

**Großwetterlagen und das raumzeitliche Muster des  
Jahrringwachstums in Mitteleuropa  
– ein neuer methodischer Analyseansatz –**

Dissertation

zur  
Erlangung des Doktorgrades (Dr. rer. nat.)  
der  
Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät  
der  
Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

vorgelegt von  
Johannes Andreas Schultz  
aus Neuss

Bonn den, 04.02.2013

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

1. Gutachter: Prof. Dr. Matthias Winiger
2. Gutachter: Prof. Dr. Gunter Menz
3. Gutachter: Prof. Dr. Clemens Simmer
4. Gutachter: Prof. Dr. Maximilian Weigend

Tag der Promotion: 11.4.2013

Erscheinungsjahr: 2013

# I VORWORT

Die vorliegende Dissertation knüpft inhaltlich an die Arbeit von Dr. Burkhard Neuwirth an, dem ich sowohl für die intensiven Gespräche als auch für die zahlreichen Anregungen danke. Seine hervorragende Lehre hat mein Interesse und meine Begeisterung für die Dendroökologie bzw. Dendroklimatologie geweckt.

Mein besonderer Dank gilt meinem Erstbetreuer Prof. Dr. Matthias Winiger, der mir diese Dissertation ermöglicht hat. Für die vielen Anregungen und die tatkräftige Unterstützung, auch in organisatorischer Hinsicht, fühle ich mich ihm zu großem Dank verpflichtet. In meinen Dank schließe ich auch meinen Zweitbetreuer Prof. Dr. Gunter Menz für die hilfreiche und konstruktive Unterstützung ein.

Meiner Kollegin Stefanie Fischer danke ich für ihre allseits erbrachte Unterstützung. Auch die Kolleginnen und Kollegen der Arbeitsgruppe, insbesondere die ehemaligen Mitarbeiter/innen, sowie die Diplomanden und Studenten, die mir bei der Geländearbeit geholfen haben, verdienen meinen Dank.

Mein Dank gilt auch dem Mathematischen Institut der Universität Bonn, dessen Beratung ich in Anspruch nehmen durfte, und Dr. Christian Ohlwein vom Meteorologischen Institut der Universität Bonn für seine Diskussionsbeiträge bzgl. der im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten Prozedur. Dem Meteorologischen Institut der Universität Bonn danke ich, dass ich deren Ressourcen nutzen durfte.

Folgenden Kollegen danke ich für die Bereitstellung von Jahrringchronologien: S. Bonn (Dendro-Institut Tharandt), A. Rigling (WSL Bimensdorf, CH), Ch. Dittmar (FH Weihenstephan, D), W. Elling † (FH Weihenstephan, D).

In meinen Dank schließe ich auch Prof Dr. Friedrich-Wilhelm Gerstengarbe vom PIK ein, der mir den Großwetterlagendatensatz zur Verfügung gestellt hat. In diesem Zusammenhang bedanke ich mich auch bei folgenden Instituten, Institutionen und Projekten für die Bereitstellung von Klimadaten: dem National Centers for Environmental Prediction (NCEP), dem National Center for Atmospheric Research (NCAR), der National Oceanic and Atmospheric Administration NOAA, der OAR (Office of Oceanic and Atmospheric

Research), dem ESRL (Earth System Research Laboratory), der PSD (Physical Sciences Division) und der Climatic Research Unit (CRU)

Schließlich gilt mein besonderer Dank meiner gesamten Familie, meiner Mutter Marita Schultz, meinem Vater Johannes K. Schultz, meiner Schwester Sonja Schultz und meinem Schwager Dr. Thomas Schultz für die immerwährende Unterstützung.

Meiner vor Kurzem gestorbenen Mutter möchte ich diese Arbeit widmen.

Bonn, im Februar 2013

Johannes A. Schultz

## I INHALTSVERZEICHNIS

<b>Vorwort</b> .....	I
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	II
<b>Verzeichnis der Abbildungen</b> .....	III

### 1. Einführung

1.1 Forschungsstand und Problemstellung.....	1
1.2 Theoretischer Hintergrund und Zielsetzung.....	3

### 2. Daten und Methoden

2.1 Dendrodaten.....	13
2.2 Wetterlagendaten.....	14
2.3 Klimadaten.....	17
2.4 Anmerkungen zu den statistischen Methoden.....	18

### 3. Berechnung des ACTI

3.1 Definition des ACTI.....	20
3.2 Berechnungen der Wetterlagenhäufigkeiten.....	21
3.3 Berechnungen der Wetterlagengewichte ( $g_i$ ).....	21
3.3.1 Berechnung der Wetterlagenindizes ( $WTI_l$ ).....	21
3.3.2 Selektion der Wetterlagenindizes ( $WTI_l$ ).....	21
3.3.3 Gruppierung.....	24

### 4. Für die Gruppenbildung relevante Einflussfaktoren

4.1 Auswirkungen von Standardisierung und Simulationseinstellungen auf die Gruppenbildung.....	26
4.2 Auswirkungen von standortspezifischen Eigenschaften auf die Gruppenbildung.....	28

### 5. Kreuzvalidierung und Plausibilitätsprüfung

5.1 Kreuzvalidierung.....	35
5.2 Plausibilitätsprüfung.....	36

## INHALTSVERZEICHNIS

---

<b>6. Wetterlagensignale in verschiedenen jahreszeitlichen Perioden und die zeitliche Stabilität der statistischen Zusammenhänge</b>	
6.1 Jahresgang der Wetterlagenreaktionen.....	44
6.2 Untersuchung der zeitlichen Stabilität.....	48
<b>7. Diskussion und Schlussfolgerung.....</b>	<b>56</b>
<b>8. Ausblick.....</b>	<b>62</b>
<b>9. Zusammenfassung.....</b>	<b>63</b>
<b>10. Literaturverzeichnis.....</b>	<b>65</b>
<b>11. Anhang.....</b>	<b>76</b>

### III VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN

Abb. 1.1:	Schematische Gegenüberstellung des klassischen Ansatzes und des Wetterlagenansatzes	5
Abb. 2.1:	Räumliche Lage aller verwendeten Standorte	14
Abb. 2.2:	Großwetterlagen und Großwettertypen	16
Abb. 3.1:	Ablaufschema der Prozedur zur Berechnung von ACTI	22
Abb. 4.1:	Einfluss von 16 verschiedenen Simulationseinstellungen (S1 - S16) auf die Gruppenbildung	27
Abb. 4.2:	Wetterlagen- bzw. GWL- (Großwetterlagen) Reaktion der 14 Gruppen aus Simulation 3	29
Abb. 4.3:	Korrelationen zwischen den 14 ACTI-Zeitreihen von S3, berechnet für den Zeitraum von 1881–2004	30
Abb. 4.4:	Der Einfluss von Wetterlagengewicht und Wetterlagenhäufigkeit auf ACTI, exemplarisch verdeutlicht für Gruppen 8 (PCAB, Fichte) und 14 (QUSP Eiche) (G8, G14) für das Jahr 1959 (Frühjahr)	31
Abb. 4.5:	Übersicht über die 12 Gruppen der Simulation 13 (S13) sowie die ACTI-Zeitreihen und Standortchronologien jeder Gruppe	34
Abb. 5.1:	Korrelationsmuster für das Frühjahr, berechnet für gACTI als auch für die Gruppenchronologie zwischen Luftdruck am Boden (SLP), sowie für das 500 hPa-Niveau, basierend auf dem Zeitraum 1948–2004	37
Abb. 5.2:	Korrelationsmuster für das Frühjahr zwischen gACTI und Niederschlag sowie zwischen Gruppenchronologie und Niederschlag auf der Basis der E-OBS Daten für den Zeitraum 1950–2004	38
Abb. 5.3:	Korrelationsmuster für das Frühjahr, berechnet zwischen den ACTI-Zeitreihen von G3, G6 und G10 und verschiedenen gegitterten Klimadatensätzen für den Zeitraum 1950–2004	40
Abb. 5.4:	Korrelationsmuster, berechnet zwischen der ACTI Zeitreihe von G9, und verschiedenen gegitterten Klimadatensätzen für den Zeitraum 1901–2004, Frühjahr	42
Abb. 6.1:	Wetterlagenreaktionen der Standortchronologien für unterschiedliche jahreszeitliche Perioden	45
Abb. 6.2:	Wetterlagen bzw. Großwetterlagenreaktionen aller Gruppen für Winter, Frühjahr, Sommer und Herbst	47
Abb. 6.3:	Gleitende Korrelationen, berechnet zwischen den ACTI-Zeitreihen und den korrespondierenden Gruppenchronologien in einem 35-jährigen gleitenden Fenster für den Zeitraum 1891–1990	49
Abb. 6.4:	Korrelationsmuster, berechnet zwischen dem ACTI für die FASY Gruppe und Bodenluftdruck (Twentieth Century Reanalysis) für ein 35-jähriges gleitendes Fenster im Zeitraum 1891–1990	55

## 1. Einführung

Für das Verständnis des Klimasystems ist es unerlässlich, lange Zeiträume zu betrachten. Dieses Vorgehen ermöglicht es, die Prozesse und Rückkopplungen im Klimasystem zu beschreiben, auf ihre Periodizität hin zu untersuchen und zu verstehen. Dieses Wissen ist unter anderem von Bedeutung für die Abschätzung des anthropogenen Anteils an den beobachteten und prognostizierten Klimaänderungen (IPCC 2007).

Aufgrund des kurzen Zeitfensters, für das meteorologische Messdaten in ausreichender Zahl, Güte und räumlicher Abdeckung zur Verfügung stehen, werden vergangene Klimabedingungen durch historische Quellen oder Proxidaten wie z. B. Eisbohrkerne, Warven oder Jahrringe rekonstruiert (Glaser 2008). Zahlreiche Studien konnten die Potenziale von Jahrringen für die Klimarekonstruktion belegen; in diesem Zusammenhang seien exemplarisch die Arbeiten von Esper et al. (2012, 2002), Büntgen et al. (2011), Cook et al. 2010 und Treydte et al. (2006) genannt. Die vorliegende Arbeit hat sich zum Ziel gesetzt, durch die Einführung eines neuen, auf Wetterlagen basierenden Ansatzes das Verständnis von Klima/Wachstums-Beziehungen (vgl. Neuwirth 2010, 2011) zu verbessern. Im Gegensatz zur gängigen Praxis in der Dendroklimatologie wird nicht der Einfluss einzelner Klimatelemente auf das Wachstum, sondern der Einfluss von Wetterlagen, die sich ihrerseits auf die lokalen klimatischen Bedingung auswirken, untersucht.

Teile dieser Arbeit, insbesondere die Beschreibung des neuen Ansatzes bzw. der Prozedur, sind in *Agricultural and Forest Meteorology* (Schultz & Neuwirth 2012) publiziert.

### 1.1 Forschungsstand und Problemstellung

Klimatische Extremereignisse wie starke Regenfälle oder extreme Dürreperioden können sich auf Ökosysteme, die landwirtschaftliche Produktivität sowie auf sozialökonomische Faktoren auswirken (Smith, 2011). Das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) geht davon aus, dass durch den Klimawandel sowohl die Häufigkeit als auch die Stärke von solchen klimatischen Extremereignissen zunehmen werden (IPCC, 2007). Änderungen in der großräumigen atmosphärischen Zirkulation, die natürliche und anthropogen verursachte Klimavariabilität bzw. Trends im Klimasystem können zu abrupten Veränderungen in den Ökosystemen führen.

Klimaanomalien auf regionaler und lokaler Maßstabebene werden maßgeblich bestimmt durch die atmosphärische Zirkulation (Küttel et al., 2010). Della-Marta et al. (2007) konnte Zusammenhänge zwischen sommerlichen Hitzeperioden in West-Europa und verschiedenen großräumigen Prädiktoren, u.a. atmosphärischen Zirkulationsverhältnissen belegen. Andere Autoren konnten Zusammenhänge zwischen atmosphärischen Zirkulationsmustern bzw. Wetterlagen und dem Auftreten von extrem kalten und warmen Tagen in Europa zeigen (Cony et al., 2008; van den Besselaar et al., 2010). Seager et al. (2008) und Weaver et al. (2009) konnten Zusammenhänge zwischen der Variabilität der

# 1. EINFÜHRUNG

---

atlantischen und pazifischen Oberflächentemperatur, der atmosphärischen Zirkulation und der Niederschlagsvariabilität in den Vereinigten Staaten nachweisen.

Für die Analyse und Beschreibung von klimatischen Bedingungen werden atmosphärische Zirkulationsbedingungen bzw. -muster oft in verschiedene Typen, die häufig als Wetterlagen bezeichnet werden, unterteilt (Philipp et al., 2010). In vielen Studien werden die Hess-Brezowsky Klassifikation (1952) für Mitteleuropa oder die Lamb Klassifikation (1972) für die Britischen Inseln verwendet. In diesem Zusammenhang seien exemplarisch noch die Vangengeim und Girs Klassifikation für den atlantisch-eurasischen Bereich (Vangengeim, 1952; Girs und Kondratovich, 1978) und für Nordamerika die Sheridan Klassifikation (Sheridan, 2002) genannt.

Die Rekonstruktion von monatlichen Gitterfelddaten für bodennahen Luftdruck (SLP) durch die Auswertung von Stationsdaten und Schiffslogbüchern (Jones et al., 1999; Küttel et al., 2010) ermöglicht es, langfristige Variationen in der atmosphärischen Zirkulation und ihre Zusammenhänge zur bodennahen Klimavariabilität zu untersuchen (Huth et al., 2008; Philipp et al., 2007). Jahrringe, aber auch andere Klimaproxies werden oft zur Rekonstruktion von Zirkulations-Indizes verwendet, wie z. B. der Nordatlantischen Oszillation (NAO) (Trouet et al., 2009), der pazifischen Dekaden-Oszillation (Crueger et al., 2009), der Atlantischen Multidekaden-Oszillation (AMO) (Gray et al., 2004) oder von El Nino Southern Oscillation (ENSO) (Wilson et al., 2010). Große Proxinetzwerke mit einer dichten, räumlichen Verteilung der Proxizitreihen ermöglichen es, bodennahe, räumliche Temperaturmuster (Mann et al., 2009; Briffa et al., 2002), oder Dürren zu rekonstruieren (Büntgen et al., 2010a, b; Cook et al., 2010; Woodhouse et al., 2009) oder erlauben die Untersuchung von räumlichen Mustern von Klima / Wachstums-Beziehungen (Neuwirth et al., 2007a). Die erzielten Ergebnisse werden oft mit großräumigen, atmosphärischen Zirkulationsmustern, den oben beschriebenen Indizes oder einzelnen ausgewählten Wetterlagen in Zusammenhang gebracht. Die Indizes fassen ein komplexes, raumzeitliches Muster der Klimavariabilität zusammen, so dass lokalklimatische Bedingungen oft nur schwierig mit diesen Indizes in Zusammenhang zu bringen sind (Stenseth et al., 2003).

Bei der Untersuchung von Jahrringchronologien bzw. anderen Proxidaten im Hinblick auf Wetterlagensignale wurden dagegen bisher nur wenige Fortschritte erzielt. Im Gegensatz zu Indizes ermöglichen es Wetterlagen, die atmosphärischen Zirkulationsbedingungen umfassender zu beschreiben.

Planchon et al. (2008) konnten anhand von Jahrringchronologien aus Frankreich zeigen, dass Wetterlagendaten für die Interpretation von Dürre Jahren sehr nützlich sein können. Neben dieser diskontinuierlichen Anwendung können solche Datensätze zur Analyse von Wachstumsmustern verwendet werden. Dieses konnten Pasho et al. (2011) anhand von Standorten in Spanien demonstrieren, indem sie lineare Einfachkorrelationen zwischen Jahrringchronologien und Häufigkeiten einzelner Wetterlagen berechneten. Es konnten

# 1. EINFÜHRUNG

---

auch signifikante Zusammenhänge zwischen Jahrring  $\delta^{18}\text{O}$  Chronologien und Wetterlagenhäufigkeiten nachgewiesen werden, jedoch sind diese nur ähnlich stark ausgeprägt wie zu einzelnen Klimaelementen (Saurer et al., 2012).

Für die kontinuierliche Zeitreihenanalyse müssen allerdings mehrere Probleme berücksichtigt werden. In diesem Zusammenhang sind die unterschiedliche zeitliche Auflösung und das unterschiedliche Skalenniveau von Wetterlagen und Jahrringchronologien zu nennen. Wetterlagendaten sind der Nominalskala zuzuordnen, während Jahrringchronologien rational skaliert sind. Ferner werden in vielen dendroklimatologischen Studien große Netzwerke mit verschiedenen Jahrringparametern verwendet, die viele Standorte bzw. Chronologien umfassen. In Kombination mit Wetterlagen-Klassifikationen, die eine große Anzahl von verschiedenen Wetterlagen definieren, kann es zu einem multiplen Testproblem kommen. Dies liegt darin begründet, dass mit der Zunahme der durchgeführten Tests die Wahrscheinlichkeit von fälschlicherweise abgelehnten Nullhypothesen zunimmt. Aber auch die stark reduzierte Anzahl von Freiheitsgraden durch die große Anzahl von Wetterlagen ist insbesondere für multiple Regressionsmodelle problematisch. Auch die schrittweise Regression, die darauf beruht, entweder sukzessiv Variablen in das Regressionsmodell aufzunehmen bzw. sukzessiv Variablen zu entfernen, die keinen signifikanten Einfluss haben, mit dem Ziel, aber nicht mit der Garantie, die besten Prädiktoren für die Ausprägung der abhängigen Variablen zu finden (Legendre & Legendre, 2012), ist –wie andere Regressionsverfahren– nur bedingt einsetzbar für die Untersuchung von Jahrringwachstumsmustern. Dies ist neben den beschriebenen Problemen darin begründet, dass nicht immer alle Wetterlagen in der untersuchten jahreszeitlichen Periode, z. B. im Frühjahr eines jeden Jahres, auftreten müssen. Insbesondere für Klassifikationen, die eine große Anzahl von verschiedenen Wetterlagen definieren (so umfasst z. B. die Hess-Brezowsky Klassifikation 29 sogenannte Großwetterlagen), ist die Häufigkeit einzelner Wetterlagen oft sehr gering. Stellt man die Häufigkeiten aller Wetterlagen, z. B. für das Frühjahr, in einer Matrix dar, wobei die Zeilen die Jahre und die Spalten die einzelnen Wetterlagen repräsentieren, so ist diese Häufigkeitsmatrix von Nullen dominiert. Korrelationen zwischen der gesamten Matrix und Jahrringchronologien oder einzelnen Spalten zeigen oft keine signifikanten Zusammenhänge.

## 1.2 Theoretischer Hintergrund und Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist es, das Verständnis von Klima / Wachstums-Beziehungen zu verbessern bzw. den Einfluss des Klimas auf die raumzeitlichen Muster des Jahrringwachstums „umfassender“ zu erklären. Andere abiotische und biotische Faktoren (Boden, anthropogene Einflüsse, Konkurrenz, etc.) und deren Wechselwirkungen werden im Rahmen dieser Arbeit nur am Rande betrachtet.

# 1. EINFÜHRUNG

---

Für die Untersuchung von Klima / Wachstums-Beziehungen wird ein neuer Ansatz, der sogenannte Wetterlagenansatz, entwickelt, der im Rahmen dieser Arbeit vorgestellt wird. Der Wetterlagenansatz beruht auf einer mehrschrittigen Prozedur, in deren Rahmen ein neuer Index [atmospheric circulation tree-ring index (ACTI)] berechnet wird. Bevor auf das Verfahren zur Berechnung des neuen Indexes (Kap. 3) eingegangen wird, sollen die grundlegenden theoretischen Überlegungen, auf denen der Wetterlagenansatz basiert, die Ziele der Arbeit sowie die Anforderung an das Verfahren vorgestellt werden.

Neuwirth et al. (2007a) konnten zeigen, dass die Klimaelemente Temperatur und Niederschlag Einfluss auf die raumzeitlichen Muster des Jahrringwachstums in Mitteleuropa nehmen. Die Zusammenhänge zwischen einzelnen Klimaelementen und den Wuchsreaktionen der Bäume sind stellenweise, je nach untersuchter jahreszeitlicher Periode, unter Zugrundelegung einer statistischen Betrachtungsweise oft nur sehr schwach ausgeprägt (z. B. Fischer und Neuwirth, 2013) oder zeitlich instabil (z. B. Lebourgeois et al., 2012; Friedrichs et al., 2009b). Aufgrund der Komplexität der Klima / Wachstums-Beziehungen (Schweingruber & Nogler 2003) ist eine „umfassende“ Erklärung nicht möglich.

Für Standorte mit komplexen Klima / Wachstums-Beziehungen (mehrere Klimaelemente wirken sich limitierend auf das Wachstum aus) ist eine Erklärung der klimagesteuerten Wuchsreaktionen der Bäume erschwert. Deswegen werden für Klimarekonstruktionen oft Standorte selektiert, an denen keine komplexen Klima / Wachstums-Beziehungen vorliegen bzw. das zu rekonstruierende Klimaelement der limitierende Wachsfaktor ist. Der Einfluss einzelner Klimaelemente auf das Wachstum kann von Baumart zu Baumart (Friedrichs et al., 2009c) und von Standort zu Standort stark variieren. Für eine „umfassende“ Erklärung von Klima / Wachstums-Beziehungen ist es erforderlich, alle Klimaelemente, die sich auf das Wachstum auswirken, und deren Wechselwirkungen zu berücksichtigen. Insbesondere für Klimaelemente, die einen statistisch nicht signifikanten Zusammenhang zum Jahrringwachstum zeigen bzw. sich schwach auf das Wachstum auswirken, ist eine klare Separierung des in Jahrringchronologien gespeicherten Signals vom allgemeinen Rauschen nicht möglich.

In Abbildung 1.1 wird der „klassische Ansatz“ zur Analyse der Klima / Wachstums-Beziehungen dem Wetterlagenansatz gegenübergestellt. In den meisten dendroklimatologischen Studien werden die Jahrringparameter, Jahrringbreite (vgl. García-Suárez et al., 2009), Holzdichte (vgl. Chen et al., 2012) sowie stabile Kohlen-, Wasser- und Sauerstoffisotope (vgl. Hafner et al., 2011) verwendet oder im Rahmen eines Multiparameter-Ansatzes (vgl. Sidorova et al., 2012) kombiniert. Für die Entfernung von nicht klimatischen Wachstumstrends wie etwa dem Alterstrend (Fritts, 1976; Bräker 1981) werden die Rohdaten standardisiert (Fritts, 1976). Dazu stehen verschiedene Verfahren, die bestimmte Frequenzbereiche entfernen bzw. es ermöglichen, die Zeitreihe in verschiedene Wellenlängen zu zerlegen, zur Verfügung (Riemer, 1994). Diese Verfahren sind in

# 1. EINFÜHRUNG

Abbildung 1.1 unter dem Oberbegriff dendroökologische Methoden zusammengefasst. Neben der zeitlichen Dimension des Klimasignals ist eine räumliche Komponente enthalten, die sich aus der Lage der Standorte im Raum ableitet. Große Netzwerke mit vielen Standorten bzw. Chronologien (z. B. Babst et al. 2012; Neuwirth, 2010; Schultz et al., 2009, 2008) ermöglichen es, raumzeitliche Muster des Jahrringwachstums aus den Daten abzuleiten. Sowohl für einzelne Standorte als auch für große Netzwerke können unter Verwendung verschiedener Methoden (z. B. Extremjahr-, Korrelations-, Regressions-, Spektralanalyse, etc.) Zusammenhänge zwischen Jahrringchronologien und verschiedenen Klimatelementen ermittelt werden, die sogenannten Klima / Wachstums Beziehungen.

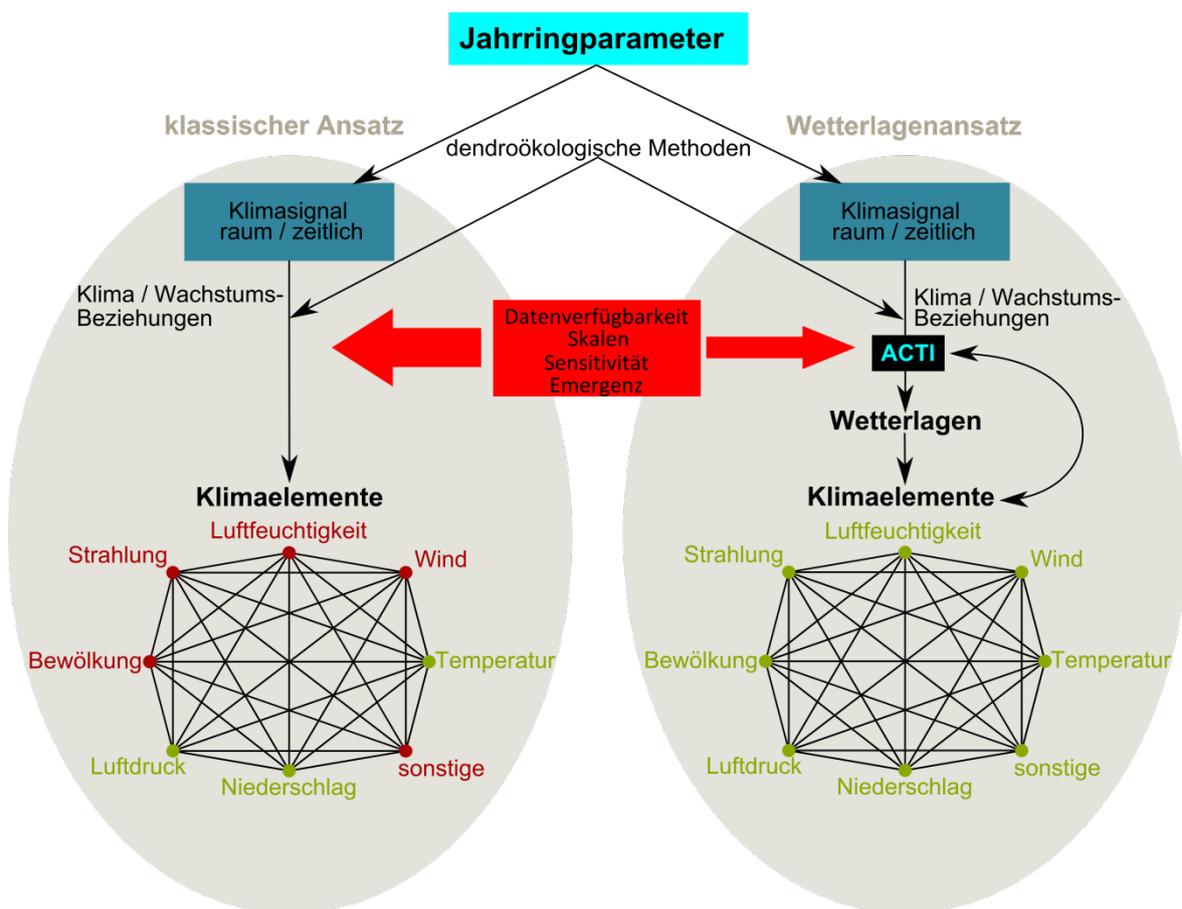


Abbildung 1.1: Schematische Gegenüberstellung des klassischen Ansatzes und des Wetterlagenansatzes. Im roten Rechteck sind die 4 Hauptproblemfelder und die Anfälligkeit des jeweiligen Ansatzes (repräsentiert durch die Dicke des roten Pfeils) gegenüber den 4 Hauptproblemfeldern dargestellt. Die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Klimatelementen sind durch Linien angedeutet. Klimatelemente, die vom jeweiligen Ansatz erfasst bzw. rekonstruiert werden können, sind grün gekennzeichnet. ACTI = atmospheric circulation tree-ring index.

Die verschiedenen Verfahren, die in der Dendroklimatologie angewendet werden, lassen sich grundlegend in zwei Ansätze unterteilen: In den diskontinuierlichen Ansatz, der darauf ausgerichtet ist, das Auftreten von auffälligen Jahrringen, z. B. besonders schmalen bzw. breiten Jahrringen (Weiserjahre) (Riemer 1992; Schweingruber, et al., 1990) durch

# 1. EINFÜHRUNG

---

alle auf den Baum wirkenden Bedingungen (sogenannte Wachstumsfaktoren) zu erklären, und in den kontinuierlichen Ansatz, der darauf zielt, das in den Chronologien gespeicherte Klimasignal über ein definiertes Zeitfenster hinweg auf seine Zusammenhänge mit Umweltbedingungen zu untersuchen. Der Begriff Klima / Wachstums-Beziehungen impliziert eigentlich eine „umfassende“ Erklärung des in Jahrringchronologien abgespeicherten Klimasignals, zumeist werden jedoch nur Temperatur und Niederschlag untersucht.

Es lassen sich neben statistischen bzw. methodischen Problemen (z. B. Standardisierung von Jahrringchronologien, Verbesserung von Regressionsmodellen) 4 Hauptproblemfelder ausmachen, die einer „umfassenden“ Erklärung von Klima / Wachstums-Beziehungen entgegenstehen und im Folgendem näher erläutert werden (Abb. 1.1):

- a) Verfügbarkeit der Klimadaten
- b) unterschiedliche raumzeitliche Skalen
- c) Sensitivität der Jahrringchronologien
- d) Emergenz

## a) Verfügbarkeit von Klimadaten

Für die Untersuchung von Klima / Wachstums-Beziehungen besteht ein Mangel an langen, kontinuierlich erhobenen meteorologischen Messreihen mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung. So konnten z. B. für den Klima-Trendatlas Deutschland nach abgeschlossener Qualitätskontrolle, insbesondere im Hinblick auf die Homogenität der Daten für den Zeitraum von 1901 bis 2000, nur 10 Temperaturreihen berücksichtigt werden (Schönwiese, & Janoschitz, 2008). Selbst Klimadaten von Stationen, die eine geringe räumliche Distanz zum Standort aufweisen, erlauben zwar gute Rückschlüsse auf die im Bestand vorherrschenden, klimatischen Bedingungen bzw. das sogenannte Bestandsklima (Kraus, 2008), können jedoch Messungen aus dem Bestand nicht vollends substituieren (Xia et al., 1999).

## b) Unterschiedliche, raumzeitliche Skalen

Klima / Wachstums-Beziehungen können auf unterschiedlichen raumzeitlichen Skalen ablaufen. Im Idealfall bedeutet dies für die Messung meteorologischer Messgrößen, dass durch das Messdesign diejenigen Skalen erfasst werden sollten, die für das Verständnis des Prozesses relevant sind. Ein aus theoretischer Sicht perfektes Messdesign lässt sich jedoch nicht umsetzen, da keine exakte Eingrenzung der raumzeitlichen Skalen möglich ist. Exemplarisch sei an dieser Stelle die Isotopenfraktionierung im Baum genannt. Die Fraktionierung ist neben der Baumart maßgeblich abhängig von Umweltparametern wie Temperatur, Luftfeuchte, Lichteinfall etc. In Konsequenz nehmen diese Umweltparameter Einfluss auf das im Jahrring abgespeicherte Isotopenverhältnis (Gagen et al., 2011). Diese Umweltparameter sind aber zum selben Zeitpunkt an den verschiedenen Positionen des Baumes zumeist unterschiedlich, so dass gravierende Unterschiede in der

# 1. EINFÜHRUNG

---

Isotopenfraktionierung innerhalb eines Baumes auftreten können (Barnard et al., 2012). Die exakte Untersuchung der Isotopenfraktionierung innerhalb eines Individuums ist somit schwierig bis unmöglich, da sie allein schon von Blatt zu Blatt bzw. von Nadel zu Nadel stark variieren kann (Barnard et al., 2012). Das im Jahrring vorliegende Isotopenverhältnis ist somit auf die einzelnen Isotopenfraktionierungsprozesse im Baum zurückzuführen.

Ferner sollten auch Autokorrelationen und die mögliche, zeitliche Verzögerung zwischen Einfluss und Wuchsreaktion berücksichtigt werden.

## c) Sensitivität der Jahrringchronologien

Die Sensitivität als berechenbarer Parameter, der die Jahr-zu-Jahr-Variabilität in Jahrringchronologien angibt, ist ein Maß für die Reaktionsfähigkeit des Baumes auf Umwelteinflüsse (Speer, 2010). An dieser Stelle ist aber die Sensitivität in Bezug auf einzelne Klimatelemente bzw. der Zusammenhang zu einzelnen Klimatelementen gemeint. Friedrichs et al. (2009a) konnten zeigen, dass die Zusammenhänge zwischen Jahrringchronologien und einzelnen Klimatelementen zeitlich instabil sein können.

Neben dem möglichen Auftreten von zeitlichen Instabilitäten sind verschiedene Standorte unterschiedlich sensitiv gegenüber einzelnen Klimatelementen. Insbesondere in großen Netzwerken, die verschiedene Baumarten und ein großes Spektrum standortökologischer Faktoren repräsentieren, ist die Analyse von Klima / Wachstums-Beziehungen daher sehr aufwendig. Oft werden die Standortchronologien nach ähnlichen Wachsmustern gruppiert bzw. geclustert. Abhängig von der verwendeten Gruppierungsmethode kann die Gruppenzusammensetzung jedoch sehr unterschiedlich sein (Friedrichs et al., 2009b). Die Gruppierung nach Wachsmustern ist gängige Praxis, jedoch nicht unproblematisch, da ähnliche Wachsmuster nicht zwingend mit ähnlichen Sensitivitäten gegenüber einzelnen Klimatelementen einhergehen müssen. Wird z. B. anhand von Jahrringbreitenserien geclustert, so beziehen sich die Ergebnisse auf den für die Jahrringbildung relevanten Gesamtzeitraum (zumeist mehrere Monate). Werden die aus der Clusterung abgeleiteten Gruppen mit einer feineren zeitlichen Auflösung (z. B. Analyse von einzelnen Monaten) auf ihre Klima / Wachstums-Beziehungen hin untersucht, wird automatisch ohne weitere Prüfung die These angenommen, dass die Gruppenzusammensetzung unter Zugrundelegung der feineren zeitlichen Auflösung unverändert bleibt. Dabei wird die Möglichkeit außer Acht gelassen, dass z. B. Standorte derselben Gruppe für den Gesamtzeitraum zwar sehr ähnliche Wachsmuster aufweisen können, aber unterschiedliche Sensitivitäten und somit unterschiedliche klimatisch bedingte Wuchsreaktionen für eine oder mehrere jahreszeitlichen Perioden nicht ausgeschlossen werden, können. Neben diesem Problem können synchrone, wiederkehrende, nicht klimatische Ereignisse, die mehrere Standorte betreffen (z. B. Insektenbefall, Forstmaßnahmen oder sonstige anthropogene Einflüsse), zu ähnlichen Wachsmustern führen und somit ähnliche Klima /

# 1. EINFÜHRUNG

---

Wachstums-Beziehungen suggerieren. In großen Netzwerken mit vielen Standorten ist dieses Problem jedoch von untergeordneter Bedeutung.

## d) Emergenz

Unter der Annahme, dass die in a) bis c) beschriebenen Probleme gelöst wären und die Wechselwirkung zwischen einzelnen Klimaelementen und ihren Auswirkungen auf das Wachstum bekannt wären, ergibt sich unter Zugrundelegung der schwachen Emergenz (vgl. Kolodkin et al., 2011) die Schlussfolgerung, dass Klima / Wachstums-Beziehungen umfassend erklärt werden können. Dies ist darin begründet, dass die Komponenten, aus denen das übergeordnete System besteht, die Eigenschaften des übergeordneten Systems determinieren. Unter Zugrundelegung der starken Emergenz (Laughlin, 2006) ist eine umfassende Erklärung der Klima / Wachstums-Beziehungen hingegen nicht möglich. Dies ergibt sich daraus, dass Eigenschaften höherer Komplexitätsstufen nicht unbedingt mit den Eigenschaften der untergeordneten Stufen zu erfassen sind. Schon Aristoteles (384-322 v. Chr.) kam in seinem Werk Metaphysik im 7. Buch sinngemäß zum Schluss „das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile“ (Morel et al. 2007). Überträgt man dies auf die Klima / Wachstums Beziehungen, bedeutet dies, dass das in den Jahrringen vorhandene Klimasignal mehr ist als die Summe der Einflüsse der einzelnen Klimaelemente. Für die Untersuchung von Klima / Wachstums-Beziehungen kommt jedoch der theoretischen Unterscheidung zwischen starker und schwacher Emergenz und sonstigen Definitionen von Emergenz (z. B. Halley & Winkler 2008) eine untergeordnete Bedeutung zu. Denn selbst bei Vorliegen von schwachen Emergenzen ist eine „umfassende“ Erklärung der raumzeitlichen Muster des Jahrringwachstums u.a. durch das Fehlen von räumlich und zeitlich hoch aufgelösten meteorologischen Messreihen sowie durch die hohe Komplexität von Klima / Wachstums-Beziehungen nicht möglich. Ungeachtet der komplizierten Zusammenhänge zwischen Klima und Wachstum sind die atmosphärischen Prozesse bzw. das Klimasystem für sich betrachtet ein hochgradig nichtlineares, hochkomplexes, dynamisches System, welches positive und negative Rückkopplungen beinhaltet (Bernhardt 2012).

Zahlreiche dendroklimatologische Studien belegen (vgl. Kap. 1.1), dass trotz der beschriebenen Probleme Jahrringe als Klimaproxies geeignet sind. Starke und somit rekonstruierbare Zusammenhänge treten jedoch zumeist nur für die Klimaelemente Temperatur, Niederschlag und für Luftdruck bzw. Luftdruckindizes auf. Unter Zugrundelegung der oben beschriebenen Problemfelder ist der klassische Ansatz (Abb. 1.1), basierend auf der Analyse einzelner Klimaelemente, für die Verbesserung des bereits bestehenden Verständnisses von raumzeitlichen Mustern des Jahrringwachstums (vgl. Neuwirth 2010) wenig hilfreich.

Der hier vorgestellte Wetterlagenansatz basiert nicht darauf, möglichst hoch aufgelöste meteorologische Datensätze für die Analyse von Klima / Wachstums-Beziehungen

# 1. EINFÜHRUNG

---

heranzuziehen, sondern bedient sich höherskaliger Phänomene des Klimasystems, die zwischen Meso- und Makroskala liegen, durch die Verwendung von Wetterlagen. In Abbildung 1.1 sind die Unterschiede zwischen dem Wetterlagenansatz und dem klassischen Ansatz dargestellt. Der Wetterlagenansatz bzw. das dahinterstehende Verfahren beruht auf einer mehrschrittigen Prozedur (siehe Kap. 3), in deren Rahmen ein Index, der sogenannte ACTI, berechnet wird. ACTI ermöglicht es, den Zusammenhang zwischen nominal skalierten Wetterlagen und rational skalierten Jahrringchronologien zu analysieren und somit Wetterlagen / Wachstums-Beziehungen bzw. Klima / Wachstums-Beziehungen zu untersuchen.

Bevor aus theoretischer Perspektive auf die Potenziale des neuen Ansatzes in Bezug auf die oben beschriebenen Problemfelder (a bis d) eingegangen wird, ist eine kurze Definition des Begriffs Wetterlage (weiterführend hierzu Kap. 2.2) erforderlich. Baur z. B. definiert seine als Großwetterlagen bezeichneten Wetterlagen als: „die mittlere Luftdruckverteilung eines Großraumes, mindestens von der Größe Europas während eines mehrtägigen Zeitraumes, in welchem gewisse Züge aufeinanderfolgender Wetterlagen gleichbleiben, eben jene Züge, welche die Witterung in den einzelnen Teilgebieten des Großraums bedingen“ (Baur et al., 1944).

In Bezug auf die oben dargestellten 4 Hauptproblemfelder (a bis d) ergeben sich für den Wetterlagenansatz folgende theoretische Überlegungen:

## zu a) Verfügbarkeit der Klimadaten

Das Vorhandensein von langen, räumlich und zeitlich hoch aufgelösten meteorologischen Messdaten ist für den neuen Ansatz von untergeordneter Bedeutung. Allein für Europa gibt es Dutzende Wetterlagen-Klassifikationen, die teilweise auch lange Zeiträume bis 1881 und darüber hinaus abdecken (Phillip et al., 2010). Da Wetterlagen die atmosphärischen Zirkulationsbedingungen für einen Großraum beschreiben, herrscht an allen untersuchten Standorten im Geltungsbereich der verwendeten Wetterlagen-Klassifikation zum selben Zeitpunkt dieselbe Wetterlage vor. Die meteorologischen Messgrößen (Temperatur, Niederschlag, etc.), die in engem Zusammenhang mit den Wetterlagen stehen, können jedoch bei ein und derselben Wetterlage an den verschiedenen Standorten sehr unterschiedlich sein. Der Zusammenhang zwischen den klimatischen Bedingungen am Standort und der Wetterlage ermöglicht es, Klima / Wachstums-Beziehungen zu untersuchen, ohne auf hoch aufgelöste Klimadaten zurückgreifen zu müssen.

## zu b) Unterschiedliche, raumzeitliche Skalen

In Bezug auf die Raum- und Zeitskalen sind folgende Aspekte bei der neuen Methode zu berücksichtigen. Eine exakte, räumliche Auflösung des Wetterlagenansatzes kann nicht angegeben werden, da es sowohl mikro- als auch mesoskalige Prozesse gibt, die auf die Wetterlage als übergeordneten steuernden Faktor zurückzuführen sind.

# 1. EINFÜHRUNG

---

Bei den meisten Klassifikationen liegen die Wetterlagendatensätze in täglicher Auflösung vor. Klimatisch gesteuerte Wachstumsprozesse, die unterhalb dieser zeitlichen Auflösung liegen, können trotzdem erfasst werden, sofern Zusammenhänge zur Wetterlage bestehen und durch die Aggregation zu einer Wetterlage keine entscheidenden Informationsverluste auftreten. Ähnliches gilt auch für Prozesse, die oberhalb der zeitlichen Auflösung liegen.

Die Erstellung von klimatischen Zeitreihen mit geringerer zeitlicher Auflösung (z. B. Wochen-, Monats-, Jahresmittel) entfällt und ist auch aufgrund des Wetterlagendatensatzes (Nominalskala) nicht möglich (Wetterlagenhäufigkeiten können hingegen berechnet werden). Informationsverluste, die durch Summierung oder Mittelung der Klimadaten (z. B. Erstellung von Monatsmitteln) entstehen, sind somit ausgeschlossen. So sind z. B. singuläre Ereignisse wie Spätfröste im Frühjahr in gemittelten Temperaturzeitreihen oft nicht mehr verifizierbar. Solche Ereignisse können sich aber auf die Jahrringbildung stark auswirken (Dittmar et al., 2006; Lebourgeois, 2007).

