anderen eine ausreichende Datenbelegung aufwiesen. Das Jahr 1945 wird beispielsweise nur durch die Versuchsstandorte Allersberg und Selb vollständig abgedeckt (N=126), wohingegen das Jahr 1955 bereits durch sechs (N=330) und das Jahr 1965 durch alle acht Standorte abgebildet wird (N=486).

Die Trendbereinigungen der Jahrringchronologien erfolgten in Anlehnung COOK UND KAIRIUKSTIS 1992 und aufbauend auf dem R-Paket „dplR“ (BUNN 2008) in einem dreistufigen Verfahren:

- 1) Alterstrendbereinigung mit einer negativen Exponentialfunktion
- 2) Eliminierung von umwelt- und managementbedingten mittelfristigen Wachstumstrends mithilfe eines kubischen Splines mit einer Wellenlänge von 10 Jahren und einer Frequenzbeschränkung von 0,5
- 3) Bereinigung der Autokorrelation auf Basis autoregressiver Modellbildung bis maximal 3. Grades.

Die in diesem Beitrag vorgestellte Analyse des Witterungseinflusses auf den Jahrringzuwachs erfolgte zunächst mit den R-Paketen „bootres“ und „treeclim“ (ZANG UND BIONDI 2013, ZANG UND BIONDI 2015). Diese Software-Pakete bauen unter anderem auf den bei FRITTS (1976) beschriebenen Methoden der *response functions* auf (s. hierzu a. COOK UND KAIRIUKSTIS 1992, S. 240 ff.). Zur Differenzierung der Klima-Wachstumsbeziehungen nach Baumart (Kiefer-Fichte) und Bestandestyp (Rein-Mischbestand) wurden die ermittelten Response-Koeffizienten (*response coefficients*) anschließend in Anlehnung an HUANG et al. (2010) und ZANG (2011) einer differenzierenden Hauptkomponentenanalyse unterzogen.

In Anlehnung an die Überlegungen von DITTMAR UND ELLING (1999) wurden mit Blick auf eine Absicherung der Ergebnisse auch alternative regressionsanalytische Verfahren gewählt; unter anderem die Verwendung generalisierter, additiver gemischter Modelle (GAMM) (s. hierzu ZUUR et al. 2009). Mit Blick auf diese regressionsanalytischen Ansätze wurden die auf jährlicher Basis vorliegenden monatlichen Temperatur- und Niederschlagswerte rechnerisch zu einer Aggregatgröße der klimatischen Wasserbilanz (KWB) in der Vegetationszeit verknüpft. Die verwendete klimatische Wasserbilanz bildet dabei den Saldo zwischen dem jährlichen temperatur- und strahlungsbedingten Wasserverbrauch (Evapotranspiration) und der niederschlagsbedingten Wassernachlieferung in der Vegetationszeit. Die Wasserverfügbarkeit im Bodenwasserspeicher zu Beginn der Vegetationszeit bleibt dabei zunächst unberücksichtigt. Die Evapotranspiration wurde in der vorliegenden Untersuchung nach TURC in Anlehnung an die Darstellung bei KUNSTLER et al. (2011) berechnet. Die Länge der Vegetationszeit wurde dabei näherungsweise aus Monatsmittelwerten der Temperatur abgeleitet. Hierbei wird die Über- beziehungsweise Unterschreitung einer kritischen Temperaturgrenze von  $10^\circ\text{C}$  zugrunde gelegt. Es resultiert eine durchschnittliche Länge der Vegetationszeit von 161 Tagen. Die längste durchschnittliche Vegetationszeit findet sich erwartungsgemäß mit 176 Tagen im wärmebegünstigten Alzenau (Weinbauklima) und die kürzeste mit 141 Tagen in Selb (Ostbayerisches Grenzgebirge).

## 4 Ergebnisse

### 4.1 Dendrochronologische Kennzahlen

Auf dem ausgewählten Standortpektrum beträgt der mittlere jährliche Durchmesserzuwachs der 571 herrschenden und mitherrschenden Bäume über die gesamte Altersspanne von 1940 bis 2013 4,1 mm. Bei der Baumart Fichte liegt der Durchmesserzuwachs im Reinbestand bei 4,3 mm und im Mischbestand bei 4,4 mm (s. Tabelle 1, Abbildung 7). Der Durchmesserzuwachs der Baumart Kiefer fällt mit 3,8 mm im Rein- und 3,6 mm im Mischbestand erwartungsgemäß etwas niedriger aus und zeigt zwischen den Bestandestypen nahezu keinen Unterschied. Auch die sonstigen beschreibenden statistischen Maßzahlen wie Maximal- und Minimalwert sowie Standardabweichung und Variationskoeffizient zeigen keine eindeutigen und systematischen Abweichungen zwischen den Bestandestypen. Auffällig ist allenfalls, dass die Maximalwerte des Zuwachses bei der Baumart Fichte höher als bei Kiefer ausfallen und diese Werte den Mittelwert der Fichte entsprechend stark beeinflussen.

*Tabelle 1: Jährlicher Durchmesserzuwachs der 571 Untersuchungsbäume für den Zeitraum von 1940-2013*

Art	Bestandes- typ	Anzahl Messwerte	Max	Mittel	Median	Min	Standard- fehler	Standard- abweichung	Variations- koeffizient
		N	mm a <sup>-1</sup>						
Fichte	Misch	6516	22,46	4,40	4,00	0,28	0,0267	2,15	0,49
	Rein	9162	18,05	4,29	3,86	0,16	0,0236	2,25	0,53
Kiefer	Misch	8322	16,06	3,64	3,29	0,25	0,0214	1,95	0,54
	Rein	9267	13,90	3,79	3,56	0,21	0,0184	1,77	0,47

Der Grundflächenzuwachs der Baumart Fichte beträgt im Reinbestand durchschnittlich 12,26 cm<sup>2</sup>a<sup>-1</sup> und im Mischbestand 12,96 cm<sup>2</sup>a<sup>-1</sup>. Hierbei fällt auf, dass der Zuwachs der Fichte um rund 13% höher ausfällt als der der Kiefer. Weiterhin fällt auf, dass auch hier die Maximalwerte der Fichte deutlich höher ausfallen und damit offenbar die Spannweite und Standardabweichung der Werteverteilung zunimmt. Letztlich geben auch die höheren Variationskoeffizienten einen Hinweis auf die größere Schwankungsbreite des Grundflächenzuwachses der Baumart Fichte. Dies deckt sich auch mit den Befunden von SPATZ (2015) zur Jahrringvariabilität der hier vorgestellten Untersuchungsbäume.

*Tabelle 2: Jährlicher Grundflächenzuwachs der 571 Untersuchungsbäume für den Zeitraum von 1940-2013*

Art	Bestandes- typ	Anzahl Messwerte	Max	Mittel	Median	Min	Standard- fehler	Standard- abweichung	Variations- koeffizient
		N	cm <sup>2</sup> a <sup>-1</sup>						
Fichte	Misch	6516	82,41	12,96	10,16	0,16	0,1252	10,11	0,78
	Rein	9162	89,44	12,26	9,85	0,05	0,0925	8,86	0,72
Kiefer	Misch	8322	60,76	10,81	9,58	0,51	0,0682	6,23	0,58
	Rein	9267	59,87	10,48	9,26	0,24	0,0628	6,04	0,58

Mit Blick auf den zeitlichen Verlauf des Durchmesserzuwachses fällt in Abbildung 7 auf, dass der Zuwachs der Fichte in den Mischbeständen bis Anfang der 1980er Jahre deutlich unter dem der Fichtenreinbestände liegt. Bei der Kiefer fallen die Durchmesserzuwächse dahingegen erst ab Mitte der 1980er Jahre geringfügig unter das Zuwachsniveau der Reinbestände. Deutlicher zeigt sich diese veränderte Zuwachsrelation bei der Betrachtung des Grundflächenzuwachses; hier sinkt der zunächst noch deutlich höhere Zuwachs der Kiefer in den Mischbeständen ab Mitte der 1980er Jahre unter das Niveau der korrespondierenden Reinbestände. Die Zuwachsrelation von Fichte im Rein- und Mischbestand gleicht sich dahingegen, wie bereits beim Durchmesserzuwachs festgestellt, weiter an. Als potenzielle Ursache für die veränderten Zuwachsrelationen kommt unter anderem eine zunehmende Konkurrenzkraft der Fichte in den Mischbeständen in Betracht. Diese kann unter anderem auf eine im Altersverlauf nachlassende Konkurrenzkraft der Kiefer (s. hierzu SPATZ 2015), eine fortdauernde standörtliche Verbesserung nach Aufgabe der Streunutzung und Rückgang der atmosphärischen Schwefeldeposition und Bodenversauerung, sowie auf eine in Einzelfällen bewirtschaftungsbedingte Begünstigung der Fichte zurückzuführen sein.



