

**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

Fakultät Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften

Dendroklimatologische und dendroökologische Untersuchungen des Zuwachsverhaltens von Buche und Fichte in naturnahen Mischwäldern

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades

Doctor rerum silvaticarum (Dr. rer. silv.)

vorgelegt von

Dipl.-Forstwirtin Britt Maria Grundmann

Gutachter:

Herr Prof. Dr. Andreas Roloff
Technische Universität Dresden

Herr Prof. (i.R.) Dr. Dieter Eckstein
Universität Hamburg / Johann Heinrich von Thünen-Institut

Tharandt, 08. April 2009

Erklärung des Promovenden

Die Übereinstimmung dieses Exemplares mit dem Original der Dissertation
zum Thema:

*Dendroklimatologische und dendroökologische Untersuchungen des Zuwachs-
verhaltens von Buche und Fichte in naturnahen Mischwäldern*

wird hiermit bestätigt.

Britt Grundmann

Tharandt, 08. April 2009

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Historie von Buchen-Fichten-Mischbeständen in Südschweden	1
1.2	Zielsetzung mit Fragestellungen	2
2	Stand des Wissens - Überblick	4
2.1	Zuwachstrends der letzten Dekaden	4
2.2	Konkurrenzuntersuchungen in Mischbeständen	6
3	Material und Methoden	9
3.1	Material	9
3.1.1	Untersuchungsflächen	9
3.1.2	Untersuchungsgruppen	15
3.1.3	Bohrkernentnahme und Präparation	18
3.1.4	Klimazeitreihen	19
3.2	Methoden	22
3.2.1	Datierung und Synchronisation der Jahrringzeitreihen	22
3.2.2	Statistische Analysen der Standorts-Chronologien	26
3.2.3	Methoden der Klima-Zuwachs-Analysen	28
3.2.4	Analysen zur Konkurrenz zwischen den Baumarten	39
4	Ergebnisse	42
4.1	Synchronisation der Jahrringserien	42
4.1.1	Erstellung der Baummittelkurven	43
4.1.2	Schardarstellungen	46
4.2	Standorts-Chronologien	49
4.2.1	Buchen	50
4.2.2	Fichten	52
4.2.3	Statistiken der Standorts-Chronologien	54
4.3	Klima-Zuwachs-Beziehungen	57
4.3.1	Korrelationsanalysen	58

Inhaltsverzeichnis

4.3.2	Regressionsanalysen	70
4.3.3	Klimaphasen	78
4.3.4	Weiserjahre	96
4.3.5	Anteile an erklärter Varianz	106
4.3.6	Stärkste Witterungseinflüsse	110
4.4	Bestandesanalysen	112
4.4.1	Konkurrenzanalysen auf der Ebene des Bestandes	112
4.4.2	Konkurrenzanalysen auf der Ebene des Einzelplots	121
4.4.3	Extreme Witterungsereignisse	139
5	Diskussion und Schlussfolgerungen	142
5.1	Bewertung des Ausgangsmaterials	142
5.2	Zuwachszeitreihen	144
5.2.1	Buchen	144
5.2.2	Fichten	146
5.2.3	Standortsvergleich	146
5.3	Klima-Wachstums-Relationen	147
5.3.1	Langfristige Witterungseinflüsse	147
5.3.2	Einfluss extremer Witterungsereignisse	151
5.3.3	Zeitliche Entwicklung der Klima-Zuwachs-Beziehungen	154
5.4	Dendroökologische Konkurrenzanalyse	158
5.4.1	Bestandesebene	158
5.4.2	Plotebene	163
5.4.3	Situation gehäufte Extremereignisse	165
5.5	Zukünftige Entwicklung von Buchen-Fichten-Mischbeständen in Südschwe- den - im Vergleich zum Harz	168
6	Zusammenfassung	175
7	Summary	178
	Literaturverzeichnis	180

1 Einleitung

1.1 Historie von Buchen-Fichten-Mischbeständen in Südschweden

Bis vor etwa 2000 Jahren war der Wald in Südschweden geprägt von Mischbeständen aus Stiel-Eiche (*Quercus robur* L.), Wald-Kiefer (*Pinus sylvestris* L.) und Winter-Linde (*Tilia cordata* Miller). Als Nebenbaumarten spielten Sand-Birke (*Betula pubescens* Ehrh.), Schwarz-Erle (*Alnus glutinosa* [L.] Gaertn.), Gemeine Esche (*Fraxinus excelsior* L.), Eberesche (*Sorbus aucuparia* L.), Berg-Ulme (*Ulmus glabra* Hudson) und auch Rot-Buche (*Fagus sylvatica* L.) wichtige Rollen. Durch paläoökologische Untersuchungen mittels Pollenanalysen, Torf- und Kohlenproben-Auswertungen und Radiokarbondatierung konnte diese Baumartenzusammensetzung bestätigt werden (Björkman und Bradshaw, 1996; Björkman, 1999). Die heutigen Waldbilder, die von Buche und Fichte geprägt sind, entwickelten sich in Südschweden über einen Zeitraum von über 1000 Jahren. Eine Untersuchung von Brandnarben an alten Kiefernstubben durch Niklasson u. a. (2002) ergab die Vermutung, dass die Einwanderung von Buche durch Feuer begünstigt wurde. Der so bereitete Boden war ein idealer Nährgrund für Buchenverjüngung. Zwei besonders verheerende Feuer konnten im Naturschutzgebiet Siggaboda in Småland für 950 und 1450 v. Chr. nachgewiesen werden, nach denen signifikante Anstiege in der Konzentration von Buchenpollen zu verzeichnen waren (Niklasson u. a., 2002). Überlebt haben Buchen während der verzeichneten Periode von wiederkehrenden Feuern in Nischen geschützt durch Felsblöcke. Ob diese Feuer blitzinduziert oder von Menschenhand gelegt waren, lässt sich nicht nachweisen, denn auch die zunehmende Landnutzung durch den Menschen, mittels Brandrodung oder Waldweide, begünstigte die fortschreitende Migration der Buche. Die letzten Eichen wurden vermutlich durch selektive Fällung entfernt, vereinzelte Stümpfe zeugen davon. Noch heute scheint die Nordgrenze der Buchenverbreitung aktiv zu sein, da sie sich auch durch vorgelagerte Einzelpopulationen weiter nach Norden verschiebt. Das Buchenareal in der heutigen Ausdehnung erweckt demnach den Anschein, keineswegs klimatisch bedingt zu sein, sondern wird vermutlich stark von der Landnutzung

durch den Menschen geprägt. Die Einwanderung der Fichte (*Picea abies* [L.] H. Karst.) geschah dagegen offenbar innerhalb kürzester Zeit, wahrscheinlich im Verlauf einer einzigen Generation (Björkman und Bradshaw, 1996). Nach Ende des Feuerregimes wanderte sie von Norden ein und bildet heute in Südschweden mit der Buche Mischbestände in scheinbarer Ko-Dominanz.