## zu c) Sensitivität der Jahrringchronologien

In Bezug auf die Sensitivität bzw. statistischen Zusammenhänge zwischen Jahrringchronologien und einzelnen Klimaelementen ergeben sich folgende Vorteile gegenüber dem klassischen Ansatz: Wie schon oben unter c) beschrieben können die statistischen Zusammenhänge zwischen einzelnen Klimaelementen und Jahrringbreitenchronologien instabil sein. Der Wetterlagenansatz untersucht nicht den Zusammenhang zwischen Jahrringchronologien und einzelnen Klimaelementen, sondern den Zusammenhang zwischen den Jahrringchronologien und Wetterlagen. Die Wetterlage ihrerseits steht wiederum im Zusammenhang mit allen Klimaelementen. Instabilitäten zwischen Jahrringparametern und Klimaelementen, die nur einzelne Klimaelemente betreffen, sollten aus theoretischer Sicht somit nicht zum Verlust des statistischen Zusammenhangs führen, zumindest nicht unter der Voraussetzung, dass die Zusammenhänge zwischen Wetterlage und Klimaelement stabil bleiben.

## zu d) Emergenz

Das in Jahrringchronologien gespeicherte Klimasignal ergibt sich aus dem Einfluss der einzelnen Klimaelemente und deren komplexen Wechselwirkungen auf das Wachstum. Das heißt: Für einen Standort können selbst Klimaelemente, die schwache oder keine signifikanten Zusammenhänge zeigen, in ihrer Kombination großen Einfluss auf das Wachstum nehmen. Der Zusammenhang zwischen Wetterlagen und einzelnen Klimaelementen erlaubt es, auch bei Vorliegen von solchen komplexen Klima / Wachstums-Beziehungen diese zu untersuchen.

Der neue Ansatz versucht nicht, Klima / Wachstums-Beziehungen durch Prozesse auf niederen Systemebenen unter Berücksichtigung der auftretenden Wechselwirkung (z. B. zwischen einzelnen Klimaelementen) zu erklären, sondern zieht ein höherskaliges

# 1. EINFÜHRUNG

---

Phänomen, die Wetterlage, für die Erklärung von Klima / Wachstums-Beziehungen heran. Dies hat zur Folge, dass nur solche Phänomene und ihre Auswirkung auf das Wachstum berücksichtigt werden können, die einen Zusammenhang zur Wetterlage aufweisen. Auf der anderen Seite führt der Wetterlagenansatz dazu, dass Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Klimaelementen besser erfasst werden. Ferner hat dieses Vorgehen zur Folge, dass emergente Prozesse auf der Ebene der Wetterlage mitberücksichtigt werden und somit zu einem umfassenderen Verständnis von Klima / Wachstums-Beziehungen beitragen.

Die zuvor dargelegten theoretischen Überlegungen zeigen, dass der Wetterlagenansatz (Abb. 1.1) das Potenzial hat, das Verständnis von Klima / Wachstums-Beziehungen zu verbessern. Aus dem Resümee der theoretischen Überlegungen ergeben sich folgende Fragestellungen:

- Kann der neue Wetterlagenansatz nicht nur in Bezug auf die theoretischen Erwägungen, sondern in tatsächlicher Hinsicht das Verständnis von Klima / Wachstums-Beziehungen verbessern?
- Können die Standorte nach ähnlichen Wetterlagenreaktionen gruppiert werden?
- Welche Faktoren (z. B. räumliche Lage, Baumart, Höhenlage, etc.) wirken sich auf die Wetterlagensensitivität eines Standortes aus?
- Sind Standorte, an denen komplexe Klima / Wachstums-Beziehungen vorliegen, wetterlagensensitiver als Standorte, an denen ein Klimaelement der dominierende Faktor ist?
- Welche Wetterlagen bzw. Wetterlagenkombinationen wirken sich maßgeblich auf das Jahrringwachstum aus?

Für die Beantwortung dieser Fragestellungen ergeben sich Voraussetzungen, die der Wetterlagenansatz bzw. das dahinterstehende Verfahren erfüllen sollte. Das Verfahren muss neben der Grundfähigkeit, die Zusammenhänge zwischen nominal skalierten Wetterlagendaten und rational skalierten Jahrringchronologien zu untersuchen, unter optionaler Einbindung verschiedener Jahrringparameter folgende Fähigkeiten aufweisen:

- flexible Wahl der jahreszeitlichen Untersuchungsperiode (z. B. Jahreszeit, Monat)
- die Möglichkeit zur Gruppierung der Standortchronologien, basierend auf ähnlichen Wetterlagenreaktionen
- Kompatibilität mit allen Wetterlagen-Klassifikationen
- Untersuchung einzelner Wetterlagen und Wetterlagenkombinationen
- Einbindung von Klimadaten für Kreuzvergleiche:

Wetterlage	↔	Baumwachstum
Wetterlage	↔	Klimaelement
Baumwachstum	↔	Klimaelement

# 1. EINFÜHRUNG

---

Zur Beantwortung der oben dargelegten Fragestellungen liegt der Arbeit folgende Struktur zugrunde. Das vorausgegangene Kapitel 1.1 diene dazu, den aktuellen Stand der Forschung sowie die Schwierigkeiten und die Vorteile, die mit einer wetterlagenbasierten Analyse von Klima / Wachstums-Beziehungen einhergehen, zu erörtern. Kapitel 1.2 zielt darauf, aus einem theoretischen Betrachtungswinkel den Wetterlagenansatz dem „klassischen Ansatz“ gegenüberzustellen sowie die sich daraus ableitenden Ziele der Arbeit nebst der Struktur vorzustellen. Bevor in Kapitel 3 die mehrschrittige Prozedur am Beispiel des Frühjahres beschrieben wird, werden in Kapitel 2 die Dendrodaten (Kap. 2.1), Wetterlagendaten (Kap. 2.2), Klimadaten (Kap. 2.3) sowie die statistischen Methoden (Kap. 2.4) vorgestellt. In Kapitel 4 wird der Einfluss von verschiedenen Simulationseinstellungen, Standardisierung der Jahrringdaten und standortspezifischen Eigenschaften auf die Ergebnisse erörtert. Die Überprüfung der Plausibilität der durch den neuen Ansatz erzielten Ergebnisse erfolgt in Kapitel 5. In Kapitel 6 wird die Übertragbarkeit des Verfahrens auf verschiedene jahreszeitliche Perioden überprüft sowie die zeitliche Stabilität der gefundenen Signale untersucht. In Kapitel 7 werden die Ergebnisse vor dem Hintergrund der in Kapitel 1.1 und 1.2 angestellten Überlegungen diskutiert. Ein Überblick über die Potenziale der Prozedur und ein Ausblick werden in Kapitel 8 gegeben, gefolgt von einer kurzen Zusammenfassung in Kapitel 9.

### 2. Daten und Methoden

Im Folgenden werden die verwendeten Datensätze, die sich in Dendrodaten, Wetterlagendaten und Klimadaten gliedern, vorgestellt. Die Klimadaten werden neben den rein statistischen Verfahren zur Verifizierung der Prozedur für die oben beschriebenen Kreuzvergleiche benötigt. Das Kapitel stellt neben den Datensätzen auch die wesentlichen, zur Aufbereitung und Auswertung der jeweiligen Datensätze erforderlichen statistischen Methoden vor.

#### 2.1 Dendrodaten

Die in Kapitel 3 nachstehend beschriebene Prozedur kann auf alle gängigen Jahrringparameter angewendet werden. Sie wird anhand eines zentraleuropäischen Jahrringbreitennetzwerkes, welches Standorte aus Deutschland und der Schweiz beinhaltet, vorgestellt. Die verwendeten Standorte wurden aus dem Bonner Dendronetzwerk, welches über 540 Chronologien umfasst, entnommen und in 2 Datensätze (I, II), die unterschiedliche Eigenschaften haben, aufgeteilt. Die Prozedur wird anhand dieser beiden Datensätze vorgestellt bzw. validiert. Der überwiegende Anteil der verwendeten Chronologien wurde von der „Bonner Dendrogruppe“ erhoben und schon in verschiedenen Publikationen verwendet (Fischer & Neuwirth 2012; Friedrichs et al., 2009a; Schultz et al., 2008, 2009; Neuwirth et al., 2007a, b; Neuwirth 2010). Diese Standorte bestehen mindestens aus 12 Bäumen mit zwei oder mehr Bohrkernen. Neben diesen Chronologien werden auch zusätzlich Fremddaten verwendet, die zu einer verbesserten räumlichen Dichte des Netzwerkes beitragen. Das gemeinsame Zeitfenster aller Chronologien umfasst den Zeitraum von 1901–1990.

Der Datensatz I besteht aus 115 Standorten und ist charakterisiert durch eine Dominanz von Buchen- und Eichenstandorten (Abb. 2.1). Zur Überprüfung der Gruppierung, die im Rahmen der Prozedur vorgenommen wird, sind im Datensatz I von einigen Baumarten nur sehr wenige Standortchronologien enthalten. Die Häufigkeiten der einzelnen Baumarten im Datensatz I entspricht somit nicht der natürlichen Verteilung. Es gibt nur einen Lärchen- und einen Douglasienstandort. Datensatz II hingegen besteht aus insgesamt 50 Standorten mit 21 Buchen- und 29 Eichenstandorten.

Die Jahrringserien wurden durch cross-dating (Cook et al., 1992) auf ihre Synchronität überprüft (Rinn, 2003; Holmes, 1983). Um nichtklimatische, alterstrendbedingte Wachstumstrends zu entfernen (Fritts, 1976), wurden kubische Splinefunktionen verwendet (Cook und Peters, 1981). Zur Betonung von hochfrequenten Signalen wurden die einzelnen Serien individuell trendbereinigt, indem Ratios von einem 32-jährigen kubischen Spline mit 50 % Varianzreduktion berechnet wurden. Für die Untersuchung von interannuellen bis multidekadischen Frequenzen wurden 300-jährige Splinefunktionen verwendet. Die so standardisierten Zeitreihen wurden mit einem „biweight robust mean“

## 2. DATEN UND METHODEN

(Cook, 1985) (weniger empfindlich gegenüber Ausreißern als der arithmetische Mittelwert) zu Standortchronologien gemittelt.

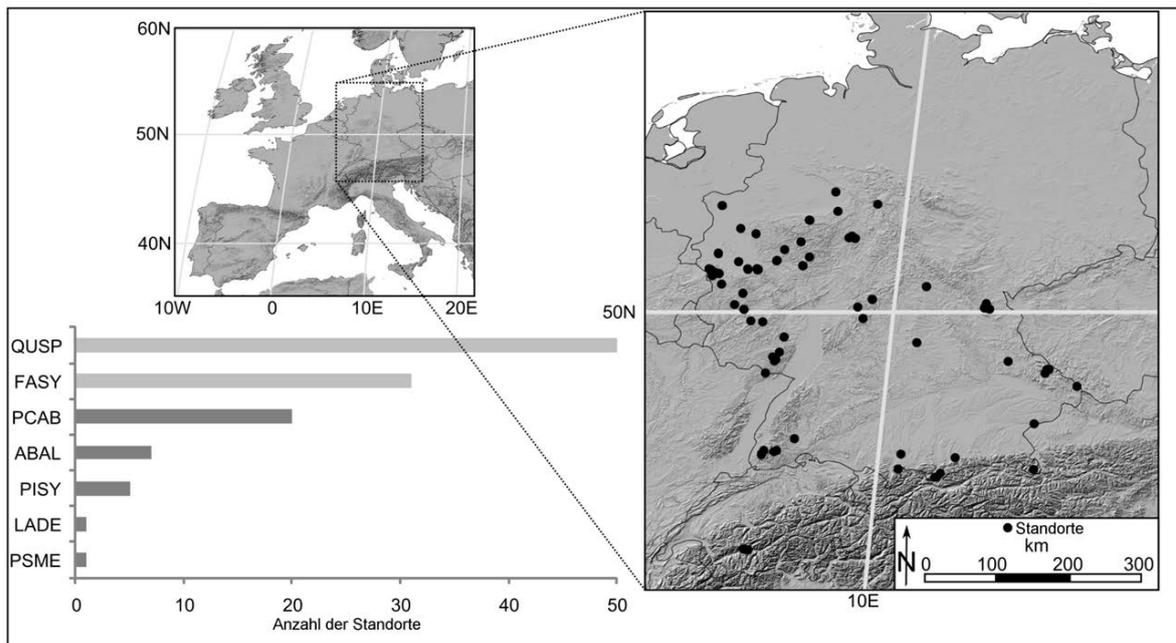


Abbildung 2.1: Räumliche Lage aller verwendeten Standorte. Für den Datensatz I sind die Häufigkeiten der einzelnen Baumarten in absoluten Zahlen angegeben; für Datensatz II siehe Text. Folgende Baumarten wurden verwendet: *Abies alba* (ABAL; Weiß-Tanne), *Fagus sylvatica* (FASY; Buche), *Larix decidua* (LADE; Lärche), *Quercus species* (QUSP; Eiche), *Picea abies* (PCAB; Fichte), *Pinus sylvestris* (PISY; Waldkiefer) und *Pseudotsuga menziesii* (PSME; Douglasie) (nach: Schultz & Neuwirth 2012).

In einem gleitenden Zeitfenster wurden die statistischen Parameter  $R_{bar}$  (interseries correlation) und EPS (expressed population signal) für die einzelnen Standortchronologien berechnet (Wigley et al., 1984); eine Erklärung der Parameter findet sich u.a. in Storch & Navarra 1999. Datensatz I beinhaltet Chronologien mit niedrigen, mittleren und hohen EPS- und  $R_{bar}$ -Werten. Hingegen sind in Datensatz II nur Standortchronologien eingeflossen, die nicht nur im Mittel für die gesamte Chronologie, sondern in allen gleitenden Zeitfenstern das für eine Klimarekonstruktion erforderliche EPS-Niveau von 0.85 erreichen (siehe Anhang A, B) (Wigley et al., 1984).

### 2.2 Wetterlagendaten

Insbesondere für Europa, aber auch für andere Teile der Welt sind verschiedene subjektive und objektive Wetterlagen-Klassifikationen verfügbar. Als subjektive Klassifikationen werden solche bezeichnet, bei denen die Klassifizierung manuell durchgeführt wird. Hingegen handelt es sich bei den objektiven Klassifikationen um algorithmisierte automatisierte Klassifikationen, deren Ergebnisse reproduzierbar sind.

Die Anzahl der Wetterlagen variiert von Klassifikation zu Klassifikation stark. Die Vergleichbarkeit zwischen den verschiedenen Klassifikationen ist dadurch nicht gegeben

## 2. DATEN UND METHODEN

---

oder zumindest erschwert (Fleig et al., 2010), so dass die Auswahl einer Klassifikation für eine spezifische Fragestellung schwierig sein kann (Jacobeit, 2010). Im Rahmen des EU-Projektes COST733 wurden verschiedene Wetterlagen-Klassifikationen miteinander verglichen (Philipp et al., 2010). In vielen Studien wird die subjektive Großwetterlagen-Klassifikation von Hess-Brezowsky verwendet. Von dieser Klassifikation existiert auch eine objektive Variante (James, 2007), jedoch sind die ausgewiesenen Wetterlagenklassen nicht mit der subjektiven Version vergleichbar.

Der „Katalog der Großwetterlagen Europas“ bzw. der dahinterstehende Datensatz wurde auf seine Homogenität hin untersucht und als homogen erachtet (Werner et al., 2000). Hingegen zeigten Cahynová & Huth (2009) über den Vergleich verschiedener Klassifikationen, dass die Persistenzänderungen (vgl. hierzu Klaus 1993) bzw. die Änderung der Andauer der Wetterlagen im Hess-Brezowsky Katalog nachweisbar sind, diese aber nicht in den objektiven Klassifikationen auftreten.

Der in dieser Arbeit vorgestellte Wetterlagenansatz ist auf alle Wetterlagen-Klassifikationen anwendbar und wird exemplarisch an der subjektiven Großwetterlagen-Klassifikation von Hess-Brezowsky vorgestellt. Der „Katalog der Großwetterlagen Europas“, der auf den Kalender der Großwetterlagen von Baur et al., (1944) zurückzuführen ist, von Hess-Brezowsky 1952, 1969, 1977 ergänzt und fortentwickelt bzw. von Werner und Gerstengarbe regelmäßig aktualisiert (1999, 2005 und 2010) wurde (Werner und Gerstengarbe 2010), unterscheidet 29 verschiedene Großwetterlagen (Abb. 2.2).

Die 29 Großwetterlagen (GWL) lassen sich ihrerseits in 10 Großwettertypen (GWT) zusammenfassen, die die Hauptanströmrichtungen repräsentieren. Diese lassen sich wiederum den drei Zirkulationsformen zonal, meridional und gemischt zuordnen (Abb. 2.2). Die Wetterlage Tief Mitteleuropa (TM), für die keine klare Zuweisung der Zirkulationsform möglich ist, wird im Allgemeinen aufgrund der wechselnden Strömungskomponenten der gemischten Zirkulation zugeordnet (Werner und Gerstengarbe 2010).

Tage, die nicht eindeutig zu klassifizieren sind bzw. eine Übergangssituation zwischen zwei Wetterlagen darstellen, werden im „Katalog der Großwetterlagen“ mit der Notation U für undefiniert bzw. Übergang versehen.

Darüber hinaus, der in Kapitel 1.2 vorgestellten Großwetterlagen Definition folgend, besteht der sogenannte „mehrtägige Zeitraum“ bzw. die Mindestandauer einer Großwetterlage bei der Hess-Brezowsky Klassifikation aus 3 Tagen.

Aus dieser Mindestandauer ergibt sich z. B. für einen Monat mit 31 Tagen, dass theoretisch maximal 11 verschiedene Wetterlagen in einem Monat eines Jahres auftreten können. Dies führt zu dem in Kapitel 1.1 beschriebenen Problem der dünnbesetzten Häufigkeitsmatrix.

## 2. DATEN UND METHODEN

Der Großwetterlegendatensatz hat eine tägliche Auflösung und geht bis in das Jahr 1881 zurück (Werner und Gerstengarbe 2010). Im Rahmen dieser Arbeit wird sowohl der Katalog von 2005 (Gerstengarbe und Werner 2005), der den Zeitraum von 1881 bis 2004 abdeckt, als auch der überarbeitete und ergänzte Katalog von 2010 (Werner und Gerstengarbe 2010) verwendet.

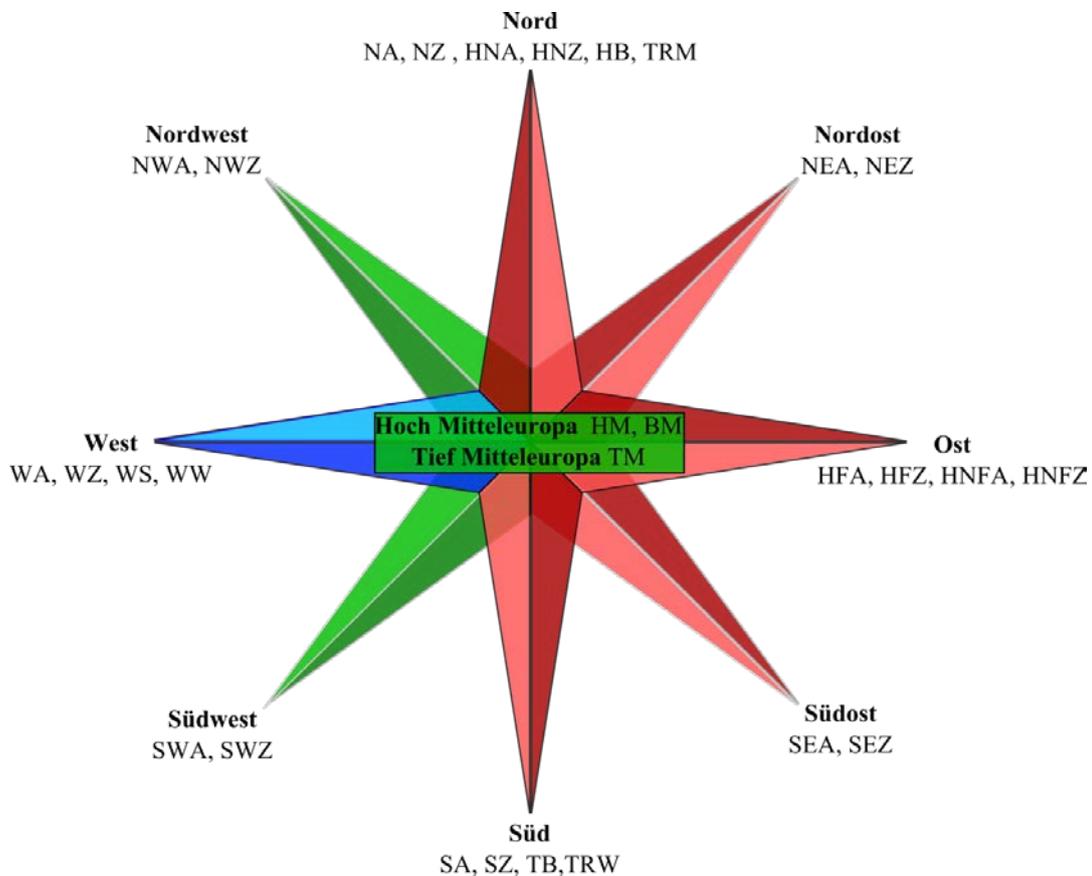


Abbildung 2.2: Großwetterlagen und Großwettertypen, dargestellt mit der jeweiligen Zirkulationsform. Die Farben repräsentieren die Zirkulationsformen: zonal (blau), gemischt (grün) und meridional (rot). Die 10 Großwettertypen sind in fetter Schrift und die Wetterlagen mit ihren jeweiligen Kürzeln dargestellt.

Westlage, antizyklonal (WA); Westlage, zyklonal (WZ); Südliche Westlage (WS); Winkelförmige Westlage (WW); Südwestlage, antizyklonal (SWA); Südwestlage, zyklonal (SWZ); Nordwestlage, antizyklonal (NWA); Nordwestlage, zyklonal (NWZ); Hoch Mitteleuropa (HM); Hochdruckbrücke (Rücken) Mitteleuropa (BM); Tief Mitteleuropa (TM); Nordlage, antizyklonal (NA); Nordlage, zyklonal (NZ); Hoch Nordmeer-Insel, antizyklonal (HNA); Hoch Nordmeer-Insel, zyklonal (HNZ); Hoch Britische Inseln (HB); Trog Mitteleuropa (TRM); Nordostlage, antizyklonal (NEA); Nordostlage, zyklonal (NEZ); Hoch Fennoskandien, antizyklonal (HFA); Hoch Fennoskandien, zyklonal (HFZ); Hoch Nordmeer-Fennoskandien, antizyklonal (HNFA); Hoch Nordmeer-Fennoskandien, zyklonal (HNFZ); Südostlage, antizyklonal (SEA); Südostlage, zyklonal (SEZ); Südlage, antizyklonal (SA); Südlage, zyklonal (SZ); Tief Britische Inseln (TB); Trog Westeuropa (TRW)

Diese im PIK Report veröffentlichte Version endet im Jahr 2009. Für die Analysen werden aber die Daten einschließlich des Jahres 2010 verwendet. Für die Herleitung der Prozedur ergeben sich durch die Verwendung unterschiedlicher langer Großwetterlegendatensätze

keine Nachteile, da das zur Kalibrierung benutzte Zeitfenster nur den Zeitraum von 1901–1990 umfasst. Für die Untersuchung von Zusammenhängen zwischen ACTI und verschiedenen Klimaelementen ist jedoch eine Untersuchung über das Zeitfenster (1901–1990) hinaus als sinnvoll zu erachten. Für Kapitel 3 –Berechnung des ACTI–, für Kap. 4 –für die Gruppenbildung relevante Einflussfaktoren– sowie für Kapitel 5 –Kreuzvalidierung und Plausibilitätsprüfung– wird der Katalog von 2005 verwendet. Für die in Kapitel 6 und 7 präsentierten Ergebnisse wurde der Programm-Code zur Berechnung von ACTI auf die aktuelle Fassung des Katalogs von 2010 umgestellt.

### 2.3 Klimadaten

Für die Untersuchung von klimatischen Signalen im ACTI werden verschiedene Klimadaten verwendet. Darüber hinaus dienen diese Datensätze zur Verifizierung der Prozedur bzw. für die Durchführung der in Kapitel 1.2 beschriebenen Kreuzvergleiche. Im Folgenden werden die verwendeten Datensätze mit jeweiligem Herausgeber vorgestellt:

(1) Von den National Centers for Environmental Prediction (NCEP) bzw. vom National Center for Atmospheric Research (NCAR) wurde der gesamte Reanalyse Datensatz ( $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ ) (Kalnay et al., 1996) –vornehmlich Luftdruck, Niederschlag, zonaler und meridionaler „wind stress“ (auch als Windschubspannung bezeichnet) und relative Feuchte–, verwendet. Der Datensatz ist ab dem Jahr 1948 verfügbar.

(2) Für die Untersuchung längerer Zeiträume wurde der 20th Century Reanalysis V2 Datensatz (Compo et al., 2011) verwendet, der von der NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), OAR (Office of Oceanic and Atmospheric Research), ESRL (Earth System Research Laboratory) und PSD (Physical Sciences Division) ( $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ ) erstellt wurde –vornehmlich Luftdruck, zonaler und meridionaler „wind stress“–. Der Datensatz deckt das Zeitfenster von 1878 bis 2010 ab.

(3) Für die genauere Untersuchung der Zusammenhänge zwischen ACTI und Niederschlag wurde der hoch aufgelöste E-OBS 7.0-Datensatz ( $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ ) (Haylock et al., 2008) herangezogen, der im Rahmen des European Climate Assessment & Dataset Project erstellt worden ist und ab dem Jahr 1950 verfügbar ist.

(4) Von der Climatic Research Unit (CRU) wurden die Grid-Datensätze (TS 3.10) für Wasserdampfdruck, Minimum- und Maximumtemperatur ( $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ ) (Mitchell und Jones, 2005) verwendet, die das Zeitfenster von 1901 bis 2009 abdecken.

## 2. DATEN UND METHODEN

---

(5) Vom Climatic Research Unit (CRU) wurde der Sea Surface Temperature-Datensatz (HadISST1) (Rayner et al., 2003) verwendet. Die Daten liegen in einer Auflösung von  $1^\circ \times 1^\circ$  vor und sind ab 1870 verfügbar.

(6) Ferner wurde der vom Hadley Centre in Kooperation mit der Climatic Research Unit erstellte CRUTEM3-Datensatz (average temperature Northern Hemisphere) (Brohan et al., 2006), der ab dem Jahr 1850 vorliegt, verwendet.

Das gemeinsame Zeitfenster aller verwendeten Datensätze (Jahrringbreitenchronologien 1901–1990, Wetterlagendaten 1881–2009, Klimadaten 1950–2006) umfasst somit den Zeitraum von 1950–1990.

### 2.4 Anmerkungen zu den statistischen Methoden

Neben den schon beschriebenen Methoden zur Standardisierung und zur Bestimmung der Güte der verwendeten Jahrringbreitenchronologien werden im Folgenden nur die wesentlichen statistischen Methoden beschrieben, die zur Auswertung der Ergebnisse bzw. zur Validierung der Prozedur verwendet werden. Dabei werden bei der Methodenauswahl bewusst Verfahren gewählt, deren Ergebnisse eindeutig zu interpretieren sind. Dies ist darin begründet, dass der Fokus der Arbeit darauf liegt, eine auf Wetterlagen basierende Prozedur zu entwickeln, die es ermöglicht, Klima / Wachstums-Beziehungen umfassender zu erklären (Kap. 1.2), diese zu validieren und die erzielten Ergebnisse und somit die Prozedur auf ihre Plausibilität hin zu überprüfen. Der Fokus liegt somit nicht auf der Interpretation der physikalischen und biologischen Prozesse, die den Klima / Wachstums-Beziehungen zugrunde liegen. In diesem Zusammenhang wäre u.a. die Anwendung von Verfahren wie Spektral-, Hauptkomponenten-, Faktorenanalyse oder die Berechnung von EOFs (Empirical Orthogonal Functions) sinnvoll. Zur Verbesserung des Verständnisses werden die im Rahmen der Prozedur benötigten Methoden unmittelbar in Kapitel 3, welches die Prozedur vorstellt, beschrieben. Die Prozedur wurde in der proprietären Programmiersprache, MATLAB umgesetzt und beruht u.a auf einer Monte Carlo-Simulation. Da sie sehr rechenintensiv ist, sind schon vorhandene MATLAB-Algorithmen, insbesondere zur Berechnung der Korrelation, durch eigene parallelisierte, multithreading fähige Algorithmen (die einzelnen Prozesse können somit parallel und konkurrierend in einzelnen Teilen bearbeitet werden) ersetzt worden. Die Simulationszeit konnte so um den Faktor 10 reduziert werden.

Für die Untersuchung räumlicher Zusammenhänge zwischen gegitterten Klimadaten (siehe 2.3) und ACTI sowie Gruppenchronologien wurden mit dem “Climate Explorer” (van Oldenborgh et al., 2009) Korrelationen berechnet und das sich daraus ergebende räumliche Korrelationsmuster kartografisch dargestellt. Auf diese Weise wurden sowohl Rohdaten als auch gefilterte Datensätze untersucht. Für die Analyse von hochfrequenten Signalen wurde

## 2. DATEN UND METHODEN

---

die Differenz von jedem Messwert zum Vorjahreswert berechnet. Dieses Vorgehen führt dazu, dass u.a. Trends aus den Datensätzen entfernt werden und fungiert somit als einfacher Hochpassfilter (van Oldenborgh et al., 2009).

Für die Untersuchung der zeitlichen Stabilität der gefundenen Signale wurden sowohl für die Untersuchung von Korrelationsmustern als auch für die Untersuchung von Zusammenhängen zwischen zwei Zeitreihen, z. B. ACTI und Gruppenchronologie, gleitende Korrelationen für verschiedene Fensterlängen berechnet.

Zur Bestimmung der Güte der Prozedur bzw. des dahinter stehenden statistischen Modells fand eine 10-fache Kreuzvalidierung Anwendung (Olson und Delen, 2008).

### 3. Berechnung des ACTI

Im Folgenden wird die Prozedur vorgestellt, die es ermöglicht, den Zusammenhang zwischen rational skalierten Jahrringchronologien mit nominal skalierten Wetterlagendaten zu untersuchen.

#### 3.1 Definition des ACTI

Die Prozedur zur Berechnung von ACTI („atmospheric circulation tree-ring index“) ermöglicht es sowohl den Einfluss einzelner Wetterlagen  $j = 1, \dots, w$  als auch das komplexe Zusammenwirken mehrerer Wetterlagen auf die raumzeitlichen Muster des Jahrringwachstums zu untersuchen. Das Ziel der mehrschrittigen Prozedur ist es, Jahrringbreitenchronologien der einzelnen Standorte nach ähnlicher Wetterlagensensitivität bzw. -reaktion zu gruppieren. Für jede Gruppe wird eine separate ACTI-Zeitreihe berechnet. Die Prozedur kann in folgende 3 Schritte untergliedert werden (siehe Abb. 3.1):

**(1) Datenaufbereitung:**

Berechnung der mit Zufallszahlen gewichteten Wetterlagenindizes ( $WTI_l$ ).

**(2) Datenselektion:**

5-stufiges Selektionsverfahren (a – e) zur Separierung derjenigen  $WTI_l$ , die den „stärksten statistischen Zusammenhang“ mit den Standortchronologien gezeigt haben.

**(3) Gruppierung und Berechnung von ACTI:**

Gruppierung der Standortchronologien nach ähnlicher Wetterlagenreaktion. Für jede Gruppe werden die Wetterlagengewichte ( $g_j$ ), Gruppenchronologien und ACTI-Zeitreihen berechnet.

Die Prozedur kann auf verschiedene Wetterlagen-Klassifikationen angewendet werden und ermöglicht es, den Einfluss der Wetterlagen auf monatlicher, saisonaler oder jährlicher Auflösung zu untersuchen. Für jede jahreszeitliche Periode ist jedoch eine separate Simulation erforderlich. Die Prozedur wird anhand des Frühjahrs (definiert als die Periode März, April, Mai) vorgestellt. Für die Berechnung der ACTI-Zeitreihen sind sowohl die Wetterlagenhäufigkeiten ( $h_{yj}$ ) (vgl. Kap. 3.2) als auch die Wetterlagengewichte ( $g_j$ ) (vgl. Kap. 3.3) erforderlich.

Die Werte der ACTI-Zeitreihe  $y = 1, \dots, t$  (in diesem Fall  $t = 124$ , 1881–2004) sind definiert als die Summe der gewichteten ( $g_j$ ) Wetterlagenhäufigkeiten ( $h_{yj}$ )  $h_{yj} \times g_j$  (vgl. Formel 1) für die untersuchte jahreszeitliche Periode (in diesem Fall Frühjahr).

$$(1) \quad ACTI_y = \sum_{j=1}^w (h_{yj} \times g_j)$$

### 3. BERECHNUNG DES ACTI

---

#### 3.2 Berechnungen der Wetterlagenhäufigkeiten ( $h_{yj}$ )

Für die zu untersuchende jahreszeitliche Periode sind die Wetterlagenhäufigkeiten  $h_{yj}$  folgendermaßen definiert: für jedes Jahr  $y$  und für jede Wetterlage  $j = 1, \dots, w$  wird die Anzahl der Tage, an denen sie aufgetreten ist, berechnet. Die Werte werden in einer  $(t \times w)$  Matrix  $H_{tw}$  gespeichert.

#### 3.3 Berechnungen der Wetterlagengewichte ( $g_j$ )

Im Rahmen der Prozedur werden die Standortchronologien gruppiert. Für jede Gruppe wird eine Standortgruppenchronologie und eine ACTI-Zeitreihe berechnet. Für die Berechnung von ACTI ist es erforderlich, für jede Gruppe 29 Wetterlagengewichte zu ermitteln. Für die Berechnung von ACTI sind die Wetterlagengewichte ( $g_j$ ) und Wetterlagenhäufigkeiten  $h_{yj}$  erforderlich (vgl. Formel 1). Für die Ermittlung der Wetterlagengewichte werden mit Zufallszahlen gewichtete Wetterlagenindizes, sogenannte  $WTI_l$  verwendet.

##### 3.3.1 Berechnung der Wetterlagenindizes ( $WTI_l$ )

Für die Berechnung der  $WTI_l$  wird eine  $(m \times w)$  Matrix  $Z_{mw}$  (in diesem Fall  $1.000.000 \times 29$ ) mit normalverteilten Zufallszahlen  $Z_{lj}$  benötigt, wobei  $l = 1, \dots, m$  die Monte Carlo-Simulationsläufe angibt und  $j = 1, \dots, w$  die Anzahl der Wetterlagen definiert (vgl. Abb. 3.1 Schritt 1). Die Zufallszahlen sind Integerwerte im Bereich von -60 bis +60. Für eine zuverlässige Abschätzung der Wetterlagengewichte ist ein großer Bereich sowie eine große Anzahl von Wiederholungen (in diesem Fall 1 Million) erforderlich.

Jede einzelne Zeile der Matrix  $Z_{mw}$  repräsentiert einen Zufallszahlensatz ( $RNS_l$ ). Die  $WTI_l$  Zeitreihen sind als die Summe der mit Zufallszahlen gewichteten Wetterlagenhäufigkeiten definiert (siehe Formel 2). Jeder Zufallszahlensatz, der aus  $w$  (in diesem Fall 29) Zufallszahlen besteht, kann somit einem  $WTI_l$  zugeordnet werden.

$$(2) \quad (WTI_y)_l = \sum_{j=1}^w (h_{yj} \times Z_{lj})$$

##### 3.3.2 Selektion der Wetterlagenindizes ( $WTI_l$ )

Im Rahmen eines 5 stufigen Verfahrens (Schritt 2 Selektionsstufen a bis e) werden die Wetterlagengewichte für jede Gruppe aus den Zufallszahlensätzen ermittelt, deren  $WTI_l$  einen „starken statistischen“ Zusammenhang mit den Standortchronologien aus der jeweiligen Gruppe gezeigt haben.  $WTI_l$  mit einem starken „statistischen Zusammenhang“ sind definiert als diejenigen  $WTI_l$ , die alle 5 Selektionsstufen, die im Folgenden beschrieben werden, erfolgreich durchlaufen haben.

### 3. BERECHNUNG DES ACTI

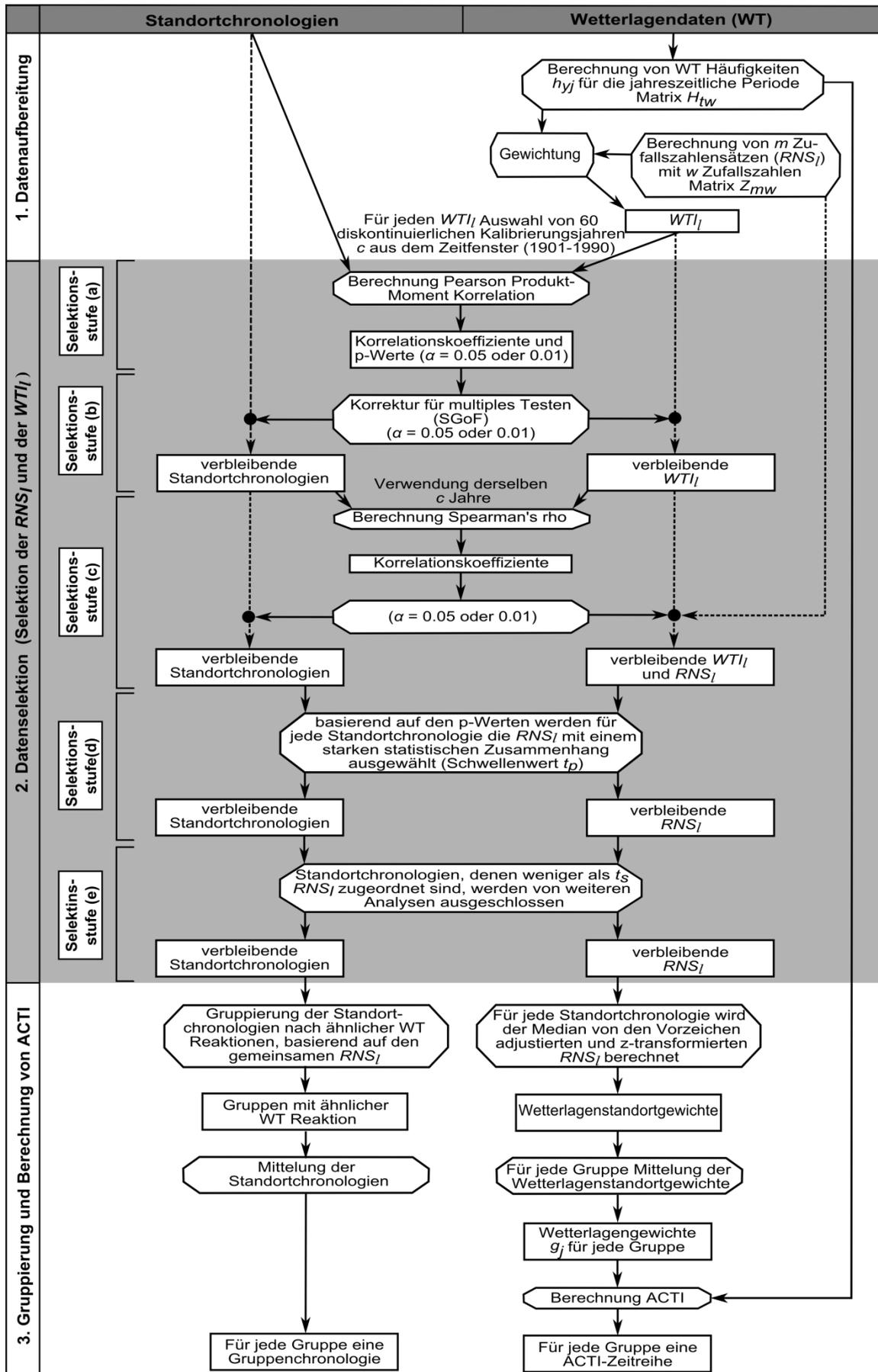


Abbildung 3.1: Ablaufschema der Prozedur zur Berechnung von ACTI (nach: Schultz & Neuwirth 2012).

### 3. BERECHNUNG DES ACTI

---

a) Für die Kalibrierung des Modells werden aus dem gemeinsamen Zeitfenster von Standortchronologien und  $WTI_l$  (in diesem Fall 1901–1990) 60 diskontinuierliche Kalibrierungsjahre  $c$  für jeden  $WTI_l$  zufällig gezogen. Diese Strategie soll die sogenannte „Überanpassung“ (overfitting) einzelner Kalibrierungsjahre sowie des gesamten Modells vermeiden. Für diese 60 Kalibrierungsjahre werden die Produkt-Moment-Korrelationskoeffizienten  $r_{li}$  (nach Pearson) zwischen  $WTI_l$  und den Standortchronologien sowie den dazugehörigen Überschreitungswahrscheinlichkeiten (p-Werte)  $p_{li}$  berechnet und in zwei ( $m \times n$ ) Matrizen  $R_{mn}$  und  $P_{mn}$  abgelegt, wobei, wie schon zuvor definiert,  $l = 1, \dots, m$  (in diesem Fall  $m = 1.000.000$ ) die Anzahl der Simulationsläufe angibt und  $i = 1, \dots, n$  (in diesem Fall  $n = 115$ ) die Anzahl der Standortchronologien repräsentiert. Es ergeben sich somit  $m \times n$  (in diesem Fall 115 Millionen) Korrelationskoeffizienten mit den dazugehörigen p-Werten. Für jede Standortchronologie werden die  $WTI_l$ , bei denen die  $p_{li}$  Werte  $> \alpha$  (Signifikanzniveau) sind, von weiteren Analysen ausgeschlossen (vgl. Abb. 3.1 Selektionsstufe a).

b) Durch das Testen mehrerer Nullhypothesen ist die versuchsbezogene Irrtumswahrscheinlichkeit größer als die individuelle Irrtumswahrscheinlichkeit für jeden einzelnen Test. Die Wahrscheinlichkeit, eine der  $k$  Nullhypothesen fälschlicherweise abzulehnen und somit anzunehmen, dass ein Zusammenhang besteht, errechnet sich mit folgender Formel:  $\alpha - (1 - \alpha)^k$ , wobei  $k$  die Anzahl der Tests angibt. Ist z. B.  $\alpha = 0,05$  und  $k = 100$ , dann beträgt die versuchsbezogene Irrtumswahrscheinlichkeit  $0,05 - (1 - 0,05)^{100} = 0,994$  somit 99,4 %. Daraus ergibt sich, dass eine Korrektur für multiples Testen vorgenommen werden sollte. Farcomeni (2008) gibt einen ausführlichen Überblick über die verschiedenen Korrekturverfahren, jedoch sind nur wenige Verfahren für eine große Anzahl von Tests geeignet. Im Rahmen der hier vorgestellten Prozedur wird das Verfahren „sequential goodness of fit metatest“ (SGoF; Carvajal-Rodríguez et al., 2009) verwendet. Die Teststärke (engl. power) des Tests nimmt mit zunehmender Anzahl der durchgeführten Tests zu. Basierend auf einem Binominaltest vergleicht SGoF die Anzahl der beobachteten signifikanten Tests mit der erwarteten Anzahl von signifikanten Tests. Alle Standortchronologien und  $WTI_l$ , die den Test nicht bestehen, werden von weiteren Analysen ausgeschlossen (vgl. Abb. 3.1 Selektionsstufe b). Alle verbleibenden  $WTI_l$  und Standortchronologien werden einer weiteren Selektion unterzogen (vgl. Abb. 3.1 Selektionsstufe c).

c) Die gefundenen statistischen Zusammenhänge zwischen den verbleibenden Standortchronologien und  $WTI_l$  können eine Ursache von Ausreißern in den Daten sein, da die Produkt-Moment-Korrelation nicht robust gegenüber Ausreißern ist. Aus diesem Grund wird zwischen den verbleibenden Standortchronologien und  $WTI_l$  für die Kalibrierungsjahre  $c$  Jahre die Rangkorrelation nach Spearman berechnet. Die

### 3. BERECHNUNG DES ACTI

---

Rangkorrelation ist im Gegensatz zur Produkt-Moment-Korrelation robust gegenüber Ausreißern, jedoch setzt sie keinen linearen Zusammenhang zwischen den Variablen voraus (Croux und Dehon, 2010).