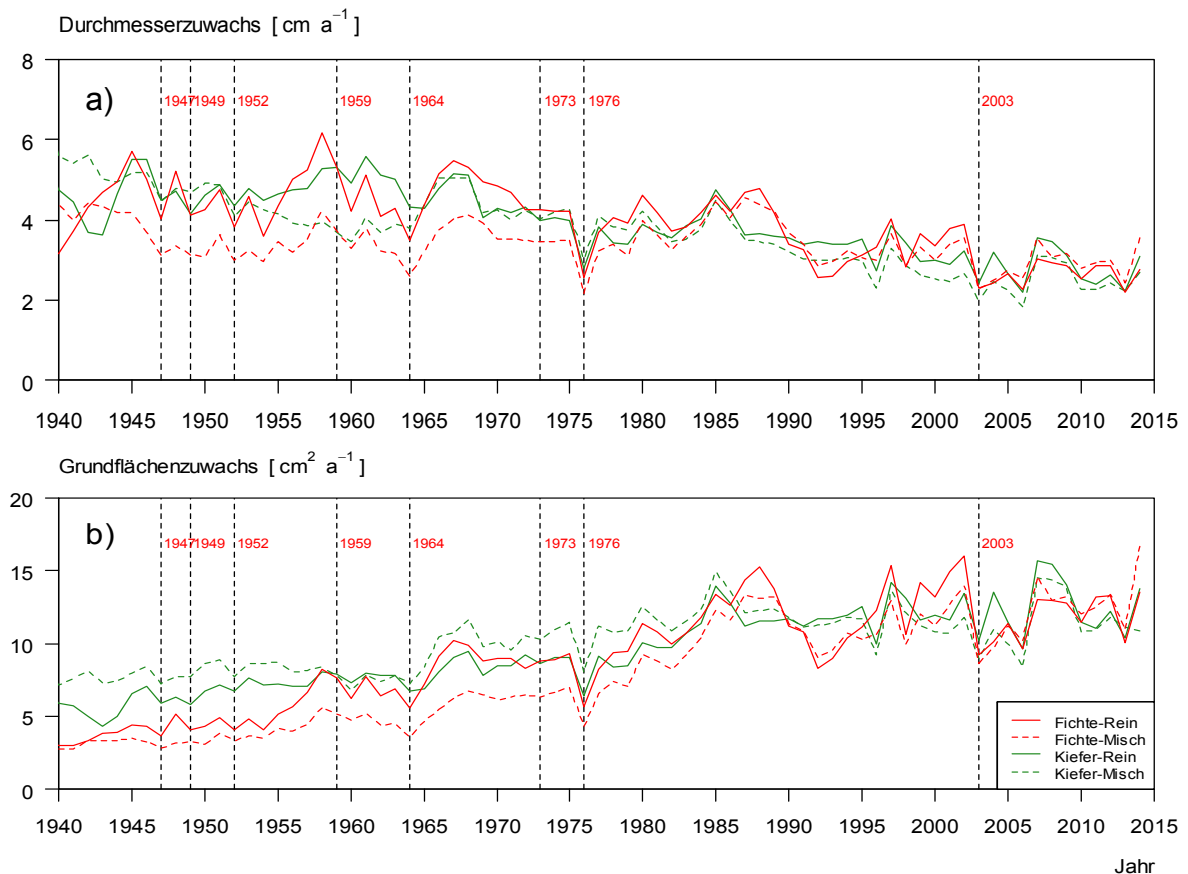


Abbildung 7: Mittlerer Durchmesser- und Grundflächenzuwachs von Kiefer und Fichte im Rein- und Mischbestand. Dargestellt ist der durch eine erforderliche Mindestanzahl von Parzellenchronologien und Witterungsdaten abgedeckte gemeinsame Betrachtungszeitraum von 1940 bis 2013. Die senkrechten gestrichelten Linien stellen die in Abbildung 8 identifizierten Trockenjahre dar.

Der Einfluss der Witterung auf das Baumwachstum wird im Folgenden auf Basis des jährlichen Durchmesserzuwachses analysiert. Ein methodischer Vergleich zur Verwendung von Durchmesser- oder Grundflächenzuwachs hatte im Vorfeld ergeben, dass nach der vorgenommenen dreifachen Trendbereinigung (s. Abschnitt 3) ein erwarteter streng linearer Zusammenhang zwischen den beiden Zuwachsgrößen besteht und sich folglich die angestrebten Analyseergebnisse nicht signifikant unterscheiden.

Einen ersten grafischen Eindruck zum Zusammenhang zwischen Durchmesserzuwachs und Witterung (Klima) vermittelt Abbildung 8. Die Witterung wird dabei an dieser Stelle als integrierende Größe der klimatischen Wasserbilanz in der Vegetationszeit wiedergegeben. Zur Hervorhebung der Witterungsschwankungen werden nicht die Absolutwerte der klimatischen Wasserbilanz, sondern die jährlichen Abweichungen vom langjährigen Mittel von 1940 bis 2013 dargestellt (Index). Ein Wert kleiner als minus eins spiegelt Jahre wider, in denen die rechnerische Wasserverfügbarkeit den langjährigen Mittelwert um 100% unterschreitet, diese Jahre sind in Abbildung 8 (oben) hervorgehoben. Bereits der erste visuelle Eindruck zeigt eine gute Übereinstimmung von indexiertem, das heißt trendbereinigtem Durchmesserzuwachs (s. hierzu Abschnitt 3) und der klimatischen Wasserbilanz. Gleichzeitig fällt auf, dass nicht in allen Fällen eines markanten Zuwachseinbruchs, wie zum Beispiel im Jahr 2006, auch unmittelbar eine witterungsbedingte Erklärung gefunden werden kann.

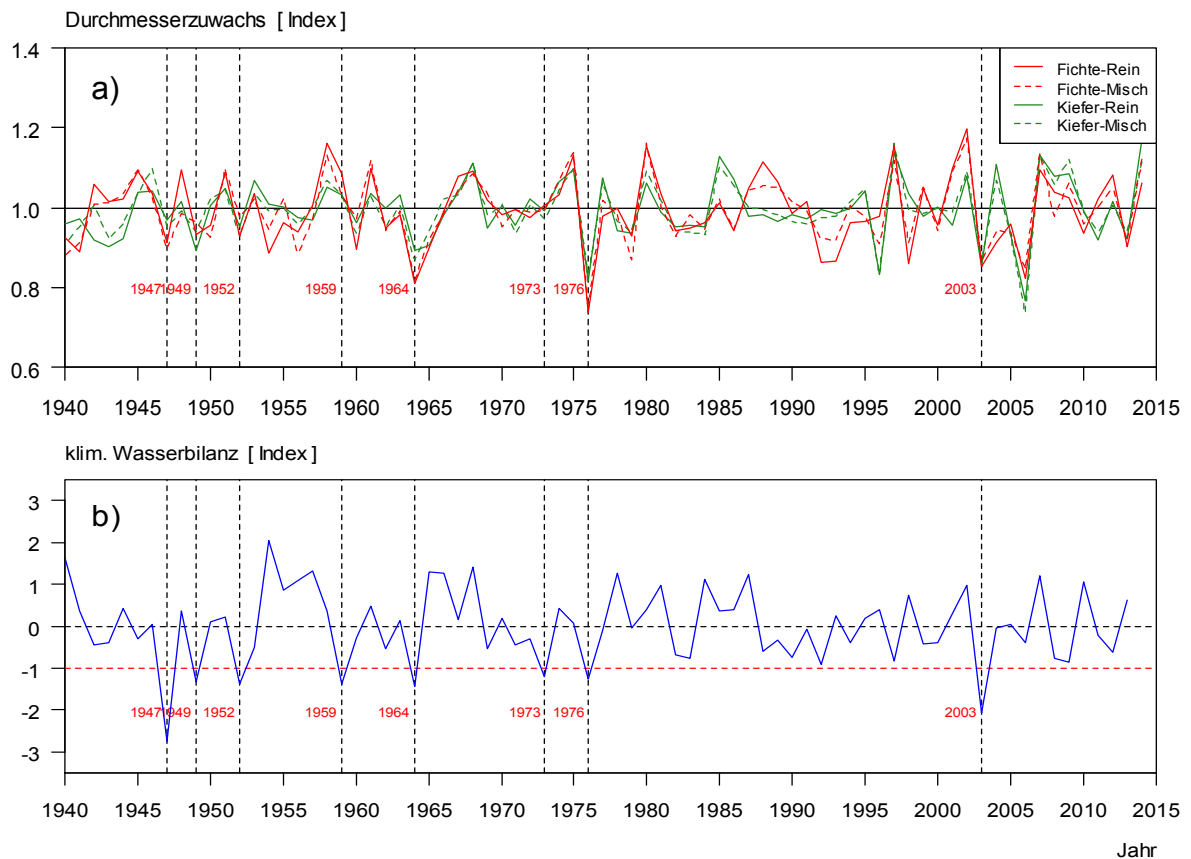


Abbildung 8: Indexierte, d. h. dreifach wachstumstrendbereinigte jährliche Durchmesserzuwächse (a) und indexierte Abweichungen der klimatischen Wasserbilanz vom langjährigen Mittel (Index) (b) für den Referenzzeitraum von 1940-2013. Die senkrechten gestrichelten Linien heben Trockenjahre hervor, in denen der Index der klimatischen Wasserbilanz unter -1 sinkt, d. h. 100% weniger Wasser in der Vegetationszeit zur Verfügung steht als im langjährigen Mittel.