1.2 Zielsetzung mit Fragestellungen

Diese Arbeit hat zunächst das Ziel, die wesentlichen Einflüsse auf den radialen Zuwachs von Buchen und Fichten in naturnahen, vom Menschen unbeeinflussten Mischwäldern zu erfassen und die sich daraus ergebende Konkurrenzsituation zu erklären. Langjährige Zuwachszeitreihen erlauben weiterhin einen Blick in die Bestandesgeschichte und ermöglichen teilweise eine Erklärung und Interpretation der vergangenen Entwicklung. Der erkenntniserweiternde Aspekt dieser Arbeit liegt in der Wahl der zu untersuchenden Waldbestände. Sie befinden sich in Südschweden, wo die Verbreitungsgrenzen beider Baumarten aufeinandertreffen. Hier liegt die nördliche Arealgrenze der Buche und die südliche der borealen Nadelwälder. Eine als Referenz dienende Untersuchungsfläche befindet sich im Harz, der im zentralen Verbreitungsgebiet der Buche liegt und durch die montane Höhenlage auch der Fichte optimale Wuchsbedingungen liefert. Die Arbeit gliedert sich im wesentlichen in zwei Teile, die zunächst getrennt voneinander untersucht und interpretiert werden, um dann in einer abschließenden Diskussion verknüpft zu werden. Der erste Teil beschäftigt sich mit den wichtigsten Witterungsgrößen, die den Zuwachs erklären.

Folgende Fragestellungen liegen zugrunde:

- Welche Witterungsfaktoren erklären die Zuwachsschwankungen beider Baumarten?
- Welche Unterschiede gibt es in den Reaktionen auf verschiedene Witterungsfaktoren zwischen den Baumarten?
- Wie hoch ist der Anteil dieser Faktoren am Zuwachsgeschehen?
- Gibt es eine zeitliche Variabilität in den Klima-Zuwachs-Beziehungen?

Der zweite Teil befasst sich mit der ökologischen Bestandessituation zwischen den beiden konkurrenzstarken Baumarten. Folgende Fragestellungen liegen hier zugrunde:

- Besteht ein Konkurrenzgleichgewicht zwischen beiden Baumarten?

1 Einleitung

- Erlauben langjährige Radialzuwachsreihen eine Erklärung der aktuellen Bestandessituation?
- Wie stellt sich die Situation zwischen Buche und Fichte in direkter, nachbarschaftlicher Konkurrenz dar?

In einer übergreifenden Diskussion beider Teilgebiete sollen folgende Fragestellungen beantwortet werden:

- Welchen Anteil haben extreme Witterungsereignisse an der Konkurrenzdynamik zwischen den beiden Baumarten?
- In welche Richtung kann sich die Bestandessituation im Hinblick auf den Klimawandel entwickeln?

Die vorliegende Arbeit ist Teil eines DFG-geförderten Kooperationsprojektes (1. Projektleiter: Prof. Dr. A. Roloff, Tharandt; 2. Projektleiter: Prof. Dr. A. Bolte, Eberswalde). Fragestellungen zur Konkurrenzsituation zwischen Buche und Fichte im Wurzelraum und eine Analyse der oberirdischen Konkurrenzdynamik anhand von Konkurrenzindizes werden vom Projektpartner (Kampf, unveröff.) bearbeitet.

2 Stand des Wissens - Überblick

2.1 Zuwachstrends der letzten Dekaden

Dynamische Entwicklung des Baumwachstums unter sich verändernden Umweltbedingungen

Die Wachstumsbedingungen für Bäume sind nicht konstant. Natürliche Ursachen sowie menschliche Aktivitäten beeinflussen Umwelt und Waldlandschaft. Besonders in den letzten Jahrzehnten kann im Zuwachs der Bäume eine deutliche Veränderung festgestellt werden: in weiten Teilen Europas nimmt das Wachstum deutlich zu (Spiecker, 1995, 1999). Das Holzvolumen stieg an einigen Standorten um bis zu 50 %, das jährliche Höhenwachstum erhöhte sich artabhängig um bis zu 5 cm. In den nördlichsten Teilen Europas kann jedoch ein absinkender Zuwachstrend beobachtet werden. Dies ist im Wesentlichen auf einzelnen Extremstandorten nachgewiesen worden. In Zentraleuropa und Südkandinavien zeigt sich aber ein nahezu einheitlich steigender Trend. Einzelne, sich regional ändernde Faktoren oder Faktorkombinationen können die Wachstumsbedingungen beeinflussen. Mögliche Ursachen können in einer veränderten Landnutzung und angepasstem Waldmanagement liegen. Andererseits existieren Untersuchungen, die belegen, dass Klimaänderungen, natürliche Störungen als auch Änderungen der Gehalte an atmosphärischem CO₂, O₃ und SO₂ sowie Stickstoffanreicherung Ursachen für das veränderte Baumwachstum darstellen (Dittmar u. a., 1997; Innes, 1998; Matyssek, 1998; Lindner, 1999; Matyssek und Innes, 1999; Spiecker, 1999; Hirschberg u. a., 2003; Körner, 2005; Dyckmans, 2006; Braun u. a., 2007; Koutavas, 2008). In ihrem Review-Artikel gehen Matyssek u. a. (2006) detailliert auf die bisher bekannten Interaktionen zwischen Trockenheit und O₃-Stress für Waldbäume ein. Extremereignisse wie Früh- und Spätfröste, Sommertrockenheit, besonders kühle und nasse Sommer oder starke Temperaturschwankungen haben wesentlich größere Einflüsse auf das Baumwachstum als sich langsam ändernde, mittlere Bedingungen (Leuschner u. a., 2001; Barthold u. a., 2004; Pederson u. a., 2004; Leuzinger u. a., 2005; Czajkowski und Bolte, 2006; Dobbertin und Giuggiola, 2006; Eilmann u. a., 2006; Kahle, 2006; Rigling u. a., 2006; Blaschke und

Cech, 2007; van der Werf u. a., 2007; Roloff und Grundmann, 2008). Extreme klimatische Bedingungen haben nicht nur direkte Auswirkungen auf das Baumwachstum, sondern auch indirekte durch Förderung von Pathogenrisiken, Feuer, Windwurf und biologischer, chemischer sowie physikalischer Bodenprozesse (Badeck u. a., 2003; Camarero u. a., 2003; Heiniger, 2003; Leckebusch und Ulbrich, 2004; Hilker u. a., 2005; Krehan und Steyrer, 2006; Leckebusch u. a., 2006; Heiniger u. a., 2007; Hoyer-Tomiczek, 2007; Perny, 2007; Steyrer und Tomiczek, 2007; Triebenbacher und Immler, 2007).

Änderung der Klimasignale im Baumwachstum

Anhand dendroklimatologischer Analysen ist es möglich, die wesentlichen, den radialen Zuwachs beeinflussenden Klima- bzw. Witterungssignale zu identifizieren (Fritts, 1976; Schweingruber, 1983; Briffa, 1984; Eckstein u. a., 1984; Hughes, 2002). Dass diese Signale einer gewissen zeitlichen Variabilität unterliegen, ist bekannt und hat viele Ursachen wie Standortveränderungen, Veränderung der Konkurrenzsituation, kleinräumliche Witterungsvariabilität, Häufung extremer Witterungsbedingungen, Beeinträchtigung durch Immissionen oder gestiegene Sensitivität mit höherem Baumalter. Zahlreiche Studien, von denen hier nur ein Auszug aufgeführt ist, zeigen diese Veränderungen im Wuchsverhalten und den Klimasignalen verschiedener Bäume (Röhle, 1987; Eckstein und Krause, 1989; Kahle, 1994; Dittmar u. a., 1997; Cescatti und Piutti, 1998; Biondi, 2000; Neumann, 2001; Briffa u. a., 2002; Dittmar u. a., 2003; Dobbertin und Giuggiola, 2006; Beck, 2007; Blaschke und Cech, 2007; Bolte u. a., 2008).

