

**Wuchspotenziale der Waldbäume
unter sich ändernden Klimabedingungen im westdeutschen
Mittelgebirgsraum**

–

eine dendroökologische Netzwerkanalyse

Dissertation

zur

Erlangung des Doktorgrades (Dr. rer. nat.)

der

Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät

der

Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

vorgelegt von

Stefanie Fischer

aus Bottrop

Bonn August 2013

Angefertigt mit Genehmigung der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der
Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

1. Gutachter: Prof. Dr. Matthias Winiger

2. Gutachter: Prof. Dr. Sebastian Schmidlein

Tag der Promotion: 15.01.2014

Erscheinungsjahr: 2014

Inhalt

Inhalt

<i>Abbildungen und Tabellen</i>	I
<i>Vorwort</i>	III
1. Einführung	
1.1 Theoretischer Hintergrund, Forschungsstand und Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung und Konzeption	5
2. Material und Methoden	
2.1 Untersuchungsgebiet und Dendrodaten	9
2.2 Probennahme und Aufbereitung der Dendrodaten	13
2.3 Klimadaten	14
2.4 Indexierung	15
2.4.1 Extremwerte	15
2.4.2 Jahr-zu-Jahr- und interdekadische Variationen	17
2.5 Gruppierung der Jahrringserien	17
2.6 Art- und cluster-spezifische Mittelung der Jahrringserien und der lokalen Klimazeitreihen	19
2.7 Analyse der Klima/Wachstumsbeziehungen	19
3. Untersuchungen	
3.1 Klimasensitivität der Douglasie in Eifel und Kellerwald	23
3.1.1 Einführende Worte	25
3.1.2 Artikel 1: Fischer, S., Neuwirth, B. (2012): Klimasensitivität der Douglasie in Eifel und Kellerwald. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung 183 (1/2): 23-33.	27
3.2 Vulnerability of trees to climate events in temperate forests of West Germany	39
3.2.1 Einführende Worte	41
3.2.2 Artikel 2: Fischer, S., Neuwirth, B. (2013): Vulnerability of trees to climate events in temperate forests of West Germany. ISRN Forestry Volume 2013, Article ID 201360, 15 pages. http://dx.doi.org/10.1155/2013/201360	43

Inhalt

3.3	Changing climate growth response in tree rings of temperate forests	59
3.3.1	Einführende Worte	61
3.3.2	Artikel 3: Fischer, S., Neuwirth, B., Schmidlein, S. (eingereicht): Changing climate growth response in tree rings of temperate forests. Trees – Structure and Function.	63
4. Diskussion		
4.1	Material und Methoden	83
4.2	Klima/Wachstumsbeziehungen	84
5. Schlussfolgerungen		91
6. Zusammenfassung		99
7. Summary		103
8. Literatur (Rahmenpapier)		107
9. Literatur (gesamte Arbeit)		113
<i>Danksagung</i>		123
<i>Publikationen und Tagungen</i>		125

Abbildungen und Tabellen

Abbildungen und Tabellen

Abb. 1:	Übersichtsschema über die Datengrundlage, methodische Konzeption, sowie die einzelnen Aufbereitungs- und Analyseschritte innerhalb der dendroökologischen Wachstumsanalyse	7
Abb. 2:	Lage des Untersuchungsgebietes und Übersicht über die dendroökologischen Standorte	9
Abb. 3:	Anteile der Baumarten (a) Flächenanteile an der Gesamtwaldfläche in Nordrhein-Westfalen (Datenquelle: MKULNV, 2012), (b) Anteile der beprobten Standorte pro Baumart an der Gesamtzahl der beprobten Standorte	10
Abb. 4:	Verteilung der mittleren Jahrestemperatur und des mittleren Jahresniederschlags in Deutschland für den Zeitraum 1961-1990	11
Abb. 5:	Schrittweise Indexierung von Jahrringdaten durch Anwendung der Croppermethode (Cropper, 1979)	16
Abb. 6:	Darstellung einer unbehandelten Eichenchronologie mit den zugehörigen Splinefunktionen, sowie der aus den Rohdaten durch Indexierung mit dem 32-jährigen Spline erzeugten Indexkurve	18
Abb. 7:	Übersicht über die Klima/Wachstumsbeziehungen der Waldbäume im westdeutschen Mittelgebirgsraum	85

Vorwort

Vorwort

Die Idee zu dieser Arbeit entstand im Rahmen diverser Diskussionen der dendroökologischen Arbeitsgruppe um Dr. Burkhard Neuwirth am Geographischen Institut der Universität Bonn (im Folgenden kurz als Dendrogruppe Bonn bezeichnet) mit Förstern, Regionalforstämtern in Nordrhein-Westfalen und der Verwaltung des Nationalparks Eifel. Sofort zeigten sich die Förster von den Möglichkeiten und Stärken der Dendroökologie in Bezug auf die jahrgenaue und retrospektive Erfassung des Radialwachstums beeindruckt, die das von ihnen durchgeführte forstliche Monitoring sinnvoll ergänzen kann. Die in der Arbeitsgruppe zunehmend an Bedeutung gewinnenden Fragestellungen, die komplexen Klima/Wachstumsbeziehungen in temperierten Wäldern, sowie die Entwicklung des Baumwachstums betreffend, mündeten in einer Kooperation von Dr. Burkhard Neuwirth und Uta Schulte (Landesbetrieb Wald und Holz), die ihrerseits Forschungen über die natürliche Waldentwicklung in Nordrhein-Westfalen betrieb. So ergab sich die Chance, das Baumwachstum in einem weitgehend flächendeckenden Netz forstökologischer Testflächen, den so genannten Naturwaldzellen, untersuchen zu dürfen. Durch eine systematische Beprobung konnten ein deutlich verdichteter und erweiterter Datensatz erzielt und die Möglichkeiten räumlich differenzierter Wachstumsanalysen im Untersuchungsgebiet optimiert werden. Weitere Kooperationen mit Herrn Dr. Michael Rös (Nationalpark Eifel) und Herrn Achim Frede (Nationalpark Kellerwald/Edersee) kamen hinzu.

Die daraus entstandene Dissertation hat die Erfassung der Wuchspotenziale der Waldbäume unter sich ändernden Klimabedingungen im westdeutschen Mittelgebirgsraum zum Ziel. Im Rahmen der darin enthaltenen Studien über komplexe Klima/Wachstumsbeziehungen in temperierten Wäldern konnten durch Verwendung des verdichteten, Buchen, Eichen, Fichten, Kiefern und Douglasien enthaltenden Datensatzes räumlich und zeitlich differenzierte Ergebnisse erzielt werden. Des Weiteren wurden entscheidende Erkenntnisse für klimatische Rekonstruktionen anhand von Jahrringserien in temperierten Waldgebieten herausgearbeitet.

Die vorliegende, kumulative Dissertation gliedert sich in fünf Kapitel von denen drei Teilkapitel (Kapitel 3.1 bis 3.3) in Form deutsch- und englischsprachiger wissenschaftlicher Artikel verfasst sind. Zwei davon sind bereits publiziert, der dritte wurde im August bei der Zeitschrift ‚Trees – Structure and Function‘ eingereicht. Um die einzelnen, in sich abgeschlossenen, wissenschaftlichen Artikel in Beziehung zueinander und zu der übergeordneten Fragestellung der Dissertation zu setzen, wurden den Kapiteln 3.1 bis 3.3 jeweils ‚Einführende Worte‘ vorangestellt.

Die Konzepte der drei wissenschaftlichen Artikel habe ich mit den Ko-Autoren diskutiert und entwickelt. Der in dieser Dissertation verwendete dendroökologische Datensatz baut auf dem

Vorwort

zu Beginn meiner Arbeit bereits bestehenden Netzwerk der Dendrogruppe der Universität Bonn auf. Der Ko-Autor Dr. Burkhard Neuwirth hat den Datensatz um eine wesentliche Zahl an Standortchronologien erweitert. Er stellte mir außerdem die in Kapitel 3.1 und 3.2 verwendeten Klimadaten zur Verfügung, während Prof. Dr. Sebastian Schmidlein die Klimazeitreihen für die Kapitel 3.3 zugrunde liegenden Analysen bereitstellte. Etwa 60 Prozent der Dendrodaten sind im Rahmen meiner eigenen Geländegänge und Laborarbeiten neu erhoben worden. Alle in dieser Dissertation beschriebenen Analysen habe ich selbstständig durchgeführt. Die wissenschaftlichen Artikel habe ich unter Berücksichtigung konstruktiver Anmerkungen der Ko-Autoren und meiner Doktorväter Prof. Dr. Matthias Winiger und Prof. Dr. Sebastian Schmidlein verfasst.

1. Einführung

1.1 Theoretischer Hintergrund, Forschungsstand und Problemstellung

Unsere Wälder verfügen über vielfältige, für die Lebensbedingungen auf der Erde bedeutende Landschaftsfunktionen, die unter den Oberbegriffen Produktions-, Regulations- und Lebensraumfunktionen zusammengefasst werden können (Bastian & Schreiber, 1994; Deutscher Bundestag, 2001). Die Bedeutung der Wälder Deutschlands wird in erster Linie in den ökonomischen Produktionsfunktionen, insbesondere in der Bedeutung als Lieferant des nachwachsenden Rohstoffes Holz, gesehen. Jedoch gewinnen Regulations- und Lebensraumfunktionen aufgrund der hohen Besiedlungsdichte und Industrie stets an Bedeutung. In diesem Rahmen sind unter anderem die Funktionen der Wälder als Kohlenstoffsinken, die Erhaltung der Artenvielfalt, wie auch die Erholungsfunktion zu nennen (Deutscher Bundestag, 2001).

Im Rahmen des globalen Klimawandels wird für Mitteleuropa bis zum Ende des 21. Jahrhunderts ein Temperaturanstieg von 2,3 bis 5,3 °C angenommen (Christensen et al., 2007). Gleichzeitig soll es zu einer zeitlichen Umverteilung der Niederschläge kommen, die mit einer Zunahme der winterlichen und einer Reduktion der sommerlichen Niederschläge einhergeht, wobei die Stärke dieser Veränderungen regional unterschiedlich ausgeprägt ist (Christensen et al., 2007; Spekat et al., 2007). Die Erwärmungstrends im 20. Jahrhundert sind außergewöhnlich stark mit einer Erwärmungsrate von $+0,08 \text{ °C} \pm 0,03 \text{ °C}$ pro Dekade (Luterbacher et al., 2004), besonders seit den späten 1970er Jahren (Foster & Rahmstorf, 2011). Die neun wärmsten Jahre der letzten 500 Jahre in Europa sind nach 1989 aufgetreten (Luterbacher et al., 2004). Mit diesen Veränderungen einhergehend, ist eine Zunahme von klimatischen Extremereignissen, wie Hitzewellen und Dürreperioden zu erwarten (Stefanon et al., 2012). Zunahmen der Stärke, Häufigkeit und Andauer von Hitze- und Dürrestress können die Zusammensetzung, die Struktur, sowie die räumliche Verteilung der Wälder maßgeblich beeinflussen (Allen et al., 2010). Dies kann zu einer reduzierten Wuchsleistung und einer erhöhten Sterblichkeitsrate von Baumarten führen (Thomas et al., 2002). Die Untersuchung der Auswirkung des Klimawandels auf Forstökosysteme ist somit von besonderer Bedeutung (Boisvenue & Running, 2006). Der Kenntnisstand bezüglich Wuchspotenz und Überlebenschancen und somit der Vitalität der Arten (Roloff, 2001) sollte weiterhin verbessert werden um als Grundlage für sinnvolle forstliche Planung dienen zu können. So liefert die Untersuchung der Potenziale typischer Wald bildender Baumarten vor dem

1. Einführung

Hintergrund sich ändernder Umweltbedingungen wertvolle Hinweise für wichtige waldbauliche Entscheidungen wie die Baumartenwahl (Kölling, 2008). Da die Einbringung von nicht-heimischen Baumarten in deutsche Wälder für die Forstwirtschaft ebenfalls von Interesse ist (Stähr et al., 2006), sollte auch die Untersuchung deren möglicher Eignung erfolgen. Die Vitalität der Bäume kann über die Untersuchung bestimmter Indikatoren, wie zum Beispiel der Kronentransparenz, des Höhen- oder des Dickenwachstums, abgeleitet werden (Dobbertin, 2005). Zur Untersuchung des zuletzt genannten Radialwachstums ist die Dendroökologie besonders geeignet, da sie eine jahrgenaue und retrospektive Analyse anhand von Jahrringbreitenserien ermöglicht (Schweingruber, 1996). Darüber hinaus können im Rahmen dendroökologischer Studien so genannte Klima/Wachstumsbeziehungen analysiert werden, deren Kenntnis entscheidend zum Verständnis der Auswirkungen klimatischer Veränderungen auf das Baumwachstum beitragen können (Neuwirth, 2011). In diesem Rahmen kommen zur Untersuchung der Zusammenhänge zwischen Wuchsanomalien und extremen klimatischen Bedingungen Weiserjehranalysen (Schweingruber et al., 1990) zum Einsatz (Romagnoli & Codipietro, 1996; Schweingruber & Nogler, 2003; Neuwirth et al., 2007a, b; Kahle et al., 2007, Babst et al., 2012). Anstatt über komplexe multivariate Zusammenhänge Bezüge zwischen Baumwachstum und Umweltfaktoren herzustellen (Fritts, 1976), was häufig zu schwer interpretierbaren Ergebnissen führt (Z'Graggen, 1992), werden in der neueren Literatur (z.B. Paritsis et al., 2009; Friedrichs et al. 2009b, c) für das Verständnis der Zusammenhänge von Jahrring- und Klimaserien in erster Linie Korrelationsberechnungen durchgeführt. Bei diesen wird der mittlere Zusammenhang zu einem klimatischen Parameter untersucht, wie z.B. zur Temperatur (Esper, 2000; Büntgen et al., 2006) zum Niederschlag (Treydte, 2003) oder zu Klimaelementen in den Tropen (Schollän et al., 2013).

An Standorten die an der jeweiligen Verbreitungsgrenze der Baumarten liegen ist der klimatische Einfluss auf das Baumwachstum besonders stark (Ellenberg, 1996) und ihr Wachstum wird meist von einem dominanten klimatischen Faktor limitiert (Körner, 1998). Es konnten hochsignifikante Zusammenhänge zwischen Baumwachstum und Klima hergestellt werden, die Rekonstruktionen klimatischer Bedingungen ermöglichen (Esper et al., 2002; Treydte et al., 2006).

Im Gegensatz dazu unterliegt das Baumwachstum der gemäßigten Breiten einem komplexen System von ökologischen Einflussfaktoren (Fritts, 1976). Dies erschwert das Verständnis der Klima/Wachstumsbeziehungen in temperierten Wäldern und somit die Rekonstruktion einzelner klimatischer Parameter (Mérian et al., 2011). Bis heute gibt es zahlreiche dendroökologische Studien in temperierten Wäldern (z.B. Bonn, 1998; Dittmar et al., 2003;

1. Einführung

Lebourgeois & Ulrich, 2010; Mérian & Lebourgeois, 2011). Diese zeigen, dass dendroökologische Analysen auch anhand von Jahrringserien aus temperierten Wäldern wichtige Erkenntnisse über klimatische Bedingungen liefern können, wie Bonn (1998) und Neuwirth et al. (2007a, b) für die Untersuchung von Weiserjahren (Schweingruber et al., 1990) belegen konnten. Friedrichs (2008) konnte signifikante korrelative Zusammenhänge zwischen Jahrringchronologien aus temperierten Wäldern und Klimazeitreihen aufzeigen. Friedrichs et al. (2009b) betonen die Bedeutung umfangreicherer, topographisch differenzierter Datennetzwerke für die Genauigkeit der Erfassung von Klima/Wachstumsbeziehungen in temperierten Wäldern. Während bisherige Netzwerkanalysen meist großräumig angelegt sind, z.B. bei Cook et al. (2004) hemisphärisch, bei Babst et al. (2013) kontinental und bei Neuwirth (2010) subkontinental, raten Schweingruber & Nogler (2003), die Studien eher regional anzusiedeln. Dadurch können auch feine Unterschiede in den relativ homogenen Klima/Wachstumsbeziehungen in temperierten Wäldern erfasst werden, was wiederum zu einem besseren Verständnis dieser führt.

Da die Bäume sowohl auf lang- als auch kurzfristige Variationen von Umweltparametern reagieren (Innes & Peterson, 2001), werden diese Untersuchungen für Wachstumsschwankungen unterschiedlicher Wellenlängen durchgeführt (Esper & Gärtner, 2001). Auf Basis der Analyse interannueller Wachstumsanomalien von Buchen und Eichen stellen Neuwirth et al. (2007b) artspezifische, zeitverzögerte Reaktionen auf gleiche klimatische Bedingungen in Westdeutschland fest. Kontinuierliche Zeitreihenanalysen interannueller Wuchsvariationen in temperierten Wäldern werden von Friedrichs et al. (2009b) für Buchen, Eichen und Kiefern in zwei Regionen des westdeutschen Mittelgebirges durchgeführt. Die Resultate der Analysen der Klima/Wachstumsbeziehungen ergeben artspezifische Unterschiede und weisen die am empfindlichsten auf klimatische Einflüsse reagierende Buche als besonders durch den Klimawandel gefährdete Art aus. Die Traubeneiche zeigt hingegen deutlich bessere Potenziale um mit den klimatischen Veränderungen zurecht zu kommen, was die Resultate von Bonn (1998) bestätigt. Bisher basieren die Forschungsansätze meist auf artspezifischen Untersuchungen (Hidalgo et al., 2001; Friedrichs et al., 2009c), so dass als wichtigster steuernder Faktor für die Klima/Wachstumsbeziehungen die Baumart impliziert wird. Ansätze, Gruppierungen von Standorten einer Art mit ähnlichen Wuchsmustern mit Hilfe von Klassifizierungsverfahren wie Clusteranalysen durchzuführen, sind zu finden bei Koprowski & Zielski (2006) und Friedrichs et al. (2009b). Weitere dendroökologische Studien sind erforderlich um das Verständnis der komplexen Klima/Wachstumsbeziehungen in temperierten Wäldern zu

1. Einführung

vertiefen (Friedrichs, 2008). Dieses stellt die Grundlage für klimatische Rekonstruktionen, sowie die Einschätzung der Auswirkungen des Klimawandels auf das Baumwachstum dar (Fritts, 1976).

Neuwirth (2010) fordert für Untersuchungen im Westen Deutschlands eine verstärkte Ausweitung des dendroökologischen Datennetzwerkes, in dem die wichtigen Wald bildenden Baumarten enthalten sind. Dendroökologische Studien in denen die Klimasensitivität heimischer mit nicht-heimischen Baumarten in temperierten Wäldern verglichen werden sind selten und finden sich für den süddeutschen Raum bei Zang et al. (2011). Eine Erweiterung des Netzwerkes um Standorte nicht-heimischer Baumarten, ermöglicht die vergleichende Untersuchung der Klimasensitivität heimischer und nicht-heimischer Baumarten im westdeutschen Mittelgebirgsraum.

Nach Neuwirth (2010) sollte die Untersuchung der Klima/Wachstumsbeziehungen nicht nur für Variationen der interannuellen Skala sondern auch für dekadische und mehrdekadische Wellenlängen erfolgen, um eine verlässliche Basis für Rekonstruktionen klimatischer Zustände durch Betrachtung aller in den Jahrringserien enthaltenen Wellenlängen zu schaffen. Die darüber hinaus geforderte Verlängerung des Untersuchungszeitraumes über die 1970er Jahre hinaus, um Untersuchungen des Einflusses des Klimawandels auf das Baumwachstum anstellen zu können, wurde von Friedrichs et al. (2009b, c) umgesetzt. Jedoch wird in diesen Arbeiten die Notwendigkeit weiterer, auf längeren Zeitreihen basierenden, dendroökologischen Analysen betont, um ein noch detaillierteres Verständnis der komplexen Wachstumsreaktionen in temperierten Wäldern zu erreichen.

Zusammengefasst können daraus folgende Forschungsdefizite für Analysen der Klima/Wachstumsbeziehungen in temperierten Wäldern abgeleitet werden:

- Die bisherigen dendroökologischen Studien basieren auf der Annahme, dass die Art der wichtigste steuernde Faktor für die Klima/Wachstumsbeziehungen ist. Es mangelt an Analysen, die auf einem artunabhängigen Ansatz beruhen, der es ermöglichen kann Faktoren zu erkennen, die wichtiger als die Art sind.
- Besonders im westdeutschen Mittelgebirgsraum besteht ein Defizit an räumlich abgegrenzten und hoch verdichteten Netzwerken für die wichtigen Wald bildenden Baumarten.
- Es besteht ein Mangel an Studien, in denen neben den interannuellen Zuwachsvariationen auch Wachstumsschwankungen dekadischer und mehrdekadischer Wellenlängen untersucht werden.

1. Einführung

- Es mangelt an räumlich und zeitlich differenzierten Analysen der Klimasensitivität nicht-heimischer Arten im Vergleich zu heimischen Arten im westdeutschen Mittelgebirgsraum. Besonderer Bedarf besteht dabei an Studien, in denen ein möglichst langer Zeitraum innerhalb des 20. Jahrhunderts bis heute untersucht wird.

1.2 Zielsetzung und Konzeption

In der vorliegenden Arbeit werden die Klima/Wachstumsbeziehungen in temperierten Waldregionen des westdeutschen Mittelgebirges analysiert. Ziel ist es, ein verbessertes Verständnis dieser zu erreichen und darauf aufbauend die Wuchspotenziale der Waldbäume unter sich ändernden Klimabedingungen abzuleiten, sowie Aussagen über die Eignung von Jahrringserien aus temperierten Wäldern für Klimarekonstruktionen treffen zu können.

Dieser Untersuchung liegen folgende Fragestellungen zugrunde:

1. Wie wirkt sich das Klima auf das Wachstum heimischer Arten aus? Lassen sich Unterschiede in Bezug auf die Klima/Wachstumsbeziehungen nicht-heimischer Baumarten feststellen?
2. Ist es möglich, durch ähnliche Wuchsmuster definierte Standortgruppen, so genannte ‚Wuchstypen‘, für Variationen unterschiedlicher zeitlicher Skalen im Untersuchungsgebiet zu differenzieren?
3. Wie wirkt sich das Klima auf die Reaktionen der gefundenen Wuchstypen aus? Wie ist die zeitliche Stabilität der gefundenen Klima/Wachstumsbeziehungen und somit die Eignung von Jahrringchronologien aus temperierten Wäldern für Rekonstruktionen von einzelnen Klimaparametern zu bewerten?
4. Welche sind die wichtigsten steuernden Faktoren für die Klima/Wachstumsbeziehungen? Ist die Baumart das übergeordnete differenzierende Kriterium?
5. Wie ist der auf Wuchstypen basierende, ‚wuchsspezifische‘ Analyseansatz hinsichtlich seiner Potenziale dem artspezifischen Ansatz gegenüber einzuordnen?

1. Einführung

Zu Beginn werden die Reaktionen heimischer Baumarten und einer nicht-heimischen Baumart, der Douglasie, auf klimatische Einflüsse in zwei Regionen des westdeutschen Mittelgebirgsraumes untersucht und vergleichend in Bezug auf deren Wuchspotenziale in einer sich erwärmenden Umwelt diskutiert (Kapitel 3.1). Nach diesem artspezifischen Ansatz wird ein wuchsspezifischer Ansatz verwendet (Kapitel 3.2 und 3.3). Es wird versucht, Standorte mit ähnlichen Wuchseigenschaften zu Wuchstypen zusammenzufassen. Für diese Wuchstypen werden die Auswirkungen klimatischer Einflussfaktoren untersucht. Anschließend werden die für die Unterschiede in den gefundenen Klima/Wachstumsbeziehungen verantwortlichen Steuerfaktoren analysiert und die Potenziale des wuchsspezifischen Ansatzes gegenüber dem konventionellen artspezifischen Ansatz vergleichend diskutiert.

Für diese Studie wurde das dendroökologische Netzwerk der Dendrogruppe Bonn (Neuwirth, 2010) für den Bereich des Niederrheinischen Tieflandes und des westdeutschen Mittelgebirgsraums, sowie die Übergangsbereiche, verdichtet. Dabei wurde darauf geachtet eine möglichst homogene Verteilung der Standorte im Untersuchungsraum zu erzielen, soweit dies durch das Fehlen von Wäldern in den Bereichen von Ballungsräumen möglich war. Es wurden nach Höhenlage, Exposition und Neigung differenzierte Standorte und dominante sowie subdominante Bäume ausgewählt, um den klimatischen Einfluss noch genauer erfassen zu können. Das Netzwerk enthält Buche (*Fagus sylvatica* L.), Traubeneiche (*Quercus petraea* Matt *Liebl.*), Stieleiche (*Quercus robur* L.), Fichte (*Picea abies* Karst.) und Kiefer (*Pinus sylvestris* L.) als wesentliche Wald bildende Baumarten im Untersuchungsgebiet, sowie die Douglasie (*Pseudotsuga menziesii* Mirb. Franco) als nicht-heimische Art. Das den Studien dieser Dissertation zugrunde liegende Untersuchungsgebiet am Übergang vom Tiefland zum Mittelgebirgsraum Westdeutschlands wurde gewählt um bisherige Untersuchungen in temperierten Wäldern unter Berücksichtigung der aufgezeigten Forschungsdefizite sinnvoll ergänzen zu können. Leichte klimatische Variationen im Untersuchungsgebiet in Folge nordwestlicher Anströmrichtungen (Hurrel et al., 2003) und der Lage der Mittelgebirge (Kapitel 2.1) ermöglichen dabei die Analyse feiner Unterschiede in den insgesamt relativ homogenen Klima/Wachstumsbeziehungen auf regionaler Ebene. Außerdem sind im Untersuchungsgebiet sowohl Tieflagen- als auch Mittelgebirgsstandorte vorhanden, was die Möglichkeiten der Differenzierung der Standorte, insbesondere nach der Höhenlage, verbessert. Darüber hinaus standen Bohrgenehmigungen für weitestgehend homogen über das Untersuchungsgebiet verteilte Beprobungsflächen zur Verfügung, die eine möglichst flächendeckende Verdichtung des Standortnetzwerkes erlaubte. Auf diesen Flächen waren

1. Einführung

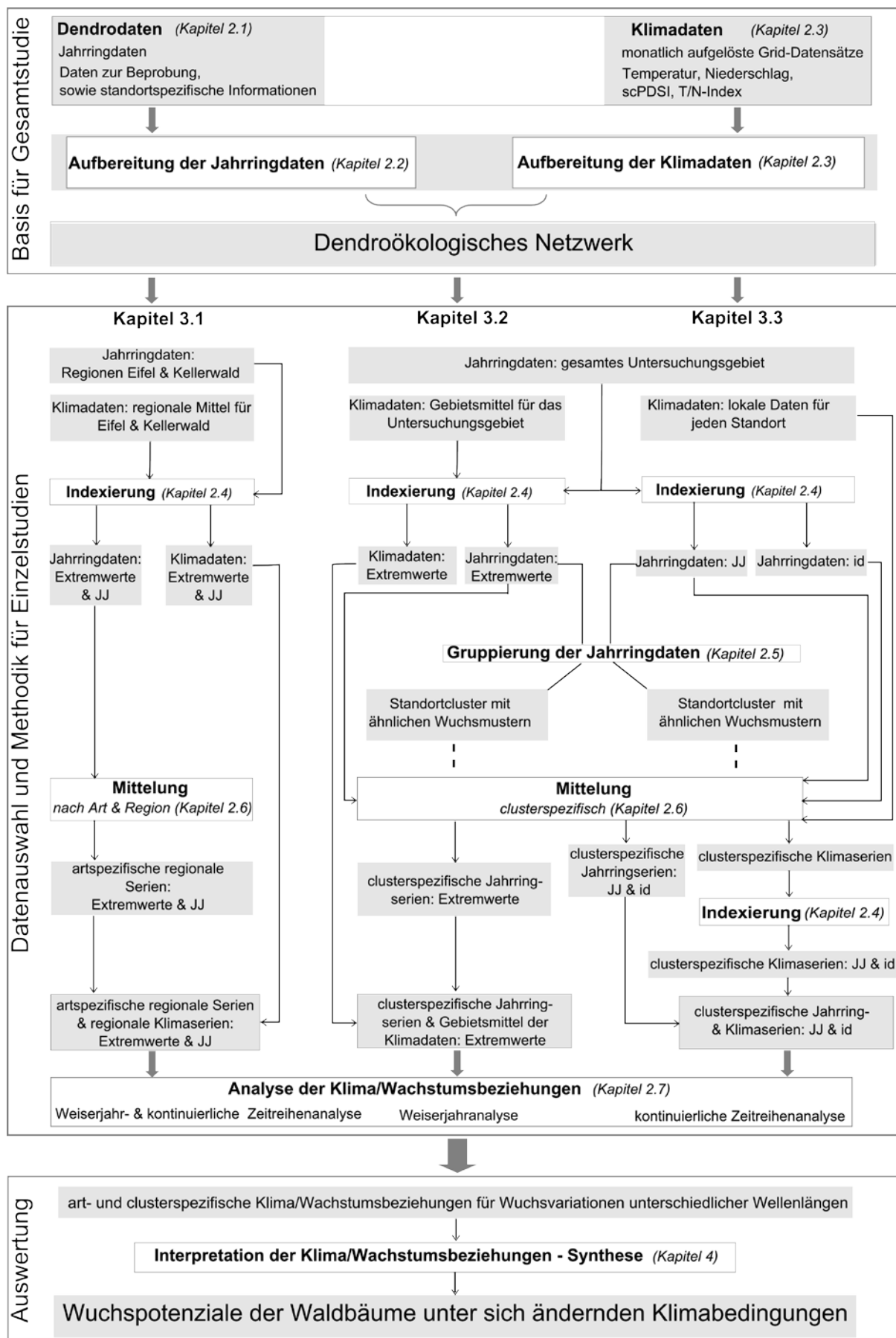


Abb. 1: Übersichtsschema über die Datengrundlage, methodische Konzeption, sowie die einzelnen Aufbereitungs- und Analyseschritte im Rahmen der dendroökologischen Wachstumsanalyse. JJ = Jahr-zu-Jahr-Variationen, id= interdekadische Variationen

1. Einführung

außerdem die wichtigen Wald bildenden Baumarten temperierter Wälder vertreten (Kapitel 2.1).

Die Methodik basiert auf dendroökologischen Standardtechniken, die in dieser Arbeit in besonderer Weise mit multivariaten Techniken verknüpft werden. Im Rahmen dieser Arbeit werden Klima/Wachstumsanalysen für Variationen verschiedener Wellenlängen, Extremjahre, Jahr-zu-Jahr-Variationen, dekadische und mehrdekadische Fluktuationen mit einschließend, analysiert. Dabei erfolgt der Wechsel von artspezifischen zu wuchsspezifischen Analysen, wobei zur Umsetzung der letztgenannten erstmals eine Kombination von Cropperserien und Clusteranalyse erfolgt, der sich eine Weiserjahanalyse anschließt. Des Weiteren werden die in der Dendroökologie üblicherweise zur Bildung von Indexserien verwendeten Splinefunktionen auch zur Analyse dekadischer und mehrdekadischer Frequenzen herangezogen. Schließlich werden die Wuchstypen hinsichtlich ihrer Reaktionen auf klimatische Veränderungen interpretiert. Zur Analyse der zeitlichen Stabilität der Klima/Wachstumsbeziehungen werden Zeitfenstervergleiche herangezogen.

Das in Abbildung 1 dargestellte Ablaufschema vermittelt einen Überblick über die Datengrundlage sowie die einzelnen Analyseschritte, deren detaillierte Erläuterung in Kapitel 2, sowie in den Kapiteln 3.1 bis 3.3 zu finden ist.

2. Material und Methoden

2.1 Untersuchungsgebiet und Dendrodaten

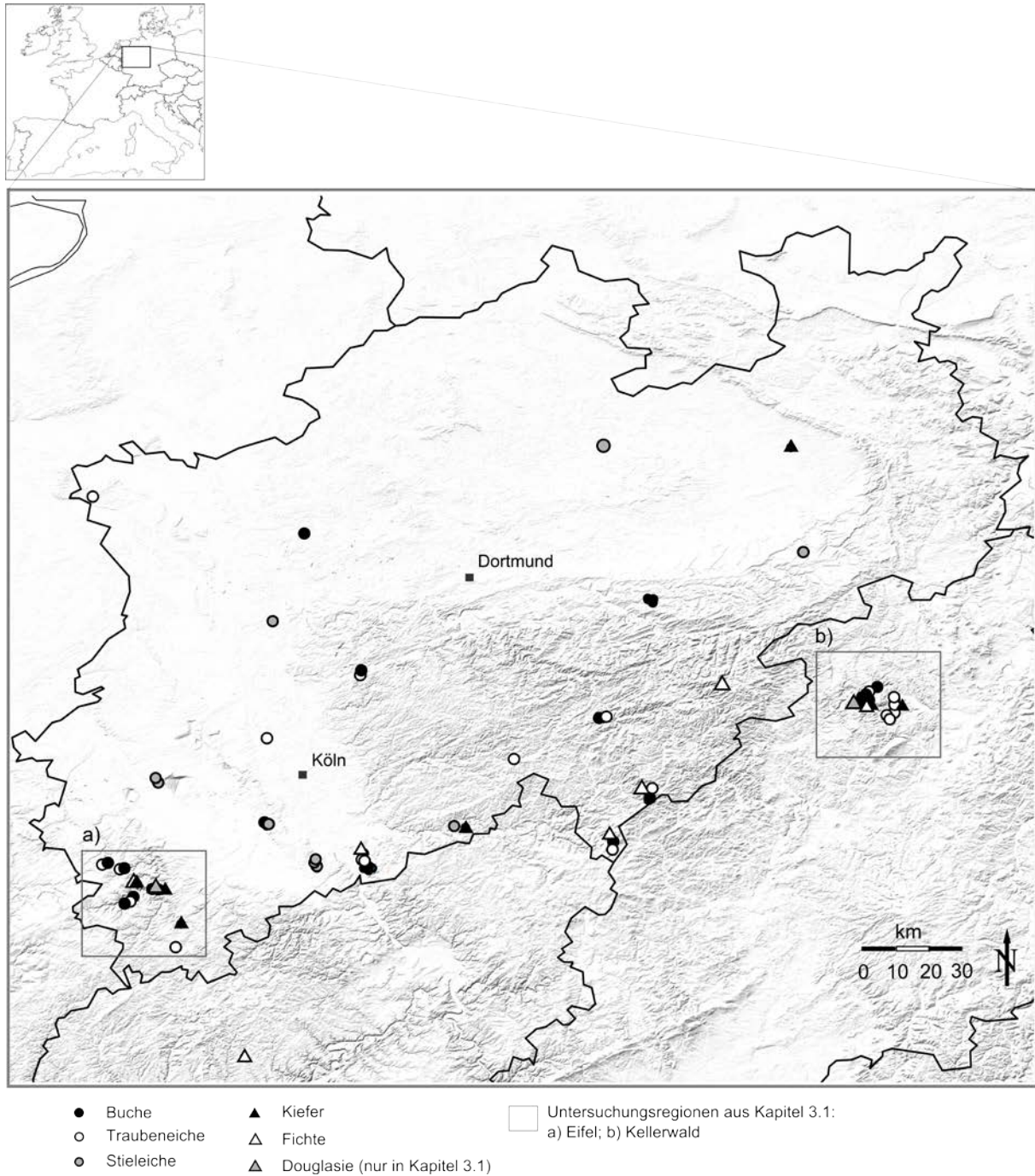


Abb. 2: Lage des Untersuchungsgebietes und Übersicht über die dendroökologischen Standorte. Die Symbole repräsentieren die verschiedenen Baumarten: schwarze Kreise = Buchenstandorte, weiße Kreise = Traubeneichenstandorte, graue Kreise = Stieleichenstandorte, schwarze Dreiecke = Kiefernstandorte, weiße Dreiecke = Fichtenstandorte und graue Dreiecke = Douglasienstandorte.

2. Material und Methoden

Das Untersuchungsgebiet liegt am Übergang des Niederrheinischen Tieflandes zum westdeutschen Mittelgebirgsraum im groben Bereich zwischen 6-10° östlicher Länge und 50-52° nördlicher Breite. Es hat eine ungefähre Größe von 300 x 200 km. Der überwiegende Teil des Untersuchungsgebietes liegt im Bundesland Nordrhein-Westfalen, wobei mit dem Nationalpark Kellerwald/Edersee und der Westeifel bei Gillenfeld auch die Randgebiete von Hessen und Rheinland-Pfalz enthalten sind. Der Langenberg im Rothaargebirge stellt mit einer Höhe von 843 m ü. NN die höchste Erhebung im Untersuchungsgebiet dar, während die tiefste Lage im niederrheinischen Tiefland bei Zyfflich mit 9,2 m ü. NN (Bezirksregierung Köln, 2013) zu finden ist.

Zu den natürlichen Waldgesellschaften im Untersuchungsgebiet zählen insbesondere Hainsimsen-Buchenwälder, artenreiche Buchenwälder, Buchen-Eichenwälder und Stieleichen-Hainbuchenwälder (Schulte, 2012; Menzler & Sawitzky, 2013). Es herrschen natürlicherweise Laubwälder vor, wobei die Buche die dominierende Baumart ist (BMVEL, 2004; Schulte, 2012). Während Buche und Eiche die natürlicherweise am häufigsten vorkommenden Baumarten sind (Schulte & Scheible, 2005), ist die vergleichsweise anspruchslose und standorttolerante Kiefer meist nur an Extremstandorten zu finden (Leder & Spelsberg, 2007) an denen sie nicht von den anspruchsvollen Laubbaumarten verdrängt wird (Abb. 3 a). Fichtendominierte Wälder kommen in Deutschland hingegen natürlicherweise in Gebieten der montanen bis subalpinen Höhenstufe vor, wohingegen die Fichte im Flachland, wenn überhaupt, nur inselartig vertreten ist (Ellenberg, 1996; BMVEL, 2004). Die

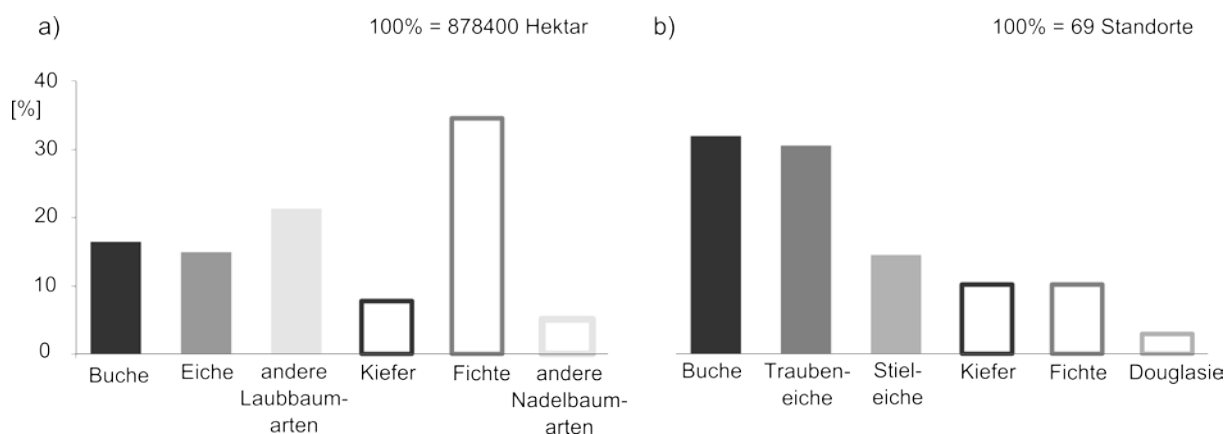


Abb. 3: Anteile der Baumarten (a) Flächenanteile an der Gesamtwaldfläche in Nordrhein-Westfalen (Datenquelle: MKULNV, 2012), (b) Anteile der beprobten Standorte pro Baumart an der Gesamtzahl der beprobten Standorte

2. Material und Methoden

vergleichsweise hohen Flächenanteile der Fichte an der Gesamtwaldfläche in Nordrhein-Westfalen (Abb. 3 a) sind auf die Anpflanzungen ab Mitte des 19. Jahrhunderts im Rahmen von Wiederaufforstungsmaßnahmen zurückzuführen (Klimo et al., 2000).

Durchschnittliche Angaben zu Lufttemperatur und Niederschlagsverhältnissen in Nordrhein-Westfalen werden für die Klimanormalperiode 1961-1990 vorgestellt. Die durchschnittliche Jahresmitteltemperatur liegt bei 8,9 °C, die mittlere jährliche Niederschlagssumme bei 911 mm (Kropp et al., 2009). Die klimatischen Bedingungen im Untersuchungsgebiet werden von nordwestlichen Anströmrichtungen bestimmt (Hurrell et al., 2003), die zusammen mit der Geländestruktur für regionale Unterschiede sorgen (LANUV, 2010).

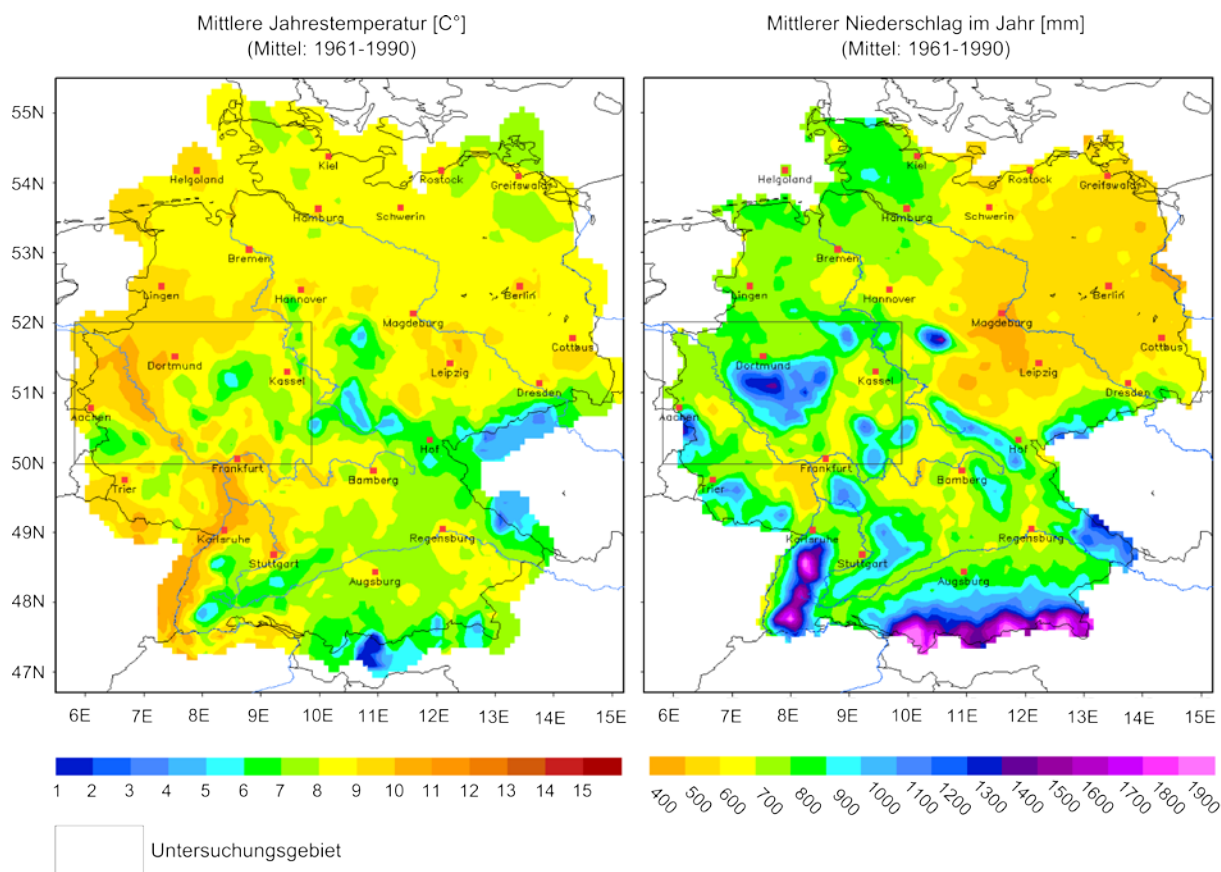


Abb. 4: Verteilung der mittleren Jahrestemperatur und des mittleren Jahresniederschlags in Deutschland für den Zeitraum 1961-1990 (verändert nach <http://imk-tornado.physik.uni-karlsruhe.de/~muehr/Karten/temp6190jahr.png> und <http://imk-tornado.physik.uni-karlsruhe.de/~muehr/Karten/regen6190jahr.png>)

Dadurch bedingt herrschen in Gebieten am nordwestlichen Rand und somit an der Luvseite des Mittelgebirges, wie zum Beispiel der Eifel und im Sauerland mit etwa 1000 mm mittlerem Jahresniederschlag, feuchtere Bedingungen vor als in der Zülpicher Börde mit ungefähr 600 mm, im Bonner Raum mit etwa 700 mm, oder dem östlicher gelegenen Kellerwald mit circa 700 mm mittlerem Jahresniederschlag (Abb. 4). Aufgrund der

2. Material und Methoden

durchschnittlichen Temperaturabnahme von 0,7 °C/100 m zeigt sich in NRW eine deutliche Abhängigkeit der Verteilung der mittleren Jahrestemperatur von der Höhe ü. NN (LANUV, 2010). Daraus ergeben sich höhere mittlere Jahrestemperaturen in den Tieflagen, wie beispielsweise der Niederrheinischen Bucht (etwa 9 °C) und der Kölner Bucht (circa 10 °C) und niedrigere in den Mittelgebirgslagen, wie der Eifel mit ungefähr 6-8 °C und dem Rothaargebirge mit etwa 5 °C mittlerer Jahrestemperatur (Abb. 4). Insgesamt lassen sich die klimatischen Verhältnisse im östlichen Teil des Untersuchungsgebietes als etwas kontinentaler als im westlichen Teil einstufen (Glaser & Schönbein, 2007).

Die regionale Verbreitung der Bodentypen in Deutschland wird einerseits durch das Klima und andererseits durch das Ausgangsgestein und das Relief bestimmt (Adler et al., 2003). Detaillierte Angaben zu allen im Untersuchungsgebiet vorkommenden Böden würden an dieser Stelle zu weit führen. Es wird dafür auf den Nationalatlas Bundesrepublik Deutschland – Relief, Boden und Wasser (2003) verwiesen. Als dominierende Bodentypen im Untersuchungsgebiet sind Braunerden und Parabraunerden zu nennen (Schulte & Scheible, 2005; Semmel, 1983, S. 45, Abb. 4), die sich unter gemäßigten Klimabedingungen (Semmel, 1983) bei etwa 8 bis 10 °C jährlicher Mitteltemperatur und 500 bis 800 mm Jahresniederschlag (Mückenhausen, 1977) entwickeln. Unter Wald ist die Braunerde mit Abstand der am weitesten verbreitete Hauptbodentyp in Nordrhein-Westfalen (Schulte, 2003). Überwiegend handelt es sich um basenarme Braunerden. Diese kommen besonders in den Mittelgebirgslagen auf „Granit-, Grauwacke-, Tonschiefer- oder Sandstein-Fließerden bzw. im Flachland“ (Schulte, 2003, S. 29) auf pleistozänen und holozänen Sanden vor.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde das bestehende, umfangreiche Datennetzwerk der Dendrogruppe Bonn für Nordrhein-Westfalen und die angrenzenden Randbereiche der Bundesländer Hessen und Rheinland-Pfalz erweitert und verdichtet. Da für wirtschaftlich genutzte Wälder aufgrund des durch eine Probenentnahme entstehenden hohen Wertverlustes des Holzes, meist keine Bohrgenehmigungen erteilt werden, wurden überwiegend Flächen beprobt, die in Waldgebieten mit unterschiedlichem Schutzstatus liegen. Dabei nehmen die Naturwaldzellen Nordrhein-Westfalens, sowie die Nationalparke Eifel und Kellerwald/Edersee einen wichtigen Stellenwert ein.

Das in den 1970er Jahren eingerichtete Naturwaldzellen-Programm in Nordrhein-Westfalen hat zum Ziel, die natürlichen Waldgesellschaften für Forschung und Lehre zu erhalten und eine natürliche Entwicklung, ohne direkte Eingriffe des Menschen, zu ermöglichen. Derzeit besteht ein Netzwerk von 75 Naturwaldzellen, die weitestgehend homogen über das Bundesland verteilt sind und die wichtigsten, für Nordrhein-Westfalen typischen, natürlichen Waldgesellschaften repräsentieren (Schulte & Scheible, 2005).

2. Material und Methoden

„Das Hauptziel aller Nationalparke ist der Schutz weitgehend ungestörter natürlicher Ökosysteme. Dieses Ziel wird mittels des Prozessschutzes, also der Gewährleistung möglichst unbeeinflusster natürlicher Prozesse, umgesetzt.“ (Landesbetrieb Wald und Holz, 2008, S. 17) Nicht natürlich im Nationalpark vorkommende Baumarten, wie Fichten und nicht-heimische Douglasien, werden zur Unterstützung der natürlichen Waldentwicklung entnommen (Landesbetrieb Wald und Holz, 2008).