Baumarten- beziehungsweise bestandestypenspezifische Unterschiede im trendbereinigten indexierten Durchmesserzuwachs lassen sich in Abbildung 8 zunächst nicht ausmachen. Allenfalls fällt auf, dass in Einzeljahren oder Einzelphasen Fichte und Kiefer unterschiedlich reagieren, so zum Beispiel in den Jahren 1985, 1996 und 2004. Dies verdeutlicht, dass ein und dieselben Umweltbedingungen offenbar in unterschiedlicher Weise auf die untersuchten Baumarten wirken.

Mit Blick auf die Güte der Datenbasis der in Abbildung 8 dargestellten Mittelwertkurven sind in Abbildung 9 die zugrundeliegenden Chronologien der untersuchten Teilpopulationen (Triplett-Parzellen) abgebildet. Die baumarten- und bestandesspezifischen Mittelwertchronologien zeigen standortübergreifend eine vergleichsweise hohe Synchronität. Dies wird auch durch die dendrochronologischen Kennzahlen der Gleichläufigkeit (GLK) und des Expressed Population Signal (EPS) (COOK UND KAIRIUKSTIS 1992, SCHWEINGRUBER 1988) in Tabelle 3 bestätigt. Unter Berücksichtigung der visuell erkennbaren Abweichungen der standortspezifischen Chronologien ergeben sich mittlere Werte der Gleichläufigkeit von 0,65 bis 0,69. Alle Standortchronologien überschreiten damit den in der Literatur genannten kritischen Grenzwert von 0,60. Weiterhin gibt das EPS mit Werten zwischen 0,92 bis 0,94 einen Hinweis darauf, dass die an den jeweiligen Standorten untersuchten Teilpopulationen (Triplett-Parzellen) starke gemeinsame Signale aufweisen. Auch im Hinblick auf diese Kennzahl unterschreitet keine der Teilpopulationen den in der Literatur genannten kritischen Grenzwert von 0,85.

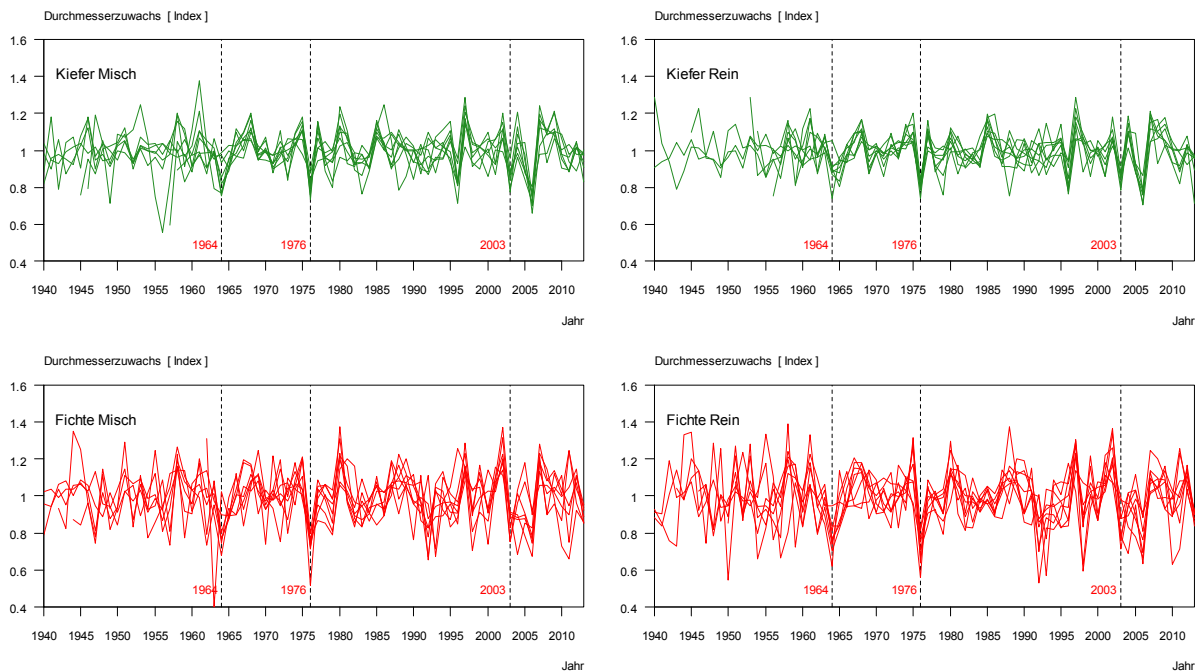


Abbildung 9: Parzellenweise Mittelwertchronologien der indexierten Durchmesserzuwächse für den Untersuchungszeitraum von 1940-2013

Tabelle 3: Mittelwerte von Expressed Population Signal (EPS) und Gleichläufigkeit (GLK) der parzellenweisen Mittelwertchronologien der acht Versuchsstandorte<sup>3</sup>

Art	Bestandes- typ	Anzahl Messwerte	Expressed Population Signal (EPS)						Gleichläufigkeit (GLK)					
			Max	Mittel	Median	Min	Standard- fehler	Standard- abweichung	Max	Mittel	Median	Min	Standard- fehler	Standard- abweichung
Fichte	Misch	7	0,95	0,93	0,94	0,90	0,007	0,02	0,76	0,69	0,69	0,65	0,014	0,04
	Rein	8	0,97	0,94	0,94	0,89	0,010	0,03	0,73	0,69	0,69	0,64	0,010	0,03
Kiefer	Misch	7	0,94	0,91	0,92	0,87	0,010	0,03	0,71	0,65	0,64	0,61	0,013	0,03
	Rein	8	0,95	0,93	0,92	0,91	0,006	0,02	0,73	0,66	0,65	0,64	0,011	0,03

#### 4.2 Zusammenhang zwischen jährlichem Durchmesserzuwachs und ausgewählten monatlichen Temperatur- und Niederschlagswerten (Bootstrapped Response Coefficients)

Aufbauend auf dem beschriebenen Untersuchungsmaterial wird nachfolgend der Einfluss von Temperatur- und Niederschlag auf das Durchmesserwachstum analysiert. Hierbei kommen sowohl Klimawerte des laufenden als auch des jeweils vorangehenden Jahres zum Einsatz. In einem ersten Schritt wurden hierzu 28 Witterungsparameter (Monatswerte) ohne die einschlägigen Wintermonate vorausgewählt. Die beobachteten indexierte Durchmesserzuwächse (N=33.267) und klimatischen Monatswerte wurden dann baumweise mit den R-Paketen „bootRes“ beziehungsweise „treeclim“ einer Hauptkomponentenregression unterzogen. Witterungsparameter die nur in Einzelfällen signifikante Ergebnisse zeigten, das heißt jeweils nur für einen einzelnen Baum signifikant waren, wurden in einem ersten Schritt aus der Modellbildung ausgeschlossen. So konnten ein reduzierter Satz von 12 Witterungsparametern definiert und in der Folge 6.852 Baum-Witterungsparameter-Kombinationen gebildet werden (s. Abbildung 10).

Wenngleich die ermittelten Koeffizienten überwiegend ökologisch plausible Wirkungsrichtungen zeigten, ließen sich nur für rund 10% der 6.852 Kombinationen signifikante Regressionskoeffizienten (response coefficients) ableiten. Die Wirkungsrichtung und Streuung aller Regressionskoeffizienten ist nach Baumarten getrennt in Abbildung 10 dargestellt. Ergänzend hierzu finden sich in Tabelle 4 die baumartenweisen Mittelwerte der Koeffizienten.

Es zeigt sich, dass das Durchmesserwachstum der Baumart Fichte insbesondere von der Temperatur im vorangegangenen Oktober (temp.prev.oct) und der Temperatur im aktuellen März (temp.curr.mar)

<sup>3</sup> Für den Mischbestand am Versuchsstandort Schrobenshausen konnten aufgrund der geringen Anzahl und Länge der Zuwachschronologien keine dendrochronologischen Kennzahlen berechnet werden.

beeinflusst wird. Diese Größen können unter anderem als Proxy für die Länge der Vegetationszeit und damit für die Ausbildung von Frühholz (März) und die Bildung von Reservstoffen (Oktober) verstanden werden. Weiterhin wirkt sich die Niederschlagsverfügbarkeit im Juni (prec.curr.jun) positiv auf das Fichtenwachstum aus. Hohe Fröhsommer- und Sommertemperaturen wirken diesem Einfluss entgegen (temp.curr.jun/jul). Mit Blick auf die Jahrringbildung im laufenden Jahr spielen bei der Fichte zudem die Spätsommertemperaturen des vorangegangenen Jahres eine gewichtige Rolle. Die Koeffizienten der Baumart Kiefer sind in ihrer Wirkungsrichtung bis auf den Koeffizienten des Oktobers des vorangegangenen Jahres (temp.prev.oct) mit denen der Fichte gleich. Allerdings unterscheiden sich die Koeffizienten zum Teil erkennbar in Ihrer Wirkungsstärke. Beispielsweise wird das Durchmesserwachstum der Kiefer offenbar weniger negativ von Sommer- und Spätsommertemperaturen beeinflusst (s. hierzu a. Abbildung 11 und Abschnitt 4.3). Gleichzeitig spielen bei der Kiefer offensichtlich die Frühjahrsniederschläge (prec.curr.mar) eine größere Rolle.