Divergenz-Problem

In der Dendroklimatologie wird seit einigen Jahren das Problem der Divergenz (divergence problem) in nördlichen Wäldern diskutiert. Untersuchungen der Temperatur-Sensitivität in circumpolaren, borealen Wäldern führten zu dem Ergebnis einer gesunkenen Klimasensitivität in den letzten Jahrzehnten, wodurch es bei Klimarekonstruktionen anhand von Jahrring-Proxys zu einer bedeutenden Unterschätzung des aktuellen Temperaturanstiegs kommt. Daraus wurde gefolgert, dass auch rekonstruierte Temperatur-Anstiege in der Vergangenheit möglicherweise unterschätzt worden sind. Ursachenforschung wurde in zahlreichen Gebieten betrieben: temperaturbedingter Trockenstress, unterschiedlich zeitlich bedingte Reaktionen der Bäume auf die globale Erwärmung, verzögerte Schneeschmelze und damit verknüpfte Änderungen in der Saisonalität, *global dimming* (ein Phänomen, das in den letzten Jahrzehnten auftauchte, wonach die

photosynthetisch nutzbare Strahlung reduziert ist) bis hin zu methodischen Ursachen bei der Standardisierung und Chronologiebildung der Zuwachsreihen (Wilmking u. a., 2005; Wilson u. a., 2007; D'Arrigo u. a., 2008). Die anscheinend gesunkene Temperatur-Sensitivität beruht jedoch wahrscheinlich auf einer methodischen Ungenauigkeit. Das Kollektiv der Zuwachszeitreihen, die in die Chronologiebildung einfließen, zeigt entgegengesetzte Klimasignale, die, zu einer Mittelkurve zusammengefasst, die Klimasensitivität unterschätzen. Eine Mehrheit der Bäume zeigt eine deutlich erhöhte Sensitivität seit den letzten Jahrzehnten. Der Grund für die stark unterschiedlichen Reaktionen des Kollektivs liegt wahrscheinlich in der erhöhten Empfindlichkeit aufgrund der globalen Erwärmung gegenüber mikrostandörtlichen Bedingungen (Wilmking u. a., 2005). Daraus geht hervor, dass die verstärkte Witterungsabhängigkeit der letzten Jahrzehnte ein weltweites, baumartenunabhängiges Phänomen ist.

2.2 Konkurrenzuntersuchungen in Mischbeständen

Die natürliche Walddynamik und Bestandesstruktur in Mischwäldern stellen im Vergleich zu gleichaltrigen Reinbeständen eine Herausforderung für die Untersuchung von Konkurrenzverhältnissen dar (Schütz, 1989). Geprägt wird diese Dynamik entscheidend von der interspezifischen Konkurrenz der beteiligten Baumarten (Otto, 1994). Die Effizienz der Raumbesetzung gilt als ein Kriterium für die Konkurrenzkraft. Zu deren Bewertung wurden zahlreiche Konkurrenzindizes entwickelt. Zur Einschätzung der Kronenkonkurrenz als Maß für die relative oberirdische Raumbesetzung zwischen Konkurrenten eignen sich geometrische Konkurrenzindizes (Ammer, 1996; Bachmann, 1998). Die Konkurrenzsituation, der ein einzelner Baum ausgesetzt ist, ergibt sich aus den Dimensionen benachbarter Bäume und den Abständen zwischen Bezugsbaum und den umgebenden Bäumen, welche z.B. durch einen Suchkreis als Konkurrenten definiert werden (Tomé und Burkhardt, 1989; Holmes und Reed, 1991; Biging und Dobbertin, 1992; Pretzsch, 1992, 1995).

Bisherige Untersuchungen zum Konkurrenzverhalten in Buchen-Fichten-Mischwäldern wurden in bewirtschafteten Beständen durchgeführt, die häufig durch Pflanzen von Buchenverjüngungen in lückiger Anordnung entstanden sind (Röhrig, 1980; Kramer, 1988). Aus den Ergebnissen zeigt sich ein ausgleichendes Wuchsverhalten beider Baumarten in Raumbesetzung und Ressourcenerschließung, wodurch die interspezifische Konkurrenz reduziert wird und sich sogar die Produktivität steigern kann (Kelty, 1992). In Mischwäldern nutzen beide Arten i.d.R. den verfügbaren Wuchsraum effizienter als in Reinbestän-

den, weil sich die Kronen beider Baumarten enger verzahnen (Kennel, 1965a,b; Pretzsch, 1992), und die Wurzeln sich in unterschiedlichen Bodentiefen differenzieren. Dazu reagieren Mischungen im Wachstum unempfindlicher auf Schwankungen der Bestandesdichte als Reinbestände und zeigen ein stabileres Zuwachsverhalten (Pretzsch, 2003b). Die Wachstumsreduktion einer Baumart wird oft durch ein gesteigertes Wachstum der anderen Baumart kompensiert (Pretzsch, 2003a). Nach Untersuchungen im Harz von Otto (1985) hat die Buche sogar einen stimulierenden Effekt auf das Wachstum der Fichte, wohingegen das Buchenwachstum durch herrschende Fichten gehemmt wurde.

Dendroökologie in der Konkurrenzforschung

In ertragskundlichen Untersuchungen wird in der Regel der Höhenzuwachs als das Maß für die Konkurrenzkraft verwendet, da die Konkurrenz um Lichtvorteile im Vordergrund steht (Kramer, 1988; Schütz, 1989). Am lebenden Baum lässt sich der Höhenzuwachs jedoch nur wenige Jahrzehnte in die Vergangenheit anhand von Triebbasisnarben rekonstruieren (Roloff, 1989). Langfristige Höhenzuwachtrends lassen sich nur durch aufwändige Stammanalysen herleiten (Kramer und Kätsch, 1982). Doch besteht grundsätzlich ein Zusammenhang zwischen Radial-, Höhen- und Grundflächenzuwachs (Fischer und Rommel, 1989; Worbes u. a., 1992). Neuere Untersuchungen belegen die große Bedeutung dieser retrospektiven Zuwachsanalysen für die Beschreibung der Konkurrenzdynamik in Mischbeständen (Worbes u. a., 1992; Bonn, 1998, 2000). Weitgehend zerstörungsfrei können so jahrgenau die Zuwächse bis zu mehrere Jahrhunderte in die Vergangenheit rekonstruiert werden. Jahrringe sind grundsätzlich gut auszuwerten und zu quantifizieren, aber sie integrieren viele Informationen verschiedener Umwelteinflüsse wie Witterung, Umweltverschmutzung, Insektenkalamitäten oder Grundwasserschwankungen (Wrobel und Eckstein, 1997). Dennoch wirken diese kleinstandörtlich in gleicher Form auf die Bäume einer Art, so dass direkte Vergleiche der mittleren Zuwächse zweier Arten desselben Standorts zulässig sind (Bonn, 1998). Zudem erfolgt die Bewertung des Konkurrenz-erfolges meist über Zuwachsangaben, die u. a. durch Jahrringanalysen erhoben werden (Pretzsch, 2002). Mit Hilfe von Jahrringanalysen konnte die Konkurrenzdynamik sowohl intra- als auch interspezifisch nachgewiesen werden (Bonn und Roloff, 2002).