Es wurden insgesamt 69 Standorte, darunter 22 Buchen-, 21 Traubeneichen-, 10 Stieleichen-, sieben Kiefern-, sieben Fichten- und zwei Douglasienstandorte beprobt. Die Baumartenzusammensetzung des Datensatzes (Abb. 3 b) entspricht in etwa den Flächenanteilen der Baumarten in Nordrhein-Westfalen (Abb. 3 a) mit Ausnahme der geringeren Repräsentanz der Fichte, die auf die zur Verfügung stehenden Beprobungsflächen zurückzuführen ist. Daraus ergibt sich eine verstärkte Dominanz der Laubbaum- im Vergleich zu den Nadelbaumstandorten im Datensatz. Die Douglasie wurde ausschließlich in kurz vor der Entnahme stehenden Beständen der Nationalparke Eifel und Kellerwald/Edersee beprobt, da sie als nicht-heimische Baumart nur vereinzelt in den Naturwaldzellen anzutreffen ist.

Die beprobten Standorte liegen in Höhen von 40 bis 710 m ü. NN und decken somit in etwa das im Untersuchungsgebiet vorkommende Höhenspektrum ab. Sie variieren bezüglich Neigung (0-45°) und Exposition.

Neben den aus dem gewonnenen Probenmaterial erzeugten Jahrringchronologien (siehe Kapitel 2.2) enthält der Datensatz standortspezifische Angaben, wie Höhenlage, Neigung, Exposition und Bodenfeuchte, sowie Daten zur Probenentnahme, z.B. Bohrhöhe und Stammumfang in Bohrhöhe. Dieser Datensatz bildet zusammen mit den in Kapitel 2.3 beschriebenen Klimadaten das dendroökologische Netzwerk, das den Analysen dieser Studie zugrunde liegt (Abb. 1).

2.2 Probennahme und Aufbereitung der Dendrodaten

Der Begriff des Standortes bezieht sich in der Dendroökologie nicht ausschließlich auf die geographische Lage einer Fläche, sondern auf eine Baumart pro Fläche. Dies bedeutet, dass das Material von zwei auf einer Fläche beprobten Baumarten zwei Standorten zugeordnet wird. Die Auswahl einer Beprobungsfläche erfolgt unter Berücksichtigung einer möglichst starken Homogenität in Hinblick auf morphologische und ökologische Kriterien. Pro Standort wurden von durchschnittlich 14 dominanten bis subdominanten Bäumen jeweils zwei Bohrkerne mit einem Durchmesser von 5 mm mit Suunto Zuwachsbohrern entnommen. Die Beprobung erfolgte etwa in Brusthöhe, 1,30 m über dem Boden, auf zwei gegenüberliegenden Seiten des Baumes. Bei der Auswahl der zu beprobenden Seiten wurde darauf geachtet, dass

2. Material und Methoden

an Hangstandorten die Bohrrichtung isohypsenparallel verläuft. Diese Vorgehensweise sorgt dafür mögliche Beeinflussungen des Jahrringbildes durch Ausgleichsreaktionen des Baumes auf die Hangneigung zu reduzieren und weitgehend auszuschließen (Gärtner et al., 2004). Die entnommenen Holzproben wurden im Labor nach den von Stokes & Smiley (1968) beschriebenen Standardverfahren aufbereitet. Dazu gehören das Aufleimen auf hölzerne Probenträger, das Präparieren einer glatten Oberfläche mit Hilfe von Schnitzmessern und Schmirgelpapier, sowie das Auftragen von Kreidestaub auf die Bohrkernoberfläche um die Jahrringgrenzen deutlicher hervortreten zu lassen. Durch Zählung der Jahrringe von der Waldkante zum Kern, bzw. zu dem letzten erfassten inneren Ring, wurden alle auf der Probe vorhandenen Jahrringe datiert. Anschließend wurden die Jahrringbreiten jedes Kernes auf einem LINTAB Messtisch mit der Software Time Series Analysis and Presentation (Rinn, 2003; TSAP) in einer Auflösung von 1/100 mm gemessen. Die so entstandenen Jahrringserien wurden pro Baum zu so genannten Baummittelkurven gemittelt, aus denen wiederum für jeden Standort Standortmittelkurven berechnet wurden. Die Korrektheit der Datierung wurde durch Cross-Dating einerseits visuell, wie auch unter Zuhilfenahme des Synchronisationsprogrammes COFECHA (Holmes, 1983) geprüft. Die Homogenität der Standorte, und somit die Qualität des in den Standortchronologien enthaltenen klimatischen Signals, wurde anhand von vier Parametern, der Gleichläufigkeit, NET (Esper et al., 2001), sowie EPS und Rbar (Wigley et al., 1984) kontrolliert (Methodenteil in Kapitel 3.1 und 3.2, sowie Kapitel 3.3).

2.3 Klimadaten und ihre Aufbereitung

Die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Klimadaten setzen sich aus monatlich, periodisch und jährlich aufgelösten Serien der Klimaelemente Temperatur und Niederschlag und zwei Dürreindizes zusammen. Der T/N-Index gibt das Verhältnis von Temperatur zu Niederschlag an und ist in dieser Arbeit definiert als Quotient aus Temperatur und Niederschlag. Der self-calibrating Palmer Drought Severity Index (scPDSI; Wells et al., 2004) ist ein Maß für die regionale Bodenwasserverfügbarkeit. Er basiert auf einem Wasserhaushaltsmodell und wird auf Grundlage von monatlichen Temperatur- und Niederschlagsdaten, sowie Werten die Bodenfeuchte betreffend berechnet.

Es wurden im Folgenden vorgestellte Grid-Datensätze für Temperatur, Niederschlag und scPDSI verwendet:

Auf Basis der Grid-Datensätze für Temperatur und Niederschlag der Climate Research Unit in Norwich (0,5° x 0,5°) (Mitchell & Jones, 2005) wurden für die Regionen Eifel und Kellerwald aus den jeweils umgebenden vier Grid-Punkten regionale Mittel für den Zeitraum

2. Material und Methoden

1901 bis 2002 berechnet (Kapitel 3.1). Die Serien aller Grid-Punkte die innerhalb des Untersuchungsgebietes, sowie in den angrenzenden Bereichen, liegen, wurden zu einem Gebietsmittel für das Zeitfenster 1941 bis 2000 zusammengefasst (Kapitel 3.2).

In Kapitel 3.3 wurden Grid-Datensätze für Temperatur, Niederschlag und scPDSI mit einer räumlichen Auflösung von 1 km x 1 km (Müller-Westermeier, 1998) über den Zeitraum 1941-2000 verwendet. Es wurden für jeden Standort lokale Temperatur- und Niederschlagsserien vom nächstgelegenen Grid-Punkt selektiert. Diese Serien fließen in die Berechnung des T/N-Index ein. Des Weiteren wurden für jeden Standort lokale scPDSI-Zeitreihen unter Verwendung des von Meyn et al. (2010) an Gridzellen adaptierten C++ Code von Wells et al. (2004) berechnet.

2.4 Indexierung

Wachstumssteuernde Faktoren, insbesondere das Klima, zeigen Variationen unterschiedlicher Wellenlängen, die sich in den Jahrringbreitenserien widerspiegeln. Im Rahmen der Analysen von Klima/Wachstumsbeziehungen werden Variationen verschiedener Wellenlängen mit Hilfe geeigneter Indexierungsverfahren voneinander separiert (Esper & Gärtner, 2001) um die Zeitreihen vergleichbar zu machen (Leyer & Wesche, 2007). Ein zentraler Aspekt bei der Indexierung der Jahrringserien ist dabei die weitgehende Entfernung des so genannten Alterstrends. Unter diesem ist die Reduktion der Jahrringbreite mit zunehmendem Baumalter zu verstehen, die sich durch einen kontinuierlich zunehmenden Stammumfang bei etwa gleich bleibender jährlicher Holzproduktion erklären lässt (Bräker, 1981). Im Rahmen dieser Arbeit wurden interannuelle Anomalien durch die Quantifizierung von Extremwerten bestimmt (Kapitel 2.4.1). Außerdem wurden die Jahrringserien und Klimazeitreihen in Jahr-zu-Jahr-Variationen und dekadische bzw. mehrdekadische, im Folgenden in Anlehnung an Esper et al. (2003) als ‚interdekadische‘ Wellenlängen bezeichnet, zerlegt. Dies wurde in erster Linie unter Verwendung so genannter kubischer Splinefunktionen (Cook & Peters, 1981), durchgeführt (Kapitel 2.4.2).

2.4.1 Extremwerte

Jahre deren Jahrringe sich in ihrer Breite visuell von den sie umgebenden Ringen unterscheiden, werden als Weiserjahre bezeichnet (Schweingruber et al., 1990). Ausführliche Gegenüberstellungen von Weiserjahrdefinitionen sind bei Z’Graggen (1992) und Neuwirth (2010) zu finden. Die Quantifizierung von Wuchsanomalien erfolgte durch Anwendung des von Neuwirth (2010) modifizierten Verfahrens nach Cropper (1979), in dessen Rahmen die Jahrringserien durch ihr 13-jähriges gleitendes Mittel dividiert werden und eine anschließende

2. Material und Methoden

z-Transformation der standardisierten Serien einen Mittelwert $\mu=0$ und eine Standardabweichung von $\sigma=1$ erzeugt (Abb. 5). Die so berechneten Cropperwerte werden anhand der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Standardabweichung in unterschiedliche Anomalieklassen eingeteilt. Werte $\geq +1\sigma$ bzw. $\leq -1\sigma$ werden als positive bzw. negative Weiserjahre bezeichnet. Die Schwellenwerte für die Klasseneinteilung in ‚schwache‘, ‚starke‘ und ‚extreme‘ positive bzw. negative Weiserjahre liegen bei $\pm 1\sigma$, $\pm 1,28\sigma$ und bei $\pm 1,645\sigma$. Insgesamt werden etwa 68 % der Werte nicht als Weiserwerte ausgewiesen, 5% werden als extreme Weiserwerte klassifiziert (Neuwirth, 2010).

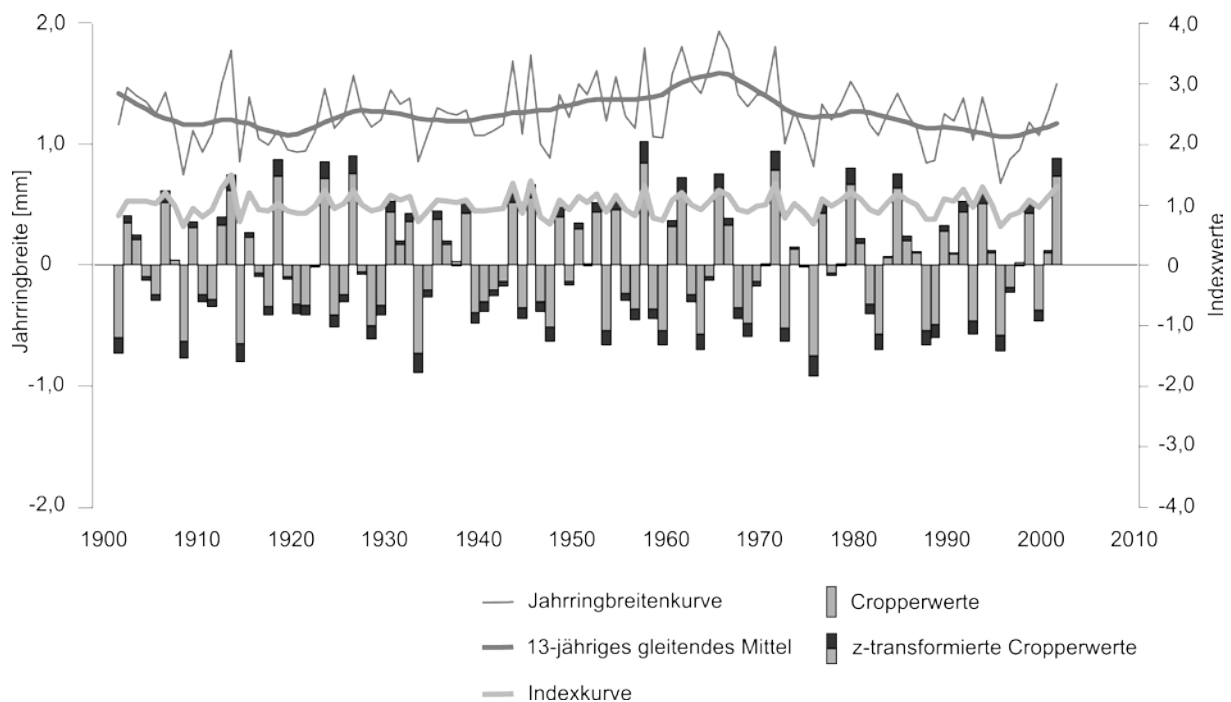


Abb. 5: Schrittweise Indexierung von Jahringdaten durch Anwendung der Croppermethode (Cropper, 1979), gezeigt am Beispiel einer Eichenchronologie aus dem östlichen Raum des Untersuchungsgebietes (nach Neuwirth 2010, S. 33; verändert in der Darstellung und durch eigene Daten). Alle Schritte erfolgen auf Basis der Einzelserien die anschließend gemittelt werden.

Die Klimadaten wurden als Abweichungen zum Mittel der Klimanormalperiode 1961-1990 aufbereitet und analog zu den Jahringdaten einer z-Transformation unterzogen. Die Schwellenwerte für die grundsätzliche Einstufung als positive bzw. negative Anomalie liegen wie bei den Jahringdaten bei $\pm 1\sigma$. Die Klasseneinteilungen in ‚warm/kalt‘, ‚sehr warm/kalt‘ und ‚extrem heiß/kalt‘ werden unter Berücksichtigung von der Stärke der Streuung um den Mittelwert innerhalb des verwendeten Klimadatensatzes festgelegt und sind den Methodenbeschreibungen der Kapitel 3.1 und 3.2 zu entnehmen.

2. Material und Methoden

2.4.2 Jahr-zu-Jahr- und interdekadische Variationen

Zur Betonung der interannuellen und interdekadischen Frequenzen wurden 32-, 80- und 150-jährige kubische Splinefunktionen mit 50% Varianzreduktion (Cook & Peters, 1981) durch Verwendung des Programmes Arstan (Cook, 1985) berechnet. Diese haben gegenüber gleitenden Mitteln den entscheidenden Vorteil die Serien in den Randbereichen nicht zu verkürzen. Die Splinefunktionen wurden individuell für jede Baummittelkurve berechnet. Anschließend erfolgte eine Mittelung mit dem im Vergleich zum arithmetischen Mittelwert weniger gegenüber Ausreißern empfindlichen ‚biweight robust mean‘ (Cook et al., 1992). Während die Jahr-zu-Jahr-Variationen der Jahrringserien mittels Division der nicht indexierten Jahrringdaten durch die 32-jährigen Splines erzeugt wurden, sind die interdekadischen Fluktuationen in den Splines selbst enthalten (Abb. 6).

Für die klimatischen Serien erfolgte die Separation der interdekadischen Wellenlängen analog zur bereits für die Jahrringchronologien beschriebenen Vorgehensweise. Das für die Indexierung von in der Einheit [1/100 mm] eingegebenen Jahrringdaten konzipierte Programm Arstan (Cook, 1985) dividiert die eingegebenen Serien grundsätzlich durch 100 um Werte in der Einheit [mm] zu erzeugen. Deshalb wurden die Splinekurven der Klimadaten zur Erhaltung der Ursprungseinheit anschließend manuell mit 100 multipliziert. Die in den Klimadaten enthaltenen Jahr-zu-Jahr-Variationen werden wie in Kapitel 2.4.1 beschrieben als Abweichungen zum Mittel der Klimanormalperiode 1961-1990 dargestellt.

2.5 Gruppierung der Jahrringserien

Die Eignung unterschiedlicher Verfahren zur Klassifikation dendroökologischer Daten, wie der Hauptkomponentenanalyse und der hierarchischen Clusteranalyse, wurde von Friedrichs et al., (2009a) untersucht und detailliert beschrieben. Auf dieser Grundlage wurde für die Bestimmung von Standortgruppen mit spezifischen Wuchsmustern in dieser Arbeit die hierarchische Clusteranalyse unter Verwendung der Ward Methode ausgewählt, da diese nach Friedrichs et al. (2009a) zu einer klaren Trennung der Cluster führt (Kapitel 3.2 und 3.3). Bei der hierarchischen Clusteranalyse werden Schritt für Schritt alle in die Clusteranalyse eingebrachten Standorte gruppiert, so dass aus vielen kleinen Clustern immer weniger und größere Cluster entstehen, bis schließlich nur noch eine alle Standorte umfassende Gruppe übrig bleibt (Jongman et al., 1987). Für die Gruppierung der Standorte auf Basis der Extremwerte (Kapitel 3.2) wurde die quadrierte Euklidische Distanz als Abstandsmaß

2. Material und Methoden

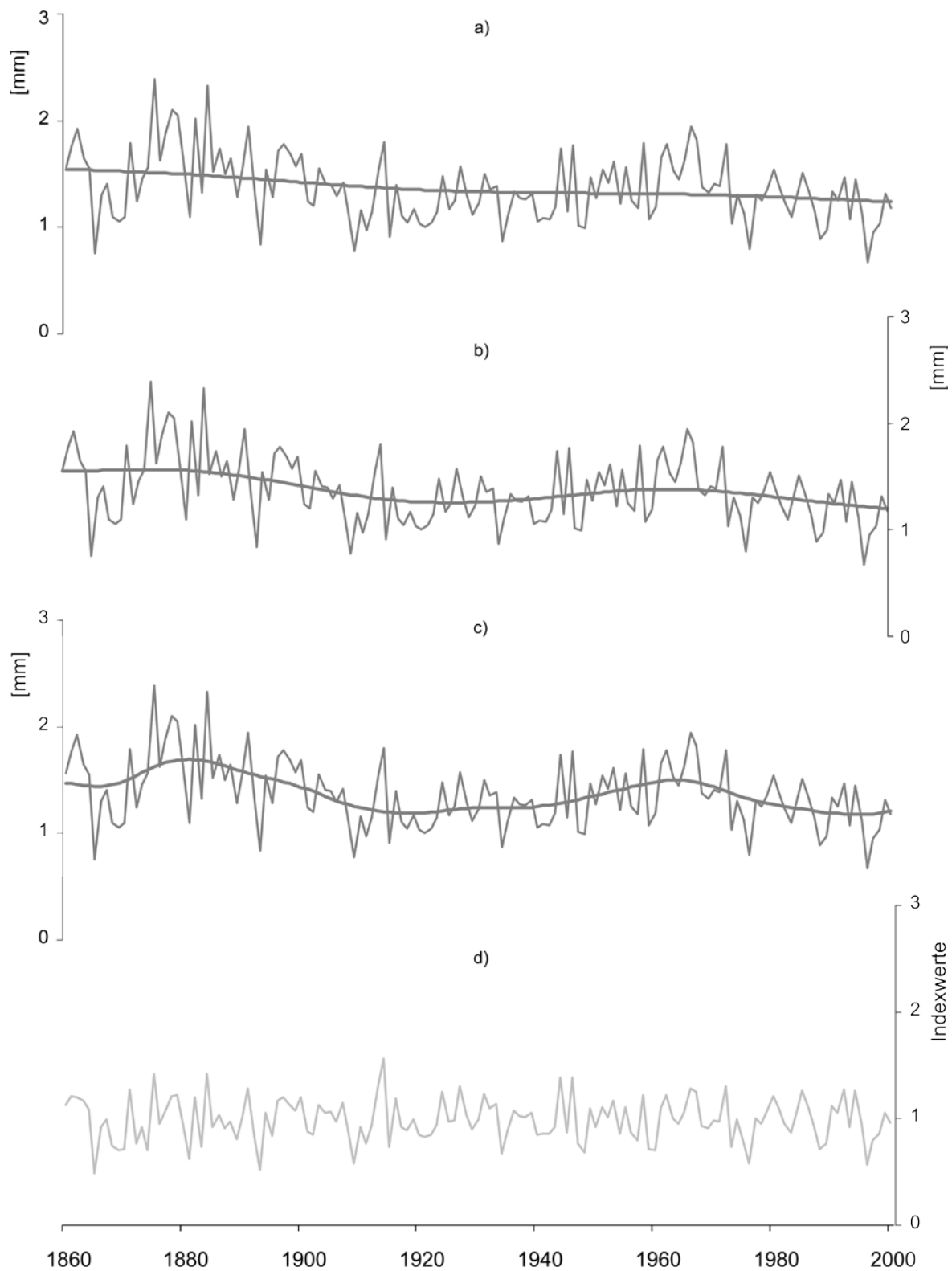


Abb. 6: Darstellung einer unbehandelten Eichenchronologie mit den zugehörigen Splinefunktionen (a) 150-jährig (b) 80-jährig und (c) 32-jährig, sowie der aus den Rohdaten durch Indexierung mit dem 32-jährigen Spline erzeugten Indexkurve (d).

2. Material und Methoden

gewählt (Leyer & Wesche, 2007). In Anlehnung an die Arbeiten von Koprowski & Zielski (2006) erfolgte die Klassifizierung der Standorte auf Basis der Jahr-zu-Jahr-Variationen (Kapitel 3.3) unter Verwendung des Korrelationskoeffizienten als Ähnlichkeitsmaß um somit die mittleren Zusammenhänge der Standortchronologien stärker berücksichtigen zu können.

2.6 Art- und cluster-spezifische Mittelung der Jahrringserien und der lokalen Klimazeitreihen
Während in Kapitel 3.1 die Jahrringserien nach Baumart und Region zu artspezifischen Regionalchronologien zusammengefasst wurden, erfolgte in Kapitel 3.2 und 3.3 eine Mittelung der indexierten Standortchronologien für die mittels Clusteranalysen nach Wachstumsmustern klassifizierten Gruppen zu cluster-spezifischen Reihen. Dies erfolgte sowohl für die Cropperserien (Kapitel 3.2) als auch für die Zeitreihen der Jahr-zu-Jahr-Variationen (Kapitel 3.3). In Kapitel 3.3 wurden zusätzlich die lokalen Klimaserien der zu einer Gruppe gehörenden Standorte zu clusterspezifischen Reihen gemittelt.

Während bei den Jahrringdaten die Indexierung vor der Mittelung vorgenommen wurde, erfolgte bei den Klimadaten in Anlehnung an Neuwirth (2010) erst die Mittelung und dann die Indexierung.

2.7 Analyse der Klima/Wachstumsbeziehungen

Die Analyse der Klima/Wachstumsbeziehungen erfolgte über einen Gesamtuntersuchungszeitraum von 1901-2002. Die im Rahmen der einzelnen Untersuchungen verwendeten Zeitfenster sind den Kapiteln 3.1 bis 3.3 zu entnehmen.

Es wurden Variationen unterschiedlicher Wellenlängen untersucht. Dabei wurden Extremjahre, sowie Jahr-zu-Jahr- und interdekadische Wuchsvariationen berücksichtigt. Diese wurden bezüglich ihres Zusammenhangs zu den in den Klimaserien enthaltenen Fluktuationen der entsprechenden Wellenlängen untersucht. Darüber hinaus erfolgte die Prüfung der zeitlichen Stabilität der gefundenen Klima/Wachstumsbeziehungen (Kapitel 3.3).

Für die Interpretation der Extremjahre wurde eine Weiserjahranalyse durchgeführt (Kapitel 3.1, 3.2). Diese basiert, in Erweiterung zu der bei Schweingruber et al. (1990) beschriebenen visuellen Bestimmung, auf gemessenen Jahrringbreiten und rechnerisch bestimmten Extremwerten. Diese wurden mit Temperatur- und Niederschlagsanomalien in Bezug auf das Mittel der Klimanormalperiode 1961-1990 verglichen.

Im Rahmen der Zeitreihenanalyse wurde die Produkt-Moment Korrelation zwischen den Jahr-zu-Jahr-Variationen der Bäume und den klimatischen Fluktuationen bezogen auf das Mittel der Klimanormalperiode 1961-1990 berechnet (Kapitel 3.1, 3.3). Die Analysen erfolgten unter Verwendung der klimatischen Serien einzelner Monate des Vor- und des Wuchsjahres

2. Material und Methoden

(Kapitel 3.1, 3.2, 3.3), sowie der für die Perioden ‚Jahr‘, ‚Frühling‘ (März-Mai), ‚Sommer‘ (Juni-August) und ‚Vegetationsperiode‘ (April-September) berechneten, klimatischen Zeitreihen (Kapitel 3.3).

Die Ähnlichkeit der durch Splinefunktionen dargestellten interdekadischen Klima- und Wuchsvariationen wurde, aufgrund der darin enthaltenen starken zeitlichen Autokorrelation, ausschließlich visuell geprüft (Kapitel 3.3). Die Analyse der zeitlichen Stabilität der detektierten Klima/Wachstumsbeziehungen erfolgte durch den Vergleich der korrelativen Zusammenhänge innerhalb von zwei aufeinander folgenden, 30-jährigen Zeitfenstern (Kapitel 3.3).

Die Analysen der Klima/Wachstumsbeziehungen wurden im ersten Schritt wie üblich artspezifisch für zwei Regionen durchgeführt (Kapitel 3.1). Nachfolgend wurden wachstumsorientierte Ansätze verwendet, bei denen die klimatisch gesteuerten Wuchsreaktionen für Gruppen mit ähnlichen Wachstumsmustern untersucht werden (Kapitel 3.2, 3.3).

3. Untersuchungen

3. Untersuchungen

3. 1 Klimasensitivität der Douglasie in Eifel und Kellerwald

Allgemeine Forst- und Jagdzeitung (2012) 183 (1/2): 23-33.

3. Untersuchungen

3.1.1 Einführende Worte

In diesem Kapitel werden die Reaktionen heimischer Baumarten und einer nicht-heimischen Baumart auf klimatische Ereignisse vergleichend analysiert, mit dem Ziel, Erkenntnisse über ihre Fähigkeiten und Chancen mit sich ändernden Klimabedingungen zurechtzukommen zu gewinnen. Als heimische Baumarten fließen Buchen, Traubeneichen, Fichten und Kiefern in die Analysen ein. Die Idee, die für ihre starke Wuchsleistung bekannte Douglasie als nicht-heimische Baumart auszuwählen, entstand während der Vorbereitung auf die Tagung ‘Opportunities and risks for Douglas-fir in a changing climate‘ in Freiburg im Jahr 2010.

Die Analysen werden für eine niederschlagsreichere und eine niederschlagsärmere Teilregion des Untersuchungsgebietes (Kapitel 2.1), die Eifel und den Kellerwald, durchgeführt und bedienen sich somit eines Teildatensatzes des gesamten dendroökologischen Netzwerkes (Kapitel 2.1). Im Rahmen der Analysen der Klima/Wachstumsbeziehungen werden die Klimaparameter Temperatur und Niederschlag, die in Form regionaler Serien in die Untersuchungen einfließen, berücksichtigt. Die Untersuchungen erfolgen artspezifisch und beinhalten sowohl die Analyse der Wuchsanomalien der Baumarten in Folge auf klimatische Extremereignisse als auch des mittleren, korrelativen Zusammenhanges zwischen Klima und Baumwachstum.

Die explizite Beschreibung der verwendeten Datensätze und Methoden finden sich im Kapitel Material und Methoden der Veröffentlichung.

Die Studie wurde in der Allgemeinen Forst- und Jagdzeitung im Jahr 2012 in deutscher Sprache unter dem Titel: ‚Klimasensitivität der Douglasie in Eifel und Kellerwald‘ publiziert. Die Verfasser sind Stefanie Fischer und Dr. Burkhard Neuwirth.

Klimasensitivität der Douglasie in Eifel und Kellerwald

(Mit 3 Abbildungen und 1 Tabelle)

STEFANIE FISCHER^{*)} und Dr. BURKHARD NEUWIRTH

(Angenommen Januar 2012)

SCHLAGWÖRTER – KEY WORDS

Nicht heimische Baumarten; Kiefer; Fichte; Buche; Eiche; Klimawandel; Dendroökologie; Wuchspotenzial; Nationalparke; Westdeutsches Mittelgebirge.

Non-native tree species; Scots pine; spruce; beech; oak; Climate change; Dendroecology; Growth Potential; Climate Sensitivity; national parks, West German low mountain range.

1. EINFÜHRUNG

Die in Nordamerika beheimatete Douglasie wurde ab 1827 in Europa eingeführt (BOOTH, 1903). Erste Douglasienpflanzen erreichten Deutschland ab 1831 (KNOERZER, 1998). Ihre in der Literatur vielfach beschriebene hohe Wuchsleistung in Kombination mit ihrer guten Holzqualität macht die Douglasie zu einer der führenden Wertholz produzierenden Baumarten der Welt (HERMANN und LAVENDER, 1999; SPELLMANN, 2004).

Für Mitteleuropa wird bis zum Ende des 21. Jahrhunderts im Zuge des globalen Klimawandels ein Temperaturanstieg von 2,3 bis 5,3°C bei einer gleichzeitigen Reduktion der sommerlichen Niederschläge angenommen (CHRISTENSEN et al., 2007). Die damit verbundene langfristige Entwicklung zu trockeneren Bedingungen in den Sommermonaten (SCHÄR et al., 2004) kann zu einer verminderten Wuchsleistung und sogar zu einer erhöhten Sterblichkeitsrate von Baumarten führen (THOMAS et al., 2002). Im Rahmen forstlicher Planung sollte die Vitalität der Arten, unter der hier in Anlehnung an ROLOFF (2001) die Wuchspotenz und Überlebensfähigkeit verstanden wird, im Hinblick auf die beschriebenen klimatischen Veränderungen analysiert und berücksichtigt werden. Da Vitalität jedoch nicht direkt messbar ist, muss sie aus Indikatoren wie Kronentransparenz oder Baumwachstum abgeleitet werden (DOBBERTIN, 2005). Das durch die Jahringbreite bestimmte Radialwachstum des Stammes ist ein solcher direkt messbarer Parameter.

Die Dendroökologie ermöglicht eine retrospektive und jahrgenaue Analyse des radialen Baumwachstums und der das Wachstum beeinflussenden Faktoren (SCHWEINGRUBER, 1996; NEUWIRTH et al., 2004). Durch Kombination von Extremjahrenanalysen und kontinuierlichen Zeitreihenanalysen konnte NEUWIRTH (2010) kühl-feuchte Verhältnisse als optimale Witterungsbedingungen für das Radialwachstum der heimischen Baumarten ermitteln. Die aus dem Jahringmuster ableitbare Empfind-

lichkeit gegenüber Umweltfaktoren wird im Folgenden als Sensitivität bezeichnet (SCHWEINGRUBER, 1983).

In dieser Studie wird die Sensitivität der Douglasie gegenüber klimatischen Schwankungen im Vergleich zu heimischen Baumarten mittels Einzeljahr- und Zeitreihenanalysen der radialen Zuwachsleistungen untersucht. Die Einzeljahranalyse basiert darauf, dass sich kurzfristige Veränderungen der Umweltsignale in Weiserjahren widerspiegeln (SCHWEINGRUBER et al., 1990). Jede Baumart zeigt dabei spezifische Signale auf Grund unterschiedlicher Empfindlichkeiten gegenüber klimatischen Anomalien. Da Bäume optimal an die mittleren ökologischen Bedingungen ihres Standortes adaptiert sind (ELLENBERG, 1996; SCHWEINGRUBER und NOGLER, 2003), spiegeln positive Weiserjahre optimale Wuchsbedingungen am Standort wider (NEUWIRTH et al., 2007b). Jede Abweichung davon bedeutet Stress und äußert sich in Form von Wuchsreduktionen. Negative Weiserjahre sind somit Zeiger für die Sensitivität gegenüber Umwelteinflüssen und können Hinweise auf die Stressempfindlichkeit der Baumarten liefern. Im Rahmen der Zeitreihenanalyse wird die Sensitivität der Baumarten auf Temperatur- und Niederschlagsserien für einzelne Monate mittels Korrelationsanalysen untersucht.

2. MATERIAL UND METHODEN

2.1 Untersuchungsgebiet

Im westdeutschen Mittelgebirgsraum werden Baumbestände aus den Nationalparks Eifel und Kellerwald/Edersee – im Folgenden kurz als Eifel und Kellerwald bezeichnet – vergleichend analysiert. Die klimatischen Bedingungen Mitteleuropas sind als überwiegend semihumid, humid und kühltemperiert einzustufen (LAUER und FRANKENBERG, 1988). Das Klima der beiden Regionen wird durch nordwestliche Anströmrichtungen bestimmt (HURREL et al., 2003), was in der am westlichen Rand des Mittelgebirges gelegenen Eifel zu höheren jährlichen Niederschlagssummen als im 200 km östlich gelegenen Kellerwald führt (Abb. 1). Dies spiegelt sich in der mittleren jährlichen Niederschlagssumme für die Klimanormalperiode 1961–1990 wider, die in der Eifel etwa 1000 mm, im Kellerwald hingegen 720 mm beträgt. Außerdem ist das Klima im Kellerwald von einer um knapp 1 K größeren jährlichen Temperaturamplitude geprägt und somit gegenüber der subozeanischen Eifel als subkontinental einzustufen (GLASER und SCHÖNBEIN, 2007).

2.2 Jahringdaten und ihre Aufbereitung

Neben den Douglasien (*Pseudotsuga menziesii*) wurden in Eifel und Kellerwald auch die heimischen Baum-

^{*)} Korrespondierende Autorin: STEFANIE FISCHER, Meckenheimer Allee 166, D-53115 Bonn. Tel.: +49-(0)228/73-2954; Fax: +49-(0)228/73-7506. E-Mail: fischer@giub.uni-bonn.de.

3. Untersuchungen

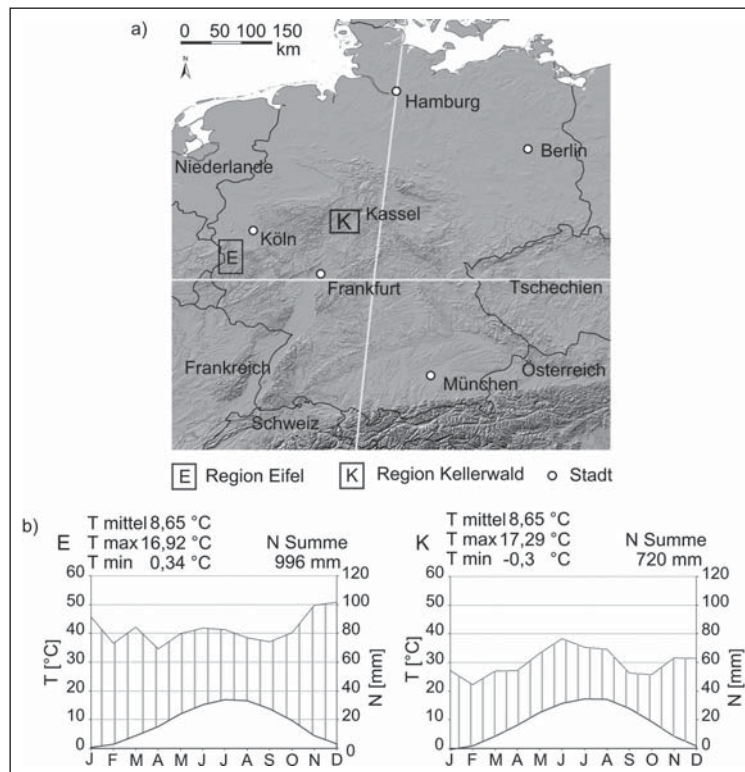


Abb. 1

Geographische Lage (a) und Klimadiagramme (b) der Untersuchungsregionen Eifel und Kellerwald.
 Geographical position (a) and climate diagrams (b) of the investigated regions Eifel and Kellerwald.

arten Rotbuche (*Fagus sylvatica*), Traubeneiche (*Quercus petraea*), Fichte (*Picea abies*) und Kiefer (*Pinus sylvestris*) aus dem Datennetzwerk des Bonner Dendrolabors analysiert (FRIEDRICHS et al., 2009a, b; NEUWIRTH, 2011). In die Untersuchung fließen insgesamt 389 Bäume von 28 Standorten ein, die in Höhen zwischen 280 und 560 m ü. NN liegen. Das mittlere Baumalter der Standorte liegt zwischen 68 und 213 Jahren (Tab. 1). Beide Regionen sind aus geologischer Sicht Teil des Rheinischen Schiefergebirges. Die Standorte der Eifel sind durch Tonschiefer und Sandsteine des Devons geprägt, auf denen sich überwiegend Braun- und Parabraunerden entwickelt haben. Im Kellerwald liegen die Standorte ebenfalls auf Gesteinen des Devons, sowie des Silurs und Unterkarbons. Es finden sich Grauwacken, Sandstein, Tonschiefer und Kieselschiefer auf denen sich auf mäßig geneigten Flächen Braunerden, in den steilsten Lagen hingegen Ranker entwickelt haben. Die Bodenprofile sind in der Regel nur geringmächtig.

Jede Beprobungsfläche wurde so gewählt, dass sie nach topographischen und ökologischen Aspekten als möglichst homogen einzustufen war. Pro Baumart der Fläche wurden von durchschnittlich 14 dominanten Bäumen je zwei 5 mm starke Bohrkerne genommen.

Die Jahrringbreiten wurden mit LINTAB V Messtischen und der Software TSAP-Win Scientific (RINN, 2003) in 1/100 mm Auflösung gemessen und anschließend mit COFECHA (HOLMES, 1983) synchronisiert. Aus den so gewonnenen zwei Jahrringserien pro Baum wurden durch arithmetische Mittelung der jährlichen Zuwächse Baummittelkurven berechnet.

Eine Prüfung der Signalstärken der Jahrringserien erfolgte durch den Parameter NET (ESPER et al., 2001). NET gibt an, wie stark die Chronologie, die der jährweisen Mittelung aller Baummittelkurven eines Standortes entspricht, die in den Einzelserien enthaltenen Signale abbildet. NET errechnet sich als Summe der Varianz und der Gegenläufigkeit der Einzelserien. Starke Signale spiegeln sich in kleinen Werten wider, wobei Null die Gleichheit zweier Serien repräsentiert. Aufgrund empirischer Berechnungen und Vergleiche mit Korrelationsberechnungen empfehlen ESPER et al. (2001) einen NET-Wert von 0,8 als Schwellenwert für eine ausreichende Signalstärke. Alle Standorte mit Ausnahme eines Fichtenstandortes in der Eifel weisen Werte unterhalb des empfohlenen Schwellenwertes von 0,8 auf (Tab. 1). Dieser wurde jedoch aufgrund der nur geringen Abweichung vom empfohlenen Schwellenwert, sowie der ver-

3. Untersuchungen

gleichsweise niedrigen Anzahl an Fichtenstandorten ebenfalls analysiert.

2.3 Klimadaten und ihre Aufbereitung

Als Grundlage für die Temperatur- und Niederschlagsreihen dienen die von der Climate Research Unit in Norwich erstellten Grid-Datensätze (0,5°x0,5°) von 1901–2002 (MITCHELL und JONES, 2005). Für Eifel und Kellerwald wurden die Daten der vier nächstgelegenen Grid-Punkte gemittelt und regionale Temperatur- und

Niederschlagszeitreihen für die 18 Monate vom Mai im Jahr vor der Jahrringbildung bis zum Oktober des Wuchsjahres erstellt. Sie wurden abschließend als Abweichungen zu den jeweiligen Mittelwerten der Klimanormalperiode 1961–1990 aufbereitet.

2.4 Analysemethoden

Die Untersuchung der Klimasensitivitäten erfolgt zweistufig durch Einzeljahr- und Zeitreihenanalyse. Bei der Einzeljahranalyse wird eine Wuchsanomalie mit

Tab. 1

Geographische Lage und Attribute der untersuchten Standorte: Reg. = Region; n = Anzahl der analysierten Bäume pro Standort; MBA = Mittleres Baumalter; NET = Signalstärkeparameter; Exp. = Exposition; Neig. = Neigung; Dougl. = Douglasie; M = Mischbestand; R = Reinbestand.
Geographical position and site specific attributes: Reg. = Region; n = number of analysed trees; MBA = Mean Tree Age; NET = Parameter for Signal Strength; Exp. = Exposition; Grad. = Gradient; Dougl. = Douglas-fir; M = Mixed; R = Pure.

Reg. Reg.	Baumart Tree species	Standort Site	n	MBA MTA	NET	Nördl. Breite Latitude	Östl. Länge Longitude	Höhe ü. NN Elev. a.s.l. [m]	Exp. Exp. [°]	Neig. Grad. [°]	Bestandesstruktur Stand Structure
Eifel	Dougl.	1	17	113	0,66	50,6097	6,4639	525	135	25	M
	Kiefer	2	15	213	0,73	50,6058	6,4919	490	210	20	M
	Fichte	3	22	68	0,70	50,1236	6,8731	470	255	8	M
		4	15	137	0,81	50,6056	6,4917	470	60	25	M
	Buche	5	16	150	0,66	50,6653	6,3250	320	340	15	M
		6	17	164	0,58	50,6086	6,4569	530	315	15	R
		7	14	140	0,47	50,6061	6,4900	470	60	10	R
		8	13	143	0,60	50,6806	6,2794	440	45	1	M
		9	14	187	0,52	50,5711	6,3597	490	150	15	R
		10	15	169	0,56	50,5717	6,3611	480	150	10	R
	Eiche	11	10	160	0,63	50,6653	6,3250	320	340	15	M
		12	13	142	0,63	50,4400	6,5656	560	90	5	M
		13	17	184	0,65	50,6806	6,2794	460	45	0	M
		14	14	190	0,48	50,6244	6,3992	400	300	40	R
		15	13	162	0,49	50,5708	6,3603	500	150	15	R
Kellerwald	Dougl.	16	9	100	0,53	51,1653	8,9086	350	210	10	M
	Kiefer	17	13	143	0,56	51,1569	9,0844	360	180	20	R
	Fichte	18	12	126	0,58	51,1553	8,9872	340	315	30	R
	Buche	19	20	176	0,75	51,1694	8,9619	340	360	45	M
		20	15	165	0,64	51,1703	8,9669	310	150	30	M
		21	13	201	0,70	51,1936	9,0117	280	180	35	R
		22	16	206	0,48	51,1672	8,9583	420	345	3	R
	Eiche	23	16	165	0,55	51,1708	8,9681	290	135	30	M
		24	13	164	0,50	51,1564	9,0842	350	180	30	R
		25	6	144	0,63	51,1572	9,0842	365	180	20	R
26		7	154	0,43	51,1581	9,0842	380	180	25	R	
27		12	125	0,43	51,1561	9,0761	400	215	10	R	
28		10	154	0,46	51,1556	9,0769	390	150	20	M	

3. Untersuchungen

Umwelteinflüssen verglichen, wobei eine klimatologische Interpretation angestrebt wird. Im Rahmen der Zeitreihenanalyse soll für das betrachtete Zeitfenster ein einheitliches klimatologisches Signal aus den Jahrringdaten abgeleitet werden.

Die Einzeljahanalyse basiert auf der klimatologischen Interpretation von zeitgleich in vielen Bäumen eines Kollektivs auftretenden Wuchsexrema. Deren Bestimmung erfolgt anhand des von CROPPER (1979) entwickelten Verfahrens, in dem interannuelle Zuwachsanomalien in Bezug zu den jeweils benachbarten Jahrringen aus den Jahrringbreitenserien ermittelt werden. Dazu werden die Jahrringserien mittels Division durch ihr jeweiliges 13-jähriges gleitendes Mittel in standardisierte Werte umgewandelt. Anschließend werden diese Indexreihen durch eine z-Transformation normalisiert. Von den resultierenden Cropperwerten mit dem Mittelwert $\mu=0$ und der Standardabweichung $\sigma=1$ werden

Werte größer +1 bzw. kleiner -1 als positive bzw. negative Weiserjahre bezeichnet (NEUWIRTH et al., 2007b) und folgendermaßen klassifiziert: Cropperwerte, die mehr als $\pm 1\sigma$ vom Mittel abweichen, werden als schwach positiv/negativ bezeichnet. Abweichungen von mehr als $\pm 1,28\sigma$ werden als stark positiv/negativ und solche von mehr als $\pm 1,645\sigma$ als extrem positiv/negativ definiert. Nach Quantifizierung der Weiserjahre wurden standortspezifische, artspezifische und gemeinsame Weiserjahre bestimmt. Dabei sind unter gemeinsamen Weiserjahren diejenigen zu verstehen, die bei allen Baumarten in Eifel und Kellerwald auftreten. Solche, die bei nur einer Baumart in beiden Regionen auftreten, werden als ‚artspezifisch‘ bezeichnet. Die Klimadaten wurden in der Einzeljahanalyse analog zu den Jahrringdaten mit Schwellenwerten von $\pm 1\sigma$, $\pm 2\sigma$ und $\pm 3\sigma$ klassifiziert und als ‚warm/kalt‘, ‚sehr warm/kalt‘ bzw. ‚extrem heiß/kalt‘ bezeichnet. Für die Niederschlagsdaten gilt

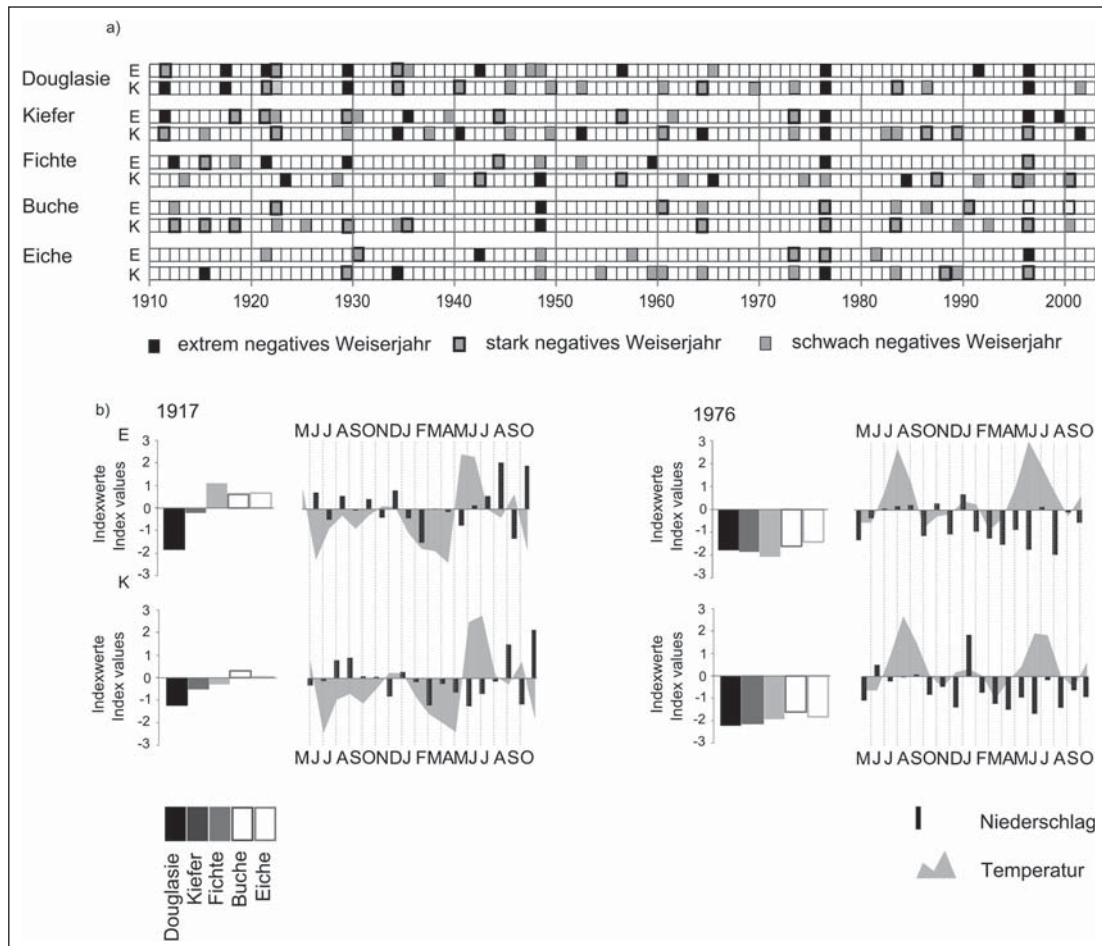


Abb. 2

- Weiserjahre der untersuchten Baumarten in Eifel (E) und Kellerwald (K):
 a) Schwach, stark und extrem negative Weiserjahre über den Zeitraum 1910–2002;
 b) Ausgewählte Weiserjahre 1917 und 1976 jeweils mit den zugehörigen klimatischen Anomalien.

- Pointer years of the analysed tree species in Eifel (E) and Kellerwald (K):
 a) weak, strong, and extreme negative pointer years for the 1910–2002 period;
 b) selected pointer years 1917 and 1976 with corresponding climatic anomalies.

3. Untersuchungen

eine analoge Klassifizierung mit Einstufungen in unterschiedliche Feuchte- bzw. Trockenheitsklassen.