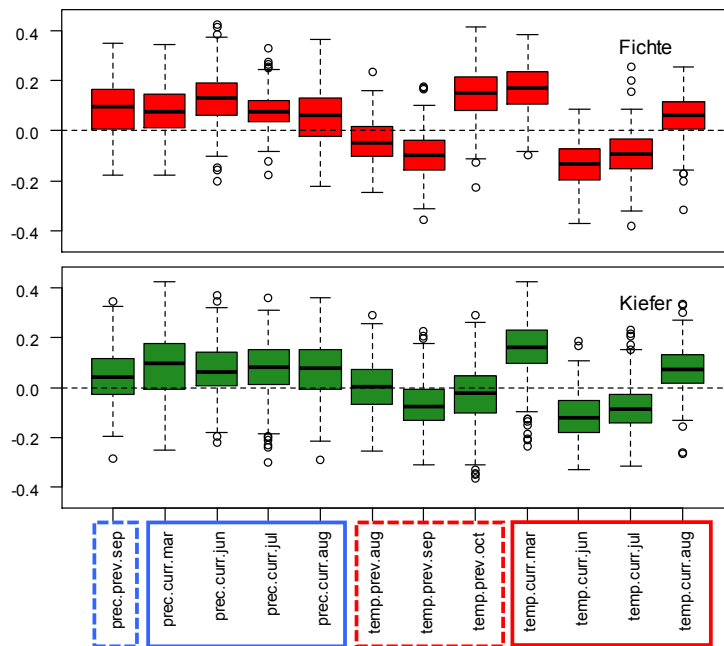


Abbildung 10: Regressionskoeffizienten (response coefficients) der Hauptkomponentenregression von 12 ausgewählten Witterungsparametern und indexten, das heißt trendbereinigten Durchmesserzuwachsen von Fichte (oben) und Kiefer (unten). Niederschlagsparameter sind auf der X-Achse blau umrahmt und Temperaturparameter rot.

Tabelle 4: Mittelwerte der Regressionskoeffizienten (response coefficients) von Kiefer und Fichte

Art	Parameter											
	prec.prev.sep	prec.curr.mar	prec.curr.aug	prec.curr.jun	prec.curr.jul	temp.prev.aug	temp.prev.sep	temp.prev.oct	temp.curr.mar	temp.curr.jun	temp.curr.jul	temp.curr.aug
Fichte	0,091	0,078	0,059	0,126	0,080	-0,042	-0,094	0,146	0,166	-0,135	-0,093	0,059
Kiefer	0,044	0,087	0,072	0,074	0,079	0,004	-0,066	-0,029	0,157	-0,115	-0,079	0,074

Unabhängig von der geringen Anzahl an signifikanten Ergebnissen wurden die in ihren Wirkungsrichtungen plausiblen baumweisen Regressionskoeffizienten der Witterungsparameter einer weiterführenden Hauptkomponentenanalyse unterzogen. Auf diese Weise soll die Witterungssensitivität der Baumarten (Kiefer und Fichte) und der verschiedenen Bestandestypen (Rein- und Mischbestand) vergleichend gegenübergestellt werden. Die Hauptkomponentenanalyse ermöglicht unter anderem eine Dimensionsreduktion und damit wie in Abbildung 11 (a) eine zweidimensionale Darstellung der einfluss-

reichsten zwei Hauptkomponenten. Die abgebildeten Hauptkomponenten erklären zusammen 31,6% der Gesamtstreuung der baumweisen Regressionskoeffizienten.

Die Hauptkomponente 1 wird maßgeblich von den bereits dargestellten Witterungsparametern Temperatur des diesjährigen März (temp.curr.mar) und vorjährigen Oktobers (temp.prev.oct) beeinflusst, gleichzeitig aber auch von einem feucht-warmen September des Vorjahres (temp + prec.prev.sep). Diese Hauptkomponente könnte damit grob mit „Länge der Vegetationszeit“ umschrieben werden, wenngleich im geringen Umfang auch Sommertrockenheit im laufenden Jahr (temp curr.jun/jul) und Trockenheit im Spätsommer des vorangegangenen Jahres (tem.prev.aug) auf die Hauptkomponente 1 wirken. Insgesamt spiegeln sich Frühjahrs- und Sommertrockenheit allerdings eher in der Hauptkomponente 2 wider. Auf dieser Achse sind zum Beispiel Größen wie Frühjahrs- (prec.curr.mar) und Sommer-niederschlag (prec.curr.jul/aug) oder Sommertemperatur (temp.curr.jun/jul) ausschlaggebend.

Eine signifikante Differenzierung der Baumarten zeigt sich im Wesentlichen mit Blick auf die Hauptkomponente 1 „Länge der Vegetationszeit“ und im bemessenen Maße auch im Hinblick auf die Aspekte „Sommertrockenheit“ (s. Abbildung 11 (b)). Eine Differenzierung von Rein- und Mischbestand innerhalb der Baumarten (Ellipsen in Abbildung 11 (a) und Boxes in (b)) zeigte sich dahingegen als nicht signifikant und erscheint auf Basis des gewählten Verfahrens offenbar nicht möglich. Allenfalls bei der Baumart Fichte zeigt sich in den Mischbeständen eine etwas geringere Streuung der Beobachtungswerte.

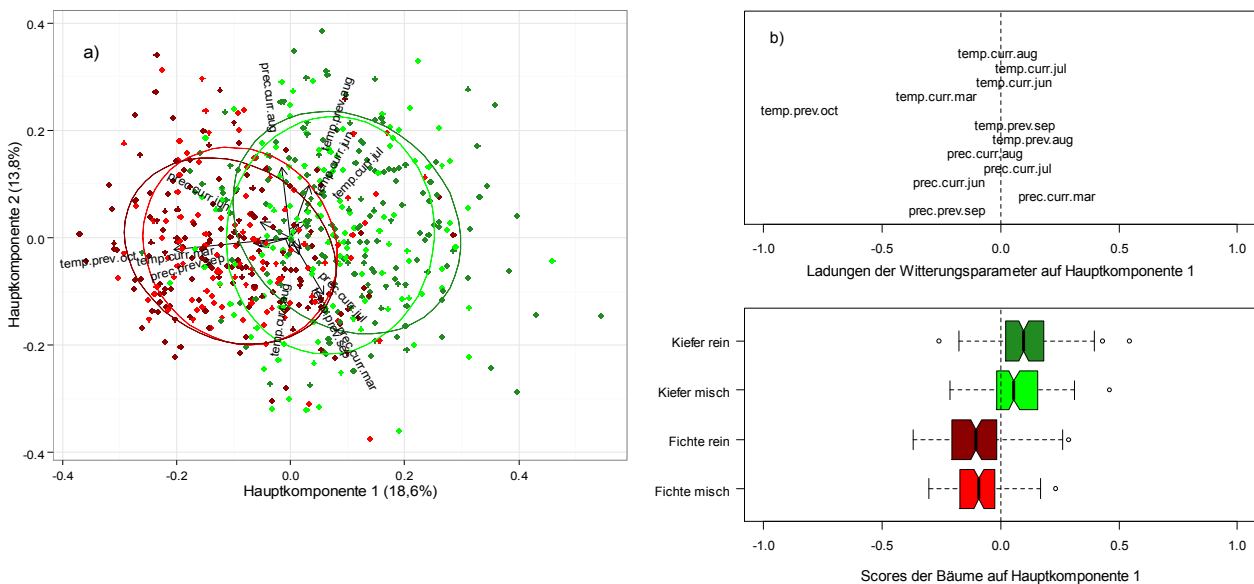


Abbildung 11: (a): Zweidimensionale Darstellung der Ergebnisse der Hauptkomponentenanalyse von baumweisen Regressionsparametern und ausgewählten Witterungsparametern. Die roten Pfeile stellen die Ladungen („Gewichte“) und Wirkungsrichtungen der einzelnen Witterungsparameter dar, je länger ein Pfeil desto stärker sein Einfluss. Die Punkte in der Grafik stellen die „scores“ („Ausprägungen“) der baumweisen Regressionskoeffizienten in Bezug auf die Hauptkomponenten 1 und 2 dar. (b): Boxplot-Darstellung der baumweisen „scores“ (unten) sowie Ladungen der relevanten Witterungsparameter (oben) über der Hauptkomponente 1

#### 4.3 Zusammenhang von Durchmesserzuwachs und klimatischer Wasserbilanz in der Vegetationszeit (GAMM-Response Function)

Mit Blick auf eine alternative Ermittlung von Klima-Zuwachsbeziehungen wurde der in Abschnitt 3.3 vorgestellte regressionsanalytische Ansatz eines generalisierten additiven gemischten Modells (GAMM) gewählt. Dieser alternative Ansatz verfolgt dabei insbesondere zwei Zielsetzungen: 1. Absicherung der Baumartendifferenzierung aus Abschnitt 4.2 und alternativer Versuch zur Differenzierung von Rein- und Mischbestand. 2. Quantifizierung und modellhafte Abbildung witterungsbedingter Zuwachsschwankungen beziehungsweise von Zuwachsverlusten bei Trockenheit.

Grundlage für diesen alternativen regressionsanalytischen Ansatz bildet die in Abschnitt 3.3 vorgestellte klimatische Wasserbilanz in der Vegetationszeit. Diese Wasserbilanz vereint eine Mehrzahl von Umweltvariablen, die in direkter Verbindung mit dem Baumwachstum stehen. Hierzu zählen: die Tempera-

tur, die Globalstrahlung, die Länge der Vegetationszeit sowie die Wassernachlieferung über den Niederschlag.