Die meisten der bisherigen Diskussionsbeiträge zur Konkurrenz zwischen Buche und Fichte gehen von konstanten Standortsbedingungen über mehrere Waldgenerationen hinweg aus. Tatsächlich sind zahlreiche Standorte mehr oder weniger starken Veränderungen unterworfen (Spiecker u. a., 1996). Für Fichten in Schweden (Elfving u. a., 1996; Eriksson und Karlsson, 1996) sowie für Buche und Fichte in Deutschland (Pretzsch,

2 Stand des Wissens - Überblick

1996; Sterba, 1996; Unthelm, 1996) konnten ansteigende Zuwachstrends nachgewiesen werden. Um langfristige Tendenzen zu erkennen, muss die Dynamik der Standorte berücksichtigt werden, was mit dendroökologischen Methoden unter Berücksichtigung der Bestandesgeschichte und -behandlung retrospektiv über Jahrzehnte bis Jahrhunderte möglich ist (Fritts und Swetnam, 1989; Swetnam u. a., 1999; Bonn, 1998, 2000; Rolstad u. a., 2002; Bonn und Roloff, 2002).

3 Material und Methoden

3.1 Material

3.1.1 Untersuchungsflächen

Zur Beantwortung der gestellten Fragen werden Naturwälder gewählt, die sich möglichst lange ohne menschlichen Einfluss entwickeln konnten. Drei der vier Untersuchungsflächen befinden sich in Südschweden an der nördlichen Verbreitungsgrenze der Buche.

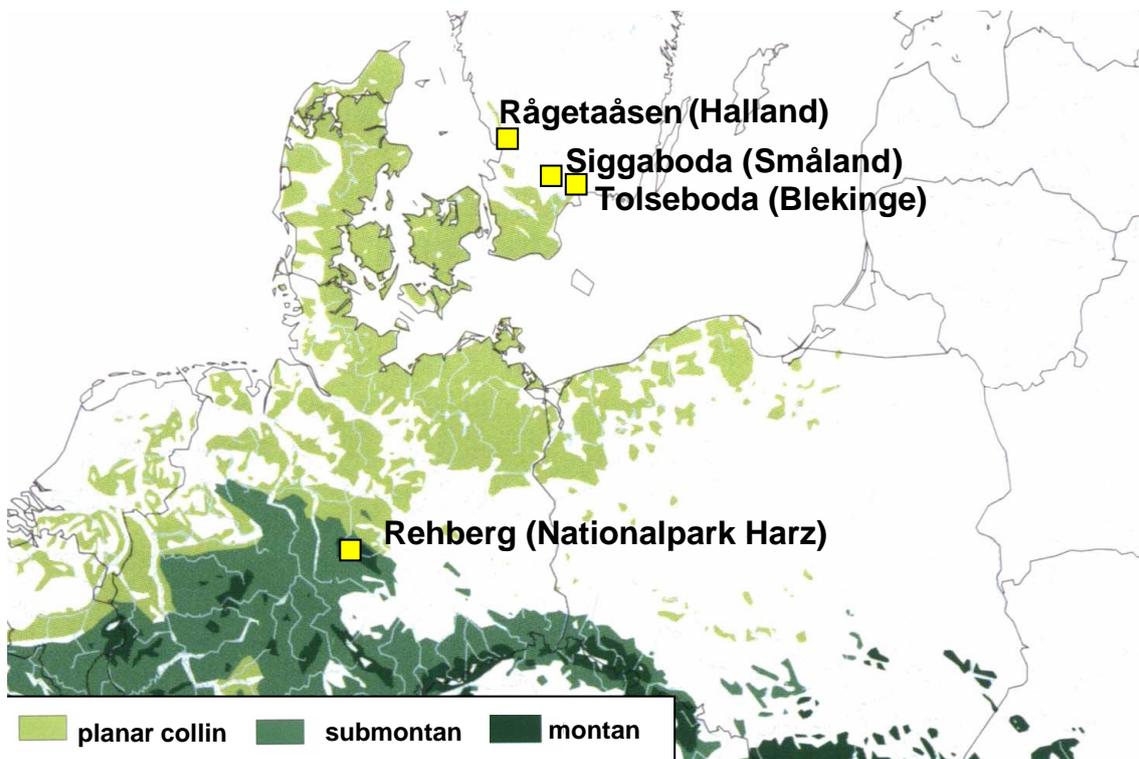


Abbildung 3.1: Natürliche Buchenwaldverbreitung (Bohn und Neuhäusl 2003); Standorte der 4 Untersuchungsflächen

Eine Untersuchungsfläche liegt im Südwesten Schwedens in der Nähe der Stadt Halmstad im Naturreservat Rågetaåsen (Halland), zwei Flächen liegen im Südosten nahe

3 Material und Methoden

Karlshamn in den Naturschutzgebieten Siggaboda (Småland) und Tulseboda (Blekinge), siehe Abbildung 3.1. Eine vierte Fläche befindet sich im montanen Bereich im Nationalpark Harz im Revier Rehberg. Diese Fläche dient als Vergleichsfläche gegenüber den schwedischen Standorten. Die Entstehungsgeschichte dieser Fläche liegt leider nicht vor. Eine detailliertere Betrachtung der Verbreitungsgrenzen natürlicher Waldgesellschaften in Südschweden liefert Abbildung 3.2. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich die beiden Standorte Tulseboda und Siggaboda knapp oberhalb der Grenze für Buchenwälder, aber innerhalb der Buchen-Fichten-Wälder befinden. Der Standort Rågetaåsen dagegen liegt noch innerhalb des Areals der Buchenwälder.