Im Rahmen der Zeitreihenanalyse wurden für die Eliminierung niederfrequenter Einflüsse wie dem Alterstrend (BRÄKER, 1981) und zur Betonung interannueller Signale an den Baummittelkurven Indexierungen mit einer Filterfunktion (32-year cubic smoothing spline) unter Verwendung des Programms Arstan (COOK, 1985) durchgeführt. Durch Division jeder Jahrringserie eines Standortes durch ihre zugehörige Filterkurve entstehen dimensionslose Indexserien, deren Mittelung über die Standorte zur Standortchronologie führt. Werden diese nachfolgend pro Art und Region gemittelt, entstehen artspezifische Regionalchronologien. Im Rahmen der Zeitreihenanalyse wurden Korrelationsberechnungen zwischen Klima- und Jahrringserien durchgeführt. Die monatlichen Zeitreihen der Temperaturmittel und Niederschlagssummen wurden zu den artspezifischen Regionalchronologien durch Korrelationskoeffizienten nach Pearson in Beziehung gesetzt.

Die Analysen erfolgen für das Zeitfenster von 1910–2002, das von Klima- und Jahrringdaten, auf Basis der artspezifischen Regionalchronologien, abgedeckt wird.

3. RESULTATE

3.1 Einzeljahranalyse

In insgesamt 55 Jahren der 93-jährigen Untersuchungsperiode sind negative Weiserjahre zu finden (Abb. 2a). Im Kellerwald weisen dabei alle Baumarten im Durchschnitt 5 negative Weiserjahre mehr auf als in der Eifel. Die Douglasie hat im Kellerwald bezogen auf die Eifel 19%, die Fichte 50% und die Eiche 56% mehr Weiserjahre. Dabei zeigt die Douglasie mit 16 Weiserjahren in der Eifel und 19 im Kellerwald zusammen mit der Kiefer (E: 15/K: 20) die meisten negativen Weiserjahre (Abb. 2a). Es folgen Fichte (E: 12/K: 18), Buche (E: 12/K: 17) und Eiche (E: 9/K: 14). Zeitlich synchrone Zuwachseinbrüche über alle Baumarten und in beiden Regionen sind jedoch nur selten zu finden und kommen nur in den Jahren 1976 und 1996 vor. In den Jahren 1929, 1948, 1964 und 1983 zeigen jeweils nur 4 Baumarten ein Weiserjahr, zum Teil wie in 1983 auch nur in einer der Regionen. Alle anderen Jahre sind entweder nur als standortspezifische oder artspezifische Weiserjahre ausgeprägt. So zeigen 1917 nur die Douglasien in Eifel und Kellerwald einen starken bis extremen Zuwachsrückgang, während für alle anderen Arten nicht einmal ein schwaches negatives Weiserjahr zu verzeichnen ist. Die heimischen Arten zeigen hingegen keine artspezifischen Weiserjahre wie die Douglasie.

Die klimatologische Interpretation der Weiserjahre wird exemplarisch an den Jahren 1976 und 1917 durchgeführt. 1976 reagieren alle Baumarten mit den im Mittel negativsten Werten. Mit Ausnahme der Fichte im Kellerwald zeigen alle Spezies stark bis extrem negative Weiserjahre. 1976 ist durch einen warmen, im Kellerwald sogar extrem warmen ($>3\sigma$), sowie trockenen Sommer charakterisiert. Darüber hinaus ist der Beginn der Vegetationsperiode in beiden Regionen trocken und der Sommer des Vorjahres überdurchschnittlich warm (Abb.

2b). 1917 weist nur die Douglasie Zuwachseinbrüche auf. Von den 18 Bäumen, deren Jahrringserien vor 1917 beginnen, zeigen 16 eine Wuchsreduktion in diesem Jahr. Das Jahr ist in beiden Regionen von einem kalten und trockenen Februar sowie einem sehr kalten Frühjahr geprägt. Mai und Juni sind als sehr warm einzustufen, in der Eifel bei durchschnittlichen, im Kellerwald bei unterdurchschnittlichen Niederschlägen. Das Vorjahr ist in beiden Regionen durch einen sehr trockenen Juni charakterisiert.

Während 1976 folglich als Hitze- und Trockenjahr zu bewerten ist, in dem alle Baumarten negative Reaktionen zeigen, lässt sich für 1917 hinsichtlich der negativen Reaktion der Douglasie an dieser Stelle keine eindeutige Charakterisierung vornehmen. Für den Vergleich und die Beurteilung der klimatischen Ursachen im Jahr 1917 lässt sich auch kein anderes Douglasien typisches Weiserjahr auswerten, da im 20. Jahrhundert kein weiteres vorhanden ist. Es gibt allerdings auch keine Jahre, die die für 1917 beschriebenen klimatischen Eigenschaften – ein kalter Februar, kaltes Früh- und Vorjahr und ein sehr warmer Spätfrühling – aufweisen. Es kommen beispielsweise immer nur einzelne Monate im Frühjahr vor, die unterdurchschnittlich kalt sind. Außerdem sind auch niemals gleichzeitig zu einem kalten Frühjahr ein kaltes Vorjahr und ein sehr warmer Spätfrühling zu finden. 1986 weist verglichen mit 1917 die ähnlichsten klimatischen Eigenschaften auf. Es wird sowohl durch einen sehr kalten Februar und einen kalten April, sowie durch einen kalten Juni des Vorjahres geprägt. Die Douglasie zeigt 1986 im Kellerwald einen Cropperwert von <-1 , in der Eifel hingegen, wo die klimatischen Bedingungen im Februar und im Vorjahr etwas schwächer ausgeprägt sind, liegt dieser Wert bei $-0,913$. Diese milderen Bedingungen zu Beginn des Jahres in der Eifel könnten eine Ursache für die im Vergleich zum Kellerwald abgeschwächtere negative Reaktion der Douglasie sein und somit einen Hinweis darauf liefern, dass die Kombination eines kalten Vorjahres mit einem kalten Februar und Frühjahr das bestimmende Merkmal für 1917 ist.

3.2 Zeitreihenanalyse

Alle Baumarten zeigen signifikante Korrelationen zu Temperatur und Niederschlag, insbesondere zu Beginn der Vegetationsperiode und im Sommer (Abb. 3).

Für die heimischen Baumarten können generell negative Korrelationen zur Sommertemperatur des Vor- und des Wuchsjahres festgestellt werden. Diese Korrelationen sind im Wuchsjahr schwächer ausgeprägt (Abb. 3a). Zum Niederschlag finden sich beinahe durchgängig positive Zusammenhänge, mit Schwerpunkten im Herbst des Vorjahres und im Frühsommer des Wuchsjahres (Abb. 3b). Auffällig sind die überwiegend gegenläufigen Reaktionen auf Temperatur und Niederschlag in den Sommermonaten, die als Trockenstresssignale interpretiert werden können. Im Winter hingegen verlaufen die Reaktionen gleichsinnig positiv. In der feuchteren und ozeanischeren Eifel sind die Korrelationen zu beiden Klimaelementen meist schwächer ausgeprägt als im Kellerwald.

3. Untersuchungen

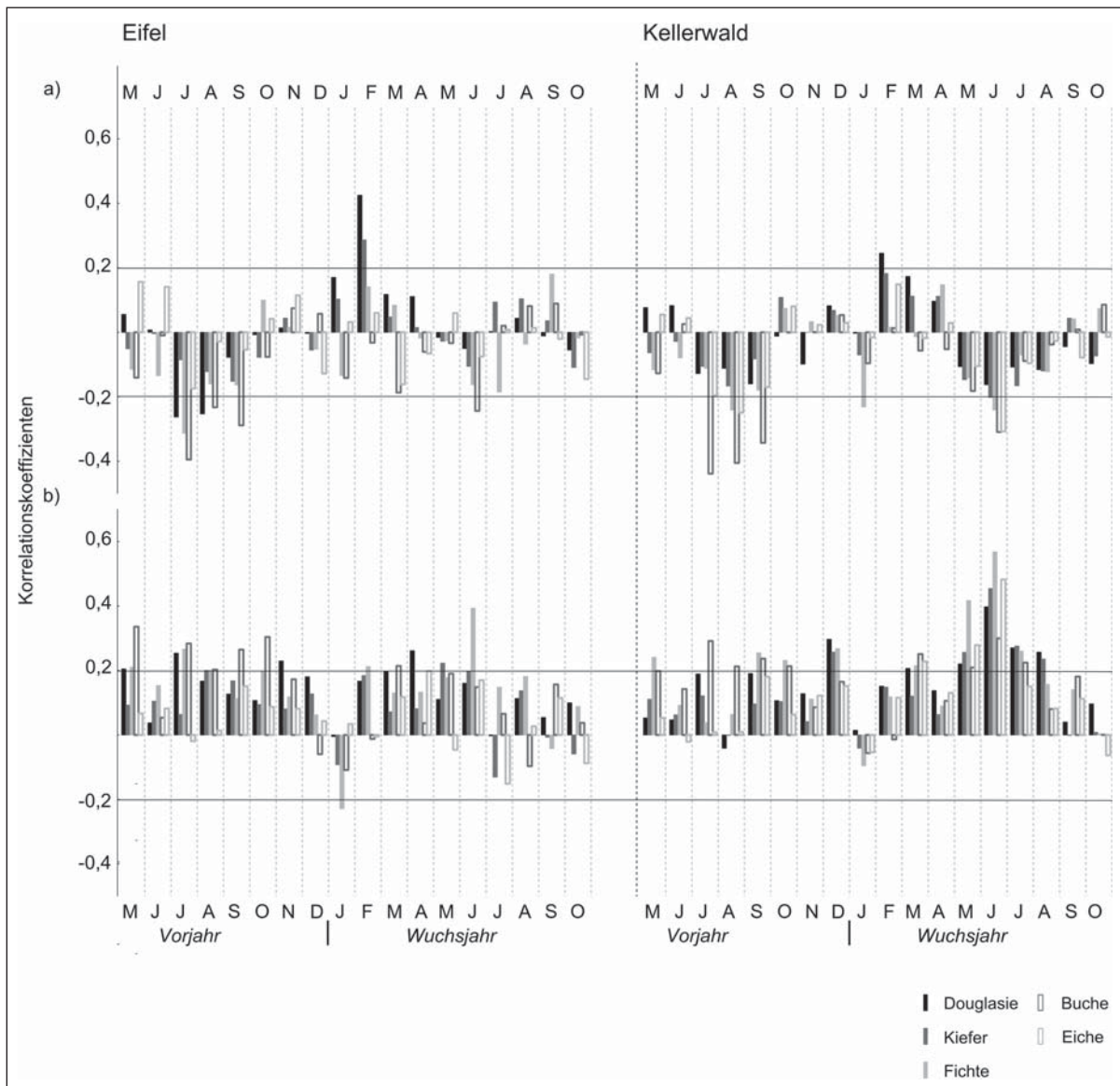


Abb. 3

Pearson's Korrelationskoeffizienten von a) Temperatur und
 b) Niederschlag zu den artspezifischen Jahrringchronologien für die Monate des Wuchs- und des Vorjahres.
 Durchgezogene Linien zeigen die kritischen Werte $t_{krit} = \pm 0,2029$ für das Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ an.
 Pearson's correlation coefficients for correlations between a) temperature and
 b) precipitation and the species specific tree-ring chronologies for months of the previous year and the year of growth.
 Solid lines denote critical values $t_{krit} = \pm 0,2029$ for the level of significance with $\alpha = 0.05$.

Während die Douglasien ähnliche Reaktionen auf Niederschlag wie die heimischen Baumarten zeigen, weisen sie andere Temperatursignale auf. Die Korrelationen zu den Sommertemperaturen des Vorjahres sind niedriger und bleiben im Kellerwald deutlich unter dem Signifikanzniveau. Zu jenen des Wuchsjahres sind keine signifikanten Zusammenhänge erkennbar. Demgegenüber zeigen die Douglasien eine hoch positive Korrelation zur Februartemperatur, insbesondere in der Eifel mit einem Korrelationskoeffizienten von $r = 0,43$.

Von den heimischen Arten zeigen nur die Kiefern der Eifel ebenfalls signifikant positive Korrelationen zur Februartemperatur. Im Kellerwald reagiert die Kiefer negativ auf Junitemperaturen. Negative Korrelationen zwischen Fichte und Temperatur sind im Juli und August des Vorjahres zu finden, sowie im Kellerwald zusätzlich im Januar und Juni. Die Buche weist negative Korrelationen zur Temperatur auf, die für den Juli (bis $-0,44$), August und September des Vorjahres besonders hoch sind. Im Wuchsjahr reagiert die Buche

3. Untersuchungen

negativ auf die Julitemperaturen (bis $-0,31$). Die Eiche zeigt ausschließlich im Kellerwald im August des Vorjahres ($-0,25$) und dem Juni des Wuchsjahres ($-0,31$) signifikant negative Reaktionen auf die Temperatur.

Bezüglich des Niederschlags sind bei allen Baumarten die Sommermonate, besonders der Juni, von Bedeutung. Die Douglasie zeigt in der Eifel positive Korrelationen zum Niederschlag des Juli und November des Vorjahres sowie dem März des Wuchsjahres. Im Kellerwald reagiert sie positiv auf den Niederschlag des Dezembers sowie der Monate Mai, Juni, Juli und August. Die Kiefer weist positive Reaktionen auf überdurchschnittliche Niederschlagssummen im Mai auf, im Kellerwald außerdem im Juni, Juli und August. Positive Korrelationen zwischen Fichte und Niederschlag sind im Juni sowie im Mai und Oktober des Vorjahres in beiden Regionen zu finden. Eine negative Korrelation zum Niederschlag existiert im Januar in der Eifel ($-0,23$). Die Buche reagiert in beiden Regionen positiv auf Niederschläge des Mai, Juli, August, September und Oktober des Vorjahres mit Korrelationskoeffizienten bis $0,34$. Im Wuchsjahr finden sich in der Eifel nur im März positive Zusammenhänge, im Kellerwald zusätzlich im Mai, Juni und Juli. Die Eiche reagiert im Kellerwald in den Monaten März, Mai und Juni ($0,48$) signifikant positiv auf Niederschlag.

4. DISKUSSION UND SCHLUSSFOLGERUNGEN

Alle untersuchten Baumarten zeigen signifikante Abhängigkeiten von Temperatur und Niederschlag.

Für die heimischen Baumarten lassen sich deutlich positive Korrelationen zu Sommerniederschlägen und negative Reaktionen auf überdurchschnittlich hohe Sommertemperaturen, die FRIEDRICHS et al. (2009b) für die westdeutsche Mittelgebirgsregion zeigen konnten, bestätigen. Die Korrelationen zum Niederschlag sind dabei im trockeneren Kellerwald höher als in der feuchteren Eifel. Die Kiefer reagiert bezüglich der Sommertemperatur deutlich abgeschwächt im Vergleich zu den anderen heimischen Arten. Von ELLENBERG (1996) wird ihre Empfindlichkeit gegenüber Dürre als sehr gering bewertet. Die positiven Korrelationen der Kiefer zur Februartemperatur konnten auch von FRIEDRICHS et al. (2009b) nachgewiesen werden. Auffällig sind die besonders hohen Korrelationen der Fichte zum Juniniederschlag ($0,57$), welche die von ELLENBERG (1996) vorgenommene Einstufung als sehr dürr empfindlich widerspiegeln. LINGG konnte 1986 in Mittelgebirgslagen ebenfalls eine Anfälligkeit für Trockenstress feststellen. Die negativen Reaktionen der Buche auf die Julitemperatur ($-0,44$) deuten zusammen mit ihrer Empfindlichkeit gegenüber Trockenheit (ELLENBERG, 1996; BONN, 1998) auf Wachstumseinbußen bei steigenden Temperaturen und gleichzeitig reduzierten Niederschlägen hin.

Bisher wurde für Zentraleuropa (BONN, 1998; NEUWIRTH, 2010) und Nordirland (GARCIA-SUAREZ et al., 2009) die Buche als sensitivste Baumart gegenüber sich ändernden Umweltbedingungen beschrieben. Die im Rahmen dieser Studie bestimmte Anzahl negativer Weiserjahre deutet jedoch darauf hin, dass in den untersuchten Regionen die Kiefer die empfindlichste heimische Baumart in Bezug auf klimatische und nicht-klima-

tische Umwelteinflüsse ist. Zu berücksichtigen ist bei diesem Befund allerdings, dass durch die vergleichsweise geringe Anzahl der untersuchten Kiefernstandorte mehr negative Weiserjahre errechnet werden als bei stärker repräsentierten Baumarten. So erfolgt bei Buche und Eiche eine stärkere Ausmittelung der Cropperwerte. Im Einklang mit NEUWIRTH et al. (2007b) reagieren die Baumarten nur in Jahren mit extremen klimatischen Bedingungen ähnlich. So fanden NEUWIRTH et al. (2007a) für den nordwestdeutschen Raum im Untersuchungszeitfenster von 1901–2004 ebenfalls nur 1976 und 1996 als gemeinsame negative Weiserjahre von Buche und Eiche. Negative Wuchsreaktionen heimischer Baumarten auf Hitze- und Trockenjahre wurden außerdem von NEUWIRTH et al. (2007a, b), sowie speziell für das Jahr 1976 von BECKER et al. (1990) beschrieben. BONN (1998) bestätigt für Tieflagen und Mittelgebirge Mitteleuropas starke Hitze und unzureichende Niederschläge als Ursachen für die stärksten Zuwachseinbrüche bei Buche und Eiche. Deren Wuchsreduktionen im Jahr 1996 werden hingegen auf kalte und trockene Bedingungen zurückgeführt (NEUWIRTH et al., 2007a).

Die Douglasie zeigt ebenso wie die heimischen Baumarten positive Reaktionen auf Niederschläge der Sommermonate, die vergleichsweise durchschnittlich stark ausgeprägt sind. In Kombination mit ihrer weitgehenden Unempfindlichkeit gegenüber überdurchschnittlichen, sommerlichen Temperaturen deutet dies auf eine geringere Anfälligkeit für Trockenstress hin, die für Bestände des von sommerlicher Dürre geprägten Herkunftsgebiets der Douglasie ermittelt werden konnte (HERMANN und LAVENDER, 1990; ST. CLAIR et al., 2005). Deutlich zeigen sich hingegen positive Korrelationen zur Temperatur des Februars, die sich ansonsten nur für die Kiefern der Eifel in abgeschwächter Form wiederfinden lassen. Diese können durch eine bei milden Wintertemperaturen mögliche zusätzliche Photosyntheseleistung und somit eine früh herrschende positive Kohlenstoffbilanz erklärt werden. GRIESBAUER und GREEN (2010) und CHEN et al. (2010) konnten positive Korrelationen zur Temperatur im Winter des Vorjahres finden, die mit dem positiven Einfluss einer Photosyntheseleistung im Winter erklärt werden (CHEN et al., 2010). Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass überdurchschnittliche Februartemperaturen in den untersuchten Regionen etwa um den Gefrierpunkt liegen (BÖHM, 1965), so dass Schneefall begünstigt wird. Durch die Schneeschmelze wird im Frühjahr und somit zu Beginn der Vegetationsperiode ein höheres Wasserangebot bereitgestellt. Besonders die Douglasie zeigt im März und April im Vergleich zu den heimischen Nadelbaumarten stärkere Abhängigkeiten vom Niederschlag und somit vom Wasserangebot. Die Auswirkung zusätzlicher Photosyntheseleistung im Februar auf das Wuchsverhalten der Douglasie könnte folglich durch ein höheres Wasserangebot im Frühjahr verstärkt werden.

Die Ableitung einer starken Empfindlichkeit gegenüber klimatischen und nicht-klimatischen Anomalien aus der vergleichsweise hohen Anzahl negativer Weiserjahre der Douglasie muss, wie bei der Kiefer, aufgrund der geringen Standortzahl mit Vorsicht erfolgen. Auf die

3. Untersuchungen

heißen und trockenen Bedingungen im Jahr 1976 reagiert sie ebenso wie die heimischen Baumarten mit einer Wuchsreduktion. Darüber hinaus zeigt sie als einzige Spezies eine Sensitivität gegenüber den klimatischen Verhältnissen von 1917. Die Analyse solcher artspezifischen Weiserjahre kann Erkenntnisse über die klimatischen Ansprüche der Baumarten liefern. Die in der Einzeljahranalyse nicht eindeutig zu treffende Entscheidung, welche klimatischen Faktoren für die negative Reaktion der Douglasie verantwortlich sind, wird nun durch die Ergebnisse der Korrelationsanalyse ermöglicht. Die positiven Korrelationen der Douglasie zu überdurchschnittlichen Februartemperaturen stützen die These, die kalten klimatischen Verhältnisse des Frühjahrs 1917, insbesondere des Februars, als wichtigsten Grund für das reduzierte Wachstum der Douglasie in diesem Jahr zu interpretieren. Die Sensitivität der Douglasie gegenüber sich ändernden Umweltbedingungen scheint im Widerspruch zu der in der Korrelationsanalyse gefundenen weitgehenden Unempfindlichkeit gegenüber überdurchschnittlichen Sommertemperaturen zu stehen. Gezeigt wurde in dieser Studie wie auch von ZHANG et al. (1999) für Kanada, dass die Douglasie eine klimasensitive Baumart ist. Es wurde deutlich, dass sie unterschiedlich auf die untersuchten Klimatelemente reagiert. Die Douglasie kann also trotz hoher Empfindlichkeit gegenüber nicht durchschnittlichen Umweltbedingungen weitgehend unempfindlich gegenüber sich ändernden Temperaturen sein, wie aus den Ergebnissen der Korrelationsanalyse dieser Studie ersichtlich wird. Außerdem können sich neben dem Klima auch weitere Umweltfaktoren auf das Baumwachstum auswirken (SCHWEINGRUBER, 1996). An dieser Stelle sind beispielsweise geomorphologische Prozesse, Konkurrenzbedingungen und forstliche Maßnahmen zu nennen. Die Anzahl negativer Weiserjahre spiegelt auch den Einfluss solcher Parameter wider. Für die Jahre 1976 und 1917 sind in den untersuchten Regionen keine nicht-klimatischen Einflüsse, wie Brände, Bodenverdichtung oder Insektenkalamitäten, bekannt. Das überregionale Auftreten negativer Wuchsreaktionen in diesen Jahren deutet auf klimatische Ursachen hin. Für das Jahr 1976 wird dieser Befund durch weitere Studien (NEUWIRTH et al., 2007a; BECKER et al., 1990) abgesichert. 1917 reagieren immerhin 89% der Douglasien in zwei Regionen mit einem negativen Cropperwert.

Altersbedingte Beeinflussungen der Sensitivität können ebenfalls weitgehend ausgeschlossen werden. So fanden ESPER et al. (2008) an insgesamt 250 Arven dreier gemischtaltriger Standorte im Schweizer Engadin und drei definierten Altersklassen jung (etwa 60 Jahre), mittel (etwa 120 Jahre) und alt (≥ 217 Jahre) keine bedeutenden altersabhängigen Unterschiede in der Sensitivität, die über standörtlich bedingte Unterschiede hinausgehen.

Standortspezifische Eigenschaften, wie Geologie und Boden, Bestandesstruktur, Höhe, Neigung oder Exposition, spielen im Hinblick auf die Reaktionsmuster der Buchen und Eichen aufgrund der jeweils hohen Standortzahl eine untergeordnete Rolle. Bei der Betrachtung der Ergebnisse sollte berücksichtigt werden, dass die

Anzahl der untersuchten Nadelbaumstandorte hingegen vergleichsweise niedrig ist. Es lassen sich jedoch aus den insgesamt 26 Douglasien, 28 Kiefern und 49 Fichten überregional einheitliche Reaktionsmuster ableiten. Die unterschiedlichen standortspezifischen Eigenschaften sind aufgrund dessen als weniger ausschlaggebend für die Wuchsreaktionen der Bäume einzustufen. Zur weiteren Absicherung der Befunde ist die Analyse zusätzlicher Standorte für die Zukunft wünschenswert.

Die Untersuchungen zeigen, dass der Einfluss von Sommertrockenheit auf das Douglasienwachstum auch in Regionen des deutschen Mittelgebirgsraumes nur eine untergeordnete Rolle spielt. Die Douglasie ist somit als weniger anfällig gegenüber der prognostizierten Klimaerwärmung einzustufen als die temperatursensitiven heimischen Baumarten, insbesondere die Buche. Negative Auswirkungen steigender Temperaturen auf das Radialwachstum der Buche postuliert VAN DER MAATEN (2011) im Rahmen einer Klimasensitivitätsstudie in der Schwäbischen Alb. Das Wachstum von Kiefern und Eichen wird hingegen durch eine Klimaerwärmung geringer beeinträchtigt (FRIEDRICHS et al., 2009b). Fehlende sommerliche Niederschläge werden sich zwar hemmend auf das Douglasienwachstum auswirken, doch gilt dies ebenso für die heimischen Baumarten. Dies gilt besonders für die Fichte, wie auch DITTMAR und ELLING (1999) für Lagen unterhalb von 600 m ü. NN in Süddeutschland zeigen konnten. Wärmere klimatische Bedingungen im späten Winter und Frühjahr werden insbesondere bei der Douglasie einen das Wachstum fördernden Einfluss haben. Ausschließlich Frühjahrskälte kann als douglasienpezifischer Wachstumshemmer angesehen werden.

Diese Studie liefert durch die Untersuchung der Klimasensitivität der Baumarten anhand des Radialwachstums Hinweise darauf, dass die ökonomisch wertvolle Douglasie gute Potenziale aufweist, um mit den erwarteten klimatischen Veränderungen zurechtzukommen. Buche und Fichte werden hingegen aufgrund ihrer vergleichsweise starken Temperatur- und Niederschlags-sensitivität unter zunehmend wärmeren und trockeneren Bedingungen leiden.

5. ZUSAMMENFASSUNG

Die im 19. Jahrhundert in Europa eingeführte Douglasie ist auf Grund ihrer enormen Wuchsleistung von großem ökonomischem Interesse. Inwieweit ihre Wuchspotenziale bei sich ändernden Klimabedingungen im Vergleich mit heimischen Baumarten aufrechterhalten werden können, wird im Rahmen dieser Studie anhand von Klimasensitivitätsanalysen untersucht.

Die Dendroökologie ermöglicht retrospektive und jahrgenaue Analysen des radialen Baumwachstums. Unter Berücksichtigung der Klima-anomalien zum Mittel der Klimanormalperiode 1961–1990 werden Einzeljahranalysen und Korrelationsanalysen für den Zeitraum 1910–2002 durchgeführt. Die Analysen erfolgen an insgesamt 389 adulten Bäumen von 28 Douglasien-, Kiefern-, Fichten-, Buchen- und Traubeneichenstandorten zweier Regionen im nordwestlichen Teil des deutschen Mittelgebirgsraumes. Die Regionen, Nationalpark Eifel

3. Untersuchungen

und Nationalpark Kellerwald/Edersee, differenzieren sich klimatisch hauptsächlich durch die mittlere jährliche Niederschlagssumme, wobei die Eifel als feuchter einzustufen ist (Abb. 1a, b; Tab. 1).

Die Baumarten reagieren unterschiedlich auf klimatische Anomalien. Ausschließlich 1976 weisen alle untersuchten Baumarten durch Hitze- und Trockenheit bedingte, signifikant negative Reaktionen auf (Abb. 2a). Das Jahr 1917, in dem nur die Douglasie signifikante Wuchsreduktionen zeigt, ist durch einen kalten und trockenen Februar sowie durch ein kaltes Frühjahr geprägt ist (Abb. 2b).

Die Douglasie zeigt im Gegensatz zu den heimischen Baumarten nur schwache Korrelationen zu den Sommertemperaturen des Vorjahres und keine signifikanten Korrelationen zu den Sommertemperaturen des Wachstumsjahres. Es sind allerdings starke positive Reaktionen auf überdurchschnittliche Februartemperaturen zu verzeichnen (Abb. 3a, b).

Die Ergebnisse zeigen für die Douglasie eine weitgehende Unempfindlichkeit gegenüber steigenden Sommertemperaturen und Wuchsreduktionen bei unterdurchschnittlichen Sommerniederschlägen. Letztere sind verglichen mit heimischen Baumarten jedoch durchschnittlich ausgeprägt. Warme Februartemperaturen hingegen fördern das Douglasienwachstum, was mit einer Photosyntheseleistung im Winter möglicherweise in Kombination mit einem zusätzlichen Wasserangebot nach Schneeschmelze in Verbindung gebracht wird.

Die Studie zeigt, dass die Douglasie im Vergleich mit den heimischen Baumarten gute Potenziale besitzt mit den prognostizierten Klimaänderungen zurechtzukommen. Diese zeigen sich vor allem auf Standorten, auf denen Buche und Fichte bereits unter zunehmend trockeneren Bedingungen leiden. So kann sie beispielsweise die Fichte als Beimischung in einem Buchenstandort ersetzen.

6. SUMMARY

Title of the paper: *Climate sensitivity of Douglas-fir in Eifel and Kellerwald.*

Douglas-fir, introduced in Europe in the 19th century, is of high economic interest because of its enormous growth performance. Whether its growth potential remains higher than that of native tree species over the course of climatic changes must be examined by analyses of climate sensitivity.

Dendroecology allows retrospective analyses of radial tree growth at an annual resolution. Single year and correlation analysis with respect to climate data expressed as deviations from the 1961–1990 mean were carried out over the 1910–2002 period. Altogether 389 adult Douglas-fir, Scots Pine, spruce, beech and oak trees from 28 stands are analysed. The sites are located in two regions in the northwestern area of the German low mountain ranges, National Park Eifel and National Park Kellerwald/Edersee. The climate diagrams show for the Eifel a higher precipitation amount than for the Kellerwald (Fig. 1a, b; Tab. 1).

Tree species respond differently to climatic anomalies and have different species specific pointer years. Only in 1976 all tree species show negative reactions caused by heat and drought (Fig. 2a). 1976 is characterised by a warm and dry summer in combination with a dry beginning of the growing season in both regions and above average previous year summer temperatures. In 1917 only Douglas-fir shows significant growth reductions in both of the regions. The climatic situation can be described by a cold and dry February and a cold spring-time (Fig. 2b).

All species show significant correlations to temperature and precipitation. Native tree species show a homogeneous response pattern: correlations to temperature are negative in summer and previous year summer and positive in winter. Positive relations to precipitation are dominating especially in early summer and previous year autumn. Douglas-fir shows deviating reactions, especially to temperature: response to previous year summer temperatures is lower and no significant negative reactions are detectable to summer temperatures of the current year. However there are high positive correlations to February temperature (Fig. 3a, b).

The results show Douglas-fir's vast insensitivity to rising summer temperatures and growth reductions due to below-average summer precipitation. The latter are on average comparable with native tree species. High February temperatures enhance the growth of Douglas-fir, which can be ascribed to photosynthesis in winter possibly combined with additional water supply after snowmelt.

This study shows that compared with native tree species, the Douglas-fir has high potential to cope with projected climatic changes, especially on sites where beech and spruce trees suffer already from increasing drought conditions. For instance, Douglas-fir could replace spruce in mixed beech stands.

7. DANKSAGUNG

Wir danken Herrn Dr. M. RÖÖS (Nationalpark Eifel), Herrn A. FREDE (Nationalpark Kellerwald/ Edersee) und Frau U. SCHULTE (Landesbetrieb Wald und Holz NRW) für die Unterstützung bei den Geländearbeiten und den dazu notwendigen Forschungsgenehmigungen.

8. LITERATUR

- BECKER, M., O. U. BRÄKER, G. KENK, O. SCHNEIDER und F. H. SCHWEINGRUBER (1990): Kronenzustand und Wachstum von Waldbäumen im Dreiländereck Deutschland-Frankreich-Schweiz in den letzten Jahrzehnten. *Allgemeine Forstzeitung* **45**: 263–266 und 272–274.
- BÖHM, H. (1965): Eine Klimakarte der Rheinlande. *Erdkunde* **18**: 202–206.
- BONN, S. (1998): Dendroökologische Untersuchung der Konkurrenzdynamik in Buchen-Eichen-Mischbeständen und zu erwartende Modifikationen durch Klimaänderungen. *Forstwissenschaftliche Beiträge Tharandt* **3**: 226 S.
- BOOTH, J. C. (1903): Die Einführung ausländischer Holzarten in die Preußischen Staatsforsten unter Bismarck und Anderes. Berlin: Springer Verlag. 111 S.

3. Untersuchungen

- BRÄKER, O. U. (1981): Der Alterstrend bei Jahrringdichten und Jahrringbreiten von Nadelhölzern und sein Ausgleich. Mitteilungen der Forstlichen Bundesversuchsanstalt Wien **142**: 75–102.
- CHEN, P. Y., C. WELSH and A. HAMANN (2010): Geographic variation in growth response of Douglas-fir to interannual climate variability and projected climate change. *Global Change Biology* **16**: 3374–3385.
- CHRISTENSEN, J. H., B. HEWITSON, A. BUSUIOC, A. CHEN, X. GAO, I. HELD, R. JONES, R. K. KOLLI, W.-T. KWON, R. LAPRISE, V. MAGANA RUEDA, L. MEARN, C. G. MENÉNDEZ, J. RÄISÄNEN, A. RINKE, A. SARR and P. WHETTON (2007): Regional Climate Projections. In: SOLOMON, S., QIN, D., MANNING, M., CHEN, Z., MARQUIS, M., AVERYT, K. B., TIGNOR, M. and MILLER, H. L. (eds.) *Climate Change 2007. The physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge, UK: Cambridge University. pp. 847–941.
- COOK, E. R. (1985): A Time Series Approach to Tree-Ring Standardization. PhD-Thesis, University of Arizona, Tucson, 175 pp.
- CROPPER, J. P. (1979): Tree-ring skeleton plotting by computer. *Tree-Ring Bulletin* **39**: 47–59.
- DITTMAR, C. and W. ELLING (1999): Jahrringbreite von Fichte und Buche in Abhängigkeit von Witterung und Höhenlage. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* **118**: 251–270.
- 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**: 319–333.
- ELLENBERG, H. (1996): Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen. In ökologischer, dynamischer und historischer Sicht. Stuttgart: Ulmer Verlag. 1095 S.
- ESPER, J., B. NEUWIRTH and K. TREYDTE (2001): A new parameter to evaluate temporal signal strength of tree-ring chronologies. *Dendrochronologia* **19**: 93–102.
- ESPER, J., R. NIEDERER, P. BEBI and D. FRANK (2008): Climate signal age effects – Evidence from young and old trees in the Swiss Engadin. *Forest Ecology and Management* **255**: 3783–3789.
- FRIEDRICH, D. A., U. BÜNTGEN, J. ESPER, D. C. FRANK, B. NEUWIRTH and J. LÖFFLER (2009a): Complex climate controls on 20th century oak growth in central-west Germany. *Tree Physiology* **29**: 39–51.
- FRIEDRICH, D. A., V. TROUET, U. BÜNTGEN, D. C. FRANK, J. ESPER, B. NEUWIRTH and J. LÖFFLER (2009b): Species-specific climate sensitivity of tree growth in Central-West Germany. *Trees – Structure and Function* **23**: 729–739.
- GARCIA-SUAREZ, A. M., C. J. BUTLER and M. G. L. BAILLIE (2009): Climate signal in tree-ring chronologies in a temperate climate: A multi-species approach. *Dendrochronologia* **27**: 183–198.
- GLASER, R. and J. SCHÖNBEIN (2007): Klima und Wetterkontraste. In: GLASER, R., GEBHARDT, H. und SCHENK, W. (Hrsg.). *Geographie Deutschlands*. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft. S. 29–44.
- GRIESBAUER, H. P. and D. S. GREEN (2010): Assessing the climatic sensitivity of Douglas-fir at its northern range margins in British Columbia, Canada. *Trees* **24**: 375–389.
- HERMANN, R. K. and D. P. LAVENDER (1999): Douglas-fir planted forests. *New Forests* **17**: 53–70.
- HERMANN, R. K. and D. P. LAVENDER (1990): *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco. In: BURNS, R. M., BARBARA, H., HONKALA, B. H. (eds.) *Silvics of North America: 1. Conifers*. Agriculture Handbook 654. Washington. pp. 527–540.
- HOLMES, R. L. (1983): Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin* **43**: 69–78.
- HURRELL, J. W., Y. KUSHNIR, G. OTTERSEN and M. VISBECK (2003): An overview of the North Atlantic Oscillation. Climatic significance and environmental impact. *Geophysical Monograph* **134**: 1–35.
- KNOERZER, D. (1998): Zum Status nichtheimischer (Baum-) Arten – von der Notwendigkeit begrifflicher Klärung. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* **169**: 41–46.
- LAUER, W. and P. FRANKENBERG (1988): Klimaklassifikation der Erde. *Geographische Rundschau* **40**: 55–59.
- LINGG, W. (1986): Dendroökologische Studien an Nadelbäumen im alpinen Trockental Wallis (Schweiz). *Berichte der Eidgenössischen Anstalt für das forstliche Versuchswesen* **287**. 81 S.
- MITCHELL, T. D. and P. D. JONES (2005): An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. *International Journal of Climatology* **25**: 693–712.
- NEUWIRTH, B., ESPER, J., SCHWEINGRUBER, F. H. and M. WINIGER (2004): Site Ecological Differences to the Climatic Forcing of Spruce Pointer Years from the Lötschental, Switzerland. *Dendrochronologia* **21**: 69–78.
- NEUWIRTH, B., D. FRIEDRICH and M. HENNEN (2007a): 2003 – where is the negative pointer year? A case study for the NW-German low mountain ranges. *TRACE – Tree Rings in Archaeology, Climatology and Ecology* **5**: 113–120.
- NEUWIRTH, B., F. H. SCHWEINGRUBER and M. WINIGER (2007b): Spatial patterns of central European pointer years from 1901 to 1971. *Dendrochronologia* **24**: 79–89.
- NEUWIRTH, B. (2010): Interannuelle Klima-Wachstums-Beziehungen zentraleuropäischer Bäume von AD 1901 bis 1971. *Bonner Geographische Abhandlungen* **125**. 169 S.
- NEUWIRTH, B. (2011): Jahrringe als Indikator für Klima- und Umweltveränderungen in Mitteleuropa. *Passauer Kontaktstudium Geographie* **11**: 67–78.
- RINN, F. (2003): TSAP-Win. Time Series Analysis and Presentation for Dendrochronology and related Applications. Version 0.53 for Microsoft Windows. Heidelberg: Rinntech Heidelberg, User Reference. 91pp.
- ROLOFF, A. (2001): Baumkronen. Verständnis, Zusammenhänge und Anwendung. Stuttgart: Ulmer. 164 S.
- SCHÄR, C., P. L. VIDALE, D. LÜTHI, C. FREI, C. HÄBERLI, M. A. LINIGER and C. APPENZELER (2004): The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature* **427**: 332–336.
- SCHWEINGRUBER, F. H. (1983): *Der Jahrring. Standort, Methodik, Zeit und Klima in der Dendrochronologie*. Bern: Verlag Paul Haupt. 234 S.
- SCHWEINGRUBER, F. H., D. ECKSTEIN, F. SERRE-BACHET and O. U. BRÄKER (1990): Identification, presentation and interpretation of event years and pointer years in dendrochronology. *Dendrochronologia* **8**: 9–38.
- SCHWEINGRUBER, F. H. (1996): *Tree rings and Environment*. Dendroecology. Bern: Verlag Paul Haupt. 609pp.
- SCHWEINGRUBER, F. H. and P. NÖGLER (2003): Synopsis and climatological interpretation of Central European tree-ring sequences. *Botanica Helvetica* **113**: 125–243.

3. Untersuchungen

- SPELLMANN, H. (2004): Ursachen-Wirkungsbeziehungen am Beispiel der Douglasie, waldwachstumskundliche Entscheidungshilfen für Waldbewirtschaftung und Forstplanung. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* **175**: 142–150.
- ST. CLAIR, J. B., N. L. MANDEL and K. W. VANCE-BORLAND (2005): Geneecology of Douglas Fir in Western Oregon and Washington. *Annals of Botany* **96**: 1199–1214.
- THOMAS, F. M., R. BLANK and G. HARTMANN (2002): Abiotic and biotic factors and their interactions as causes of oak decline in Central Europe. *Forest Pathology* **32**: 277–307.
- VAN DER MAATEN, E. (2011): Climate sensitivity of radial growth in European beech (*Fagus sylvatica* L.) at different aspects in southwestern Germany. *Trees – Structure and Function*: 1–12. DOI: 10.1007/s00468-011-0645-8.
- ZHANG, Q., R. I. ALFARO and R. J. HEBDA (1999): Dendroecological studies of tree growth, climate and spruce beetle outbreaks in Central British Columbia, Canada. *Forest Ecology and Management* **121**: 215–225.

3. Untersuchungen

3.2 Vulnerability of trees to climate events in temperate forests of West Germany

3. Untersuchungen

3.2.1 Einführende Worte

Nachdem in Kapitel 3.1 eine vergleichende Analyse der Wuchspotenziale heimischer Baumarten und der nicht-heimischen Douglasie für zwei Teilregionen des Untersuchungsgebietes erfolgte, werden in diesem Kapitel die Empfindlichkeiten von Buche, Traubeneiche, Stieleiche, Fichte und Kiefer gegenüber klimatischen Extremereignissen untersucht. Dies erfolgt anhand eines um Tieflagenstandorte und räumlich zwischen Eifel und Kellerwald gelegene Mittelgebirgsstandorte erweiterten Datensatzes. Dieser entspricht dem gesamten, in dieser Dissertation verwendeten Datensatz (Kapitel 2.1), unter Ausschluß der Douglasienstandorte.

Im Rahmen dieser Untersuchung werden Temperatur- und Niederschlagsserien zu einem Gebietsmittel für das gesamte Untersuchungsgebiet aufbereitet.

Die Analyse der Klima/Wachstumsbeziehungen wird in dieser Studie unter Verwendung eines neuen, wachstumsbasierten Ansatzes durchgeführt. Während in Kapitel 3.1 die untersuchten Standorte automatisch nach dem Kriterium der Art zusammengefasst und somit ausschließlich artspezifische Klima/Wachstumsbeziehungen untersucht wurden, werden nun Jahrringserien nach ähnlichem Wachstumsmuster gruppiert und klimaökologisch interpretiert. Dies geschieht durch Anwendung einer neuen Methodenkombination - der Verknüpfung einer Clusteranalyse mit einer Weiserjahanalyse. Die in dieser Untersuchung verwendeten Daten und Methoden werden im Kapitel Material und Methoden der Veröffentlichung ausführlich erläutert.

Die von Stefanie Fischer und Dr. Burkhard Neuwirth verfasste Studie wurde im Jahr 2013 in der Zeitschrift *ISRN Forestry* in englischer Sprache unter dem Titel ‚Vulnerability of trees to climate events in temperate forests of West Germany‘ publiziert. Gegenüber der Veröffentlichung sind folgende Korrekturen vorzunehmen:

1. Die Angaben zur Lage des Untersuchungsgebietes lauten korrekt 6.0-9.1° E statt 6.2-9.1° E.
2. In Abbildung 1 muss Standort 8 als Stieleichenstandort und Standort 48 als Buchenstandort dargestellt werden.
3. In Abbildung 2 muss die Gruppenzuordnung dieser beiden Standorte verändert werden. Tatsächlich fällt Standort 8 in Gruppe 8 und Standort 48 in Gruppe 11.

Es handelt sich dabei ausschließlich um Darstellungsfehler. Die Kernaussagen der Studie basieren auf den korrekten Verhältnissen, die in Tabelle 1 gezeigt werden.

Research Article

Vulnerability of Trees to Climate Events in Temperate Forests of West Germany

Stefanie Fischer¹ and Burkhard Neuwirth²

¹Department of Geography, University of Bonn, Meckenheimer Allee 166, 53115 Bonn, Germany

²DeLaWi Tree-Ring Analysis, Preschlinallee 2, 51570 Windeck, Germany

Correspondence should be addressed to Stefanie Fischer; fischer@giub.uni-bonn.de

Received 30 November 2012; Accepted 20 December 2012

Academic Editors: M. S. Di Bitetti, M. Kanashiro, F. Le Tacon, and P. Newton

Copyright © 2013 S. Fischer and B. Neuwirth. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

An improved understanding of the spatiotemporal climate/growth relationship of our forests is of particular importance for assessing the consequences of climate warming. A total of 67 stands of beech (*Fagus sylvatica* L.), pedunculate oak (*Quercus robur* L.), sessile oak (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.), Scots pine (*Pinus sylvestris* L.), and spruce (*Picea abies* Karst.) from sites located in the transition zone from the lowlands to the low mountain ranges of West Germany have been analysed. A combination of pointer year and cluster analysis was used to find groups with similar growth anomaly patterns over the 1941–2000 period. Shifted reaction patterns especially characterise differences in the growth behaviour of the clusters. These are controlled by different reactions to the climate conditions in winter and spring and are determined by a complex system of forcing factors. Results of this study reflect the enormous importance of the length of the growing season. Increasing the duration of the vegetation period climate warming can change the climate/growth relationship of trees, thereby confounding climate reconstructions which use tree rings. Since forcing factors have been detected that are more important than the tree species, we recommend the application of growth-specific approaches for the analysis of tree species' vulnerability to climate.

1. Introduction

Whereas tree growth at the timberline is mostly limited by only one specific dominant factor [1], growth of temperate forest regions is influenced by a multitude of biotic and abiotic factors [2–4]. This is caused by predominant temperate climate conditions and the fact that mostly native tree species are growing in the range of their natural distribution areas [5]. Nevertheless, climate control is still a crucial forcing factor for annual tree-ring growth in lower altitudes [3]. The 20th century warming trends are extraordinary [6] and steady since the late 1970s [7] and have lengthened the duration of the growing season [8]. An increase of severe climate extremes such as heat waves is inherent with these [9], whereas changes in precipitation and dryness extremes are less clearly linked [10]. However, a better understanding of the spatiotemporal climate/growth relationships, including the identification of the environmental drivers, is of particular importance [11–13] to understand climate-induced changes in forest

productivity with regard to different tree species and site characteristics. Previous studies have shown that analyses of tree-ring width at lower elevation sites are suitable for climatological interpretations [4, 12, 14–17]. Comprehensive network analyses have been made by Neuwirth et al. [12] investigating the interannual climate/growth relationship of temperate and humid forest stands within a wide region of mid-latitude Europe. Covering an altitudinal range of 10–2300 m a.s.l., the investigation area is affected by strong environmental gradients, leading to a comparison of temperate with limiting conditions [12]. To further enhance comprehension of the complex climate/growth relationship in temperate forests, Schweingruber and Nogler [18] recommended the analysis of tree growth at a more regional scale. Friedrichs et al. [4] investigated slight variations in oak growth within relatively homogeneous growth patterns on a regional scale. Homogeneous subsets caused by smaller environmental gradients could be identified by grouping splined tree-ring series. Babst et al. [19] detected 15 groups with

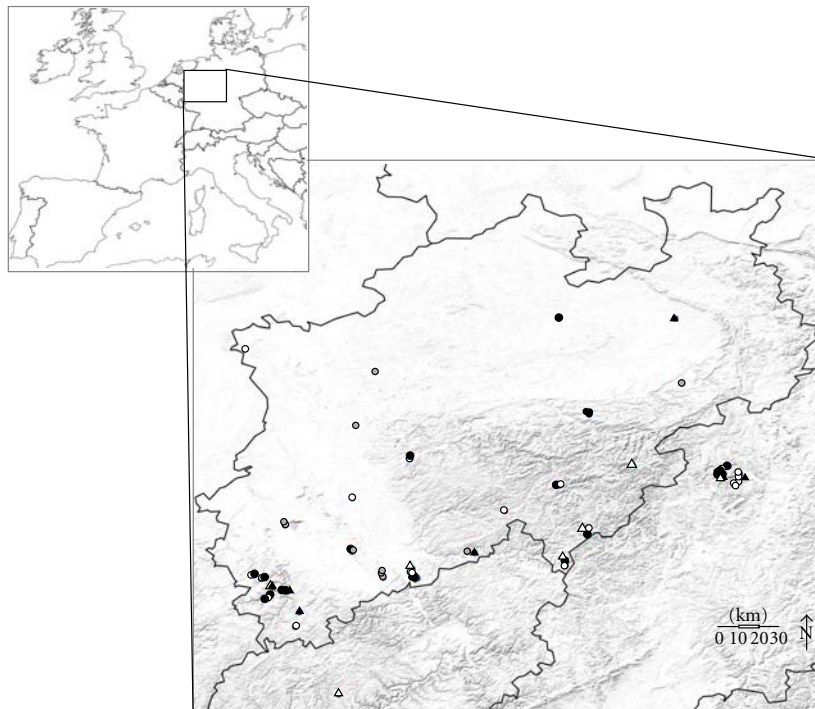


FIGURE 1: Topographical situation of the research area and location of the investigated sites. Black circles denote beech stands, grey circles pedunculate oak stands, white circles sessile oak stands, black triangles Scots pine stands, and white triangles spruce stands.

similar high-frequency growth variability due to temperature and precipitation anomalies for a supraregional network covering the European continent. Lacking from previous studies is an analysis of multispecies growth anomalies within single years as a response to abrupt changes in climatic conditions on a regional scale.

Pointer years are an accepted tool to analyse high-frequency changes in radial tree growth, which are primarily climatologically induced. They can be interpreted as expressions of rapid environmental changes [20]. Since trees are optimally adapted to their site-specific environmental conditions [5, 18], positive pointer years reflect optimal growth conditions [12], with almost all growth factors close to optimum [21]. Extreme environmental conditions lead to reductions of tree-growth [20]. Negative pointer years are a suitable method to detect single environmental factors, which deviate strongly from optimal conditions [21]. As such, our analyses are focused on evaluating negative pointer years, which can be seen as reactions to external disturbances. The pointer year analysis was conducted on the basis of measured tree-ring width values, in contrast to visual approaches described by Kaennel and Schweingruber [22].