Ergänzend kann man in einer jährlichen Wasserbilanz grundsätzlich auch den „Füllstand“ des Bodenwasserspeichers zu Beginn der Vegetationszeit berücksichtigen. Unterstellt man zum Beispiel, dass der Bodenwasserspeicher über die Wintermonate vollständig aufgefüllt wurde, kann hilfsweise die gesamte Größe des Bodenwasserspeichers als Startwert für eine Wasserbilanz in der Vegetationszeit angesetzt werden. Der Bodenwasserspeicher wird dabei üblicherweise über die nutzbare Feldkapazität (nFK) angegeben. Die nFK bestimmt sich aus wichtigen Bodenparametern wie Korngrößenverteilung, Lagerungsdichte und Skelettanteil. Für die hier untersuchten Standorte beträgt die nutzbare Feldkapazität auf einem Meter Profiltiefe etwa -130 mm. Da die ergänzende Verwendung dieses Bodenwasserspeichers in der Wasserbilanz letztlich aber auch mit einer Mehrzahl von Annahmen verbunden ist und zudem keine höhere statistische Erklärungskraft brachte, wurde zunächst auf dessen Verwendung verzichtet.

Ohne die Berücksichtigung des Bodenwasserspeichers weist die Mehrzahl der in Abbildung 12 zugrundeliegenden Beobachtungsjahre eine negative Wasserbilanz auf. Die durchschnittliche klimatische Wasserbilanz aller Versuchsstandorte liegt so bei -86,5 mm. Tatsächlich steht den Bäumen aber wie bereits erläutert ein mehr oder weniger gefüllter rechnerischer Bodenwasserspeicher von durchschnittlich etwa -130 mm zur Verfügung. Vor diesem Hintergrund erscheint es plausibel, dass sich der in Abbildung 12 dargestellte modellhafte Zusammenhang von klimatischer Wasserbilanz und Durchmesserzuwachs erst ab einem Schwellenwert von etwa -130 mm erkennbar negativ auf das Durchmesserwachstum auswirkt.

Dem generalisierten additiven gemischten Modell (GAMM) in Abbildung 12 liegen insgesamt 32.322 Beobachtungen von trendbereinigten Durchmesserzuwachsen und klimatischer Wasserbilanz zugrunde. Das Modell wurde dabei wie in nachstehender Formel 1 formuliert.

$$id(Index)_{ijk} = f(KWB_{ik}, Baumart_i) + \beta_0 * Versuch + \dots + \beta_n * Versuch + b_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad \text{Formel 1}$$

Der indexierte Durchmesserzuwachs ( $id(Index)$ ) eines Einzelbaumes ( $j$ ) im Jahr ( $k$ ) auf dem Versuch ( $i$ ) wird damit von den abhängigen Variablen der klimatischen Wasserbilanz in der Vegetationsperiode ( $KWB_{ik}$ ), der Baumart ( $Baumart_i$ ) und dem Versuchsstandort ( $Versuch_{1..n}$ ) bestimmt. Die Wirkung der klimatischen Wasserbilanz wird als nichtparametrische Glätterfunktion in Abhängigkeit von der Baumart beschrieben  $f(KWB_{ik}, Baumart_i)$ .

Damit geben die in Abbildung 12 für Kiefer und Fichte dargestellten Modelle die absolute Zu- oder Abnahme des Durchmesserzuwachses pro Millimeter Verlust oder Zugewinn an Wasser in der Vegetationszeit wieder. In der vorliegenden Form lieferte das Modell eine hochsignifikante Differenzierung der Baumarten Kiefer und Fichte. Bei der Fichte führt beispielsweise ein Trockenereignis wie das Jahr 2003 mit einer mittleren berechneten klimatischen Wasserbilanz von -257 mm zu einem beobachteten Rückgang des Durchmesserzuwachses um durchschnittlich rund 16,3%, wohingegen der Zuwachsrückgang bei der Kiefer nur rund 13,8% ausmacht. Eine ergänzende Berücksichtigung des Bestandestypus Rein- oder Mischbestand erbrachte im Modell keinen signifikanten Erklärungsmehrwert. Damit lässt sich auch auf Basis dieser Methodik keine veränderte Wirkung von Witterungsereignissen in Rein- und Mischbeständen aus Kiefer und Fichte nachweisen.

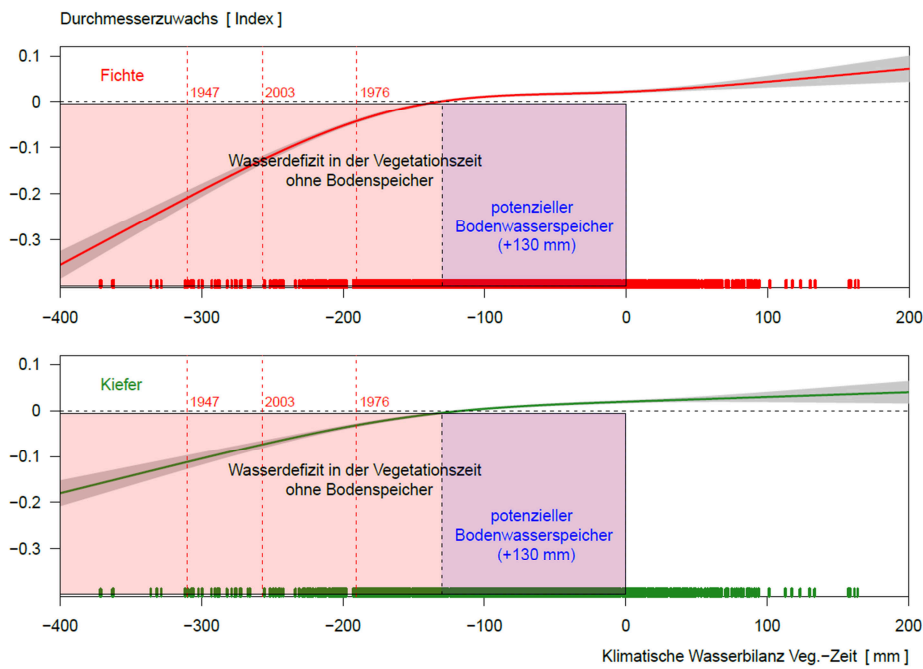


Abbildung 12: Nichtlineare Glätterfunktion eines generalisierten additiven gemischten Modells (GAMM) zum Einfluss der klimatischen Wasserbilanz (KWB) in der Vegetationszeit auf den trendbereinigten Durchmesserzuwachs (Index) der 571 herrschenden und mitherrschenden Fichten (oben) und Kiefern (unten). Die kleinen grünen und roten Balken über den X-Achsen geben die Datenbelegung im jeweiligen Wertebereich wieder. Die hellrot hinterlegte Fläche stellt das jahresweise berechnete Defizit der klimatischen Wasserbilanz in der Vegetationszeit dar. Der hellblau überlagernde Bereich bildet den durchschnittlichen Bodenwasserspeicher auf 1m Profiltiefe aller Versuchsstandorte ab (nutzbare Feldkapazität (nFK) von 130 mm). Die klimatische Wasserbilanz in den Trockenjahren 1947, 1976 und 2003 ist durch senkrechte rote Linien und Jahreszahlen gekennzeichnet.

Dahingegen erbrachte die lineare Berücksichtigung der Versuchsstandorte (*Versuch*) in dem generalisierten additiven gemischten Modell in Formel 1 für einzelne Versuche einen zusätzlichen signifikanten Erklärungsanteil (s. a.Tabelle 5). Dabei wird die im Modell in Abbildung 12 dargestellte Abnahme des Durchmesserzuwachses mit zunehmendem Wasserdefizit offenbar standörtlich modifiziert. Standorte mit vergleichsweise besserer mittlerer Wasserbilanz in der Vegetationszeit scheinen stärker auf Wasserlimitierung zu reagieren (Selb, Unterlüß) als Standorte mit insgesamt unterdurchschnittlicher Wasserbilanz (Alzenau). Die entsprechenden Mittelwerte und Häufigkeitsverteilungen der klimatischen Wasserbilanz sind je Versuchsstandort in Abbildung 13 dargestellt.

Tabelle 5: Parameterschätzung und Signifikanzbeurteilung (\*\*\*)  $p < 0,001$ , \*\*  $p < 0,01$ , \*  $p < 0,05$ ,  $p < 0,1$ ) des generalisierten additiven gemischten Modells Formel 1 zum Zusammenhang zwischen trendbereinigtem Durchmesserzuwachs (*id*(Index)) (s. hierzu a. Abbildung 8) und klimatischer Wasserbilanz in der Vegetationszeit (KWB) sowie Versuchsstandort (*Versuch*).