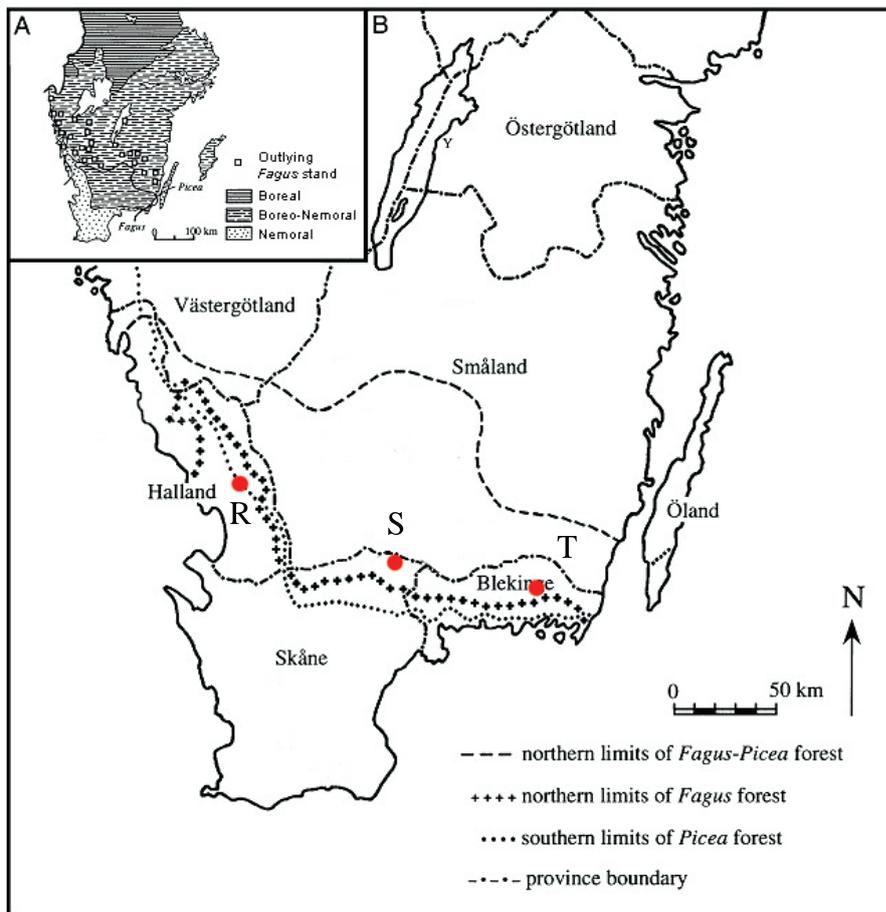


Abbildung 3.2: Verbreitungsgrenzen natürlicher Waldgesellschaften in Südschweden; rote Kreise=Untersuchungsflächen, R=Rågetaåsen, S=Siggaboda, T=Tulseboda; nach Lindquist (1931, 1959); Sjörs (1965)

Die wichtigsten Angaben zu den Standorten und den Beständen sind in Tabelle 3.1 dargestellt. Die Abbildungen 3.3 bis 3.6 geben Eindrücke der Untersuchungsflächen wider.

3 Material und Methoden

Tabelle 3.1: Standortsangaben der Untersuchungsflächen

	NW Rehberg	NW Rågetaåsen	NSG Siggaboda	NSG Tulseboda
Lage	Nationalpark Harz, Revier Rehberg, Abt. 550a und 580a	Provinz: Halland Kommune: Halmstad Gemeinde: Karlstorp 4 km N Karlstorp	Provinz: Kronoberg Kommune: Älmhult Gemeinde: Härlunda 10 km SO Härlunda	Provinz: Blekinge Kommune: Ronneby Gemeinde: Tving 1,5 km NNW Tulseboda
Region	Wuchsbezirk: montaner Mittel- und Oberharz	Moorreiche Westseite des Südschwed. Hochlandes	SO-Smålands Wald- u. Seengebiet	Blekinges Schluchttal-Terrain, Eichenwaldgebiet
Höhe über NN (m)	651-700	140-160	140-150	80-90
Exposition	SO	SO	wechselnd	S
Mittl.jährl. Lufttemp.(°C)	6,1	6,4	6,0	6,5
Mittl.Temp. Mai Sept.(°C)	12,3	12	12	13
Niederschlag, (mm/a)	1300	1200	700	650
Humusform	Rohhumusartiger Moder	Rohhumusartiger Moder	Rohhumusartiger Moder	Rohhumusartiger Moder
Ausgangssubstrat	Grauwacke, Hornfels, stellenweise geringe Anteile von Löß	Gneiss	Gneiss-Granit	Karlshamns-Granit
Bodenart	lehmiger Schluff	lehmiger Schluff	sandiger Lehm	lehmiger Schluff
Bodentyp	schwach podsolige Braunerde	podsolierte Braunerde	Braunerde-Podsol	Braunerde-Podsol
Wasser-versorgung	frisch	frisch	frisch	(grund)-frisch (Bachtal)
Nährstoff-versorgung	mäßig	schwach bis mäßig	schwach bis mäßig	schwach bis mäßig
Bestandesalter (Jahre)	Buche und Fichte 149 J.	Buche und Fichte über 130 J.	Buche bis 230 J., Fichte bis 210 J.	Buche > 200 J., Fichte bis 100 J.
Mischung Fi/Bu (%)	64/36	ca. 50/50	ca. 60/40	ca. 30/70
Bestockung (nach 2005)	dicht bis locker	dicht bis räumdig	locker bis räumdig	dicht bis lückig

3 Material und Methoden



Abbildung 3.3: Untersuchungsfläche am Standort Rehberg



Abbildung 3.4: Untersuchungsfläche am Standort Rågetaåsen

3 Material und Methoden



Abbildung 3.5: Untersuchungsfläche am Standort Siggaboda



Abbildung 3.6: Untersuchungsfläche am Standort Tulseboda

3 Material und Methoden

Auf den Untersuchungsflächen wurden zur Horizonteinteilung und Nährstoffanalyse Bodenproben entnommen (Tab. 3.2).

Tabelle 3.2: Analysewerte der Bodenproben; Sto. = Standort, Hz. = Horizont, B.art = Bodenart, Re = Rehberg, Si = Siggaboda, To = Tulseboda, Rå = Rågetaäsen

Sto.	Hz.	Tiefe [cm]	B.art	pH H ₂ O	pH KCl	FG g	TG g	N%	C%	C/N
Re	OL	+ 2	-	5,66	5,1	10	4,7	1,14	34,9	30,61
	OF	+ 5	-	5,71	5,22	20,6	12,2	0,6	16,57	27,62
	OH	+ 2	-	5,62	4,68	32,3	20,5	0,38	8,54	22,47
	Ahe	0 - 8	Us	5,52	4,41	36	25,4	0,22	4,44	20,18
	Bh(s)	8 - 24	Uls	5,2	3,73	59,1	41,7	0,17	3,63	21,35
	Bv	24 - 46	Uls	5,04	4,04	73,3	56	0,1	2,68	26,80
	Cv	46 +	Uls	-	-	-	-	-	-	-
Si	OL	+ 1	-	4,88	4,54	16,1	8,8	1,43	46,45	32,48
	OF	+ 2	-	4,43	3,61	27,1	8,2	1,62	46,82	28,90
	OH	+ 8 - 10	-	3,79	2,95	37,2	11,2	1,5	46,44	30,96
	Ahe	0 - 10	Slu	4,06	3,4	91	80,6	0,26	7,84	30,15
	Bvhs	10 - 16	Slu	4,51	3,63	102	93,2	0,11	3,02	27,46
	BvCv	16 - 45 +	Slu	4,67	3,86	97,2	89,2	0,1	2,62	26,20
To	OL	+ 1	-	5,38	5,02	15,8	8,8	1,4	42,47	30,34
	OF	+ 1	-	5,09	4,74	31	13,3	1,45	37,4	25,79
	OH	+ 2	-	4,36	3,82	38,1	19,1	1,78	36,66	20,60
	Ahe	0 - 7	Uls	3,99	3,17	114,5	101,2	0,12	3,6	30,00
	Bhs	7 - 10	Uls	4,29	3,37	91,4	77,3	0,14	3,49	24,93
	Bvs	10 - 18	Uls	4,51	3,72	112,6	96,5	0,12	3	25,00
	BvCv	18 - 40 +	Uls	4,73	4,02	124,8	113,4	0,15	4,39	29,27
Rå	OL	+ 1	-	5,13	4,92	18,6	6,9	1,52	43,21	28,43
	OF	+ 1	-	4,54	3,91	28,6	8,7	1,98	47,04	23,76
	OH	+ 3 - 4	-	4,38	3,34	40,7	12,2	1,45	34,65	23,90
	Ahe	0 - 5	Uls	5,14	4,41	73,7	35,7	0,71	16,36	23,04
	Bvhs	5 - 10	Uls	5,04	4,51	71,7	39,2	0,51	12,62	24,75
	BvCv	10 - 50 +	Uls	5,08	4,79	89,3	62,3	0,11	2,38	21,64