The aim of this study is to detect forcing factors for the climate/growth relationships of different tree species in temperate forests. The analysis is based on a multispecies tree ring network of beech (*Fagus sylvatica* L.; FASY), pedunculate oak (*Quercus robur* L.; QURO), sessile oak (*Quercus petraea* Matt Liebl.; QUPE), Scots pine (*Pinus sylvestris* L.; PISY), and

spruce (*Picea abies* Karst.; PCAB), covering the transition of the lowlands to the low mountain ranges of West Germany. In line with this investigation, a particular approach was applied, combining pointer year analysis with cluster analysis.

2. Material and Methods

2.1. Research Area and Tree-Ring Data. The research area is situated 6.2–9.1°E and 50.1–51.9°N and covers the transition from the lowlands to the low mountain ranges of West Germany (Figure 1). Climatic conditions of the region are characterised by northwesterly atmospheric flows [23]. They are predominantly homogeneous with some local differentiations, such as a tendency to more oceanic conditions in the western area and more continental conditions in the eastern parts of the research area. The mean annual temperature over the 1961–1990 period was 9.0°C with a minimum of 0.83°C in January and a maximum of 17.1°C in July. The average annual precipitation was 816 mm, ranging from 53 mm in February to 79 mm in July. The length of the growing season was shortened with increasing altitude and latitude [8, 24].

The dataset contains 67 sites of a continuously extended dendroecological network [4, 16, 17, 25–27] including stands of beech, pedunculate oak, sessile oak, Scots pine, and spruce. Sites range in altitude from 40 to 710 m a.s.l. and represent a variety of gradients (0–45°) and aspects. Soil analyses detect cambisols and luvisols as predominant soil types which are also typical for temperate forest regions in West

Germany [28]. The available water capacity ranges from low (60–110 mm) to very high (>240 mm) (Table 1).

Tree-ring series were prepared using standard procedures [29, 30]. Tree-ring widths were measured with a programme for tree-ring analyses (Time Series Analysis and Presentation; TSAP) in a resolution of 1/100 mm followed by synchronising the series carried out with TSAP [31] and a programme which is used to control the quality of the cross-dating and the tree-ring chronologies (COFECHA) [32]. Tree-ring series were averaged to site chronologies and afterwards to tree-species as well as cluster chronologies. The chronology of all sites including cluster 1 corresponds to the master chronology across all sites.

The four parameters Gleichläufigkeit, NET, Rbar, and EPS were calculated on the basis of the undetrended chronologies as measures of homogeneity for each site, tree-species and cluster chronology. The Gleichläufigkeit is a sign test of the synchronous year-to-year changes of a single series [3] whereas NET is a combination of the Gleichläufigkeit and the coefficient of variation and additionally supplies information about the growth level of the series. Small NET values indicate high signal strength of the mean tree-ring chronology with a maximum of 0 [33]. A threshold of 0.7 was defined for Gleichläufigkeit and a threshold of 0.8 was used for NET [33]. The interseries correlation Rbar and the expressed population signal (EPS) are based on the correlation coefficient between the single series and were calculated over 30 years, lagged by 15 years. EPS is a function of Rbar and the series replication. EPS values increase with sample size and interseries correlation [34] and should remain above the commonly applied threshold of 0.85 [35]. Site chronologies were considered to be homogeneous when at least two parameter values satisfied the defined thresholds.

2.2. Climate Data. To investigate climate/growth relationship, gridded ($0.5^\circ \times 0.5^\circ$) datasets of monthly temperature and precipitation series [36] were used. The climate data from all grid points covering the research area were averaged and prepared as anomalies with respect to the 1961–1990 reference period. Climate data were classified using thresholds of $\pm 1z$, $\pm 1.5z$, and $\pm 2z$ to divide them into “hot,” “very hot,” and “extremely hot” as well as “cold,” “very cold,” and “extreme cold,” respectively.

2.3. Methods. The detection of stands with similar growth behaviour in single years within the multi-tree-species network was carried out over the 1941–2000 period and combined two different techniques, a pointer year and a cluster analysis.

To emphasize annual growth reactions in answer to extreme environmental conditions, comparable values for extreme growth years were calculated after Cropper [37]. Raw tree-ring series were standardized by using a 13-year moving average and calculating ratios. Afterwards a z -transformation was applied to normalise these values resulting in the Cropper series with a mean of 0 (μ) and a standard deviation of 1 (σ).

Cluster analysis was performed to detect sites showing similar increment patterns due to climatic influences,

modified by the site's ecologic conditions [4, 17, 38, 39]. Site-specific Cropper series were grouped, stepwise, using hierarchical cluster analysis. To induce a clear separation of the resulting clusters, Ward's method was applied, using the squared Euclidian distance as a measure of similarity [17, 40]. The intergroup variance was then maximised while the intragroup variance was minimised [39]. An indicator for determining the number of clusters was a jump in the squared Euclidian distance between two steps of the cluster analysis, bigger than all those preceding [41].

For each cluster, the so-called cluster plots were calculated by averaging all corresponding site-specific Cropper series. Years with values above $+1\sigma$ and below -1σ were defined as pointer years of which these years, reflected by at least 80% of the sites of a cluster, were defined as “characteristic” for the cluster. Characteristic pointer years were classified with respect to standard deviation (σ) units. Anomalies larger than $\pm 1\sigma$ were defined as “weak,” $\pm 1.28\sigma$ as “strong,” and $\pm 1.645\sigma$ as “extreme” pointer values. Attributes such as tree species or site ecological aspects appearing only by one of the clusters which were combined in the following grouping step were defined as differentiating criteria. For each grouping step, characteristic pointer years for corresponding clusters as well as differentiating criteria have been detected. For each cluster and for each tree species, a specific variance value of growth anomalies was calculated, by averaging the Cropper value variances per year over the 1941–2000 period (VaC).

Analysis of the climate/growth relationship of each group was carried out by interpreting cluster-characteristic growth anomalies with the corresponding climatic conditions. To maximise the quality of the interpretation of the cluster-specific climate/growth relationship, only these climatic influences could be used with high probability, which could be detected in several cluster-specific pointer years [21]. Growth reactions due to the same climatic impact occurring in one cluster in the same year as the climatic event and in another cluster one year later were defined as shifted reactions.

3. Results

3.1. Homogeneity. The parameters Gleichläufigkeit, NET, Rbar, and EPS confirm the homogeneity of all analysed site chronologies (Table 1). Chronology statistics for cluster 1 refer to the overall homogeneous growth behaviour within the research area, reflected by values of NET, Gleichläufigkeit, Rbar, and EPS, which suffice the recommended thresholds (Table 2; for detailed information about the clusters, see Figure 2 and subsection Structure of the clusters). Mean parameter values for the cluster-specific chronologies are superior to these for the species-specific chronologies throughout. Only the mean EPS value is slightly lower for the cluster-specific chronologies, since EPS values are calculated including series replication. Regarding the chronology parameters as well as the VaC values for a single tree species and clusters, a better differentiation is effected at the cluster level.

Whereas coniferous trees show the highest NET and nearly the highest VaC values, the eastern coniferous cluster

3. Untersuchungen

TABLE 1: Geographical position and attributes of the investigated stands.

Site	Longitude	Latitude	Species	Elev.	Asp.	Grad.	AWC	<i>n</i>	AGR	<i>s</i>	GLK	NET	Rbar	EPS	Clu
1	7.0472	50.6706	QURO	185	15	2	4	12	181	70	0.78	0.62	0.53	0.92	8
2	7.0472	50.6700	QURO	185	15	2	4	12	198	60	0.79	0.51	0.52	0.92	8
3	7.0372	50.6836	QURO	165	20	2	4	14	190	63	0.78	0.55	0.57	0.95	8
4	6.4194	50.9272	QURO	105	0	0	4	16	222	73	0.77	0.58	0.50	0.91	8
5	6.4239	50.9169	QURO	103	0	0	3	16	171	61	0.79	0.58	0.57	0.95	8
6	6.8031	51.0447	QUPE	45	180	2	3	14	235	97	0.77	0.66	0.44	0.91	8
7	6.7975	51.3147	QURO	40	0	0	3	15	236	83	0.78	0.59	0.26	0.84	8
8	7.8864	51.9069	QURO	60	0	0	4	17	162	55	0.78	0.57	0.57	0.96	8
9	8.9681	51.1708	QUPE	290	135	30	1	16	149	50	0.79	0.55	0.45	0.93	9
10	7.2492	50.6694	QUPE	370	320	40	2	18	147	69	0.73	0.74	0.36	0.91	9
11	7.2475	50.6703	QUPE	375	180	45	n/a	16	152	59	0.74	0.64	0.47	0.93	9
12	7.2217	50.6836	QUPE	280	150	20	n/a	7	178	77	0.81	0.59	0.47	0.81	9
13	6.3250	50.6653	QUPE	320	340	15	3	10	143	47	0.70	0.63	0.44	0.87	9
14	6.5656	50.4400	QUPE	560	90	5	3	13	149	55	0.75	0.63	0.31	0.84	9
15	6.2794	50.6806	QUPE	460	0	0	1	13	149	59	0.76	0.65	0.54	0.93	9
16	6.3992	50.6244	QUPE	400	300	40	3	14	151	45	0.81	0.48	0.50	0.93	9
17	6.3603	50.5708	QUPE	500	150	15	2	13	128	36	0.78	0.49	0.49	0.92	9
18	8.1175	50.7272	QUPE	450	19	40	2	16	116	49	0.78	0.65	0.50	0.90	9
19	8.2269	50.8661	QUPE	440	180	25	1	14	118	39	0.81	0.53	0.65	0.96	9
20	6.8439	50.7917	QURO	155	240	5	2	12	300	95	0.80	0.52	0.61	0.95	9
21	7.7169	50.9825	QUPE	385	270	15	3	12	190	76	0.78	0.63	0.48	0.92	9
22	7.1111	51.2297	QUPE	260	230	30	1	14	167	73	0.80	0.66	0.61	0.94	9
23	6.0631	51.7503	QUPE	50	180	3	3	11	108	31	0.78	0.50	0.51	0.93	9
24	8.0228	51.1028	QUPE	470	130	35	1	16	133	49	0.79	0.58	0.56	0.93	9
25	8.6736	51.5831	QURO	295	350	2	3	11	188	67	0.76	0.61	0.21	0.67	9
26	7.5303	50.7933	QURO	175	290	15	n/a	8	207	66	0.75	0.58	0.57	0.90	9
27	8.9619	51.1694	FASY	340	360	45	n/a	13	173	92	0.80	0.75	0.55	0.90	10
28	8.9669	51.1703	FASY	310	150	30	n/a	15	178	70	0.78	0.64	0.51	0.94	10
29	9.0117	51.1936	FASY	280	180	35	n/a	13	140	68	0.80	0.70	0.58	0.92	10
30	8.9583	51.1672	FASY	420	345	3	n/a	16	152	47	0.84	0.48	0.66	0.97	10
31	7.2361	50.6628	FASY	230	270	10	n/a	16	297	120	0.73	0.69	0.47	0.91	11
32	7.2489	50.6689	FASY	360	320	40	n/a	14	232	82	0.75	0.63	0.51	0.92	11
33	7.2469	50.6700	FASY	340	160	45	n/a	17	160	65	0.80	0.63	0.55	0.94	11
34	6.3250	50.6653	FASY	320	340	15	3	16	207	85	0.76	0.66	0.44	0.90	11
35	6.4569	50.6086	FASY	530	315	15	1	16	99	34	0.77	0.58	0.50	0.94	11
36	6.4900	50.6061	FASY	470	60	10	1	15	209	60	0.83	0.47	0.63	0.96	11
37	6.2794	50.6806	FASY	440	45	1	1	13	230	84	0.78	0.60	0.49	0.91	11
38	6.3597	50.5711	FASY	490	150	15	2	14	149	47	0.82	0.51	0.57	0.94	11
39	6.3611	50.5717	FASY	480	150	10	2	15	149	51	0.79	0.56	0.57	0.95	11
40	8.1186	50.7289	FASY	500	140	30	n/a	16	182	58	0.80	0.54	0.55	0.95	11
41	8.2253	50.8656	FASY	440	180	25	1	18	188	61	0.79	0.56	0.53	0.94	11
42	6.8439	50.7917	FASY	155	240	5	2	10	420	141	0.82	0.54	0.52	0.91	11
43	7.1111	51.2300	FASY	260	330	30	1	12	195	65	0.79	0.56	0.48	0.90	11
44	8.0222	51.1022	FASY	455	130	40	1	15	185	61	0.77	0.58	0.54	0.94	11
45	8.1422	51.4425	FASY	350	310	8	2	19	157	56	0.77	0.59	0.49	0.94	11
46	8.1297	51.4469	FASY	360	280	3	2	19	156	56	0.74	0.63	0.42	0.92	11
47	8.1297	51.4469	FASY	350	140	3	n/a	10	151	48	0.79	0.54	0.49	0.89	11
48	6.8489	51.5633	FASY	65	30	1	1	15	172	70	0.80	0.62	0.53	0.94	11
49	9.0842	51.1564	QUPE	350	180	30	1	13	138	45	0.82	0.50	0.57	0.93	12
50	9.0842	51.1572	QUPE	365	180	20	1	6	88	40	0.81	0.63	0.60	0.90	12
51	9.0842	51.1581	QUPE	380	180	25	1	7	139	38	0.82	0.43	0.58	0.90	12

3. Untersuchungen

TABLE 1: Continued.

Site	Longitude	Latitude	Species	Elev.	Asp.	Grad.	AWC	<i>n</i>	AGR	<i>s</i>	GLK	NET	Rbar	EPS	Clu
52	9.0761	51.1561	QUPE	400	215	10	n/a	13	140	40	0.84	0.43	0.58	0.92	12
53	9.0769	51.1556	QUPE	390	150	20	n/a	10	165	46	0.81	0.46	0.59	0.93	12
54	6.8731	50.1236	PCAB	470	255	8	n/a	22	492	19	0.74	0.70	0.58	0.96	13
55	7.2128	50.7122	PCAB	170	70	5	n/a	17	251	104	0.74	0.71	0.41	0.91	13
56	6.4917	50.6056	PCAB	470	60	25	n/a	15	144	79	0.75	0.81	0.43	0.91	13
57	8.1133	50.7311	PCAB	520	45	5	n/a	16	210	71	0.79	0.57	0.45	0.92	13
58	8.2261	50.8661	PCAB	440	180	25	1	7	205	84	0.79	0.63	0.49	0.86	13
59	8.4408	51.1997	PCAB	710	340	10	n/a	14	242	109	0.76	0.71	0.42	0.88	13
60	9.0844	51.1569	PISY	360	180	20	n/a	13	113	41	0.80	0.56	0.50	0.92	14
61	8.9872	51.1553	PCAB	340	315	30	n/a	12	168	63	0.80	0.59	0.46	0.90	14
62	8.9897	51.1572	PISY	350	270	40	n/a	12	104	34	0.84	0.50	0.58	0.94	14
63	6.4919	50.6058	PISY	490	210	20	n/a	15	164	70	0.74	0.73	0.30	0.85	15
64	6.5783	50.5083	PISY	490	270	35	n/a	11	107	40	0.73	0.69	0.45	0.90	15
65	6.4769	50.6067	PISY	415	280	30	n/a	13	126	45	0.77	0.60	0.43	0.90	15
66	7.5697	50.7867	PISY	275	260	30	n/a	14	195	106	0.71	0.91	0.45	0.91	15
67	8.5839	51.8875	PISY	110	330	0–5	n/a	9	136	49	0.73	0.67	0.40	0.84	15

Elev.: elevation, Asp.: aspect [°], Grad.: gradient [°], AWC: available water capacity: 1 = low (60–110 mm); 2 = mean (110–170 mm); 3 = high (170–240 mm); 4 = very high (>240 mm); n/a: not applicable, *n*: number of trees per site, AGR: average growth rate, *s*: standard deviation, GLK: Gleichläufigkeit, NET: parameter of signal strength, Rbar: interseries correlation (calculated over 30 years lagged by 15 years), EPS: expressed population signal (calculated over 30 years lagged by 15 years), Clu: cluster.

TABLE 2: Chronology and Cropper’s series statistics of cluster 1 (master chronology; including all sites), species-specific and cluster-specific chronologies.

	<i>n</i>	AGR	<i>s</i>	<i>v</i>	GLK	NET	Rbar	EPS	VaC
Cluster 1	63	1.70	0.80	0.47	0.73	0.74	0.38	0.97	0.57
QURO	10	1.71	0.44	0.25	0.84	0.41	0.55	0.90	0.40
QUPE	20	1.38	0.36	0.27	0.76	0.51	0.47	0.95	0.46
FASY	22	2.05	0.74	0.37	0.81	0.55	0.61	0.97	0.31
PCAB	7	2.19	1.29	0.57	0.81	0.76	0.55	0.90	0.49
PISY	7	0.93	0.35	0.37	0.81	0.57	0.36	0.79	0.46
Clu 8	8	1.71	0.33	0.19	0.86	0.34	0.70	0.93	0.35
Clu 9	18	1.45	0.42	0.29	0.77	0.53	0.51	0.94	0.45
Clu 10	4	2.02	0.45	0.22	0.89	0.33	0.64	0.87	0.15
Clu 11	18	2.05	0.78	0.38	0.82	0.57	0.65	0.97	0.28
Clu 12	5	1.27	0.27	0.21	0.94	0.28	0.85	0.97	0.10
Clu 13	6	2.29	1.37	0.58	0.81	0.77	0.56	0.87	0.46
Clu 14	3	1.14	0.40	0.35	0.89	0.46	0.64	0.84	0.28
Clu 15	5	0.93	0.41	0.43	0.82	0.61	0.38	0.75	0.42
x_Species	13	1.65	0.64	0.36	0.81	0.56	0.51	0.90	0.42
x_Clu	8	1.61	0.55	0.33	0.85	0.49	0.62	0.89	0.31

X_Species and x_Clu represent mean values for species-specific and cluster-specific chronologies. Values of *n*, AGR, *s*, *v*, GLK, NET, Rbar, and EPS are calculated on the basis of the undetrended chronologies. *n*: number of trees per site, AGR: average growth rate, *s*: standard deviation, *v*: coefficient of variation, GLK: Gleichläufigkeit, NET: parameter of signal strength, Rbar: inter-series correlation (calculated over 30 years lagged by 15 years), EPS: expressed population signal (calculated over 30 years lagged by 15 years). VaC: mean of the annual variance of the Cropper values per year over the 1941–2000 period calculated for the Cropper series.

14 shows much better values compared to spruce cluster 13 and Scots pine cluster 15. VaC is especially low for pedunculate oak and beech and the highest for spruce. At the cluster level, eastern oak cluster 12 shows the lowest VaC

value, followed by eastern beech cluster 10, low mountain range beech cluster 11, and lowland oak cluster 8. All evaluated parameters are most favourable for cluster 12, thereby revealing its comparatively high homogeneity. However, low

3. Untersuchungen

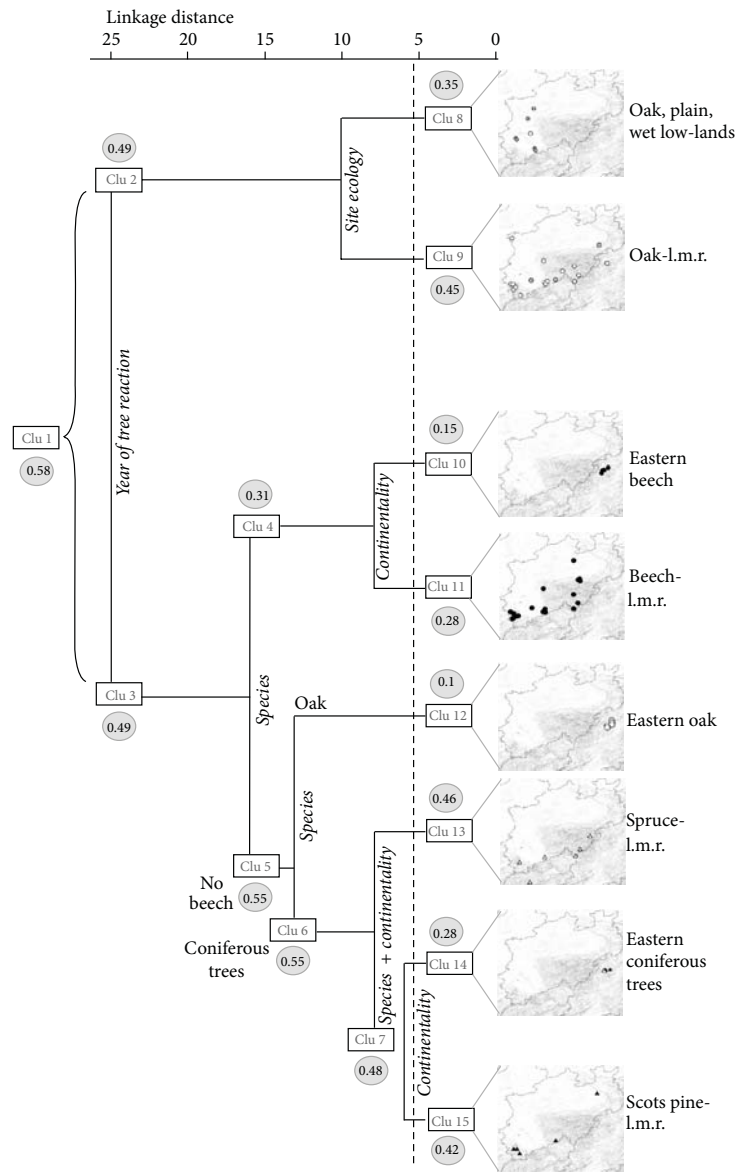


FIGURE 2: Dendrogram of the cluster analysis showing the relationship between the different clusters (Clu 1–15), ecological attributes, like tree species or topographical position, as well as differentiating criteria between the clusters (in italics); l.m.r.: low mountain ranges. Numbers in circles denote the cluster-specific mean variance over the annual variances of the Cropper values (VaC). Dashed line marks the linkage distance of five which was chosen for the selection of the final clusters (Clu 8–15). Maps show the topographical positions of the corresponding sites for each final cluster.

mountain range oak cluster 9 together with spruce cluster 13 shows the highest VaC values, Scots pine cluster 15 the lowest Rbar and EPS values.

3.2. *Structure of the Clusters.* Each step of the cluster analysis results in the formation of clusters, combining sites with similar pointer year patterns. In general, VaC increases inversely with the number of clusters. In the following, 15

clusters will be described and interpreted. While the bigger clusters 1–7 are defined as succeeding clusters, cluster 8–15 are selected as final clusters. At a linkage distance of five, eight final clusters are differentiated, namely, three oak clusters (8, 9, 12), two beech clusters (10, 11), one spruce (13), one Scots pine (15), and one coniferous tree (14) cluster (Figure 2). Cluster 10, 12, and 14 are situated in the eastern part of the research area. Cluster 1 includes all investigated sites and

VaC is comparably high (0.58). One grouping step before, cluster 2 and 3 can be differentiated by their reaction pattern concerning the year of tree reaction. Both of them have a VaC value of 0.49. As parts of cluster 2, oak clusters 8 and 9 distinguish themselves by site ecological aspects. The oaks from plain wet lowlands (cluster 8) have a lower VaC value than those from low mountain range regions (cluster 9). One plain wet lowland site (site 23, Table 1) is classified into cluster 9. As parts of cluster 3, clusters 4 and 5 differ in tree species. Beech cluster 4 has a smaller VaC value than the mixed species cluster 5. As parts of cluster 4, eastern beech cluster 10 and low mountain range cluster 11 can be distinguished by continentality. As parts of cluster 5, clusters 12 and 6 are differentiated by tree species. Cluster 12 consists of eastern oaks and has the lowest VaC value of all groups (0.1). One eastern oak stand (site 9, Table 1) is classified into cluster 9. The variance value of coniferous tree cluster 6 is still high (0.55). One grouping step before, low mountain range spruce cluster 13 differs from cluster 7 in both tree species and continentality. Cluster 13 shows the highest VaC value of the final clusters. As parts of cluster 7, the eastern coniferous tree cluster 14 and the low mountain range Scots pine cluster 15 also distinguish themselves by tree species and continentality. Clusters 10, 12, and 14 are located east of 8°57' E, with VaC values comparably lower in relation to the more westerly-situated clusters.

3.3. Climatological Interpretation of the Characteristic Pointer Years. Characteristic pointer years are classified according to their main climatic conditions in six pointer year types (PYTs) characterised by (1) a hot previous year and a cold summer of the current year, (2) coldness + dryness, (3) coldness + wetness/lack of solar radiation, (4) a hot previous year and a hot and dry summer, (5) dryness in combination with drought in summer of the current year, and (6) dryness in spring, especially during a hot May. In addition to these typical attributes, further climatic criteria can be detected as having influenced the tree's reactions in these years (Figure 3).

Years of PYT 1 (previous year hot, summer of the current year cold) are 1947/1948, 1959/1960, 1984, 1996, and 2000. In 1947/1948, the whole previous year growing season is hot/extremely hot in combination with dryness during the previous summer. Winter 1947/1948 is extraordinarily warm and wet, with temperature anomalies exceeding values of +1z and precipitation anomalies of +2.09z (January). Current year's April is hot and below-average summer temperatures occur in June. The previous year growing season of 1959/1960 is dry/extremely dry, but temperature anomalies are clearly lower than those in 1947/1948. Winter temperatures are slightly above average. Summer coldness is detected in July, and August and October are extremely wet. 1984 is also characterised by very/extremely high precipitation values in previous year's May, both May and September in combination with coldness. Only previous year's June and August show extreme temperature values; summer coldness begins in May. Temperatures during winter months are slightly above average. Climate conditions in 1996 are also

dry/extremely dry from previous year's autumn until January, plus large parts of the growing season coupled with cold in winter, spring, May, and September. Previous year's temperature anomalies do not appear over the entire previous year's growing season. In 2000, the entire previous year's growing season is hot/extremely hot; below-average temperatures first occur in July.

1956, 1962/1963, 1973, and 1991 belong to PYT 2 (cold + dry).

1942, 1968, and 1981 are classified as PYT 3 (cold + wet/lack of solar radiation). Since high precipitation values were normally accompanied by lower temperatures and reduced solar radiation, positive precipitation anomalies in August 1941 and July 1942, August and September 1968, and June and July 1980, as well as in March, June, August, and October 1981, reflect a lack of solar radiation and lower temperatures in these months. In 1942, additional dryness in February and April is observed.

1976 and 1983 belong to PYT 4 (previous year hot + hot and dry summer). In 1976, the whole growing season is dry/very dry while drought is most pronounced in June (temperature: +2.38z; precipitation: -1.9z). In 1983, the entire previous year's growing season is hot/very hot in combination with a dry previous year's July; April and May are extremely wet.

1946/1947, 1958/1959, and 1963/1964 are defined as PYT 5 (dryness in combination with drought in summer of the current year). In 1947 and 1959, the whole growing season is hot and dry. All of these years are additionally characterised by dry/extremely dry, in 1946/1947 and 1963/1964 also extremely cold winters. However, a further differentiation of the years belonging to PYT 5 is possible. Whereas in 1963/1964 dryness is particularly pronounced already in December, it begins in 1947 in August and 1959 in February. While in 1946/1947 and 1958/1959 nearly the whole growing season is hot/extremely hot, in 1963/1964 only May and June show comparably lower temperature anomalies. October in 1964 is very cold.

1988, 1989, and 1990 belong to PYT 6 (dryness in a hot May). 1988 additionally shows an extremely wet March and a dry April and June, 1989 a dry January, and 1990 a very dry and hot previous year's May.

3.4. Ecological and Climatological Interpretation of the Clusters. Each of the clusters is determined by its characteristic pointer years as well as specific ecological criteria (Table 3). 1976 and 1996 are characteristic for each cluster, with the exception of 1976 in cluster 2 and cluster 9 and 1996 in cluster 10. Final clusters show a more homogeneous increment pattern than all sites including cluster 1, resulting in smaller VaC values and a predominantly higher number of characteristic pointer years, respectively (Figure 2, Table 3).

Several controlling factors for climate/growth relationships can be detected, most importantly shifted reactions of the clusters, followed by tree species and site ecological or topographical aspects. Stands located east of 8°57' E form individual groups showing in general stronger reactions in response to dryness than those of the western part of the

3. Untersuchungen

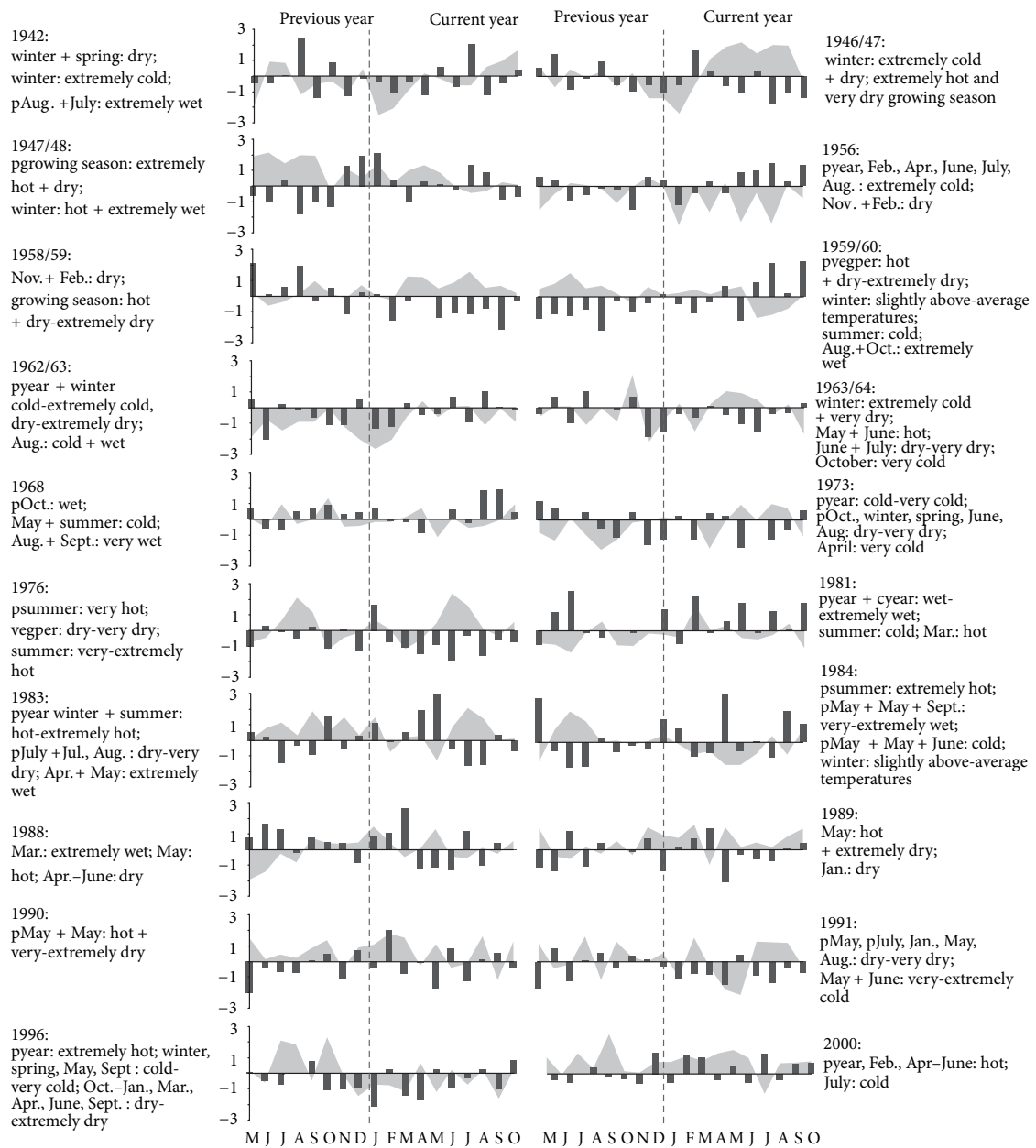


FIGURE 3: Climate anomalies of detected characteristic pointer years from previous year's May to October of the current year. Black bars mark precipitation, grey areas temperature values. Dashed lines denote the transition of previous year to the year of growth, p = previous year, c = current year.

research area. In the following, the interpretation of the clusters begins with the largest (cluster 1) and ends with the defined clusters. For cluster 1–7, a description of typical ecological attributes is not meaningful because of the high number of corresponding sites showing diverse topographical and ecological features (Table 3). Cluster 1 contains all investigated sites representing five tree species. There are only

two negative pointer years, 1976 and 1996, in which more than 80% of the sites show Cropper's values smaller than -1σ . Both of these are strong negative pointer years and appear in each cluster with a different intensity. In general, the investigated temperate forests show strong negative growth anomalies in response to the climatic conditions of PYT 1 (1996) and PYT 4 (1976).

3. Untersuchungen

TABLE 3: Cluster-specific attributes in terms of tree species, site ecological aspects, and pointer years.

Clu	Species	Site ecological description ¹	Char. pointer years
Clu 1	FASY, QUPE, QURO, PISY, PCAB		<i>1976, 1996</i>
Clu 2	QUPE, QURO		<i>1942, 1959, 1996</i> <i>1947, 1981</i>
Clu 3	FASY, QUPE, QURO, PISY, PCAB		1976 <i>1948, 1996</i> 1960
Clu 4	FASY		1948, 2000 <i>1976, 1996</i>
Clu 5	QUPE, QURO, PISY, PCAB		1976 <i>1996</i>
Clu 6	PISY, PCAB		1976 <i>1996</i>
Clu 7	PISY, PCAB		1996 <i>1976</i> 1973
Clu 8	QUPE, QURO	Plain lowlands, wet	1947 <i>1959, 1963, 1968,</i> <i>1976, 1981,</i> 1996
Clu 9	QUPE, QURO	Low mountain ranges, 155–560 m a.s.l., 2 lowland sites with bigger gradient, 1 plain wet lowland site	1996 <i>1942</i>
Clu 10	FASY	East of 8°57', 280–420 m a.s.l., dry	1948, 1983 <i>1964, 1976, 2000</i>
Clu 11	FASY	Low mountain ranges, 155–530 m a.s.l.	1948, 2000 <i>1960, 1976, 1990,</i> 1996
Clu 12	QUPE	East of 8°57', slope sites	1976 <i>1948, 1960, 1973,</i> 1996 1964, 1988
Clu 13	PCAB	Low mountain ranges, 170–710 m a.s.l.	1976 <i>1948, 1984, 1996</i>
Clu 14	PISY, PCAB	Coniferous trees, east of 8°57', 340–360 m a.s.l., slope sites	1964, 1976 <i>1989, 1996</i> 1973
Clu 15	PISY	Low mountain ranges, 110–490 m a.s.l., western expositions	1996 <i>1956, 1976, 1991</i> 1960, 1973

¹Descriptions of the characteristic site ecological aspects are only reasonable for final clusters. Extreme pointer years are designated by bold font, strong pointer years by italic font, and weak pointer years by regular font numbers.

The differentiation of clusters 2 and 3, the parts of cluster 1, can only be explained by their shifted reactions concerning 1947/1948 and 1959/1960, neither by tree species, nor by site ecological or topographical aspects. Beside 1996 in cluster 2

and 3 and 1976 in cluster 3, there are no negative pointer years that appear in more than 80% of sites.

Because of obvious differences in interannual increment pattern in terms of shifted growth reactions, further pointer

years are interpreted as characteristic. Cluster 2 consists of 26 oak stands from the lowlands and the low mountain ranges and one oak site from the eastern part of the research area. There are sessile oak as well as pedunculate oak sites. Five years are classified as characteristic for this cluster: 1942 (70% of the sites react), 1947 (65% of the sites react), 1959 (78% of the sites react), 1981 (65% of the sites react), and 1996. Negative growth reactions occur in cluster 2 when climate conditions in the winter are extremely cold and dry followed by a dry spring, such as that in 1942 and 1996. Lower temperatures and high precipitation values, along with a lack of solar radiation, in August 1941, July 1942, July 1980, and June and October 1981 also reduce the tree growth. Extremely cold and very dry winter months provoke immediate growth reductions in response to a hot/extremely hot and dry/extremely dry growing season (PYT 5; 1947, 1959).

As well as five sessile oak sites, cluster 3 contains all the investigated stands of beech, Scots pine, and spruce. This group is characterised by 1948 (78% of the sites react), 1960 (68% of the sites react), 1976, and 1996. Compared to cluster 2 there is a shifted reaction in 1948 and 1960 to the hot and dry summer/growing season in 1947 and 1959. Thus, climatic conditions of PYT 1 (1947/1948, 1959/1960, 1996) and PYT 4 (1976) are growth reducing.

Whereas cluster 2 is affected by cold and dryness during the winter months followed by a hot and dry summer, as well as lower temperatures and a lack of solar radiation in previous year autumn and current year summer, growth of cluster 3 is less influenced by the climate conditions in winter. However, it is more susceptible to summer heat and dryness in the year prior to ring formation.

The mixed oak clusters 8 and 9, parts of cluster 2, are differentiated by site ecological and topographical aspects. Cluster 8 contains plain oak stands in the lowlands characterised by soil wetness. Cluster 9 includes oak stands of the low mountain ranges as well as two pedunculate oak stands from the lowlands on more inclined sites, one plain wet lowland oak stand (site 23), and one eastern oak stand (site 9). 1996 is characteristic for both of the clusters but for cluster 9 more important (extreme negative pointer year). Cluster 9 is characterised only by two negative pointer years, 1942 and 1996, along with a comparatively high VaC value (cluster 9: 0.45; cluster 8: 0.35). This comparably lower homogeneity reflects the varied ecological spectrum of lowland and low mountain range sites belonging to cluster 9. Beside winter dryness and cold during 1996 and 1942, lower temperatures and high precipitation values, along with a lack of solar radiation, in August 1941 and July 1942, as well as the dry April are crucial for cluster 9.

For cluster 8 seven pointer years are classified as characteristic (Table 3). Climatic conditions of PYT 1 (1996), PYT 4 (1976), and PYT 5 (1947, 1959) lead to strong, even extreme (1947) growth reductions. While cold, particularly in the previous year (1963, 1981) and during winter (1963), that influences tree growth in a negative manner, high precipitation values, along with a lack of solar radiation, in previous year's summer and March (1981), and summer and autumn months (1968, 1981) cause stress.

Both of the groups are strongly negatively influenced by coldness as well as by a lack of solar radiation in previous and current year's summer. Whereas climatic conditions in March are important for cluster 8, April moisture controls the growth of cluster 9. Hot and dry conditions during the growing season after a hot previous year's summer restrict the growth of cluster 9 less.

The differentiation of clusters 4 and 5, as parts of cluster 3, is apparently conditioned by tree species. While cluster 4 includes all beech sites, cluster 5 contains five sessile oak sites situated in the east of the research area as well as all conifer sites.

Cluster 4 and 5 are both characterised by 1976 and 1996; additionally, cluster 4 is extremely negatively affected by 1948 and 2000. More than 80% of the beech sites react with a negative growth anomaly smaller than -1σ when previous climate conditions correspond to PYT 1 (1947/1948, 1996, 2000) and 4 (1976). In 1960 only 76% of the beech sites react with a negative pointer year. While summer in 1960 is comparably cold, similar to 2000, the previous year's summer is less hot than those during the years 1947/1948, 1976, 1996, and 2000. Hence, the most important factor for growth reduction in beech is a hot previous year's summer. The influence of previous year's heat and dryness seems to be crucial for beech growth.

Cluster 5 clearly shows less homogenous growth behaviour than beech cluster 4, which is reflected by a comparatively high VaC value (0.55 versus 0.31 for cluster 4). Additionally, there are no further characteristic pointer years other than 1976 and 1996 that are characteristic for nearly all clusters.

Beech clusters 10 and 11, as parts of cluster 4, are differentiated by the degree of continentality. Cluster 10 contains all beech stands located east of $8^{\circ}57'E$. These beeches show growth reductions in years of PYT 4 (1976, 1983). In 1983, the entire previous year's growing season is hot/very hot in combination with a dry previous July followed by a hot/extremely hot and dry/very dry summer. In spite of high precipitation values in April and May, cluster 10 reacts with an extreme growth reduction (-1.66σ). Water supply at the beginning of the growing season is not high enough to compensate for the following summer dryness.

Furthermore, climatic conditions of PYT 1 (1947/1948, 2000) lead to growth reductions of cluster 10. In 1947/1948, the very dry previous year's summer strengthens growth reductions. No significant negative reactions can be detected in 1959/1960, 1984, and 1996 belonging also to PYT 1. Whereas in 1947/1948 and 2000 the entire previous year's growing season is hot/extremely hot, in 1984 and 1996 only single months are extremely hot. Furthermore, high precipitation values in the previous May and May 1984 appear to lessen the influence of dryness. In 1959/1960, temperature anomalies during the previous year's growing season are clearly of lower magnitude than those in 1947/1948. Additionally, high precipitation values in August and October may have positively influenced the growth of cluster 10, which is predominantly limited by dryness. Negative growth anomalies in 1963/1964 also reveal the sensitivity of cluster

10 to dryness. Additionally, the very cold October in 1964 could shorten the growing season. Cluster 11 contains all other beech stands. These respond strongly to PYT 4. High precipitation values in March and April 1983 lead to the absence of negative growth reactions of cluster 11, revealing the lower sensitivity of cluster 11 to dryness compared to cluster 10. The strong growth reduction in 1990 refers to a vulnerability particularly to climatic conditions of PYT 6. The absence of negative reactions in 1988 and 1989, belonging also to PYT 6, reflects the importance of climate conditions in the previous May for cluster 11.

Climate conditions of PYT 1 are, however, crucial for growth reductions of cluster 11 (1948, 1960, 1996, 2000). Hence, summer coldness is of high importance for growth reductions of cluster 11, whereas growth of cluster 10 is more heavily influenced by permanent dryness, especially in previous and current years' summers and by coldness at the end of the growing season. Previous year's heat is crucial for the growth performance of both beech clusters; the growth of cluster 10 is also controlled by the duration and intensity of the hot period.

The differentiation of the parts of cluster 5, cluster 6 (coniferous trees), and cluster 12 (five sessile oak sites) is also determined by tree species. Cluster 12 contains all oak stands situated east of 8°57'E, with the exception of site 9. Climate conditions are more continental than those in other parts of the research area. Whereas cluster 6, according to cluster 5, only shows the characteristic pointer years 1976 and 1996 in combination with an even high VaC value (0.55), oak cluster 12 is characterised further by 1948, 1960, 1964, 1973, and 1988 (VaC 0.1). Negative growth reactions of cluster 12 are caused by climatic conditions of PYT 1 (1947/1948, 1959/1960, 1996) in combination with a very dry beginning of the growing season of the current year (1996) and PYT 4 (1976). Probably, high precipitation values in August and October 1960, along with a lack of solar radiation, also lower the growth performance of eastern oak. Dryness during the growing season leads to negative growth anomalies of cluster 12 (1964, 1973, 1988). In 1973, dryness already begins in previous year's October with a maximum in July (-1.81 σ) affecting a stronger growth reduction than detected for 1964 and 1988. The extremely wet March in 1988 (+2.65 σ) primarily lowers the dryness in the following growing season, but a simultaneous negative impact due to too little solar radiation cannot be excluded here. In 1976 the growth reduction is the strongest (-1.72 σ). Thus, dryness especially in the summer months of the current year and in the late summer/autumn of the year prior to ring formation is the most important growth limiting factor for oak sites in the region eastwards of 8°57'E. Coldness, a lack of solar radiation, or dryness at the beginning of the vegetation period can enhance growth reductions.

Clusters 13 and 7, composed of clusters 14 and 15, are parts of cluster 6. They can be differentiated by tree species in combination with the degree of continentality. Cluster 13 consists of all spruce stands located west of 8°57'E and shows 1976 (PYT 4), 1948, 1984, and 1996 (PYT 1) as characteristic pointer years. In 1983 (PYT 4), high precipitation values in

April and May lead to an absence of negative growth reactions of cluster 13. Similar to cluster 11, climatic conditions of PYT 1 reduce growth of cluster 13 (1947/1948, 1984, 1996). The extremely high precipitation values in previous year's May and the current May as well as in September 1984, along with a lack of solar radiation and below-average temperatures, have growth-reducing effects. In 1960 and 2000, also characterised by summer coldness, cluster 13 does not react with negative growth anomalies. Whereas coldness begins in 1984 and 1996 in May, and in 1948 in June, below-average temperatures first occur in 1960 and 2000 during July.

Cluster 7 mainly includes stands of Scots pine. VaC is comparably high (0.48), reflecting low homogeneous growth reactions of the corresponding sites also shown in the low number of characteristic pointer years, 1973 (PYT 2), 1976 (PYT 4), and 1996 (PYT 1). All of these years show below-average precipitation values over large parts of the growing season, leading to the assumption that dryness is the most important growth-limiting factor for cluster 7.

Cluster 14 and 15 are differentiated by topography in terms of the degree of continentality. Cluster 14 consists of all spruce and Scots pine stands located east of 8°57'E. Cluster 15 contains all other Scots pine stands. For both clusters, VaC is smaller than that for cluster 7 (cluster 14: 0.28; cluster 15: 0.42; cluster 7: 0.48).

Cluster 14 shows negative growth anomalies in response to the climatic conditions of PYT 1 (1996) and PYT 4 (1976). Additionally, in 1996, winter and April are very/extremely dry. Because of wet conditions in April and May 1983, no negative growth anomaly occurs in this year. Beside 1996, no negative growth anomalies occur in any other year of PYT 1. All of these years show above-average winter temperatures, especially 1947/1948. Dry conditions in winter and summer reduce growth in the years 1964 and 1973; in 1989 this is further influenced by an extremely dry May. In 1964, the growing season is probably shortened by very low temperatures in October. Additionally, extremely cold conditions in winter 1963 lead to an extreme growth reduction in eastern coniferous growth (-1.77 σ). Only clusters in the eastern part of the research area (cluster 10, 12, 14) are affected by the climatic conditions of 1964. Among these clusters, coniferous tree cluster 14 shows the strongest reaction, followed by clusters 10 (-1.55 σ) and 12 (-1.18 σ). Growth of eastern coniferous tree cluster 14 is mainly limited by dryness in summer and May. Winter dryness causes a lack of moistness at the beginning of the vegetation period, whereas above-average winter temperatures enhance growth performance.

The climatic conditions of PYT 1 (1959/1960, 1996) and PYT 4 (1976) limit the growth of Scots pine cluster 15. Reasons for the absence of negative growth anomalies in 1983 (PYT 4) and the other years belonging to PYT 1 are similar to those described previously for cluster 14. The growth anomaly in 1959/1960 detected in cluster 15 is possibly caused by a lack of solar radiation in combination with below-average temperatures in August and October. These high precipitation values in turn have a positive influence on the growth of cluster 14, limited mainly by dryness. Similarly, eastern beech cluster 10 does not show

a negative growth anomaly in 1960. Climate conditions of PYT 4 lower growth of cluster 15. An extremely cold February and a cold/extremely cold growing season (1956) also reduce growth, as do dryness in winter (1973) and the growing season (1973, 1991) in combination with a very/extremely cold spring or summer.

Tree growth of cluster 15 is less strongly limited by dryness compared to cluster 14 and more reduced by coldness during winter and growing season. Winter temperatures are crucial for the growth performance of clusters 14 and 15.

4. Discussion

Grouping of the Cropper series leads to the detection of eight subsets of trees with specific growth anomaly patterns within an already fairly homogeneous growth behaviour on a regional scale. Nearly all of these subsets can be explained by the detected driving factors, which control the climate/growth relationships of the different groups. This is possible for a tree-ring network consisting of five tree species in the transition zone from the lowlands to the low mountain ranges in temperate forest regions of Germany. The group assignment of only one site cannot be explained by ecological and climatological features.

Results show predominantly more homogeneous growth patterns for the clusters than for the species-specific groups, confirming the progress of this particular growth-specific clustering process in contrast to widely used species-specific approaches. While in numerous studies the species-specific vulnerability to changing climatic conditions has been analysed [16, 42], results of this investigation lead to the assumption that it is not primarily the tree species but a shifted tree reaction that is the most important forcing factor for the climate/growth relationship. These findings can only be detected using this particular growth-specific clustering approach.