Standortchronologien und  $WTI_l$ , die keine signifikanten Rangkorrelationskoeffizienten gezeigt haben, werden von weiteren Analysen ausgeschlossen. Ebenso werden  $WTI_l$ , die nur mit einer Standortchronologie signifikant korrelieren, ausgeschlossen, da sie nur lokale Klimaeffekte widerspiegeln. (vgl. Abb. 3.1 Selektionsstufe c)

d) Abhängig von der Fragestellung einer Untersuchung ist eine weitere Selektion der verbleibenden  $WTI_l$  bzw. Zufallszahlensätze ( $RNS_l$ ) sinnvoll. Die Zufallszahlensätze werden, basierend auf den  $p_{li}$  Werten, die im Rahmen der Produkt-Moment-Korrelation berechnet worden sind, durch den Schwellenwert  $t_p$  weiter selektiert. Ein Schwellenwert  $t_p$ , z. B. von 20 %, führt dazu, dass für jede Standortchronologie die  $RNS_l$  selektiert wird, deren  $WTI_l$  mit der jeweiligen Standortchronologie den stärksten statistischen Zusammenhang gezeigt haben, ausgedrückt durch die 20 % der kleinsten  $p_{li}$  Werte. Ein  $t_p$  von 100 % hingegen führt dazu, dass für die Berechnung der Wetterlagengewichte alle verbleibenden  $RNS_l$  herangezogen werden (vgl. Abb. 3.1 Selektionsstufe d). Der Einfluss von verschiedenen  $t_p$  Werten auf die Ergebnisse wird in Kapitel 4 behandelt.

e) Eine gute Abschätzung der Wetterlagengewichte kann nur gewährleistet werden, wenn ein Minimum von  $RNS_l$  für jede Standortchronologie zur Verfügung steht. Das Minimum wird definiert durch den Schwellenwert  $t_s$ . (in diesem Fall  $t_s = 500$ ). Unter Zugrundelegung des Gesetzes der großen Zahlen nähert sich mit zunehmender Zahl der zur Verfügung stehenden  $RNS_l$  das beobachtete Wetterlagengewicht dem theoretischen Wetterlagengewicht an. Standortchronologien, denen weniger als  $t_s$   $RNS_l$  zugeordnet sind, werden von weiteren Analysen ausgeschlossen (vgl. Abb. 3.1 Selektionsstufe e).

#### 3.3.3 Gruppierung

Ziel der Gruppierung ist es, die verbleibenden Standortchronologien nach ähnlicher Wetterlagenreaktion zu gruppieren und aus den nach allen Selektionsstufen verbleibenden  $RNS_l$  die Wetterlagengewichte ( $g_j$ ) für jede Gruppe abzuleiten. Für jede Standortchronologie, sofern sie alle Selektionsstufen (Kap. 3.3.2) erfolgreich durchlaufen hat, existieren mehr als  $t_s$  (Abb. 3.1 e)  $WTI_l$  mit den dazugehörigen  $RNS_l$ .

Zunächst ist es aber erforderlich, die  $RNS_l$  einer z-Transformation zu unterziehen und eine Anpassung des Vorzeichens vorzunehmen, bevor der Median bzw. der Mittelwert für die zusammenzufassenden  $RNS_l$  berechnet werden kann. Jeder Zufallszahlensatz  $RNS_l$  besteht aus  $w$  ( $w = 29$ ) normalverteilten Zufallszahlen, so dass der Mittelwert der einzelnen Zufallszahlensätze aufgrund der geringen Anzahl von Zufallszahlen stark variieren kann.

### 3. BERECHNUNG DES ACTI

---

Aus diesem Grunde wird zunächst eine z-Transformation vorgenommen, die u.a dazu führt, dass der Mittelwert jedes  $RNS_i = 0$  ist.

Die Aggregation von  $RNS_i$  (z. B. durch Berechnung des Mittelwertes), deren  $WTI_i$  zu unterschiedlichen Zusammenhängen in Bezug auf die Richtung des Zusammenhangs (positiver oder negativer Zusammenhang) geführt haben, ist nicht sinnvoll. Für jede Standortchronologie wird überprüft, ob die Verbleibenden der jeweiligen Standortchronologie zugeordneten  $WTI_i$  negativ oder positiv mit der Standortchronologie korreliert sind. Für alle  $WTI_i$ , die zu negativen Korrelationen führen, werden die zugehörigen  $RNS_i$  mit -1 multipliziert. Für jede Standortchronologie werden Wetterlagenstandortgewichte errechnet. Diese errechnen sich durch die Bildung des Median über alle verbleibenden z-transformierten und Vorzeichen-adjustierten Zufallszahlensätze ( $RNS_i$ ), die der jeweiligen Standortchronologie zugeordnet sind.

Die Gruppierung der Standortchronologien und die Ermittlung der Wetterlagengewichte ( $g_j$ ) für jede Gruppe basiert auf allen  $WTI_i$  bzw.  $RNS_i$ , die alle Selektionsstufen erfolgreich durchlaufen haben. Die Standortchronologien werden in Paaren zusammengefasst, indem für jede Standortchronologie diejenige Standortchronologie ermittelt wird, die die größte Anzahl von gemeinsamen  $RNS_i$  aufweist. Die Anzahl der Paare ist somit gleich der Anzahl aller Standortchronologien, die alle Selektionsstufen erfolgreich durchlaufen haben. Sofern Standortchronologien zu mehreren Paaren gehören, werden alle diese Paare zu einer Gruppe zusammengefasst. Daraus ergibt sich, dass die minimale Gruppengröße 2 ist.

Die Wetterlagengewichte ( $g_j$ ) für jede Gruppe errechnen sich durch Mittelung der Wetterlagenstandortgewichte innerhalb einer Gruppe. Analog dazu werden die Standortchronologien durch Mittelung zu den jeweiligen Gruppenchronologien vereinigt. Für jede Gruppe existieren somit 29 Wetterlagengewichte, eine Gruppenchronologie und eine dazugehörige ACTI-Zeitreihe (vgl. Abb. 3.1 Schritt 3), die sich aus den Wetterlagenhäufigkeiten und Wetterlagengewichten nach der im Kapitel 3.1 erläuterten Formel errechnen lässt.

## 4. FÜR DIE GRUPPENBILDUNG RELEVANTE EINFLUSSFAKTOREN

---

### 4. Für die Gruppenbildung relevante Einflussfaktoren

Mit der in Kapitel 3 vorgestellten Prozedur können Wetterlagensignale in Jahrringen im hochfrequenten (intraannuell, und interannuell) sowie im niederfrequenten Bereich (dekadische, mehrdekadische und säkulare Variationen) untersucht werden. Abhängig von der Standardisierung der Jahrringchronologien und den Simulationseinstellungen können unterschiedliche Signale betont werden.

Im Folgenden werden die Auswirkungen von Standardisierung und Simulationseinstellungen auf die Gruppenbildung bzw. auf die Ergebnisse dargestellt. In diesem Zusammenhang wird auch der Einfluss von standortspezifischen Eigenschaften (Exposition, Baumart, Höhenlage), die nicht direkt in die Gruppenbildung mit eingeflossen sind, berücksichtigt.

#### 4.1 Auswirkungen von Standardisierung und Simulationseinstellungen auf die Gruppenbildung

Abhängig vom Untersuchungsziel sind verschiedene Simulationseinstellungen bzw. Standardisierungen sinnvoll. Insgesamt wurden 16 verschiedene Einstellungen getestet; für jede Einstellungskombination ist eine separate Simulation erforderlich (S1 bis S16). Für die Standardisierung der Jahrringchronologien wurden 32-jährige und 300-jährige kubische Splinefunktionen verwendet. Ferner wurden vier verschiedene Schwellenwerte  $t_p$  ( $t_p = 10, 15, 20, 100\%$ ) und zwei verschiedene Signifikanzniveaus ( $\alpha = 0,05, \alpha = 0,01$ ) untersucht. Daraus ergeben sich 16 verschiedene Einstellungskombinationen bzw. Simulationen ( $2 \times 2 \times 4 = 16$ ), deren Ergebnisse in Abbildung 4.1 dargestellt sind. Für jede der 16 Simulationen ist die Anzahl der Gruppen, die maximale Gruppengröße, die durchschnittliche Gruppengröße und die Anzahl signifikant reagierender Standortchronologien angegeben, jeweils bezogen auf die Standortchronologien, die alle 5 Selektionsstufen (Kap. 3.3.2 a - e) erfolgreich durchlaufen haben.

In Bezug auf die Standardisierung der Standortchronologien wurden stärkere Wetterlagensignale für den 300-jährigen Spline gefunden (Abb. 4.1 S5 - S8, S13 - S16) als für den 32-jährigen Spline (Abb. 4.1 S1 - S4, S9 - S12). Dies zeigte sich sowohl in Bezug auf die Korrelationskoeffizienten bzw. die kleineren p-Werte, errechnet zwischen ACTI und den Standortchronologien für den Zeitraum 1901–1990 (vgl. hierzu Abb. 4.2 und ergänzend Abb. 4.5), als auch in Bezug auf die Anzahl der reagierenden Standortchronologien (vgl. Abb. 4.1).

Unabhängig von der Standardisierung führt ein kleiner Schwellenwert  $t_p$  (Kap. 3.3.2) zu einer reduzierten Anzahl von reagierenden Standortchronologien und kleineren Gruppengrößen (Abb. 4.1). Diese kleinen Gruppen zeichnen sich dadurch aus, dass nur Standorte mit sehr ähnlichen Wetterlagenreaktionen in einer Gruppe zusammengefasst sind. Dieser Befund wird u.a. dadurch gestützt, dass der eine Douglassienstandort in S1

## 4. FÜR DIE GRUPPENBILDUNG RELEVANTE EINFLUSSFAKTOREN

( $t_p = 10\%$ ) keine Reaktion zeigt, jedoch bei einem Schwellenwert  $t_p \geq 15\%$  (Abb. 4.1 S2-S4) trotz der unterschiedlichen Baumart einer Gruppe zugeordnet wird.

Hingegen führt ein großer Schwellenwert  $t_p$  zu einer Zunahme von Standortchronologien mit signifikanten Wetterlagenreaktionen und der Gruppengröße, jedoch zu einer Abnahme der Anzahl der Gruppen. Die Simulationen S9 ( $t_p = 10\%$ ) und S12 ( $t_p = 100\%$ ) zeigen ein gegenteiliges Bild, da die Anzahl der Gruppen von 8 auf 14 Gruppen ansteigt. Die starke Zunahme von reagierenden Standorten mit signifikanten Wetterlagenreaktionen (von 34 auf 83 Standortchronologien) begründet dieses abweichende Verhalten.

		32-jähriger Spline				300-jähriger Spline			
		S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
$(\alpha = 0,05)$	Schwellenwert $t_p$	10 %	15 %	20 %	100 %	10 %	15 %	20 %	100 %
	Anzahl der Gruppen	14	15	14	12	14	13	13	6
	maximale Gruppengröße	19	20	22	25	20	21	21	46
	durchschnittliche Gruppengröße	5,3	5,4	5,8	7,4	6,9	7,7	7,8	17,7
	Anzahl der reagierenden Standorte	74	81	81	89	96	100	102	106
		S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16
$(\alpha = 0,01)$	Schwellenwert $t_p$	10 %	15 %	20 %	100 %	10 %	15 %	20 %	100 %
	Anzahl der Gruppen	8	11	10	14	12	12	11	6
	maximale Gruppengröße	10	9	14	21	13	16	18	54
	durchschnittliche Gruppengröße	4,3	4,2	5,6	5,9	5,2	7,1	8,1	16,8
	Anzahl der reagierenden Standorte	34	46	56	83	62	85	89	101

Abbildung 4.1: Einfluss von 16 verschiedenen Simulationseinstellungen (S1 - S16) auf die Gruppenbildung (2 Standardisierungen: 32-jähriger Spline und 300-jähriger Spline; 2 verschiedene Signifikanzniveaus  $\alpha = 0,05$ ,  $\alpha = 0,01$ ; sowie 4 verschiedene Schwellenwerte  $t_p$ , 10 %, 15 %, 20 %, 100 %) (nach: Schultz & Neuwirth 2012).

Die Einführung des Schwellenwertes  $t_p$  erlaubt eine flexible Anpassung des Gruppierungsverfahrens an eine spezifische Fragestellung. Für die Analyse hoch aufgelöster räumlicher Wachstumsmuster ist eine Differenzierung in viele kleine Gruppen mit sehr ähnlichen Wetterlagensignalen sinnvoll. Hingegen ist für die Untersuchung von großräumigen atmosphärischen Signalen in Jahrringchronologien ein größerer Schwellenwert  $t_p$  zu bevorzugen. Durch das Gruppierungsverfahren besteht die Möglichkeit, dass Gruppen auftreten können, die sehr große Ähnlichkeiten in Bezug auf ihre Wetterlagenreaktionen haben und somit sehr ähnliche Wetterlagengewichte  $g_j$  aufweisen. In diesem Falle ist auch eine Zusammenlegung der Gruppen möglich, um die gemeinsamen übergeordneten Signale zu betonen. In solch einem Fall wird der ACTI als gACTI (ACTI grand group) bezeichnet.

Für den Vergleich bzw. die Validierung von verschiedenen Wetterlagen-Klassifikationen besteht die Möglichkeit, die Gruppenbildung auszuschalten und die Standortchronologien, basierend auf ähnlichen Wachstumsmustern, zu gruppieren (vgl. Friedrichs et al., 2009a). Die Gruppenzusammensetzung bleibt somit für jede getestete Wetterlagen-Klassifikation gleich. Dies erlaubt einen einfacheren Vergleich der Ergebnisse, da Unterschiede in den ACTI-Zeitreihen nicht die Folge einer unterschiedlichen Gruppenzusammensetzung sind,

## 4. FÜR DIE GRUPPENBILDUNG RELEVANTE EINFLUSSFAKTOREN

---

sondern entweder auf eine unterschiedliche Gewichtung oder auf Unterschiede im Wetterlagendatensatz zurückzuführen sind. Somit gestattet die Prozedur den Vergleich verschiedener Wetterlagen-Klassifikationen, auch solcher, die eine unterschiedliche Anzahl von Wetterlagen aufweisen.

### 4.2 Auswirkungen von standortspezifischen Eigenschaften auf die Gruppenbildung

Das Gruppierungsverfahren gruppiert die Standorte, wie in Kapitel 3.3.3 beschrieben, nach ähnlicher Wetterlagenreaktion. Durch dieses Vorgehen werden gemeinsame Signale betont. Die Gruppierung von einzelnen Standortchronologien in Gruppen ermöglicht es, die Gruppen auf Ähnlichkeiten in Bezug auf ihre Metadaten (Hangneigung, Höhenlage, Baumart etc.) hin zu untersuchen.

Sehr ähnliche abiotische und biotische Umweltfaktoren (Klima, Boden, Konkurrenz etc.) sollten bei derselben Baumart ähnliche Wuchsreaktionen auslösen. Unterschiedliche Baumarten können z. B. auf ähnliche Klimabedingungen sehr unterschiedlich reagieren (vgl. Fischer und Neuwirth 2013).

Da die für jede Standortchronologie vorhandenen Metadaten nicht in die Gruppenbildung mit eingeflossen sind, würde, sofern sich die Gruppen durch ihre Metadaten klar voneinander abgrenzen ließen (z. B. dieselbe Baumart in derselben Höhenlage und Hangneigung), dies darauf hindeuten, dass diese standortspezifischen Eigenschaften bzw. die Metadaten Einfluss auf die Wetterlagenreaktion der Bäume nehmen. Die Gruppenbildung gestattet es somit, standortspezifische Eigenschaften zu identifizieren, die sich auf die Wetterlagenreaktionen der einzelnen Bäume in einer Gruppe maßgeblich auswirken.

Im Folgenden wird der Einfluss von standortspezifischen Eigenschaften exemplarisch, basierend auf den Ergebnissen für die Simulationen S3 (vgl. Abb. 4.2) und S13, dargestellt. Die ausgewählten Simulationen repräsentieren unterschiedliche Simulationseinstellungen, Jahrring Standardisierung und Signifikanzniveaus (S3  $\alpha = 0,05$ ; S13  $\alpha = 0,01$ ). Die für die Simulation S3 verwendete Standardisierung der Jahrringbreitenchronologien führt dazu, dass nur hochfrequente Variationen in den Chronologien erhalten bleiben. Hingegen bewahrt der 300-jährige Spline sowohl hochfrequente als auch niederfrequente Variationen (S13).

Abbildung 4.2 zeigt im oberen Teil für Simulation S3 die Metadaten, differenziert nach den einzelnen Gruppen. Insgesamt haben sich 14 Gruppen, in denen 81 Standortchronologien zusammengefasst sind, ergeben. Die größte Gruppe ist Gruppe 6 (G6). Sie umfasst 22 Standortchronologien. Hingegen erreichen die Gruppen 2 und 7 nur die von der Prozedur vorgegebene Mindestgruppengröße von 2 Standortchronologien. Die durchschnittliche Gruppengröße liegt bei 5,8 Standortchronologien. Nur die Gruppen 5, 6 und 10 (G5, G6, G10) setzen sich aus Standortchronologien verschiedener Baumarten zusammen (Abb. 4.2).

#### 4. FÜR DIE GRUPPENBILDUNG RELEVANTE EINFLUSSFAKTOREN

Gruppen		G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9	G10	G11	G12	G13	G14		
Höhe in m ü. NN. und r für den Zeitraum 1901-1990		1110-700 0,55	1020-860 0,54	1660-1540 0,58	1235-1020 0,58	770-260 0,64	525-50 0,63	470-465 0,58	1320-985 0,57	420-280 0,56	400-290 0,60	385-295 0,61	560-165 0,61	185-40 0,57	320-110 0,58	Σ	
ABAL		2		1			17		4							3	
FASY					17				4							21	
LADE																0	
PCAB				4	3	1	3	3							14		
PISY		3												1			4
PSME							1									1	
QUSP					4	1	2				6	4	11	5	5	38	
Σ		3	2	4	3	6	22	2	3	4	7	4	11	5	5	81	
T.WL	WA	12,7						5,3	4,0						5,0	3,3	
	WZ		24,1	18,9	7,7	8,3	3,3	10,3	18,3	12,8	9,2	9,7	9,4	7,8	23,5	10,9	
	WS	4,4			4,3											2,0	
	SWA		3,2			4,7									2,9		
	SWZ	4,9	4,5					5,8			3,1	3,1				4,2	
	NWZ	17,0	4,7						10,0	8,3	12,7	9,8			8,7	4,8	5,5
	HM		4,7	6,6		9,9			11,2	6,4	6,0	5,9	8,6	8,5	3,2	4,1	4,7
	BM	17,3	6,4	15,4	17,9					25,0	7,6		6,9	6,5	6,7	9,0	
	NZ	4,6	3,7					5,1								3,3	
	HNA		5,3			3,0	5,4				4,7	8,8	7,6	3,7	5,9	2,8	
	HNZ				4,0			6,6		3,2						3,1	
	HB		4,1	4,4					3,7			8,9	3,6			3,7	
	TRM	4,5	7,4	5,1	3,2	14,7	11,4	11,9	4,0	9,6	5,9	12,7	15,7	16,8	15,0	4,9	
	NEA		3,5									3,4				2,3	
	HFA	10,6	6,5	8,2	8,2	11,2	7,8	10,1	8,6		10,4	16,0	14,8	12,2	12,2	4,0	
	HNFA		3,7	5,9	7,1		4,2	5,1	4,8		3,8		3,8			2,9	
HNFZ		6,6	5,4		5,6	4,0				3,2		6,3	3,6	2,3			
SEA				6,4	4,5				4,7	7,5	4,9	5,2	4,5	2,5			
TB		6,6		5,7	6,3		3,2	4,9						2,8			
TRW		3,4	6,0	7,4	9,2	14,4	9,0		16,7	14,6	5,2		5,0	4,9	6,9		
Σ ACTI <sub>p</sub> %		76	80	78	80	75	74	78	78	78	79	79	87	78	82		
Σ GWL <sub>f</sub> %		36	60	51	57	41	48	47	45	47	57	38	54	56	51		

Abbildung. 4.2: Wetterlagen - bzw. GWL (Großwetterlagen) - Reaktion der 14 Gruppen aus Simulation 3 (S3). Im oberen Bereich der Abbildung sind für jede Gruppe die räumliche Verteilung der Standorte innerhalb einer Gruppe, die Höhenlage, die Korrelationskoeffizienten zwischen Gruppenchronologie und ACTI sowie die Artenzusammensetzung innerhalb der Gruppen dargestellt. Die GWL<sub>f</sub> (GWL Häufigkeit) und ACTI<sub>p</sub> (prozentualer Anteil von jeder GWL an ACTI) sind für das Zeitfenster 1950–2004 berechnet und somit mit Abbildung 5.3 vergleichbar. Blaue ACTI<sub>p</sub> Werte repräsentieren Großwetterlagen mit negativen Gewichten, rote mit positiven Gewichten. Es wurden nur solche ACTI<sub>p</sub> Werte angegeben, die ≥ 3 % sind. (nach: Schultz & Neuwirth 2012).

#### 4. FÜR DIE GRUPPENBILDUNG RELEVANTE EINFLUSSFAKTOREN

Die größte Gruppe G6 beinhaltet Standortchronologien von 4 verschiedenen Baumarten. Die Korrelationsanalyse zwischen den 14 ACTI-Zeitreihen und den korrespondierenden Gruppenchronologien zeigt hoch signifikante ( $\alpha = 0,001$ ) Zusammenhänge. Für das gemeinsame Zeitfenster zwischen ACTI und Gruppenchronologien (1901–1990) bewegen sich die Korrelationskoeffizienten zwischen 0,54 und 0,64 (Abb. 4.2).

ACTI ist mit der korrespondierenden Gruppenchronologie immer positiv korreliert. Daraus resultiert, dass Wetterlagen mit negativen Gewichten ( $g_j$ ) mit ungünstigen klimatischen Bedingungen für das Baumwachstum in der spezifischen Gruppe einhergehen.

Neben den starken Zusammenhängen zwischen ACTI einer Gruppe und der korrespondierenden Gruppenchronologien zeigen einige ACTI-Zeitreihen sowohl negative als auch positive Zusammenhänge zu Gruppenchronologien anderer Gruppen (nicht dargestellt). Daraus lässt sich u.a. ableiten, dass es Wetterlagen gibt, die in einer Gruppe zu positiven Wuchsanomalien führen und in einer anderen Gruppe negative Wuchsanomalien auslösen. Einige Gruppen zeigen aber auch keinen statistischen Zusammenhang zu anderen Gruppen. Dieser Schluss ergibt sich auch aus den Ergebnissen der Korrelationsanalyse der ACTI-Zeitreihen untereinander (Abb. 4.3). Auch in diesem Fall treten sowohl positive als auch negative Zusammenhänge auf oder die Zeitreihen sind unkorreliert (leere Felder Abb. 4.3).

Die Korrelationsanalyse der ACTI-Zeitreihen untereinander gibt auch Aufschluss darüber, wie ähnlich einzelne Gruppen zueinander sind. So sind z. B. alle Eichen dominierten Gruppen G5, G7, G10, G11, G12, G13 und G14 (Abb. 4.2) stark positiv miteinander korreliert (vgl. Abb. 4.3 grün markierte Korrelationskoeffizienten).

	ACTIG1	ACTIG2	ACTIG3	ACTIG4	ACTIG5	ACTIG6	ACTIG7	ACTIG8	ACTIG9	ACTIG10	ACTIG11	ACTIG12	ACTIG13	ACTIG14
ACTIG1	1,00													
ACTIG2	0,27	1,00												
ACTIG3	0,45	0,45	1,00											
ACTIG4	0,49	0,78	0,78	1,00										
ACTIG5	0,40	0,20	0,20	0,20	1,00									
ACTIG6	0,33	0,33	0,63	0,54	0,58	1,00								
ACTIG7		0,36			0,86	0,37	1,00							
ACTIG8		0,22	0,70	0,75	-0,20	0,27	-0,32	1,00						
ACTIG9	0,36	0,34	0,51	0,46	0,48	0,83	0,23	0,19	1,00					
ACTIG10	0,43	0,51	0,33		0,74	0,67	0,55		0,71	1,00				
ACTIG11		0,26	0,32	0,26	0,82	0,63	0,85		0,44	0,66	1,00			
ACTIG12	0,22	0,49	0,24	0,29	0,85	0,61	0,86	-0,20	0,45	0,69	0,91	1,00		
ACTIG13	0,28	0,52	0,52	0,55	0,69	0,72	0,55	0,20	0,59	0,58	0,74	0,80	1,00	
ACTIG14					0,72	0,56	0,75	-0,34	0,41	0,51	0,87	0,88	0,69	1,00

Abbildung 4.3: Korrelationen zwischen den 14 ACTI-Zeitreihen von S3, berechnet für den Zeitraum von 1881–2004. In grün hervorgehoben sind die Korrelationskoeffizienten der ACTI-Zeitreihen der Eichengruppen ( $\alpha = 0,05$ ).

Wie schon in Kapitel 3.1 dargelegt, sind die jährlichen Werte der ACTI-Zeitreihen definiert als die Summe der gewichteten Wetterlagenhäufigkeiten ( $g_j \times h_{yj}$ ) für eine untersuchte jahreszeitliche Periode. Als Folge daraus ergibt sich, dass statistische

#### 4. FÜR DIE GRUPPENBILDUNG RELEVANTE EINFLUSSFAKTOREN

Zusammenhänge zwischen den ACTI-Zeitreihen der Gruppen bzw. das Fehlen solcher Folge der Gewichtung sein müssen.

Dies soll im Rahmen eines Exkurses, der das Zusammenspiel zwischen Wetterlagenhäufigkeiten und Wetterlagengewichten betrachtet, näher erläutert werden, bevor auf den unteren Teil der Abbildung 4.2 eingegangen wird.

Das Aufsummieren aller Wetterlagenhäufigkeiten ohne Gewichtung würde dazu führen, dass die ACTI-Zeitreihe keine Variabilität zeigt z. B. wären für das Frühjahr die einzelnen Werte der ACTI-Zeitreihe immer = 92, da das Frühjahr (hier definiert als die Periode März bis Mai) aus 92 Tagen besteht. In Abbildung 4.4 ist der Einfluss von Wetterlagenhäufigkeit und Wetterlagengewicht auf ACTI exemplarisch für das Jahr 1959 dargestellt (Frühjahr). Für dieses Jahr hat ACTI bei 13 der 14 Gruppen einen negativen Wert. Insbesondere einige der von Eichenstandorten dominierten Gruppen weisen einen stark negativen ACTI auf.

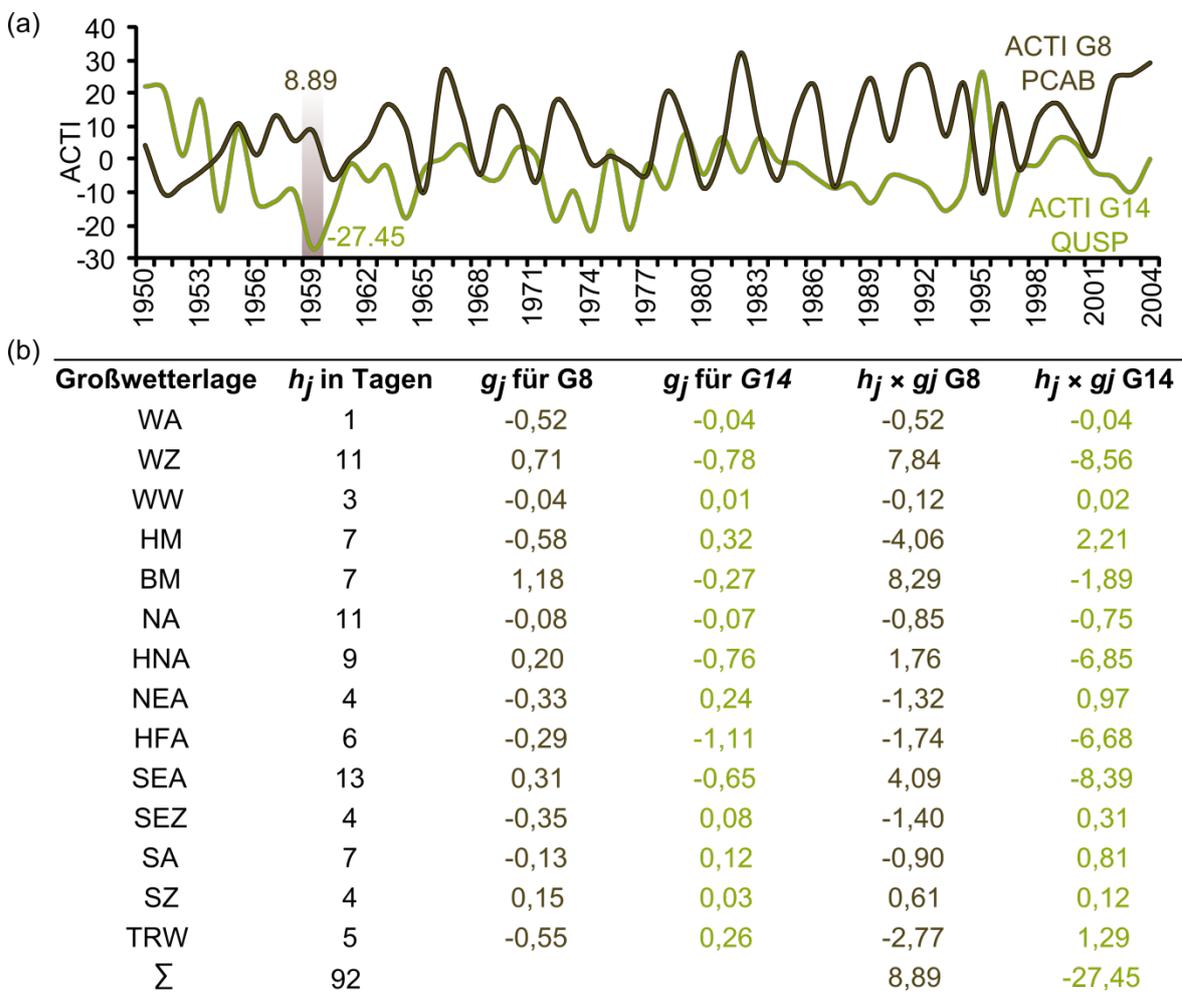


Abbildung 4.4: Der Einfluss von Wetterlagengewicht und Wetterlagenhäufigkeit auf ACTI, exemplarisch verdeutlicht für Gruppen 8 (PCAB, Fichte) und 14 (QUSP Eiche) (G8, G14) für das Jahr 1959 (Frühjahr). (a) ACTI-Zeitreihen von G8 und G14 für den Zeitraum 1950–2004 (Frühjahr) (b) Wetterlagenhäufigkeit ( $h_j$ ) in Tagen für das Frühjahr 1959 und Wetterlagengewichte ( $g_j$ ) für G8 und G14 (nach: Schultz & Neuwirth 2012).

## 4. FÜR DIE GRUPPENBILDUNG RELEVANTE EINFLUSSFAKTOREN

---

Der Mittelwert für ACTI für die Eichen dominierten Gruppen liegt bei -19,4, hingegen liegt der Mittelwert für alle Gruppen bei -13,2. Das Minimum liegt bei -27,4 (Gruppe 14, QUSP), das Maximum bei 8,9 (Gruppe 8 PCAB).

Gruppe 8, bestehend aus drei Fichtenstandorten aus dem Hochgebirge (vgl. hierzu Abb. 4.2), ist die einzige Gruppe mit einem positiven ACTI-Wert im Jahr 1959. In Abbildung 4.4 werden für G8 (Eiche, QUSP) und G14 (Fichte, PCAB) die Wetterlagengewichte ( $g_j$ ), die Berechnung von ACTI und die zwei ACTI-Zeitreihen dargestellt. Der Einfluss einzelner Wetterlagen auf den Index ist nur durch die gemeinsame Betrachtung von Wetterlagenhäufigkeit und Wetterlagengewicht möglich. Die Wetterlagenhäufigkeit verändert sich von Jahr zu Jahr, aber die 29 Wetterlagengewichte ( $g_j$ ) bleiben für jede Gruppe konstant.

Der Einfluss einer Wetterlage auf das Wachstum in einer Gruppe kann von Gruppe zu Gruppe stark variieren. Zum Beispiel hat die Wetterlage BM, die im Frühjahr relativ häufig auftritt (vgl. Abb. 4.2  $GWL_f$ ), einen großen Einfluss auf das Wachstum von Gruppe 8, jedoch einen eher schwachen Einfluss auf das Wachstum von Gruppe 14. Dies ist ersichtlich am Wetterlagengewicht, welches für G8 = 1,18 und für G14 = -0,27 ist (Abb. 4.4).

Die Wetterlagenkombination im Frühjahr 1959 führt zu wärmeren Bedingungen und leicht unterdurchschnittlichen Niederschlagsmengen. Einige der antizyklonalen Wetterlagen, die im Frühjahr 1959 aufgetreten sind, wie z. B. NA, haben das Potenzial zur Auslösung von Spätfrostereignissen. Der positive ACTI-Wert von Gruppe 8 und eine überdurchschnittliche Jahrringbreite für das Jahr 1959 sind ein Indikator für gute Wachstumsbedingungen (in diesem Zusammenhang sind nur die klimatischen Wachstumsbedingungen gemeint). Im Gegensatz dazu zeigen die unterdurchschnittliche Jahrringbreite der Gruppenchronologie von Gruppe 14, die aus 5 Eichenstandorten besteht, und der negative ACTI-Wert dieser Gruppe für das Frühjahr 1959 ungünstige Wachstumsbedingungen an. Neuwirth et al. (2007b) konnten zeigen, dass 1959 ein negatives Weiserjahr für Eichen ist.

Der Einfluss einzelner Wetterlagen auf das Wachstum in einer Gruppe kann nicht nur von Jahr zu Jahr untersucht werden, sondern auch für Zeiträume. In Abbildung 4.2 unten ist für den Zeitraum von 1950–2004 der Einfluss jeder Wetterlage (Großwetterlage GWL) auf die 14 ACTI von jeder Gruppe dargestellt (100 % sind definiert als die Summe aller gewichteten Wetterlagenhäufigkeiten [unter Auslassung des Vorzeichens, absolute Werte] für den Zeitraum 1950–2004). Für die Interpretation der Ergebnisse werden nur solche Wetterlagen herangezogen, die einen größeren Anteil als 3 % am ACTI der jeweiligen Gruppe haben. Unter Zugrundelegung dieses Schwellenwertes sind für das Wachstum im Frühjahr in den 14 Gruppen insgesamt 23 von 29 Großwetterlagen relevant. Nur einige Großwetterlagen wirken sich auf das Baumwachstum in den meisten Gruppen ähnlich aus, wie z. B. HFA und TRM (Abb. 4.2). Die Wetterlage HFA führt für die meisten Gruppen zu

#### 4. FÜR DIE GRUPPENBILDUNG RELEVANTE EINFLUSSFAKTOREN

---

ungünstigen Wuchsbedingungen, hingegen führt die Großwetterlage TRM in den meisten Gruppen zu guten Wuchsbedingungen. Die relativ geringe Häufigkeit von TRM (tritt im Zeitraum von 1950–2004 im Frühjahr an 4,9 % der Tage auf) wird z. B. für G13 kompensiert durch ein großes Wetterlagengewicht, welches dazu führt, dass diese Wetterlage einen relativ großen Einfluss auf den ACTI der G13 nimmt (16.8 % vgl. Abb. 4.2).

Wetterlagen, die eine geringe Häufigkeit haben, aber ein hohes absolutes Gewicht, gehen oft mit extremen Wetterbedingungen einher. Die Wetterlage TRM z. B. führt zu extremen Niederschlägen und leicht unterdurchschnittlichen Temperaturen.

Jedoch können die Witterungsbedingungen an den verschiedenen Standorten während derselben Wetterlage sehr unterschiedlich sein. Jede Wetterlage hat ihr eigenes spezifisches komplexes Muster in Bezug auf den Zustand der Klimaelemente, so dass eine generalisierende Betrachtung für das gesamte Untersuchungsgebiet nur unter Einschränkungen sinnvoll ist.

Die in Abbildung 4.2 dargestellten Ergebnisse zeigen, dass es artspezifische Wetterlagenreaktionen gibt. Für alle Eichen dominierten Gruppen (G5, G7, G10-G14) sind die Wetterlagen HNA, HFA und SEA negativ gewichtet und gehen somit mit ungünstigen Wuchsbedingungen einher. Hingegen haben die Großwetterlagen HM und TRM positive Gewichte und wirken sich somit wachstumsfördernd aus. Für alle Buchen dominierten Gruppen sind die Großwetterlagen TRM, SWZ, WZ und NWZ positiv und die Großwetterlagen HNFA und HFA negativ gewichtet. Für die Fichten dominierten Gruppen führen die Wetterlagen WZ, BM und TB zu guten Wachstumsbedingungen.

Unter Zugrundelegung einer generalisierenden Betrachtung für das gesamte Untersuchungsgebiet führen die Großwetterlagen HFA, HNFA, BM und SEA zu trockenen und wärmeren Bedingungen als im langjährigen Durchschnitt; im Gegensatz dazu sind die Großwetterlagen TRM und NWZ mit kühleren bzw. feuchteren Bedingungen assoziiert. Eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Wetterlagen findet man in Gerstengarbe und Werner (2005) und Werner und Gerstengarbe (2010).

Neben der Baumart nehmen auch andere standortspezifische Eigenschaften Einfluss auf die Großwetterlagenreaktion der Bäume. Dies ist unter anderem darin begründet, dass innerhalb derselben Baumart unterschiedliche Wetterlagenreaktionen auftreten. Für die Eichenstandorte im westlichen Teil des Untersuchungsgebietes (G12, G13, G14) führt die Wetterlage TRW zu guten Wachstumsbedingungen. Für Gruppen, deren Standorte aus dem zentralen Bereich (G11 und G7) bzw. aus dem östlichen Bereich des Untersuchungsgebietes (G5 und G10) kommen, ist der Einfluss von TRW entweder unterhalb des Schwellenwertes und somit als nicht dominant einzustufen bzw. die Wetterlage TRW führt zu ungünstigen Wuchsbedingungen.

Zwischen Standorten mit geringen EPS- und Rbar-Werten (vgl. Kap. 2.1) und Standorten mit hohen Werten konnten weder Unterschiede bezüglich der Wetterlagenreaktionen noch

## 4. FÜR DIE GRUPPENBILDUNG RELEVANTE EINFLUSSFAKTOREN

in Bezug auf die Gruppenzusammensetzung festgestellt werden. Neben Baumart und räumlicher Lage der Standorte ist für die Wetterlagenreaktionen der Bäume auch die Höhe der Standorte über NN von Bedeutung (Abb. 4.2).

Da die Gruppenbildung nur auf ähnlichen Wetterlagenreaktionen der Standortchronologien basiert, lassen die Ähnlichkeiten innerhalb der Gruppen in Bezug auf die Metadaten nur den Schluss zu, dass Baumart, räumliche Lage und Höhe der Standorte Einfluss auf die Wetterlagenreaktionen der Bäume nehmen (Abb. 4.2). Zumindest einer dieser drei Faktoren kann für die Charakterisierung aller Gruppen herangezogen werden.

Die vorgestellten Ergebnisse von S3 werden durch die Ergebnisse von S13 weiter untermauert. Insgesamt reagieren 62 Standortchronologien, die sich auf 12 Gruppen verteilen (Abb. 4.5). Nur 3 der 12 Gruppen setzen sich aus Standortchronologien von verschiedenen Baumarten zusammen. Die in Abbildung 4.5 dargestellten Korrelationskoeffizienten, berechnet zwischen den ACTI-Zeitreihen und den zugehörigen Gruppenchronologien, sind alle hoch signifikant positiv korreliert.