In jedem der vier Naturwälder wurde in Anlehnung an das Kernflächenkonzept der niedersächsischen Naturwaldforschung (NFVA, 1999) eine Kernfläche von 1 ha eingerichtet. Ein Rasternetz von 20 x 20 m² wurde dauerhaft mit Holzpflocken markiert (Abb. 3.7). Auf der gesamten Fläche wurde der Derbholzbestand (BHD > 7cm) hinsichtlich Baumart, Durchmesser und Polarkoordinaten erfasst. Auf einem inneren Quadrat von 60 x 60 m² wurden zusätzlich Baumhöhe, Höhe des Kronenansatzes, Höhe der größten Kronenausdehnung und die Kronenschirmfläche (8-Punkt-Kronenablotung) erhoben.

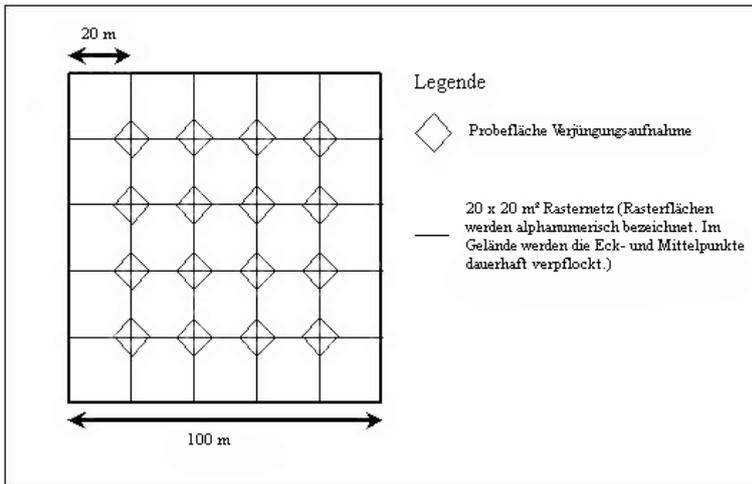


Abbildung 3.7: Kernfläche und weitere Unterteilung nach den niedersächsischen Naturwaldaufnahmen (NFVA 1999, verändert)

3.1.2 Untersuchungsgruppen

Die Untersuchungen zur Bestandesdynamik zwischen Buchen und Fichten erfolgten an direkten Konkurrenzsituationen zwischen und innerhalb der Arten in Naturwäldern. Dazu wurden je Bestand acht Untersuchungsgruppen (im Folgenden *Plots* genannt) ausgeschieden, bei denen jeweils ein Baum als Zentralbaum von Konkurrenten umstanden war (Abb. 3.8).

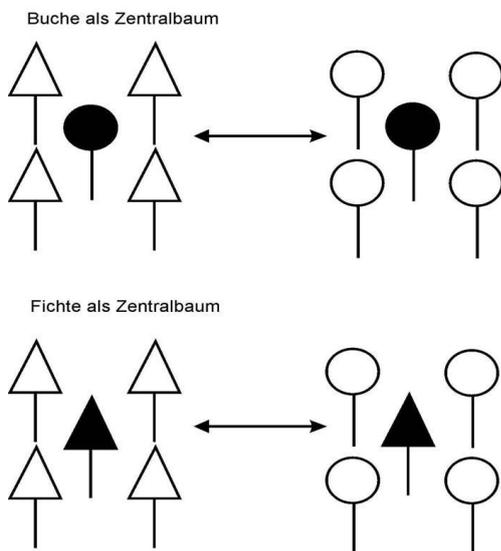


Abbildung 3.8: Schematische Darstellung der Konkurrenz-Konstellationen

3 Material und Methoden

Die kreisförmigen Kronen stehen hier für Buchen, die dreieckigen für Fichten. In der Regel sollte der Zentralbaum eines Plots noch an der Kronenkonkurrenz teilnehmen, doch dies konnte nicht in allen Fällen gewährleistet werden, da die Bäume meist in Kleingruppen aufwachsen und nur an den Grenzen solcher Kleingruppen verschiedener Arten diese modellhaften Konstellationen auftreten. Zum Konkurrenten wurde ein Baum durch Kronenkontakt mit dem Zentralbaum oder in einzelnen Fällen durch maßgebliche Lichtkonkurrenz. Die Abbildungen 3.9 und 3.10 zeigen beispielhaft die interspezifischen Konkurrenzsituationen auf den Untersuchungsflächen.



Abbildung 3.9: Beispiel eines Plots mit einer Fichte als Zentralbaum umringt von Buchen



Abbildung 3.10: Beispiel eines Plots mit einer Buche als Zentralbaum umringt von Fichten

3 Material und Methoden

Je Standort bildete in dreifacher Wiederholung eine Buche den Zentralbaum eines Plots und war umstanden von Fichten, in weiteren drei Plots war eine Fichte umringt von Buchen. Je einmal wurde die intraspezifische Konkurrenz untersucht. In einzelnen Fällen befanden sich Plots nicht innerhalb der Kernfläche, da die gewünschte Konkurrenzsituation nicht aufzufinden war, doch in unmittelbarer Nähe. Von jedem Baum wurden der BHD und die Höhe gemessen, die soziologische Klasse nach Kraft und die Vitalität nach Roloff (2001) eingeschätzt. Weiterhin wurden besondere Merkmale wie Stammfäulen, Schleimfluss oder sonstige Schäden vermerkt. In den ausgewählten Plots fanden die Bohrkernentnahmen zur Analyse des radialen Wachstums statt.