Variable	Parameter	Koeffizient	Standardfehler	Signifikanz	
Versuchsstandort	Bodenwöhr (Referenz als Y-Achsenabschnitt)	$\beta_0$	0,9923	0,0021	***
	Allersberg	$\beta_1$	0,0039	0,0030	.
	Selb	$\beta_2$	-0,0057	0,0033	.
	Weiden	$\beta_3$	0,0020	0,0036	.
	Alzenau	$\beta_4$	0,0172	0,0033	***
	Geisenfeld	$\beta_5$	-0,0029	0,0032	.
	Unterlüß	$\beta_6$	-0,0090	0,0034	**
	Schrobenhausen	$\beta_7$	-0,0013	0,0037	.
f(Klim. Wasserbilanz : Baumart)	nichtparametrischer Glätter (s. Abbildung 12)				***

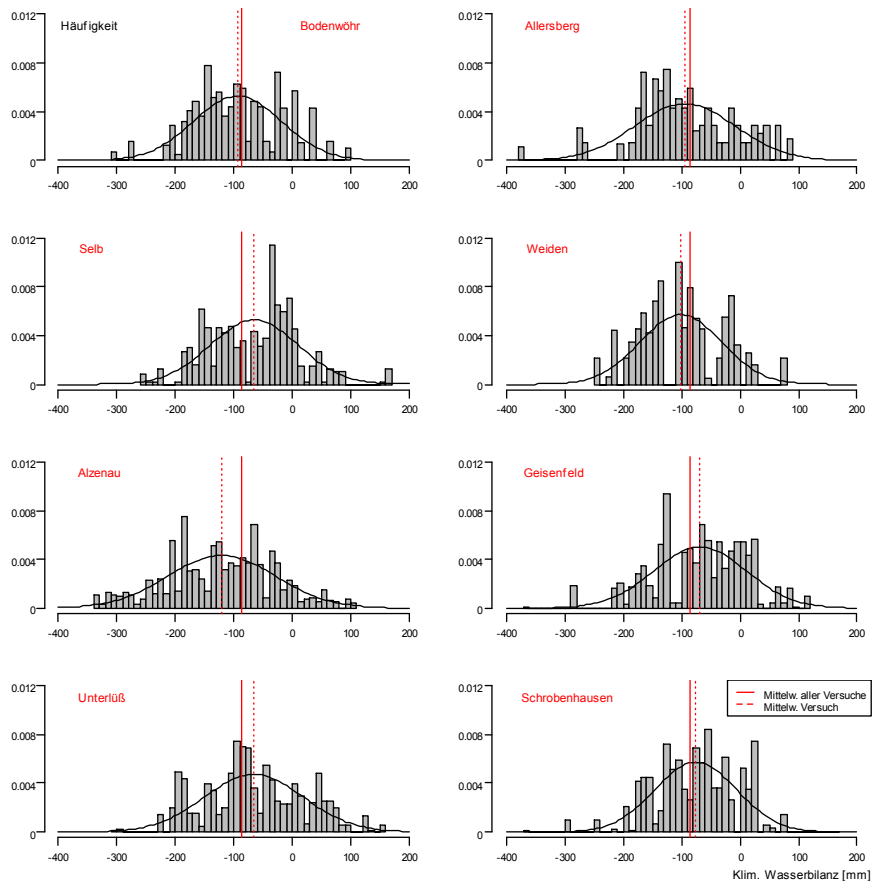


Abbildung 13: Relative Häufigkeitsverteilung und Mittelwert der klimatischen Wasserbilanz in der Vegetationszeit für den Beobachtungszeitraum von 1940-2013. Die senkrechten durchgezogenen roten Linien geben den Mittelwert der klimatischen Wasserbilanz aller Versuchsstandorte wieder, die Gestrichelten den Mittelwert des jeweiligen Versuchsstandortes.

## 5 Diskussion und Schlussfolgerungen

Die im vorliegenden Beitrag vorgestellten temporären Kiefern-Fichten-Versuchsstandorte liegen am südwestlichen Rand des großen Hauptverbreitungsgebiet von Kiefer und Fichte und decken ein homogenes Standortpektrum schwach lehmiger Sande in Höhenlagen zwischen 100 - 450m ab. Auch hinsichtlich der Alters- und Bestandesstruktur bieten die ausgewählten Versuchsbestände eine größtmögliche Vergleichbarkeit und Homogenität. Ein bemessener Gradient ergibt sich allenfalls mit Blick auf die klimatischen Eckdaten wie Temperatur, Niederschlag und Globalstrahlung in der Vegetationszeit, sowie eine gewisse Variation in der Länge der Vegetationszeit selbst. Entsprechend dem vergleichsweise homogenen Datenmaterial zeigten die trendbereinigten Baumchronologien hohe dendrochronologische Übereinstimmungs- und Gütemaße.

In diesem Zusammenhang weisen unter anderem COOK UND KAIRIUKSTIS (1992), FRITTS et al. (1965) und MÄKINEN et al. (2003) darauf hin, dass entsprechend homogenes Untersuchungsmaterial aus geschlossenen Waldbeständen oftmals ein schwaches Signal gegenüber Witterungseinflüssen zeigt. Unter Berücksichtigung dieser Rahmenbedingungen erscheint es nachvollziehbar, dass im ersten Untersuchungsteil nur für etwa 10% der baumweisen Response-Koeffizienten signifikante Schätzer berechnet werden konnten. Unabhängig von einer solchen Signifikanzbeurteilung lieferten die Response-Koeffizienten plausible Wirkungsrichtungen der monatlichen Witterungsparameter von Temperatur und Niederschlag. Dabei zeigte sich eine klare Differenzierung der Baumarten Kiefer und Fichte. Die Fichte reagiert im Durchmesserzuwachs offenbar besonders positiv auf die Temperaturen im Oktober des vorangehenden und im März des aktuellen Jahres. Auch auf das Durchmesserwachstum der Kiefer wirkt sich die Märztemperatur sehr positiv aus, wengleich hierbei offenbar auch eine ausreichende Wasserverfügbarkeit gegeben sein muss. Hohe Sommertemperaturen im Juni und Juli wirken dahingegen bei beiden Baumarten negativ auf das Durchmesserwachstum. Insgesamt decken sich die Ergebnisse damit nicht nur mit bekanntem Praxiswissen sondern auch mit einer ganzen Reihe von wissenschaft-



lichen Untersuchungen (BÜNTGEN et al. 2007, LEBOURGEOIS et al. 2010 MÄKINEN et al. 2002, NEUWIRTH 2005, ZANG 2011).

Die Verwendung der klimatischen Wasserbilanz als integrierende Größe der Wasserverfügbarkeit über die ganze Vegetationszeit brachte im zweiten Untersuchungsteil (GAMM-Response-Funktion) hochsignifikante baumartenspezifische Erklärungsansätze zur jährlichen Schwankung der Durchmesserzuwächse. Die Einbeziehung der Versuchsstandorte als Faktor erbrachte in einigen Fällen einen zusätzlichen signifikanten Erklärungsbeitrag. Die durch das entwickelte Modell abgebildete stärkere relative Witterungssensitivität der Baumart Fichte spiegelte sich in den Beobachtungswerten z. B. durch einen um 2,5%-Punkte größeren Zuwachseinbruch im Jahr 2003 wieder (insg. -16,3%). Diese Beobachtung deckt sich unter anderem auch mit den Ergebnissen von DITTMAR UND ELLING (1999) und ZANG et al. (2011).

Ließ sich sowohl mit dem Ansatz der monatlichen Witterungsparameter (Response-Koeffizienten), als auch mit den Response-Funktionen auf Basis der klimatischen Wasserbilanz eine klare Differenzierung der Baumarten Kiefer und Fichte erreichen, so war dies für die beiden Bestandestypen Rein- und Mischbestand nicht möglich. Damit konnten die Ergebnisse und Überlegungen von LEBOURGEOIS et al. (2013), MARTINEZ-VILALTA et al. (2012) und DEL RIO et al. (2013) zur Wirkung von Witterungseinflüssen und –extremen in Mischbeständen auf Basis der vorliegenden Untersuchung nicht bestätigt werden. Hierzu sind vermutlich höher auflösende dendroökologische oder physiologische Untersuchungen notwendig.

Mit Blick auf die unterschiedliche Reaktion der Versuchsstandorte auf Einschränkungen in der Wasserbilanz zeichnete sich folgende Tendenz ab: Standorte die aufgrund geringerer Strahlungs- und Temperaturintensität eine im Durchschnitt bessere Wasserbilanz aufweisen, gleichzeitig aber über vergleichsweise geringe Niederschläge in der Vegetationszeit verfügen, reagieren besonders sensibel auf Veränderungen in der klimatischen Wasserbilanz (Selb, Unterlüß). Standorte die dahingegen temperatur- und strahlungsbedingt über vergleichsweise niedrige klimatische Wasserbilanzen, gleichzeitig aber über etwas höhere Vegetationszeitniederschläge verfügen, reagieren dahingegen weniger stark im Durchmesserzuwachs. Diese Befunde müssen im weiteren Verlauf der Untersuchung noch näher analysiert und gegebenenfalls durch die Verwendung alternativer Maße der Wasserversorgung abgesichert werden.

Darüber hinaus sollen die erarbeiteten Ergebnisse wenn möglich noch durch alternative statistische Verfahren und eine Analyse von Extremjahren ergänzt werden. Weiterhin soll das Zuwachsverhalten von hauptständigen und unterständigen Bäumen gegenübergestellt werden.