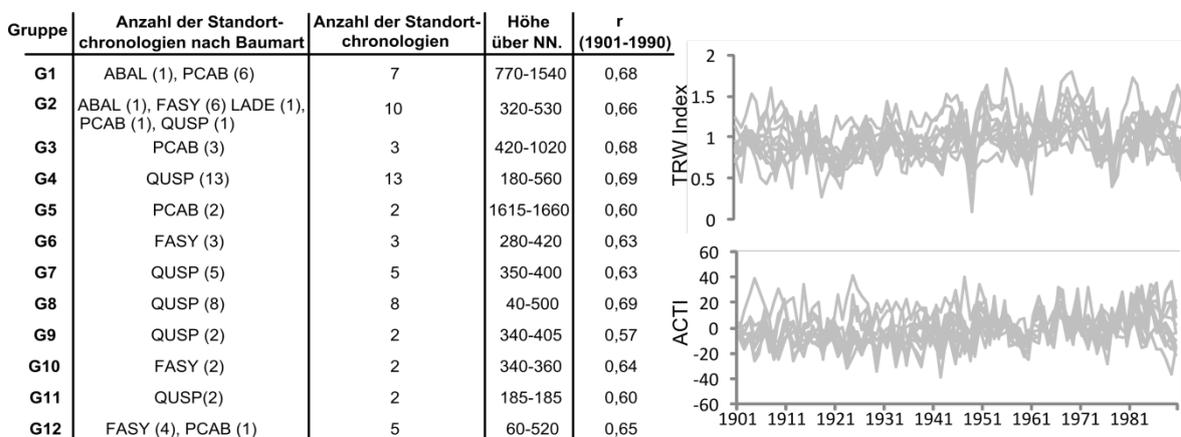


Abbildung 4.5: Übersicht über die 12 Gruppen der Simulation 13 (S13) sowie die ACTI-Zeitreihen und Standortchronologien jeder Gruppe.

Die ACTI-Zeitreihen in Abbildung 4.5 zeigen eine hohe visuelle Ähnlichkeit; dies konnte auch durch die Korrelationsanalyse belegt werden. Nur Gruppe 5 ist nicht mit den anderen ACTI-Zeitreihen positiv korreliert, es treten sogar negative Zusammenhänge auf. Für S13 zeigen jedoch die ACTI-Zeitreihen ein stärkeres gemeinsames Signal als die ACTI-Zeitreihen für S3. Zur weiteren Untersuchung dieses Signals wurden die 62 Standortchronologien in einer Gruppe zusammengefasst und durch Mittelung der 12 ACTI-Zeitreihen ein sogenannter gACTI (vgl. Kap. 4.1) berechnet. Der Korrelationskoeffizient zwischen Gruppenstandortchronologie und gACTI für den Zeitraum 1901–1990 liegt bei 0,69; zum Vergleich: der Median der in Abbildung 4.5 dargestellten Korrelationskoeffizienten liegt bei  $r = 0,65$ . Die Zusammenlegung aller Gruppen hat nicht zum Ziel, die Zusammenhänge zwischen ACTI und Jahrringbreitenchronologien zu verbessern, sondern die Untersuchung von gemeinsamen Signalen zu ermöglichen.

### 5. Kreuzvalidierung und Plausibilitätsprüfung

Die hoch signifikanten Korrelationen ( $\alpha = 0,001$ ) zwischen dem neuen Index (ACTI) und den Standortchronologien bzw. Gruppenchronologien belegen selbst für Standorte mit komplexen Klima / Wachstums-Beziehungen die Potenziale des Verfahrens gegenüber dem „klassischen Ansatz“ (Kap. 1.2). Zur Bestimmung der Güte des Modells bzw. zur Gewährleistung der Übertragbarkeit des Modells außerhalb des Kalibrierungszeitfensters ist eine Kreuzvalidierung (Olson und Delen, 2008) sinnvoll, deren Ergebnisse im Folgenden dargestellt werden.

Außer dieser rein statistischen Überprüfung wird eine Plausibilitätsprüfung der Ergebnisse durchgeführt. Neben der mathematischen Definition des ACTI (Kap. 3.1) kann der Index inhaltlich definiert werden als das aus einer Gruppe von Standortchronologien mit ähnlicher Wetterlagenreaktion extrahierte Wetterlagensignal. Daraus folgt, dass der neue Index sowohl mit den Gruppenchronologien signifikante Zusammenhänge zeigen sollte als auch mit einzelnen Klimaelementen. Die Untersuchung dieser beiden Zusammenhänge sowie die in Kapitel 1.2 erwähnten Kreuzvergleiche erlauben es, die Ergebnisse auf ihre Plausibilität hin zu prüfen.

#### 5.1 Kreuzvalidierung

Die Kreuzvalidierung wird exemplarisch an gACTI (vgl. S. 34) durchgeführt. Aufgrund der für gACTI verwendeten Standardisierung der Jahrringe können somit sowohl hochfrequente als auch niederfrequente Signale untersucht werden. Im Rahmen einer 10-fachen Kreuzvalidierung wurden 10 Modellläufe durchgeführt. In jedem Modelllauf wurden jeweils 9 Jahre von der Kalibrierungsperiode (1901–1990) ausgeschlossen, so dass am Ende aller 10 Durchgänge jedes Jahr einmal nicht für die Kalibrierung verwendet wurde.

Die Ergebnisse der Kreuzvalidierung zeigen, dass das Modell nicht zur Überanpassung der Datensätze (overfitting) neigt. Der RMSE (root mean square error), der im Rahmen der Kreuzvalidierung ermittelt wurde, ist sogar kleiner (8.0) als der RMSE für den ursprünglichen gACTI (9.3). Zusätzlich zu diesem Vergleich mit der Gruppenchronologie wurde ein sogenannter gACTI<sub>cross</sub>, basierend auf den ausgeschlossenen Jahren der 10 Modellläufe, errechnet. gACTI<sub>cross</sub> zeigt eine hohe Gleichläufigkeit von 91 % mit gACTI. Die starke Ähnlichkeit zwischen den beiden Kurven wird auch belegt durch einen Korrelationskoeffizienten von  $r = 0,89$ .

Die Gruppenchronologie ist sowohl mit gACTI<sub>cross</sub> ( $r = 0,39$ ) als auch mit gACTI (0,69) hoch signifikant korreliert. Die Entfernung der hochfrequenten Signale mit einem 20-jährigen Tiefpassfilter führt zu Korrelationskoeffizienten von  $r = 0,86$  (für gACTI) bzw.  $r = 0,64$  für gACTI<sub>cross</sub>. Die Anwendung eines 20-jährigen Hochpassfilters führt hingegen zu einer Abschwächung des Signals. Daraus lässt sich schließen, dass das gemeinsame Signal zwischen gACTI und Gruppenchronologie im niederfrequenten Frequenzbereich

## 5. KREUZVALIDIERUNG UND PLAUSIBILITÄTSPRÜFUNG

---

anzusiedeln ist. Für die Zusammenhänge zwischen gACTI bzw. gACTIcross und der Gruppenchronologie spielen somit die Jahr-zu-Jahr-Variabilität eine untergeordnete Rolle. Die in Kapitel 3 vorgestellte Prozedur betont das jeweils stärkste Signal in den Jahrringchronologien. Daher ist es für die Untersuchung der hochfrequenten Wetterlagensignale aufgrund der gefundenen schwächeren Zusammenhänge im hochfrequenten Bereich, sinnvoll, eine andere Standardisierung der Jahrringchronologien (z. B. die für S3, vgl. Abb. 4.1) zu verwenden.

Die dargestellten Ergebnisse zeigen einen starken niederfrequenten Anteil in gACTI. Dies ist auch relevant für die Interpretation der Ergebnisse. Die Berechnung des prozentualen Einflusses der einzelnen Wetterlagen auf gACTI beruht auf demselben Zeitfenster, welches in Abbildung 4.2 (1950–2004) verwendet wurde (100 % sind definiert als die Summe aller gewichteten Wetterlagenhäufigkeiten [unter Auslassung des Vorzeichens absolute Werte] für den Zeitraum 1950–2004). Folgende Wetterlagen haben positive Gewichte  $g_j$  und führen somit zu guten Wuchsbedingungen: NWZ (12,2 %), SWZ (11,2 %), TRW (6,4 %), TRM (6,6 %), BM (5,5 %), HB (3,7 %) und HNFZ (3,5 %). Die Wetterlagen HFA (9,0 %), HM (5,7 %), WA (5,0 %), HNA (4,5 %), und HNFA (4,5 %) führen hingegen zu ungünstigen Wuchsbedingungen.

### 5.2 Plausibilitätsprüfung

Hinter jedem Indexwert der ACTI-Zeitreihe verbirgt sich das komplexe räumliche Muster der Witterungsbedingungen, die mit jeder Wetterlage einhergehen, sowie die Wetterlagenhäufigkeiten. Der ACTI kann nicht nur, wie in Abbildung 4.2 und 4.4 beschrieben, in seine Bestandteile zerlegt werden, so dass der Einfluss einzelner Wetterlagen auf den Indexwert bzw. auf das Wachstum in den Gruppen untersucht werden kann, sondern es können auch Zusammenhänge zwischen ACTI und verschiedenen Klimaelementen bzw. Klimadatensätzen betrachtet werden. Dies wird im Folgenden an gACTI und den Gruppen aus Simulation 3 (S3, vgl. Ab 4.1) verdeutlicht.

Die Zusammenhänge zwischen ACTI und den Gruppenchronologien wurden bereits in Kapitel 4.2 beschrieben. Da diesen Zusammenhängen gemeinsame klimatische Signale zugrunde liegen, sollten die ACTI-Zeitreihen auch mit verschiedenen Klimaelementen signifikante Korrelationen zeigen. Da Wetterlagen die großräumigen atmosphärischen Zirkulationsbedingungen bzw. die Verteilung von Luftdruckgebieten beschreiben, ist es zunächst naheliegend, die Zusammenhänge zwischen ACTI und Luftdruck zu untersuchen. In Abbildung 5.1 sind für gACTI und für die zugehörige Gruppenchronologie Korrelationen mit gegitterten Luftdruckdaten (Reanalyse-Datensatz, vgl. Kap. 2.3) für das 500 hPa-Niveau und am Boden (SLP) dargestellt. Die Korrelationskoeffizienten wurden unter Zuhilfenahme des „Climate Explorer“ (van Oldenborgh et al., 2009) ermittelt und anschließend kartographisch dargestellt.

## 5. KREUZVALIDIERUNG UND PLAUSIBILITÄTSPRÜFUNG

Farblich markierte Gebiete in der Karte sind solche Gebiete, in denen signifikante Zusammenhänge ( $\alpha = 0,05$ ) zwischen Luftdruck und den untersuchten Zeitreihen auftreten. Es lässt sich feststellen, dass sowohl für den Bodenluftdruck als auch für den Luftdruck in der 500 hPa-Fläche, welche in den Mittelbreiten ungefähr einer Höhe von 5,5 km entspricht, signifikante negative Korrelationskoeffizienten im Bereich von Skandinavien zu beobachten sind. Dabei sind die Muster für die Gruppenchronologie und für den ACTI sehr ähnlich. Durch diesen Abgleich der Korrelationsmuster können die gefundenen Zusammenhänge zwischen den gACTI und der Gruppenchronologie (vgl. Kap. 4.2) u.a. auf einen gemeinsamen Zusammenhang zum Luftdruck zurückgeführt werden.

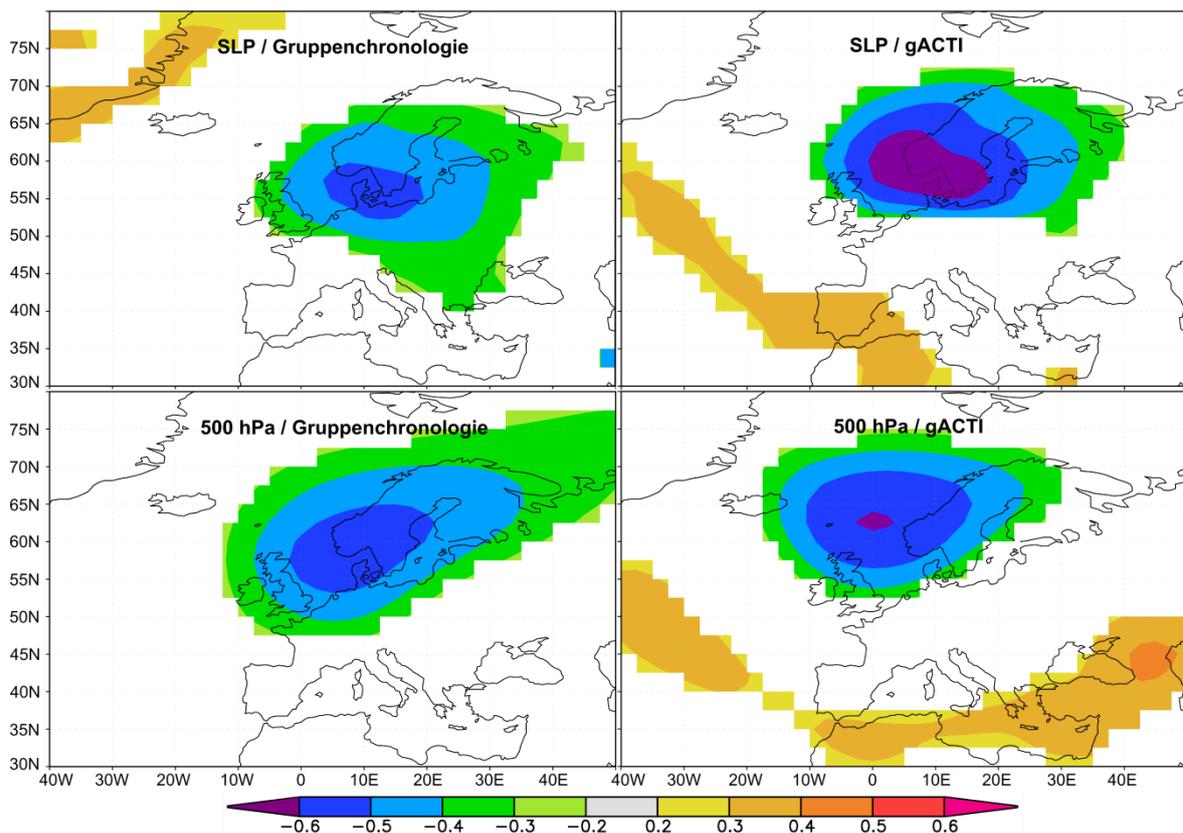


Abbildung 5.1: Korrelationsmuster für das Frühjahr, berechnet für gACTI als auch für die Gruppenchronologie zwischen Luftdruck am Boden (SLP), sowie für das 500 hPa-Niveau, basierend auf dem Zeitraum 1948–2004 (NCEP/NCAR Reanalysedaten vgl. Kapitel 2.3.) Die Korrelationskoeffizienten sind farbig dargestellt. Für die weiß markierten Gebiete wurden keine signifikanten Zusammenhänge gefunden ( $\alpha = 0,05$ ).

Die Zusammenhänge für den gACTI sind stärker ausgeprägt als für die Gruppenchronologie. Dies zeigt sich einerseits in der Stärke der gefundenen Zusammenhänge ( $r \leq -0,6$ ), andererseits treten für den gACTI größere räumliche Korrelationsmuster auf. So zeigt gACTI auch signifikante positive Zusammenhänge zum Luftdruck in einem schmalen Band, welches nordwestlich der Azoren über das Mittelmeer, das Schwarze Meer bis hin zum Kaspischen Meer reicht. Für dieses Gebiet sind keine Zusammenhänge mit der Gruppenchronologie nachweisbar (vgl. Abb. 5.1). Ähnliches gilt

## 5. KREUZVALIDIERUNG UND PLAUSIBILITÄTSPRÜFUNG

auch für die statistischen Zusammenhänge mit dem Niederschlag (Abb. 5.2 hoch aufgelöster  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  E-OBS 7.0-Datensatz) (Haylock et al., 2008). Auch hier ist das räumliche Muster der Korrelationen für den gACTI großräumiger und stärker ausgeprägt als für die Gruppenchronologien.

Aufgrund der Vorgehensweise bei der Gruppierung (Kap. 3.3.3) sind die ACTI-Zeitreihen einer Gruppe immer positiv korreliert mit der korrespondierenden Gruppenchronologie. Ferner ist der ACTI definitionsgemäß das aus einer Gruppe von Standortchronologien mit ähnlicher Wetterlagenreaktion extrahierte Wetterlagensignal (vgl. Kap. 5). Somit können die ACTI-Zeitreihen dazu verwendet werden, den Einfluss einzelner Klimaelemente auf das Wachstum innerhalb einer Gruppe zu untersuchen.

Die in Abbildung 5.1 dargestellten Karten für gACTI lassen den Schluss zu, dass geringer Luftdruck über Skandinavien zu guten Wuchsbedingungen führt. Dieser Schluss wird durch das Korrelationsmuster zwischen der Gruppenchronologie und dem Luftdruck bestätigt. Das in Abbildung 5.2 dargestellte Korrelationsmuster zwischen Niederschlag und Gruppenchronologie bzw. gACTI untermauert dieses Ergebnis, da das räumliche Muster auf zyklonale Niederschläge hindeutet. Somit ergeben die beobachteten negativen Zusammenhänge zum Luftdruck bzw. die positiven Zusammenhänge zum Niederschlag ein in sich schlüssiges Bild.

Der gACTI zeigt neben den schon beschriebenen Klimaelementen auch hoch signifikante Zusammenhänge z. B. zum zonalen und meridionalen „wind stress“ (Karten hierzu finden sich im Anhang C) oder zur Temperatur. So ist der gACTI mit der gemittelten nordhemisphärischen Temperatur (CRU-Daten) für das Frühjahr im Zeitraum 1881 bis 2004 positiv korreliert ( $r = 0.5$ ). Die Ergebnisse zeigen, dass großräumige klimatische Zusammenhänge zwischen den gACTI und verschiedenen Klimadatensätzen bestehen. Auch die 12 ACTI-Zeitreihen (Abb. 4.5), aus denen der gACTI gebildet wurde, zeigen hoch signifikante Zusammenhänge zu verschiedenen Klimaelementen.

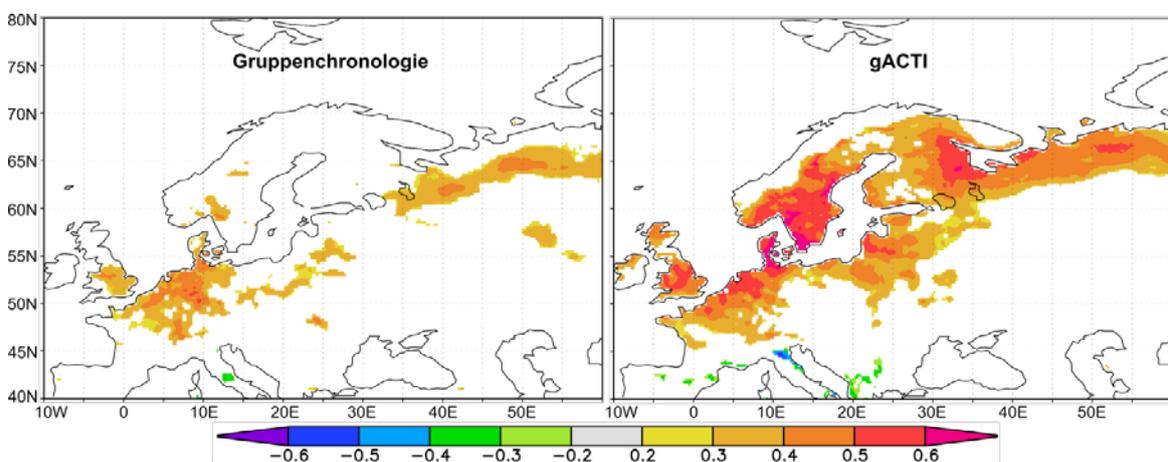


Abbildung 5.2: Korrelationsmuster für das Frühjahr zwischen gACTI und Niederschlag sowie zwischen Gruppenchronologie und Niederschlag auf der Basis der E-OBS Daten (vgl. Kap. 2.3) für den Zeitraum 1950–2004. Für die weiß markierten Gebiete wurden keine signifikanten Zusammenhänge gefunden ( $\alpha = 0,05$ ).

## 5. KREUZVALIDIERUNG UND PLAUSIBILITÄTSPRÜFUNG

---

Neben dem in Abbildung 5.1 und 5.2 durchgeführten Abgleich der Korrelationsmuster zwischen gACTI und Gruppenchronologie besteht die Möglichkeit, die Ergebnisse der Korrelationsanalyse zwischen ACTI und gegitterten Klimadaten durch den Vergleich der ACTI<sub>p</sub>-Werte (Abb. 4.2) näher zu verifizieren. Somit kann nicht nur die Analyse der Korrelationsmuster bzw. der ACTI<sub>p</sub>-Werte zur Verifizierung der gefundenen Zusammenhänge zwischen ACTI und Gruppenchronologie beitragen, sondern auch die Kombination beider Ansätze. Sie bietet die Möglichkeit, die Ergebnisse bzw. die gesamte Prozedur durch Interpretation der klimatologischen Zusammenhänge auf ihre Plausibilität hin zu überprüfen. Dies soll exemplarisch an den Gruppen 3, 6, 10 (G3, G6, G10) der Simulation 3 (S3), die sich durch unterschiedliche Metadaten auszeichnen, verdeutlicht werden (vgl. Abb. 4.2). G3 repräsentiert eine Hochgebirgsgruppe, G6 eine Gruppe mit verschiedenen Baumarten, und G10 besteht aus Standorten, die eine geringe räumliche Distanz zueinander aufweisen (vgl. Abb. 4.2).

Aufgrund der für S3 verwendeten Indexierung der Jahrringchronologien (Abb. 4.1) enthalten diese keine niederfrequenten Signale. Sollten in den ACTI-Zeitreihen niederfrequente Signale auftreten, so können diese in keinem Zusammenhang zu den Jahrringchronologien stehen und sind somit als Störsignal zu klassifizieren. Zur Reduzierung der niederfrequenten Anteile (z. B. Trends) sowohl in den ACTI-Zeitreihen als auch in den Klimadaten wurde, wie in Kapitel 2.4 beschrieben, ein Hochpassfilter verwendet. Für die Korrelationsanalyse wurde das Zeitfenster von 1950–2004 gewählt, welches allen Datensätzen gemein ist und somit einen Vergleich der Ergebnisse mit Abbildung 4.2 gewährleistet. In Abbildung 5.3 sind die Korrelationsmuster zwischen Luftdruck (500 hPa-Niveau) und zonalem bzw. meridionalem „wind stress“ (Boden 10 m) und zu denen in Abbildung 5.3e gezeigten ACTI-Zeitreihen dargestellt. Die ACTI-Zeitreihen der Gruppen 3, 6 und 10 (G3, G6, G10) zeigen eine hohe visuelle Ähnlichkeit, jedoch treten auch Phasen auf, z. B. von 1980–1990, in denen ein uneinheitlicher Kurvenverlauf zu beobachten ist.

Das in Abbildung 5.3 a und b für G3 und G10 dargestellte Korrelationsmuster mit Luftdruck im 500 hPa-Niveau erscheint auf den ersten Blick relativ ähnlich. So ist der ACTI negativ korreliert mit dem Luftdruck im Bereich von Skandinavien. Für G3 finden sich positive Zusammenhänge für den Luftdruck im Bereich des Mittelmeeres mit zwei Zentren, eines westlich von Portugal / Spanien und eines im Bereich des Balkan. Hingegen sind für G10 die positiven Zusammenhänge zum Luftdruck auf dem iberischen Bereich begrenzt. Die beiden Korrelationsmuster sind deckungsgleich mit den typischen Positionen von Hoch- und Tiefdruckgebieten in Europa. Die mit der blauen Signatur versehenen Gebiete sind oft von tiefem Luftdruck dominiert, während in den rot markierten Gebieten im Mittel hoher Luftdruck vorherrscht. So führt insbesondere für G10 niedriger Luftdruck über Skandinavien und hoher Luftdruck über Portugal / Spanien zu guten

## 5. KREUZVALIDIERUNG UND PLAUSIBILITÄTSPRÜFUNG

Wachstumsbedingungen. Diese Schlussfolgerung wird durch die positiven Korrelationen mit dem zonalen „wind stress“, dargestellt in Abbildung 5.3 c, weiter untermauert.

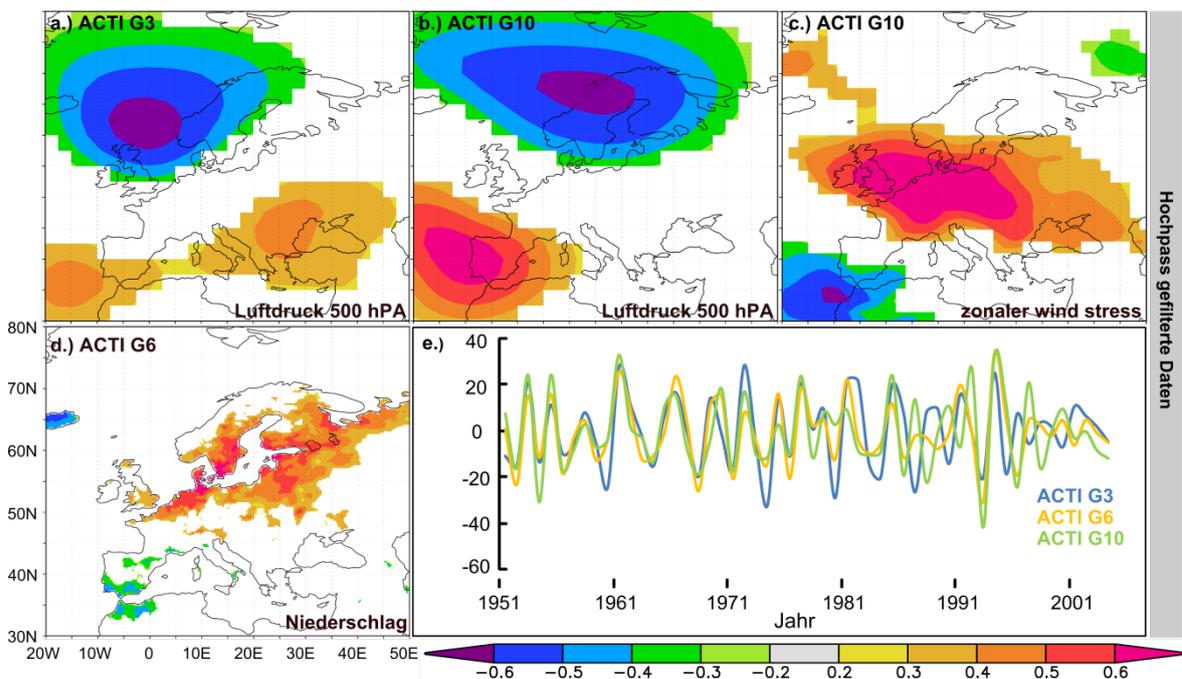


Abbildung 5.3: Korrelationsmuster für das Frühjahr, berechnet zwischen den ACTI-Zeitreihen von G3, G6 und G10 (Karte e) und verschiedenen gegitterten Klimadatenansätzen (Karten a–d) für den Zeitraum 1950–2004. Das verwendete Zeitfenster ist identisch mit dem in Abbildung 4.2 gewählten. Den Karten a–c liegen die NCEP/NCAR-Reanalysedaten, und der Karte d die E-OBS Daten (vgl. Kap. 2.3) zugrunde. Auf die Daten wurde ein Hochpassfilter angewendet (vgl. hierzu Kap. 2.4). Die Korrelationskoeffizienten sind farbig dargestellt. Für die weiß markierten Gebiete wurden keine signifikanten Zusammenhänge gefunden ( $\alpha = 0,05$ ) (nach: Schultz & Neuwirth 2012).

Ein starker Luftdruckgradient zwischen den beschriebenen Gebieten führt zu einer starken zonalen Strömung. Eine Zunahme des zonalen Zirkulationstyps ist auch typisch für die positive NAO-Phase. Die Zunahme der zonalen Zirkulation während der positiven NAO-Phase führt zu wärmeren und feuchteren Bedingungen im Untersuchungsgebiet (Hurrell, 2003). In der positiven NAO-Phase bzw. bei Vorherrschen zonaler Strömungskomponenten ist die Wahrscheinlichkeit von Frostereignissen im späten Frühjahr reduziert. Hingegen führt ein geringer Luftdruckgradient zwischen den oben beschriebenen Gebieten zu schlechteren Wachstumsbedingungen. Bei solch einer Situation herrschen meridionale Strömungskomponenten vor, welche auch typisch für die negative NAO-Phase sind (Rohli und Vega, 2008). Vergleicht man dieses Ergebnis mit Abbildung 4.2, so ist festzustellen, dass für die G3 und G10 überwiegend die Wetterlagen, die zu den Zirkulationstypen zonal und halbmeridional gehören (vgl. Abb. 2.2), rot markierte ACTI<sub>p</sub>-Werte aufweisen und somit positive Wetterlagengewichte haben. Die Analyse der ACTI<sub>p</sub>-Werte bzw. der Wetterlagengewichte kommt somit zur selben Schlussfolgerung wie die Analyse der in Abbildung 5.3 b und c vorgestellten Korrelationsmuster.

## 5. KREUZVALIDIERUNG UND PLAUSIBILITÄTSPRÜFUNG

---

Ergänzend zu der obigen klimatologischen Interpretation ist für die Standorte der Gruppe 3, die alle auf der Alpennordseite zwischen 1540-1660 m ü. NN liegen (vgl. Abb. 4.2), neben der schon beschriebenen synoptischen Situation (Luftdruck Portugal / Spanien und Skandinavien), auch der Luftdruck im Bereich des Mittelmeeres mit Schwerpunkt über dem Balkan relevant (vgl. Abb. 5.3 a). Diese Konstellation, bestehend aus hohem Luftdruck über dem Mittelmeer bzw. Balkan und geringem Luftdruck über Skandinavien / Nordsee. Je nach Stärke der Druckgebilde führt diese Situation u.a. zu einem Luftmassentransport über die Alpen und wärmeren Bedingungen auf der Alpennordseite. Auch diese synoptische Situation führt, neben der schon beschriebenen, zu guten Wuchsbedingungen für die Standorte in dieser Gruppe.

Trotz der räumlich heterogenen Verteilung von Niederschlag finden sich in vielen der 14 Gruppen von S3 signifikante Zusammenhänge zum Niederschlag. Diese Zusammenhänge werden beispielhaft an G6, die die meisten Standortchronologien beinhaltet, in Abbildung 5.3d gezeigt. Insbesondere für Dänemark / Norddeutschland treten Korrelationskoeffizienten größer als 0,6 mit dem hoch aufgelösten E-OBS-7.0-Datensatz (Haylock et al., 2008) auf. Positive Zusammenhänge treten für das Gebiet auf, welches vom südlichen Großbritannien über das nördliche Frankreich, Benelux, Deutschland und Dänemark bis nach Skandinavien, Polen und Russland reicht. Dieses Muster ist dem in Abbildung 5.2 dargestellten Muster sehr ähnlich und entspricht den klassischen Zugbahnen von Tiefdruckgebieten und den assoziierten Niederschlagsfeldern.

Für unterschiedliche Zeitfenster konnten zwischen allen 14 ACTI-Zeitreihen statistisch signifikante Zusammenhänge mit verschiedenen Klimadatensätzen, unter anderem mit Mittel-, Minimum- und Maximumtemperatur, Wasserdampfdruck, zonalem und meridionalem „wind stress“ und Luftdruck nachgewiesen werden. Die beobachteten Korrelationsmuster weisen zumeist eine großräumige Struktur auf.

Bei einigen Gruppen treten hoch komplexe, schwierig zu interpretierende Korrelationsmuster auf. Für das komplette zur Verfügung stehende gemeinsame Zeitfenster zwischen den verwendeten gegitterten Klimadatensätzen und ACTI wird dies exemplarisch an Gruppe 9, die aus 4 Buchen-Standortchronologien aus dem Kellerwald besteht (vgl. Abb. 4.2), verdeutlicht (vgl. Abb. 5.4). Auch für dieses Beispiel können die Korrelationsmuster der einzelnen Klimaelemente untereinander verglichen und zu einer gegenseitigen Interpretation der Ergebnisse genutzt werden. So ist z. B. das gefundene Korrelationsmuster für den Niederschlag in Bezug auf das gefundene Muster mit Luftdruck (SLP und 500 hPa-Niveau) stimmig (vgl. Abb. 5.4 a, b, e). Gleiches gilt auch für Niederschlag und die gefundenen Muster für den Bewölkungsgrad (vgl. Abb. 5.4 h). Da der ACTI negativ mit dem Luftdruck über Skandinavien bzw. Dänemark korreliert ist, bedeutet dies, dass niedriger Luftdruck in diesem Gebiet mit einem positiven ACTI-Wert assoziiert ist bzw. zu guten Wuchsbedingungen führt. Geringer Luftdruck in diesem Gebiet führt zu Niederschlägen u.a im Bereich des Kellerwaldes. Die positiven Zusammenhänge

## 5. KREUZVALIDIERUNG UND PLAUSIBILITÄTSPRÜFUNG

zwischen G9 und Niederschlag bestätigen diese Aussage. Hingegen stellt sich die Frage, in welchem direkten Zusammenhang das Muster für Maximumtemperatur (Tmax) und Wasserdampfdruck im östlichen Bereich des Kartenausschnittes mit den klimatischen Bedingungen im Kellerwald steht. Auch die auf ein sehr kleines Gebiet begrenzten Zusammenhänge mit der SST (Sea surface temperature) (vgl. Abb. 5.4 i) lassen sich nicht direkt mit den klimatischen Bedingungen am Standort verbinden. Hier besteht sehr wahrscheinlich ein indirekter Zusammenhang über den Luftdruck, bzw. in Bezug auf die SST, zum „wind stress“.

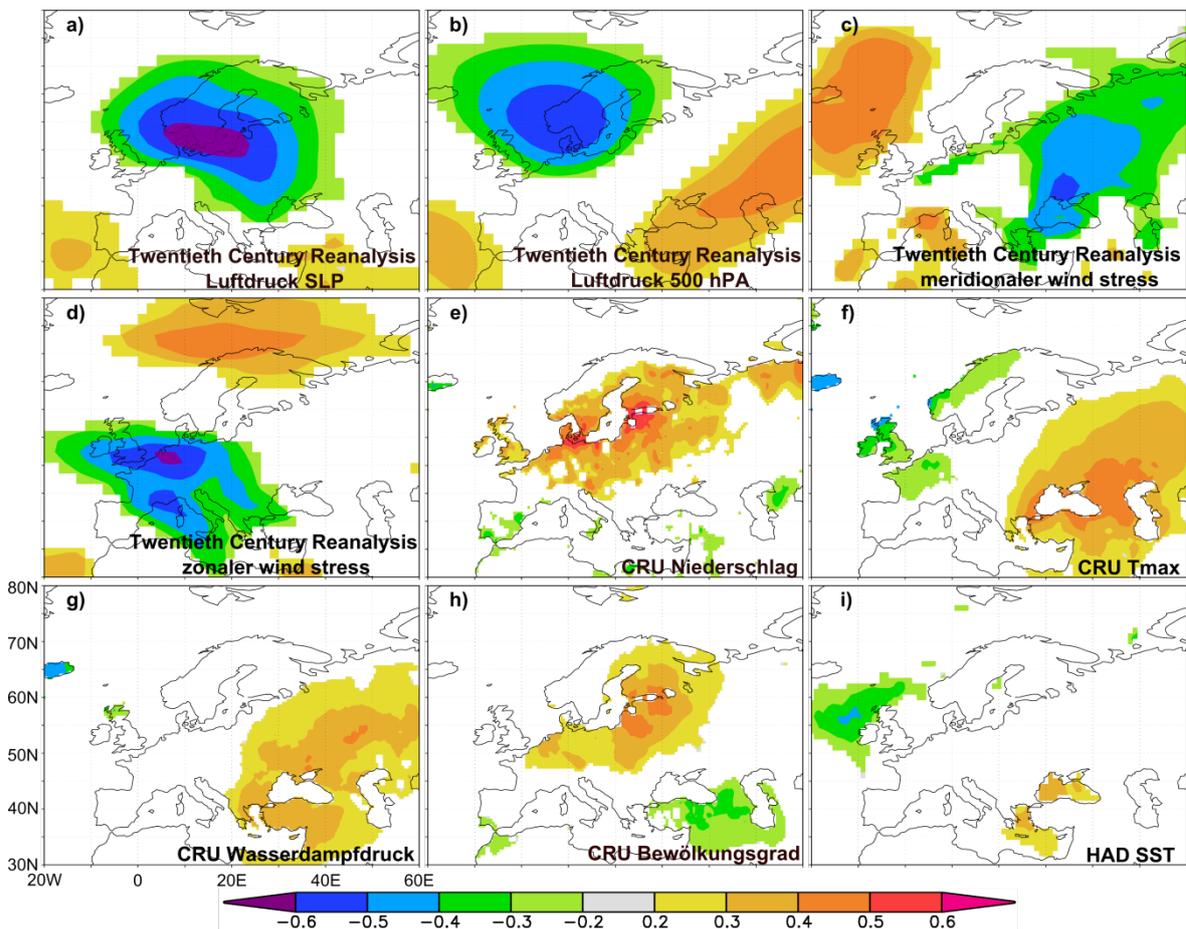


Abbildung 5.4: Korrelationsmuster, berechnet zwischen der ACTI-Zeitreihe von G9, und verschiedenen gegitterten Klimadaten a - i (vgl. Kap. 2.3) für den Zeitraum 1901–2004, Frühjahr. Die Klimadaten als auch die ACTI-Zeitreihe von G9 wurden hochpassgefiltert (vgl. Kap. 2.4). Die Berechnungen basieren auf dem. Die Korrelationskoeffizienten sind farbig dargestellt. Für die weiß markierten Gebiete wurden keine signifikanten Zusammenhänge gefunden ( $\alpha = 0,05$ ).

Es lässt sich also resümieren, dass die Prozedur dazu geeignet ist, Wetterlagensignale in Jahrringchronologien zu detektieren. Dies belegen sowohl die starken statistischen Zusammenhänge zwischen ACTI und Gruppenchronologien als auch die Zusammenhänge zwischen Klimadaten und ACTI-Zeitreihen. Für die einzelnen Gruppen sorgt die Gruppierung der Standortchronologien zu einer Reduktion des Rauschens, so dass gemeinsame Signale in den Standortchronologien stärker hervortreten. Gerade in

## 5. KREUZVALIDIERUNG UND PLAUSIBILITÄTSPRÜFUNG

---

Regionen, in denen komplexe Klima / Wachstums-Beziehungen auftreten (dies gilt für die meisten Standorte im Datensatz), stellt sich die Analyse von einzelnen Klimaelementen durch die oft schwachen statistischen Zusammenhänge oder durch Zusammenhänge, die über die Zeit nicht stabil sind, als schwierig dar (Friedrichs et al., 2009a, b). Ferner ermöglicht der Abgleich der Korrelationsmuster die Verifizierung der gefundenen Zusammenhänge. Darüber hinaus vereinfachen die ACTI-Zeitreihen, die für jede Gruppe vorliegen, die Analyse von Klima / Wachstums-Beziehungen. Einerseits ist dies darin begründet, dass sie, wie in Abbildung 4.2 bzw. 4.4 gezeigt, in ihre Komponenten zerlegt werden können und somit der Einfluss der einzelnen Wetterlagen erfassbar wird; andererseits zeigen sie stärkere Zusammenhänge zu Klimaelementen und sind im Regelfall mit mehr Klimaelementen korreliert als die Gruppenchronologien. Dadurch lassen sich die synoptischen Bedingungen besser erfassen, die für die Wuchsreaktionen der Bäume in einer Gruppe maßgeblich sind.

## **6. Wetterlagensignale in verschiedenen jahreszeitlichen Perioden und die zeitliche Stabilität der statistischen Zusammenhänge**

In den meisten dendroklimatologischen Studien werden die Zusammenhänge zwischen Klima und Jahrringwachstum zumeist für mehrere jahreszeitliche Perioden untersucht (Schweingruber 1996). Es finden sich nicht nur Zusammenhänge innerhalb der Wachstumsperiode, sondern auch die klimatischen Bedingungen des Vorjahres oder auch des Winters können sich auf das Jahrringwachstum auswirken. Dabei sind Zusammenhänge je nach untersuchter jahreszeitlicher Periode und Standort unterschiedlich stark ausgeprägt (vgl. hierzu Fischer und Neuwirth 2012; Neuwirth 2010). Im Folgenden wird die in Kapitel 3 beschriebene Prozedur auf verschiedene jahreszeitliche Perioden angewendet. Da hierzu eine Anpassung des in MATLAB geschriebenen Programms notwendig ist, wurde im Rahmen dieser Anpassung auf die aktuelle Version des Großwetterlagendatensatzes (Werner und Gerstengarbe 2010) umgestellt, der ein längeres Zeitfenster abdeckt.

Im zweiten Teil des Kapitels soll die zeitliche Stabilität der Zusammenhänge zwischen ACTI und Gruppenchronologien untersucht werden.

Da dieses Kapitel darauf zielt, die Prozedur zu bewerten, liegt der Fokus nicht auf der klimatologischen Interpretation der gefundenen Signale in den einzelnen Gruppen und deren zeitlicher Stabilität. Vielmehr sollen über die Analyse des Jahresgangs der Wetterlagenreaktionen grundlegende Aussagen über die Prozedur ermöglicht werden.

### **6.1 Jahresgang der Wetterlagenreaktionen**

Für 16 verschiedene jahreszeitliche Perioden wurden die 115 Standortchronologien des Datensatzes I, der auch schon in den vorangegangenen Kapiteln verwendet wurde, auf ihre Wetterlagenreaktion hin untersucht. Für die Standardisierung der Jahrringchronologien wurde ein 32jähriger-Spline verwendet. Zur Detektion auch schwacher Wetterlagensignale in den Standortchronologien wurde  $\alpha = 0,05$  und ein Schwellenwert ( $t_p$ ) von 30 % gewählt. In Abbildung 6.1 ist jeweils für alle Perioden die Anzahl der reagierenden Standorte sowie die Anzahl der Gruppen dargestellt. Insgesamt treten 110 Gruppen in den 16 jahreszeitlichen Perioden auf. Die meisten der 115 Standortchronologien, insgesamt 86, die sich auf 14 Gruppen aufteilen, zeigen signifikante Wetterlagenreaktionen im Frühjahr (März, April, Mai). Auch die Analyse der einzelnen Monate belegt den starken Zusammenhang im Frühjahr. So reagieren allein für den Monat April 76 Standortchronologien.

Darüber hinaus ist es auffällig, dass für längere Perioden, z. B. das Jahr oder auch die Periode März bis Oktober, eine kleinere Anzahl von Standortchronologien mit signifikanten Wetterlagenreaktionen zu beobachten ist.