Bei der Auswahl von Probebäumen zur Analyse des standörtlichen Wuchspotentials einer Baumart sollten möglichst die sozial stärksten Bäume der Klassen 1 und 2 nach Kraft (1884) beprobt werden (Lorimer u. a., 1999). Das Wachstum dieser Bäume wird neben standörtlichen Bedingungen maßgeblich von klimatischen Einflüssen geprägt. Konkurrenz durch benachbarte Bäume ist weitestgehend ausgeschlossen. Doch werden ausschließlich Bäume der stärksten sozialen Klassen beprobt, wird das durchschnittliche standörtliche Wuchspotential einer Baumart deutlich überschätzt (Cherubini u. a., 1998; Dittmar und Elling, 2007), sowie Schädigungsgrade unterschätzt. Andererseits stellte Neumann (2001) lediglich einen leichten Rückgang der Korrelationen bei Witterungszuwachs-Beziehungen bis hin zu Baumklasse 4 fest. In dieser Untersuchung soll neben dem standörtlichen Wuchsverhalten das Augenmerk jedoch auch auf die ökologischen Bestandsverhältnisse zwischen den Baumarten gelenkt werden. Daher sind neben sozial starken Probebäumen auch schwächere Bäume der Kraftschen Klassen 3 bis 5 ausgewählt und beprobt worden (Tab. 3.3). Bis auf die Baumart Buche am Standort Siggaboda und die Fichte in Rågetaåsen nehmen die sozial starken Bäume den Hauptanteil der beprobten Bäume von mindestens 68 % ein.

Tabelle 3.3: Anteile der Probebäume in Prozent [%] nach sozialen Klassen

Kraft	Rehberg		Rågetaåsen		Siggaboda		Tolseboda	
	Buche	Fichte	Buche	Fichte	Buche	Fichte	Buche	Fichte
1 - 2	70,8	85,7	68,0	56,0	48,1	69,6	78,3	72,0
3 - 4	29,2	14,3	32,0	40,0	48,1	30,4	21,7	28,0
5				4,0	3,7			

3.1.3 Bohrkernentnahme und Präparation

Probenentnahme

Für die Untersuchungen des radialen Wachstums der Bäume wurden mit Hilfe eines 40 cm langen Zuwachsbohrers nach Pressler je Baum zwei Bohrkernentnommen. Die Bohrungen wurden an Baumabschnitten vorgenommen, die möglichst frei von Ästen, Wunden oder Wuchsanomalien waren. Die Proben wurden soweit möglich gegenüberliegend entnommen, bei Hangneigung (Harz, Rehberg) hangparallel, um Reaktionsholz auszuschließen. Die Entnahme fand in einer Höhe von 1,3 Metern statt. Abweichungen von der Bohrhöhe wurden nur vorgenommen, wenn die örtlichen Gegebenheiten (Felsen etc.) es verlangten oder in dieser Höhe der Baum kein gesundes Holz aufwies. In einzelnen Fällen musste die Bohrung deutlich tiefer ausgeführt werden, um Fäule und Hohlräumen auszuweichen. Krause (1992) bestätigt außerdem durch ihre Ganzbaumanalysen an Buchen, Fichten, Eichen und Kiefern, dass die höchste durch Klima erklärte Varianz in den unteren Stammbereichen gefunden werden kann. Aus zwei mittleren Radien eines Baumes, bzw. abweichend dem größten und kleinsten Radius, wurde anschließend eine Baummittelkurve gebildet. Je Bestand und Baumart wurden mindestens 15 Bäume beprobt, um eine statistisch abgesicherte Standorts-Chronologie erstellen zu können. Diese Zahl wird nach Schweingruber (1983) als ausreichend bewertet. Wurde diese Zahl mit den Bäumen der Untersuchungsgruppen nicht erreicht, wurden zusätzlich Bäume außerhalb der Untersuchungsgruppen beprobt, um die Standorts-Chronologie statistisch gesichert bilden zu können. Die Anzahlen der Bohrkernentnahmen je Standort sind in Tabelle 3.4 dargestellt.

Tabelle 3.4: Anzahl an Bohrkernen und Probeebäumen

	Baumart	Rehberg	Rågetaåsen	Siggaboda	Tolseboda	Summe
Kerne	Fichte	42	45	44	43	174
	Buche	51	46	54	47	198
	gesamt	93	91	98	90	372
Bäume	Fichte	21	30	23	27	101
	Buche	27	27	28	26	108
	gesamt	48	57	51	53	209

Präparation der Bohrkerne

Unter einem Stereomikroskop wurden die Bohrkerne so ausgerichtet, dass die Zellen im Querschnitt betrachtet werden konnten. Denn nur im Querschnitt lassen sich auch sehr schmale und undeutliche Jahrringgrenzen erkennen (Abetz, 1960). Anschließend mussten die Kerne mit Holzkleber auf Holzbretter mit eingefrästen Nuten geklebt und getrocknet werden. Auf einem Bandschleifgerät wurden die Proben beginnend mit einer Körnung des Schleifpapiers von 80 in sechs Schritten bis 400 geschliffen. Anschließend konnten die Buchenkerne mit Hand bis 600er Körnung weiter geschliffen werden, da die feinen Gefäße der Buche so deutlicher zu erkennen sind. Diese Methode zur Aufbereitung von Bohrkernen ist lange bewährt (Iseli und Schweingruber, 1989; Yamaguchi und Brunstein, 1991).

3.1.4 Klimazeitreihen

Die Klimaanalysen wurden mit den Variablen Temperatur und Niederschlag durchgeführt. Die Klimadaten liegen in Form von Monatsmittelwerten für die Temperatur und in Monatssummen für den Niederschlag vor. Für jeden Standort wurde die nächstgelegene Klimastation mit den längsten durchgehenden Aufzeichnungen gewählt. Die wichtigsten Angaben zu den Klimastationen sind in Tabelle 3.5 nachzulesen.

Die Distanz zwischen den Standorten Siggaboda und Tulseboda und der ausgewählten Klimastation Växjö ist überdurchschnittlich hoch, doch aufgrund der Kürze der Aufzeichnung von nähergelegenen Stationen musste auf Växjö zurückgegriffen werden.

Prüfung und Korrektur der Klimazeitreihen

Fehlende Messdaten wurden mit entsprechend angepassten Werten aus der nahe gelegenen Klimastation Karlshamn ergänzt. Nach einem Vergleich der monatlichen Gesamtmittelwerte der Niederschlagssummen von Karlshamn und der zu ergänzenden Station wurde auf die fehlenden Werte der monatlich abweichende Prozentsatz hinzugerechnet. Bei fehlenden Temperaturwerten wurden die monatlich im Durchschnitt etwas niedrigeren Werte Karlshamns um die monatliche Differenz zu der zu ergänzenden Station erhöht. Der windbedingte Messfehler bei den Niederschlagsdaten der Stationen Clausthal-Zellerfeld, Växjö, und Halmstad wurden nach Richter (1995) korrigiert. Dieser jahreszeitlich variierende systematische Fehler der Niederschlagsmessung hat seine Ursache in