Whereas Neuwirth et al. [43] can detect immediate reactions of oak stands and lagged reactions of beech stands from the northwest German low mountain ranges, this study shows that shifted growth reactions are mainly not controlled by tree species as evidenced by the immediate as well as lagged reactions of oak groups. Z'Graggen [21] suggests an enhancing effect of previous year's autumn and winter dryness on spring dryness. We hypothesise that clusters which are strongly influenced by winter/spring dryness are already weakened when dryness and heat begin in summer, thereby leading to an immediate growth reduction in the same year. However, these groups, which are predominantly susceptible to summer heat and dryness, react in the year after the climatological event. Lebourgeois and Ulrich [44] detect an earlier onset of the growing season for oak stands between 10 and 15 days in the warmer, more oceanic and southerly regions of France, when compared to the beginning of the vegetation period of the more continentally located oak stands. This corroborates our assumption that the more continentally situated oak stands are less influenced by winter/spring dryness. Furthermore, the annual timing of the growing season is primarily controlled by temperature [45], and an increase of altitude delays budburst [44]. A later

beginning of the growing season due to altitude would explain the impact of climatic conditions in March 1981 for plain wet lowland cluster 8 and the climatic influence in April 1942 on higher altitude cluster 9. For cluster 8, this impact occurs in March, whereas for cluster 9 it occurs later, during April. This may also explain the fact that 1947 and 1959 are characteristic for lowland cluster 8 only, but not for cluster 9 which is, on average, located at higher elevations. In cluster 9 stands react during 1947 or 1948 and predominantly, but less than 80%, in 1959. Cluster 9 stands that react during 1947 and 1959 are located predominantly at lower altitudes than those that react during 1948 or indeed do not react during 1959. However, there are stands that show growth reduction in 1947 as well as in 1948 but are situated at lower altitudes than those that react in only 1947 or 1948. Furthermore, a species-specific differentiation such as that detected by Friedrichs et al. [4], with pedunculate oak growth controlled by winter and spring climatic conditions and sessile oak growth influenced mainly by June precipitation, can not be confirmed here. This suggests perhaps a more complex system of controlling factors of cluster 9, as indicated by the high VaC values and the low number of characteristic pointer years. For beech, Lebourgeois and Ulrich [44] detail a later beginning of the growing season. However, due to the higher elevation (~400/1000 m a.s.l.) of the French tree-ring network beech stands than their oak stands (200 m a.s.l.), we cannot transfer their findings to our network; in this study beech and oak stands both show a similar altitude distribution. Due to a relatively homogeneous topographical distribution of all our investigated stands, we assume that a complex interaction of forcing factors control the stronger influence of early spring climatic conditions on tree growth of cluster 2, when compared to cluster 3.

Climatic conditions in the eastern sector of the research area can be described as more continental than these in the western sector [26]. Comparably lower VaC values confirm a higher homogeneity of the easterly located clusters and reflect a stronger climate control of the corresponding stands. Noticeably, chronology statistics are most favourable for the eastern oak cluster, which reveal its strong reaction to climate and complement the findings of Bonn [15], who identifies beech as the most sensitive tree species. Beside a delayed growing season, as discussed above, the amount of water supply is smaller for easterly situated clusters. Trees growing on dryer sites are generally more sensitive to drought [2, 46], thus explaining the comparably stronger reactions of the eastern stands to dryness. The occurrence of negative growth anomalies in 1964 is typical for stands exposed to more continental conditions. While dryness is, with the exception of the winter months, not strong or extreme, its extended persistence leads to growth reductions. Neuwirth et al. [43] detect the contribution of low autumn temperatures, such as those seen in 1964, to negative growth reactions of beech in the same year. The duration of the vegetation period is generally limited by daily mean temperatures above 5°C [8]. Below-average autumn temperatures at the end of the growing season can, especially in more continental regions, lead to an earlier end of the physiological productivity and smaller ring widths.

The degree of continentality is an important driving factor for the climate/growth relationship at a regional scale and is empirically defined in this study with a threshold delineated here as east of $8^{\circ}57'$. This result is similar to findings of Babst et al. [47], regarding the existence of a boundary that separates temperature- and moisture-sensitive areas on a continental scale. The eastern oak stand which does not belong to cluster 12 could be influenced by more oceanic climatic conditions because of its lower situation close to the Edersee compared with stands belonging to the eastern oak cluster (Table 1).

Growth of the oak clusters and of the spruce cluster is influenced by extremely high precipitation values, predominantly at the beginning or at the end of the vegetation period. Whereas sufficient precipitation normally affects growth positively, extremely high precipitation values have a negative influence on tree growth and can be interpreted as a resonance effect, going along with lower temperatures [38, 48] and a lack of solar radiation. A strong positive relationship between Norway spruce growth and intercepted radiation is demonstrated by several authors including Bergh et al. [49]. A clear designation of the impact of high precipitation anomalies is, however, not always possible. Clusters that are very sensitive to dryness at the beginning of the growing season may also be influenced positively by extremely high precipitation values, thereby lessening the influence of any subsequent dry months. This may result in missed negative reactions, such as that during 1984 where cluster 10 does not show a growth reduction in spite of an extremely hot and very dry previous year's summer due to extremely high precipitation during previous year's May, this compensating for the effects of the previous year's dryness.

In general, beech growth is negatively affected by previous year's heat and dryness [19]. Above-average temperatures, in combination with a deficit of precipitation in June and July of the year prior to ring formation, stimulate the formation of flower buds and potentially lead to a beech mast [50]. Negative correlations are detected between fruit production and radial growth [51]. Oswald [52] suggests that tree-ring width can be reduced by 50% in good mast years. However, other studies discuss that reserve substances that are needed for a radial tree growth are not necessarily mainly used for fructification but that climate conditions enhancing reproductive growth have a coincident limiting influence on the radial tree growth [53, 54]. In succession to Neuwirth et al. [43] and Fischer and Neuwirth [26], it was possible to differentiate beech sensitivity to climate by detecting two beech groups that both react with growth reductions to previous year's heat, but, conversely, both show cluster-specific climatic sensitivities. Whereas growth of the low mountain range beech stands is more limited by coldness during summer, growth reductions of the easterly located beech stands are more controlled by permanent dryness, particularly dryness in the previous and current year's summer and coldness at the end of the growing season.

Winter temperatures can have a positive influence on the growth performance of coniferous trees, which may be explained by supplementary rates of photosynthesis, because

needles are photosynthetically active when temperatures are above freezing even in the winter months [55]. The impact of growth-reducing climatic factors can be weakened or compensated due to above-average temperatures during winter.

For spruce cluster 13, the growth-enhancing impacts of the above-average winter temperatures, such as those seen in other coniferous tree clusters, cannot be identified here. According to Neuwirth [38], below-average precipitation in March 1948 likely results in a lack of any positive impact from warm and wet winter conditions during 1947/1948. His results suggest that, after mild winters, the precipitation volumes around the onset of the growing season are important for the growth performance of spruces below 750 m a.s.l. While solar radiation has a strong positive influence on spruce growth, coldness in May and summer can reduce growth, as can drought, particularly in June [56].

Western Scots pine cluster 15 is limited by dryness, albeit less strongly than the more easterly situated coniferous tree cluster 14; however, it is also limited by cold during the growing season. Winter coldness precludes additional photosynthetic activity in both clusters 14 and 15. Clusters characterised by a more continental location could be found for all of the broadleaved tree species. Only coniferous tree species form one easterly situated cluster. This is likely caused by the comparably low number of coniferous stands. Further investigation, including more Scots pine and spruce stands, is now necessary to gather more results supported by statistical evidence.

5. Conclusion

We investigate an extended tree-ring width network of five tree species in temperate forest regions of West Germany. We adopt a particular approach whereby we group sites with similar growth anomaly patterns. Here we show for the first time that growth clusters with homogeneous interannual increment patterns regarding growth anomalies in single years can be detected on a regional scale. Climate/growth relationships of these groups are controlled by several ecological factors, such as tree species, soil moisture, or continentality. Overall, the tree species is not the most important controlling factor. Our analyses show that, first of all, shifted reactions due to differing influences of coldness and dryness in winter and spring distinguish growth behaviour of the clusters. The tree reaction to climatic conditions in early spring is determined by a complex system of controlling factors and cannot clearly be described by just one forcing factor, such as altitude, continentality, or tree species. The length of the growing season clearly plays a major role. Increasing the duration of the vegetation period due to climate warming is likely to change the climate/growth behaviour of the trees, considerably complicating the climate reconstructions. General statements concerning tree species' reactions to climate are not necessarily valid for stands in temperate forest regions with various topographical and ecological features. Growth controlling factors that are more important than the tree species can only be detected using a particular growth-specific clustering approach. Analyses

of climate sensitivity in temperate forest regions should therefore be based on growth-specific approaches rather than species-specific grouping approaches.

Acknowledgments

The authors thank Dr. M. Rööß (Nationalpark Eifel), A. Frede (Nationalpark Kellerwald-Edersee), and U. Schulte (Landesbetrieb Wald und Holz NRW) for their helpful cooperation concerning the field work and the necessary research permits.

References

- [1] C. Körner, "A re-assessment of high elevation treeline positions and their explanation," *Oecologia*, vol. 115, no. 4, pp. 445–459, 1998.
- [2] H. C. Fritts, *Tree Rings and Climate*, Academic Press, London, UK, 1976.
- [3] F. H. Schweingruber, *Tree Rings and Environment. Dendroecology*, Paul Haupt, Stuttgart, Germany, 1996.
- [4] D. A. Friedrichs, U. Büntgen, J. Esper, D. C. Frank, B. Neuwirth, and J. Löffler, "Complex climate controls on 20th century oak growth in central-west Germany," *Tree Physiology*, vol. 29, pp. 39–51, 2009.
- [5] H. Ellenberg, *Die Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen in ökologischer, dynamischer und historischer Sicht*, Ulmer, Stuttgart, Germany, 5th edition, 1996.
- [6] D. C. Frank, J. Esper, C. C. Raible et al., "Ensemble reconstruction constraints on the global carbon cycle sensitivity to climate," *Nature*, vol. 463, no. 7280, pp. 527–530, 2010.
- [7] G. Foster and S. Rahmstorf, "Global temperature evolution 1979–2010," *Environmental Research Letters*, vol. 6, pp. 1–8, 2011.
- [8] T. E. Skaugen and O. E. Tveito, "Growing-season and degree-day scenario in Norway for 2021–2050," *Climate Research*, vol. 26, pp. 221–232, 2004.
- [9] M. Stefanon, F. D'Andrea, and P. Drobinski, "Heatwave classification over Europe and the Mediterranean region," *Environmental Research Letters*, vol. 7, pp. 1–9, 2012.
- [10] B. Orłowsky and S. I. Seneviratne, "Global changes in extreme events: regional and seasonal dimension," *Climatic Change*, vol. 110, pp. 669–696, 2012.
- [11] K. R. Briffa, T. J. Osborn, F. H. Schweingruber, P. D. Jones, S. G. Shiyatov, and E. A. Vaganov, "Tree-ring width and density data around the Northern Hemisphere: part 2, spatio-temporal variability and associated climate patterns," *The Holocene*, vol. 12, no. 6, pp. 759–789, 2002.
- [12] B. Neuwirth, F. H. Schweingruber, and M. Winiger, "Spatial patterns of central European pointer years from 1901 to 1971," *Dendrochronologia*, vol. 24, no. 2-3, pp. 79–89, 2007.
- [13] L. DeSoto, J. J. Camarero, J. M. Olano, and V. Rozas, "Geographically structured and temporally unstable growth responses of *Juniperus thurifera* to recent climate variability in the Iberian Peninsula," *European Journal of Forest Research*, vol. 131, pp. 905–917, 2012.
- [14] C. Dittmar and W. Elling, "Jahrringbreite von Fichte und Buche in Abhängigkeit von Witterung und Höhenlagen," *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, vol. 118, pp. 251–270, 1999.
- [15] S. Bonn, "Dendroökologische Untersuchung der Konkurrenzdynamik in Buchen-Eichen-Mischbeständen und zu erwartende Modifikationen durch Klimaänderungen," *Forstwissenschaftliche Beiträge*, vol. 3, Dresden, Germany, 1998.
- [16] D. A. Friedrichs, V. Trouet, U. Büntgen et al., "Species-specific climate sensitivity of tree growth in Central-West Germany," *Trees*, vol. 23, pp. 729–739, 2009.
- [17] D. A. Friedrichs, B. Neuwirth, M. Winiger, and J. Löffler, "Methodologically induced differences in oak site classifications in a homogeneous tree-ring network," *Dendrochronologia*, vol. 27, no. 1, pp. 21–30, 2009.
- [18] F. H. Schweingruber and P. Nogler, "Synopsis and climatological interpretation of Central European tree-ring sequences," *Botanica Helvetica*, vol. 113, no. 2, pp. 125–143, 2003.
- [19] F. Babst, M. Carrer, C. Urbinati, B. Neuwirth, and D. Frank, "500 years of regional forest growth variability and links to climatic extreme events in Europe," *Environmental Research Letters*, vol. 7, no. 4, Article ID 045705, 2012.
- [20] F. H. Schweingruber, D. Eckstein, F. Serre-Bachet, and O. U. Bräker, "Identification, presentation and interpretation of event years and pointer years in dendrochronology," *Dendrochronologia*, vol. 8, pp. 9–38, 1990.
- [21] S. Z'Graggen, *Dendrohistometrisch-klimatologische Untersuchung an Buchen (Fagus sylvatica L.) [Ph.D. thesis]*, Universität Basel, 1992.
- [22] M. Kaennel and F. H. Schweingruber, Eds., *Multilingual Glossary of Dendrochronology*, Birmensdorf, Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research. Paul Haupt, Stuttgart, 1995.
- [23] J. W. Hurrell, Y. Kushnir, G. Ottersen, and M. Visbeck, "An overview of the North Atlantic Oscillation. Climatic significance and environmental impact," *Geophysical Monograph*, vol. 134, pp. 1–35, 2003.
- [24] R. Schulz and N. Asche, "Klima, Standort, Wald. Regionales Wasserhaushaltsmodell auf Bundesebene übertragbar?" *AFZ-DerWald*, vol. 1, pp. 20–24, 2008.
- [25] B. Neuwirth, "Jahrringe als Indikator für Klima- und Umweltveränderungen in Mitteleuropa," *Passauer Kontaktstudium Geographie*, vol. 11, pp. 67–78, 2011.
- [26] S. Fischer and B. Neuwirth, "Klimasensitivität der Douglasie in Eifel und Kellerwald," *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung*, vol. 183, pp. 23–33, 2012.
- [27] J. Schultz and B. Neuwirth, "A new atmospheric circulation tree-ring index (ACTI) derived from climate proxies: procedure, results and applications," *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 164, pp. 149–160, 2012.
- [28] U. Schulte and A. Scheible, *Atlas der Naturwaldzellen in Nordrhein-Westfalen*, B.o.s.s. Druck und Medien, Kleve, Germany, 2005.
- [29] M. A. Stokes and T. L. Smiley, *An Introduction To Tree-Ring Dating*, University of Arizona Press, Tucson, Ariz, USA, 1968, reprinted 1996.
- [30] J. R. Pilcher, "Sample preparation, cross-dating and measurement," in *Methods of Dendrochronology. Applications in the Environmental Sciences*, E. R. Cook and L. A. Kairiukstis, Eds., pp. 40–51, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 1990.
- [31] F. Rinn, "TSAP-Win. Time series analysis and presentation for dendrochronology and related applications," Version 0.53 for Microsoft Windows. User Reference, Heidelberg, Germany, 2003.
- [32] R. L. Holmes, "Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement," *Tree-Ring Bulletin*, vol. 43, pp. 69–78, 1983.

3. Untersuchungen

- [33] J. Esper, B. Neuwirth, and K. Treydte, "A new parameter to evaluate temporal signal strength of tree-ring chronologies," *Dendrochronologia*, vol. 19, pp. 93–102, 2001.
- [34] K. R. Briffa and P. D. Jones, "Basic chronology statistics and assessment," in *Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences*, E. R. Cook and L. A. Kairiukstis, Eds., pp. 137–152, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 1990.
- [35] T. M. L. Wigley, K. R. Briffa, and P. D. Jones, "On the average value of correlated time series with applications in dendroclimatology and hydrometeorology," *Journal of Climate & Applied Meteorology*, vol. 23, no. 2, pp. 201–213, 1984.
- [36] T. D. Mitchell and P. D. Jones, "An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids," *International Journal of Climatology*, vol. 25, no. 6, pp. 693–712, 2005.
- [37] J. P. Cropper, "Tree-ring skeleton plotting by computer," *Tree-Ring Bulletin*, vol. 39, pp. 47–59, 1979.
- [38] B. Neuwirth, *Klima/Wachstums-Beziehungen zentraleuropäischer Bäume von 1901 bis 1971—Eine dendroklimatologische Netzwerkanalyse [Ph.D. thesis]*, Universität Bonn, 2005.
- [39] M. Koprowski and A. Zielski, "Dendrochronology of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) from two range centres in lowland Poland," *Trees*, vol. 20, no. 3, pp. 383–390, 2006.
- [40] I. Leyer and K. Wesche, *Multivariate Statistik in der Ökologie*, Springer, Heidelberg, Germany, 2007.
- [41] G. Bahrenberg, E. Giese, and J. Nipper, *Statistische Methoden in der Geographie 2: Multivariate Statistik*, Borntraeger, Berlin, Germany, 2nd edition, 2003.
- [42] H. G. Hidalgo, J. A. Dracup, G. M. MacDonald, and J. A. King, "Comparison of tree species sensitivity to high and low extreme hydroclimatic events," *Physical Geography*, vol. 22, no. 2, pp. 115–134, 2001.
- [43] B. Neuwirth, D. Friedrichs, and M. Hennen, "2003—where is the negative pointer year? A case study for the NW-German low mountain ranges," *Tree Rings in Archaeology, Climatology and Ecology*, vol. 5, pp. 113–120, 2007.
- [44] F. Lebourgeois and E. Ulrich, "Forest trees phenology in the French Permanent Plot Network (Renecofor, ICP forest network)," in *Forests, Carbon Cycle and Climate Change*, D. Lousteau, Ed., pp. 158–171, Collection UpDateSciences and Technologies, 2010.
- [45] A. Menzel, G. Jakobi, R. Ahas, H. Scheifinger, and N. Estrella, "Variations of the climatological growing season (1951–2000) in Germany compared with other countries," *International Journal of Climatology*, vol. 23, no. 7, pp. 793–812, 2003.
- [46] E. R. Cook, M. A. Kablack, and G. C. Jacoby, "The 1986 drought in the southeastern United States: how rare an event was it?" *Journal of Geophysical Research*, vol. 93, no. 11, pp. 14–260, 1988.
- [47] F. Babst, B. Poulter, V. Trouet et al., "Site and species-specific responses of forest growth to climate across the European continent," *Global Ecology and Biogeography*. In press.
- [48] K. R. Briffa, F. H. Schweingruber, P. D. Jones, T. J. Osborn, S. G. Shiyatov, and E. A. Vaganov, "Reduced sensitivity of recent tree-growth to temperature at high northern latitudes," *Nature*, vol. 391, no. 6668, pp. 678–682, 1998.
- [49] J. Bergh, S. Linder, and J. Bergström, "Potential production of Norway spruce in Sweden," *Forest Ecology and Management*, vol. 204, pp. 1–10, 2005.
- [50] H. Wachter, "Über die Beziehung zwischen Witterung und Buchenmastjahren," *Forstarchiv*, vol. 35, pp. 69–78, 1964.
- [51] C. Dittmar, W. Zech, and W. Elling, "Growth variations of Common beech (*Fagus sylvatica* L.) under different climatic and environmental conditions in Europe—A dendroecological study," *Forest Ecology and Management*, vol. 173, no. 1–3, pp. 63–78, 2003.
- [52] H. Oswald, "Importance et périodicité des fainées. Influence des facteurs climatiques et sylvicoles," in *Le Hêtre*, E. Teissier du Cros, F. Le Tacon, G. Nepveu, J. Pardé, R. Perrin, and J. Timbal, Eds., pp. 207–241, Paris, France, 1981.
- [53] V. Selås, G. Piovesan, J. M. Adams, and M. Bernabei, "Climatic factors controlling reproduction and growth of Norway spruce in southern Norway," *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 32, no. 2, pp. 217–225, 2002.
- [54] M. Mund, W. L. Kutsch, C. Wirth et al., "The influence of climate and fructification on the inter-annual variability of stem growth and net primary productivity in an old-growth, mixed beech forest," *Tree Physiology*, vol. 30, no. 6, pp. 689–704, 2010.
- [55] H. P. Mäkinen, N. Mielikäinen, and K. Mielikäinen, "Climatic signal in annual growth variation of Norway spruce (*Picea abies*) in southern Finland," *Trees*, vol. 15, pp. 177–185, 2001.
- [56] J. H. Bassman, G. E. Edwards, and R. Robberecht, "Long-term exposure to enhanced UV-B radiation is not detrimental to growth and photosynthesis in Douglas-fir," *New Phytologist*, vol. 154, no. 1, pp. 107–120, 2002.

3. Untersuchungen

3.3 Changing climate growth response in tree rings of temperate forests

3. Untersuchungen

3.3.1 Einführende Worte

Nach der in Kapitel 3.2 erfolgten Analyse von Wuchsanomalien als Reaktion auf klimatische Extremereignisse werden in diesem Kapitel nun die mittleren, korrelativen Zusammenhänge zwischen Baumwachstum und Klima untersucht. Neben Analysen der Jahr-zu-Jahr-Variationen werden zusätzlich auch interdekadische Wellenlängen im Baumwachstum herausgefiltert und auf ihre klimatische Steuerung hin untersucht um Klima/Wachstumsbeziehungen noch detaillierter verstehen zu können (Neuwirth, 2010).

Diese Untersuchungen erfolgen auf Grundlage des in Kapitel 3.2 verwendeten Datensatzes. Der in dieser Studie verwendete Klimadatensatz basiert auf lokalen Temperatur-, Niederschlags-, T/N- und scPDSI-Zeitreihen. Diese werden hingegen nicht, wie in Kapitel 3.2 beschrieben, zu einem Gebietsmittel aufbereitet, sondern zu gruppenspezifischen klimatischen Serien, um die leichten klimatischen Modifikationen hinsichtlich der Kontinentalität im Untersuchungsgebiet zu berücksichtigen.

Da der in Kapitel 3.2 verwendete wachstumsbasierte Ansatz neue, über die Möglichkeiten eines artspezifischen Ansatzes hinausgehende Resultate geliefert hat, wird dieser ebenfalls, leicht modifiziert, in Kapitel 3.3 angewendet. Die genaue Beschreibung der im Rahmen der Untersuchung verwendeten Methoden wird in Kapitel 3.3.2 ausführlich erläutert.

Der von Stefanie Fischer, Dr. Burkhard Neuwirth und Prof. Dr. Sebastian Schmidlein verfasste Artikel wurde im August 2013 bei der Zeitschrift ‚Trees – Structure and Function‘ eingereicht.

3. Untersuchungen

Changing climate growth response in tree rings of temperate forests

Stefanie Fischer, Department of Geography, University of Bonn, Meckenheimer Allee 166, 53115 Bonn, Germany; fischer@giub.uni-bonn.de; 0049(0)228/73-6318; +49 (0)228 73-5393

Burkhard Neuwirth, DeLaWi Tree-Ring Analyses, Preschlinallee 2, D-51570 Windeck, Germany;

Sebastian Schmidlein, Institute of Geography and Geoecology, Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Kaiserstraße 12, 76131 Karlsruhe, Germany

Keywords Climate warming, Dendroecology, Climate sensitivity, Climate/growth relationships, Growth trends, Different wavelengths

Abstract

To improve knowledge of the complex climate/growth relationships of temperate forests, a network of 67 sites, including stands of mature beech, sessile and pedunculate oak, Scots pine and spruce, was analysed. The sites are located at the transition between the lowlands and hilly regions of western Germany. Cluster analysis was performed to detect groups of sites showing similar interannual growth patterns over the 1941-2000 period. For these groups, Pearson's correlation coefficients were computed for ring width and climate data over the whole research period, as well as for two shifted 30-year time windows. Additionally, interdecadal growth variations were compared with climate fluctuations of corresponding wavelengths using splines at 32, 80 and 150 years. Interannual growth reactions are mainly differentiated by tree species and by the degree of continentality, whereas site ecological features play a minor role. We detected complex climate/growth relationships that changed over time. Further, high correlation coefficients over the 1941-2000 period do not guarantee temporal stability. A shift between a temperature signal predominantly in the previous year and a precipitation signal in the current year was found. Additionally, a temporal change from temperature-controlled towards precipitation-controlled growth was detected. Furthermore, there were some differences between growth determining factors on interannual and interdecadal scales. These findings highlight severe difficulties for climate reconstructions in

3. Untersuchungen

temperate forests and should be considered when reconstructing climate series instead of assuming stability of climate-induced signals in tree growth over time.

Introduction

Understanding forest growth is important because of forests' function as CO₂ sinks (Luyssaert et al. 2008), high economic importance of timber production, nature conservation, erosion control and recreation (Spiecker 2003). Global average temperature has increased by 0.8 °C since 1900, including rapid warming since the 1970s at a rate of 0.2 °C per decade (Hansen et al. 2006). A temperature increase of between 2.3-5.3 °C is predicted for Central Europe over the course of the 21st century, along with a decrease of summer precipitation (Christensen et al. 2007). Even though tree growth in temperate forests is influenced by various climatic and non-climatic factors, climate control is the predominant influence (Schweingruber 1996). Climatic changes directly affect tree growth, with long-term changes in climate provoking long-term growth variations and consequences for forest composition and vigour (Thomas et al. 2004; Jump et al. 2006). For a better assessment of the climate-induced productivity changes of temperate forest trees it is necessary to further improve our knowledge of complex climate/growth relationships on a regional scale (Schweingruber and Nogler 2003). Previous studies conducted on temperate forests have evaluated species-specific responses to climate, usually dealing with growth anomalies and interannual growth behaviour (Dittmar et al. 2003; Neuwirth et al. 2007; Friedrichs et al. 2009b; Lebourgeois et al. 2010). Since climate varies on different time-scales, tree-ring series also contain growth fluctuations of different wavelengths (Esper and Gärtner 2001). As such, Neuwirth (2010) refers to the importance of additional analyses of decadal and multi decadal fluctuations, defined by Esper et al. (2003) as interdecadal variations (with wavelengths of > 10-100 years). As an extension of this to species-specific analyses, Fischer and Neuwirth (2013) recommend combining sites with similar growth behaviour within a multi-species dataset. This approach has the advantage that the resulting groups are not automatically formed according to tree species, and factors more important than species for controlling growth can thus be detected.

The main objective of our study was to gain insight into the climate/growth relationships of different tree species in the lowlands and low mountain ranges of western Germany with respect to interannual as well as interdecadal variation. Therefore, a multispecies tree ring network including sites of beech (*Fagus sylvatica* L.; FASY), pedunculate oak (*Quercus robur* L.; QURO), sessile oak (*Quercus petraea* Matt Liebl.; QUPE), Scots pine (*Pinus*

3. Untersuchungen

sylvestris L.; PISY), and spruce (*Picea abies* Karst.; PCAB), located in the transition zone from the lowlands to the low mountain ranges of western Germany, was analysed. Groups with similar interannual growth behaviour were classified by applying a cluster analysis, and climate/growth response was then investigated for each group. Besides temperature and precipitation two indices, the self-calibrating Palmer Drought Severity Index (scPDSI; Wells et al. 2004) and a simple temperature/precipitation ratio (T/P), were included in our analyses to evaluate the influence of water availability more comprehensively, as well as the interaction of temperature and precipitation. Other objectives were to assess the most important forcing factors for the different climate/growth relationships of the groups and to gain insight into the temporal stability of these relationships.

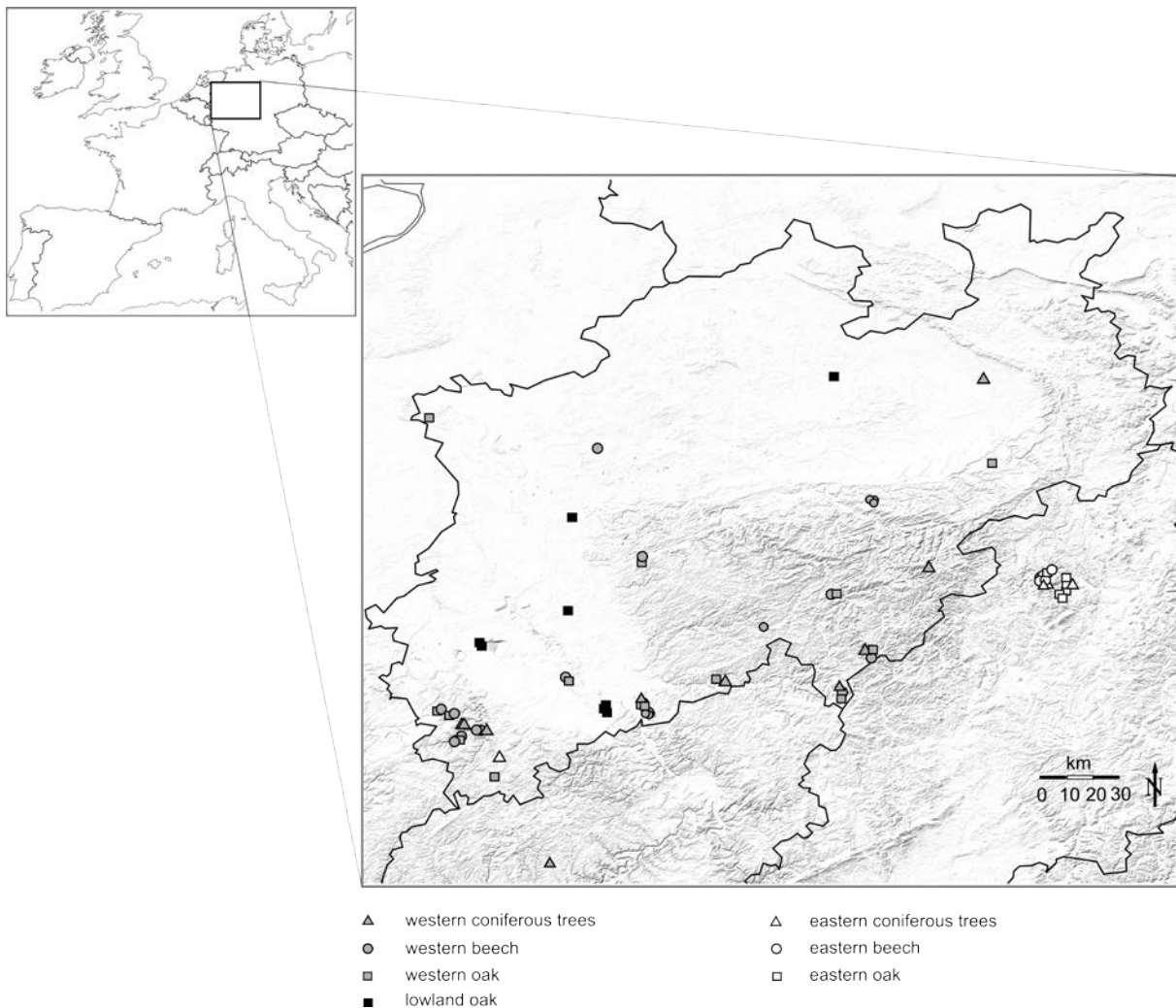


Fig. 1 Location of the research area and topographical situation of the analysed sites as well as their attribution to one of the detected final clusters. Forms give information about the (dominating) tree species of the cluster. Colours define the location of the cluster

3. Untersuchungen

Materials and methods

Research area and tree data

The study area is situated in western Germany between 6.0-9.1° E and 50.1-51.9° N at the transition from the lowlands to the low mountain ranges of Central Europe (Fig. 1) and is characterised by north-westerly atmospheric flows. These influence the overall homogeneous climate of the research area (Hurrell et al. 2003), with slightly wetter conditions in the western part and dryer conditions in the eastern part.

The study is based on a dataset of 67 stands of mature aged beech (*Fagus sylvatica* L.; FASY), oak (sessile oak; *Quercus petraea* Matt Liebl.; QUPE and pedunculate oak; *Quercus robur* L.; QURO), Scots pine (*Pinus sylvestris* L.; PISY) and spruce (*Picea abies*; PCAB). This data is part of a growing database for Central European forest stands described by Friedrichs et al. 2009b; Neuwirth 2011; Schultz and Neuwirth 2012, and described in detail by Fischer and Neuwirth (2013). The study sites represent a broad variety of conditions concerning altitudinal range (40 to 710m a.s.l.), gradient, aspect and soil water capacity. Cambisols and luvisols prevail as the most characteristic soils of temperate forests in western Germany (Schulte and Scheible 2005). The available water capacity ranges from low (60-110mm) to very high (>240mm) (Fischer and Neuwirth 2013, Table 1).

We took two cores per tree from an average of 14 trees per site. Here, the term 'site' refers to one tree species per location, with two species at one location representing two sites. Tree-ring series were created by measuring ring widths with the program TSAP (Rinn 2003) and then synchronising the resulting series using TSAP and COFECHA (Holmes 1983). Tree-mean curves were computed by averaging the tree-ring series, in turn from which site-mean curves were then developed. Strength of the site chronologies was confirmed by Fischer and Neuwirth (2013) on the basis of the parameters Gleichläufigkeit, NET (Esper et al. 2001), EPS and Rbar (Wigley et al. 1984).

Climate data

Gridded temperature, precipitation and scPDSI data with a monthly resolution were used for the 1941-2000 period. The spatial resolution of these grids amounted to one kilometre (Müller-Westermeier 1998). For the interpretation of tree rings, we considered the 17 months from previous year June to current year October. Additionally, temperature and scPDSI means and precipitation sums for four different periods, the current year (January to December), the seasons spring (March to May) and summer (June to August) as well as the

3. Untersuchungen

growing season (April to September) were calculated. Site temperature and precipitation series were extracted from grids by choosing the closest pixel centre. On the basis of these data, site specific T/P ratios were computed for equivalent months and time periods. Self-calibrated scPDSI series were calculated using the C++ code of Wells et al. (2004) for single locations, adapted to grids by Meyn et al. (2010).

Standardization

Cubic smoothing splines with 50% frequency cut-offs at 32, 80 and 150 years were calculated with the program Arstan (Cook 1985) for tree-ring and climate data to express decadal and multidecadal variations. Indices as ratios of the cubic smoothing splines at 32 years were calculated for the tree-ring data to enhance interannual variations (Cook and Peters 1981). Climate raw data were additionally prepared as deviations from the mean values of the standard reference period 1961-1990.

Cluster Analysis

Hierarchical cluster analysis was performed to find groups of tree sites showing similar growth behaviour on an interannual scale. Ward's method was applied with Pearson's correlation coefficient as a measure of similarity on the basis of the 32-year spline detrended tree-ring series. Stepwise grouping leads from clusters containing one site to one big cluster containing all sites (Jongman et al. 1987).

Averaging

For each of the detected clusters, cluster-specific tree-ring and climate datasets were computed by averaging tree-ring and climate series data from all sites belonging to a cluster. These datasets contain cluster-specific 32-year spline detrended tree-ring data, climate data as deviations of the 1961-1990 period, splines of the tree-ring data at 32, 80 and 150 years and corresponding splines of the climate data.

Correlation analysis

Correlation analyses were applied on the basis of the cluster-specific 32-year spline detrended tree-ring data and climate data as deviations of the 1961-1990 period, giving Pearson's correlation coefficients between the detrended cluster chronology and corresponding climate series for each cluster. Three time windows were chosen, one covering the whole research period 1941-2000, and two 30-year time windows from 1941-1970 and 1971-2000. Critical

3. Untersuchungen

values for the level of significance with $\alpha=0.05$ and 59 degrees of freedom are 0.25232 and 0.3550 for 29 degrees of freedom.

Results

Structure of the clusters

At a linkage distance of 0.9, seven clusters were selected as final clusters, namely three oak, two beech and two mixed coniferous tree clusters (Fig. 1). Western and eastern clusters could be differentiated for each of the broadleaved tree species as well as for the coniferous trees. Additionally, a lowland cluster characterised by plain and wet site conditions could be detected for oak. The differentiation of the clusters can be characterised by two important separating criteria: tree species and continentality. Site ecological aspects play a subordinate role in explaining classifications at the level of the final clusters.

Time window 1941-2000

In general, negative responses to temperature and positive responses to precipitation are characteristic for the analysed clusters (Fig. 2 a-g). Almost universally, positive reactions to June precipitation and simultaneous negative reactions to current year June temperature can be detected, as well as a negative signal of previous year temperature, especially of previous year July, sometimes along with a positive precipitation signal. This typical increment pattern is most clearly shown by the eastern beech cluster. Lowland oaks show a specific positive precipitation signal in spring of the current year. While beech clusters show the strongest reactions to climate, especially to temperature, and coniferous trees to precipitation, growth reactions of oak are the weakest overall, especially those of the western and the lowland oak cluster. No negative correlation to temperature could be detected for western and lowland oaks. Reactions to current year summer climatic conditions as well as the precipitation signals are stronger for the more easterly-situated clusters.

The histograms of the cluster-specific response to the drought indices are similar to those described above for temperature and precipitation; strongest reactions are also shown by eastern beech (Fig. 3 a-g). Generally, clusters show negative reactions to T/P and positive reactions to scPDSI. Positive reactions to scPDSI combined with negative reactions to T/P in June of the current year, as well as a positive scPDSI signal accompanied by a negative T/P signal in previous year late summer and autumn are typical. Previous year signals are the strongest for beech and nearly absent from oak clusters. Also a spring signal of the lowland oaks was detected for both scPDSI and T/P. Beech clusters show the strongest signals to

3. Untersuchungen

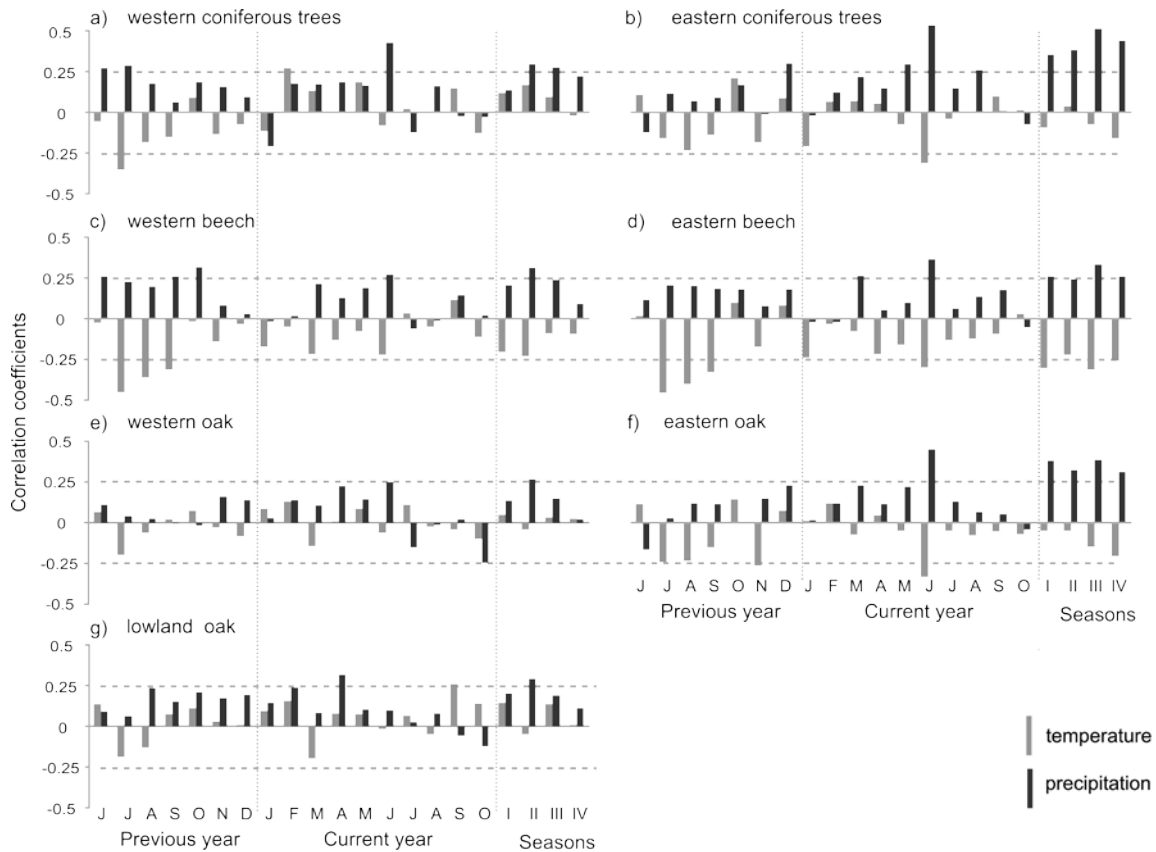


Fig. 2 Pearson's correlation coefficients between cluster-specific 32-year spline detrended tree-ring data and temperature and precipitation over the 1941–2000 period for the months of the previous year June until current year October as well as for the periods I = current year, II = Spring, III = Growing Season and IV = Summer. Dashed lines denote 95% levels of significance

scPDSI and coniferous trees to T/P, whereas oak generally show the weakest reactions with exception of the T/P signals in the eastern oak cluster in the current year and in the lowland oak cluster in spring. Signals in current year summer and in the periods are more pronounced in the eastern clusters. While in the western clusters reactions in spring are more important, growing season and summer play a major role in the easterly-situated clusters. In general, significant correlations between tree growth and the indices T/P and especially scPDSI can be detected in a higher number of months than those between tree growth and temperature or precipitation signals. scPDSI signals are the strongest compared to T/P as well as temperature and precipitation signals. Exceptions are the negative previous year temperature signals in beech growth and the spring T/P signal of lowland oak.

3. Untersuchungen

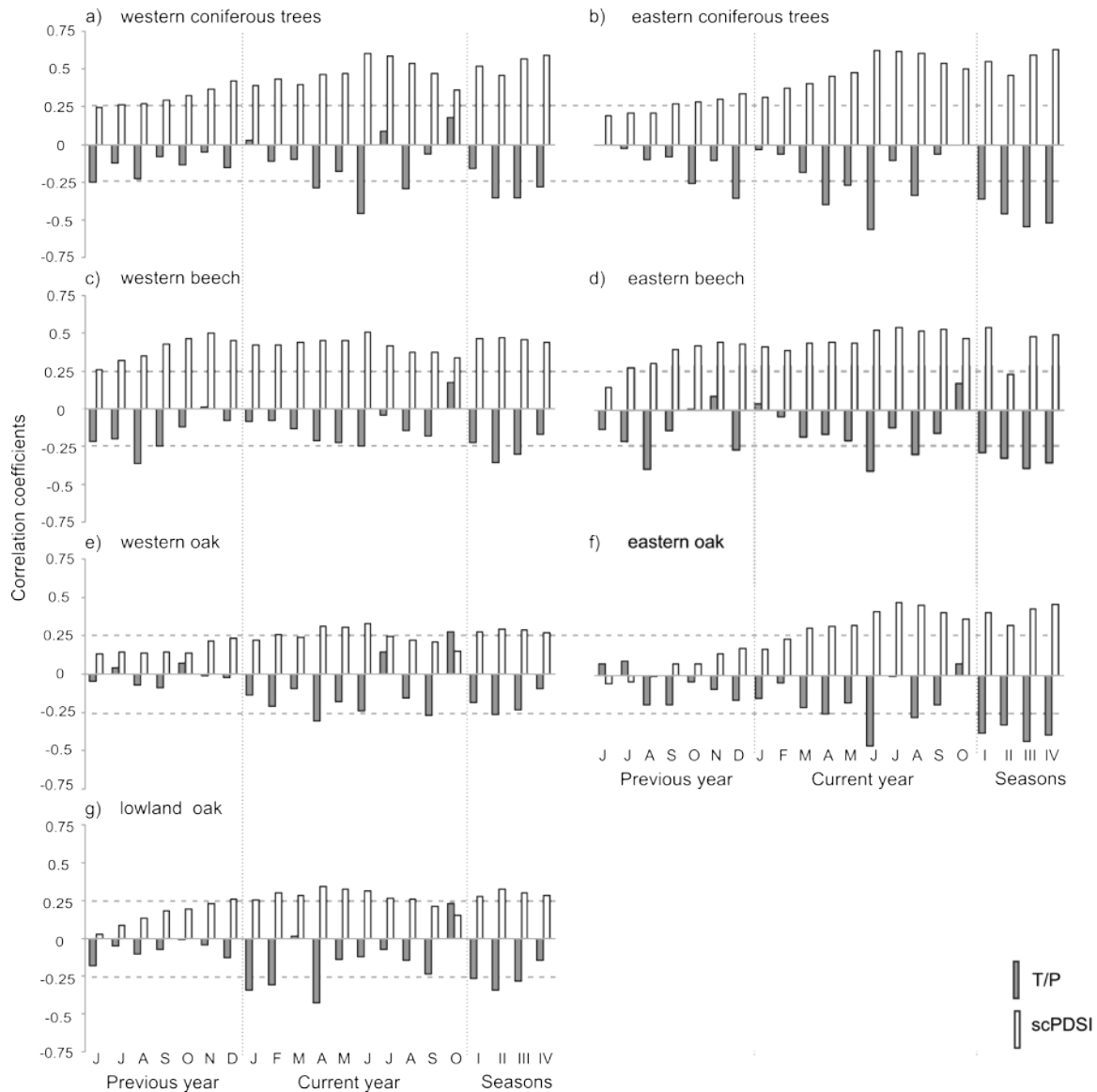


Fig. 3 Pearson's correlation coefficients between cluster-specific 32-year spline detrended tree-ring data and T/P and scPDSI over the 1941–2000 period for the months of the previous year June until current year October as well as for the periods I = current year, II = Spring, III = Growing Season and IV = Summer. Dashed lines denote 95% levels of significance

Interdecadal variations

Interdecadal tree growth and climatic variations were compared for selected months and climate parameters with respect to high correlation coefficients on an interannual scale, using cluster-specific splines of the tree-ring and climate data at 32, 80 and 150 years. These fluctuations are described for two clusters (Fig. 4 and 5).

3. Untersuchungen

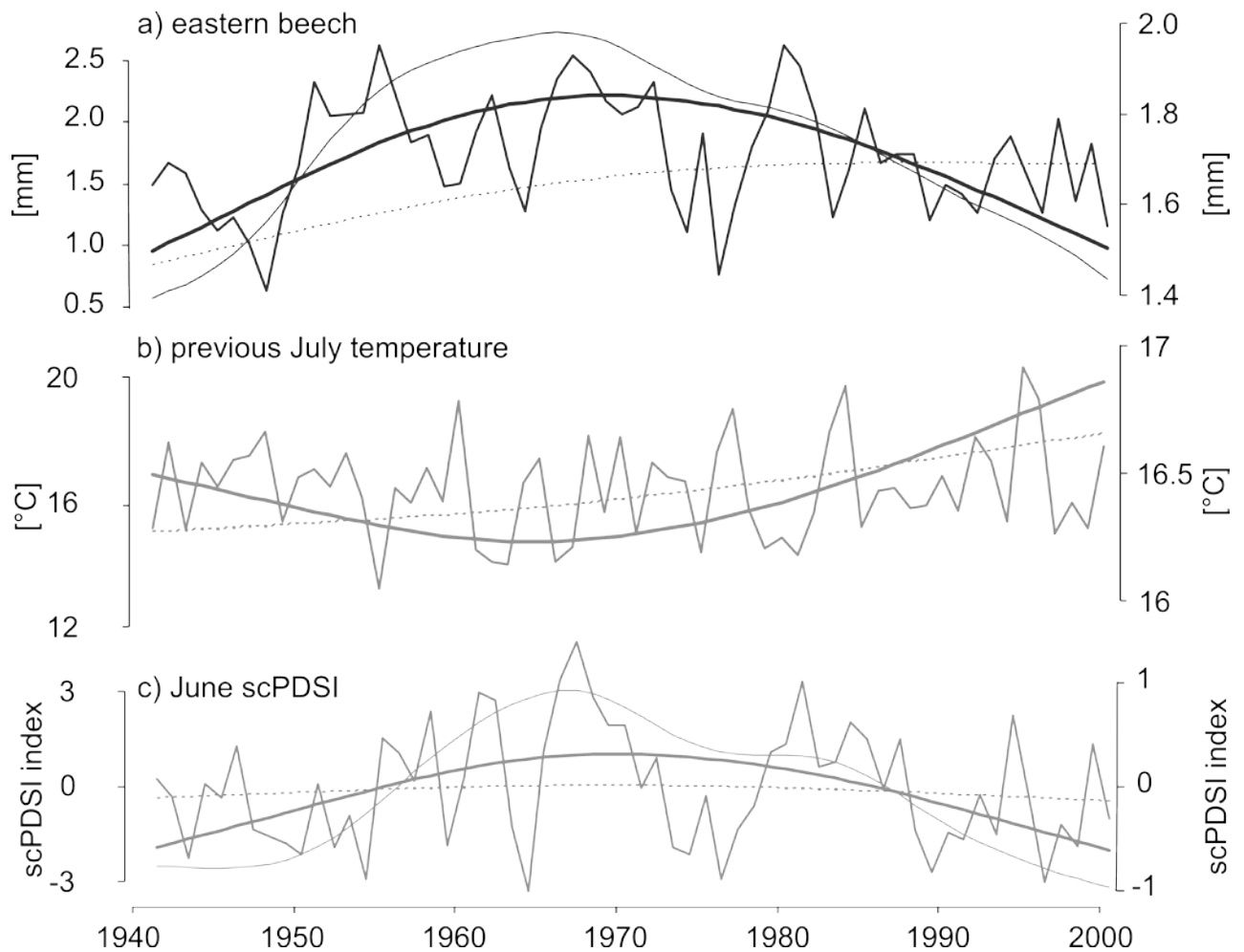


Fig. 4 Cluster-specific splines of the tree-ring data (eastern beech) and of the climate data (previous July temperature; June scPDSI) at different wavelengths as well as the corresponding raw series. Fine solid lines denote splines at 32 years, bold solid lines splines at 80 years, dashed lines splines at 150 years and solid lines represent the raw series. Axes are individually fitted to accentuate the course of the curves

While the splines show variations at different wavelengths, the general shape of the curve is similar (Fig. 4a, b, c). Eastern beech shows increasing growth until the end of the 1960s, followed by a decrease in growth over the second half of the time window (Fig. 4a). Only the spline at 150 years shows a delayed and weakened curve development. All splines of previous year July temperature, corresponding to the strongest negative temperature signal (Fig. 2d), show an almost exactly inverse trend to those of eastern beech (Fig. 4b). After an initial decrease, a minimal turning point during the mid-1960s can be detected, followed by a rising curve for the splines at 32 and 80 years; the spline at 150 years shows a steady increase. The splines of June scPDSI show a similar curve progression to those of eastern beech (Fig. 4c). All three splines increase until a maximum at the end of the 1960s, and then show a subsequent decrease.