## 6. WETTERLAGENSIGNALE IN VERSCHIEDENEN JAHRESZEITLICHEN PERIODEN UND DIE ZEITLICHE STABILITÄT DER STATISTISCHEN ZUSAMMENHÄNGE

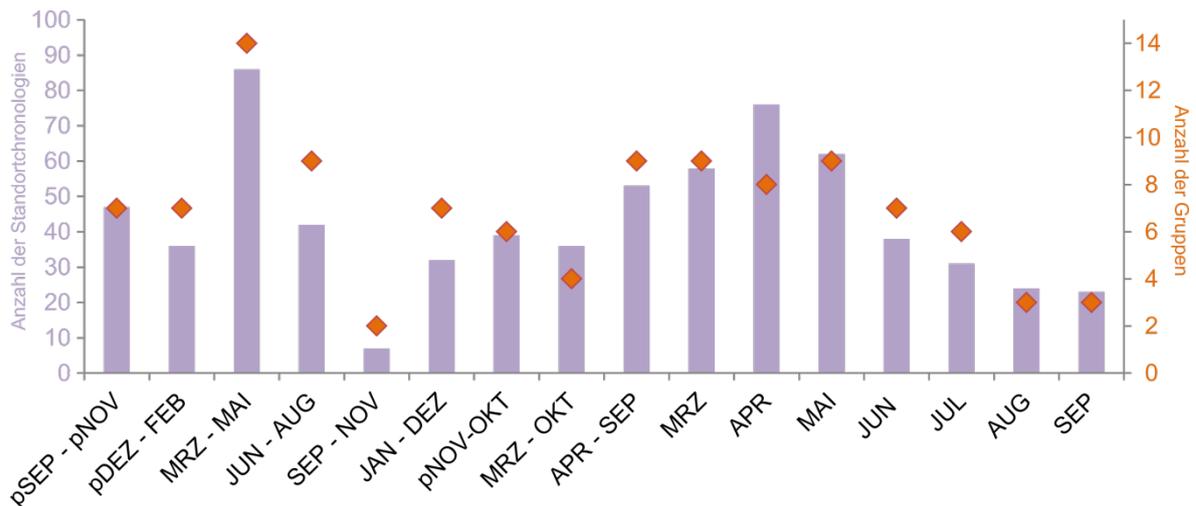


Abbildung 6.1: Wetterlagenreaktionen der Standortchronologien für unterschiedliche jahreszeitliche Perioden. In rot ist die Anzahl der Gruppen angegeben, in blau die Anzahl der Standortchronologien mit signifikanten Wetterlagenreaktionen, p(previous) = Vorjahr.

Vordergründig könnte man annehmen, dass für längere Perioden, insbesondere wenn sie innerhalb der Vegetationsperiode liegen, mehr Standortchronologien signifikante Wetterlagenreaktionen aufweisen als für einzelne Monate bzw. kurze Perioden. Zwei wesentliche Aspekte treten jedoch dieser Annahme entgegen:

a) Ein und dieselbe Wetterlage kann in verschiedenen Jahreszeiten mit einer vollkommen anderen Witterung einhergehen. So führt z. B. die Großwetterlage Hoch Nordmeer-Fennoskandien antizyklonal (HNFA) im Winter in Bezug auf die Temperatur zu unterdurchschnittlichen Temperaturen, während im Sommer höhere Temperaturen auftreten als im Mittel.

b) Neben diesem Aspekt können identische meteorologische Bedingungen abhängig vom Zeitpunkt ihres Auftretens im Jahr zu verschiedenen Wuchsreaktionen der Bäume führen. So wirkt sich z. B. ein Frostereignis im Frühjahr anders aus als ein Frostereignis im Herbst. Da die Wetterlagengewichte ( $g_j$ ) den Einfluss der Wetterlagen auf das Jahrringwachstum in einer Gruppe repräsentieren, ergibt sich aus diesen beiden Aspekten, dass die Bestimmung von optimalen Wetterlagengewichten für eine längere Periode erschwert ist. Die geringere Anzahl von signifikant reagierenden Standortchronologien für längere Perioden ist somit ursächlich auf diese beiden Aspekte zurückzuführen.

In Bezug auf die 4 Jahreszeiten entspricht der Verlauf der Anzahl der Standortchronologien mit signifikanten Wetterlagenreaktionen somit den Erwartungen. Für den Winter (Dezember-Februar) zeigen nur 36 Standortchronologien, die sich auf 7 Gruppen aufteilen, signifikante Wetterlagenreaktionen. Für das Frühjahr steigt die Zahl auf 86 an und erreicht ihr Minimum im Herbst (September-November) mit 7 Standortchronologien, die sich auf 2 Gruppen verteilen.

## 6. WETTERLAGENSIGNALE IN VERSCHIEDENEN JAHRESZEITLICHEN PERIODEN UND DIE ZEITLICHE STABILITÄT DER STATISTISCHEN ZUSAMMENHÄNGE

---

Da für die Untersuchung viele Eichen- und Buchenstandorte (vgl. Abb. 2.1) verwendet wurden sowie als Jahrringparameter die Jahrringbreite, sind die starken Zusammenhänge zum Frühjahr zu erwarten.

In Abbildung 6.2 wird analog zu Abbildung 4.2 der prozentuale Anteil jeder Großwetterlage am ACTI ( $ACTI_p$ ) für jede Gruppe in den Jahreszeiten Winter (Dezember-Februar), Frühjahr (März-Mai), Sommer (Juni-August) und Herbst (September-November) mit einer Farbcodierung dargestellt (ein Überblick über alle jahreszeitlichen Perioden findet sich im Anhang D und E). Zur Verbesserung der Vergleichbarkeit zwischen den Jahreszeiten wurden die Achsen in Bezug zu Abbildung 4.2 gedreht. Ferner wurde das gesamte zur Verfügung stehende Zeitfenster des Großwetterlagendatensatzes für die Berechnung herangezogen (1881-2010). Somit sind die Abbildungen 4.2 und 6.2 nur bedingt vergleichbar. Auch hier zeigt sich, dass je nach Gruppe die Wetterlagen einen unterschiedlichen Anteil am ACTI der jeweiligen Gruppe haben. Die einzelnen Gruppen in den verschiedenen jahreszeitlichen Perioden lassen sich nur schwer vergleichen. Dies liegt daran, dass z. B. Gruppe 2 im Frühjahr nicht zwingend aus denselben Standortchronologien bestehen muss wie Gruppe 2 im Sommer. So beschränkt sich der Vergleich zwischen den Jahreszeiten auf Wetterlagen, die in den meisten Gruppen ähnliche Wuchsreaktionen auslösen.

Unter Zugrundelegung der obigen Aspekte (a) und b) S. 45) sollten die Wetterlagengewichte eine jahreszeitliche Komponente aufweisen. Die in Abbildung 6.2 dargestellten Ergebnisse bestätigen diese Annahme. So führt z. B. die Großwetterlage HFA im Sommer in den meisten Gruppen zu günstigen Wuchsbedingungen (positives Wetterlagengewicht, rote Signatur), hingegen im Frühjahr für das Wachstum zu ungünstigen Witterungsbedingungen (negatives Wetterlagengewicht, blaue Signatur). Ähnliches gilt auch für die Wetterlage NWZ, die im Frühjahr für die meisten Gruppen positiv und im Sommer negativ gewichtet ist. Es gibt aber auch Wetterlagen, die über die Jahreszeiten hinweg keinen Vorzeichenwechsel in Bezug auf die Gewichtung vollziehen; exemplarisch sei hier die Großwetterlage TRM, genannt, die im Winter, Frühjahr und Sommer für die meisten Gruppen positive Gewichte aufweist. Für einige Wetterlagen tritt somit ein gleichgerichtetes Verhalten der meisten Gruppen über mehrere Jahreszeiten hinweg auf, wobei sich das Vorzeichen der Wetterlagengewichte verändern kann.

Sowohl die sich über die verschiedenen jahreszeitlichen Perioden verändernde Anzahl von Standortchronologien mit signifikanten Wetterlagenreaktionen als auch die Wetterlagengewichte zeigen, dass die beiden Aspekte (a) und b)) erwartungsgemäß Einfluss nehmen und somit die in Abbildung 6.2 dargestellten Ergebnisse vor diesem Hintergrund plausibel erscheinen.

## 6. WETTERLAGENSIGNALE IN VERSCHIEDENEN JAHRESZEITLICHEN PERIODEN UND DIE ZEITLICHE STABILITÄT DER STATISTISCHEN ZUSAMMENHÄNGE

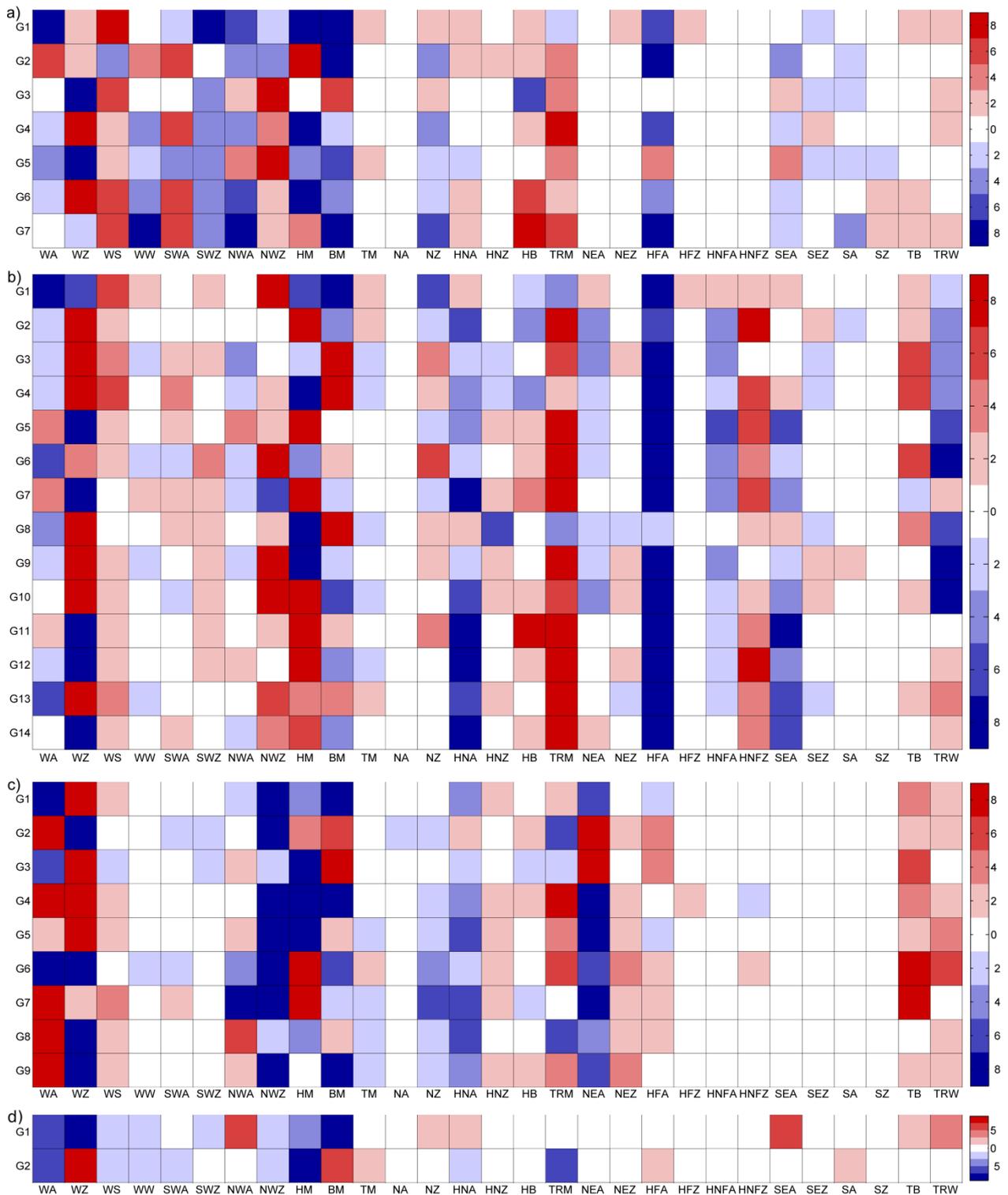


Abbildung. 6.2: Wetterlagen bzw. Großwetterlagenreaktionen aller Gruppen für den Winter (Dezember-Februar a)), für das Frühjahr (März-Mai b)) den Sommer (Juni-August c)) und den Herbst (September-November d)). In Farbe sind die prozentualen Anteile jeder Großwetterlage am ACTI ( $ACTI_p$  Werte vgl. hierzu Abb. 4.2) der jeweiligen Gruppe angegeben, berechnet für den Zeitraum 1881-2010. Blaue Felder repräsentieren Großwetterlagen mit negativen Gewichten, rote mit positiven Gewichten.  $ACTI_p$  Werte  $< 1$  % werden in weiß dargestellt. Die dunkelste rote und die dunkelste blaue Farbkategorie umfassen alle Werte  $> 7$  %.

## **6.2 Untersuchung der zeitlichen Stabilität**

In den Zusammenhängen zwischen einzelnen Klimaelementen und verschiedenen Jahrringparametern können Instabilitäten auftreten, die sogar bis hin zum Verlust des statistischen Zusammenhangs führen können (Lebourgeois et al., 2012; Friedrichs et al., 2009b). Die Ursache für solche Instabilitäten sind oft nur schwer zu ergründen.

Für den im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten, auf Wetterlagen basierenden Ansatz ist das Auftreten zeitlicher Instabilitäten nicht auszuschließen. Das Einbrechen bzw. der Verlust des statistischen Zusammenhangs kann mehrere Ursachen haben. Auf der einen Seite sind in diesem Zusammenhang nicht klimatische, abiotische sowie biotische Faktoren zu nennen, die sich auf das Baumwachstum potenziell auswirken können, wie z. B. Forstmaßnahmen, Insektenbefall, Hangrutschungen, Lawinen und Murgänge, Steinschlag, Konkurrenz, Veränderungen des Grundwasserspiegels, Luftverschmutzung etc. Andererseits ist auch nicht auszuschließen, dass die Klima / Wachstums-Beziehungen selbst einer Veränderung unterliegen können. Dies wäre der Fall, wenn ein Baum bzw. ein Standort auf dieselben klimatischen Bedingungen anders reagiert als zuvor. Neben diesen Aspekten können aber auch die Klimadaten Ursache für den Verlust des statistischen Zusammenhangs sein, etwa durch Inhomogenitäten oder Fehler in den Klimadaten. Im Folgenden soll exemplarisch verdeutlicht werden, wie durch das neue Verfahren die Ursachen von instabilen Klima / Wachstums-Beziehungen besser erforscht werden können. Die Analyse der zeitlichen Instabilitäten für die in Abbildung 6.1 dargestellten jahreszeitlichen Perioden ergibt, dass nur für einige Gruppen die statistischen Zusammenhänge über die Zeit zwischen Gruppenchronologie und ACTI stark schwanken. Hingegen treten für das Frühjahr, insbesondere bei Eichen und Buchen dominierten Gruppen, systematische, synchrone Instabilitäten auf. Zur näheren Verifizierung der gefundenen Instabilitäten wurde ein homogenes Netzwerk, bestehend aus Buchen- und Eichenstandorten, insgesamt 50 Chronologien (vgl. Kap. 2.1 Datensatz II), verwendet. Die für die Untersuchungen herangezogenen Chronologien erfüllen in Bezug auf Rbar- und EPS-Werte das für eine Klimarekonstruktion erforderliche Niveau (vgl. Kap. 2.1) und sollten somit ein stabiles gemeinsames Signal aufweisen. Der Analyse lagen folgende Simulationseinstellungen zugrunde: 32-jähriger Spline,  $t_p = 20$  (vgl. Kap. 3.3.2 d),  $\alpha = 0,05$ , gleiche Wahl der Kalibrierungsjahre wie in Kapitel 3.3.2 a beschrieben.

In Abbildung 6.3 sind die Ergebnisse der gleitenden Korrelationsanalyse (35-jähriges, beidseitig gleitendes Fenster) zwischen Gruppenchronologie und der jeweiligen ACTI-Zeitreihe für den Zeitraum 1891–1990 dargestellt. Insgesamt ergeben sich aus der Länge des gleitenden Fensters und dem untersuchten Zeitraum für jede Gruppe 66 Korrelationskoeffizienten. Für das Frühjahr treten insgesamt sieben Gruppen auf, 2 reine Buchengruppen (G3, G6 in grün dargestellt) und 5 reine Eichengruppen (G1, G2, G4, G5, G7 in rot dargestellt). Insgesamt haben 13 Buchenstandorte signifikante Wetterlagenreaktionen gezeigt, 3 Standorte sind der Gruppe 3 zugeordnet und 10 Standorte

## 6. WETTERLAGENSIGNALE IN VERSCHIEDENEN JAHRESZEITLICHEN PERIODEN UND DIE ZEITLICHE STABILITÄT DER STATISTISCHEN ZUSAMMENHÄNGE

der Gruppe 6. Insgesamt treten bei 21 Eichenstandorten signifikante Wetterlagenreaktionen auf, die sich wie folgt auf die Gruppen aufteilen: G1 (4 Standorte), G2 (2 Standorte), G4 (4 Standorte), G5 (7 Standorte), G7 (4 Standorte).

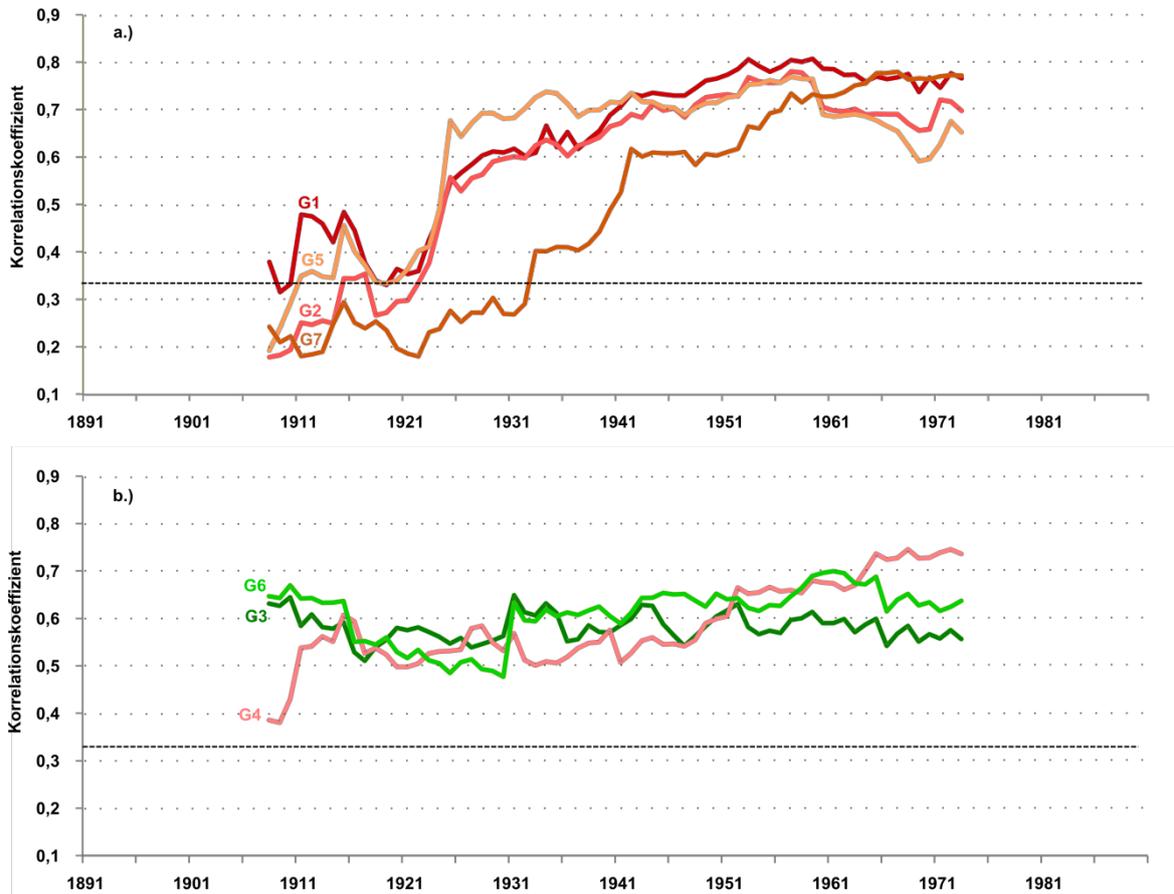


Abbildung 6.3: Gleitende Korrelationen, berechnet zwischen den ACTI-Zeitreihen und den korrespondierenden Gruppenchronologien in einem 35-jährigen gleitenden Fenster für den Zeitraum 1891–1990. Die gestrichelte Linie repräsentiert das Signifikanzniveau,  $\alpha = 0,05$ .

Da für die Berechnung der Korrelationskoeffizienten ein beidseitig 35-jähriges, gleitendes Fenster verwendet wurde, bezieht sich der erste Wert (1908) der resultierenden Zeitreihen auf den Zeitraum von 1891–1925 (35 Jahre). In Abbildung 6.3a sind alle Gruppen dargestellt, bei denen die Zusammenhänge zwischen ACTI und Gruppenchronologie instabil sind, während in Abbildung 6.3b alle Kurven durchweg über der gestrichelten Linie und somit stabil sind bzw. für alle 66 untersuchten Zeitfenster signifikante Zusammenhänge zeigen. Es ist auffällig, dass für alle Eichengruppen die Korrelationskoeffizienten zu Beginn der Zeitreihe ansteigen, um das Jahr 1916 (1899–1933) abfallen und dann auf einen Korrelationskoeffizient von  $> 0,7$  ansteigen. Für die dargestellten Buchengruppen (G3, G6) zeigt sich ein leicht modifiziertes Bild.

Die Korrelationskoeffizienten haben zu Beginn der Zeitreihe eine leicht abnehmende Tendenz, fallen synchron zu den Eichen im Jahre 1916 von einem Korrelationskoeffizient  $> 0,6$  ab, pendeln im Zeitraum 1916 bis 1931 um einen Korrelationskoeffizienten von 0,5

## 6. WETTERLAGENSIGNALE IN VERSCHIEDENEN JAHRESZEITLICHEN PERIODEN UND DIE ZEITLICHE STABILITÄT DER STATISTISCHEN ZUSAMMENHÄNGE

---

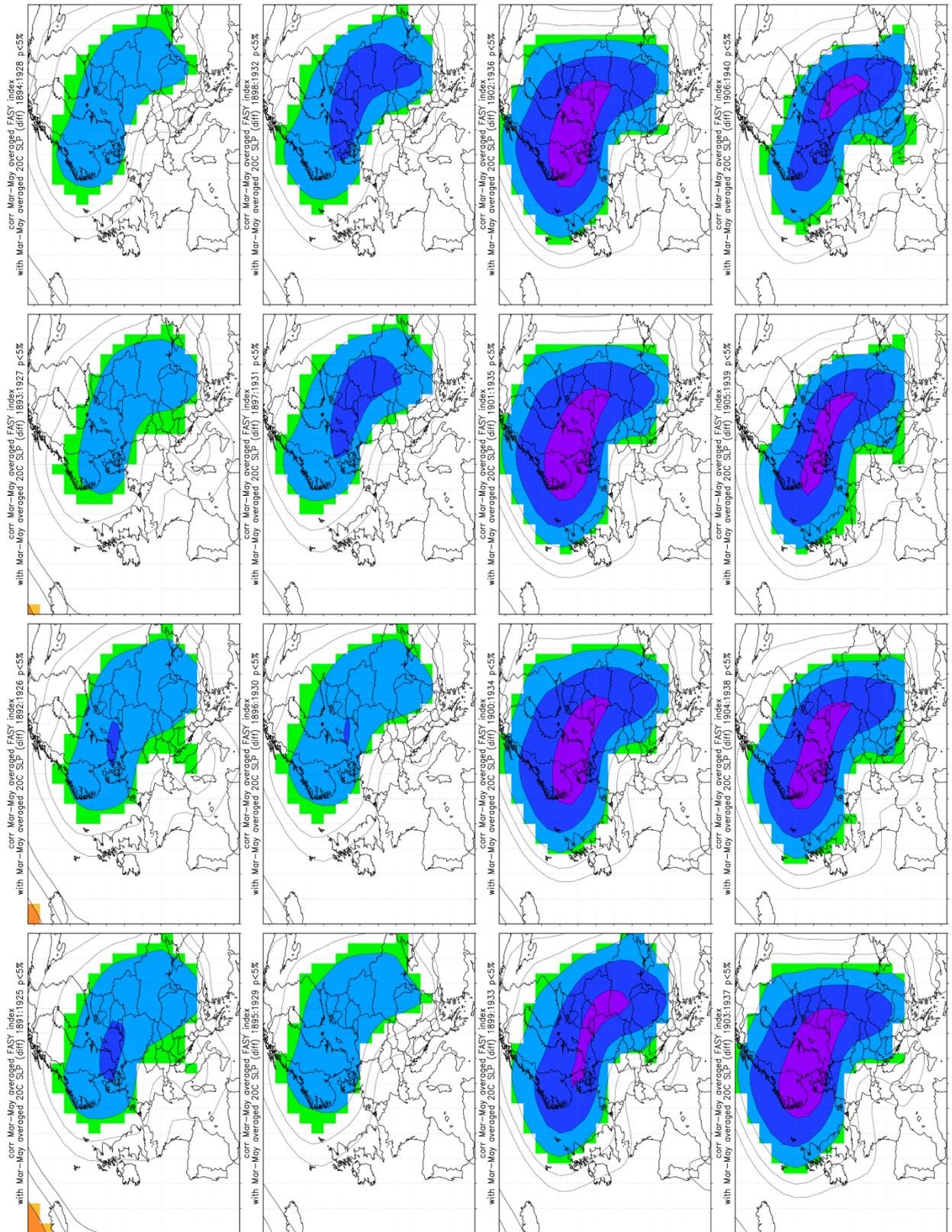
und steigen dann wieder an. Im Allgemeinen ist festzustellen, dass die Schwankungen der Eichengruppen viel größer sind als die der Buchengruppen. Die synchrone Abnahme des Zusammenhangs zwischen ACTI und Gruppenchronologien sowohl für die Eichen- als auch für die Buchengruppen deutet auf eine gemeinsame Ursache hin. Der von verschiedenen Autoren postulierte frühere Start der Vegetationsperiode wäre eine mögliche Ursache (vgl. hierzu weiterführend: Vitasse et al., 2011; Koerner, C. und Basler, 2010; Cleland et al., 2007; Menzel et al., 2006). Hingegen ist die Wahl der Kalibrierungsjahre aus dem gemeinsamen Zeitfenster (1901–1990 vgl. Kap. 3.3.2 a) als Ursache auszuschließen, da sowohl bei Verwendung des gesamten Zeitfensters (1891–1990) als auch bei Erhöhung der Kalibrierungsjahre von 60 auf 80 weiterhin der Einbruch des Zusammenhangs nachweisbar bleibt. Andererseits können auch Inhomogenitäten im Katalog der Großwetterlagen ursächlich sein (vgl. Kap. 2.2).

Ziel dieses Kapitels ist es nicht, die Ursachen für diese Instabilität zu finden. An dieser Stelle wäre es erforderlich, zur weiteren Verifizierung der Instabilitäten eine weitere Wetterlagen-Klassifikation heranzuziehen, die es ermöglicht, den Großwetterlagendatensatz als Ursache definitiv auszuschließen. Grundsätzlich lässt sich aber feststellen, dass nur für das Frühjahr synchrone Schwankungen in der Stärke der Zusammenhänge in allen Gruppen zu beobachten sind.

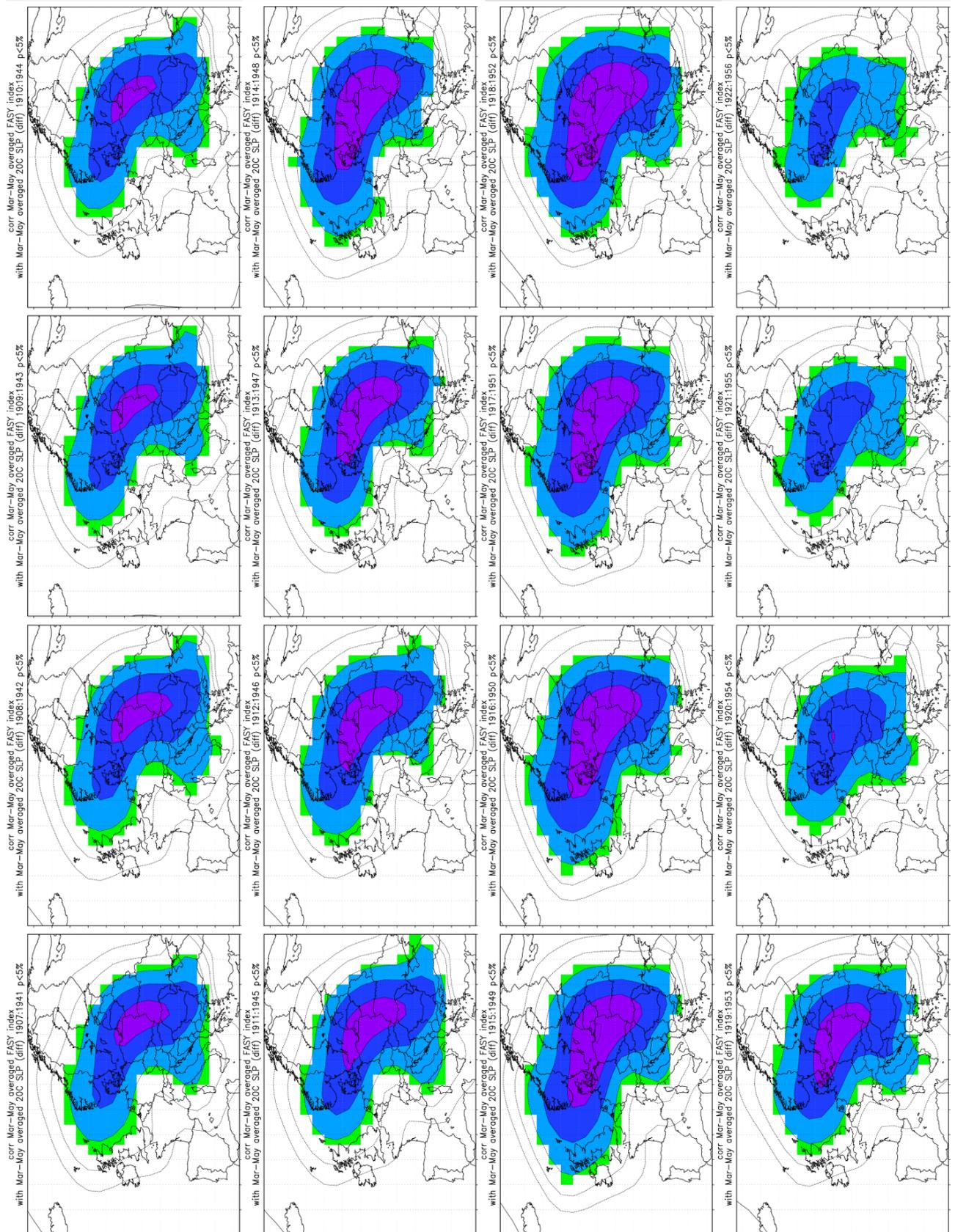
Neben der Analyse der Stabilität zwischen Gruppenchronologie und ACTI kann auch die zeitliche Stabilität zwischen ACTI und verschiedenen Klimaelementen untersucht werden. Dies wird in Abbildung 6.4 exemplarisch für den Bodenluftdruck und den Buchengruppen G3 und G6 gezeigt. Aufgrund der hohen Ähnlichkeit der ACTI-Zeitreihen der beiden Buchengruppen sowie des ähnlichen Kurvenverlaufs in Abbildung 6.3 wurden die beiden Buchengruppen zusammengelegt und für die als FASY bezeichnete Gruppe ein ACTI gebildet.

In Abbildung 6.4 wurden zwischen FASY und gegitterten Luftdruckdaten (Bodenluftdruck Twentieth Century Reanalysis, vgl. Kap. 2.3) unter Zuhilfenahme des „Climate Explorer“ (van Oldenborgh et al., 2009) in einem gleitenden Fenster (gleiche Fensterlänge und gleicher Zeitraum wie Abb. 6.3, 35-jähriges gleitendes Fenster, Zeitraum 1891–1990) Korrelationen errechnet und die Korrelationskoeffizienten kartographisch dargestellt.

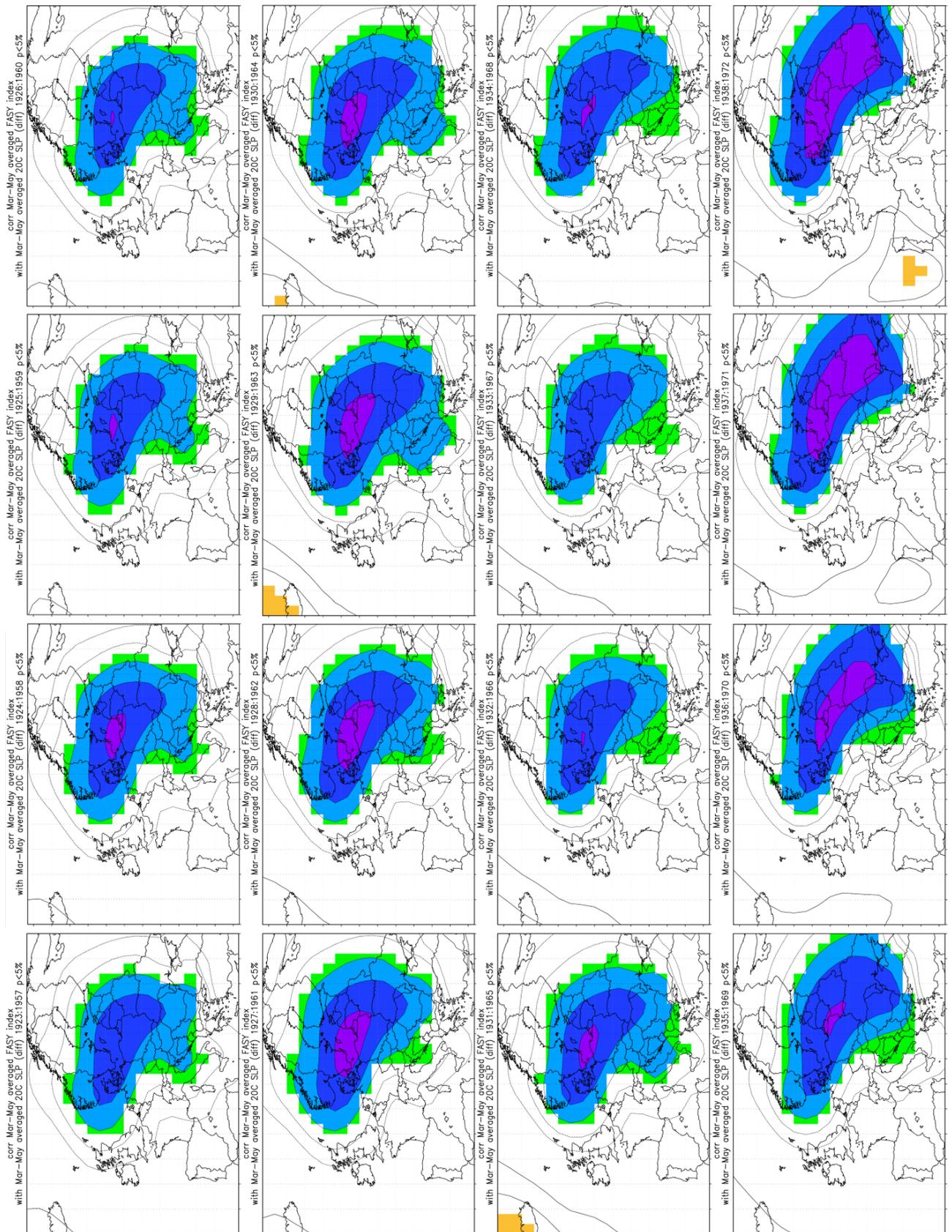
## 6. WETTERLAGENSIGNALE IN VERSCHIEDENEN JAHRESZEITLICHEN PERIODEN UND DIE ZEITLICHE STABILITÄT DER STATISTISCHEN ZUSAMMENHÄNGE



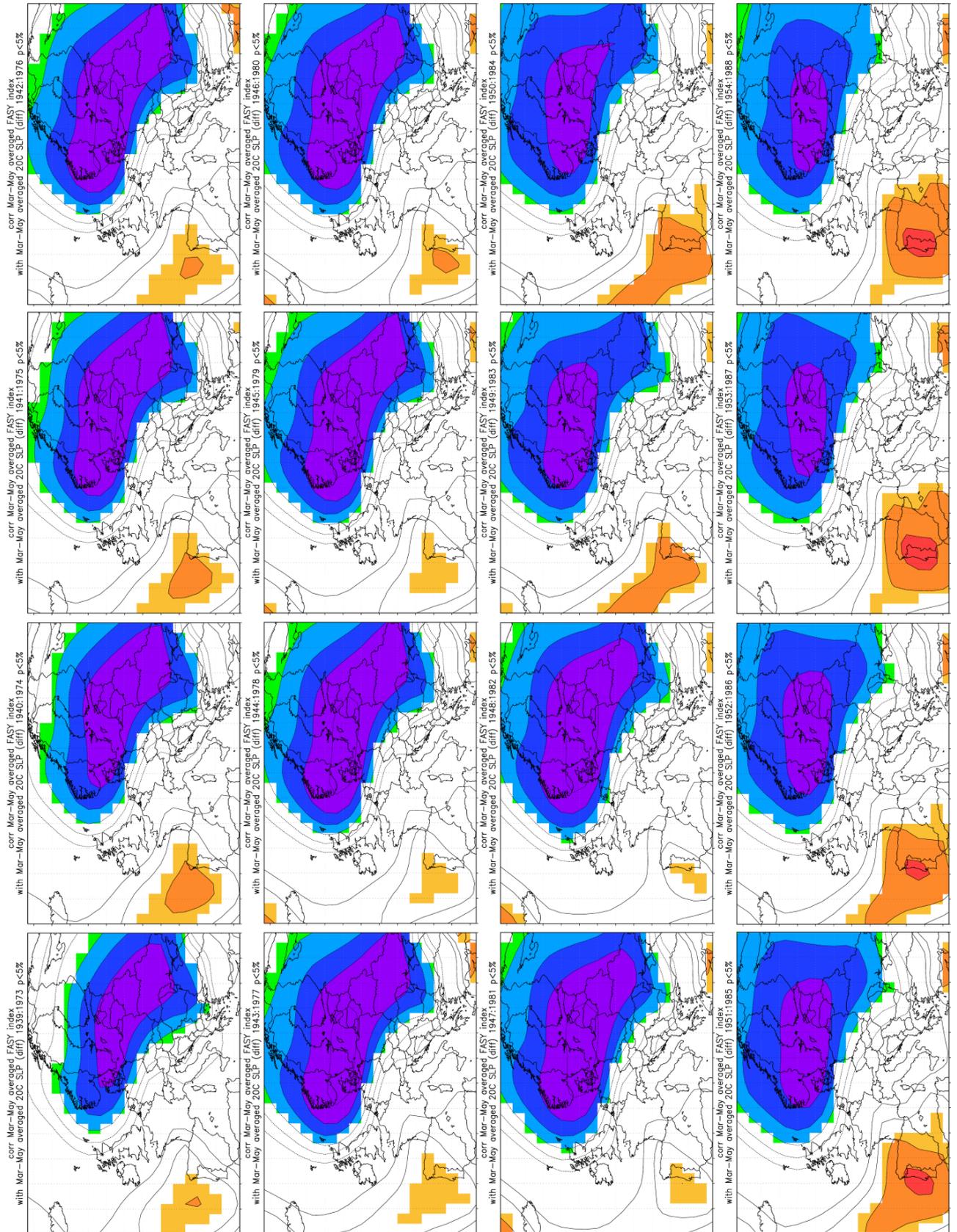
## 6. WETTERLAGENSIGNALE IN VERSCHIEDENEN JAHRESZEITLICHEN PERIODEN UND DIE ZEITLICHE STABILITÄT DER STATISTISCHEN ZUSAMMENHÄNGE



## 6. WETTERLAGENSIGNALE IN VERSCHIEDENEN JAHRESZEITLICHEN PERIODEN UND DIE ZEITLICHE STABILITÄT DER STATISTISCHEN ZUSAMMENHÄNGE



## 6. WETTERLAGENSIGNALE IN VERSCHIEDENEN JAHRESZEITLICHEN PERIODEN UND DIE ZEITLICHE STABILITÄT DER STATISTISCHEN ZUSAMMENHÄNGE



## 6. WETTERLAGENSIGNALE IN VERSCHIEDENEN JAHRESZEITLICHEN PERIODEN UND DIE ZEITLICHE STABILITÄT DER STATISTISCHEN ZUSAMMENHÄNGE

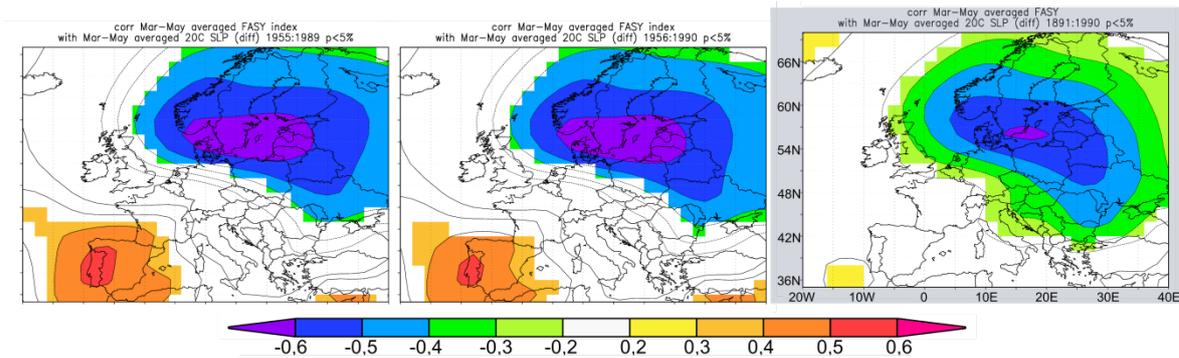


Abbildung 6.4: Korrelationsmuster, berechnet zwischen dem ACTI für die FASY Gruppe und Bodenluftdruck (Twentieth Century Reanalysis) für ein 35-jähriges gleitendes Fenster im Zeitraum 1891–1990. Die grau unterlegte Karte stellt das Muster für den Zeitraum (1891–1990) dar. Die Korrelationskoeffizienten sind farbig dargestellt. Für die weiß markierten Gebiete wurden keine signifikanten Zusammenhänge gefunden ( $\alpha = 0,05$ ).