## 6 Danksagung

Mein Dank gilt Hans Pretzsch für die wissenschaftliche Leitung der Untersuchung und Gerhard Schütze, Christian Zang, Michael Heym und Peter Biber für die Unterstützung bei der Jahringmessung sowie bei der Datenaufbereitung und -analyse. Den Kollegen der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft danke ich für die Unterstützung bei der Beschaffung, Aufbereitung und Auswertung der Boden- und Klimadaten. Weiterhin danke ich allen studentischen und wissenschaftlichen Hilfskräften, die bei den aufwendigen Außenaufnahmen und Laborarbeiten mitgewirkt haben. Abschließend danke ich dem Bayerischen Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (Bayerische Forstverwaltung) für die Projektförderung und den Bayerischen Staatsforsten, den Niedersächsischen Landesforsten, der Stadt Alzenau und dem Privatforstbetrieb Dickow (i.V.m. der Niedersächsischen Landwirtschaftskammer) für die Bereitstellung der Untersuchungsflächen und –bäume und für die personelle Unterstützung.

## 7 Literatur

- Biber, P. (2013): Kontinuität durch Flexibilität - Standardisierte Datenauswertung im Rahmen eines waldwachstumskundlichen Informationssystems. *Allgemeine Forst Und Jagdzeitung*: 184 (7/8). S. 11.
- Bielak, K., Dudzinska, M. und Pretzsch, H. (2014): Mixed stands of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and Norway spruce [*Picea abies* (L.) Karst] can be more productive than monocultures. Evidence from over 100 years of observation of long-term experiments. *Forest Systems*: 23 (3). S. 573-589.
- Bouriaud, O. und Popa, I. (2008): Comparative dendroclimatic study of Scots pine, Norway spruce, and silver fir in the Vrancea Range, Eastern Carpathian Mountains. *Trees*: 23 (1). S. 95-106.

- Bunn, A. G. (2008): A dendrochronology program library in R (dplR). *Dendrochronologia*: 26 (2). S. 115-124.
- Büntgen, U., Frank, D. C., Kaczka, R. J., Verstege, A., Zwijacz-Kozica, T. und Esper, J. (2007): Growth responses to climate in a multi-species tree-ring network in the Western Carpathian Tatra Mountains, Poland and Slovakia. *Tree Physiology*: 27 (5). S. 689-702.
- Cook, E. R. und Kairiukstis, L. A. (1992): *Methods of dendrochronology: Applications in the environmental science*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, London. 394 S.
- Däullary, A. (2015): Zusammenhang zwischen Standort und Leistung. Untersuchung ausgewählter Rein- und Mischbestände aus Kiefer und Fichte entlang eines ökologischen Gradienten. Masterarbeit, Lehrstuhl für Waldwachstumskunde, Studienfakultät für Forstwissenschaft und Ressourcenmanagement, Technische Universität München. 51 S.
- del Rio, M., Schutze, G. und Pretzsch, H. (2013): Temporal variation of competition and facilitation in mixed species forests in Central Europe. *Plant Biol (Stuttg)*: 16(1): S. 166-176
- Dittmar, C. und Elling, W. (1999): Jahrringbreite von Fichte und Buche in Abhängigkeit von Witterung und Höhenlage. *Forstwissenschaftliches Centralblatt vereinigt mit Tharandter forstliches Jahrbuch*: 118 (1-6). S. 251-270.
- DWD (2014): Räumlich explizite Temperatur- und Niederschlagswerte für Deutschland in monatlicher Auflösung.
- Fritts, H. C. (1976): *Tree Rings and Climate*. Academic Press, London, New York, San Francisco. 567 S.
- Fritts, H. C., Smith, D. G., Cardis, J. W. und Budelsky, C. A. (1965): Tree-Ring Characteristics Along a Vegetation Gradient in Northern Arizona. *Ecology*: 46 (4). S. 393-401.
- Gruber, A., Pirkebner, D., Florian, C. und Oberhuber, W. (2012): No evidence for depletion of carbohydrate pools in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) under drought stress. *Plant Biol (Stuttg)*: 14 (1). S. 142-148.
- Harper, J. L. (1977): *Population Biology of Plants*. Academic Press, London, New York. 776-778 S.
- Huang, J., Tardif, J. C., Bergeron, Y., Denneler, B., Berninger, F. und Girardin, M. P. (2010): Radial growth response of four dominant boreal tree species to climate along a latitudinal gradient in the eastern Canadian boreal forest. *Global Change Biology*: 16 (2). S. 711-731.
- Jucker, T., Bouriaud, O., Avacaritei, D. und Coomes, D. A. (2014): Stabilizing effects of diversity on aboveground wood production in forest ecosystems: linking patterns and processes. *Ecology Letters*: 17 (12). S. 1560-1569.
- Kennel, R. (1965): Untersuchungen über die Leistung von Fichte und Buche im Rein- und Mischbestand. *Allgemeine Forst und Jagdzeitung*: 136 (7). S. 149-161, 173-189.
- Kölling, C. und Zimmermann, L. (2007): Die Anfälligkeit der Wälder Deutschlands gegenüber dem Klimawandel. *Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft*: 67 (6). S. 259-268.
- Kunstler, G., Albert, C. H., Courbaud, B., Lavergne, S., Thuiller, W., Vieilledent, G., Zimmermann, N. E. und Coomes, D. A. (2011): Effects of competition on tree radial-growth vary in importance but not in intensity along climatic gradients. *Journal of Ecology*: 99 (1). S. 300-312.
- Lebourgeois, F., Gomez, N., Pinto, P. und Mérian, P. (2013): Mixed stands reduce *Abies alba* tree-ring sensitivity to summer drought in the Vosges mountains, western Europe. *Forest Ecology and Management*: 303 S. 61-71.
- Lebourgeois, F., Rathgeber, C. B. K. und Ulrich, E. (2010): Sensitivity of French temperate coniferous forests to climate variability and extreme events (*Abies alba*, *Picea abies* and *Pinus sylvestris*). *Journal of Vegetation Science*: 21 (2). S. 364-376.
- Lindén, M. und Agestam, E. (2003): Increment and Yield in Mixed and Monoculture Stands of *Pinus sylvestris* and *Picea abies* Based on an Experiment in Southern Sweden. *Scandinavian Journal of Forest Research*: 18 (2). S. 155-162.
- Mäkinen, H., Nöjd, P., Kahle, H.-P., Neumann, U., Tveite, B., Mielikäinen, K., Röhle, H. und Spiecker, H. (2002): Radial growth variation of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) across latitudinal and altitudinal gradients in central and northern Europe. *Forest Ecology and Management*: 171 (3). S. 243-259.
- Mäkinen, H., Nöjd, P., Kahle, H.-P., Neumann, U., Tveite, B., Mielikäinen, K., Röhle, H. und Spiecker, H. (2003): Large-scale climatic variability and radial increment variation of *Picea abies* (L.) Karst. in central and northern Europe. *Trees*: 17 (2). S. 173-184.
- Martin-Benito, D., Beeckman, H. und Canellas, I. (2013): Influence of drought on tree rings and tracheid features of *Pinus nigra* and *Pinus sylvestris* in a mesic Mediterranean forest. *European Journal of Forest Research*: 132 (1). S. 33-45.
- Martinez-Vilalta, J., Lopez, B. C., Loepfe, L. und Lloret, F. (2012): Stand- and tree-level determinants of the drought response of Scots pine radial growth. *Oecologia*: 168 (3). S. 877-888.
- Mason, W. L. und Connolly, T. (2013): Mixtures with spruce species can be more productive than monocultures: evidence from the Gisburn experiment in Britain. *Forestry*: 87 (2). S. 209-217.
- Morin, X., Fahse, L., Scherer-Lorenzen, M., Bugmann, H. (2011): Tree species richness promotes productivity in temperate forests through strong complementarity between species. *Ecol Lett*: 14 (12). S. 1211-1219.