3. Untersuchungen

Lowland oak splines show an overall declining curve progression (Fig. 5a). While the spline at 32-years shows variations with maxima at 1949, 1969, and 1984, the 80-year spline declines after a plateau from around 1950, and the spline at 150 years shows a permanent decrease.

Splines of spring T/P also show declining trends overall with a tendency to increase towards the end of the time window (Fig. 5b). From the mid-1970s, the 32-year T/P spline shows the inverse trend to that of the equivalent lowland oak spline, with a minimum at 1981. The spline at 80 years is slightly inverse from 1980 onwards, whereas the 150-year spline continuously declines showing a similar curve progression as the corresponding lowland oak spline.

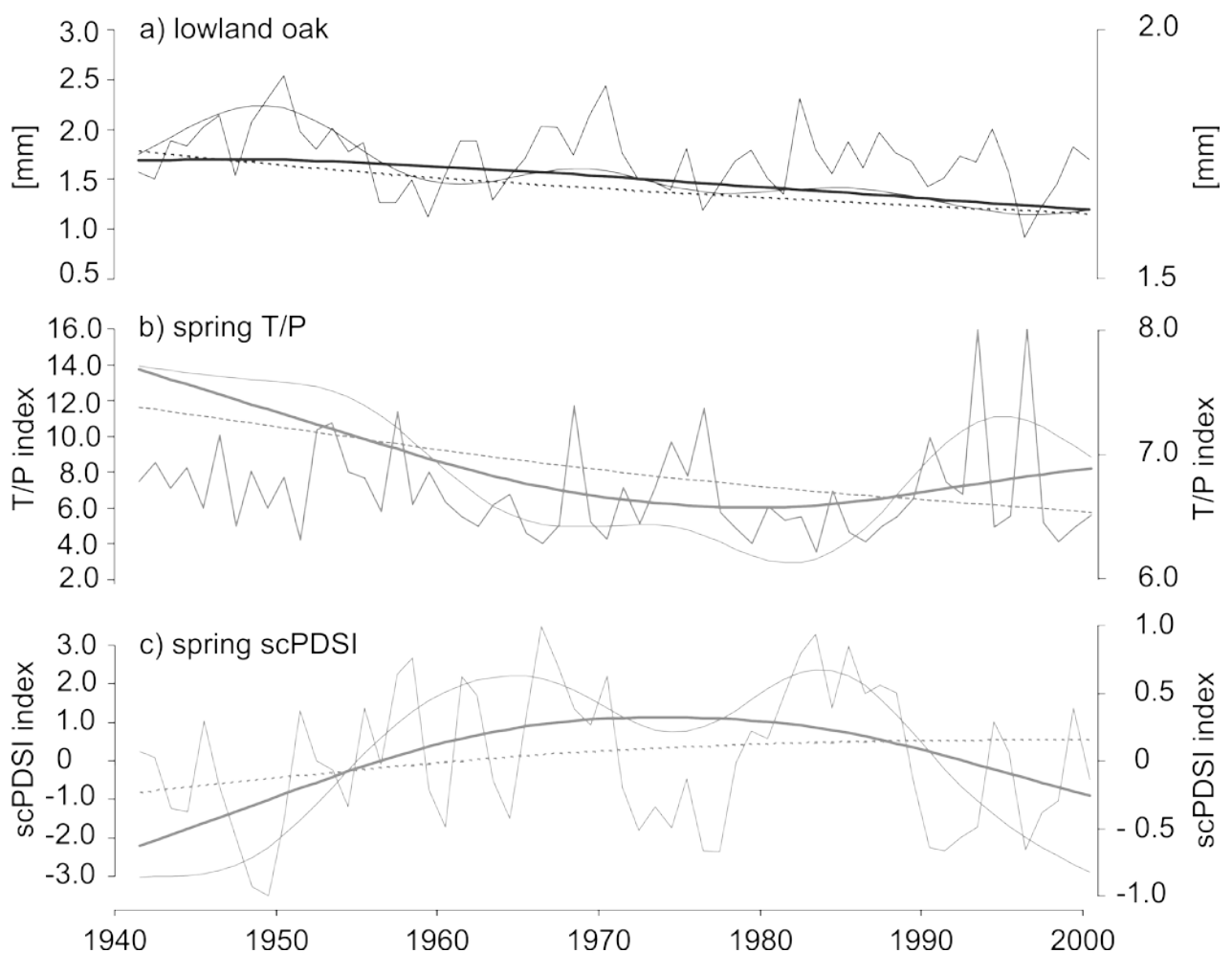


Fig. 5 Cluster-specific splines of the tree-ring data (lowland oak) and of the climate data (spring T/P; spring scPDSI) at different wavelengths as well as the corresponding raw series. Fine solid lines denote splines at 32 years, bold solid lines splines at 80 years, dashed lines splines at 150 years and solid lines represent the raw series. Axes are individually fitted to accentuate the course of the curves

3. Untersuchungen

The 32-year spring scPDSI spline shows two maxima, the first at 1964 and the second 1984, with a slightly lower point between in the mid-1970s (Fig. 5c). Thus, although there is a shifted curve progression when compared to the corresponding lowland oak spline, similar curves can be detected after the mid-1970s. Then the spline at 80 years also shows a comparable curve. The steadily increasing 150-year scPDSI spline and the declining 150-year lowland oak spline show a rather inverse course.

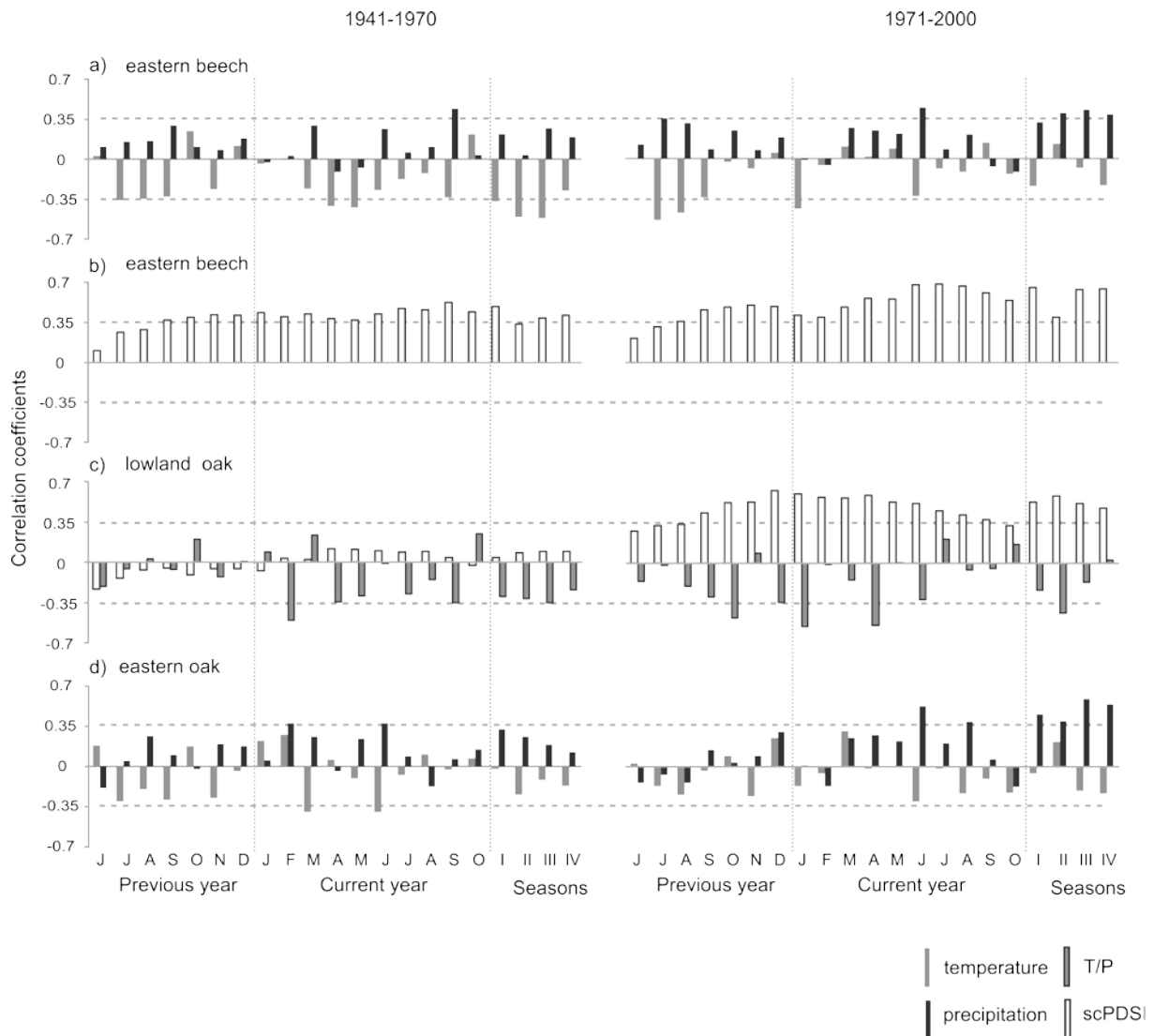


Fig. 6 Pearson's correlation coefficients for selected cluster-specific 32-year spline detrended tree-ring data and climate data as deviations of the 1961-1990 period over two 30-year time-windows for the months of the previous year June until current year October as well as for the periods I = current year, II = spring, III = growing season and IV = summer. Correlation values between tree growth and (6a, d) temperature and precipitation, (6b) scPDSI and (6c) T/P and scPDSI are shown. Dashed lines denote 95% significance levels.

3. Untersuchungen

30-year time windows (1941-1970 and 1971-2000)

In general, clusters show a development from more temperature controlled reactions in the time window 1941-1970 to predominantly precipitation controlled reactions in the time window 1971-2000 (Fig. 6a, d). Particularly in the beech, a change from stronger temperature to stronger precipitation signals in the current year can be detected (Fig. 6a). Consequently, correlations between clusters, temperature and precipitation that are significant in both of the time windows are rare. An example is the correlation between eastern beech and previous year July temperature. A strengthening of the previous year temperature signal is visible for all clusters simultaneously, with the exception of the eastern oak cluster in the second time window (Fig. 6a, d). Reactions to temperature are stronger in the previous year, whereas precipitation signals are more pronounced in the current year. Overall, correlation values for both T/P and scPDSI indices are higher in the 1971-2000 period (Fig. 6b, c). Whereas for eastern beech the correlations to scPDSI are predominantly significant in both of the time windows (Fig. 6b), lowland oak cluster shows no significant correlation to scPDSI in the 1941-1970 period (Fig. 6c). Despite there being significant correlations between lowland oak cluster and T/P in both time windows, none of them are stable over time. Overall, correlations between growth of all clusters and scPDSI are more stable over time when compared to those of temperature, precipitation and T/P ratio (not shown).

Discussion and conclusion

Seven clusters with specific interannual growth patterns were delimited in temperate forests of western Germany. This is an extension of the study of Friedrichs et al. (2009a) which classifies oak growth, and also adds to earlier detections of subsets showing similarities in growth (see Fischer and Neuwirth 2013). The composition of the clusters and their site-specific ecological features are similar to those described by Fischer and Neuwirth (2013) on the basis of growth anomalies. Deviating from this similarity is the eastern oak cluster which integrates all eastern-situated oak stands. Furthermore, no separate low mountain range clusters for Scots pine and spruce can be detected with regard to the interannual growth variations, while two Scots pine stands are classified into other species' clusters: site 64 into the eastern beech cluster, and site 67 into the low mountain range oak cluster (Table 1, Fischer and Neuwirth 2013).

Overall, climatic conditions in summer of the current year as well as previous year temperatures are crucial for tree growth in temperate forests (Fischer and Neuwirth 2012). Water availability is the most important influencing factor for tree growth, chiefly expressed

3. Untersuchungen

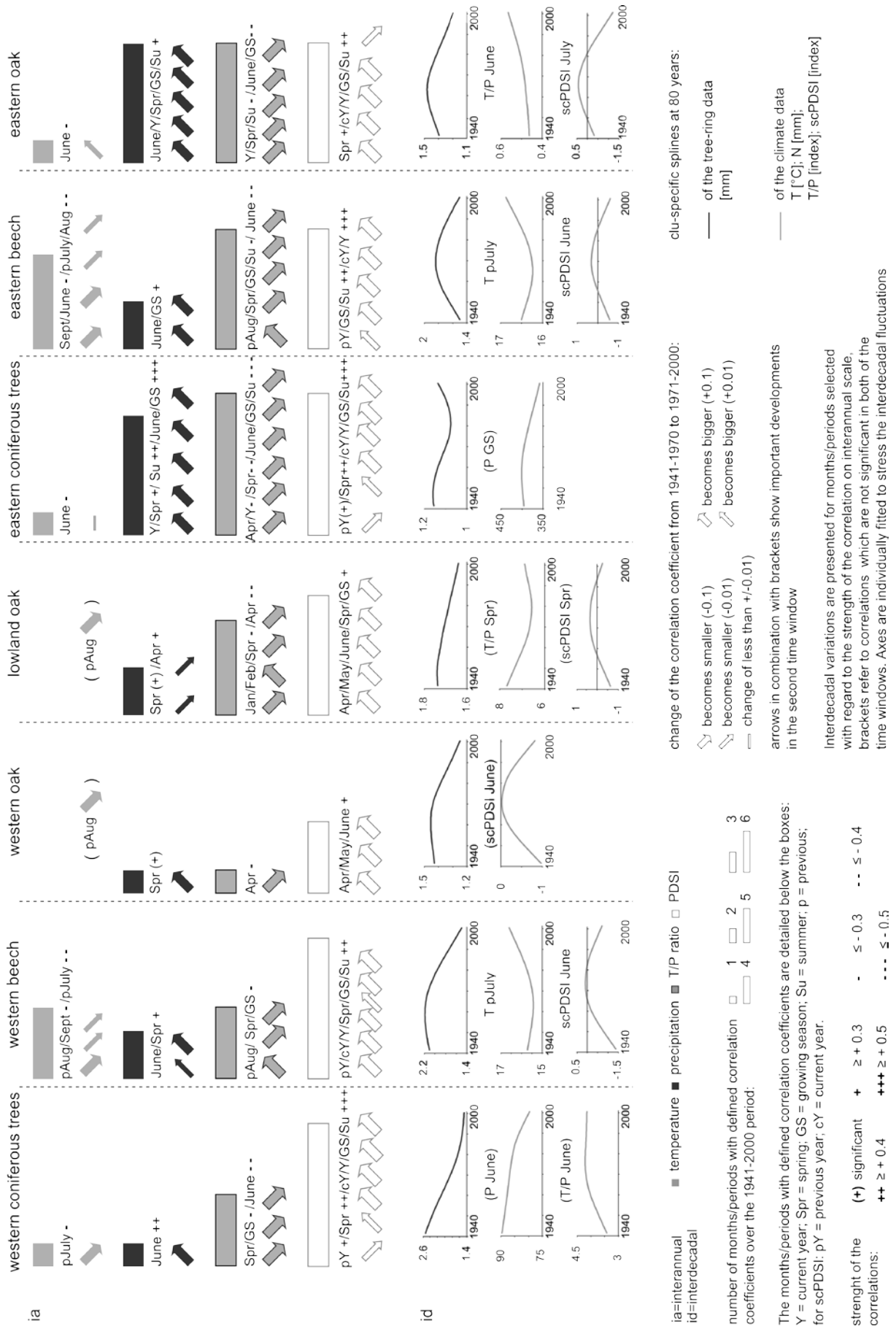


Fig. 7 A summary overview for cluster-specific reactions to climate on interannual and interdecadal scale.

3. Untersuchungen

by strong growth responses to scPDSI (Friedrichs et al. 2009b). These extend over several subsequent months, since the conditions of several previous months are involved by calculating the scPDSI values (Wells et al., 2004). Specific year-to-year growth reactions of the clusters to climate parameters are mainly differentiated by the species as well as by the location of the corresponding sites, regarding the degree of continentality. This complements the findings of Fischer and Neuwirth (2013), who reveal a complex system of forcing factors to be more important for growth anomalies than species affiliation, with the length of the growing season playing a major role. Only slight variations in interannual growth are effected by site ecological features, a fact that confirms earlier findings for growth anomaly patterns (Fischer and Neuwirth 2013). Stronger reactions to climate, especially to precipitation and both of the drought indices, were detected for the eastern clusters situated on the drier sites of the research area (Fig. 7).

Beech shows the strongest response to climate, especially to temperature, which is in line with the findings of Bonn (1998) for temperate forests of Germany. Drobyshev et al. (2010) proposed that the particularly negative influence of previous year temperatures on beech growth was connected to temperature-controlled masting behaviour of beech and the corresponding allocation of a higher amount of assimilates for the production of nuts in the following year. Water availability in early summer of the current year is also crucial for beech growth, as detected by Lebourgeois et al. (2005) for a wide variety of site conditions in France.

Growth of coniferous trees in temperate forests is also strongly influenced by climatic conditions as demonstrated by Zang et al. (2012) for Scots Pine and spruce in lower altitude regions of southern Germany, and is mainly controlled by water availability (Mäkinen et al. 2003) and precipitation (Kahle and Spiecker 1996).

The comparatively weak reactions to climate by western and lowland oaks, with the absence of negative correlations to temperature of these over the 1941-2000 period, are in line with the findings of Mérian et al. (2011) and Zang et al. (2012) who state that oaks show only weak reactions to temperature and their responses to precipitation are restricted to spring and early summer. This refers to the influence of water supply in spring when the early wood vessels are formed (Gonzalez and Eckstein 2003); this is further illustrated by the positive responses to spring scPDSI and the negative reactions to spring T/P ratio. Field studies conducted in a natural stand of pedunculate and sessile oak in France showed that oak was a drought-tolerant species because full photosynthetic capacity was maintained even after periods of strong drought stress (Epron and Dreyer 1993). Further indications of the drought tolerance of oak

3. Untersuchungen

are adaptations like deep rooting, as well as the maintenance of significant stomatal conductance, and significant transpiration, even during severe dehydration (Bréda et al. 1992). Interdecadal growth variations show an overall incremental decrease towards the end of the 20th century, with the exception of eastern coniferous trees (Fig. 7), supporting diverse statements about both decreasing (Dittmar et al. 2003) and predominantly increasing (Badeau et al. 1996) growth trends in Central Europe. Whereas the leaf trees, with the exception of the lowland oak, grow more slowly from the 1970s, the western coniferous trees and lowland oak show an overall continuous decrease. Similar to the declining growth found in our study for western and eastern beech and oak from the 1970s onwards, Jump et al. (2006) detected a rapid decline for beech, beginning in the mid-1970s. Interdecadal growth variations of these four clusters are clearly positively linked with summer moisture fluctuations. Additionally, beech is negatively influenced by previous year summer temperature, also shown on an interannual scale on the basis of predominantly high correlation coefficients (Fig. 7). Thus, since the 1970s decreasing June scPDSI, and for beech also simultaneously increasing previous year July temperature, most likely trigger growth decline of western and eastern deciduous tree clusters. Interdecadal growth variations of the coniferous clusters as well as those of the lowland oaks can only be weakly or temporarily linked to the decadal fluctuations of one specific climate parameter (Fig. 7) despite high correlation coefficients over the 1941-2000 period (Fig. 2, 3). While the interdecadal variations of the western needle trees are still comparable with the fluctuations of June precipitation and June T/P, long-term growth of the eastern coniferous trees can only be linked to the decreasing precipitation amount over the growing season prior to the early 1980s (Fig. 7). Subsequently increments increase despite the water availability declining further. Possible positive responses of lowland oak to scPDSI on an interdecadal scale can only be detected from 1970; negative influences of T/P could be visible from 1980. This may indicate that environmental conditions were too wet for lowland oaks growing on moist sites until at least 1970, supporting the findings of Oosterbaan and Nabuurs (1991) that soil water excess contributes to oak decline on hydromorphic soils throughout Europe. This would be in line with a strongly increasing precipitation until the mid-1980s followed by a slow decrease, and rising temperatures from the late 1960s onwards (not shown). Additionally, high precipitation amounts accompanied by high cloud cover and a lack of solar radiation, can reduce photosynthetic rates of the shadow intolerant oak (Laurance et al. 2009). Overall, these changing, ambiguous climate/growth responses are assumed to be caused by complex climate/growth relationships that are not stable over time (Fig. 4). Besides an overall decreasing growth response to temperature, as discussed in many dendroecological

3. Untersuchungen

studies for tree sites at high elevations and latitudes since the mid-20th century as a ‘divergence problem’ (see D’Arrigo et al. 2008), the influence of previous year summer temperatures becomes stronger within our study area. Simultaneously, stronger reactions to summer water availability in the current year could be detected, similar to that shown by Friedrichs et al. (2009b) for two regions of temperate forest in Germany, and Andreu et al. (2007) for coniferous trees in the Mediterranean area. An overall instability of climate/growth response was also reported by Mérian et al. (2011) for oak in Northern France. Wilson and Elling (2004) stress the importance of stable climate/growth relationships as a requirement for dendroclimatologic reconstructions in line with the uniformitarian principle applied in dendroclimatologic studies (Fritts 1976). Mérian et al. (2011) recommend taking cognisance of multi-decadal instabilities in climate/growth response, because these could constrain climate reconstructions (García-Suárez et al. 2009). García-Suárez et al. (2009) suggest, amongst others, that natural climate forcing and changing CO₂ levels act as triggers for this phenomenon.

Less evident relationships can also be found for eastern oak and T/P June, although significant correlations in both of the 30 year time windows were detected (not shown). Only from the end of the 1960s do eastern oak and T/P June decadal variations begin to show an inverse course. We assume soil moisture conditions to be more important for the long-term growth of eastern oak compared to the T/P ratio which refers to changed climate/growth relationships on interdecadal compared to interannual scales. This is in line with the findings of Kahle et al. (2008) who also detected changes concerning influencing factors on forest growth between long-term and short-term variations.

Our study reveals complex climate/growth relationships in temperate forests. These are mainly forced by the tree species and the grade of continentality, and also change over time despite high correlation coefficients for interannual fluctuations. Besides a time lag between a temperature signal predominantly in the previous year and a precipitation signal dominating in the current year, a temporal shift from a more temperature-controlled to a precipitation-controlled growth is found. As a consequence, interdecadal growth variations cannot always be explained by the fluctuations of one climate parameter. Furthermore, growth variations of different wavelengths are not automatically influenced by similar climate parameters.

Our results clearly reveal complex and changing climate/growth relationships affecting climate reconstructions of temperate forests. These findings should be necessarily taken into account when reconstructing climate parameters for temperate forests. Following the

3. Untersuchungen

detection of high climatic signals in tree growth the authors recommend proving their stability over time to guarantee, as far as possible, a reliable climate/growth relationship.

Acknowledgements

We thank Dr. M. Rööös (Nationalpark Eifel), A. Frede (Nationalpark Kellerwald-Edersee), and U. Schulte (Landesbetrieb Wald und Holz NRW) for their helpful cooperation with regard to the field work and the necessary research permits.

References

- Andreu L, Gutiérrez E, Macias M, Ribas M, Bosch O, Camarero JJ (2007) Climate increases regional tree-growth variability in Iberian pine forests. *Glob Change Biol* 13:804–815
- Badeau V, Becker M, Bert D, Dupouey J (1996) Long-term growth trends of trees: ten years of dendrochronological studies in France. In: Spiecker H, Mielikäinen K, Köhl M, Skovsgaard J (eds) *Growth trends in European forests: studies from 12 countries*. European forest institute research report, Springer Verlag, Berlin, pp 167-181
- Bonn S (1998) *Dendroökologische Untersuchung der Konkurrenzdynamik in Buchen/Eichen-Mischbeständen und zu erwartende Modifikationen durch Klimaänderungen*. Dissertation, Forstwissenschaftliche Beiträge Tharandt, Dresden
- Bréda N, Cochard H, Dreyer E, Granier A (1992) Water transfer in a mature oak stand (*Quercus patraea*): seasonal evolution and effects of a severe drought. *Can. J. For. Res.* 23: 1136-1143
- Briffa KR, Jones PD (1990) Basic chronology statistics and assessment. In: Cook ER, Kairiukstis LA (eds) *Methods of dendrochronology: applications in the environmental sciences*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp 137-152
- Cook ER, Peters K (1981) The smoothing spline: a new approach to standardizing forest interior tree-ring width series for dendroclimatic studies. *Tree-Ring Bull* 41:45–53
- Cook ER (1985) *A time series analysis approach to tree-ring standardization*. Dissertation, University of Arizona, Tucson
- Christensen JH, Hewitson B, Busuioc A, Chen A, Gao X, Held I, Jones R, Kolli RK, Kwon W-T, Laprise R, Magana Rueda V, Mearns L, Menéndez CG, Räisänen J, Rinke A, Sarr A, Whetton P (2007) Regional climate projections. In: Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt KB, Tignor M, Miller HL (eds) *Climate Change 2007. The physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge University Press, Cambridge, pp 847–941
- D’Arrigo R, Wilson R, Liepert B, Cherubini P (2008) On the ‘Divergence Problem’ in northern forests: a review of the tree-ring evidence and possible causes. *Glob Planet Change* 60:289–305
- Dittmar C, Zech W, Elling W (2003) Growth variations of common beech (*Fagus sylvatica* L.) under different climatic and environmental conditions in Europe—a dendroecological study. *For Ecol Manage* 173:63–78
- Drobyshev I, Övergaard R, Saygin I, Niklasson M, Hickler T, Karlsson M, Sykes MT (2010) Masting behaviour and dendrochronology of European beech (*Fagus sylvatica* L.) in southern Sweden. *For Ecol Manage* 259:2160–2171

3. Untersuchungen

- Ellenberg H (1996) Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen. In ökologischer, dynamischer und historischer Sicht. Ulmer, Stuttgart
- Epron D, Dreyer E (1993) Long-term effects of drought on photosynthesis of adult oak trees. *Q. petraea* (Matt) Liebl. and *Q. robur* L. in a natural stand. *New Phytol* 125:381–389
- Esper J, Neuwirth B, Treydte K (2001) A new parameter to evaluate temporal signal strength of tree ring chronologies. *Dendrochronologia* 19:93-102
- Esper J, Gärtner H (2001) Interpretation of tree-ring chronologies. *Erdkunde* 55:277-288
- Esper J, Shiyatov SG, Mazepa VS, Wilson RJS, Graybill DA, Funkhouser G (2003) Temperature-sensitive Tien Shan tree ring chronologies show multi-centennial growth trends. *Climate Dynamics* 21:699–706
- Fischer S, Neuwirth B (2012) Klimasensitivität der Douglasie in Eifel und Kellerwald. *Allg Forst- u J-Ztg* 183:23-33
- Fischer S, Neuwirth B (2013) Vulnerability of Trees to Climate Events in Temperate Forests of West Germany. *ISRN Forestry*. doi:10.1155/2013/201360
- Friedrichs DA, Büntgen U, Esper J, Frank DC, Neuwirth B, Löffler J (2009a) Complex climate controls on 20th century oak growth in central-west Germany. *Tree Physiol* 29:39–51
- Friedrichs DA, Trouet V, Büntgen U, Frank DC, Esper J, Neuwirth B, Löffler J (2009b) Species-specific climate sensitivity of tree growth in Central-West Germany. *Trees - Struct Funct* 23: 729-739
- García-Suárez AM, Butler CJ, Baillie M (2009) Climate signal in tree-ring chronologies in a temperate climate: a multi-species approach. *Dendrochronologia* 27:183–198
- Gonzalez IG, Eckstein D (2003) Climatic signal of earlywood vessels of oak on a maritime site. *Tree Physiol* 23:497–504
- Hansen J, Sato M, Ruedy R, Lo K, Lea DW, Medina-Elizade M (2006) Global temperature change. *Proc Natl Acad Sci* 103:14288-14293
- Holmes RL (1983) Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bull* 43: 69-78
- Hurrell JW, Kushnir Y, Ottersen G, Visbeck M (2003) An overview of the North Atlantic Oscillation. *Geophys Monogr* 134:1–35
- Jongman RHG, ter Braak CJF, van Tongeren OFR (1987) Data analysis in community and landscape ecology. Centre for Agricultural Publishing and Documentation, Wageningen
- Jump AS, Hunt JM, Peñuelas J (2006) Rapid climate change-related growth decline at the southern range edge of *Fagus sylvatica*. *Glob Chang Biol* 12:2163-2174
- Kahle H-P, Spiecker H (1996) Adaptability of radial growth of Norway spruce to climate variations: results of a site specific dendroecological study in high elevations of the Black Forest (Germany). *Radiocarbon* 38:785–801
- Kahle HP, Karjalainen T, Schuck A, Ågren GI, Kellomäki S, Mellert KH, Pritzel J, Rehfuss KE, Spiecker H (eds) (2008) Causes and Consequences of Forest Growth Trends in Europe – Results of the RECOGNITION Project. Brill, Leiden
- Laurance SGW, Laurance WF, Nascimento HEM, Andrade A, Fearnside PM, Rebello ERG, Condit R (2009) Long-term variation in Amazon forest dynamics. *J Veg Sci* 20:323–333
- Lebourgeois F, Breda N, Ulrich E, Granier A (2005) Climate–tree-growth relationships of European beech (*Fagus sylvatica* L.) in the French Permanent Plot Network (RENECOFOR). *Trees - Struct Funct* 19:385–401

3. Untersuchungen

- Lebourgeois F, Rathgeber CBK, Ulrich E (2010) Sensitivity of French temperate coniferous forests to climate variability and extreme events (*Abies alba*, *Picea abies* and *Pinus sylvestris*). *J Veg Sci* 21:364–376
- Luysaert S, Detlef Schulze E, Börner A, Knohl A, Hessenmöller D, Law BE, Ciais P, Grace J (2008) Old-growth forests as global carbon sinks. *Nature* 455:213-215
- Mäkinen H, Nöjd P, Kahle H-P, Neumann U, Tveite B, Mielikäinen K, Röhle H, Spiecker H (2003) Large-scale climatic variability and radial increment variation of *Picea abies* (L.) Karst. in central and northern Europe. *Trees – Struct Funct* 17:173-184
- Mérian P, Bontemps JD, Bergès L, Lebourgeois F (2011) Spatial variation and temporal instability in climate-growth relationships of sessile oak (*Quercus petraea* [Matt.] Liebl.) under temperate conditions. *Plant Ecol* 212:1855-1871
- Meyn A, Schmidtlein S, Taylor SW, Girardin MP, Thonicke K (2010) Spatial variation of trends in wildfire and summer drought in British Columbia, Canada, 1920-2000. *Int J Wildland Fire* 19: 272-283
- Mitchell TD, Jones PD (2005) An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. *Int J Climatol* 25: 693-712
- Müller-Westermeier G (1998) Numerical production of climatic maps for parameters with significant correlation to topography. – Klimastatusbericht, DWD: 82-85
- Neuwirth B, Schweingruber FH, Winiger M (2007) Spatial patterns of central European pointer years from 1901 to 1971. *Dendrochronologia* 24: 79-89.
- Neuwirth B (2010) Interannuelle Klima-Wachstums-Beziehungen zentraleuropäischer Bäume von AD 1901 bis 1971. Dissertation, Bonn Geogr Abh, Bonn
- Neuwirth B (2011) Jahrringe als Indikator für Klima- und Umweltveränderungen in Mitteleuropa. *Passauer Kontaktstud Geogr* 11: 67-78
- Oosterbaan A, Nabuurs GJ (1991) Relationships between oak decline and groundwater class in The Netherlands. *Plant Soil* 136:87–93
- Rinn F (2003) TSAP-Win: Time series analysis and presentation for dendrochronology and related applications. Version 0.53 for Microsoft Windows. User Reference. Rinntech Heidelberg, Heidelberg
- Schultz J, Neuwirth B (2012) A new atmospheric circulation tree-ring index (ACTI) derived from climate proxies: Procedure, results and applications. *Agricul Forest Meteorol* 164: 149-160
- Schweingruber FH (1996) Tree rings and environment - dendrochronology. Haupt, Bern
- Schweingruber FH, Nogler P (2003) Synopsis and climatological interpretation of Central European tree-ring sequences. *Bot Helv* 113:125-143
- Spiecker H (2003) Silvicultural management in maintaining biodiversity and resistance of forests in Europe - temperate zone. *J Environ Manage* 67:55-65
- Wells N, Goddard S, Hayes MJ (2004) A self-calibrating Palmer drought severity index. *J Clim* 17:2335–2351
- Wigley TML, Briffa KR Jones PD (1984) On the average of value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. *J Clim Appl Meteorol* 23:201-213
- Wilson R, Elling W (2004) Temporal instability in tree-growth/climate response in the Lower Bavarian Forest region: implications for dendroclimatic reconstruction. *Trees – Struct Funct* 18:19-28
- Zang C, Pretzsch H, Rothe A (2012) Size-dependent responses to summer drought in Scots pine, Norway spruce and common oak. *Trees – Struct Funct* 26:575-569

4. Diskussion

4.1 Material und Methoden

Der dieser Studie zugrunde liegende dendroökologische Datensatz enthält ungleiche Mengenanteile der beprobten Baumarten. Dies ist auf die in Kapitel 2.1 erläuterten Gründe, nämlich die primäre Lage der Beprobungsflächen in Schutzgebieten zurückzuführen. Diese Problematik wurde bereits von Neuwirth (2010) thematisiert. Seitdem ist der Datensatz im Rahmen der zur Verfügung stehenden Beprobungsflächen um zusätzliche Nadelbaumstandorte ergänzt worden, doch das Ungleichgewicht konnte nicht behoben werden. Dies wirkt sich, wie im weiteren Verlauf dieses Kapitels beschrieben wird, für die Nadelbaumarten restriktiv auf die Analyseergebnisse aus. Für Fichte, Kiefer und Douglasie gilt dies im Hinblick auf die Ausdifferenzierung von Wuchstypen im Raum, für die Douglasie auch für die Repräsentativität der Analyseergebnisse.

Im Rahmen dieser Studie konnten für einen Multi-Spezies-Datensatz aus temperierten Wäldern auf regionaler Skala mittels neuartiger Methodenkombinationen Wuchstypen definiert werden, die sich durch homogene Wachstumsmuster für Variationen unterschiedlicher zeitlicher Skalen auszeichnen (Kapitel 3.2 und 3.3). Dies stellt eine Weiterentwicklung zu Neuwirth (2007a) und Friedrichs et al. (2009b) dar. So konnte Neuwirth (2007a) basierend auf seinem großräumig angelegten Netzwerk nur überregionale Wachstumsmuster finden. Die Gruppierungen von Standorten mit ähnlichen Wachstumsmustern von Friedrichs et al. (2009b) wurden ausschließlich für die Eiche durchgeführt. Bei beiden Untersuchungen erfolgte keine Berücksichtigung von Variationen unterschiedlicher zeitlicher Skalen bei der Definition von Standortgruppen mit ähnlichen Wachstumsmustern.

Der in dieser Studie (Kapitel 3.2 und 3.3) angewendete wuchsspezifische Ansatz ermöglichte die Aufspürung von die Klima/Wachstumsbeziehungen steuernden Faktoren die wichtiger als die Baumart sind. Dies ist im Rahmen des üblicherweise angewendeten artspezifischen Ansatzes (z.B. Michelot et al., 2012), der als wichtigsten Steuerfaktor für die Klima/Wachstumsbeziehungen die Baumart voraussetzt, nicht möglich. Die Faktoren selbst werden beim artspezifischen Ansatz zwar auch gefunden, doch ihre übergeordnete Bedeutung kann nicht erfasst werden.

Der im Rahmen dieser Studie gewählte Untersuchungszeitraum der, wie von Neuwirth (2010) empfohlen, über das von ihm untersuchte Zeitfenster bis 1971 hinausgeht, ermöglicht die Untersuchung der Auswirkungen klimatischer Änderungen auf das Baumwachstum. Dies

4. Diskussion

wurde auch von Friedrichs (2008) umgesetzt. In Weiterentwicklung zu ihren Arbeiten erfolgte in dieser Studie die gezielte Auswahl von drei Zeitfenstern, einem längeren, 60-jährigen Zeitraum und zwei kürzeren, 30-jährigen Zeitfenstern. Diese decken in etwa die Phase vor und nach einem Wendepunkt in den klimatischen Reihen, wie Temperatur und scPDSI (Kapitel 3.3 und Kapitel 4, Abb. 7: interdekadische Variationen), ab. Dadurch lassen sich zeitlich noch differenziertere, und statistisch abgesicherte, Analyseergebnisse erzielen.

Mit dieser Studie wird der von Friedrichs (2008) formulierten Forderung weiterer Langzeitanalysen in temperierten Waldgebieten zur Verbesserung des Verständnisses der komplexen Klima/Wachstumsbeziehungen und Auswirkungen des Klimawandels auf das Baumwachstum unter Berücksichtigung des aktuellen Forschungsstands nachgekommen.

Die Klima/Wachstumsbeziehungen werden für artspezifische (Kapitel 3.1) und wuchsspezifische (Kapitel 3.2 und 3.3) Gruppen untersucht. Die Douglasien wurden aufgrund der geringen Standortzahl nicht in die wuchsspezifischen Analysen mit einbezogen. Jedoch wurden die in Kapitel 3.2 und 3.3 angewendeten Analysen der Klima/Wachstumsbeziehungen für die Diskussion auch für die Douglasie, separat für den westlichen und östlichen Standort, durchgeführt (Abb. 7).

4.2 Klima/Wachstumsbeziehungen

Generell konnten Wuchsreaktionen auf die klimatischen Bedingungen im Wuchsjahr, sowie die Vorjahrestemperaturen im Untersuchungsgebiet gefunden werden (Kapitel 3.1, 3.2, 3.3), die auf Basis der Resultate vorheriger dendroökologischer Studien (Bonn, 1998; Neuwirth, 2007b; Friedrichs, 2009c; Zang et al., 2011) als typisch für heimische Baumarten in temperierten Wäldern eingeordnet werden können. Dabei wirken sich in der Regel die Temperatur und der T/N-Index negativ, die Niederschläge und scPDSI positiv auf das Baumwachstum aus (Abb. 7). Die wuchsspezifischen Analysen in Kapitel 3.2 und 3.3 führen jedoch zu deutlich differenzierteren Aussagen, bezüglich der Klima/Wachstumsbeziehungen definierter Wuchstypen und deren Wuchspotenzialen unter sich ändernden Klimabedingungen.

Im Rahmen dieser Studie können erstmals Wuchstypen gefunden werden, die einheitliche Reaktionen auf klimatische Variationen unterschiedlicher Frequenzen zeigen.

Die nach wuchsspezifischen Kriterien auf Basis der Extremjahre und der Jahr-zu-Jahr-Variationen gebildeten Gruppen stimmen in Bezug auf ihre Standortzusammensetzung weitgehend überein (Kapitel 3.2, 3.3). Lediglich die Nadelbaumstandorte zeigen unterschiedliche Gruppenzugehörigkeiten. Insgesamt ergeben sich daraus sieben Wuchstypen,

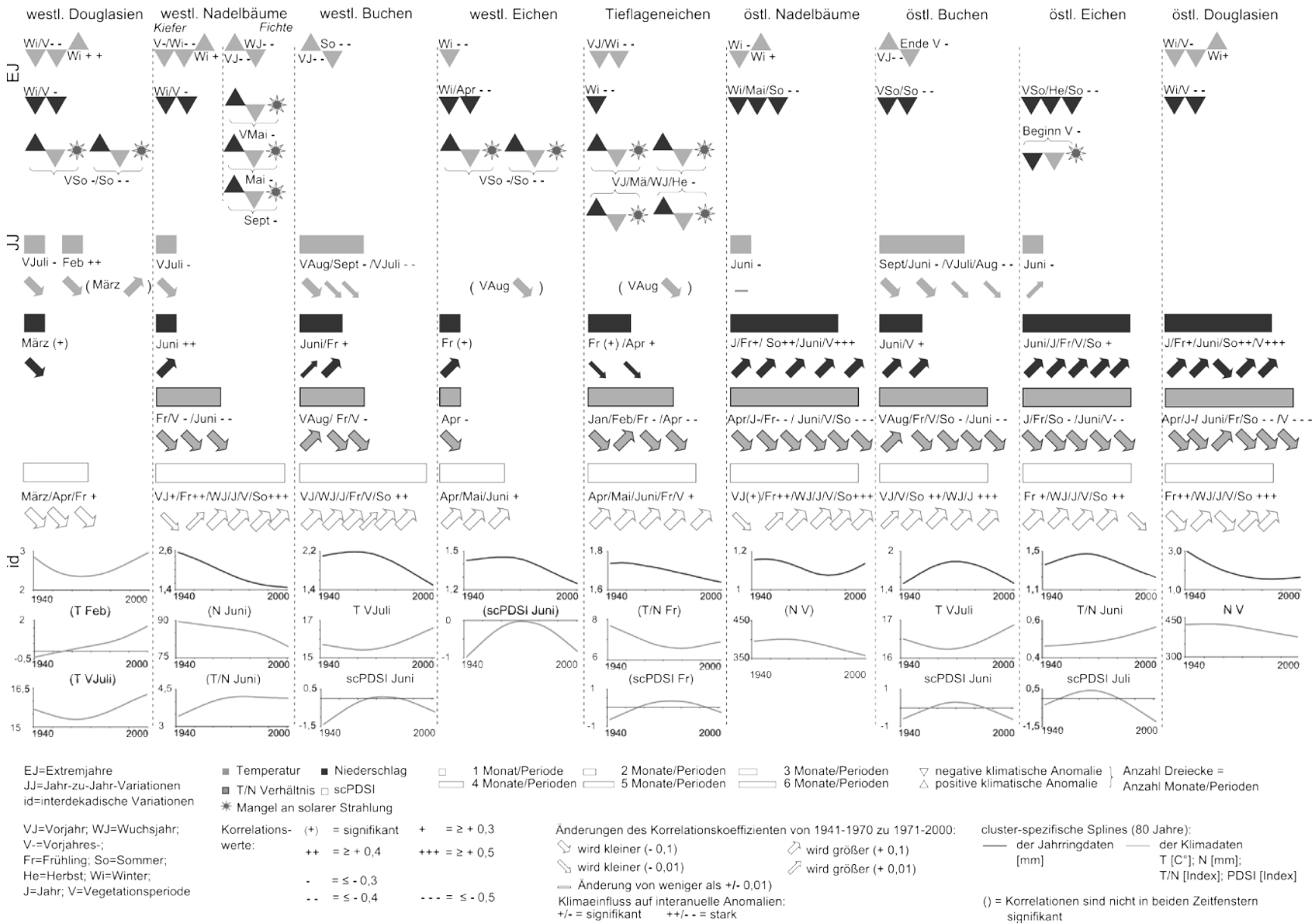


Abb. 7: Übersicht über die Klima/Wachstumsbeziehungen der Wuchstypen im westdeutschen Mittelgebirgsraum ergänzt um die Douglasie

4. Diskussion

von denen die westliche Nadelbaumgruppe auf Ebene der Extremjahre zwei artspezifische Teilgruppen ausbildet, eine Kiefern – und eine Fichtengruppe (Abb. 7).

Die Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass die Unterschiede in den Klima/Wachstumsbeziehungen auf unterschiedlichen Wellenlängen durch verschiedene Steuerfaktoren differenziert werden. Während auf Basis der Jahr-zu-Jahr-Variationen die Baumart zusammen mit dem Kontinentalitätsgrad der Standorte die wichtigsten trennenden Kriterien sind (Kapitel 3.3), wird das Reaktionsmuster in Bezug auf die Extremjahre stärker von einem komplexen System an Faktoren, wie dem Kontinentalitätsgrad und insbesondere der Länge der Vegetationsperiode gesteuert (Kapitel 3.2). Dies ist eine Weiterentwicklung zu den Aussagen von Neuwirth et al. (2007b), die zeitlich versetzte Wuchsreaktionen auf gleiche klimatische Ereignisse artspezifisch erklären. Damit konnte gleichzeitig herausgestellt werden, dass die Baumart nicht immer der wichtigste Steuerfaktor für die Klima/Wachstumsbeziehungen ist.

Im Rahmen dieser Studie konnte insgesamt, insbesondere für das Wuchsjahr, eine zunehmende Abhängigkeit der Wuchstypen von der Wasserverfügbarkeit in Folge der klimatischen Änderungen festgestellt werden. Dies zeigt sich in einer Verstärkung der korrelativen Zusammenhänge zwischen Baumwachstum und Niederschlag, scPDSI und dem T/N-Index bei nahezu allen Wuchstypen (Abb. 7). Eine zunehmende Dürreempfindlichkeit wird von Friedrichs et al. (2009c) als eine Folge des Erwärmungstrends der letzten Dekaden beurteilt.

Gleichzeitig konnte eine Verstärkung der negativen Wuchsreaktionen auf die Vorjahrestemperatur für alle westlichen Wuchstypen, die Eichen der Tieflagen und die östlichen Buchen gefunden werden.

Die Analysen ergeben generell stärkere Abhängigkeiten von der Wasserverfügbarkeit in dem als etwas kontinentaler einzustufenden, östlichen Teil des Untersuchungsgebietes (Abb. 7). Dies erweitert die von Friedrichs et al. (2009c) getätigten Aussagen für zwei regional begrenzte Waldgebiete auf eine regional vernetzte Skala.

Die Buche zeigt im Untersuchungsgebiet insgesamt die stärksten Reaktionen auf klimatische Bedingungen, besonders auf die Temperatur, was im Einklang mit den Befunden von Bonn (1998) für Buchen in temperierten Wäldern steht. Im Rahmen dieser Studie konnte jedoch herausgestellt werden, dass sie sich im östlichen Teil des Untersuchungsgebiets als weniger

4. Diskussion

empfindlich gegenüber Trockenstress als alle anderen östlichen Wuchstypen zeigt. Der negative Einfluss von Hitze und Trockenheit im Vorjahressommer und im Sommer des Wuchsjahres spiegelt sich in den Wuchsvariationen aller Wellenlängen und über den gesamten Untersuchungszeitraum wider (Abb. 7).

Die Befunde dieser Studie zeigen, dass die Reaktionen der Eiche auf klimatische Bedingungen sehr differenziert für die verschiedenen Wuchstypen zu betrachten sind (Kapitel 3.2 und 3.3). Darauf basierend ist die Aussage von Friedrichs (2008), dass die Traubeneiche im Vergleich mit Stieleiche, Buche und Kiefer besser geeignet ist um mit den klimatischen Veränderungen zurecht zu kommen und sie nur schwach auf klimatische Bedingungen reagiert (Mérian et al., 2011), zu modifizieren. So können die östlich gelegenen Eichen in Bezug auf die Stärke und Dauer der Abhängigkeit von der Wasserverfügbarkeit zwischen die besonders trockenheitsempfindlichen östlich gelegenen Nadelhölzer und Buchen eingereiht werden. Es lässt sich eine Steuerung der Wuchsvariationen aller Wellenlängen durch die Wasserverfügbarkeit im Sommer des Wuchsjahres feststellen (Abb. 7). Die starke klimatische Beeinflussung des Wachstums der östlichen Eichengruppe zeigt sich bei den Wuchsanomalien auch durch die ausgeprägte Homogenität der Reaktionen, die sogar stärker ist als die der Buchengruppen (Kapitel 3.2). Die westlich gelegenen Eichen und die Eichen der Tieflagen zeigen deutlich schwächere Reaktionen auf klimatische Einflüsse. Ausreichende Niederschläge sind für diese nur im Frühling wichtig, so dass sich eine Abnahme sommerlicher Niederschläge nicht wuchshemmend auswirken wird (Kapitel 3.2 und 3.3; Abb. 7).

Weiterhin konnte gezeigt werden, dass das Wachstum der Nadelbaumgruppen überwiegend von der Wasserverfügbarkeit gesteuert wird. Dies steht im Einklang mit den Ergebnissen von Zang et al. (2012), die die Bedeutung der Wasserverfügbarkeit in Frühling und Sommer für das Wachstum von Kiefern und Fichten betonen. Dies gilt besonders für die kontinentaler gelegene Nadelbaumgruppe, die am stärksten von allen Gruppen abhängig von der Wasserverfügbarkeit ist (Abb. 7). Die Fichte zeigt sich in der artspezifischen Analyse als besonders empfindlich gegenüber abnehmenden sommerlichen Niederschlägen (Kapitel 3.1). Dazu passen Aussagen von Zang et al. (2012), die die Fichte als empfindlicher auf das Klima reagierende Baumart im Vergleich zur Kiefer beschreiben. Milde Winter wirken sich auf Basis der Wuchsanomalien positiv auf das Wachstum der Nadelbaumgruppen aus. Für die westlichen Douglasien zeigt sich dieser wuchsfördernde Einfluss für die Wuchsvariationen aller Frequenzen (Abb. 7). Im Westen des Untersuchungsgebietes ist dieser nur für die

4. Diskussion

Kieferngruppe zu finden, was die Ergebnisse der artspezifischen Analyse (Kapitel 3.1) bestätigt. Für die Fichtengruppe konnte keine wuchsfördernde Wirkung milder Winter gezeigt werden, die nach Neuwirth (2010) bei der Fichte nur im Zusammenhang mit zu Beginn der Vegetationsperiode ausreichend vorhandener Feuchtigkeit steht.