Das in den 66 Karten dargestellte Korrelationsmuster zeigt negative Zusammenhänge zwischen Bodenluftdruck und ACTI der FASY Gruppe für das Gebiet Skandinavien-Ostsee-Osteuropa. Die auftretenden Muster, dargestellt in den Karten, variieren sowohl in Bezug auf die Stärke der Zusammenhänge als auch in Bezug auf die räumliche Ausdehnung bzw. die Lage der Muster. So sind z. B. die Zusammenhänge zu Beginn der Untersuchungsperiode schwächer ausgeprägt. Ferner treten am Ende der Untersuchungsperiode positive Zusammenhänge mit dem Bodenluftdruck im Bereich Portugal / Spanien auf, die in den Zeitfenstern zuvor nicht nachweisbar waren. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Muster sehr ähnlich sind und auch –wie die in Abbildung 6.3 dargestellten Zeitreihen für die beiden Buchengruppen (G3, G6) –in allen 66 Zeitfenstern signifikante Zusammenhänge auftreten.

Neben dieser Untersuchung der zeitlichen Stabilität der Zusammenhänge zwischen ACTI und Klimadaten können analog auch die Zusammenhänge zwischen Gruppenchronologie und Klimadaten untersucht werden. Diese kombinierte, in Kapitel 1.2 als Kreuzvergleiche benannte Vorgehensweise ermöglicht es, das Verständnis von Klima / Wachstums-Beziehungen zu verbessern und liefert wichtige Erkenntnisse über die möglichen Ursachen von instabilen Klima / Wachstums-Beziehungen bzw. Schwankungen in der Stärke des Zusammenhangs. Allgemein lässt sich für die Untersuchung zeitlicher Instabilitäten festhalten, dass zur Gewährleistung eines umfassenden Bildes sowohl die ACTI-Zeitreihen als auch die zugeordneten Gruppenchronologien mit verschiedenen Klimaelementen in unterschiedlichen Druckniveaus (z. B. 500 hPa-Niveau oder 850 hPa-Niveau) im Hinblick auf die zeitliche Stabilität der Zusammenhänge untersucht werden sollten.

### 7. Diskussion und Schlussfolgerung

Die vorgestellte Prozedur sowie die Ergebnisse aus den Kapitel 4, 5 und 6 zeigen, dass der Wetterlagenansatz substanziell das Verständnis von Klima / Wachstums-Beziehungen verbessern kann. Insbesondere die hoch signifikanten Zusammenhänge zwischen den ACTI-Zeitreihen und verschiedenen Klimaelementen, die statistischen Zusammenhänge zwischen den ACTI-Zeitreihen und Gruppenchronologien sowie die Ähnlichkeit der Korrelationsmuster mit Klimaelementen (vgl. Abb. 5.1) zeigen, dass das neue Verfahren es ermöglicht, das in Jahrringchronologien gespeicherte Klimasignal im hochfrequenten als auch im niederfrequenten Bereich zu erfassen. Die gefundenen Zusammenhänge liegen selbst für Standorte mit komplexen Klima / Wachstums-Beziehungen, auf einem Niveau, welches auch für eine Klimarekonstruktion bei Weitem ausreichend ist. Die in Kapitel 1.2 angestellten theoretischen Überlegungen in Bezug auf die Vorteile des neuen Verfahrens konnten somit bestätigt werden. Daraus ergibt sich, dass die erste in Kapitel 1.2 vorgestellte Fragestellung positiv zu beantworten: Die Prozedur ist in der Lage, das Verständnis von Klima / Wachstums-Beziehungen zu verbessern.

In Bezug auf die Frage, ob Standorte nach ähnlicher Wetterlagenreaktion gruppiert werden können (Fragestellung 2 Kap. 1.2), zeigen die Ergebnisse ein komplexeres Bild. Grundsätzlich ist festzustellen, dass das Gruppierungsverfahren in der Lage ist, Standortchronologien mit ähnlicher Wetterlagenreaktion zu selektieren und in einer Gruppe zusammenzufassen. Allerdings neigt das Gruppierungsverfahren dazu, viele Gruppen mit sehr ähnlichen Wetterlagenreaktionen bzw. Wetterlagengewichten auszuweisen. Für die Analyse hoch aufgelöster räumlicher Wuchsmuster ist solch eine starke Differenzierung sinnvoll. Die in Kapitel 4.1 dargestellten Ergebnisse zeigen, dass sich die standortspezifischen Eigenschaften wie Baumart, räumliche Lage der Standorte und Höhenlage auf die Gruppierung auswirken (Fragestellung 3 Kap. 1.2). Obwohl diese Metadaten für die Gruppierung nicht herangezogen werden, lassen sich die Gruppen durch diese Eigenschaften voneinander abgrenzen. Dass diese Eigenschaften, insbesondere die Baumart, sich auf die Wetterlagenreaktion der Bäume auswirken, ist zu erwarten, so dass die Ergebnisse der Gruppierung vor diesem Hintergrund als plausibel zu erachten sind.

Sollen jedoch großräumige atmosphärische Signale in Jahrringchronologien untersucht werden, ist eine feine Differenzierung eher störend. Der Schwellenwert  $t_p$  ermöglicht jedoch eine fragestellungsspezifische Anpassung des Gruppierungsverfahrens (vgl. Kapitel 3.3.3). Je größer der Schwellenwert  $t_p$  ist, desto kleiner ist die Anzahl der Gruppen, und um so mehr Standorte mit signifikanten Wetterlagenreaktionen treten auf (vgl. Kapitel 4.1). Ferner ist es relativ einfach, Gruppen mit sehr ähnlichen Wetterlagenreaktionen im Nachhinein zusammenzulegen. Sowohl die Ergebnisse für den gACTI (vgl. Kapitel 5.1 und 5.2) als auch die Ergebnisse der FASY Gruppe (Kap. 6) zeigen dies durch den Erhalt der starken statistischen Zusammenhänge sowohl zwischen Gruppenchronologie und ACTI als auch zwischen ACTI und Klimaelementen. Das Gruppierungsverfahren birgt auch den

Vorteil, dass die Standortchronologien nach ähnlicher Wetterlagenreaktion gruppiert werden (Kap. 3.3.3) und nicht nach ähnlichen Wachstumsmustern (vgl. hierzu Kap. 1.2 c). Insbesondere für Jahrringchronologien, die im Allgemeinen als „noisy proxies“ angesehen werden (Ammann et al., 2010), ist dieser neue Gruppierungsansatz hilfreich, um gemeinsame Signale zu stabilisieren. Da die Gruppierung nicht auf ähnlichen Wachstumsmustern, sondern auf ähnlicher Wetterlagenreaktion beruht, können auch verschiedene Proxy-Zeitreihen oder Jahrringparameter, die unterschiedliche Wetterlagensensitivität bzw. Signalstärke aufweisen, in einer Simulation verwendet werden. Aufgrund der hohen zeitlichen Auflösung von Wetterlagendaten können auch hoch aufgelöste Jahrringparameter wie z. B. stabile Isotope (vgl. Pons und Helle, 2011) oder holzanatomische Zeitreihen (vgl. Fonti et al., 2010) verwendet werden.

Für den Vergleich von 2 oder mehreren Wetterlagen-Klassifikationen ist es sinnvoll, dass die Gruppenzusammensetzung konstant bleibt. Dies kann auf der einen Seite gewährleistet werden, indem eine bestehende Gruppenbildung, basierend auf der Wetterlagen-Klassifikation  $x$  für die Wetterlagen-Klassifikation  $y$ , übernommen wird oder die Standortchronologien können auch nach ähnlichen Wachstumsmustern gruppiert werden. Somit ist eine flexible Anpassung der Prozedur in dieser Hinsicht möglich.

In Bezug auf die Wetterlagensensitivität (Fragestellung 4, Kap. 1.2) konnten keine Unterschiede zwischen Standorten mit komplexen Klima / Wachstums-Beziehungen und Standorten, an denen ein Klimaelement der dominierende wachstumslimitierende Faktor ist, festgestellt werden. Dies wird bestätigt durch die dicht beieinanderliegenden Korrelationskoeffizienten (0,54 bis 0,64 vgl. hierzu Abb. 4.2) zwischen den 14 ACTI-Zeitreihen und den korrespondierenden Gruppenchronologien. Ähnliches gilt für die Korrelationskoeffizienten, dargestellt in Abbildung 4.5, die einen Bereich zwischen 0,57 und 0,69 abdecken. Es wurden sowohl Standorte aus dem Flachland, die sich im Regelfall durch komplexe Klima / Wachstums-Beziehungen auszeichnen, als auch Standorte aus dem Hochgebirge, bei denen zumeist ein Klimaelement der wachstumslimitierende Faktor ist, verwendet. Da für die verschiedenen Gruppen die Stärke der statistischen Zusammenhänge zwischen ACTI und Gruppenchronologien sowie zwischen Gruppenchronologien und Klimaelementen ähnlich stark ausgeprägt sind, ergeben sich in Bezug auf die Wetterlagensensitivität von Standorten aus dem Hochgebirge und dem Flachland keine Unterschiede. Für die Klimarekonstruktionen werden oft Standorte selektiert, an denen das zu rekonstruierende Klimaelement der dominierende wachstumslimitierende Faktor ist. Somit werden für die meisten Klimarekonstruktionen ökologische Grenzstandorte verwendet. So werden für Temperaturrekonstruktionen (Büntgen et al., 2006; Corona et al., 2010; Lindholm et al., 2009; Popa und Kern, 2009; Wang et al., 2010) oft Standorte aus den Hochgebirgen an der oberen Waldgrenze oder aus den hohen Breiten herangezogen. Für die Rekonstruktion von Trockenheit bzw. Niederschlag (Büntgen et al., 2010b; Cook et al., 2010; Davi et al., 2010) werden Standorte

verwendet, an denen die Feuchtigkeit der wachstumslimitierende Faktor ist. Für die meisten Gebiete, insbesondere für temperierte Klimate, ist das in Jahrringchronologien gespeicherte Klimasignal auf verschiedene Klimaelemente und deren Interaktionen zurückzuführen (García-Suárez et al., 2009; Neuwirth et al., 2007a). Treydte et al. (2007) konnten zeigen, dass mit stabilen Isotopen in Jahrringen auch für diese Regionen Aussagen über vergangene Umwelt- bzw. Klimabedingungen möglich sind. Obwohl das Verfahren nur anhand von Jahrringbreitenchronologien vorgestellt worden ist (vgl. Kap. 2.1), ermöglicht es ACTI, sowohl für ökologische Grenzstandorte als auch für Standorte aus temperierten Regionen Klima / Wachstums-Beziehungen bzw. Wetterlagen / Wachstums-Beziehungen zu untersuchen. Die hoch signifikanten Zusammenhänge sowohl zwischen gegitterten Klimadaten und den ACTI-Zeitreihen als auch den Gruppenchronologien und die für den gACTI gefundenen Zusammenhänge zur gemittelten CRU nordhemisphärischen Temperatur, bestätigen diese Aussage (vgl. Kap. 5.2). Esper et al. (2002) konnten für ihr nordhemisphärisches Jahrringnetzwerk ähnlich starke Zusammenhänge zur nordhemisphärischen Temperatur finden.

Betrachtet man jedoch die Sensitivität der einzelnen Gruppen gegenüber einzelnen Wetterlagen bzw. den prozentualen Einfluss einzelner Wetterlagen auf die verschiedenen ACTI-Zeitreihen der einzelnen Gruppen (vgl. hierzu Abb. 4.2 und 6.2), so ergeben sich zwischen den verschiedenen Gruppen gravierende Unterschiede. In Bezug auf einzelne Wetterlagen sind jedoch ähnliche Einflüsse auf die ACTI-Zeitreihen der verschiedenen Gruppen festzustellen. So ist z. B. die Großwetterlage HFA für die meisten Gruppen im Frühjahr negativ gewichtet. Die Größe des Wetterlagengewichtes variiert aber von Gruppe zu Gruppe stark, so dass der prozentuale Einfluss der Großwetterlage HFA auf die ACTI-Zeitreihen der verschiedenen Gruppen zwischen 6,5 % und 16 % schwankt (vgl. Abb. 4.2). Auch Gruppen, die ähnliche standortspezifische Eigenschaften wie z. B. Baumart oder Höhenlage aufweisen, zeichnen sich durch ähnliche Wetterlagenreaktionen in Bezug auf einzelne Großwetterlagen aus (vgl. hierzu Kap. 4.2 und Abb. 4.2.) So sind z. B. für alle Eichengruppen die Großwetterlagen HNA, HFA und SEA für das Frühjahr negativ gewichtet. Auf die Frage, welche Wetterlagen bzw. Wetterlagenkombinationen sich maßgeblich auf das Jahrringwachstum auswirken (Kap. 1.2, Fragestellung 5), ist trotz dieser Ähnlichkeiten eine generalisierende Aussage für alle Gruppen zu pauschal und nicht Erfolg versprechend.

Neben diesen spezifischen Aussagen bzgl. der in Kapitel 1.2 vorgestellten Fragestellungen lassen sich folgende ganz allgemeine Aussagen über die Prozedur treffen:

Die Prozedur ermöglicht es, verschiedene Wetterlagen-Klassifikationen zu verwenden. Für eine Umstellung auf eine andere Klassifikation muss lediglich der Wetterlagendatensatz ausgetauscht werden und die Anzahl der Wetterlagen  $w$  muss entsprechend der verwendeten Klassifikation definiert werden. Für Regionen, für die keine Wetterlagen-Klassifikation vorhanden ist, können aus gegitterten Luftdruckdatensätzen Klassifikationen

erstellt werden. In diesem Zusammenhang sei z. B. der EMULATE-Datensatz (Ansell et al., 2006) oder der NCEP/NCAR-Datensatz (Kalnay et al., 1996) genannt. Die zur Klassifikation benötigte Software wurde im Rahmen des EU-Projekts Cost 733 entwickelt und ist unter (<http://geo23.geo.uni-augsburg.de/cost733class-1.1> Stand 3.1.2013) abrufbar. Die neue Prozedur bietet bei der Untersuchung des Wetterlageneinflusses auf die raumzeitlichen Muster des Jahrringwachstums gegenüber klassischen Verfahren wie z. B. der Methode der kleinsten Quadrate (OLS) mehrere Vorteile. Diese Vorteile lassen sich an den Schwächen der klassischen Verfahren verdeutlichen. Im Endeffekt lassen sich zwei Problemfelder ausmachen, die es erschweren, den Einfluss von Wetterlagen auf das Jahrringwachstum zu untersuchen. Auf der einen Seite werden in vielen dendroklimatologischen Studien eine große Anzahl von Standorten verwendet, so dass das multiple Testen berücksichtigt werden sollte (vgl. Kap. 1.1 und 3.3.2 b.). Andererseits führt für die meisten Wetterlagen-Klassifikationen die große Anzahl von ausgewiesenen Wetterlagen zur Reduzierung der Freiheitsgrade. Die hohe Anzahl der durchgeführten Iterationen (1 Million) sowie die in Abbildung 3.1 aufgeführten 5 Selektionsstufen erlauben eine gute Abschätzung der Wetterlagengewichte und darüber hinaus eine zuverlässige Korrektur des multiplen Testens. Die Anzahl von Simulationsläufen, die für eine gute Abschätzung der Wetterlagengewichte erforderlich ist, lässt sich in diesem Fall nicht exakt berechnen. Die im Rahmen dieser Arbeit vorgestellte Prozedur liefert schon sehr gute Ergebnisse bei 100.000 Läufen. Die benötigte Anzahl der Läufe für eine gute Abschätzung der Wetterlagengewichte wurde empirisch bestimmt. Das verwendete Verfahren zur Korrektur des multiplen Testens ist auch geeignet, wenn die Anzahl der durchgeführten Tests groß ist, da die „Power“ bzw. Teststärke sogar mit der Zunahme der durchgeführten Tests zunimmt.

Ferner berücksichtigt die Prozedur, dass Wetterlagen die Witterungsbedingungen in einem sehr großen Gebiet maßgeblich bestimmen, so dass mehrere Chronologien bzw. Standorte ähnliche Signale aufweisen sollten. Für die Abschätzung der Wetterlagengewichte wurden nur solche Signale bzw.  $WTI_i$  verwendet, die mehreren Chronologien gemein waren (vgl. Kap. 3.3.2 c).

Die Kreuzvalidierung konnte zeigen, dass im Gegensatz zu Regressionsmodellen das Modell nicht zu einer Überanpassung der Daten (overfitting) neigt (Kap. 5.1). Die Potenziale von ACTI in Bezug auf die Untersuchung von Klima / Wachstums-Beziehungen werden auch an den starken Zusammenhängen zu verschiedenen Klimaelementen verdeutlicht. Schon für sich betrachtet ist allein die Analyse des Zusammenhangs zwischen Wetterlagendaten und Klimadaten nicht trivial (Phillipp et al., 2010). Die vorgestellte Prozedur bzw. ACTI ermöglicht es, den noch komplexeren Zusammenhang zwischen großräumigen atmosphärischen Zirkulationsmustern und Jahrringwachstum zu untersuchen und trägt zu einem besseren Verständnis der hinter den Klima / Wachstums-Beziehungen stehenden Prozesse bei.

Schon Friedrichs et al. (2009b) konnten zeigen, dass die statistischen Zusammenhänge zwischen Jahrringchronologien und verschiedenen Klimaelementen zeitlich instabil sein können. Sie konnten nicht nur den Verlust der statistischen Zusammenhänge beobachten, sondern auch die Veränderung der Richtung der Zusammenhänge.

Der im Rahmen dieser Arbeit vorgestellte Ansatz basiert nicht darauf, die Zusammenhänge zu einzelnen Klimaelementen zu untersuchen, sondern über einen auf Wetterlagen basierenden Ansatz das in Jahrringchronologien gespeicherte Klimasignal zu erklären. Instabilitäten, die nur einzelne Klimaelemente betreffen, sollten sich somit nicht so gravierend auf die Zusammenhänge zwischen Gruppenchronologie und ACTI auswirken. Trotzdem konnten für einzelne Gruppen Instabilitäten beobachtet werden. Systematisch über alle Gruppen hinweg fanden sich im Frühjahr jedoch nur zeitliche Instabilitäten bzw. Schwankungen in der Stärke des Zusammenhangs zwischen Gruppenchronologie und ACTI (vgl. Kap. 6.2). Insbesondere bei einigen Eichengruppen sind die Zusammenhänge stellenweise nicht mehr signifikant.

Der Schwerpunkt dieses Kapitels lag nicht darauf, die Instabilitäten zu verifizieren und deren Ursachen zu untersuchen, sondern die Potenziale aufzuzeigen, die das neue Verfahren bietet, die Ursachen von Instabilitäten in Klima / Wachstums-Beziehungen durch Verwendung von Kreuzvergleichen aufzudecken.

Insbesondere für verlässliche Aussagen über vergangene Klimabedingungen ist die Detektion von Instabilitäten und die Erforschung der zugrunde liegenden Prozesse unerlässlich. Die vorgestellte Prozedur legt die Grundlage für Wetterlagenrekonstruktionen basierend auf verschiedenen Jahrringparametern und Proxydaten. Neben der Rekonstruktion von atmosphärischen Zirkulationsmustern bzw. Wetterlagen können mit dem Verfahren auch einzelne Klimaelemente rekonstruiert werden. Vor diesem Hintergrund ist die Analyse von zeitlichen Instabilitäten unerlässlich. Es ist auch nicht auszuschließen, dass die Instabilitäten ursächlich auf Inhomogenitäten im Katalog der Großwetterlagen zurückzuführen sind (vgl. hierzu Kap. 2.1). Unter Berücksichtigung dieses Aspekts und der Tatsache, dass im Allgemeinen auch beim „downscalen“ mit Wetterlagen (Werner und Gerstengarbe 2011) Fehler auftreten können, wäre es sinnvoll, verschiedene Wetterlagen-Klassifikationen zu testen. In diesem Zusammenhang sind auch Veränderungen, die innerhalb einer Wetterlage in Bezug auf die Witterungsbedingungen auftreten können, als Fehlerquelle zu nennen (Küttel 2011). Darüber hinaus ist ein großes Netzwerk, welches verschiedene Jahrringparameter umfasst und eine gute räumliche Abdeckung aufweist, für eine Rekonstruktion erstrebenswert. Der erste Schritt für eine Wetterlagenrekonstruktion würde darauf basieren, mit den herkömmlichen Methoden der Dendrochronologie (Zhang et al., 2004) für jede Gruppe ACTI-Zeitreihen zu rekonstruieren.

Die rekonstruierten ACTI-Zeitreihen, die Wetterlagengewichte für jede Gruppe und die Unterschiede zwischen den Gruppen bezüglich ihrer Wetterlagenreaktion können

## 7. DISKUSSION UND SCHLUSSFOLGERUNG

---

verwendet werden, um auf die Wetterlagenhäufigkeiten zu schließen. Im Gegensatz dazu können Gruppen, die sehr ähnliche Wetterlagenreaktionen aufweisen, dazu verwendet werden, Instabilitäten in den Klima / Wachstums-Beziehungen sogar außerhalb des Kalibrierungszeitfensters zu detektieren. Je mehr Gruppen bzw. ACTI-Zeitreihen vorliegen, desto exakter wird die Rekonstruktion der Wetterlagenhäufigkeiten. Neben der Rekonstruktion vergangener klimatischer Bedingungen und der Untersuchung des Einflusses dieser Bedingung auf das Jahrringwachstum kann das Verfahren dazu verwendet werden, den Einfluss von zukünftigen klimatischen Bedingungen auf das Jahrringwachstum zu modellieren.

Schon Klaus (1993) und Bartholy et al. (2006) konnten Veränderungen der Wetterlagenhäufigkeiten und der Persistenz bzw. der Andauer nachweisen. Zukünftige Veränderungen können aus den globalen Klimamodellen (GCM General Circulation Model) abgeleitet werden (Cheng et al., 2011; Conway und Jones, 1998; Donat et al., 2010).

Das Wissen über zukünftige Wetterlagenhäufigkeiten und Wetterlagenandauer in Kombination mit der Prozedur kann dazu verwendet werden, wetterlagenbasierte Waldwachstumsmodelle aufzustellen und den Einfluss des Klimawandels auf das Waldwachstum bzw. auf die Waldökosysteme zu untersuchen.

### 8. Ausblick

Der „atmospheric circulation tree-ring index“ (ACTI) ermöglicht es, Fragestellungen, die im weiteren und engeren Sinne im Kontext von Klima / Wachstums-Beziehungen stehen, mit einer wetterlagenbasierten Herangehensweise zu untersuchen. Die Prozedur ist nicht nur dafür geeignet, sowohl im hochfrequenten als auch im niederfrequenten Bereich Wetterlagensignale in Jahrringchronologien bzw. in allen wetterlagensensitiven Proxydaten zu untersuchen, sondern ermöglicht auch viele weitergehende Anwendungen. In diesem Zusammenhang ist die Klimarekonstruktion oder die Untersuchung der den Klima / Wachstums-Beziehungen zugrunde liegenden Prozesse zu nennen. Neben diesen Anwendungen ergeben sich auch Einsatzmöglichkeiten der Prozedur im Bereich der Waldwachstumsmodellierung, der Validierung von verschiedenen Wetterlagen-Klassifikationen sowie von Klimadatensätzen, der Untersuchung von Instabilitäten in den Klima / Wachstums-Beziehungen und der Erstellung von Pseudoproxies.

Zunächst ist es aber in erster Linie sinnvoll, die Prozedur auf einen größeren dendrochronologischen Datensatz, der mehrere Hundert Chronologien und verschiedene Jahrringparameter umfasst, anzuwenden. Zumindest für Europa bestehen bereits solch große Datensätze, die verschiedene Jahrringparameter und Baumarten umfassen. Darüber hinaus liegen noch keine Erkenntnisse vor, welche Wetterlagen-Klassifikationen am geeignetsten sind für die Untersuchung von Klima / Wachstums-Beziehungen und allen nachgeordneten Fragestellungen. Zur Beseitigung dieses Erkenntnisdefizits sollte die Prozedur auf verschiedene Wetterlagen-Klassifikationen angewendet werden. Dies erlaubt auch zu prüfen, inwieweit der Großwetterlagendatensatz ursächlich für die beobachteten Instabilitäten im Frühjahr ist. Einige Indizien deuten als Ursache der Instabilität auf eine Wechselwirkung zwischen der Nordatlantischen Oszillation und der Atlantischen Multidekaden-Oszillation hin. Weitere Analysen sind jedoch für die Verifizierung dieses Zusammenhangs notwendig.

### 9. Zusammenfassung

Das Baumwachstum bzw. das Jahrringwachstum wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst, so dass eine Abschätzung des Einflusses eines einzelnen Faktors wie z. B. des Klimas auf das Wachstum erschwert ist. Neben vielen anderen Teildisziplinen der Dendrochronologie befasst sich die Dendroklimatologie damit, das in Jahrringchronologien gespeicherte Klimasignal zu untersuchen. Das Klimasignal ist seinerseits jedoch wiederum auf den Einfluss einzelner Klimaelemente zurückzuführen. Insbesondere für Standorte unter gemäßigten klimatischen Bedingungen wirken sich zumeist mehrere Klimaelemente auf das Wachstum aus; es liegen daher sogenannte komplexe Klima / Wachstums-Beziehungen vor. Somit werden für Klimarekonstruktionen oft Standorte verwendet, an denen das zu rekonstruierende Klimaelement der dominierende wachstumslimitierende Faktor ist.

Die Arbeit stellt einen neuen, auf Wetterlagen basierenden Ansatz vor, der es ermöglicht, das in Jahrringchronologien gespeicherte Klimasignal umfassender zu erklären. Der Ansatz basiert darauf, nicht den Einfluss einzelner Klimaelemente auf das Wachstum zu untersuchen, sondern den Einfluss von Wetterlagen, die sich ihrerseits auf die lokalklimatischen Bedingungen auswirken. Da der Zusammenhang zwischen nominal skalierten Wetterlagendaten und rational skalierten Jahrringchronologien direkt nur unzureichend analysiert werden kann, wird im Rahmen einer mehrschrittigen Prozedur ein Index, der „sogenannte atmospheric circulation tree-ring index“ (ACTI), abgeleitet. Der ACTI wird immer für eine Gruppe von Standortchronologien mit ähnlichen Wetterlagenreaktionen berechnet. Die Werte der ACTI-Zeitreihen sind definiert als die Summe der gewichteten Wetterlagenhäufigkeiten für die untersuchte jahreszeitliche Periode (z. B. Frühjahr). Die Wetterlagengewichte werden im Rahmen der Prozedur u.a. durch eine Monte Carlo-Simulation hergeleitet.

Die Prozedur kann sowohl auf verschiedene Wetterlagen-Klassifikationen und Jahrringparameter als auch auf alle wetterlagensensitiven Klimaproxies angewendet werden. In dieser Studie wird die Prozedur anhand der Großwetterlagen-Klassifikation nach Hess-Brezowsky (1952) und zwei Jahrringbreitendatensätzen vorgestellt, einem mit heterogenen Wuchseigenschaften mit 115 Standortchronologien und einem homogeneren Datensatz mit 50 Chronologien von Buchen- und Eichenstandorten.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Prozedur in der Lage ist, das Verständnis von Klima / Wachstums-Beziehungen –selbst für Standorte mit komplexen Klima / Wachstum-Beziehungen– substantiell zu verbessern. Dies wird einerseits durch die hochsignifikanten Zusammenhänge zwischen ACTI und Jahrringbreitenchronologien und andererseits zwischen ACTI und verschiedenen Klimaelementen belegt. Andererseits treten Zusammenhänge zu Klimaelementen auf, die bisher mit dem klassischen Ansatz noch nicht nachweisbar waren. Die Analyse der räumlichen Korrelationsmuster mit gegitterten Klimadatensätzen zeigen sowohl für ACTI als auch für die Gruppenchronologien ähnliche

Muster. In Kombination mit der klimatologischen Interpretation der Muster sind die Ergebnisse als plausibel zu erachten. Es konnten für mehrere jahreszeitliche Perioden signifikante Zusammenhänge zwischen Wetterlagen und Jahrringchronologien nachgewiesen werden. Ferner belegen die Ergebnisse der durchgeführten Kreuzvalidierung die Güte des Modells.

Die Prozedur ermöglicht es, die Standortchronologien unmittelbar nach ähnlicher Wetterlagenreaktion zu gruppieren und nicht basierend auf ähnlichen Wachstumsmustern. Gemeinsame Wetterlagensignale in Jahrringchronologien können so besser vom allgemeinen Rauschen separiert werden. Das Gruppierungsverfahren ist hoch flexibel und erlaubt eine fragestellungsspezifische Gruppierung der verwendeten Standortchronologien. Unter Einbindung der für jeden Standort vorhandenen Metadaten und der Gruppierungsergebnisse können standortspezifische Eigenschaften identifiziert werden, die sich maßgeblich auf die Wetterlagenreaktion der Bäume auswirken.

Die Prozedur trägt zu einem besseren Verständnis der für die Klima / Wachstums-Beziehungen relevanten Prozesse bei und erlaubt eine umfassendere Untersuchung der Ursachen von Instabilitäten in den Klima / Wachstums-Beziehungen. Sie legt die Grundlage für eine auf Wetterlagen basierende Analyse aller Fragestellungen, die im Kontext von Klima / Wachstums-Beziehungen zu sehen sind. Die Anwendungen reichen somit von der Klimarekonstruktion –Rekonstruktion von verschiedenen Klimaelementen und / oder Wetterlagenhäufigkeiten–, über die Waldwachstumsmodellierung bis hin zur Validierung von verschiedenen Wetterlagen-Klassifikationen und Klimadatensätzen.

### 10. Literaturverzeichnis

- Ammann, C.M., Genton, M.G. und B. Li (2010): Technical note: correcting for signal attenuation from noisy proxy data in climate reconstructions. *Clim. Past* 6 (2), S. 273–279.
- Ansell, T.J., Jones, P.D., Allan, R.J., Lister, D., Parker, D.E., Brunet, M., Moberg, A., Jacobeit, J., Brohan, P., Rayner, N.A., Aguilar, E., Alexandersson, H., Barriendos, M., Brandsma, T., Cox, N.J., Della-Marta, P.M., Drebs, A., Founda, D., Gerstengarbe, F., Hickey, K., Jonsson, T., Luterbacher, J., Nordli, O., Oesterle, H., Petrakis, M., Philipp, A., Rodwell, M.J., Saladie, O., Sigro, J., Slonosky, V., Srnec, L., Swail, V., Garcia-Suarez, A.M., Tuomenvirta, H., Wang, X., Wanner, H., Werner, P., Wheeler, D. und E. Xoplaki (2006): Daily mean sea level pressure reconstructions for the European-North Atlantic region for the period 1850–2003. *J. Climate* 19 (12), S. 2717–2742.
- Babst, F., Carrer, M., Poulter, B., Urbinati, C.; Neuwirth, B. und D. Frank, (2012): 500 years of regional forest growth variability and links to climatic extreme events in Europe. *Environ. Res. Lett.* 7, S. 1–11.
- Barnard, H. R., Brooks, J. R. und B.J. Bond (2012): Applying the dual-isotope conceptual model to interpret physiological trends under uncontrolled conditions. *Tree Phys.* 32(10), S. 1183–1198.
- Bartholy, J., Pongracz, R. und M. Pattantyus-Abraham (2006): European cyclone track analysis based on ECMWF ERA-40 data sets. *Int. J. Climatol.* 26 (11), S. 1517–1527.
- Baur, F., Hess, P. und H., Nagel (1944): *Kalender der Großwetterlagen Europas 1881–1939*, Bad Homburg.
- Bernhardt, K-H (2012): *Klima im Wandel*. Internet-Zeitschrift des Leibniz-Instituts für interdisziplinäre Studien e.V. S. 1–12 Abrufbar unter [http://www.leibniz-institut.de/archiv/bernhardt\\_01\\_02\\_12.pdf](http://www.leibniz-institut.de/archiv/bernhardt_01_02_12.pdf) (letzter Aufruf 5.1.2013)
- Bräker, O.U. (1981): Der Alterstrend bei Jahrringdichten und Jahrringbreiten von Nadelhölzern und sein Ausgleich. *Mitt. forstl. Bunderversuchsanst. Wien* 142/I, S. 75–102.
- Briffa, K. R. und J.A. Matthews (2002): ADVANCE-10K: a European contribution towards a hemispheric dendroclimatology for the Holocene. *The Holocene* 12(6), S. 639–642.
- Brohan, P., Kennedy, J.J., Harris, I., Tett, S.F.B. und P.D. Jones (2006): Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: a new data set from 1850. *J. Geophys. Res.* 111, D12106, S. 1–21.

## 10. LITERATURVERZEICHNIS

---

- Büntgen, U., Tegel, W., Nicolussi, K., McCormick, M., Frank, D., Trouet, V., Kaplan, J. O., Herzig, F., Heussner, K.-U., Wanner, H., Luterbacher, J. und J. Esper (2011): 2500 Years of European Climate Variability and Human Susceptibility. *Science* 331(6017), S. 578–582.
- Büntgen, U., Brazdil, R., Frank, D. und J. Esper (2010a): Three centuries of Slovakian drought dynamics. *Clim. Dynam.* 35 (2-3), S. 315–329.
- Büntgen, U., Trouet, V., Frank, D., Leuschner, H.H., Friedrichs, D., Luterbacher, J. und J. Esper (2010b): Tree-ring indicators of German summer drought over the last millennium. *Quaternary Sci. Rev.* 29 (7-8), S. 1005–1016.
- Büntgen, U., Frank, D.C., Nievergelt, D. und J. Esper (2006): Summer temperature variations in the European Alps, AD 755-2004. *J. Climate* 19 (21), S. 5606–5623.
- Cahynová, M. und R. Huth (2009): Enhanced lifetime of atmospheric circulation types over Europe: fact or fiction? *Tellus A* 61 (3), S. 407–416.
- Carvajal-Rodríguez, A., de Uña-Alvarez, J. und E. Rolán-Alvarez (2009): A new multitest correction (SGoF) that increases its statistical power when increasing the number of tests. *BMC Bioinformatics* 10 (1), 209, S. 1–14.
- Chen, F., Yuan, Y., Wei, W., Wang, L., Yu, S., Zhang, R., Fan, Z., Shang, H., Zhang, T. und Y. Li (2012): Tree ring density-based summer temperature reconstruction for Zajsan Lake area, East Kazakhstan. *Int. J. Climatol.* 32 (7), S. 1089–1097.
- Cheng, C.S., Li, G., Li, Q. und H. Auld (2011): A synoptic weather-typing approach to project future daily rainfall and extremes at local scale in Ontario, Canada. *J. Climate* 24 (14), S. 3667–3685.
- Cleland, E. E., Chuine, I., Menzel, A., Mooney, H. A. und M. D. Schwartz (2007): Shifting plant phenology in response to global change. *Trends Ecol. Evol.* 22 (7), S. 357–365.
- Compo, G.P., Whitaker, J.S., Sardeshmukh, P.D., Matsui, N., Allan, R.J., Yin, X., Gleason, B.E., Vose, R.S., Rutledge, G., Bessemoulin, P., Brönnimann, S., Brunet, M., Crouthamel, R.I., Grant, A.N., Groisman, P.Y., Jones, P.D., Kruk, M., Kruger, A.C., Marshall, G.J., Maugeri, M., Mok, H.Y., Nordli, Ø, Ross, T.F., Trigo, R.M., Wang, X.L., Woodruff, S.D., und S.J. Worley (2011): The Twentieth Century Reanalysis Project. *Quarterly J. Roy. Meteorol. Soc.*, 137, S. 1–28.
- Conway, D. und P.D. Jones (1998): The use of weather types and air flow indices for GCM downscaling. *J. Hydrol.* 212–213, S. 348–361.
- Cony, M., Hernández, E. und T. Del Teso (2008): Influence of synoptic scale in the generation of extremely cold days in Europe. *Atmósfera* 21 (4), S. 389–401.

## 10. LITERATURVERZEICHNIS

---

- Cook, E.R., Anchukaitis, K.J., Buckley, B.M., D'Arrigo, R.D., Jacoby, G.C. und W.E. Wright (2010): Asian monsoon failure and megadrought during the last millennium. *Science* 328 (5977), S. 486–489.
- Cook, E.R., Briffa, K.R., Shiyatov, S. und V. Mazepa (1992): Tree-ring standardization and growth-trend estimation. In: Cook, E.R., Kairiukstis, L.A. (Eds.), *Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences*. (Kluwer Academic Publishers), London, S. 104–132.
- Cook, E.R. (1985): A time series analysis approach to tree ring standardization. Dissertation. University of Arizona, S. 1–183.
- Cook, E. R. und K. Peters (1981): The smoothing spline: a new approach to standardizing forest interior tree-ring width series for dendroclimatic studies. *Tree-ring Bull.* 41, S. 45–53.
- Corona, C., Guiot, J., Edouard, J.L., Chalief, F., Büntgen, U., Nola, P. und C. Urbinati (2010): Millennium-long summer temperature variations in the European Alps as reconstructed from tree rings. *Clim. Past* 6 (3), S. 379–400.
- Croux, C. und C. Dehon (2010): Influence functions of the Spearman and Kendall correlation measures. *Stat. Methods Appl.* 19 (4), S. 497–515.
- Crueger, T., Zinke, J. und M. Pfeiffer (2009): Patterns of Pacific decadal variability recorded by Indian Ocean corals. *Int. J. Earth Sci.* 98 (1), S. 41–52.
- Davi, N., Jacoby, G., Fang, K., Li, J., D'Arrigo, R., Baatarbileg, N. und D. Robinson (2010): Reconstructing drought variability for Mongolia based on a large-scale tree ring network: 1520–1993, *J. Geophys. Res. Atmos.* 115, D22103, S. 1–9.
- Della-Marta, P.M., Luterbacher, J., von Weissenfluh, H., Xoplaki, E., Brunet, M. und H. Wanner (2007): Summer heat waves over western Europe 1880–2003, their relationship to large-scale forcings and predictability. *Clim. Dynam.* 29 (2), S. 251–275.
- Dittmar, C., Fricke, W. und W. Elling, (2006): Impact of late frost events on radial growth of common beech (*Fagus sylvatica* L.) in Southern Germany. *Eur. J. For. Res.* 125(3), S. 249–259.
- Donat, M.G., Leckebusch, G.C., Pinto, J.G. und U. Ulbrich (2010): European storminess and associated circulation weather types: future changes deduced from a multimodel ensemble of GCM simulations. *Climate Res.* 42 (1), S. 27–43.
- Esper, J., Frank, D. C., Timonen, M., Zorita, E., Wilson, R. J. S., Luterbacher, J., Holzhammer, S., Fischer, N., Wagner, S., Nievergelt, D., Verstege, A. und U. Büntgen (2012): Orbital forcing of tree-ring data. *Nature Clim. Change* 2 (12), S. 862–866.

## 10. LITERATURVERZEICHNIS

---

- Esper, J., Cook, E.R. und F.H. Schweingruber, (2002): Low-frequency signals in long tree-ring chronologies for reconstructing past temperature variability. *Science* 295 (5563), S. 2250–2253.
- Farcomeni, A. (2008): A review of modern multiple hypothesis testing, with particular attention to the false discovery proportion. *Stat. Methods Med. Res.* 17 (4), S. 347–388.
- Fischer S., und B. Neuwirth (2013): Vulnerability of trees to climate events in temperate forests of West Germany. *ISRN Forestry* (in press).
- Fischer S., und B. Neuwirth (2012): Klimasensitivität der Douglasie in Eifel und Kellerwald. *Allg. Forst- u. J.-Ztg.*, 183. Jg., 1/2, S 23–33.
- Fleig, A.K., Tallaksen, L.M., Hisdal, H., Stahl, K. und D.M. Hannah (2010): Inter-comparison of weather and circulation type classifications for hydrological drought development. *Phys. Chem. Earth*, 35 (9–12), S. 507–515.
- Fonti, P., von Arx, G., García-González, I., Eilmann, B., Sass-Klaassen, U., Gärtner, H. und D. Eckstein (2010): Studying global change through investigation of the plastic responses of xylem anatomy in tree rings. *New Phytol.* 185 (1), S. 42–53.
- Friedrichs, D.A., Neuwirth, B., Winiger, M. und J. Löffler (2009a): Methodologically induced differences in oak site classifications in a homogeneous tree-ring network. *Dendrochronologia* 27 (1), S. 21–30.
- Friedrichs, D.A., Büntgen, U., Frank, D.C., Esper, J., Neuwirth, B. und J. Löffler (2009b): Complex climate controls on 20th century oak growth in Central-West Germany. *Tree Physiol.* 29 (1), S. 39–51.
- Friedrichs D, Trouet, V., Büntgen, U., Frank, D.C., Esper, J., Neuwirth, B. und J. Löffler (2009c): Twentieth century climate sensitivity of Central European tree species. *Trees* 23, S. 729–739.
- Fritts, H.C. (1976): *Tree Rings and Climate*. Academic Press, London, 567 S..
- Gagen, M., Mc Carroll, D., Loader, N., und I. Robertson (2011): Stable Isotopes in Dendroclimatology: Moving Beyond Potential In: Hughes, M.K., Swetnam, T.W., Diaz, F.D. (Hrsg.): *Dendroclimatology Progress and Prospects. Developments in Paleoenvironmental Research*, Vol. 11, (Springer), Heidelberg, London, New York, S. 147–172.
- García-Suárez, A.M., Butler, C.J., M.G. Baillie (2009): Climate signal in tree-ring chronologies in a temperate climate: a multi-species approach. *Dendrochronologia* 27 (3), S. 183–198.