- Neuwirth, B. (2005): Interannuelle Klima/Wachstums-Beziehungen zentraleuropäischer Bäume von AD1901 bis 1971 - Eine dendroklimatologische Netzwerkanalyse. Dissertation, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät, Rheinische Friedrich-Wilhelm-Universität Bonn. 165 S.
- Oberhuber, W., Stumböck, M. und Kofler, W. (1998): Climate-tree-growth relationships of Scots pine stands (*Pinus sylvestris* L.) exposed to soil dryness. *Trees*: 13 (1). S. 19-27.
- Olsthoorn, A. F. M., Bartelink, H. H., Gardiner, J. J., Pretzsch, H., Hekhuis, H. J., Franc, A. (1999): Management of mixed-species forest: silviculture and economics. IBN Scientific Contributions, Wageningen.
- Piotto, D. (2008): A meta-analysis comparing tree growth in monocultures and mixed plantations. *Forest Ecology and Management*: 255 (3-4). S. 781-786.
- Pretzsch, H., Biber, P. und Ďurský, J. (2002): The single tree-based stand simulator SILVA: construction, application and evaluation. *Forest Ecology and Management*: 162 (1). S. 3-21.
- Pretzsch, H., Bielak, K., Bruchwald, A., Dieler, J., Dudzinska, M., Ehrhart, H.-P., Jensen, A. M., Johannsen, V. K., Kohnle, U., Nagel, J., Spellmann, H., Zasada, M. und Zingg, A. (2013): Mischung und Produktivität von Waldbeständen. Ergebnisse langfristiger ertragskundlicher Versuche. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung*: 184 (7/8). S. 177-196.
- Pretzsch, H., del Río, M., Ammer, C., Avdagic, A., Barbeito, I., Bielak, K., Brazaitis, G., Coll, L., Dirnberger, G., Drössler, L., Fabrika, M., Forrester, D. I., Godvod, K., Heym, M., Hurt, V., Kurylyak, V., Löf, M., Lombardi, F., Matović, B., Mohren, F., Motta, R., den Ouden, J., Pach, M., Ponette, Q., Schütze, G., Schweig, J., Skrzyszewski, J., Sramek, V., Sterba, H., Stojanović, D., Svoboda, M., Vanhellefont, M., Verheyen, K., Wellhausen, K., Zlatanov, T. und Bravo-Oviedo, A. (2015): Growth and yield of mixed versus pure stands of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and European beech (*Fagus sylvatica* L.) analysed along a productivity gradient through Europe. *European Journal of Forest Research*: 134 (5). S. 927-947.
- Pretzsch, H., Rotzer, T., Matyssek, R., Grams, T. E. E., Haberle, K. H., Pritsch, K., Kerner, R. und Munch, J. C. (2014): Mixed Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst) and European beech (*Fagus sylvatica* [L.] stands under drought: from reaction pattern to mechanism. *Trees-Structure and Function*: 28 (5). S. 1305-1321.
- Pretzsch, H. und Schütze, G. (2009): Transgressive overyielding in mixed compared with pure stands of Norway spruce and European beech in Central Europe: evidence on stand level and explanation on individual tree level. *European Journal of Forest Research*: 128 (2). S. 183-204.
- Scherer-Lorenzen, M., Körner, C. und Schulze, E.-D. (2005): *Forest Diversity and Function - Temperate and Boreal Systems*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg.
- Schweingruber, F. H. (1988): *Tree rings: basics and applications of dendrochronology*. D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Boston, Lancaster, Tokyo. 276 S.
- Spatz, S. (2015): Vergleichende Analyse morphologischer und holzqualitätsbestimmender Merkmale in Rein- und Mischbeständen aus Fichte (*Picea abies* (L.) Karst) und Kiefer (*Pinus sylvestris* L.). Masterarbeit, Lehrstuhl für Waldwachstumskunde, Studienfakultät für Forstwissenschaft und Ressourcenmanagement, Technische Universität München.
- Vandermeer, J. (1992): *The ecology of intercropping*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Wellhausen, K. (2014): Analyse der Produktivität von Kiefer (*Pinus sylvestris* L.) und Fichte (*Picea abies* (L.) Karst) im Rein- und Mischbestand auf Basis temporärer Versuchsflächen. Beiträge zur Jahrestagung der Sektion Ertragskunde im DVFFA: S. 127-139.
- Zang, C. und Biondi, F. (2013): Dendroclimatic calibration in R: The bootRes package for response and correlation function analysis. *Dendrochronologia*: 31 (1). S. 68-74.
- Zang, C. und Biondi, F. (2015): treeclim: an R package for the numerical calibration of proxy-climate relationships. *Ecography*: 38 (4). S. 431-436.
- Zang, C., Pretzsch, H. und Rothe, A. (2012): Size-dependent responses to summer drought in Scots pine, Norway spruce and common oak. *Trees-Structure and Function*: 26 (2). S. 557-569.
- Zang, C., Rothe, A., Weis, W. und Pretzsch, H. (2011): Tree suitability under climate change conditions: susceptibility of major forest tree species from tree-rings widths. *Allgemeine Forst Und Jagdzeitung*: 182 (5-6). S. 98-112.
- Zang, C. S. (2011): Growth reactions of temperate forest trees to summer drought - a multispecies tree-ring network approach. Dissertation, Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt, Technische Universität München. 137 S.
- Zuur, A. F., Ieno, E. N., Walker, N. J., Saveliev, A. A. und Smith, G. M. (2009): *Mixed Effects Models and Extensions in Ecology with R*. Springer, 574 S.

## 8 Anhang

Tabelle 6: Ertragskundliche Basisdaten für die temporären Versuchsfleichen zum letzten rekonstruierten Aufnahmezeitpunkt im Jahr 2013/2014. Zuwachs- und Vorratswerte in Vorratsfestmeter mit Rinde.

Versuchsstandort	Parzelle Baumart	Fläche m <sup>2</sup>	Aufn- zeitpunkt Jahr	Alter Jahre	Grundfläche m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup>	Mischungsanteil			SDI N ha <sup>-1</sup>	Durchmesser		Höhe		Vorrat		Zuwachs		Ober-/Mittel- Höhe <sub>Alter100</sub> m				
						Grund- fläche	Trocken- masse %	relSDI (max Triol)		do cm	d <sub>g</sub>	ho m	hg	m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup>							
Bodenwöhr	BOD	Kie, (Fi) (Kie), Fi	661	2013	80	24,0	48,8	49%	55%	51%	464	35,3	28,4	27,0	25,2	276,1	537,6	6,5	15,7	28,0		
				2013	80	24,8			51%	45%	49%	548	35,7	19,7	26,7	20,0	261,5		9,2		30,0	
		Fi	542	2013	85		43,6				897	33,9	24,3	28,2	24,7		537,7			22,3	30,6	
		Ki	411	2013	65		36,3				734	31,7	25,6	25,3	24,0		393,8			10,9	29,8	
Allersberg	ALB	Kie, (Fi) (Kie), Fi	1212	2008	78	22,4	43,8	51%	56%	55%	447	32,7	26,3	23,5	21,9	224,9	425,8	6,6	12,6	24,8		
				2008	78	21,4			49%	44%	45%	498	32,0	16,9	24,6	18,5	200,9		6,0		28,3	
			Fi	395	2008	73		48,5				1.012	36,7	23,3	27,2	22,5		547,5			17,0	32,3
			Ki	285	2008	73		40,4				806	32,6	26,4	25,0	24,0		439,8			12,0	28,0
Selb	SEL	Kie, (Fi) (Kie), Fi	641	2013	85	26,7	51,5	52%	58%	59%	500	41,2	30,8	31,1	28,1	343,0	626,2	9,1	19,3	30,0		
				2013	93	24,8			48%	42%	41%	520	38,4	22,8	29,6	21,3	283,2		10,1		29,8	
			Fi	251	2013	93		51,6				1.028	36,3	26,8	30,8	27,7		701,1			17,2	31,4
			Ki	357	2013	75		43,3				848	35,7	27,5	28,2	25,9		514,1			14,2	29,1
Weiden	WEI	Kie, (Fi) (Kie), Fi	650	2013	60	22,8	49,4	46%	52%	48%	428	36,7	30,7	26,4	25,6	266,4	552,1	8,3	20,4	33,2		
				2013	60	26,6			54%	48%	52%	585	39,9	19,8	29,1	19,9	285,6		12,2		38,5	
			Fi	457	2013	60		44,4				853	43,1	29,9	27,9	24,2		534,6			17,1	37,2
			Ki	251	2013	60		46,3				940	35,3	27,7	25,9	25,3		529,0			17,9	32,9
Alzenau	ALZ	Kie, (Fi) (Kie), Fi	586	2013	75	17,9	50,5	35%	39%	38%	334	38,2	30,9	29,9	28,7	231,9	645,1	5,8	16,2	32,7		
				2013	75	32,6			65%	61%	62%	655	41,4	26,0	30,7	25,5	413,2		10,4		35,4	
			Fi	483	2013	60		42,5				929	35,6	20,2	28,0	23,3		495,0			20,3	37,3
			Ki	509	2013	85		40,3				734	39,7	33,0	29,1	26,9		496,1			13,9	28,9
Geisenfeld	GEI	Kie, (Fi) (Kie), Fi	941	2013	75	25,1	63,8	39%	44%	40%	439	43,1	36,2	32,3	31,0	354,4	875,4	10,3	28,4	35,2		
				2013	75	38,7			61%	56%	60%	769	46,8	26,9	33,2	26,7	521,1		18,1		38,0	
			Fi	300	2013	70		61,4				1.143	46,0	32,7	31,4	29,2		855,6			20,3	37,5
			Ki	541	2013	65		50,3				939	42,9	33,7	29,8	29,2		668,2			21,9	35,8
Unterlüß	ULÜ	Kie, (Fi) (Kie), Fi	894	2014	63	18,0	44,7	40%	43%	46%	363	34,4	25,7	23,8	22,9	186,8	471,0	5,2	12,7	29,0		
				2014	65	26,7			60%	57%	54%	574	36,2	21,3	25,2	21,4	284,1		7,5		32,3	
			Fi	268	2014	65		54,7				1.215	32,1	19,3	23,9	20,0		543,9			15,0	31,0
			Ki	306	2014	63		46,6				912	34,2	27,5	23,2	22,3		475,1			13,5	28,4
Schrobenhs.	SRO	Kie, (Fi) (Kie), Fi	650	2014	68	25,4	58,3	43%	46%	43%	515	32,8	25,2	27,0	26,2	296,4	693,4	8,0	22,5	31,6		
				2014	68	32,9			57%	54%	57%	753	34,0	17,7	31,1	23,1	397,1		14,5		37,9	
			Fi	637	2014	73		62,5				1.192	45,7	30,4	35,1	30,6		932,3			24,8	40,7
			Ki	475	2014	68		52,8				1.081	34,8	26,4	28,5	27,6		646,0			18,5	33,2