Die Resultate dieser Studie zeigen, dass die Douglasie im Vergleich zu den heimischen Baumarten gute Wuchspotenziale hat, um mit den klimatischen Veränderungen zurecht zu kommen. Dies erklärt sich durch ihre weitgehende Unempfindlichkeit gegenüber überdurchschnittlich hohen Temperaturen (Kapitel 3.1 und Kapitel 4, Abb. 7). Ein positiver Einfluss steigender Temperaturen lässt sich insbesondere für die westlichen Douglasien mit einiger Sicherheit annehmen. Dies lässt sich aus der generell wuchsfördernden Wirkung von milden Wintern, sowie dem positiven Einfluss der Vorjahres-Juli-Temperatur auf interdekadischer Ebene ableiten (Abb. 7). Der Wasserbedarf der Douglasie ist sowohl im Westen als auch im Osten des Untersuchungsgebiets als vergleichbar mit dem der heimischen Baumarten einzustufen (Kapitel 3.1 und Kapitel 4, Abb. 7). Ihre Dürreempfindlichkeit ist verglichen mit der Fichte deutlich geringer (Kapitel 3.1), was die Douglasie zu einer geeigneten Ersatzbaumart für die Fichte macht (Proença Vasconcelos, 2013). Die guten Wuchspotenziale der Douglasie unter sich ändernden Klimabedingungen bestätigen sich durch die in den 1960er Jahren einsetzende Wuchsbeschleunigung der westlichen Douglasien auf interdekadischer Ebene (Abb. 7).

Während bisherige Studien gezeigt haben, dass die Klima/Wachstumsbeziehungen in temperierten Wäldern komplex sind und es Änderungen dieser Beziehungen über die Zeit gibt (Wilson & Elling, 2004; Friedrichs, 2008; Mérian et al., 2011), konnten in dieser Studie die Komplexitäten erstmals benannt werden. Während es auf Ebene der Jahr-zu-Jahr-Variationen einen zeitlichen Versatz zwischen einem Temperatursignal im Vorjahr und einem Niederschlagssignal im Wuchsjahr gibt, erfolgt über die Zeit eine Verschiebung von stärkerer Temperatur- zu vermehrter Niederschlagssteuerung des Baumwachstums (Kap. 3.3). Die Einflüsse von Niederschlag, T/N-Index und scPDSI werden stärker bei einer gleichzeitigen Intensivierung des Vorjahrestemperatursignals (Abb. 7). Stabile signifikante Zusammenhänge über die Zeit, die eine Voraussetzung für Klimarekonstruktionen darstellen (Wilson & Elling, 2004), sind folglich eher selten zu finden, wie z.B. die zwischen der östlichen Buchengruppe und der Vorjahres-Julitemperatur oder dem Juni scPDSI (Abb. 7). Aufgrund dieser zeitlichen Instabilitäten können interdekadische Wuchsvariationen nicht immer durch die Fluktuationen eines Klimaparameters erklärt werden, sondern sind die Folge eines komplexen

4. Diskussion

Wirkungsgefüges mehrerer klimatischer Einflussfaktoren (Kapitel 3.3). Dies zeigt sich z.B. für die östlichen Nadelbäume (Abb. 7). Die von Friedrichs (2008) diskutierten Überlegungen, die Kiefer aufgrund ihrer starken Korrelationen zum Klima für Rekonstruktionen zu verwenden, sind neben den von ihr angeführten Problemen, wie z.B. eines weitgehend nicht vorhandenen historischen Materials, nun noch kritischer zu sehen.

Die zeitlichen Instabilitäten in den Klima/Wachstumsbeziehungen erschweren Klimarekonstruktionen und Modellierungen anhand von Jahrringserien temperierter Wälder.

Ein weiterer Befund dieser Studie ist, dass im Einklang mit Aussagen von Kahle et al. (2008) Wuchsvariationen unterschiedlicher Wellenlängen nicht automatisch von den gleichen klimatischen Parametern verursacht werden. Dies zeigt sich z.B. in der wuchshemmenden Wirkung hoher Niederschlagsmengen in Kombination mit niedrigeren Temperaturen und einem Mangel an Solarstrahlung. Diese ist, klar erkennbar, nur auf Ebene der Extremjahre zu finden, was sich überwiegend bei westlichen Wuchstypen und besonders bei den Tieflageneichen zeigt (Kapitel 3.3 und Kapitel 4, Abb. 7).

Ein weiteres Beispiel ist der bei der östlichen Eichengruppe zwar auf Ebene der Jahr-zu-Jahr-Variationen vorhandene Einfluss des T/N-Indexes, der sich aber nicht in den interdekadischen Variationen widerspiegelt (Kapitel 3.3).

Hinzu kommt außerdem die unterschiedliche Auswirkung gleicher klimatischer Parameter auf Wuchsvariationen unterschiedlicher Frequenzen. So zeigt sich bei der westlichen Douglasie der Einfluss der Vorjahres-Juli-Temperatur wuchshemmend auf Ebene der Jahr-zu-Jahr-Variationen, jedoch wuchsfördernd bezogen auf die interdekadischen Variationen (Abb. 7).

5. Schlussfolgerungen

Die Resultate dieser Studie zeigen eine zunehmende Trockenheitsempfindlichkeit für die heimischen Waldbäume im 20. Jahrhundert, die für die Douglasie nicht in diesem Ausmaß zu bestätigen ist. Die Douglasie zeigt insgesamt gute Potenziale um mit den klimatischen Änderungen zurecht zu kommen, besonders im Vergleich zu der temperatursensitiven Buche und der niederschlagsabhängigen Fichte. Es ergibt sich für die Wuchstypen eine stärkere Differenzierung im Vergleich zur reinen artspezifischen Betrachtung. Insgesamt werden die kontinentaler gelegenen Wuchstypen und auch die östliche Douglasie stärker unter verringerten sommerlichen Niederschlägen leiden. Klimatische Rekonstruktionen anhand von Jahrringen aus temperierten Wäldern werden erschwert durch die Komplexität und die Instabilität der Klima/Wachstumsbeziehungen. Im Folgenden werden nun die der Untersuchung zugrunde liegenden Fragen soweit möglich beantwortet, Kernaussagen formuliert und mögliche weitere Forschungsrichtungen aufgezeigt.

- 1. Wie wirkt sich das Klima auf das Wachstum heimischer Arten aus? Lassen sich Unterschiede in Bezug auf die Klima/Wachstumsbeziehungen nicht-heimischer Baumarten feststellen?*

Grundsätzlich wird das Wachstum heimischer Arten überwiegend durch die klimatischen Bedingungen im Sommer des Wuchsjahres, sowie die Temperatur im Sommer des Vorjahres gesteuert. Die Eichen der Tieflagen zeigen ein spezifisches Niederschlagssignal im Frühling. In der Regel wirken sich die Temperatur und der T/N-Index negativ, Niederschlag und scPDSI positiv auf das Wachstum der Bäume temperierter Wälder aus. Dies führt grundsätzlich vor dem Hintergrund steigender Temperaturen und abnehmender sommerlicher Niederschläge zu Wachstumseinbußen bei den heimischen Baumarten. Artspezifisch betrachtet werden Buche und Fichte besonders stark unter den sich ändernden Temperaturen leiden, während Eiche und Kiefer besser mit den Klimaänderungen zurechtkommen werden.

Diese generellen Aussagen müssen allerdings, die Resultate der wuchsspezifischen Analyse berücksichtigend, stark differenziert für die verschiedenen Wuchstypen erfolgen. Die nicht-heimische Douglasie zeigt positive Wuchsreaktionen auf sommerliche Niederschläge, die verglichen mit denen der heimischen Baumarten durchschnittlich stark ausgeprägt sind. Hinsichtlich überdurchschnittlicher Temperaturen zeigt sie sich hingegen

5. Schlussfolgerungen

weitestgehend unempfindlich. Sie profitiert, ebenso wie die Kiefer, von milden Wintertemperaturen und zeigt auf interdekadischer Ebene eine Wuchsbeschleunigung, die mit steigenden Temperaturen in Zusammenhang gebracht werden kann.

2. *Ist es möglich durch ähnliche Wachstumsmuster definierte Standortgruppen, so genannte ‚Wuchstypen‘, für Variationen unterschiedlicher zeitlicher Skalen im Untersuchungsgebiet zu differenzieren?*

Die Anwendung neuartiger Methodenkombinationen ermöglicht es im Rahmen eines wuchsspezifischen Analyseansatzes Gruppen von Standorten mit ähnlichen Wachstumsmustern zusammenzufassen. Die Standortzusammensetzung dieser Gruppen stimmt für die Wuchsvariationen auf Basis verschiedener Wellenlängen weitestgehend überein, so dass erstmals Wuchstypen mit einheitlichen Reaktionen auf das Klima definiert werden können.

Bei den Nadelhölzern kommt es zu einer weniger einheitlichen und klaren Differenzierung, was wahrscheinlich auf die noch zu geringe Anzahl der im Datensatz enthaltenen Nadelbaumstandorte zurückzuführen ist.

3. *Wie wirkt sich das Klima auf die Reaktionen der gefundenen Wuchstypen aus? Wie ist die Stabilität der gefundenen Klima/Wachstumsbeziehungen und somit die Eignung von Jahrringchronologien aus temperierten Wäldern für Rekonstruktionen von einzelnen Klimaparametern zu beurteilen?*

Die typischen Reaktionsmuster auf Temperatur, Niederschlag, T/N-Index und scPDSI wurden bereits bei der Beantwortung der ersten Frage beschrieben. Diese sind bei den im Anschluss an die Clusteranalysen definierten Wuchstypen in durch Kontinentalitätsgrad, Baumart und standortökologische Faktoren modifizierter Ausprägung wieder zu finden. Ganz deutlich zeigen sich hier die stärkeren Reaktionen der östlich gelegenen Wuchstypen besonders auf die Wasserverfügbarkeit, ausgedrückt durch Niederschlag und scPDSI, sowie den T/N-Index. Insgesamt zeigen die Buchengruppen die stärksten Reaktionen auf klimatische Bedingungen. Abnehmende sommerliche Niederschläge, sowie insbesondere überdurchschnittlich hohe Sommertemperaturen des Vorjahres wirken sich hemmend auf das Wachstum der Buchengruppen aus. Das Wachstum der Nadelbaumgruppen wird in erster Linie durch ausbleibende sommerliche Niederschläge negativ beeinflusst. Milde Winter hingegen haben wuchsfördernde Auswirkungen. Die Eichengruppen zeigen ausgeprägt differenzierte Reaktionen auf klimatische Bedingungen. Während die Eichen der Tieflagen, sowie die westliche Eichengruppe nur schwach auf klimatische

5. Schlussfolgerungen

Bedingungen reagieren, ist die östlich gelegene Eichengruppe bezüglich ihres Wasserbedarfs vergleichbar mit Buchen und Nadelbäumen. Kälte im Winter, sowie hohe Niederschlagsmengen gekoppelt mit niedrigeren Temperaturen und einem Mangel an solarer Strahlung im Frühling, im Sommer des Vor- und Wuchsjahres, sowie im Herbst des Wuchsjahres, wirken sich vorrangig auf das Wachstum westlicher Wuchstypen hemmend aus. Alle Wuchstypen zeigen in Folge des Klimawandels eine zunehmende Abhängigkeit von der Wasserverfügbarkeit und von der Vorjahrestemperatur. Dabei definieren Stärke und Andauer der Abhängigkeiten die Empfindlichkeiten der Wuchstypen gegenüber den klimatischen Veränderungen.

Die zeitliche Stabilität der gefundenen Klima/Wachstumsbeziehungen in temperierten Waldgebieten ist trotz starker korrelativer Zusammenhänge nicht immer gewährleistet. Die dafür verantwortlichen Komplexitäten konnten in dieser Studie erstmals definiert werden. So wurde neben zeitlich versetzten Reaktionen auf Temperatur überwiegend im Vorjahr, und auf Niederschlag im Wuchsjahr, ein Wechsel von stärkerer Temperatur- zu intensiverer Niederschlagssteuerung über die Zeit bei gleichzeitig zunehmender negativer Beeinflussung durch die Vorjahrestemperatur festgestellt. Außerdem wurde eine das Anomalieverhalten der Bäume in Bezug auf klimatische Bedingungen des Winters und Frühlings beeinflussende Wirkung der Länge der Vegetationsperiode festgestellt. Des Weiteren werden die Unterschiede in den Klima/Wachstumsbeziehungen der Wuchstypen für Wuchsvariationen verschiedener Wellenlängen von unterschiedlichen ökologischen Faktoren gesteuert. Darüber hinaus werden die Wuchsvariationen auch nicht automatisch von denselben klimatischen Parametern auf allen Wellenlängen beeinflusst. Alle diese Komplexitäten wirken sich erschwerend auf die Durchführbarkeit und Güte klimatischer Rekonstruktionen anhand von Jahrringen aus temperierten Waldgebieten aus - grundsätzlich ist jedoch von diesen nicht abzuraten. Bei sorgfältiger Auswahl des Wuchstyps auf Basis der Prüfung der korrelativen Zusammenhänge über (1) ein möglichst langes Zeitfenster, (2) zeitlich versetzte, kürzere Zeitfenster, (3) der Beurteilung der Synchronität der interdekadischen Variationen von Dendro- und Klimadaten (4) der Kenntnis des Anomalieverhaltens und (5) der Sicherstellung einer möglichst einheitlichen Steuerung des Reaktionsverhaltens durch gleiche Klimaparameter für verschiedene Wellenlängen können Klimarekonstruktionen wie auch Modellierungen in die Zukunft gewagt werden. Im Untersuchungsgebiet wäre die östliche Buchengruppe in Bezug auf die Vorjahres-Julitemperatur, sowie den Juni-scPDSI als besonders geeignet für diese Vorhaben zu nennen.

5. Schlussfolgerungen

4. *Welche sind die wichtigsten steuernden Faktoren für die Unterschiede der Klima/Wachstumsbeziehungen? Ist die Baumart das übergeordnete differenzierende Kriterium?*

Als wichtigste steuernde Faktoren für die Unterschiede der Klima/Wachstumsbeziehungen zwischen den Wuchstypen sind grundsätzlich die Art und der Kontinentalitätsgrad zu nennen. Standortökologische Faktoren bewirken meist nur untergeordnete Differenzierungen. Eine wichtige Erkenntnis ist, dass diese steuernden Faktoren von unterschiedlicher Priorität bezogen auf Wuchsvariationen verschiedener Wellenlängen sind. Es zeigt sich dabei, dass die Art nicht immer der wichtigste steuernde Faktor ist. So kristallisiert sich auf Basis der Extremjahre ein komplexes System von Steuerungsfaktoren, zusammenhängend mit dem Kontinentalitätsgrad, als übergeordnetem Steuerungsfaktor heraus. Dieser neue Befund führt zu der Erkenntnis, dass generelle artspezifische Aussagen in temperierten Wäldern nicht selbstverständlicherweise sinnvoll sind.

5. *Wie ist der auf ‚Wuchstypen‘ basierende, ‚wuchsspezifische‘ Analyseansatz hinsichtlich seiner Potenziale dem artspezifischen Ansatz gegenüber einzuordnen?*

Während der artspezifische Ansatz auf der automatischen Zusammenfassung aller einer Art zugehörigen Standorte basiert, werden im Rahmen des in dieser Studie verwendeten neuartigen wuchsspezifischen Ansatzes die Standorte hinsichtlich ähnlicher Wuchsmuster zusammengefasst. Dies kann zu nicht durch die Art bestimmten Gruppierungen führen und somit Erkenntnisse bezüglich der Priorität der Steuerungsfaktoren für die Unterschiede in den Klima/Wachstumsbeziehungen zwischen den Wuchstypen liefern. Dies konnte mit bedeutsamen Folgen für klimatische Rekonstruktionen, anhand der durch die Länge der Vegetationsperiode gesteuerten, versetzten Reaktionen von Eichen, gezeigt werden. Diese Befunde können durch die Herangehensweise im Rahmen des artspezifischen Ansatzes nicht gewonnen werden. Noch stärker ausdifferenzierte, auch auf die Art bezogene Ergebnisse, lassen sich dann mit dem wuchsspezifischen Ansatz erzielen, wenn noch mehr räumlich differenzierte Standorte in die Analyse hineingegeben werden.

5. Schlussfolgerungen

Die wichtigsten Kernaussagen die aus den Ergebnissen dieser Arbeit resultieren sind:

- Der wuchsspezifische Ansatz ermöglicht die Differenzierung von Wuchstypen in temperierten Wäldern auf regionaler Skala. Er zeigt sich als besonders geeignet für Differenzierungen von Wuchsmustern, wenn genügend Standorte einer Art in die Analysen einfließen. Bei geringen Standortzahlen, wie bei den Nadelhölzern, kann es zu keiner detaillierten Ausdifferenzierung kommen.
- Der in dieser Dissertation angewendete und, besonders auf Ebene der Extremjahre, neuartige wuchsspezifische Ansatz ermöglicht die Detektion von die Klima/Wachstumsbeziehungen der Waldbäume steuernden Faktoren, die wichtiger als die Baumart sind.
- Die Steuerungsfaktoren für die Differenzierungen der Klima/Wachstumsbeziehungen zwischen den Gruppen stimmen für Wuchsvariationen unterschiedlicher zeitlicher Skalen nicht überein. Während die Jahr-zu-Jahr-Variationen überwiegend von der Baumart gesteuert werden, erfolgt die Steuerung der Extremjahre von einem komplexen System von Einflussfaktoren, insbesondere der Länge der Vegetationsperiode.
- Die Baumart ist nicht immer der wichtigste Steuerfaktor für die Unterschiede in den Klima/Wachstumsbeziehungen zwischen den Wuchstypen. Folglich sind verallgemeinernde artspezifische Aussagen zu den Klima/Wachstumsbeziehungen in temperierten Waldgebieten nicht automatisch sinnvoll.
- Insgesamt lässt sich in Folge der Klimaänderungen eine zunehmende Abhängigkeit von der Wasserverfügbarkeit, besonders im Wuchsjahr, feststellen. Hinzu kommen verstärkte negative Reaktionen auf Vorjahrestemperaturen.
- Die Buche ist aufgrund ihrer starken negativen Reaktionen auf überdurchschnittliche Temperaturen und ihres Wasserbedarfs in den Sommermonaten durch die sich ändernden Klimabedingungen besonders gefährdet.
- Die Eichen müssen hinsichtlich ihrer Wuchspotenziale unter sich ändernden Klimabedingungen deutlich differenziert betrachtet werden. Entgegen der allgemeinen

5. Schlussfolgerungen

Aussage, dass Eichen besser mit Dürreperioden als Buchen und Nadelbäume zurechtkommen, zeigt sich die Eiche unter kontinentaleren Bedingungen als besonders abhängig von der Wasserverfügbarkeit.

- Die Nadelbäume, insbesondere Kiefer und Douglasie, profitieren von milden Wintern, deren Vorkommen durch im Rahmen des Klimawandels besonders in den Wintermonaten steigenden Temperaturen zunehmen wird. Gleichzeitig kommt es insbesondere bei der Fichte zu Wachstumseinbußen durch eine Abnahme sommerlicher Niederschläge.
- Die Douglasie zeigt im Vergleich mit den heimischen Baumarten aufgrund ihrer weitgehenden Unempfindlichkeit gegenüber steigenden Temperaturen und ihrer im mittleren Bereich einzuordnenden Abhängigkeit von Niederschlägen, besonders auf Buche und Fichte bezogen, gute Wuchspotenziale um mit den klimatischen Veränderungen zurechtkommen.
- Die Klima/Wachstumsbeziehungen der Bäume temperierter Wälder verändern sich über die Zeit. Es erfolgt ein Wechsel von stärkerer Temperatur- zu stärkerer Niederschlagssteuerung. Dies hat zur Folge, dass die Klima/Wachstumsbeziehungen, trotz hoher Signifikanzen bei den korrelativen Zusammenhängen über längere Zeiträume, nicht automatisch auch durchgängig signifikant sind.
- Die Wuchsvariationen der Bäume werden auf unterschiedlichen zeitlichen Skalen nicht immer von den gleichen klimatischen Parametern beeinflusst.

Diese Studie hat einen aktuellen Beitrag zur Verbesserung des Verständnisses der Komplexität der Klima/Wachstumsbeziehungen in temperierten Waldgebieten auf Basis eines verdichteten, sechs Baumarten enthaltenden, Datensatzes und neuer Methodenkombinationen und Anwendungen geleistet. Es konnten neue Erkenntnisse über die räumlich differenzierten Reaktionen von neuartigen Wuchstypen, die steuernden Faktoren für die Unterschiede in den Klima/Wachstumsbeziehungen, sowie die Veränderungen dieser Beziehungen über die Zeit gewonnen werden. Daraus konnten Folgerungen über die Wuchspotenziale der Waldbäume, auch im Vergleich mit einer nicht-heimischen Nadelbaumart, sowie die Eignung von Jahrringserien aus temperierten Wäldern für die Klimarekonstruktion abgeleitet werden. Die Miteinbeziehung der nicht-heimischen Douglasie trägt zusätzlich zu einem seit längerem in

5. Schlussfolgerungen

der Forstwirtschaft diskutierten Thema, ob nicht-heimische Baumarten geeignet zum Anbau bei sich ändernden Klimabedingungen sind und gegebenenfalls heimische Baumarten auf bestimmten Standorten ersetzen können, bei.

Für weiterführende Arbeiten werden auf der Grundlage dieser Studie Untersuchungen in folgende Richtungen empfohlen:

1. Auch wenn das in Kapitel 2.1 beschriebene Ungleichgewicht im Datensatz zwischen Laub- und Nadelbaumarten aufgrund der natürlichen Gegebenheiten nur schwer behoben werden kann, wäre es für die Analyse von Nadelbaumarten von grundlegender Bedeutung den dendroökologischen Datensatz um weitere Nadelbaumstandorte zu ergänzen.

Dies würde eine stärkere Ausdifferenzierung bei der Gruppenbildung im Rahmen der Clusteranalysen ermöglichen und eine bessere Repräsentativität in Bezug auf die Klima/Wachstumsbeziehungen besonders für die Douglasie erzielen. Gerade bei der Douglasie scheinen die Möglichkeiten einer flächendeckenden Beprobung kritisch, da sie als nicht-heimische, die heimische Flora verdrängende Baumart, nicht dauerhaft in geschützten Waldgebieten anzutreffen sein wird. Hingegen ist sie in wirtschaftlich genutzten Wäldern aufgrund ihrer hohen ökonomischen Bedeutung für die Forstwirtschaft vertreten. Das Problem, in Wirtschaftswäldern keine Genehmigung für dendroökologische Probenahmen zu erhalten, könnte in Ausnahmefällen durch die Gewinnung von Stammscheiben bei der Holzernte umgangen werden. Dafür sind weitere gute Kooperationen mit Forstbehörden notwendig.

2. Die Aufnahme zusätzlicher Tieflagenstandorte aller untersuchten Baumarten in das dendroökologische Netzwerk wäre sinnvoll um eine noch stärkere Ausdifferenzierung der Klima/Wachstumsbeziehungen zu erzielen und eventuell weitere, noch feiner abgegrenzte Wuchstypen finden zu können.

3. Der bereits im Rahmen unveröffentlicher Analysen begonnene Vergleich der Eignung von für unterschiedliche räumliche Skalen aufbereiteten Klimadaten für dendroökologische Analysen könnte grundlegende Erkenntnisse für zukünftige Studien bringen. So sollte systematisch geprüft werden, ob die Waldbäume stärker auf das Klima nahe am Standort, der Region oder auf ein übergeordnetes klimatisches Gebietsmittel reagieren, bzw. ob diesbezüglich überhaupt von einer Regelmäßigkeit auszugehen ist.

5. Schlussfolgerungen

4. Anhand eines ausgewählten Wuchstyps mit stabilen Klima/Wachstumsbeziehungen über die Zeit, z. B. der östlich gelegenen Buchengruppe, könnte eine Modellierung zukünftiger klimatischer Entwicklungen erfolgen, die mit bereits bestehenden regionalen Klimamodellierungen für Westdeutschland (z. B. WETTREG; Spekat et al., 2007) vergleichend analysiert werden könnten.

5. Räumliche Autokorrelation könnte bei den regional begrenzten Gruppen zu erhöhten Korrelationskoeffizienten führen, z.B. bei den im östlichen Teil des Untersuchungsgebietes gelegenen Gruppen (Kapitel 3.3). Mit einem vollständig homogen über den Untersuchungsraum verteilten Standortnetzwerk könnten diese Einflüsse weitgehend ausgeschlossen werden. Ein solches lässt sich aber aufgrund der im Untersuchungsgebiet vorhandenen Ballungsräume und damit einhergehend der räumlichen Verteilung der geschlossenen Waldbestände, sowie der in Abhängigkeit von den vorliegenden Bohrgenehmigungen erfolgten Auswahl der Beprobungsflächen nicht realisieren. Es könnte hingegen in zukünftigen Studien der Einfluss der räumlichen Autokorrelation untersucht und herausgerechnet werden, was bisher in der Dendroökologie nicht üblich war. Dies könnte z.B. mit dem Programm SAM (Spatial Analysis in Macroecology; Rangel et al., 2010) erfolgen.

6. Zusammenfassung

Unsere Wälder sind im Zuge des Klimawandels sich verändernden klimatischen Bedingungen ausgesetzt, die Veränderungen im Radialwachstum der Bäume bewirken. Um diese Änderungen und ihr Ausmaß abschätzen zu können ist ein grundlegendes Verständnis der Klima/Wachstumsbeziehungen erforderlich. Das Baumwachstum wird in temperierten Wäldern durch ein komplexes System von Einflussfaktoren gesteuert, was sich erschwerend auf die Erfassung der Klima/Wachstumsbeziehungen auswirkt. Das Ziel dieser Studie war, aufbauend auf bisherigen Untersuchungen in temperierten Wäldern, die Wuchsreaktionen der Waldbäume im westdeutschen Mittelgebirgsraum auf klimatische Bedingungen noch differenzierter zu erfassen und daraus deren Wuchspotenziale unter sich ändernden Klimabedingungen abzuleiten. Außerdem sollten Erkenntnisse über die Änderungen der Klima/Wachstumsbeziehungen über die Zeit gewonnen werden, um Aussagen bezüglich der Eignung von Jahrringserien aus temperierten Wäldern für Klimarekonstruktionen treffen zu können.

Dafür wurde das bestehende Netzwerk der Dendrogruppe Bonn für den westdeutschen Mittelgebirgsraum und die Tieflagen verdichtet. Der verwendete Datensatz enthält nun insgesamt 69 Standorte, darunter 22 Buchen-, 21 Traubeneichen-, 10 Stieleichen, jeweils sieben Kiefern- und Fichtenstandorte, sowie zwei Douglasienstandorte. Monatlich aufgelöste Temperatur- und Niederschlagsserien, sowie Zeitreihen der Dürreindizes T/N (bzw. T/P) und scPDSI fließen, für unterschiedliche räumliche Skalen aufbereitet, in die Analysen ein. Durch den gewählten Untersuchungszeitraum von 1901 bis 2002 ist es möglich, die Auswirkungen des Klimawandels auf das Baumwachstum über das 20. Jahrhundert zu untersuchen. Außerdem erlauben nicht standardmäßig verwendete, sowie neuartig kombinierte methodische Ansätze deutlich differenziertere Ergebnisse in Bezug auf die Klima/Wachstumsbeziehungen und deren steuernde Faktoren. Diese werden für Wuchsvariationen unterschiedlicher zeitlicher Skalen, von Extremjahren über Jahr-zu-Jahr-Variationen bis hin zu interdekadischen Variationen untersucht. Dafür kommen Weiserjahr- und Korrelationsanalysen, sowie die nicht weit verbreitete Verwendung von Splinefunktionen zur Darstellung interdekadischer Variationen zum Einsatz. Letztere ermöglicht eine in den Randbereichen des Zeitfensters verlustfreie Betrachtung von interdekadischen Wellenlängen. Die Korrelationsanalysen erfolgen für drei gezielt ausgewählte Zeitfenster, um den Einfluss

6. Zusammenfassung

sich ändernder Klimabedingungen auf das Radialwachstum der Bäume besser erfassen zu können.

Die guten Fähigkeiten der Douglasie um mit den sich ändernden Klimabedingungen zurecht zu kommen konnten im artspezifischen Vergleich mit den heimischen Baumarten herausgestellt werden. Diese äußern sich in Form weitgehend ausbleibender negativer Reaktionen auf überdurchschnittlich hohe Sommertemperaturen, der wuchssteigernden Wirkung von milden Wintern und den im Vergleich mit den heimischen Arten nur durchschnittlichen Abhängigkeiten von sommerlichen Niederschlägen.

Im Rahmen wuchsspezifischer Analysen konnten erstmals Wuchstypen mit ähnlichen Reaktionen auf klimatische Bedingungen in temperierten Wäldern auf regionaler Skala definiert werden. In diesem Rahmen wurden stärkere Differenzierungen der Klima/Wachstumsbeziehungen als bei der artspezifischen Analyse erzielt. Außerdem war es möglich, die Prioritäten der Steuerungsfaktoren für die Unterschiede in den Klima/Wachstumsbeziehungen zwischen den Wuchstypen zu untersuchen, ohne automatisch die Baumart als wichtigsten differenzierenden Faktor zu implizieren. Ausschließlich dadurch konnte für die Wuchsanomalien die übergeordnete Bedeutung eines komplexen Wirkungsgefüges an Steuerungsfaktoren, insbesondere der Länge der Vegetationsperiode, festgestellt und damit gleichzeitig der Befund gewonnen werden, dass sich Steuerungsfaktoren für Wuchsvariationen unterschiedlicher Frequenzen unterscheiden.

Bei der wuchsspezifischen Analyse erweisen sich die Buchengruppen als besonders empfindlich gegenüber klimatischen Einflüssen, insbesondere gegenüber der Temperatur. Die östlich gelegenen Nadelbäume hingegen zeigen die stärksten Abhängigkeiten von der Wasserverfügbarkeit. Die Wuchstypen der meist als klimatisch weniger empfindlich dargestellten Eiche weisen hinsichtlich der Stärke ihrer Reaktionen deutliche Unterschiede auf. So ist die östlich gelegene Eichengruppe in Bezug auf ihre Abhängigkeit von der Wasserverfügbarkeit vergleichbar mit Buchen und Nadelbäumen. Die östlich gelegenen Wuchstypen werden vergleichsweise stärker unter den klimatischen Änderungen leiden.

Im Rahmen dieser Arbeit konnten die Komplexitäten der Klima/Wachstumsbeziehungen in temperierten Wäldern des westdeutschen Mittelgebirgsraumes erstmals benannt werden. Neben einem grundsätzlichen zeitlichen Versatz eines überwiegend im Vorjahr auftretenden Temperatur- und eines hauptsächlich im Wuchsjahr vorkommenden Niederschlagssignals, kommt es zu einer Verlagerung von stärkerer Temperatursteuerung in der Mitte des 20. Jahrhunderts, hin zu vermehrter Niederschlagssteuerung im letzten Drittel des 20. Jahrhunderts. Wuchsvariationen interdekadischer Wellenlängen können aufgrund dieser Instabilitäten somit nicht immer durch einen klimatischen Parameter erklärt werden.

6. Zusammenfassung

Außerdem konnte gezeigt werden, dass die Wachstumsmuster unterschiedlicher zeitlicher Frequenzen nicht immer durch dieselben klimatischen Parameter gesteuert werden. Diese Komplexitäten stellen Hindernisse für verlässliche Klimarekonstruktionen und -modellierungen in die Zukunft anhand von Jahrringserien aus temperierten Wäldern dar.

Jedoch wird von Rekonstruktion und Modellierung keinesfalls grundsätzlich abgeraten. Unter Berücksichtigung der genannten Komplexitäten und der Auswahl eines geeigneten Wuchstyps, die auf der Erfassung der Klima/Wachstumsbeziehungen und weitestgehender Prüfung deren Stabilität beruht, sollte auch mit diesen Jahrringchronologien die Rekonstruktion früherer, wie auch die Vorhersage zukünftiger Klimabedingungen erfolgen können.

Die Ergebnisse dieser Studie weisen darauf hin, dass die Wuchspotenziale der Waldbäume unter sich ändernden Klimabedingungen deutlich differenziert in Bezug auf die definierten Wuchstypen einzuordnen sind. Steigende Temperaturen und abnehmende sommerliche Niederschläge werden sich besonders bei den östlich gelegenen Wuchstypen, auch bei der östlichen Eichengruppe, wuchshemmend auswirken. Im gesamten Untersuchungsgebiet zeigen sich die Buchengruppen als besonders durch die klimatischen Änderungen gefährdet. Allgemeine artspezifische Aussagen über die Eignung verschiedener Baumarten vor dem Hintergrund des Klimawandels werden als weniger gewinnbringend eingestuft.

7. Summary

In line with climate change our forests are exposed to changing climate conditions effecting changes in radial tree growth. In order to determine these changes and their magnitude, a fundamental understanding of climate/growth relationships is necessary. Tree-growth in temperate forests is forced by a complex system of influencing factors, confounding the identification of these climate/growth relationships. Building on previous investigations of temperate forests, the aim of this study was to detect the growth reactions of forest trees even more differentiated and to derive from this their growth potential under changing climate conditions. Further, knowledge of changing climate/growth relationships over time is required to enable assumptions regarding the suitability of tree ring series of temperate forests for climate reconstructions to be made. To achieve these aims, the existing network of the dendroecological working group Bonn was increased for the low mountain ranges and lowlands of western Germany. The dataset used contains 69 sites overall, of which there are 22 beech, 21 sessile oak, 10 pedunculate oak, seven Scots pine and seven spruce stands, as well as two Douglas-fir stands. Monthly resolution temperature and precipitation series, as well as time series of the drought-indices T/P (rsp. T/N) and scPDSI, were prepared for different spatial scales and integrated into the analyses. With the chosen investigation period from 1901-2002, it is possible to analyse the consequences of climate change on tree growth over the 20th century. Furthermore, non-standard procedures and a novel combination of methodological approaches allow more clearly differentiated results concerning the climate/growth relationship and its forcing factors. These are investigated for growth variations on different time scales, ranging from extreme years to year-to-year and interdecadal variations. Pointer year and correlation analyses are applied, as well as the non-standard usage of spline functions in order to resolve interdecadal variations. The latter allows the lossless consideration of the interdecadal wavelengths. Correlation analyses are carried out over three specifically chosen time windows to better detect the influence of changing climate conditions on the radial growth of the trees.

The growth characteristics of Douglas-fir suited to coping with changing climate conditions could be pointed out by species-specific comparisons with native tree species. These are expressed largely as a lack of negative reaction to above-average summer temperatures, the growth enhancing effect of mild winters and the only average dependency on summer precipitation when compared to the native tree species.

7. Summary

Within the framework of growth-specific analyses, growth types with similar reactions to climate conditions could be defined for the first time in temperate forests at a regional scale. In this context, stronger differentiations of the climate/growth relationships could be achieved than those from species-specific analyses. Furthermore, it was possible to investigate the influence of the forcing factors on differences in the climate/growth relationships without automatically designating the tree species as the most important differentiating factor. Due to this, the importance of a complex system of forcing factors, particularly the length of the growing season, could be observed. As a result, it was discovered that the forcing factors of growth variation at different frequencies can differ markedly from one other.

Again from growth-specific analyses, the beech clusters demonstrate the strongest reactions to climatic influences, particularly with regard to temperature. However, the eastern coniferous trees show the strongest dependency on water availability. The different clusters of oak, usually portrayed as being less sensitive to climate, show clear differences regarding the strength of their reactions. The eastern oak cluster is comparable to beech and coniferous trees in terms of its dependency on water availability. Overall, the more easterly-situated clusters will comparatively suffer the most due to climatic changes.

In this study, the complexities of climate/growth relationships in temperate forests of the low mountain region of western Germany could be identified for the first time. Besides a general time lag between a temperature signal predominantly in the previous year and a precipitation signal dominating in the current year, there is a temporal shift from a predominantly temperature-controlled growth in the middle of the 20th century to a more precipitation-controlled growth in the latter third of the 20th century. Because of these instabilities, growth variations of interdecadal wavelengths could not always be explained by a single climate parameter. Furthermore, it could be shown that growth patterns of different temporal frequencies were not always forced by the same climate parameters. These complexities hinder reliable climate reconstruction and modelling based on tree ring series from temperate forests. However, reconstructions and modelling would not be generally discouraged. With careful consideration of the afore-mentioned complexities and the choice of a suitable cluster, based on the detection of climate/growth relationships and the proof of temporal stability insofar as possible, the reconstruction of past climates and the forecast of future conditions should be carried out using these tree ring chronologies.

The results of this study show that growth potential of forest trees under changing climate conditions can be classified as strongly differentiated with regard to the different clusters. Rising temperatures and decreasing summer precipitation will have growth-reducing effects, in particular for the easterly-situated growth types, also for the eastern oak cluster. In the

7. Summary

entire research area, beech clusters show to be particularly vulnerable to climatic change. General species-specific statements regarding the suitability of different tree species in relation to climate change were considered to be less helpful.

8. Literatur (Rahmenpapier)

- Adler, G., Behrens, J., Eckelmann, W., Hartwich, R., Richter, A. (2003): Böden im Überblick. In: Institut für Länderkunde, Leipzig (Hrsg.): Nationalatlas Bundesrepublik Deutschland – Relief, Boden und Wasser. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg/Berlin. S. 100-103.
- Allen, C. D., Macalady, A. K., Chenchouni, H., Bachelet, D., McDowell, N., Vennetier, M., Kitzberger, T., Rigling, A., Breshears D. D., Hogg, E. H. (Ted), Gonzalez, P., Fensham, R., Zhang, Z., Castro, J., Demidova, N., Lim, J.-H., Allard, G., Running, S. W., Semerci, A., Cobb, N. (2010): A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management* 259: 660–684.
- Babst, F., Carrer, M., Urbinati, C., Neuwirth, B., Frank, D. (2012): 500 years of regional forest growth variability and links to climatic extreme events in Europe. *Environmental Research Letters* 7, no. 4, Article ID 045705
- Babst, F., Poulter, B., Trouet, V., Tan, K., Neuwirth, B., Wilson, R., Carrer, M., Grabner, M., Tegel, W., Levanic, T., Panayotov, M., Urbinati, C., Bouriaud, O., Ciais, P., Frank, D. (2013): Site- and species-specific responses of forest growth to climate across the European continent. *Global Ecology and Biogeography* 22: 706-717.
- Bastian, O., Schreiber, K.-F. (1994): Analyse und ökologische Bewertung der Landschaft. Gustav Fischer Verlag, Jena – Stuttgart. 502 S.
- Bezirksregierung Köln (Hrsg.) (2013): Nordrhein-Westfalen in Zahlen und Geodaten. Abteilung Geobasis NRW, Bonn. 4 S. Abrufbar unter: http://www.bezreg-koeln.nrw.de/brk_internet/presse/publikationen/geobasis/faltblatt_geobasis_nrw.pdf (letzter Aufruf: 27.8.2013)
- Boisvenue, C., Running, S. W. (2006): Impacts of climate change on natural forest productivity - evidence since the middle of the 20th century. *Global Change Biology* 12: 1–21.
- Bonn, S. (1998): Dendroökologische Untersuchung der Konkurrenzdynamik in Buchen-Eichen-Mischbeständen und zu erwartende Modifikationen durch Klimaänderungen. *Forstwissenschaftliche Beiträge Tharandt* 3. 226 S.
- Bräker, O. U. (1981): Der Alterstrend bei Jahrringdichten und Jahrringbreiten von Nadelhölzern und sein Ausgleich. *Mitteilungen der forstlichen Bundesversuchsanstalt Wien* 142/I, 75-102.
- Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft [BMVEL] (Hrsg.) (2004): Die zweite Bundeswaldinventur – BWI II. Das Wichtigste in Kürze. Bonn. 87 S.
- Büntgen, U., Frank, D. C., Schmidhalter, M., Neuwirth, B., Seifert, M., Esper, J. (2006): Growth/Climate Response Shift in a Long Subalpine Spruce Chronology. *Trees – Structure and Function* 20: 99-110.
- Christensen, J. H., Hewitson, B., Busuioc, A., Chen, A., Gao, X., Held, I., Jones, R., Kolli, R. K., Kwon, W.-T., Laprise, R., Magana Rueda, V., Mearns, L., Menéndez, C. G., Räisänen, J., Rinke, A., Sarr, A., Whetton, P. (2007): Regional Climate Projections. In: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., Miller, H. L. (Hrsg.): *Climate Change 2007. The physical science basis. Contribution of*

8. Literatur (Rahmenpapier)

- working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University, Cambridge, UK. S. 847-941.
- Cook, E. R., Peters, K. (1981): The smoothing spline: a new approach to standardizing forest interior tree-ring width series for dendroclimatic studies. *Tree-Ring Bulletin* 41: 45-53.
- Cook, E. R. (1985): A time series analysis approach to tree-ring standardization. Dissertation, University of Arizona, Tucson AZ, US. 183 S.
- Cook, E. R., Briffa, K., Shiyatov, S., Mazepa, V. (1992): Tree-Ring Standardization and Growth-Trend Estimation. In: Cook, E. R., Kairiukstis, L. A. (Hrsg.): *Methods of dendrochronology: Applications in the environmental sciences*. Kluwer Academic Publ., Dordrecht. S. 104-122.
- Cook, E. R., Esper, J., D'Arrigo, R. D. (2004): Extra-tropical Northern Hemisphere temperature variability over the past 1000 years. *Quaternary Science Reviews* 23: 2063-2074.
- Cropper, J. P. (1979): Tree-ring skeleton plotting by computer. *Tree-Ring Bulletin* 39: 47-59.
- Deutscher Bundestag (Hrsg.) (2001): *Gesamtwaldbericht, Bundestagsdrucksache 14/6750 v. 25.7.2001*. 82 S. Abrufbar unter: <http://dip21.bundestag.de/dip21/btd/14/067/1406750.pdf> (letzter Abruf: 27.8.2013)
- Dittmar, C., Zech, W., Elling, W. (2003): Growth variations of Common beech (*Fagus sylvatica* L.) under different climatic and environmental conditions in Europe-a dendroecological study. *Forest Ecology and Management* 173: 63-78.
- 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: 319-333.
- Ellenberg, H. (1996): *Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen*. In ökologischer, dynamischer und historischer Sicht. Ulmer Verlag, Stuttgart. 1095 S.
- Esper, J. (2000): Paläoklimatische Untersuchungen an Jahrringen im Karakorum und Tien Shan Gebirge (Zentralasien). *Bonner Geographische Abhandlungen* 103. 126 S.
- Esper, J., Gärtner, H. (2001): Interpretation of tree-ring chronologies. *Erdkunde* 55: 277-288.
- Esper, J., Treydte, K., Gärtner, H., Neuwirth, B. (2001): A tree ring reconstruction of climatic extreme years since AD 1427 for Western Central Asia. *Palaeobotanist* 50: 141-152.
- Esper, J., Cook, E. R., Schweingruber, F. H. (2002): Low-frequency signals in long tree-ring chronologies and the reconstruction of past temperature variability. *Science* 295: 2250-2253.
- Foster, G., Rahmstorf, S. (2011): Global temperature evolution 1979-2010. *Environmental Research Letters* 6: 1-8.
- Friedrichs, D. A. (2008): Spatio-temporal patterns of tree-growth response to climatic change. Dissertation, Universität Bonn. 98 S.
- Friedrichs, D. A., Neuwirth, B., Winiger, M., Löffler, J. (2009a): Methodologically induced differences in oak site classifications in a homogeneous tree-ring network. *Dendrochronologia* 27: 21-30.
- Friedrichs, D. A., Büntgen, U., Esper, J., Frank, D.C., Neuwirth, B., Löffler, J. (2009b): Complex climate controls on 20th century oak growth in central-west Germany. *Tree Physiology* 29: 39-51.
- Friedrichs, D. A., Trouet, V., Büntgen, U., Frank, D. C., Esper, J., Neuwirth, B., Löffler, J. (2009c): Species-specific climate sensitivity of tree growth in Central-West Germany. *Trees – Structure and Function* 23: 729-739.
- Fritts, H. C. (1976): *Tree rings and climate*. Academic Press, London, UK. 567 S.
- Gärtner, H., Esper, J., Treydte, K. (2004): Geomorphologie und Jahrringe - Feldmethoden in der Dendrogeomorphologie. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* 155/6: 198-207.

8. Literatur (Rahmenpapier)

- Glaser, R., Schönbein, J. (2007): Klima und Wetterkontraste. In: Glaser, R., Gebhardt, H., Schenk, W. (Hrsg.): Geographie Deutschlands. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt. S. 29–44.
- Hidalgo, H. G., Dracup, J. A., MacDonald, G. M., King, J. A. (2001): Comparison of tree species sensitivity to high and low extreme hydroclimatic events,” *Physical Geography* 22: 115-134.
- Holmes, R. L. (1983): Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin* 43: 69–78.
- Hurrell, J. W., Kushnir, Y., Ottersen, G., M. Visbeck, M. (2003): An overview of the North Atlantic Oscillation. Climatic significance and environmental impact. *Geophysical Monograph* 134: 1–35.
- Innes, J. L., Peterson, D. L. (2001): Proceedings introduction: managing forests in a greenhouse world – context and challenges. In: Peterson D. L., Innes, J. L., O’Brian, K. (Hrsg.): *Climate Change, Carbon, and Forestry in Northwestern North America: Proceedings of a Workshop*, Vol. PNW-GTR-614 , USDA Forest Service, Orcas Island, Washington. S. 1–9.
- Institut für Länderkunde, Leipzig (Hrsg.) (2003): *Nationalatlas Bundesrepublik Deutschland – Relief, Boden und Wasser*. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg/Berlin. 174 S.
- Jongman, R. H. G., ter Braak, C. J. F., van Tongeren, O. F. R. (1987): *Data analysis in community and landscape ecology*. Centre for Agricultural Publishing and Documentation, Wageningen. 299 S.
- Kahle, H-K, Mutschler A., Spiecker, H. (2007): Zuwachsreaktionen von Waldbäumen auf Trockenstress - Erste Ergebnisse retrospektiver Analysen in verschiedenen Höhenlagen des Südschwarzwaldes unter besonderer Berücksichtigung der Jahre 1947, 1976 und 2003. Bericht Sektion Ertragskunde im DVFF: 6-16.
- Kahle, H. P., Karjalainen, T., Schuck, A., Ågren, G. I., Kellomäki, S., Mellert, K. H., Pritzel, J., Rehfuess, K. E., Spiecker, H. (Hrsg.) (2008): *Causes and Consequences of Forest Growth Trends in Europe – Results of the RECOGNITION Project*. Brill, Leiden. 272 S.
- Klimo, E., Hager, H., Kulhavý, J. (Hrsg.) (2000): *Spruce Monocultures in Central Europe – Problems and Prospects*. EFI Proceedings 33. 208 S.
- Kölling, C. (2008): Die Douglasie im Klimawandel: Gegenwärtige und zukünftige Anbaubedingungen in Bayern. *LWF Wissen* 59: 12-21.
- Koprowski, M., Zielski, A. (2006): Dendrochronology of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) from two range centres in lowland Poland. *Trees – Structure and Function* 20: 383-390.
- Körner, C. (1998): A re-assessment of high elevation treeline positions and their explanation. *Oecologia* 115: 445-459.
- Kropp, J., Holsten, A., Lissner, T., Roithmeier, O., Hattermann, F., Huang, S., Rock, J., Wechsung, F., Lüttger, A., Pompe, S., Kühn, I. , Costa, L., Steinhäuser, M., Walther, C., Klaus, M., Ritchie, S., Metzger, M. (2009): *Klimawandel in Nordrhein-Westfalen - Regionale Abschätzung der Anfälligkeit ausgewählter Sektoren*. Abschlussbericht des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung (PIK) für das Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (MUNLV). 259 S.
- Landesbetrieb Wald und Holz (Hrsg.) (2008): *Nationalparkplan. Band 1: Leitbild und Ziele*. Schleiden-Gemünd. 79 S. Abruflbar unter: http://www.nationalpark-eifel.de/data/inhalt/NLPP_Druck_27_3_08_web_955_1269356454.pdf (letzter Abruf: 27.8.2013)
- LANUV - Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (Hrsg.) (2010): *Klima und Klimawandel in Nordrhein-Westfalen, Daten und Hintergründe*, Fachbericht 27. Recklinghausen. 57 S. Abruflbar unter: <http://www.lanuv.nrw.de/veroeffentlichungen/fachberichte/fabe27/fabe27KW.pdf> (letzter Abruf: 27.8.2013)

8. Literatur (Rahmenpapier)

- Leder, B., Spelsberg, G. (2007): Die Waldkiefer in NRW. Naturschutz-Mitteilungen 1: 36-40.
- Lebourgeois, F., Ulrich, E. (2010): Forest trees phenology in the French Permanent Plot Network (Renecofor, ICP forest network). In: Lousteau, D. (Hrsg.) Forests, Carbon Cycle and Climate Change. Collection UpDateSciences and Technologies. S. 158–171.
- Leyer, I., Wesche, K. (2007): Multivariate Statistik in der Ökologie. Springer-Verlag, Heidelberg. 221 S.
- Luterbacher, J., Dietrich, D., Xoplaki, E., Grosjean, M., Wanner, H. (2004): European seasonal and annual temperature variability, trends, and extremes since 1500. *Science* 303: 1499-1503.
- Menzler, K., Sawitzky, H. (2013): Vielfalt der Waldgesellschaften in Buchenlandschaften. Am Beispiel des Nationalparks Kellerwald-Edersee. *AFZ-DerWald* 1: 12-14.
- Mérian, P., Bontemps, J. D., Bergès, L., Lebourgeois, F. (2011): Spatial variation and temporal instability in climate-growth relationships of sessile oak (*Quercus petraea* [Matt.] Liebl.) under temperate conditions. *Plant Ecology* 212: 1855-1871.
- Mérian, P., Lebourgeois, F. (2011): Size-mediated climate-growth relationships in temperate forests: A multispecies analysis. *Forest Ecology and Management* 261: 1382–1391.
- Meyn, A., Schmidlein, S., Taylor, S. W., Girardin, M. P., Thonicke, K. (2010): Spatial variation of trends in wildfire and summer drought in British Columbia, Canada, 1920-2000. *International Journal of Wildland Fire* 19: 272-283.
- Michelot, A., Bréda, N., Damesin, C., Dufrêne, E. (2012): Differing growth responses to climatic variations and soil water deficits of *Fagus sylvatica*, *Quercus petraea* and *Pinus sylvestris* in a temperate forest. *Forest Ecology and Management* 265: 161–171.
- Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MKULNV) (Hrsg.) (2012): Waldzustandsbericht 2012. Bericht über den ökologischen Zustand des Waldes in NRW. Düsseldorf. 76 S. Abrufbar unter: http://www.umwelt.nrw.de/naturschutz/pdf/landeswaldbericht_2012.pdf (letzter Abruf: 27.8.2013)
- Mitchell, T. D., Jones, P. D. (2005): An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. *International Journal of Climatology* 25: 693–712.
- Mückenhausen, E. (1977)²: Entstehung, Eigenschaften und Systematik der Böden der Bundesrepublik Deutschland. 300 S.
- Müller-Westermeier, G. (1998): Numerical production of climatic maps for parameters with significant correlation to topography. – Klimastatusbericht, DWD: 82-85.
- Neuwirth, B., Schweingruber, F. H., Winiger, M. (2007a): Spatial patterns of central European pointer years from 1901 to 1971. *Dendrochronologia* 24: 79-89.
- Neuwirth, B., Friedrichs, D., Hennen, M. (2007b): 2003—where is the negative pointer year? A case study for the NW-German low mountain ranges. *Tree Rings in Archaeology, Climatology and Ecology* 5: 113–120.
- Neuwirth, B. (2010): Interannuelle Klima-Wachstums-Beziehungen zentraleuropäischer Bäume von AD 1901 bis 1971. *Bonner Geographische Abhandlungen* 125. 169 S.
- Neuwirth, B. (2011): Jahrringe als Indikator für Klima- und Umweltveränderungen in Mitteleuropa. *Passauer Kontaktstudium Geographie* 11: 67–78.
- Paritsis, J., Veblen, T. T., Kitzberger, T. (2009): Assessing dendroecological methods to reconstruct defoliator outbreaks on *Nothofagus pumilio* in northwestern Patagonia, Argentina. *Canadian Journal of Forest Research* 39: 1617-1629.