## 10. LITERATURVERZEICHNIS

---

- Gerstengarbe, F.-W.H. und P.C. Werner (2005): Katalog der Großwetterlagen Europas (1881–2004) nach Paul Hess und Helmut Brezowsky, PIK Report 123, 6. Auflage, Potsdam 146 S..
- Girs, A.A. und K.V. Kondratovich (1978): Methods of Long Term Weather Forecasts. Gidrometeoizdat, Leningrad (in russischer Sprache).
- Glaser, R. (2008): Klimageschichte Mitteleuropas: 1200 Jahre Wetter, Klima, Katastrophen. (Primus-Verlag), 2. Auflage, Darmstadt, 272 S..
- Gray, S.T., Graumlich, L.J., Betancourt, J.L. und G.T. Pederson (2004): A tree-ring based reconstruction of the Atlantic Multidecadal Oscillation since 1567 AD. *Geophys. Res. Lett.* 31 (12), S. 1–4.
- Hafner, P., Robertson, I., McCarroll, D., Loader, N. J., Gagen, M., Bale, R. J., Jungner, H., Sonninen, E., Hiltunen, E. und T. Levanic, (2011): Climate signals in the ring widths and stable carbon, hydrogen and oxygen isotopic composition of *Larix decidua* growing at the forest limit in the southeastern European Alps *Trees* 25(6), S. 1141–1154.
- Halley, J. D. und D.A. Winkler (2008): Classification of emergence and its relation to self-organization. *Complexity* 13 (5), S. 10–15.
- Haylock, M.R., Hofstra, N., Tank, A.M., Klok, E.J., Jones, P.D. und M. New (2008): A European daily high-resolution gridded data set of surface temperature and precipitation for 1950–2006. *J. Geophys. Res. Atmos.* 113 (D20), S. 1–12.
- Hess, P. und H. Brezowsky (1952): Katalog der Grosswetterlagen Europas. *Berichte des Deutschen Wetterdienstes in der US-Zone*, 33.
- Holmes, R.L. (1983): Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurements. *Tree-ring Bull.* 43, S. 69–78.
- Hurrell, J.W., Kushnir, Y., Ottersen, G., und M. Visbeck (Hrsg.) (2003): *The North Atlantic Oscillation: Climatic Significance and Environmental Impact*, *Geophys. Monogr. Ser.*, 134, AGU, Washington, D. C., 279 S..
- Huth, R. (2008): Classifications of atmospheric circulation patterns. *Ann. N.Y. Acad. Sci.* 1146 (Trends and Directions in Climate Research), S. 105–152.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2007): *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Jacobson, J. (2010): Classifications in climate research. *Phys. Chem. Earth, Parts 35* (9–12), S. 411–421.

## 10. LITERATURVERZEICHNIS

---

- James, P.M. (2007): An objective classification method for Hess and Brezowsky Grosswetterlagen over Europe. *Theor. Appl. Climatol.* 88 (1–2), S. 17–42.
- Jones, P.D., Davies, T.D., Lister, D.H., Slonosky, V., Jonsson, T., Barring, L., Jonsson, P., Maheras, P., Kolyva-Machera, F., Barriendos, M., Martin-Vide, J., Rodriguez, R., Alcoforado, M.J., Wanner, H., Pfister, C., Luterbacher, J., Rickli, R., Schuepbach, E., Kaas, E., Schmith, T., Jacobeit, J. und C. Beck (1999): Monthly mean pressure reconstructions for Europe for the 1780–1995 period. *Int. J. Climatol.* 19 (4), S. 347–364.
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K.C., Ropelewski, C., Wang, J., Leetmaa, A., Reynolds, R., Jenne, R. und D. Joseph (1996): The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 77 (3), S. 437–471.
- Klaus, D. (1993): Zirkulations- und Persistenzänderungen des europäischen Wettergeschehens im Spiegel der Großwetterlagenstatistik. *Erdkunde* 47, S. 85–104.
- Kraus, H. (2008): Grundlagen der Grenzschicht-Meteorologie. Einführung in die Physik der Atmosphärischen Grenzschicht und in die Mikrometeorologie. (Springer), Berlin, Heidelberg, 214 S..
- Koerner, C. und D. Basler (2010): Phenology under Global Warming. *Science* 327(5972), S. 1461–1462.
- Kolodkin, A.N., Boogerd, F.C., Bruggeman, F.J. und H.V. Westerhoff (2011): Modeling Approaches in Systems Biology, Including Silicon Cell Models. In: te Pas, M., Woelders, H. und A. Bannink: *Systems Biology and Livestock Science* (Wiley-Blackwell), S. 31–52.
- Küttel, M., Luterbacher, J. und H. Wanner (2011): Multidecadal changes in winter circulation-climate relationship in Europe: frequency variations, within-type modifications and long-term trends. *Clim. Dynam.* 36 (5), 957–972.
- Küttel, M., Xoplaki, E., Gallego, D., Luterbacher, J., García-Herrera, R., Allan, R., Barriendos, M., Jones, P., Wheeler, D. und H. Wanner (2010): The importance of ship log data: reconstructing North Atlantic, European and Mediterranean sea level pressure fields back to 1750. *Clim. Dynam.* 34 (7), S. 1115–1128.
- Lamb, H.H. (1972): British Isles weather types and a register of the daily sequence of circulation patterns 1861–1971. *Geophys. Mem. Lond.* 116, 85 S..
- Laughlin, R.B. (2006): *A Different Universe: Reinventing Physics from the Bottom Down* (Basic Books), New York, 272 S..

## 10. LITERATURVERZEICHNIS

---

- Lebourgeois, F., Merian, P., Courdier, F., Ladier, J. und P. Dreyfus (2012): Instability of climate signal in tree-ring width in Mediterranean mountains: a multi-species analysis. *Trees* 26 (3): S. 715–729.
- Lebourgeois, F. (2007): Climatic signal in annual growth variation of silver fir (*Abies alba* Mill.) and spruce (*Picea abies* Karst.) from the French Permanent Plot Network (RENECOFOR). *Ann. For. Sci.* 64 (3), S. 333–343.
- Legendre, P., und L. Legendre (2012): *Numerical Ecology, Developments in Environmental Modelling*. 3. Auflage, 24, (Elsevier), Amsterdam, 1006 S..
- Lindholm, M., Jalkanen, R. und H. Salminen (2009): High-frequency reconstruction of mid-summer temperature from annual height increment of Scots pine at the northern timberline since 1846. *Dendrochronologia* 27 (2), S. 113–119.
- Mann, M.E., Zhang, Z.H., Rutherford, S., Bradley, R.S., Hughes, M.K., Shindell, D., Ammann, C., Faluvegi, G. und F.B. Ni (2009): Global signatures and dynamical origins of the little ice age and medieval climate anomaly. *Science* 326 (5957), S. 1256–1260.
- Menzel, A., Sparks, T. H., Estrella, N., Koch, E., Aasa, A., Ahas, R., Alm-Kübler, K., Bissolli, P., Braslavská, O. G., Briede, A., Chmielewski, F. M., Crepinsek, Z., Curnel, Y., Dahl, Å., Defila, C., Donnelly, A., Filella, Y., Jatzak, K., Mage, F., Mestre, A., Nordli, Ø., Penuelas, J., Pirinen, P., Remisová, V., Scheifinger, H., Striz, M., Susnik, A., Van Vliet, A. J. H., Wielgolaski, F.-E., Zach, S. und A.N. Zust (2006): European phenological response to climate change matches the warming pattern. *Glob. Chang. Biol.* 12 (10), S. 1969–1976.
- Mitchell, T.D. und P.D. Jones (2005): An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. *Int. J. Climatol.* 25 (6), S. 693–712.
- Morel, J., Bauer, E., Meleghy, T., Niedenzu, H.-J., Preglau, M. und H. Staubmann (2007): *Soziologische Theorie. Abriß der Ansätze ihrer Hauptvertreter*. 8. Auflage (Oldenbourg Verlag), München, 332 S..
- Neuwirth, B. (2011): Jahrringe als Indikator für Klima und Umweltveränderungen in Mitteleuropa. *Passauer Kontaktstudium Geographie* 11, S. 67–78.
- Neuwirth, B. (2010): *Interannuelle Klima-Wachstums-Beziehungen zentraleuropäischer Bäume von AD 1901 bis 1971*. Bonner Geographische Abhandlungen 125. (E. Ferger Verlag), Bergisch Gladbach, 169 S..
- Neuwirth, B., Schweingruber, F.H. und M. Winiger (2007a): Spatial patterns of central European pointer years from 1901 to 1971. *Dendrochronologia* 24 (2-3), S. 79–89.

## 10. LITERATURVERZEICHNIS

---

- Neuwirth, B., Friedrichs, D.A. und M. Hennen (2007b): 2003 - where is the negative pointer year? A case study for the NW-German low mountain ranges. In: Haneca, K., et al. (Eds.), TRACE –Tree Rings in Archaeology Climatology and Ecology, 5. Jülich, S. 113–120.
- Olson, D. und D. Delen (2008): Advanced Data Mining Techniques. (Springer), Berlin Heidelberg, 180 S..
- Pasho, E., Julio Camarero, J., de Luis, M. und S.M. Vicente-Serrano (2011): Spatial variability in large-scale and regional atmospheric drivers of *Pinus halepensis* growth in eastern Spain. *Agric. Forest Meteorol.* 151 (8), S. 1106–1119.
- Philipp, A., Bartholy, J., Beck, C., Erpicum, M., Esteban, P., Fettweis, X., Huth, R., James, P., Jourdain, S., Kreienkamp, F., Krennert, T., Lykoudis, S., Michalides, S.C., Pianko-Kluczynska, K., Post, P., Álvarez, D.R., Schiemann, R., Spekat, A. und F.S. Tymvios (2010): Cost733cat - a database of weather and circulation type classifications. *Phys. Chem. Earth, Parts 35* (9-12), S. 360–373.
- Philipp, A., Della-Marta, P.M., Jacobeit, J., Fereday, D.R., Jones, P.D., Moberg, A. und H. Wanner (2007): Long-term variability of daily North Atlantic-European pressure patterns since 1850 classified by simulated annealing clustering. *J. Climate* 20 (16), S. 4065–4095.
- Planchon, O., Dubreuil, V., Bernard, V. und S. Blain (2008): Contribution of tree-ring analysis to the study of droughts in northwestern France (XIX-XXth century). *Clim. Past Discuss.* 4 (1), S. 249–270.
- Pons, T.I. und G. Helle (20011): Identification of anatomically non-distinct annual rings in tropical trees using stable isotopes. *Trees Struct. Funct.* 25 (1), S. 83–93.
- Popa, I., und Z. Kern, (2009): Long-term summer temperature reconstruction inferred from tree-ring records from the Eastern Carpathians. *Clim. Dynam.* 32 (7-8), S. 1107–1117.
- Rayner, N. A., Parker, D. E., Horton, E. B., Folland, C. K., Alexander, L. V., Rowell, D. P., Kent, E. C. und A. Kaplan (2003): Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century J. *Geophys. Res.*, 108, No. D14 S. 1–37.
- Riemer, T. (1994): Über die Varianz von Jahrringbreiten: statistische Methoden für die Auswertung der jährlichen Dickenzuwächse von Bäumen unter sich ändernden Lebensbedingungen. *Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme. Reihe A*, 121, Göttingen, 375 S..

## 10. LITERATURVERZEICHNIS

---

- Riemer, T. (1992): Statistiken zur Erkennung von Weiserjahren. In: B. Sloboda: Modelle zu automatisierten Zuwachsmess- und Auswerttechniken, klimaorientierte Wachstumsmodelle, Inventurmethode und ihre Anwendungen, S. 184–197.
- Rinn, F. (2003): TSAP-Win. Time Series Analysis and Presentation for Dendrochronology and Related Applications. Version 0.53 for Microsoft Windows, Heidelberg, 91 S..
- Rohli, R.V. und A.J. Vega (2008): Climatology. (Jones and Bartlett Publishers), Mississauga 466 S..
- Saurer, M., Kress, A., Leuenberger, M., Rinne, K.T., Treydte, K.S. und R.T. Siegwolf (2012): Influence of atmospheric circulation patterns on the oxygen isotope ratio of tree rings in the Alpine region. *Journal of Geophys. Res –Atmos.* 117, S. 1–12.
- Schönwiese, C.-D. und R. Janoschitz (2008): Klima-Trendatlas Deutschland 1901–2000. 2. aktualisierte Auflage. Bericht Nr. 4, Inst. Atmosph. Umwelt, Univ. Frankfurt/Main. 63 S..
- Schultz, J.A., und B. Neuwirth (2012): A new atmospheric circulation tree-ring index (ACTI) derived from climate proxies: Procedure, results and applications." *Agric. For. Meteorol.* 164. S. 149–160.
- Schultz, J.A., Neuwirth, B., Winiger, M. und J. Löffler (2009): Negative pointer years from Central European tree-rings caused by circulation patterns. In: Kaczka R, Malik I, Owczarek P, Gärtner H, Helle G, Heinrich I (Hrsg.): TRACE - Tree Rings in Archaeology, Climatology and Ecology, 7, S. 78–84.
- Schultz, J.A., B. Neuwirth, D.A. Friedrichs, J. Löffler & M. Winiger (2008): Growth responses to NAO along a Central European west - east transect Tree Rings in Archaeology, Climatology and Ecology, 6, pp. 80-86, Riga. In: Elferts D, Brumelis G, Gärtner H, Helle G, Schleser G (Hrsg.):TRACE - Tree Rings in Archaeology, Climatology and Ecology, 6, S. 14–20.
- Schweingruber, F.H. und P. Nogler (2003): Synopsis and climatological interpretation of Central European tree-ring sequences. *Bot. Helv.* 113 (2), S. 125–243.
- Schweingruber, F.H. (1996): Tree rings and environment – Dendroecology. (Paul Haupt), Bern, Stuttgart, Wien, 609 S..
- Schweingruber, F.H., Eckstein, D., Serre-Bachet, F. und O.U. Bräker (1990): Identification, Presentation and Interpretation of Event Years and Pointer Years in Dendrochronology. *Dendrochronologia* 8, S. 9–38.

## 10. LITERATURVERZEICHNIS

---

- Seager, R., Burgman, R., Kushnir, Y., Clement, A., Cook, E., Naik, N. und J. Miller (2008): Tropical pacific forcing of North American medieval megadroughts: testing the concept with an atmosphere model forced by coral-reconstructed SSTs. *J. Climate* 21 (23), S. 6175–6190.
- Sheridan, S.C. (2002): The redevelopment of a weather-type classification scheme for North America. *Int J. Climatol.* 22 (1), S. 51–68.
- Sidorova, O.V., Saurer, M., Myglan, V.S., Eichler, A., Schwikowski, M., Kirilyanov, A. V., Bryukhanova, M.V., Gerasimova, O.V., Kalugin, I.A., Daryin, A.V. und R.T. Siegwolf (2012): A multi-proxy approach for revealing recent climatic changes in the Russian Altai. *Clim. Dyn.* 38 (1-2), S. 175–188.
- Smith, M.D. (2011): The ecological role of climate extremes: current understanding and future prospects. *J. Ecol.* 99 (3), S. 651–655.
- Speer, J.H. (2010): *Fundamentals of Tree-Ring Research*. The University of Arizona Press. 368 S..
- Stenseth, N.C., Ottersen, G., Hurrell, J.W., Myrsetrud, A., Lima, M., Chan, K.S., Yoccoz, N.G. und B. Adlandsvik (2003): Studying climate effects on ecology through the use of climate indices: the North Atlantic Oscillation, El Niño Southern Oscillation and beyond. *Proc. R. Soc. Lond. Ser. B: Biol. Sci.* 270 (1529), S. 2087–2096.
- Storch, v. H. und A. Navarra (1999): *Analysis of Climate Variability. Applications of Statistical Techniques*. 2. Auflage (Springer), Berlin, Heidelberg S. 342.
- Treydte, K., Frank, D., Esper, J., Andreu, L., Bednarz, Z., Berninger, F., Boettger, T., D'Alessandro, C.M., Etien, N., Filot, M., Grabner, M., Guillemain, M.T., Gutierrez, E., Haupt, M., Helle, G., Hiltunen, E., Jungner, H., Kalela-Brundin, M., Krapiec, M., Leuenberger, M., Loader, N.J., Masson-Delmotte, V., Pazdur, A., Pawelczyk, S., Pierre, M., Planells, O., Pukienė, R., Reynolds-Henne, C.E., Rinne, K.T., Saracino, A., Saurer, M., Sonninen, E., Stievenard, M., Switsur, V.R., Szczepanek, M., Szychowska-Krapiec, E., Todaro, L., Waterhouse, J.S., Weigl, M. und G.H. Schleser (2007): Signal strength and climate calibration of a European tree-ring isotope network. *Geophys. Res. Lett.* 34 (24), S. 1–6.
- Treydte, K. S., Schleser, G. H., Helle, G., Frank, D. C., Winiger, M., Haug, G. H. und J. Esper (2006): The twentieth century was the wettest period in northern Pakistan over the past millennium. *Nature* 440 (7088), S. 1179–1182.
- Trouet, V., Esper, J., Graham, N.E., Baker, A., Scourse, J.D. und D.C. Frank (2009): Persistent positive north Atlantic oscillation mode dominated the medieval climate anomaly. *Science* 324 (5923), S. 78–80.

## 10. LITERATURVERZEICHNIS

---

- van den Besselaar, E.J., Tank, A., und G. van der Schrier (2010): Influence of circulation types on temperature extremes in Europe. *Theor. Appl. Climatol.* 99 (3-4), S. 431–439.
- Vangengeim, G.Y., (1952): Basics of the macrocirculation method of long-term meteorological forecasts for the Arctic. *Trudy ANII* 34, S. 1–343 (in russischer Sprache).
- van Oldenborgh, G.J., Drijfhout, S., van Ulden, A., Haarsma, R., Sterl, A., Severijns, C., Hazeleger, W. und H. Dijkstra (2009): Western Europe is warming much faster than expected. *Clim. Past* 5 (1), S. 1–12. *Climate Explorer*: <http://climexp.knmi.nl> (letzter Aufruf 20.12.2012).
- Vitasse, Y., Francois, C., Delpierre, N., Dufréne, E., Kremer, A., Chuine, I. und S. Delzon (2011): Assessing the effects of climate change on the phenology of European temperate trees. *Agric. For. Meteorol.* 151, S. 969–980.
- Wang, L., Duan, J.P., Chen, J., Huang, L. und X.M Shao (2010): Temperature reconstruction from tree-ring maximum density of Balfour spruce in eastern Tibet, China. *Int. J. Climatol.* 30 (7), S. 972–979.
- Weaver, S.J., Schubert, S. und H. Wang (2009): Warm season variations in the Low-Level circulation and precipitation over the central United States in observations, AMIP simulations, and idealized SST experiments. *J. Climate* 22 (20), S. 5401–5420.
- Werner P.C. und F.-W. Gerstengarbe (2011): Spatial-temporal changes of meteorological parameters in selected circulation patterns. *PIK Report*, 123, Potsdam, 25 S..
- Werner, P.C. und F.-W. Gerstengarbe (2010): Katalog der Großwetterlagen Europas (1881–2009) nach Paul Hess und Helmut Brezowsky, *PIK Report* 119, 7. Auflage, Potsdam, 146 S..
- Werner, P.C., Gerstengarbe, F.-W., Fraedrich, K. und H. Oesterle (2000): Recent climate change in the North Atlantic/European sector. *Int. J. Climatol.* 20 (5), S. 463–471.
- Wigley, T.M.L., Briffa, K.R. und P.D. Jones (1984): On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. *J. Climate Appl. Meteorol.* 23, S. 201–213.
- Wilson, R., Cook, E., D'Arrigo, R., Riedwyl, N., Evans, M.N., Tudhope, A. und R. Allan (2010): Reconstructing ENSO: the influence of method, proxy data, climate forcing and teleconnections. *J. Quaternary Sci.* 25 (1), S. 62–78.
- Woodhouse, C.A., Russell, J.L. und E.R. Cook (2009): Two modes of north American drought from instrumental and Paleoclimatic data. *J. Climate* 22 (16), S. 4336–4347.

## 10. LITERATURVERZEICHNIS

---

- Xia, Y., Fabian, P., Stohl, A. und M. Winterhalter (1999): Forest climatology: reconstruction of mean climatological data for Bavaria, Germany." *Agric. For. Meteorol* 96(1), S 117–129.
- Zhang, Z.H., Mann, M.E. und E.R. Cook (2004): Alternative methods of proxy-based climate field reconstruction: application to summer drought over the conterminous United States back to AD1700 from tree-ring data. *Holocene* 14 (4), S. 502–516.

### 11. Anhang

Anhang A	Übersicht über die Standorte des Datensatzes I	S. 78
Anhang B	Übersicht über die Standorte des Datensatzes II	S. 81
Anhang C	Korrelationsmuster für das Frühjahr zwischen gACTI und “wind stress” (meridional / zonal)	S. 82
Anhang D	Gruppenzusammensetzung in den verschiedenen jahreszeitlichen Perioden auf Standortbasis	S. 83
Anhang E	Großwetterlagenreaktionen aller Gruppen für verschiedene jahreszeitliche Perioden	S. 89

## Anhang A: Übersicht über die Standorte des Datensatzes I

ID	geo. Breite	geo. Länge	Art	Höhe in m ü. NN	Expo- sition	Rbar	EPS	Region
1I	46,326	7,613	PISY	1110	135	0,54	0,91	Rhonetal
2I	46,321	7,645	PISY	1000	130	0,62	0,93	Rhonetal
3I	46,325	7,634	PISY	1020	140	0,53	0,92	Rhonetal
4I	46,313	7,698	PISY	700	175	0,51	0,92	Rhonetal
5I	47,792	10,438	ABAL	860	90	0,42	0,93	Schwaben
6I	47,564	10,413	PCAB	1540	315	0,46	0,92	Schwaben
7I	49,107	13,107	PCAB	1235	270	0,38	0,71	Bayrischer Wald
8I	49,049	13,078	ABAL	850	292	0,46	0,94	Bayrischer Wald
9I	49,231	12,341	ABAL	455	315	0,51	0,96	Bayrischer Wald
10I	48,845	13,719	FASP	1005	67	0,59	0,97	Bayrischer Wald
11I	49,111	13,151	PCAB	1235	90	0,45	0,93	Bayrischer Wald
12I	50,067	11,774	PCAB	695	330	0,61	0,95	Fichtelgebirge
13I	50,135	11,803	PCAB	660	330	0,55	0,97	Fichtelgebirge
14I	50,050	11,877	PCAB	770	45	0,5	0,95	Fichtelgebirge
15I	50,059	11,835	PCAB	800	292	0,56	0,96	Fichtelgebirge
16I	49,525	10,522	FASP	415	90	0,72	0,98	Steigerwald
17I	49,525	10,522	QUSP	415	90	0,62	0,97	Steigerwald
18I	48,265	12,957	FASP	465	225	0,39	0,93	Inntal
19I	47,556	13,021	PCAB	1615	292	0,53	0,93	Oberbayern
20I	49,903	9,422	QUSP	540	210	0,41	0,94	Spessart
21I	50,201	9,563	QUPE	465	22	0,59	0,97	Spessart
22I	50,199	9,560	FASP	470	180	0,49	0,95	Spessart
23I	50,199	9,560	QUSP	470	180	0,5	0,95	Spessart
24I	50,083	9,293	PCAB	420	22	0,48	0,95	Spessart
25I	50,083	9,293	ABAL	420	22	0,39	0,91	Spessart
26I	47,738	11,492	PCAB	1020	315	0,4	0,92	Tegernseer Berge
27I	47,738	11,492	ABAL	1020	315	0,59	0,96	Tegernseer Berge
28I	47,497	11,233	PCAB	985	135	0,29	0,81	Zugspitzregion
29I	47,437	11,156	PCAB	1645	337	0,41	0,93	Zugspitzregion
30I	47,436	11,137	PCAB	1660	337	0,44	0,93	Zugspitzregion
31I	51,169	8,962	FASY	340	360	0,55	0,9	Kellerwald
32I	51,170	8,967	FASY	310	150	0,51	0,94	Kellerwald
33I	51,171	8,968	QUPE	290	135	0,45	0,93	Kellerwald
34I	51,194	9,012	FASY	280	180	0,49	0,78	Kellerwald
35I	51,167	8,958	FASY	420	345	0,66	0,97	Kellerwald
36I	51,157	9,084	PISY	360	180	0,5	0,92	Kellerwald
37I	51,157	9,084	LADE	360	180	0,68	0,93	Kellerwald
38I	51,156	9,084	QUPE	350	180	0,57	0,93	Kellerwald
39I	51,157	9,084	QUPE	365	180	0,6	0,9	Kellerwald
40I	51,158	9,084	QUPE	380	180	0,58	0,9	Kellerwald

## Anhang A: Fortsetzung

ID	geo. Breite	geo. Länge	Art	Höhe in m ü. NN	Expo- sition	Rbar	EPS	Region
41I	51,156	9,076	QUPE	400	215	0,58	0,92	Kellerwald
42I	51,156	9,077	QUPE	390	150	0,59	0,93	Kellerwald
43I	51,695	9,445	QUSP	320	260	0,46	0,85	Solling
44I	49,614	7,921	QUPE	500	45	0,54	0,92	Donnersberg
45I	49,616	7,922	QUPE	500	220	0,6	0,93	Donnersberg
46I	50,119	6,875	FASY	430	200	0,44	0,83	Vulkaneifel
47I	50,047	7,069	QUPE	340	240	0,6	0,94	SW-Eifel
48I	50,044	7,071	QUPE	270	180	0,63	0,94	SW-Eifel
49I	50,297	7,007	QUPE	480	90	0,53	0,91	Osteifel
50I	50,297	7,007	FASY	480	90	0,47	0,9	Osteifel
51I	49,864	7,235	QUPE	520	45	0,57	0,94	Hunsrück
52I	49,851	7,468	QUPE	405	135	0,53	0,91	Hunsrück
53I	49,377	7,867	QUPE	500	180	0,48	0,92	Pfalz
54I	49,304	7,747	QUPE	400	330	0,56	0,93	Pfalz
55I	49,262	7,814	QUPE	475	200	0,55	0,94	Südwestpfalz
56I	49,242	7,788	QUPE	485	170	0,35	0,74	Südwestpfalz
57I	49,055	7,643	QUPE	390	-	0,59	0,93	Südwestpfalz
58I	50,663	7,236	FASY	230	270	0,47	0,91	Siebengebirge
59I	50,669	7,249	FASY	360	320	0,51	0,92	Siebengebirge
60I	50,669	7,249	QUPE	370	320	0,32	0,85	Siebengebirge
61I	50,670	7,248	QUPE	375	180	0,46	0,88	Siebengebirge
62I	50,670	7,247	FASY	340	160	0,55	0,94	Siebengebirge
63I	50,671	7,047	QURO	185	15	0,54	0,92	Kottenforst-Ville
64I	50,670	7,047	QURO	185	15	0,54	0,93	Kottenforst-Ville
65I	50,680	7,041	QURO	165	20	0,57	0,95	Kottenforst-Ville
66I	50,684	7,222	QUPE	280	150	0,49	0,84	Siebengebirge
67I	50,665	6,325	QUPE	320	340	0,44	0,87	Rureifel
68I	50,665	6,325	FASY	320	340	0,41	0,87	Rureifel
69I	50,609	6,457	FASY	530	315	0,5	0,94	Rureifel
70I	50,610	6,464	PSME	525	135	0,42	0,91	Rureifel
71I	50,606	6,490	FASY	470	60	0,63	0,96	Rureifel
72I	50,440	6,566	QUPE	560	90	0,32	0,84	Kalkeifel
73I	50,681	6,279	QUPE	460	-	0,54	0,93	NP Eifel
74I	50,681	6,279	FASY	440	45	0,49	0,91	NP Eifel
75I	50,624	6,399	QUPE	400	300	0,5	0,93	Rureifel
76I	50,571	6,360	QUPE	500	150	0,49	0,92	NP Eifel
77I	50,572	6,361	FASY	480	150	0,56	0,94	Rureifel
78I	50,606	6,492	PCAB	470	60	0,41	0,9	Eifel
79I	50,731	8,113	PCAB	520	45	0,42	0,91	Haiger - Siegerland
80I	50,729	8,119	FASY	500	140	0,53	0,94	Haiger - Siegerland

## Anhang A: Fortsetzung

ID	geo. Breite	geo. Länge	Art	Höhe in m ü. NN	Expo- sition	Rbar	EPS	Region
81I	50,727	8,118	QUPE	450	19	0,5	0,9	Haiger - Siegerland
82I	50,866	8,226	PCAB	440	180	0,44	0,83	Haiger - Siegerland
83I	50,866	8,225	FASY	440	180	0,53	0,94	Haiger - Siegerland
84I	50,866	8,227	QUPE	440	180	0,65	0,96	Haiger - Siegerland
85I	50,927	6,419	QURO	105	135	0,57	0,95	Jülich
86I	50,917	6,424	QURO	103	-	0,49	0,91	Jülich
87I	50,792	6,844	FASY	155	240	0,52	0,91	Köln-Bonner Bucht
88I	50,792	6,844	QURO	155	240	0,6	0,94	Köln-Bonner Bucht
89I	50,983	7,717	QUPE	385	270	0,41	0,76	Oberbergisches Land
90I	51,230	7,111	FASY	260	330	0,45	0,88	Oberbergisches Land
91I	51,230	7,111	QUPE	260	230	0,61	0,94	Oberbergisches Land
92I	51,315	6,798	QURO	40	-	0,34	0,87	Niederrheinisches Tiefland
93I	51,674	6,370	FASY	50	180	0,4	0,91	Niederrheinisches Tiefland
94I	51,674	6,364	FASY	60	330	0,54	0,93	Niederrheinisches Tiefland
95I	51,102	8,022	FASY	455	130	0,54	0,94	Arnsberg
96I	51,103	8,023	QUPE	470	130	0,56	0,93	Arnsberg
97I	51,583	8,674	QURO	295	350	0,19	0,64	Paderborner Hochfläche
98I	51,443	8,142	QUPE	350	310	0,49	0,94	Niedersauerland
99I	51,447	8,130	FASY	360	280	0,42	0,92	Niedersauerland
100I	51,447	8,130	FASY	350	140	0,49	0,89	Niedersauerland
101I	50,804	7,591	QURO	165	245	0,4	0,79	Siegtal
102I	50,812	7,599	QURO	180	225	0,46	0,84	Siegtal
103I	51,888	8,584	QUPE	110	330	0,46	0,9	Ostmünsterland
104I	51,888	8,584	FASY	110	330	0,39	0,81	Ostmünsterland
105I	50,399	10,596	FASP	460	360	0,46	0,91	Fränkische Platte
106I	50,399	10,593	FASP	460	360	0,61	0,94	Fränkische Platte
107I	50,401	10,594	FASP	520	180	0,44	0,9	Fränkische Platte
108I	50,399	10,596	QURO	460	360	0,53	0,94	Fränkische Platte
109I	50,399	10,593	QURO	420	360	0,67	0,96	Fränkische Platte
110I	47,850	7,783	PCAB	490	225	0,66	0,9	Schwarzwald
111I	47,833	7,983	PCAB	1320	45	0,56	0,84	Schwarzwald
112I	47,850	8,033	PCAB	1250	330	0,58	0,84	Schwarzwald
113I	47,800	7,750	ABAL	930	225	0,5	0,81	Schwarzwald
114I	47,783	7,750	ABAL	940	45	0,49	0,81	Schwarzwald
115I	48,033	8,350	PCAB	880	45	0,46	0,78	Schwarzwald

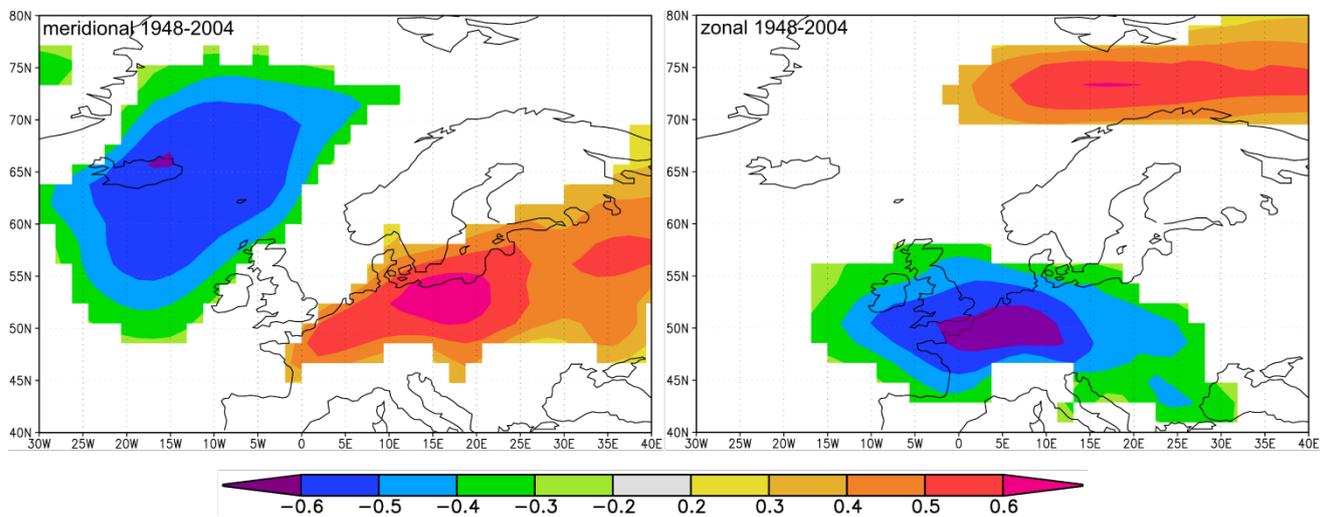
**Anhang B: Übersicht über die Standorte des Datensatzes II**

ID	geo. Breite	geo. Länge	Art	Höhe in m ü. NN	Expo- sition	Rbar	EPS	Region
1II	49,525	10,522	QUSP	415	90	0,62	0,97	Steigerwald
2II	48,265	12,957	FASP	465	225	0,39	0,93	Inntal
3II	50,201	9,563	FASP	465	7	0,41	0,94	Spessart
4II	50,201	9,563	QUPE	465	22	0,59	0,97	Spessart
5II	50,199	9,560	FASP	470	180	0,49	0,95	Spessart
6II	50,199	9,560	QUSP	470	180	0,50	0,95	Spessart
7II	51,169	8,962	FASY	340	360	0,55	0,90	Kellerwald
8II	51,170	8,967	FASY	310	150	0,51	0,94	Kellerwald
9II	51,171	8,968	QUPE	290	135	0,45	0,93	Kellerwald
10II	51,167	8,958	FASY	420	345	0,66	0,97	Kellerwald
11II	51,156	9,084	QUPE	350	180	0,57	0,93	Kellerwald
12II	51,157	9,084	QUPE	365	180	0,60	0,90	Kellerwald
13II	51,156	9,077	QUPE	390	150	0,59	0,93	Kellerwald
14II	49,616	7,922	QUPE	500	220	0,60	0,93	Donnersberg
15II	50,044	7,071	QUPE	270	180	0,63	0,94	SW-Eifel
16II	50,297	7,007	QUPE	480	90	0,53	0,91	Osteifel
17II	50,297	7,007	FASY	480	90	0,47	0,90	Osteifel
18II	49,880	7,583	QUPE	500	180	0,50	0,93	Hunsrück
19II	49,864	7,235	QUPE	520	45	0,57	0,94	Hunsrück
20II	49,304	7,747	QUPE	400	330	0,56	0,93	Pfalz
21II	49,262	7,814	QUPE	475	200	0,55	0,94	Südwestpfalz
22II	49,055	7,643	QUPE	390	-	0,59	0,93	Südwestpfalz
23II	50,670	7,247	FASY	340	160	0,55	0,94	Siebengebirge
24II	50,671	7,047	QURO	185	15	0,54	0,92	Kottenforst-Ville
25II	50,670	7,047	QURO	185	15	0,54	0,93	Kottenforst-Ville
26II	50,680	7,041	QURO	165	20	0,57	0,95	Kottenforst-Ville
27II	50,609	6,457	FASY	530	315	0,50	0,94	Rureifel
28II	50,606	6,490	FASY	470	60	0,63	0,96	Rureifel
29II	50,681	6,279	QUPE	460	-	0,54	0,93	NP Eifel
30II	50,624	6,399	QUPE	400	300	0,50	0,93	Rureifel
31II	50,571	6,361	FASY	490	150	0,57	0,94	Rureifel
32II	50,571	6,360	QUPE	500	150	0,49	0,92	NP Eifel
33II	50,572	6,361	FASY	480	150	0,56	0,94	Rureifel
34II	50,729	8,119	FASY	500	140	0,53	0,94	Haiger - Siegerland
35II	50,727	8,118	QUPE	450	19	0,50	0,90	Haiger - Siegerland
36II	50,866	8,225	FASY	440	180	0,53	0,94	Haiger - Siegerland
37II	50,866	8,227	QUPE	440	180	0,65	0,96	Haiger - Siegerland
38II	50,927	6,419	QURO	105	135	0,57	0,95	Jülich
39II	50,917	6,424	QURO	103	-	0,49	0,91	Jülich
40II	50,792	6,844	FASY	155	240	0,52	0,91	Köln-Bonner Bucht

**Anhang B: Fortsetzung**

ID	geo. Breite	geo. Länge	Art	Höhe in m ü. NN	Exposition	Rbar	EPS	Region
41II	50,792	6,844	QURO	155	240	0,60	0,94	Köln-Bonner Bucht
42II	51,230	7,111	QUPE	260	230	0,61	0,94	Oberbergisches Land
43II	51,674	6,370	FASY	50	180	0,40	0,91	Niederrheinisches Tiefland
44II	51,674	6,364	FASY	60	330	0,54	0,93	Niederrheinisches Tiefland
45II	51,102	8,022	FASY	455	130	0,54	0,94	Arnsberg
46II	51,447	8,130	FASY	360	280	0,42	0,92	Niedersauerland
47II	50,399	10,593	FASP	460	360	0,61	0,94	Fränkische Platte
48II	50,401	10,594	FASP	520	180	0,44	0,90	Fränkische Platte
49II	50,399	10,596	QURO	460	360	0,53	0,94	Fränkische Platte
50II	50,399	10,593	QURO	420	360	0,67	0,96	Fränkische Platte

**Anhang C: Korrelationsmuster für das Frühjahr zwischen gACTI und “wind stress” (meridional / zonal).**



11. ANHANG

Anhang D: Gruppenzusammensetzung in den verschiedenen jahreszeitlichen Perioden auf Standortbasis

ID	Art	Höhe in m ü. NN	Region	S3	S13	pSEP- pNOV	pDEZ- FEB	MRZ- MAI	JUN- AUG	SEP- NOV	JAN- DEZ	pNOV-OKT	MRZ- OKT	APR- SEP	MRZ	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP
1I	PISY	1110	Rhonetal	1	-	-	1	1	1	-	-	1	1	1	-	-	-	-	-	-	-
2I	PISY	1000	Rhonetal	1	-	-	1	1	-	-	-	1	-	-	1	-	-	-	-	-	-
3I	PISY	1020	Rhonetal	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	1	-	1	-	1	-	1
4I	PISY	700	Rhonetal	1	-	-	1	1	-	-	-	1	-	-	1	-	-	-	1	-	1
5I	ABAL	860	Schwaben	2	-	-	2	2	-	-	2	2	1	2	2	1	-	-	-	-	-
6I	PCAB	1540	Schwaben	3	1	-	-	3	2	-	-	-	-	-	-	2	-	-	2	-	-
7I	PCAB	1235	Bayrischer Wald	4	1	1	-	4	2	-	-	3	-	-	3	-	2	-	2	-	-
8I	ABAL	850	Bayrischer Wald	-	1	-	2	-	-	-	2	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9I	ABAL	455	Bayrischer Wald	5	2	-	2	5	-	-	2	2	1	-	-	1	-	-	-	-	-
10I	FASP	1005	Bayrischer Wald	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4	-	3	1	-	-	-
11I	PCAB	1235	Bayrischer Wald	4	1	-	-	4	2	-	-	-	-	-	3	2	-	-	2	-	-
12I	PCAB	695	Fichtelgebirge	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4	-	-	-	-
13I	PCAB	660	Fichtelgebirge	-	-	-	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	-	-	-
14I	PCAB	770	Fichtelgebirge	5	1	-	2	5	3	1	-	-	-	3	-	-	5	2	-	-	-
15I	PCAB	800	Fichtelgebirge	-	1	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-
16I	FASP	415	Steigerwald	6	-	2	3	6	4	-	3	3	1	2	4	3	-	-	-	-	-
17I	QUSP	415	Steigerwald	5	4	3	4	5	-	-	-	-	-	-	5	4	4	1	-	-	-
18I	FASP	465	Inntal	-	-	-	2	-	-	-	2	2	-	-	4	-	-	-	-	-	-
19I	PCAB	1615	Oberbayern	3	5	1	5	3	-	-	-	-	-	-	6	2	2	-	2	-	-
20I	QUSP	540	Spessart	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	4	-	5	6	-	3	1	-

11. ANHANG

Anhang D: Fortsetzung

ID	Art	Höhe in m ü. NN	Region	S3	S13	pSEP- pNOV	pDEZ- FEB	MJRZ- MAI	JUN- AUG	SEP- NOV	JAN- DEZ	pNOV-OKT	MJRZ- OKT	APR- SEP	MRZ	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP
21I	QUPE	465	Spessart	7	-	-	6	7	-	-	-	-	-	-	-	6	-	-	-	-	2
22I	FASP	470	Spessart	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-	1	-
23I	QUSP	470	Spessart	7	-	-	-	7	-	-	-	-	-	-	-	6	-	-	-	2	2
24I	PCAB	420	Spessart	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4	-	-
25I	ABAL	420	Spessart	-	-	-	-	-	4	-	2	2	1	2	-	-	-	-	4	-	-
26I	PCAB	1020	Tegernseer Berge	4	3	-	2	4	3	-	-	-	2	3	-	1	5	2	-	-	-
27I	ABAL	1020	Tegernseer Berge	2	-	-	2	2	-	-	2	-	1	2	-	1	-	-	-	-	3
28I	PCAB	985	Zugspitzregion	8	1	-	-	8	-	-	-	-	-	-	4	-	2	-	-	-	-
29I	PCAB	1645	Zugspitzregion	3	-	1	-	3	2	-	-	-	-	-	6	2	2	-	2	-	-
30I	PCAB	1660	Zugspitzregion	3	5	1	5	3	-	-	-	-	-	-	6	2	2	-	2	-	-
31I	FASY	340	Kellerwald	9	6	-	-	9	-	-	-	-	-	-	-	3	4	-	-	-	-
32I	FASY	310	Kellerwald	9	-	-	-	9	-	-	-	-	-	2	5	-	4	4	3	-	-
33I	QUPE	290	Kellerwald	10	-	3	-	10	5	-	4	4	3	4	7	4	4	3	5	1	-
34I	FASY	280	Kellerwald	9	6	-	-	9	-	-	-	-	1	-	-	-	4	-	-	-	-
35I	FASY	420	Kellerwald	9	6	3	-	9	-	-	-	-	-	-	-	-	4	-	-	-	-
36I	PISY	360	Kellerwald	10	-	-	-	10	1	-	4	4	3	4	8	4	4	3	5	1	-
37I	LADE	360	Kellerwald	-	2	-	-	10	1	-	-	4	3	4	8	1	-	3	5	-	-
38I	QUPE	350	Kellerwald	10	7	3	-	10	-	-	4	5	3	4	7	4	4	3	-	-	-
39I	QUPE	365	Kellerwald	10	7	3	-	10	-	-	-	-	3	4	7	-	4	3	-	-	-
40I	QUPE	380	Kellerwald	10	7	3	-	10	-	-	4	5	3	4	-	4	4	3	-	-	2