8. Literatur (Rahmenpapier)

- Proença Vasconcelos, Ana Cátia (2013): Wälder im Klimawandel - Grundlagen für Anpassungsoptionen in Rheinland-Pfalz. Dissertation, Universität Freiburg. 259 S.
- Rangel, T. F., Diniz-Filho, J. A. F., Bini, L. M. (2010): SAM: a comprehensive application for Spatial Analysis in Macroecology. (Version 4). *Ecography* 33: 46-50.
- Rinn, F. (2003): TSAP-Win. Time Series Analysis and Presentation for Dendrochronology and Related Applications. Version 0.53 for Microsoft Windows. User Reference. Heidelberg. 91 S.
- Roloff, A. (2001): Baumkronen. Verständnis, Zusammenhänge und Anwendung. Ulmer, Stuttgart. 164 S.
- Romagnoli, M., Codipietro, G. (1996): Pointer years and growth in Turkey oak (*Quercus cerris* L) in Latium (central Italy). A dendroclimatic approach. *Annales des Sciences Forestieres* 53: 671-684.
- Schollän, K., Heinrich, I., Neuwirth, B., Krusic, P. J., D'Arrigo, R. D., Karyanto, O., Helle, G. (in press): Multiple tree-ring chronologies (ring width, $\delta^{13}C$, $\delta^{18}O$) reveal dry and rainy season signals of rainfall in Indonesia. *Quaternary Science Reviews*. DOI: 10.1016/j.quascirev.2013.05.018
- Schulte, A. (Hrsg.) (2003): Wald in Nordrhein-Westfalen. Band 1. Aschendorff, Münster. 515 S.
- Schulte, U., Scheible, A. (2005): Atlas der Naturwaldzellen in Nordrhein-Westfalen. B.o.s.s. Druck und Medien, Kleve. 171 S.
- Schulte, U. (2012): 40 Jahre Naturwaldzellen in NRW. Eine Zwischenbilanz der Forschungsergebnisse. *Natur in NRW* 2: 31-35.
- Schweingruber, F. H., Eckstein, D., Serre-Bachet, F., Bräker (1990): Identification, presentation and interpretation of event years and pointer years in dendrochronology. *Dendrochronologia* 8: 9-38.
- Schweingruber, F. H. (1996): Tree rings and Environment. *Dendroecology*. Verlag Paul Haupt, Bern. 609 S.
- Schweingruber, F. H. and P. Nogler (2003): Synopsis and climatological interpretation of Central European tree-ring sequences. *Botanica Helvetica* 113: 125-243.
- Semmel, A. (1983²): Grundzüge der Bodengeographie. Teubner. Stuttgart. 123 S.
- Spekat, A., Enke, W., Kreienkamp, F. (2007): Neuentwicklung von regional hoch aufgelösten Wetterlagen für Deutschland und Bereitstellung regionaler Klimaszenarios mit dem Regionalisierungsmodell WETTREG 2005 auf der Basis von globalen Klimasimulationen. Projektbericht im Rahmen des F+E Vorhabens 204 41 138 „Klimaauswirkungen und Anpassung in Deutschland – Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland“, Mitteilungen des Umweltbundesamtes, 149 S.
- Stähr, F., Köhler, F., Rose, B. (2006): Neufassung der Bestandeszieltypen für das Land Brandenburg. *AFZ/Der Wald* 61: 754-757.
- Stefanon, M., D'Andrea, F., Drobinski, P. (2012): Heatwave classification over Europe and the Mediterranean region. *Environmental Research Letters* 7: 1-9.
- Stokes, M. A., Smiley, T. L. (1968): An Introduction to Tree-ring Dating. University of Chicago. Reprinted 1996. University of Arizona Press, Tucson, US. 73 S.
- Thomas, F. M., Blank, R., Hartmann, G. (2002): Abiotic and biotic factors and their interactions as causes of oak decline in Central Europe. *Forest Pathology* 32: 277-307.
- Treydte, K. (2003): Dendro-Isotope und Jahrringbreiten als Klimaproxies der letzten 1200 Jahre im Karakorumgebirge/Pakistan. *Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Umwelt/Environment* 38. 167 S.
- Treydte, K. S., Schleser, G. H., Helle, G., Frank, D. C., Winiger, M., Haug, G. H., Esper, J. (2006): The twentieth century was the wettest period in northern Pakistan over the past millennium. *Nature* 440: 1179-1182.

8. Literatur (Rahmenpapier)

- Wells, N., Goddard, S., Hayes, M. J. (2004): A self-calibrating Palmer drought severity index. *Journal of Climate* 17: 2335–2351.
- Wigley, T. M. L., Briffa, K. R., Jones, P. D. (1984): On the average of value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. *Journal of Climate and Applied Meteorology* 23: 201-213.
- Wilson, R., Elling, W. (2004): Temporal instability in tree-growth/climate response in the Lower Bavarian Forest region: implications for dendroclimatic reconstruction. *Trees – Structure and Function* 18: 19-28.
- Zang, C., Rothe, A., Weis, W., Pretzsch, H. (2011): Zur Baumarteneignung bei Klimawandel: Ableitung der Trockenstress-Anfälligkeit wichtiger Waldbaumarten aus Jahrringbreiten. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 182 (5/6): 98-112.
- Zang, C., Pretzsch, H., Rothe, A. (2012): Size-dependent responses to summer drought in Scots pine, Norway spruce and common oak. *Trees – Structure and Function* 26: 575-569.
- Z'Graggen, S. (1992): Dendrohistometrisch – klimatologische Untersuchung an Buchen (*Fagus sylvatica* L.) Dissertation, Universität Basel. 167 S.

Abbildungen:

<http://imk-tornado.physik.uni-karlsruhe.de/~muehr/Karten/temp6190jahr.png>

(zuletzt abgerufen: 27.8.2013)

<http://imk-tornado.physik.uni-karlsruhe.de/~muehr/Karten/regen6190jahr.png>

(zuletzt abgerufen: 27.8.2013)

Neuwirth, B. (2010): Interannuelle Klima-Wachstums-Beziehungen zentraleuropäischer Bäume von AD 1901 bis 1971. *Bonner Geographische Abhandlungen* 125. 169 S.

9. Literatur (gesamte Arbeit)

- Adler, G., Behrens, J., Eckelmann, W., Hartwich, R., Richter, A. (2003): Böden im Überblick. In: Institut für Länderkunde, Leipzig (Hrsg.): Nationalatlas Bundesrepublik Deutschland – Relief, Boden und Wasser. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg/Berlin. S. 100-103.
- Allen, C. D., Macalady, A. K., Chenchouni, H., Bachelet, D., McDowell, N., Vennetier, M., Kitzberger, T., Rigling, A., Breshears D. D., Hogg, E. H. (Ted), Gonzalez, P., Fensham, R., Zhang, Z., Castro, J., Demidova, N., Lim, J.-H., Allard, G., Running, S. W., Semerci, A., Cobb, N. (2010): A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management* 259: 660–684.
- Andreu, L., Gutiérrez, E., Macias, M., Ribas, M., Bosch, O., Camarero, J. J. (2007): Climate increases regional tree-growth variability in Iberian pine forests. *Global Change Biology* 13: 804–815.
- Babst, F., Carrer, M., Urbinati, C., Neuwirth, B., Frank, D. (2012): 500 years of regional forest growth variability and links to climatic extreme events in Europe. *Environmental Research Letters* 7, no. 4, Article ID 045705
- Babst, F., Poulter, B., Trouet, V., Tan, K., Neuwirth, B., Wilson, R., Carrer, M., Grabner, M., Tegel, W., Levanic, T., Panayotov, M., Urbinati, C., Bouriaud, O., Ciais, P., Frank, D. (2013): Site- and species-specific responses of forest growth to climate across the European continent. *Global Ecology and Biogeography* 22: 706-717.
- Badeau, V., Becker, M., Bert, D., Dupouey, J. (1996): Long-term growth trends of trees: ten years of dendrochronological studies in France. In: Spiecker, H., Mielikäinen, K., Köhl, M., Skovsgaard, J. (Hrsg.): Growth trends in European forests: studies from 12 countries. European forest institute research report, Springer Verlag, Berlin, S.167-181.
- Bahrenberg, G., Giese, E., Nipper, J. (2003²): *Statistische Methoden in der Geographie 2: Multivariate Statistik*. Borntraeger, Berlin, Stuttgart.
- Bassman, J. H., Edwards, G. E., Robberecht, R. (2002): Long-term exposure to enhanced UV-B radiation is not detrimental to growth and photosynthesis in Douglas-fir. *New Phytologist* 154: 107-120.
- Bastian, O., Schreiber, K.-F.(1994): *Analyse und ökologische Bewertung der Landschaft*. Gustav Fischer Verlag, Jena – Stuttgart. 502 S.
- Becker, M., Bräker, O. U., Kenk, G., Schneider, O., Schweingruber, F. H. (1990): Kronenzustand und Wachstum von Waldbäumen im Dreiländereck Deutschland-Frankreich-Schweiz in den letzten Jahrzehnten. *Allgemeine Forstzeitung* 45: 263–266 und 272–274.
- Bergh, J., Linder, S., Bergström, J. (2005): Potential production of Norway spruce in Sweden. *Forest Ecology and Management* 204: 1–10.
- Bezirksregierung Köln (Hrsg.) (2013): *Nordrhein-Westfalen in Zahlen und Geodaten*. Abteilung Geobasis NRW, Bonn. 4 S. Abrufbar unter: http://www.bezreg-koeln.nrw.de/brk_internet/presse/publikationen/geobasis/faltblatt_geobasis_nrw.pdf (letzter Aufruf: 27.8.2013)
- Böhm, H. (1965): Eine Klimakarte der Rheinlande. *Erdkunde* 18: 202–206.

9. Literatur (gesamte Arbeit)

- Boisvenue, C., Running, S. W. (2006): Impacts of climate change on natural forest productivity - evidence since the middle of the 20th century. *Global Change Biology* 12: 1–21.
- Bonn, S. (1998): Dendroökologische Untersuchung der Konkurrenzdynamik in Buchen-Eichen-Mischbeständen und zu erwartende Modifikationen durch Klimaänderungen. *Forstwissenschaftliche Beiträge Tharandt* 3. 226 S.
- Booth, J. C. (1903): Die Einführung ausländischer Holzarten in die Preußischen Staatsforsten unter Bismarck und Anderes. Springer Verlag, Berlin. 111 S.
- Bräker, O. U. (1981): Der Alterstrend bei Jahrringdichten und Jahrringbreiten von Nadelhölzern und sein Ausgleich. *Mitteilungen der forstlichen Bundesversuchsanstalt Wien* 142/I, 75-102.
- Bréda, N., Cochard, H., Dreyer, E., Granier, A. (1992): Water transfer in a mature oak stand (*Quercus patraea*): seasonal evolution and effects of a severe drought. *Canadian Journal of Forest Research* 23: 1136-1143.
- Briffa, K. R., Jones, P. D. (1990): Basic chronology statistics and assessment. In: Cook, E. R., Kairiukstis, L. A. (Hrsg.): *Methods of dendrochronology: applications in the environmental sciences*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, S.137-152.
- Briffa, K. R., Schweingruber, F. H., Jones, P. D., Osborn, T. J., Shyatov, S. G., Vaganov, E. A. (1998): Reduced sensitivity of recent tree-growth to temperature at high northern latitudes. *Nature* 391: 678-682.
- Briffa, K. R., Osborn, T. J., Schweingruber, F. H., Jones, P. D., Shiyatov, S. G., Vaganov, E. A. (2002): Tree-ring width and density data around the Northern Hemisphere: Part 2, spatiotemporal variability and associated climate patterns. *The Holocene* 12: 759-789.
- Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft [BMVEL] (Hrsg.) (2004): Die zweite Bundeswaldinventur – BWI II. Das Wichtigste in Kürze. Bonn. 87 S.
- Büntgen, U., Frank, D. C., Schmidhalter, M., Neuwirth, B., Seifert, M., Esper, J. (2006): Growth/Climate Response Shift in a Long Subalpine Spruce Chronology. *Trees – Structure and Function* 20: 99-110.
- Chen, P. Y., Welsh, C., Hamann, A. (2010): Geographic variation in growth response of Douglas-fir to interannual climate variability and projected climate change. *Global Change Biology* 16: 3374–3385.
- Christensen, J. H., Hewitson, B., Busuioc, A., Chen, A., Gao, X., Held, I., Jones, R., Kolli, R. K., Kwon, W.-T., Laprise, R., Magana Rueda, V., Mearns, L., Menéndez, C. G., Räisänen, J., Rinke, A., Sarr, A., Whetton, P. (2007): Regional Climate Projections. In: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., Miller, H. L. (Hrsg.): *Climate Change 2007. The physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge University, Cambridge, UK. S. 847-941.
- Cook, E. R., Peters, K. (1981): The smoothing spline: a new approach to standardizing forest interior tree-ring width series for dendroclimatic studies. *Tree-Ring Bulletin* 41: 45-53.
- Cook, E. R. (1985): A time series analysis approach to tree-ring standardization. Dissertation, University of Arizona, Tucson AZ, US. 183 S.
- Cook, E. R., Kahlack, M. A., Jacoby, G. C. (1988): The 1986 drought in Southeastern United States: how rare an event was it? *Journal of geophysical research* 93: 257–260.
- Cook, E. R., Briffa, K., Shiyatov, S., Mazepa, V. (1992): Tree-Ring Standardization and Growth-Trend Estimation. In: Cook, E. R., Kairiukstis, L. A. (Hrsg.): *Methods of dendrochronology: Applications in the environmental sciences*. Kluwer Academic Publ., Dordrecht. S. 104-122.
- Cook, E. R., Esper, J., D'Arrigo, R. D. (2004): Extra-tropical Northern Hemisphere temperature variability over the past 1000 years. *Quaternary Science Reviews* 23: 2063-2074.

9. Literatur (gesamte Arbeit)

- Cropper, J. P. (1979): Tree-ring skeleton plotting by computer. *Tree-Ring Bulletin* 39: 47–59.
- D'Arrigo, R., Wilson, R., Liepert, B., Cherubini, P. (2008): On the 'Divergence Problem' in northern forests: a review of the tree-ring evidence and possible causes. *Global and Planetary Change* 60: 289–305.
- DeSoto, L., Camarero, J. J., Olano, J. M., Rozas, V. (2012): Geographically structured and temporally unstable growth responses of *Juniperus thurifera* to recent climate variability in the Iberian Peninsula. *European Journal of Forest Research*: 131: 905-917.
- Deutscher Bundestag (Hrsg.) (2001): Gesamtwaldbericht, Bundestagsdrucksache 14/6750 v. 25.7.2001. 82 S. Abrufbar unter: <http://dip21.bundestag.de/dip21/btd/14/067/1406750.pdf> (letzter Abruf: 27.8.2013)
- Dittmar, C., Elling, W. (1999): Jahrringbreite von Fichte und Buche in Abhängigkeit von Witterung und Höhenlage. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 118: 251–270.
- Dittmar, C., Zech, W., Elling, W. (2003): Growth variations of Common beech (*Fagus sylvatica* L.) under different climatic and environmental conditions in Europe-a dendroecological study. *Forest Ecology and Management* 173: 63-78.
- 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: 319–333.
- Drobyshev, I., Övergaard, R., Saygin, I., Niklasson, M., Hickler, T., Karlsson, M., Sykes, M. T. (2010): Masting behaviour and dendrochronology of European beech (*Fagus sylvatica* L.) in southern Sweden. *Forest Ecology and Management* 259: 2160–2171.
- Ellenberg, H. (1996): Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen. In ökologischer, dynamischer und historischer Sicht. Ulmer Verlag, Stuttgart. 1095 S.
- Epron, D., Dreyer, E. (1993): Long-term effects of drought on photosynthesis of adult oak trees. *Q. petraea* (Matt) Liebl. and *Q. robur* L. in a natural stand. *New Phytologist* 125: 381–389.
- Esper, J. (2000): Paläoklimatische Untersuchungen an Jahrringen im Karakorum und Tien Shan Gebirge (Zentralasien). *Bonner Geographische Abhandlungen* 103. 126 S.
- Esper, J., Gärtner, H. (2001): Interpretation of tree-ring chronologies. *Erdkunde* 55: 277-288.
- Esper, J., Treydte, K., Gärtner, H., Neuwirth, B. (2001): A tree ring reconstruction of climatic extreme years since AD 1427 for Western Central Asia. *Palaeobotanist* 50: 141–152.
- Esper, J., Cook, E. R., Schweingruber, F. H. (2002): Low-frequency signals in long tree-ring and the reconstruction of past temperature variability. *Science* 295: 2250-2253.
- Esper, J., Shiyatov, S. G., Mazepa, V. S., Wilson, R. J. S., Graybill, D. A., Funkhouser, G. (2003): Temperature-sensitive Tien Shan tree ring chronologies show multi-centennial growth trends. *Climate Dynamics* 21: 699–706.
- Esper, J., Niederer, R., Bebi, P., Frank, D. (2008): Climate signal age effects – Evidence from young and old trees in the Swiss Engadin. *Forest Ecology and Management* 255: 3783–3789.
- Fischer, S., Neuwirth, B. (2012): Klimasensitivität der Douglasie in Eifel und Kellerwald. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 183 (1/2): 23-33.
- Fischer, S., Neuwirth, B. (2013): Vulnerability of trees to climate events in temperate forests of West Germany. *ISRN Forestry* Volume 2013, Article ID 201360, 15 S. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/201360>
- Foster, G., Rahmstorf, S. (2011): Global temperature evolution 1979–2010. *Environmental Research Letters* 6: 1–8.

9. Literatur (gesamte Arbeit)

- Frank, D., Esper, J., Raible, C., Büntgen, U., Trouet, V., Stocker, B., Joos, F., (2010): Ensemble reconstruction constraints on the global carbon cycle sensitivity to climate. *Nature*: 463, S. 527-530.
- Friedrichs, D. A. (2008): Spatio-temporal patterns of tree-growth response to climatic change. Dissertation, Universität Bonn. 98 S.
- Friedrichs, D. A., Neuwirth, B., Winiger, M., Löffler, J. (2009a): Methodologically induced differences in oak site classifications in a homogeneous tree-ring network. *Dendrochronologia* 27: 21-30.
- Friedrichs, D. A., Büntgen, U., Esper, J., Frank, D.C., Neuwirth, B., Löffler, J. (2009b): Complex climate controls on 20th century oak growth in central-west Germany. *Tree Physiology* 29: 39–51.
- Friedrichs, D. A., Trouet, V., Büntgen, U., Frank, D. C., Esper, J., Neuwirth, B., Löffler, J. (2009c): Species-specific climate sensitivity of tree growth in Central-West Germany. *Trees – Structure and Function* 23: 729–739.
- Fritts, H. C. (1976): *Tree rings and climate*. Academic Press, London, UK. 567 S.
- Garcia-Suarez, A. M., Butler, C. J., Baillie, M. G. L. (2009): Climate signal in tree-ring chronologies in a temperate climate: A multi-species approach. *Dendrochronologia* 27: 183–198.
- Gärtner, H., Esper, J., Treydte, K. (2004): Geomorphologie und Jahrringe - Feldmethoden in der Dendrogeomorphologie. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* 155/6: 198-207.
- Glaser, R., Schönbein, J. (2007): Klima und Wetterkontraste. In: Glaser, R., Gebhardt, H., Schenk, W. (Hrsg.): *Geographie Deutschlands*. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt. S. 29–44.
- Gonzalez, I. G., Eckstein, D. (2003): Climatic signal of earlywood vessels of oak on a maritime site. *Tree Physiology* 23: 497–504.
- Griesbauer, H. P., Green, D. S. (2010): Assessing the climatic sensitivity of Douglas-fir at its northern range margins in British Columbia, Canada. *Trees* 24: 375–389.
- Hermann, R. K., Lavender, D. P. (1990): *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco. In: Burns, R. M., Barbara, H., Honkala, B. H. (Hrsg.) *Silvics of North America: 1. Conifers*. Agriculture Handbook 654. Washington. S. 527–540.
- Hermann, R. K., Lavender, D. P. (1999): Douglas-fir planted forests. *New Forests* 17: 53–70.
- Hidalgo, H. G., Dracup, J. A., MacDonald, G. M., King, J. A. (2001): Comparison of tree species sensitivity to high and low extreme hydroclimatic events,” *Physical Geography* 22: 115-134.
- Holmes, R. L. (1983): Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin* 43: 69–78.
- Hurrell, J. W., Kushnir, Y., Ottersen, G., M. Visbeck, M. (2003): An overview of the North Atlantic Oscillation. Climatic significance and environmental impact. *Geophysical Monograph* 134: 1–35.
- Innes, J. L., Peterson, D. L. (2001): Proceedings introduction: managing forests in a greenhouse world – context and challenges. In: Peterson D. L., Innes, J. L., O’Brian, K. (Hrsg.): *Climate Change, Carbon, and Forestry in Northwestern North America: Proceedings of a Workshop*, Vol. PNW-GTR-614 , USDA Forest Service, Orcas Island, Washington. S. 1–9.
- Institut für Länderkunde, Leipzig (Hrsg.) (2003): *Nationalatlas Bundesrepublik Deutschland – Relief, Boden und Wasser*. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg/Berlin. 174 S.
- Jongman, R. H. G., ter Braak, C. J. F., van Tongeren, O. F. R. (1987): *Data analysis in community and landscape ecology*. Centre for Agricultural Publishing and Documentation, Wageningen. 299 S.
- Jump, A. S., Hunt, J. M., Peñuelas, J. (2006): Rapid climate change-related growth decline at the southern range edge of *Fagus sylvatica*. *Global Change Biology* 12: 2163-2174.

9. Literatur (gesamte Arbeit)

- Kaennel, M., Schweingruber, F. H. (Hrsg.): Multilingual glossary of dendrochronology. Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research, Birmensdorf. Paul Haupt Verlag, Bern, Stuttgart, Wien.
- Kahle, H.-P., Spiecker, H. (1996): Adaptability of radial growth of Norway spruce to climate variations: results of a site specific dendroecological study in high elevations of the Black Forest (Germany). *Radiocarbon* 38: 785–801.
- Kahle, H.-K., Mutschler A., Spiecker, H. (2007): Zuwachsreaktionen von Waldbäumen auf Trockenstress - Erste Ergebnisse retrospektiver Analysen in verschiedenen Höhenlagen des Südschwarzwaldes unter besonderer Berücksichtigung der Jahre 1947, 1976 und 2003. Bericht Sektion Ertragskunde im DVFF: 6-16.
- Kahle, H. P., Karjalainen, T., Schuck, A., Ågren, G. I., Kellomäki, S., Mellert, K. H., Pritzel, J., Rehfuess, K. E., Spiecker, H. (Hrsg.) (2008): Causes and Consequences of Forest Growth Trends in Europe – Results of the RECOGNITION Project. Brill, Leiden. 272 S.
- Klimo, E., Hager, H., Kulhavy, J. (Hrsg.) (2000): Spruce Monocultures in Central Europe – Problems and Prospects. *EFI Proceedings* 33. 208 S.
- Knoerzer, D. (1998): Zum Status nichtheimischer (Baum-) Arten – von der Notwendigkeit begrifflicher Klärung. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 169: 41–46.
- Kölling, C. (2008): Die Douglasie im Klimawandel: Gegenwärtige und zukünftige Anbaubedingungen in Bayern. *LWF Wissen* 59: 12-21.
- Koprowski, M., Zielski, A. (2006): Dendrochronology of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) from two range centres in lowland Poland. *Trees – Structure and Function* 20: 383-390.
- Körner, C. (1998): A re-assessment of high elevation treeline positions and their explanation. *Oecologia* 115: 445-459.
- Kropp, J., Holsten, A., Lissner, T., Roithmeier, O., Hattermann, F., Huang, S., Rock, J., Wechsung, F., Lüttger, A., Pompe, S., Kühn, I., Costa, L., Steinhäuser, M., Walther, C., Klaus, M., Ritchie, S., Metzger, M. (2009): Klimawandel in Nordrhein-Westfalen - Regionale Abschätzung der Anfälligkeit ausgewählter Sektoren. Abschlussbericht des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung (PIK) für das Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (MUNLV). 259 S.
- Landesbetrieb Wald und Holz (Hrsg.) (2008): Nationalparkplan. Band 1: Leitbild und Ziele. Schleiden-Gemünd. 79 S. Abrufbar unter: http://www.nationalpark-eifel.de/data/inhalt/NLPP_Druck_27_3_08_web_955_1269356454.pdf (letzter Abruf: 27.8.2013)
- LANUV - Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (Hrsg.) (2010): Klima und Klimawandel in Nordrhein-Westfalen, Daten und Hintergründe, Fachbericht 27. Recklinghausen. 57 S. Abrufbar unter: <http://www.lanuv.nrw.de/veroeffentlichungen/fachberichte/fabe27/fabe27KW.pdf> (letzter Abruf: 27.8.2013)
- Lauer, W., Frankenberg, P. (1988): Klimaklassifikation der Erde. *Geographische Rundschau* 40: 55–59.
- Laurance, S. G. W., Laurance, W. F., Nascimento, H. E. M., Andrade, A., Fearnside, P. M., Rebello, E. R. G., Condit, R. (2009): Long-term variation in Amazon forest dynamics. *Journal of Vegetation Science* 20: 323–333.
- Luyssaert, S., Schulze, E. D., Börner, A., Knohl, A., Hessenmöller, D., Law, B. E., Ciais, P., Grace, J. (2008): Old-growth forests as global carbon sinks. *Nature* 455: 213-215.
- Leder, B., Spelsberg, G. (2007): Die Waldkiefer in NRW. *Naturschutz-Mitteilungen* 1: 36-40.

9. Literatur (gesamte Arbeit)

- Lebourgeois, F., Breda, N., Ulrich, E., Granier, A. (2005): Climate–tree-growth relationships of European beech (*Fagus sylvatica* L.) in the French Permanent Plot Network (RENECOFOR). *Trees – Structure and Function* 19: 385–401.
- Lebourgeois, F., Rathgeber, C. B. K., 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: 364–376.
- Lebourgeois, F., Ulrich, E. (2010): Forest trees phenology in the French Permanent Plot Network (Renecofor, ICP forest network). In: Lousteau, D. (Hrsg.) *Forests, Carbon Cycle and Climate Change*. Collection UpDateSciences and Technologies. S. 158–171.
- Leyer, I., Wesche, K. (2007): *Multivariate Statistik in der Ökologie*. Springer-Verlag, Heidelberg. 221 S.
- Lingg, W. (1986): *Dendroökologische Studien an Nadelbäumen im alpinen Trockental Wallis (Schweiz)*. Berichte der Eidgenössischen Anstalt für das forstliche Versuchswesen 287. 81 S.
- Luterbacher, J., Dietrich, D., Xoplaki, E., Grosjean, M., Wanner, H. (2004): European seasonal and annual temperature variability, trends, and extremes since 1500. *Science* 303: 1499-1503.
- Mäkinen, H. P., Mielikäinen, N., Mielikäinen, K. (2001): Climatic signal in annual growth variation of Norway spruce (*Picea abies*) in southern Finland. *Trees – Structure and Function* 15: 177–185.
- Mäkinen, H., Nöjd, P., Kahle, H.-P., Neumann, U., Tveite, B., Mielikäinen, K., Röhle, H., Spiecker, H. (2003): Large-scale climatic variability and radial increment variation of *Picea abies* (L.) Karst. in central and northern Europe. *Trees – Structure and Function* 17: 173-184.
- Menzel, A., Jakobi, G., Ahas, R., Scheifinger, H., Estrella, N. (2003): Variations of the climatological growing season (1951-2000) in Germany compared with other countries. *International Journal of Climatology* 23: 793-812.
- Menzler, K., Sawitzky, H. (2013): Vielfalt der Waldgesellschaften in Buchenlandschaften. Am Beispiel des Nationalparks Kellerwald-Edersee. *AFZ-DerWald* 1: 12-14.
- Mérian, P., Bontemps, J. D., Bergès, L., Lebourgeois, F. (2011): Spatial variation and temporal instability in climate-growth relationships of sessile oak (*Quercus petraea* [Matt.] Liebl.) under temperate conditions. *Plant Ecology* 212: 1855-1871.
- Mérian, P., Lebourgeois, F. (2011): Size-mediated climate–growth relationships in temperate forests: A multispecies analysis. *Forest Ecology and Management* 261: 1382–1391.
- Meyn, A., Schmidlein, S., Taylor, S. W., Girardin, M. P., Thonicke, K. (2010): Spatial variation of trends in wildfire and summer drought in British Columbia, Canada, 1920-2000. *International Journal of Wildland Fire* 19: 272-283.
- Michelot, A., Bréda, N., Damesin, C., Dufrêne, E. (2012): Differing growth responses to climatic variations and soil water deficits of *Fagus sylvatica*, *Quercus petraea* and *Pinus sylvestris* in a temperate forest. *Forest Ecology and Management* 265: 161–171.
- Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MKULNV) (Hrsg.) (2012): *Waldzustandsbericht 2012. Bericht über den ökologischen Zustand des Waldes in NRW*. Düsseldorf. 76 S. Abrufbar unter: http://www.umwelt.nrw.de/naturschutz/pdf/landeswaldbericht_2012.pdf (letzter Abruf: 27.8.2013)
- Mitchell, T. D., Jones, P. D. (2005): An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. *International Journal of Climatology* 25: 693–712.

9. Literatur (gesamte Arbeit)

- Mückenhausen, E. (1977)²: Entstehung, Eigenschaften und Systematik der Böden der Bundesrepublik Deutschland. 300 S.
- Müller-Westermeier, G. (1998): Numerical production of climatic maps for parameters with significant correlation to topography. – Klimastatusbericht, DWD: 82-85.
- Mund, M., Kutsch, W. L., Wirth, C., Kahl, T., Knohl, A., Skomarkova, M. V., Schulze, E.-D. (2010): The influence of climate and fructification on the inter-annual variability of stem growth and net primary productivity in an old-growth, mixed beech forest. *Tree Physiology* 30: 689-704.
- Neuwirth, B., Esper, J., Schweingruber, F. H., Winiger, M. (2004): Site Ecological Differences to the Climatic Forcing of Spruce Pointer Years from the Lötschental, Switzerland. *Dendrochronologia* 21: 69–78.
- Neuwirth, B. (2005): Klima/Wachstums–Beziehungen zentraleuropäischer Bäume von 1901 bis 1971 - Eine dendroklimatologische Netzwerkanalyse. Dissertation, Universität Bonn. 151 S.
- Neuwirth, B., Schweingruber, F. H., Winiger, M. (2007a): Spatial patterns of central European pointer years from 1901 to 1971. *Dendrochronologia* 24: 79-89.
- Neuwirth, B., Friedrichs, D., Hennen, M. (2007b): 2003—where is the negative pointer year? A case study for the NW-German low mountain ranges. *Tree Rings in Archaeology, Climatology and Ecology* 5: 113–120.
- Neuwirth, B. (2010): Interannuelle Klima-Wachstums-Beziehungen zentraleuropäischer Bäume von AD 1901 bis 1971. *Bonner Geographische Abhandlungen* 125. 169 S.
- Neuwirth, B. (2011): Jahrringe als Indikator für Klima- und Umweltveränderungen in Mitteleuropa. *Passauer Kontaktstudium Geographie* 11: 67–78.
- Oosterbaan, A., Nabuurs, G. J. (1991): Relationships between oak decline and groundwater class in The Netherlands. *Plant Soil* 136: 87–93.
- Orlowsky, B., Seneviratne, S. (2012): Global changes in extreme events: regional and seasonal dimension. *Climatic Change* 110: 669-696.
- Oswald, H. (1981): Importance et périodicité des fâinées. Influence des facteurs climatiques et sylvicoles. In: Teissier du Cros, E., Le Tacon, F., Nepveu, G., Pardé, J., Perrin, R., Timbal, J. (Hrsg.): *Le Hêtre*, Paris, S. 207-241.
- Paritsis, J., Veblen, T. T., Kitzberger, T. (2009): Assessing dendroecological methods to reconstruct defoliator outbreaks on *Nothofagus pumilio* in northwestern Patagonia, Argentina. *Canadian Journal of Forest Research* 39: 1617-1629.
- Pilcher, J. R. (1990): Sample preparation, cross-dating and measurement. In: Cook, E. R. and Kairiukstis, L. A. (Hrsg.): *Methods of Dendrochronology. Applications in the Environmental Sciences*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, S. 40-51.
- Proença Vasconcelos, Ana Cátia (2013): Wälder im Klimawandel - Grundlagen für Anpassungsoptionen in Rheinland-Pfalz. Dissertation, Universität Freiburg. 259 S.
- Rangel, T. F., Diniz-Filho, J. A. F., Bini, L. M. (2010): SAM: a comprehensive application for Spatial Analysis in Macroecology. (Version 4). *Ecography* 33: 46-50.
- Rinn, F. (2003): TSAP-Win. Time Series Analysis and Presentation for Dendrochronology and Related Applications. Version 0.53 for Microsoft Windows. User Reference. Heidelberg. 91 S.
- Roloff, A. (2001): Baumkronen. Verständnis, Zusammenhänge und Anwendung. Ulmer, Stuttgart. 164 S.
- Romagnoli, M., Codipietro, G. (1996): Pointer years and growth in Turkey oak (*Quercus cerris* L) in Latium (central Italy). A dendroclimatic approach. *Annales des Sciences Forestieres* 53: 671-684.

9. Literatur (gesamte Arbeit)

- Schär, C., Vidale, P. L., Lüthi, D., Frei, C., Häberli, C., Liniger, M. A., Appenzeller, C. (2004): The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature* 427: 332–336.
- Schollän, K., Heinrich, I., Neuwirth, B., Krusic, P. J., D'Arrigo, R. D., Karyanto, O., Helle, G. (in press): Multiple tree-ring chronologies (ring width, $\delta^{13}C$, $\delta^{18}O$) reveal dry and rainy season signals of rainfall in Indonesia. *Quaternary Science Reviews*. DOI: 10.1016/j.quascirev.2013.05.018
- Schulte, A. (Hrsg.) (2003): Wald in Nordrhein-Westfalen. Band 1. Aschendorff, Münster. 515 S.
- Schulte, U., Scheible, A. (2005): Atlas der Naturwaldzellen in Nordrhein-Westfalen. B.o.s.s. Druck und Medien, Kleve. 171 S.
- Schulte, U. (2012): 40 Jahre Naturwaldzellen in NRW. Eine Zwischenbilanz der Forschungsergebnisse. *Natur in NRW* 2: 31-35.
- Schulz, R., Asche, N. (2008): Klima, Standort, Wald. Regionales Wasserhaushaltsmodell auf Bundesebene übertragbar? *AFZ-DerWald* 1: 20-24.
- Schultz, J., Neuwirth, B. (2012): A new atmospheric circulation tree-ring index (ACTI) derived from climate proxies: Procedure, results and applications. *Agricultural and Forest Meteorology* 164: 149-160.
- Schweingruber, F. H. (1983): Der Jahrring. Standort, Methodik, Zeit und Klima in der Dendrochronologie. Verlag Paul Haupt, Bern. 234 S.
- Schweingruber, F. H., Eckstein, D., Serre-Bachet, F., Bräker (1990): Identification, presentation and interpretation of event years and pointer years in dendrochronology. *Dendrochronologia* 8: 9-38.
- Schweingruber, F. H. (1996): Tree rings and Environment. *Dendroecology*. Verlag Paul Haupt, Bern. 609 S.
- Schweingruber, F. H. and P. Nogler (2003): Synopsis and climatological interpretation of Central European tree-ring sequences. *Botanica Helvetica* 113: 125–243.
- Selås, V., Piovesan, G., Adams, J. M., Bernabei, M. (2002): Climatic factors controlling reproduction and growth of Norway spruce in southern Norway. *Canadian Journal of Forest Research* 32: 217–225.
- Semmel, A. (1983²): Grundzüge der Bodengeographie. Teubner. Stuttgart. 123 S.
- Skaugen, T. E., Tveito, O. E. (2004): Growing-season and degree-day scenario in Norway for 2021–2050. *Climate Research* 26: S. 221–232.
- Spekat, A., Enke, W., Kreienkamp, F. (2007): Neuentwicklung von regional hoch aufgelösten Wetterlagen für Deutschland und Bereitstellung regionaler Klimaszenarios mit dem Regionalisierungsmodell WETTREG 2005 auf der Basis von globalen Klimasimulationen. Projektbericht im Rahmen des F+E Vorhabens 204 41 138 „Klimaauswirkungen und Anpassung in Deutschland – Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland“, Mitteilungen des Umweltbundesamtes, 149 S.
- Spellmann, H. (2004): Ursachen-Wirkungsbeziehungen am Beispiel der Douglasie, waldwachstumskundliche Entscheidungshilfen für Waldbewirtschaftung und Forstplanung. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 175: 142–150.
- Spiecker, H. (2003): Silvicultural management in maintaining biodiversity and resistance of forests in Europe - temperate zone. *Journal of Environmental Management* 67: 55-65.
- Stähr, F., Köhler, F., Rose, B. (2006): Neufassung der Bestandeszieltypen für das Land Brandenburg. *AFZ/Der Wald* 61: 754-757.
- St. Clair, J. B., Mandel, N. L., Vance-Borland, K. W. (2005): Genecology of Douglas Fir in Western Oregon and Washington. *Annals of Botany* 96: 1199–1214.
- Stefanon, M., D'Andrea, F., Drobinski, P. (2012): Heatwave classification over Europe and the Mediterranean region. *Environmental Research Letters* 7: 1–9.

9. Literatur (gesamte Arbeit)

- Stokes, M. A., Smiley, T. L. (1968): An Introduction to Tree-ring Dating. University of Chicago. Reprinted 1996. University of Arizona Press, Tucson, US. 73 S.
- Thomas, F. M., Blank, R., Hartmann, G. (2002): Abiotic and biotic factors and their interactions as causes of oak decline in Central Europe. *Forest Pathology* 32: 277–307.
- Treydte, K. (2003): Dendro-Isotope und Jahrringbreiten als Klimaproxies der letzten 1200 Jahre im Karakorumgebirge/Pakistan. *Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Umwelt/Environment* 38. 167 S.
- Treydte, K. S., Schleser, G. H., Helle, G., Frank, D. C., Winiger, M., Haug, G. H., Esper, J. (2006): The twentieth century was the wettest period in northern Pakistan over the past millennium. *Nature* 440: 1179–1182.
- Van der Maaten, E. (2011): Climate sensitivity of radial growth in European beech (*Fagus sylvatica* L.) at different aspects in southwestern Germany. *Trees – Structure and Function* 26: 777–788.
- Wachter, H. (1964): Über die Beziehung zwischen Witterung und Buchenmastjahren. *Forstarchiv* 35: 69–78.
- Wells, N., Goddard, S., Hayes, M. J. (2004): A self-calibrating Palmer drought severity index. *Journal of Climate* 17: 2335–2351.
- Wigley, T. M. L., Briffa, K. R., Jones, P. D. (1984): On the average of value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. *Journal of Climate and Applied Meteorology* 23: 201–213.
- Wilson, R., Elling, W. (2004): Temporal instability in tree-growth/climate response in the Lower Bavarian Forest region: implications for dendroclimatic reconstruction. *Trees – Struct Funct* 18: 19–28.
- Zang, C., Rothe, A., Weis, W., Pretzsch, H. (2011): Zur Baumarteneignung bei Klimawandel: Ableitung der Trockenstress-Anfälligkeit wichtiger Waldbaumarten aus Jahrringbreiten. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 182 (5/6): 98–112.
- Zang, C., Pretzsch, H., Rothe, A. (2012): Size-dependent responses to summer drought in Scots pine, Norway spruce and common oak. *Trees – Structure and Function* 26: 575–569.
- Z'Graggen, S. (1992): Dendrohistometrisch – klimatologische Untersuchung an Buchen (*Fagus sylvatica* L.) Dissertation, Universität Basel. 167 S.
- Zhang, Q., Alfaro, R. I., Hebda, R. J. (1999): Dendroecological studies of tree growth, climate and spruce beetle outbreaks in Central British Columbia, Canada. *Forest Ecology and Management* 121: 215–225.

Abbildungen:

<http://imk-tornado.physik.uni-karlsruhe.de/~muehr/Karten/temp6190jahr.png>

(zuletzt abgerufen: 27.8.2013)

<http://imk-tornado.physik.uni-karlsruhe.de/~muehr/Karten/regen6190jahr.png>

(zuletzt abgerufen: 27.8.2013)

Neuwirth, B. (2010): Interannuelle Klima-Wachstums-Beziehungen zentraleuropäischer Bäume von AD 1901 bis 1971. *Bonner Geographische Abhandlungen* 125. 169 S.

Dendrochronologische Daten:

Die in dieser Arbeit verwendeten dendrochronologischen Daten wurden in die

„International Tree-Ring Data Bank“ (ITRDB) eingefügt und sind abrufbar unter:

<http://hurricane.ncdc.noaa.gov/pls/paleox/f?p=518:1:0:::APP:PROXYTOSEARCH:18>

Danksagung

Danksagung

Meinem praktischen Betreuer und Kollegen Dr. Burkhard Neuwirth möchte ich herzlich für die intensiven fachlichen Diskussionen und Anregungen, sowie die immerwährende moralische Unterstützung danken, die zur Fertigstellung dieser Dissertation in besonderem Maße beigetragen haben. Meine Begeisterung für dendroökologische Fragestellungen und Arbeitsweisen habe ich seiner Fähigkeit, die Potenziale der Dendroökologie zu vermitteln und Ideen für Forschungsthemen zu entwickeln, zu verdanken.

Mein besonderer Dank gilt meinen beiden Doktorvätern Prof. Dr. Matthias Winiger und Prof. Dr. Sebastian Schmidlein, die mir diese Dissertation ermöglicht haben. Ich danke sowohl für die zahlreichen konstruktiven fachlichen Gespräche und Hinweise, die meine Studien bereichert haben, als auch für ihre optimistische Unterstützung und Begleitung meiner Arbeiten in beratender wie organisatorischer Hinsicht.

Meinen Kollegen aus der Arbeitsgruppe Klimatologie und Landschaftsökologie danke ich für zahlreiche Diskussionen. Insbesondere möchte ich Dr. Johannes Schultz, Dr. Ole Rößler, Dr. Kerstin Anschlag, Dr. Roland Pape, Dr. Dirk Wundram und Ulrike Faude für Tipps und praktische Hilfe unter anderem bei der Umsetzung von Arbeiten mit ArcGIS und MATLAB danken. Des Weiteren gilt mein Dank den zahlreichen Studenten und Studentinnen die bei der Durchführung der Geländearbeiten beteiligt waren. Eine in diesem Umfang vorgenommene dendroökologische Datenerhebung wäre ohne ihre Unterstützung nicht möglich gewesen.

Meinen Kollegen aus der Mathematik, insbesondere Dr. Benjamin Seyfferth, möchte ich für die organisatorische und praktische Unterstützung meiner Arbeiten die den Abschluss meiner Dissertation wesentlich erleichtert haben danken.

Für die Bereitstellung von meteorologischen und dendroökologischen Daten bedanke ich mich bei Dr. Burkhard Neuwirth und Prof. Dr. Sebastian Schmidlein. Ihre Daten stellen einen wesentlichen Teil der in meiner Dissertation verwendeten Datenbasis dar.

Danken möchte ich außerdem Uta Schulte (Landesbetrieb Wald und Holz NRW), Dr. Michael Röös (Nationalpark Eifel) und Achim Frede (Nationalpark Kellerwald/Edersee) für die erteilten Bohrgenehmigungen in den Naturwaldzellen Nordrhein-Westfalens, sowie den Nationalparks Eifel und Kellerwald/Edersee und die Unterstützung bei den Geländearbeiten.

Danksagung

Ohne diese Kooperationen wäre die Durchführung meiner Dissertation nicht möglich gewesen.

Des Weiteren bedanke ich mich für die finanzielle Unterstützung in Bezug auf meine Geländeaufenthalte durch die Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn im Rahmen des Maria von Linden - Programms für Nachwuchswissenschaftlerinnen.

Ganz besonders möchte ich mich bei meiner gesamten Familie und insbesondere bei meinen Eltern Ursula und Konrad Fischer für ihre immerwährende geduldige Unterstützung und Motivation bedanken.

Publikationen und Tagungen

Fischer, S., Neuwirth, B., Schmidlein, S. (submitted): Changing climate growth response in tree rings of temperate forests. *Trees – Structure and Function*

Fischer, S., Neuwirth, B. (2013): Vulnerability of trees to climate events in temperate forests of West Germany. *ISRN Forestry Volume 2013, Article ID 201360, 15 pages.*
<http://dx.doi.org/10.1155/2013/201360>

Fischer, S., Neuwirth, B. (2012): Klimasensitivität der Douglasie in Eifel und Kellerwald. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung 183 (1/2): 23-33.*

Zöller, L., Hambach, U., Blanchard, H., Fischer, S., Köhne, S., Stritzke, R. (2010): Der Rodderberg-Krater bei Bonn. Ein komplexes Geoarchiv. *Eiszeitalter und Gegenwart Quaternary Science Journal 59 (1/2): 44-58.*

Fischer, S., Neuwirth, B., Winiger, M., Löffler, J. (2007): Nature conservation Influencing factor on radial tree growth? A conceptional approach of a new project. In: Haneca, K. et al. (Eds.) *Proceedings of the Dendrosymposium – TRACE 5: 196-199.*

Lumineszenz- und ESR - Datierungskolloquium, Bayreuth/Trebgast, 2004

TRACE, Tervuren, 2006

TRACE, Zakopane, 2008

TRACE, Freiburg, 2010

Opportunities and risks for Douglas fir in a changing climate, Freiburg, 2010