11. ANHANG

Anhang D: Fortsetzung

ID	Art	Höhe in m ü. NN	Region	S3	S13	pSEP- pNOV	pDEZ- FEB	MRZ- MAI	JUN- AUG	SEP- NOV	JAN- DEZ	pNOV-OKT	MRZ- OKT	APR- SEP	MRZ	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP
41I	QUPE	400	Kellerwald	10	7	3	-	10	-	-	4	5	3	4	7	-	4	3	5	-	-
42I	QUPE	390	Kellerwald	10	7	3	-	10	5	-	4	4	3	4	7	4	4	3	5	-	-
43I	QUSP	320	Solling	11	4	-	-	11	-	2	-	-	-	5	9	4	7	-	-	-	3
44I	QUPE	500	Donnersberg	-	-	-	-	-	6	-	-	-	-	-	-	4	4	-	-	-	-
45I	QUPE	500	Donnersberg	-	8	-	-	-	6	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-
46I	FASY	430	Vulkaneifel	6	2	-	-	6	4	-	5	-	1	1	5	3	4	4	-	1	-
47I	QUPE	340	SW-Eifel	-	9	4	7	-	-	-	-	-	-	-	-	4	-	6	-	-	-
48I	QUPE	270	SW-Eifel	-	-	-	7	2	-	-	-	-	3	-	-	1	-	6	-	-	-
49I	QUPE	480	Osteifel	12	-	-	6	12	-	-	-	-	-	-	-	4	-	-	-	-	2
50I	FASY	480	Osteifel	6	-	-	-	6	-	-	-	-	-	-	5	3	6	-	-	1	-
51I	QUPE	520	Hunsrück	12	-	-	7	12	-	-	5	3	-	-	-	4	4	5	-	-	2
52I	QUPE	405	Hunsrück	-	9	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4	-	1	-	-	-
53I	QUPE	500	Pfalz	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-
54I	QUPE	400	Pfalz	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7	-	5	-	-	-
55I	QUPE	475	Südwestpfalz	-	-	-	7	-	-	-	-	-	-	-	-	7	-	5	-	-	-
56I	QUPE	485	Südwestpfalz	12	-	-	-	12	-	-	-	-	-	-	-	7	-	5	-	-	-
57I	QUPE	390	Südwestpfalz	-	-	-	7	12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
58I	FASY	230	Siebengebirge	-	-	-	-	-	1	-	-	-	1	1	-	-	1	-	-	1	-
59I	FASY	360	Siebengebirge	6	10	-	-	6	4	-	-	-	-	2	5	3	8	-	-	-	-
60I	QUPE	370	Siebengebirge	12	8	-	-	12	-	-	-	-	-	-	2	4	7	-	6	-	-

11. ANHANG

Anhang D: Fortsetzung

ID	Art	Höhe in m ü. NN	Region	S3	S13	pSEP- pNOV	pDEZ- FEB	MRZ- MAI	JUN- AUG	SEP- NOV	JAN- DEZ	pNOV-OKT	MRZ- OKT	APR- SEP	MRZ	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP
61I	QUPE	375	Siebengebirge	11	4	-	-	11	-	-	-	-	-	-	2	4	-	-	-	-	-
62I	FASY	340	Siebengebirge	6	10	2	-	6	-	-	5	-	-	2	5	3	-	-	-	-	-
63I	QURO	185	Kottenforst-Ville	13	11	4	-	13	7	-	5	3	4	6	2	1	9	-	6	3	2
64I	QURO	185	Kottenforst-Ville	13	11	4	-	13	7	-	5	3	4	6	2	1	9	-	6	3	-
65I	QURO	165	Kottenforst-Ville	13	-	4	6	13	7	-	5	3	-	-	2	1	9	-	6	3	-
66I	QUPE	280	Siebengebirge	14	-	-	-	12	-	-	-	-	-	-	-	4	-	-	-	-	-
67I	QUPE	320	Rureifel	14	4	-	6	14	-	-	-	-	-	5	-	4	3	-	-	2	2
68I	FASY	320	Rureifel	6	2	6	-	6	4	-	-	-	1	1	-	3	1	4	3	-	-
69I	FASY	530	Rureifel	-	2	-	-	-	-	-	-	-	1	2	-	-	1	-	-	-	-
70I	PSME	525	Rureifel	6	-	-	2	6	-	-	-	4	-	-	5	-	-	-	-	-	-
71I	FASY	470	Rureifel	-	-	6	-	-	4	-	-	-	-	2	-	-	1	4	-	-	-
72I	QUPE	560	Kalkeifel	12	4	5	-	12	-	-	-	-	-	5	-	4	4	-	-	-	3
73I	QUPE	460	NP Eifel	12	4	-	6	12	-	-	-	-	-	-	-	4	-	-	-	-	2
74I	FASY	440	NP Eifel	-	2	6	-	-	4	-	3	3	1	2	5	-	-	-	-	-	-
75I	QUPE	400	Rureifel	12	4	7	7	12	-	-	-	3	3	5	2	4	4	-	-	-	2
76I	QUPE	500	NP Eifel	12	4	5	-	12	-	-	-	3	-	5	-	4	4	-	-	-	-
77I	FASY	480	Rureifel	-	2	6	-	-	-	-	-	-	-	-	9	8	1	4	3	-	-
78I	PCAB	470	Eifel	6	-	-	-	6	1	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-
79I	PCAB	520	Haiger - Siegerland	6	12	2	-	6	1	-	-	-	3	-	5	8	-	-	-	-	-
80I	FASY	500	Haiger - Siegerland	6	12	-	-	6	4	-	5	3	-	2	5	3	8	-	-	1	-

11. ANHANG

Anhang D: Fortsetzung

ID	Art	Höhe in m ü. NN	Region	S3	S13	pSEP- pNOV	pDEZ- FEB	MRZ- MAI	JUN- AUG	SEP- NOV	JAN- DEZ	pNOV- OKT	MRZ- OKT	APR- SEP	MRZ	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP
81I	QUPE	450	Haiger - Siegerland	12	-	-	-	12	-	2	-	-	-	5	-	4	7	-	-	-	2
82I	PCAB	440	Haiger - Siegerland	6	-	2	-	6	-	-	-	-	-	7	-	8	-	1	4	-	-
83I	FASY	440	Haiger - Siegerland	6	12	2	-	6	-	-	-	-	-	-	9	-	6	-	-	-	-
84I	QUPE	440	Haiger - Siegerland	-	-	5	-	-	8	2	-	-	-	5	-	4	-	-	-	-	3
85I	QURO	105	Jülich	-	8	7	-	-	7	-	6	3	4	8	-	1	-	7	-	3	-
86I	QURO	103	Jülich	13	8	7	-	13	-	-	6	3	4	8	-	1	-	-	-	3	-
87I	FASY	155	Köln-Bonner Bucht	6	-	-	-	6	4	-	-	-	1	1	5	-	1	4	-	-	-
88I	QURO	155	Köln-Bonner Bucht	14	-	-	6	14	-	-	-	3	-	-	-	4	3	-	-	2	-
89I	QUPE	385	Oberbergisches Land	11	-	-	-	11	8	2	-	-	-	-	-	4	7	-	-	2	3
90I	FASY	260	Oberbergisches Land	6	-	6	-	6	9	-	7	3	2	7	9	3	6	4	3	-	-
91I	QUPE	260	Oberbergisches Land	5	-	4	6	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	-	-
92I	QURO	40	Niederrheinisches Tiefland	13	8	7	-	13	7	-	-	3	-	8	-	1	3	7	-	3	-
93I	FASY	50	Niederrheinisches Tiefland	6	-	2	-	6	4	-	7	-	2	2	5	-	8	-	-	-	-
94I	FASY	60	Niederrheinisches Tiefland	6	12	2	-	6	-	-	-	-	1	2	9	3	-	-	-	-	-
95I	FASY	455	Arnsberg	6	-	6	3	6	-	-	-	-	1	1	5	-	6	-	-	-	-
96I	QUPE	470	Arnsberg	12	4	5	-	12	-	2	-	-	-	-	-	4	-	-	-	2	3
97I	QURO	295	Paderborner Hochfläche	11	4	5	-	11	8	-	-	4	-	5	2	4	7	3	-	2	3
98I	QUPE	350	Niedersauerland	6	2	6	3	6	9	-	-	-	-	7	5	3	6	-	-	1	-
99I	FASY	360	Niedersauerland	6	-	6	-	6	9	-	-	-	2	7	5	3	6	-	3	-	-
100I	FASY	350	Niedersauerland	6	2	6	-	6	9	-	-	-	1	7	5	3	6	-	3	-	-

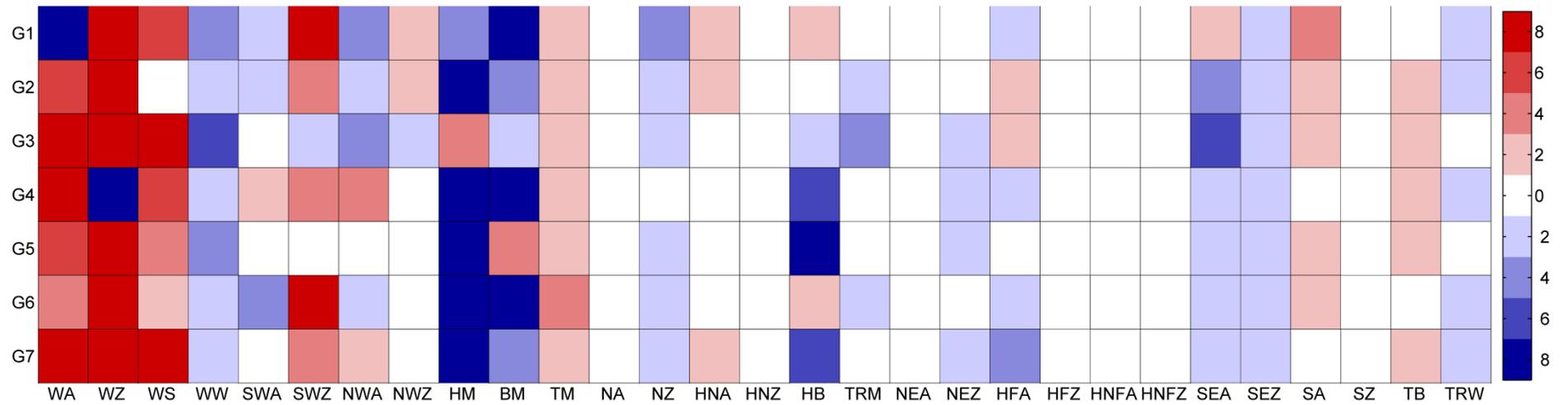
11. ANHANG

Anhang D: Fortsetzung

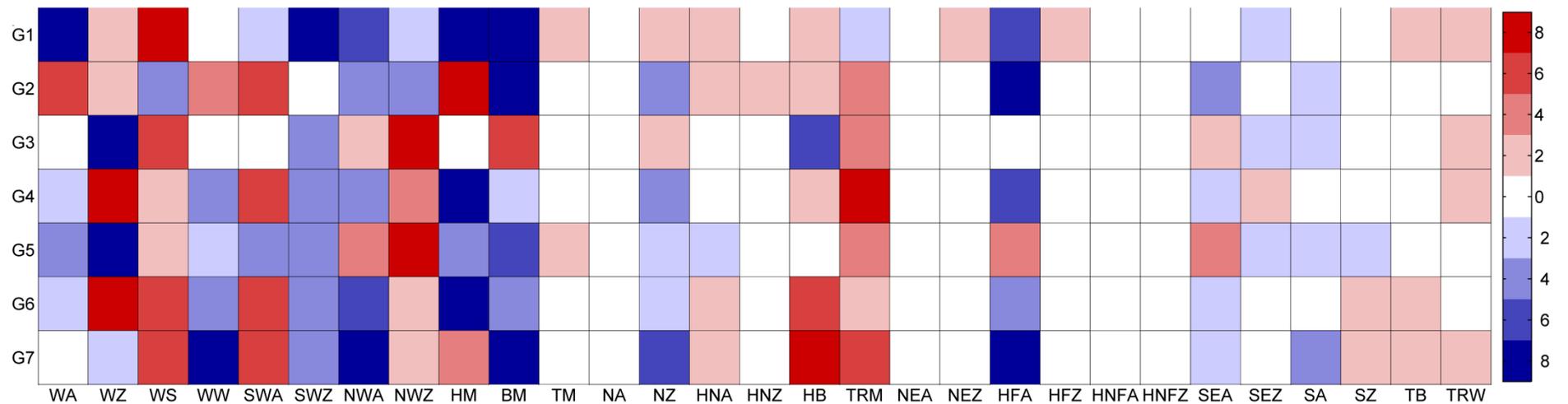
ID	Art	Höhe in m ü. NN	Region	S3	S13	pSEP- pNOV	pDEZ- FEB	MRZ- MAI	JUN- AUG	SEP- NOV	JAN- DEZ	pNOV-OKT	MRZ- OKT	APR- SEP	MRZ	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP
101I	QURO	165	Siegtal	12	8	5	-	12	-	-	5	3	-	5	2	4	4	-	6	-	-
102I	QURO	180	Siegtal	14	4	-	-	14	8	-	-	3	-	5	2	4	4	-	-	2	2
103I	QUPE	110	Ostmünsterland	14	-	5	6	14	-	-	6	3	-	-	-	4	-	-	-	3	2
104I	FASY	110	Ostmünsterland	6	12	2	-	6	9	-	-	-	-	7	9	3	-	-	3	-	-
105I	FASP	460	Fränkische Platte	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	6	3	-	-	-
106I	FASP	460	Fränkische Platte	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	5	-	-	-	1	-
107I	FASP	520	Fränkische Platte	6	-	-	-	6	-	-	3	-	-	-	5	5	6	-	-	-	-
108I	QURO	460	Fränkische Platte	5	4	3	4	5	-	-	1	6	-	9	-	4	-	1	-	-	2
109I	QURO	420	Fränkische Platte	5	4	-	4	5	5	-	1	6	3	9	-	4	-	1	-	-	2
110I	PCAB	490	Schwarzwald	-	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-
111I	PCAB	1320	Schwarzwald	8	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	4	-	-	-	2	-	-
112I	PCAB	1250	Schwarzwald	8	-	-	-	8	-	-	-	-	-	-	4	4	2	-	-	-	-
113I	ABAL	930	Schwarzwald	-	-	-	2	12	-	-	-	2	-	-	4	-	-	-	-	-	-
114I	ABAL	940	Schwarzwald	-	-	-	2	-	-	-	2	2	-	-	4	-	-	-	-	-	-
115I	PCAB	880	Schwarzwald	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4	7	-	-	-	-	-

Anhang E: Großwetterlagenreaktionen aller Gruppen für verschiedene jahreszeitliche Perioden

pSEP - pNOV

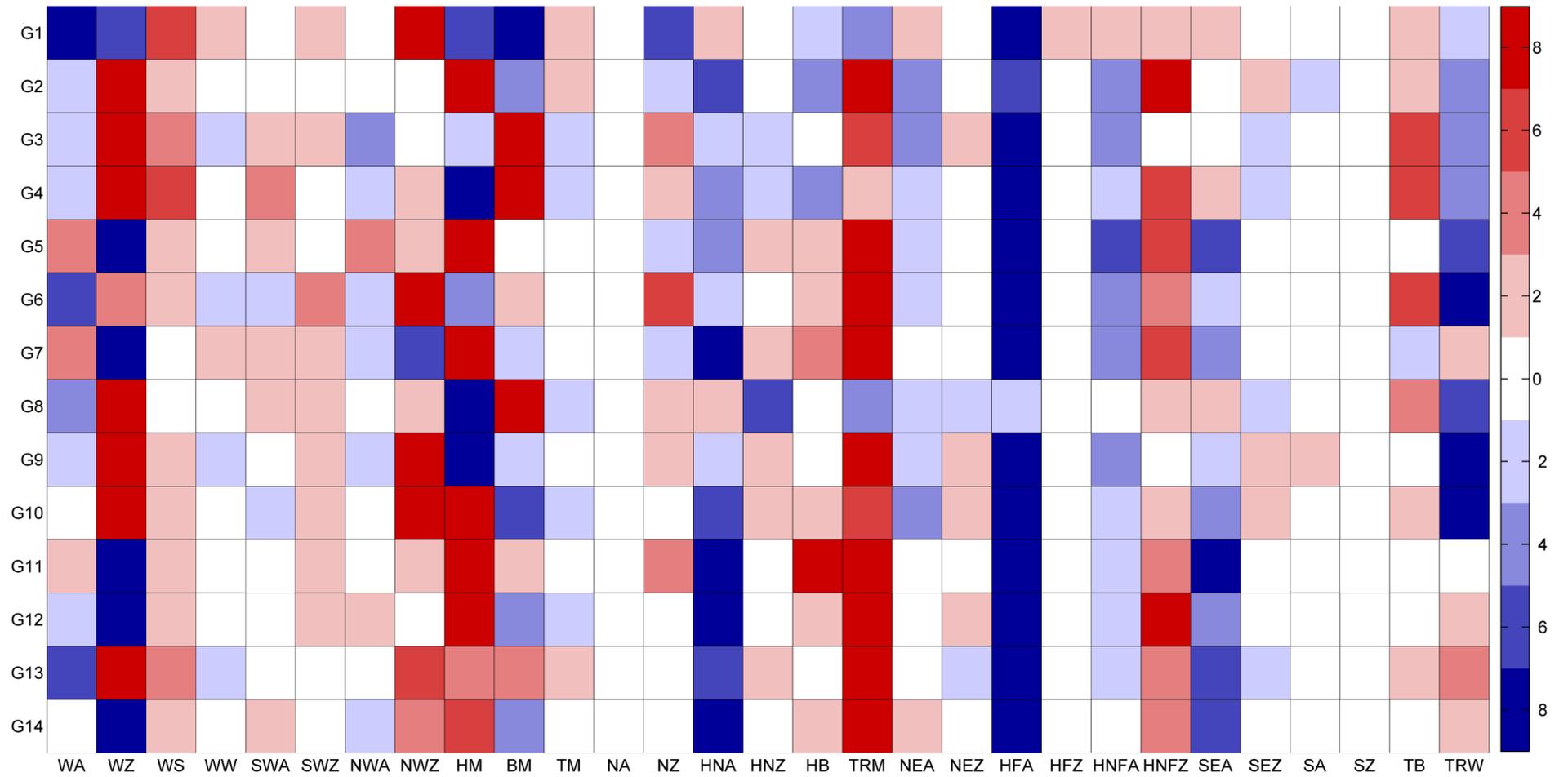


pDEZ - FEB



Anhang E: Fortsetzung

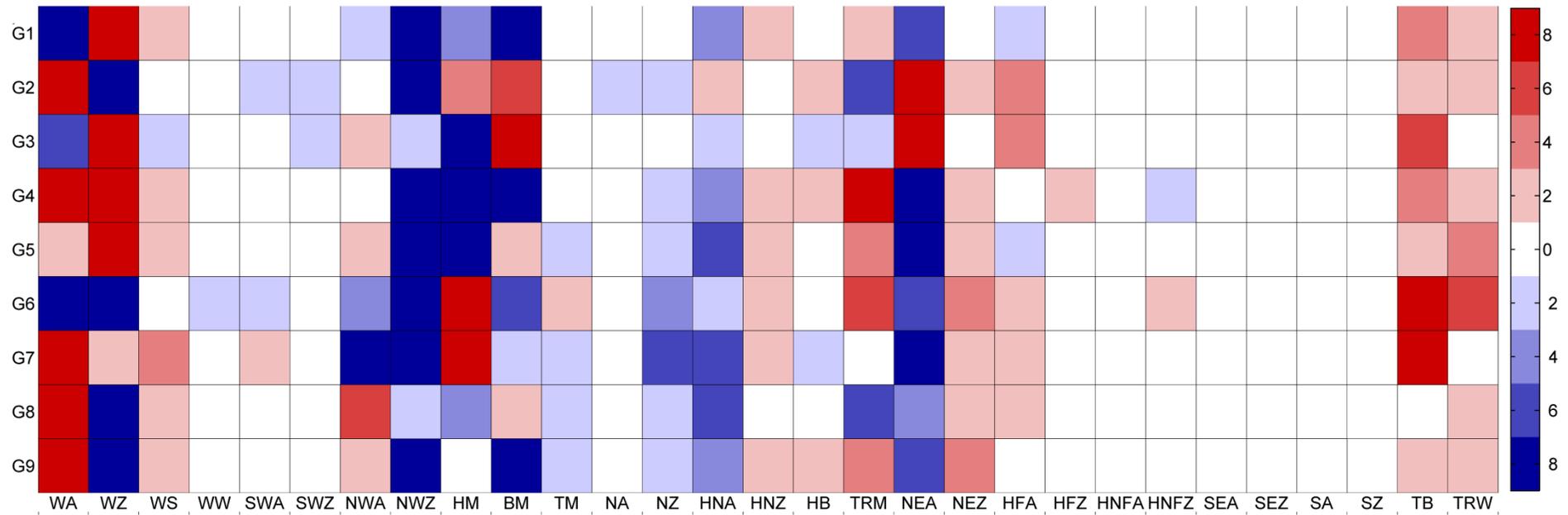
MRZ - MAI



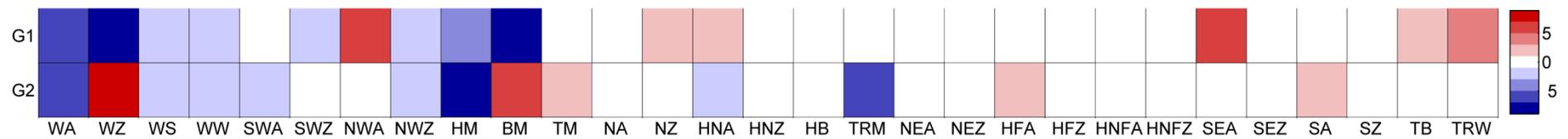
11. ANHANG

Anhang E: Fortsetzung

JUN - AUG

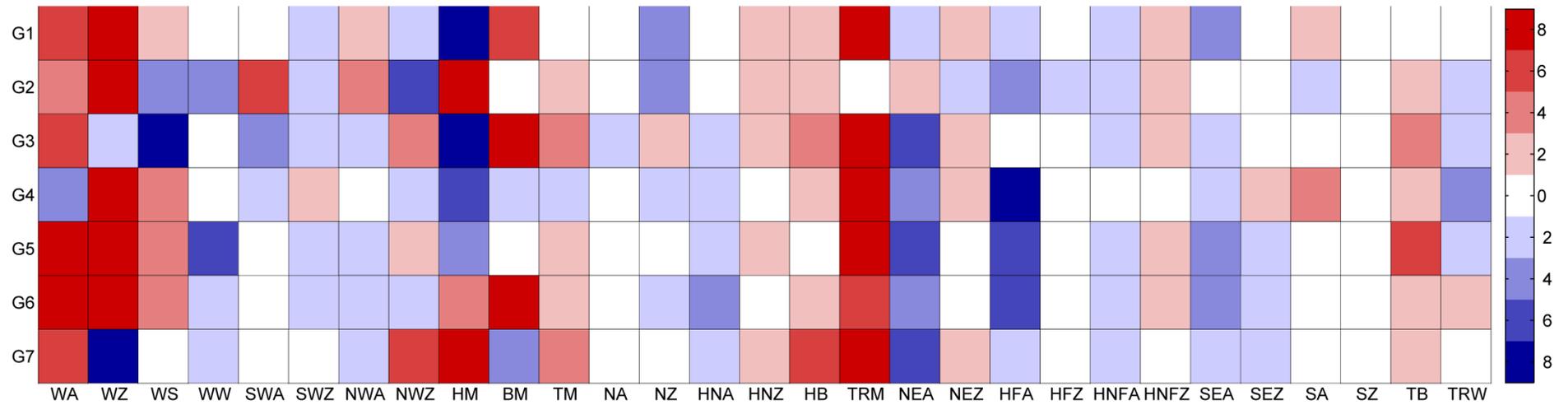


SEP - NOV

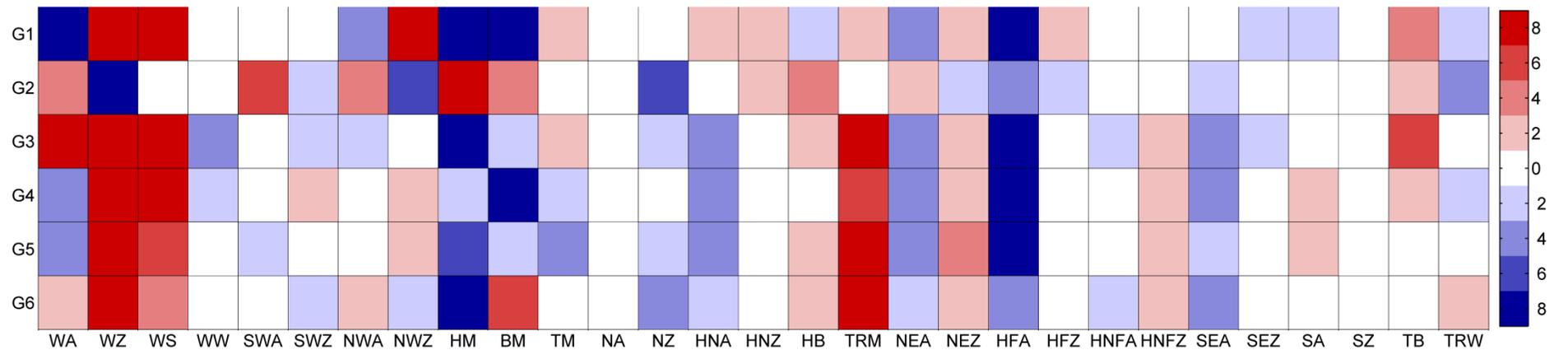


Anhang E: Fortsetzung

JAN - DEZ

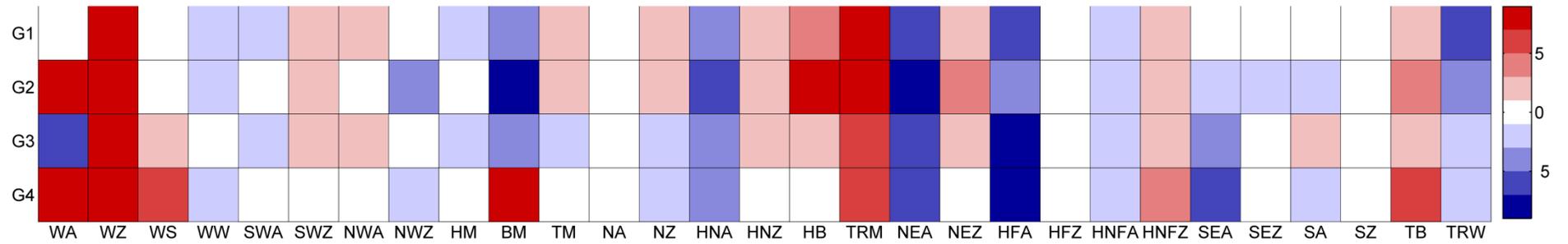


pNOV – OKT

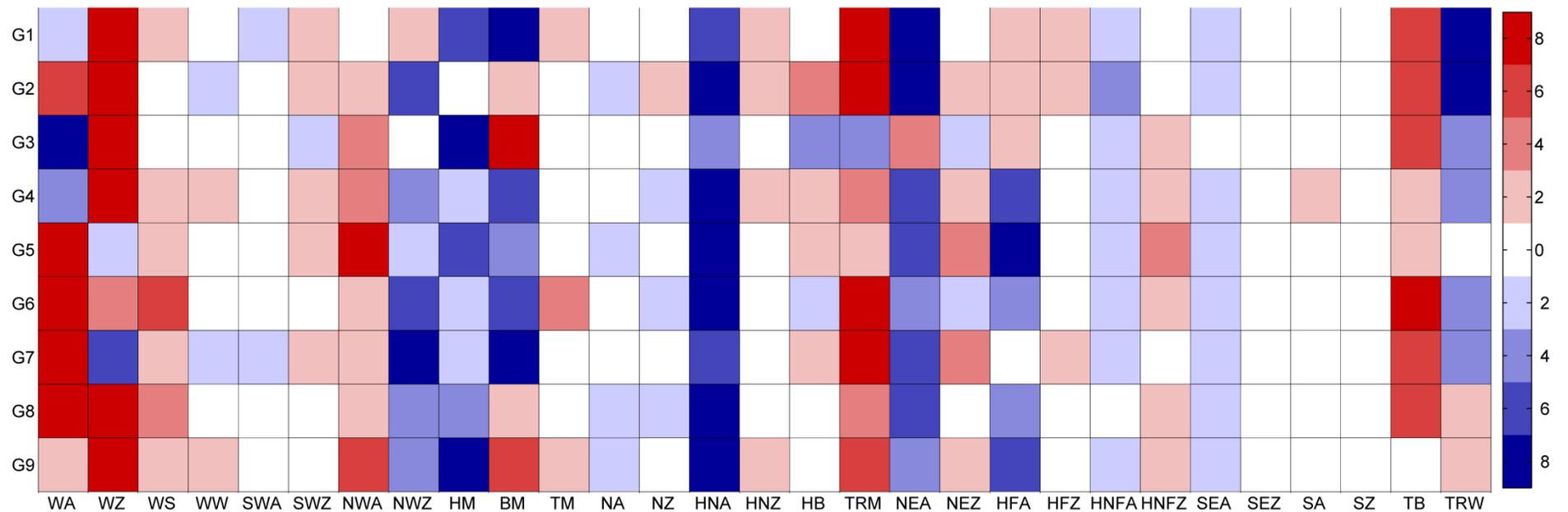


Anhang E: Fortsetzung

MRZ – OKT

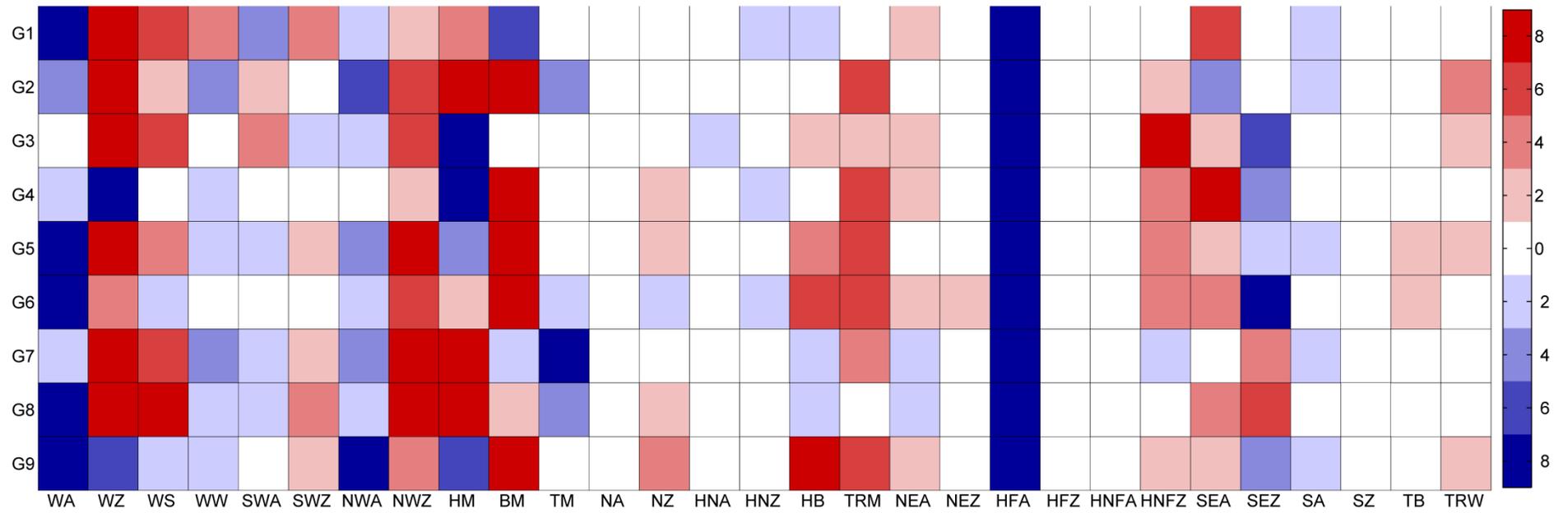


APR - SEP



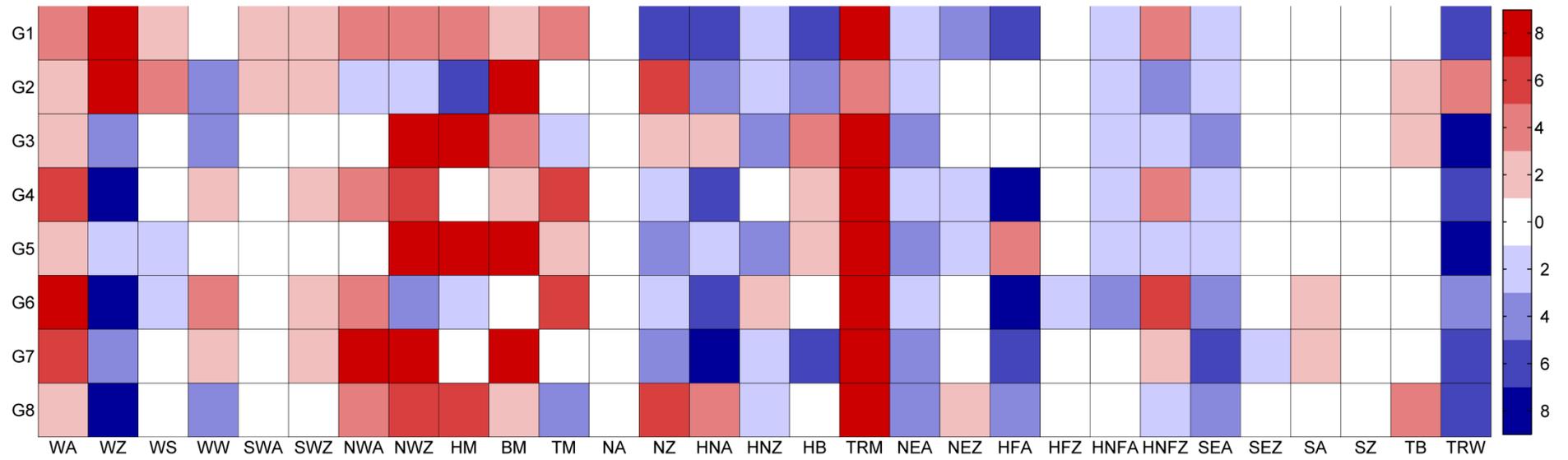
Anhang E: Fortsetzung

MRZ



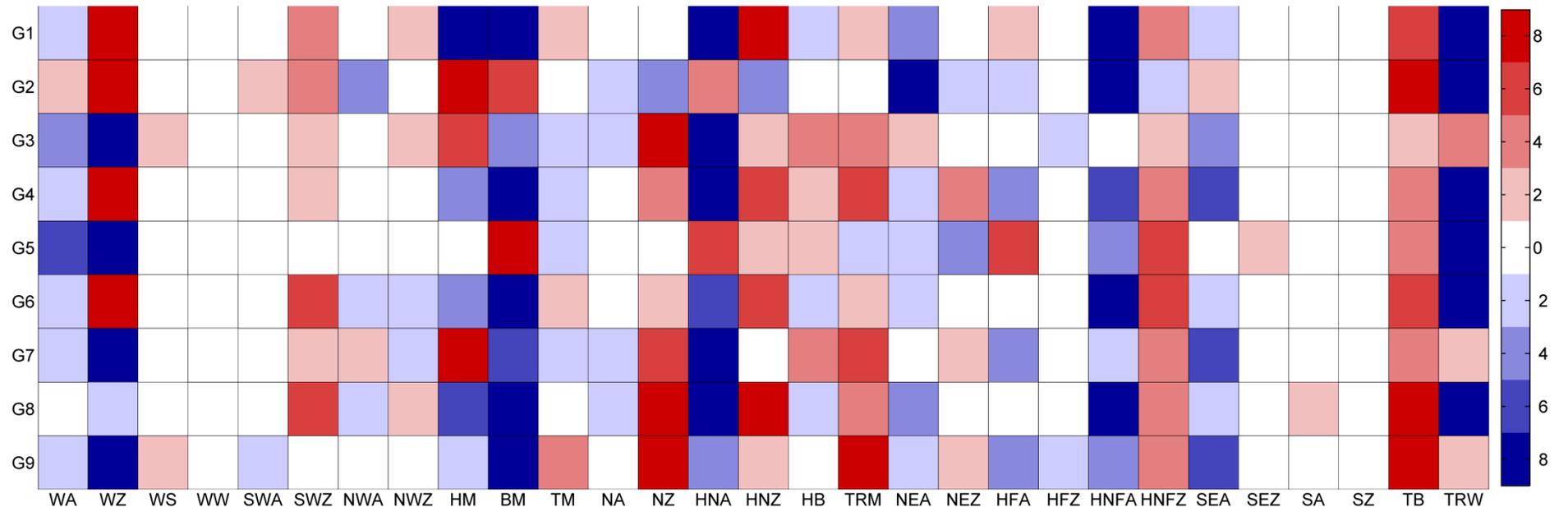
Anhang E: Fortsetzung

APR



Anhang E: Fortsetzung

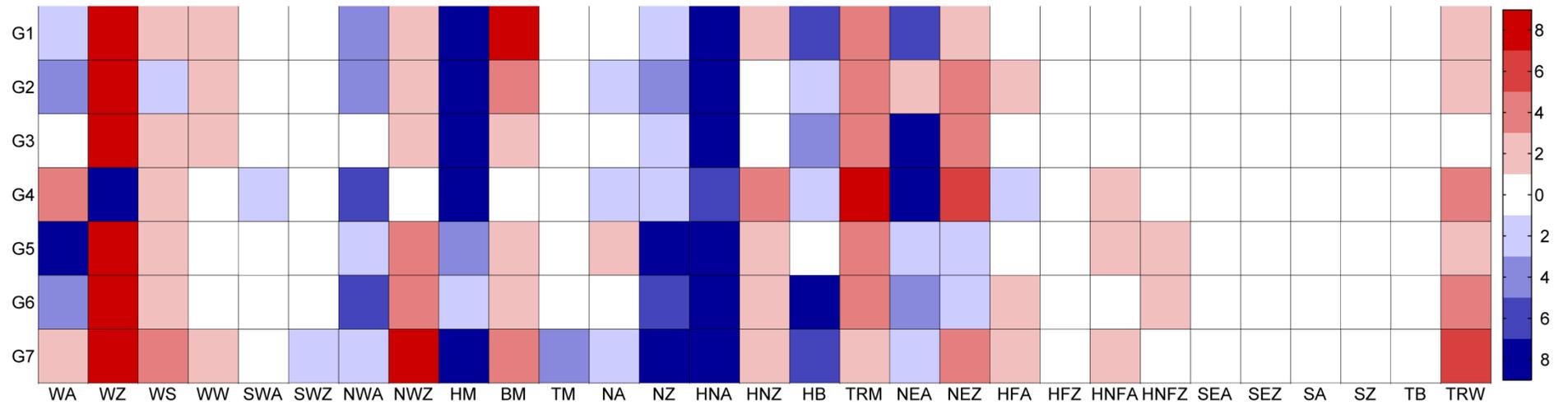
MAI



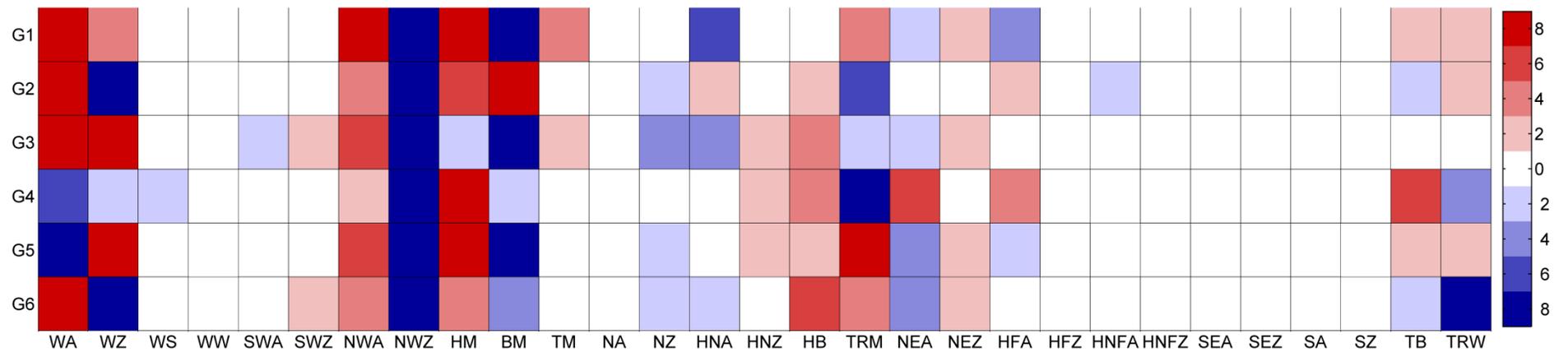
# 11. ANHANG

## Anhang E: Fortsetzung

### JUN



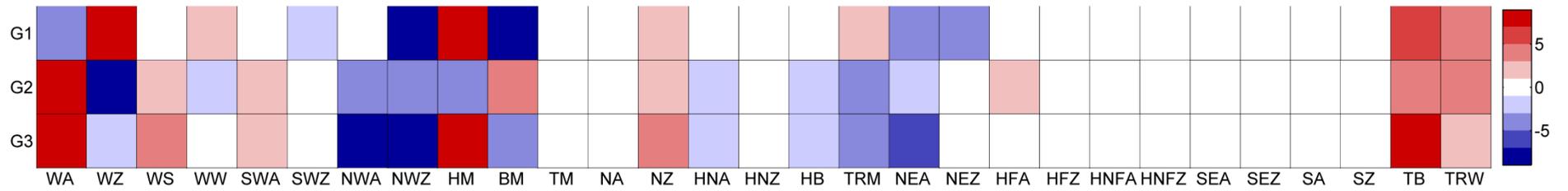
### JUL



# 11. ANHANG

## Anhang E: Fortsetzung

### AUG



### SEP