3 Material und Methoden

Tabelle 3.5: Angaben zu den Klimastationen, T = Temperatur, N = Niederschlag

Probenstandort	Klimastation	Beginn der Aufzeichnungen (bis 2005)	Beginn der Chronologie (bis 2005) [Bu/Fi]	Entfernung zum Probenstandort [km]	Höhe der Station [ü.NN]	Höhe des Probenstandorts [ü.NN]
Rehberg, Harz	Clausthal-Zellerfeld (T/N)	1885	1870/1876	16	560 - 570	651 - 700
Rägetaåsen	Halmstad (T/N)	1860	1908/1945	20	10 - 20	146 - 160
Siggaboda	Växjö (T/N)	1860	1737/1877	48	170 - 180	140 - 150
	Lund (N)	1753		118	40 - 45	
	Uppsala (T)	1774		420	15 - 20	
Tolseboda	Växjö (T/N)	1860	1736/1871	68	170 - 180	80 - 90
	Lund (N)	1753		155	40 - 45	
	Uppsala (T)	1774		420	15 - 20	

der Niederschlagsumverteilung vom Sommer- in das Winterhalbjahr oder umgekehrt. In weiten Teilen Deutschlands wurde diese Umverteilung in den letzten drei Dekaden spürbar. Dies führt bei konstanter *wahrer* Jahresniederschlagshöhe und konstanter mittlerer Windgeschwindigkeit zu einer künstlich verringerten Jahresniederschlagsmenge. Dieser Fehler beträgt nach Richter in Deutschland im Sommer grob gemittelt 10 %, im Winter dagegen ca. 25 % der wahren Niederschlagsmenge. Dieser Unterschied resultiert aus Art und Stärke des fallenden Niederschlages sowie der Windgeschwindigkeit, die einen mehr oder weniger ausgeprägten Jahresgang besitzt. Daher wird nach einer jahreszeitlichen Niederschlagsumverteilung weniger Niederschlag aufgefangen als zuvor.

Stationarität und Homogenität Stationarität bedeutet, dass die statistischen Charakteristika einer Zeitreihe zeitlich invariant sind (Schönwiese und Malcher, 1985). Die Ursachen einer Nicht-Stationarität klimatologischer Zeitreihen können meteorologisch und nichtmeteorologisch sein. Im letzteren Fall wird von Inhomogenitäten in der Zeitreihe gesprochen. Eine mögliche meteorologische Ursache können Änderungen der atmosphärischen Zirkulation sein. In solch einem Fall spricht man von der Homogenität einer Zeitreihe, da es sich um eine meteorologische Ursache handelt, jedoch ist sie gleichzeitig

3 Material und Methoden

nichtstationär. Inhomogenitäten dagegen lassen sich an Unterschieden zwischen Zeitreihen nahegelegener Stationen erkennen und beziehen sich auf lokale, nicht zur Messgröße gehörende Einflüsse an einer Station (z.B. Geräteveränderung oder Stationsverlegung). Durch eine verlässliche Dokumentation der Stationsgeschichte ließen sich Inhomogenitäten leicht aufdecken, doch diese liegen in den seltensten Fällen vor. Daher greift man auf die statistische Homogenitätsprüfung zurück, derer es zwei Varianten gibt: absolute und relative Homogenitätstests. Die ersteren beruhen nur auf einer Klimareihe und sind dementsprechend unsicher. Dagegen vergleichen die relativen Tests benachbarte Stationen oder Gebietsmittelwerte als Referenzdatenreihen.

Als vorbereitende Analyse zur Homogenitätsprüfung wird zunächst die Stationarität mittels folgenden Tests überprüft:

$$st \approx \pm s \times \sqrt{\frac{n}{m \times (m - 1)}} \quad (3.1)$$

Hierbei sind s die Standardabweichung, n die Stichproben und m die Anzahl der Filtergewichte. Aufgrund des elfjährigen Sonnenfleckenzyklus wird mit 11 Filtergewichten gerechnet.

Die verschiedenen Verfahren der Homogenitätsprüfung weisen gewisse Vor- und Nachteile auf. Daher ist es empfehlenswert, mehrere Tests anzuwenden. In dieser Arbeit fanden folgende vier Tests Anwendung: die Homogenitätsprüfung nach Abbe, Buishand und Alexandersson und die Doppelsummenanalyse. Die zugehörigen Formeln finden sich im Anhang.

Die Stationarität der Klimastation Clausthal-Zellerfeld konnte durch die Tiefpassfilterung nachgewiesen werden. Weiterhin wurden die Temperatur- und die Niederschlagsdaten auf Homogenität geprüft. Für die Station Clausthal-Zellerfeld diente Hannover (Flugwetterwarte) als Referenzstation. Die numerischen Prüfungen nach Abbe, Buishand und Alexandersson belegen mit einer Signifikanz von 90 % die Homogenität der aufgezeichneten Daten. Auch die grafische Prüfung mittels Doppelsummenlinie bestätigt die Homogenität. Für die schwedischen Klimastationen lag keine homogene Datenreihe als Referenz vor, doch kann bei den vorliegenden Daten aufgrund geringer Schwankungen und Unregelmäßigkeiten innerhalb der Reihen von einer ausreichenden Homogenität ausgegangen werden.

Interkorrelation Besteht eine Interkorrelation innerhalb der Klimazeitreihen, wie z.B. in den Sommermonaten in Europa üblicherweise Temperatur und Niederschlag negativ korrelieren, ist es notwendig diese zu identifizieren und entsprechende Variablen vor einer Klima-Zuwachs-Analyse zu entfernen. Diese Überprüfung fand mit der Statistik-Software *R* statt.

3.2 Methoden

3.2.1 Datierung und Synchronisation der Jahrringzeitreihen

Die Proben wurden zunächst unter dem Stereomikroskop durch einfaches Auszählen der Jahrringe vordatiert. Auf diese Weise können jedoch undeutliche und schmale Jahrringgrenzen, wie sie auf ungünstigen Standorten oder aufgrund widriger Witterungsbedingungen vorkommen können, leicht übersehen werden. Weitere Schwierigkeiten für die korrekte Datierung von Bohrkernen können sich aus verschiedenen Wuchsbedingungen der Bäume ergeben. Herrschen in einer Vegetationsperiode sehr ungünstige Bedingungen, kann es vorkommen, dass das Kambium seine Tätigkeit einstellt und ein bis mehrere Jahrringe partiell oder komplett ausfallen (Elling, 1987). Solche fehlenden oder auskeilenden Jahrringe verfälschen die Datierung. Bei unterdrückten Bäumen hat Hartig dieses Phänomen schon 1869 beschrieben. Neben ungünstigen Witterungsbedingungen werden verschiedene Ursachen, wie Immissionen, Entlaubung durch Insektenepidemien, Spätfröste oder Sommerdürren genannt. Grundsätzlich werden Assimilate zunächst in den lebensnotwendigen Bereichen des Baumes, der Krone und den Wurzeln angelegt bevor die Holzmasse erweitert wird (Hartig, 1891). Ausfallende Jahrringe als Fehlerquelle bei der Datierung benennen viele Autoren (Nägeli, 1935; Pollanschütz, 1980; Nogler, 1981; Nagel und Athari, 1982; Schweingruber u. a., 1986; Wätzig und Fischer, 1988; Bonn, 2000; Piovesan u. a., 2003).

Sind die Wachstumsbedingungen im Spätsommer sehr widrig, kann die Buche kleine, dickwandige Spätholzzellen bilden. Daran angrenzend kann sie jedoch bei günstigeren Bedingungen wiederum dünnwandigere, weitlumigere Zellen bilden. Der Übergang zwischen den unterschiedlich gestalteten Zellen kann eine Jahrringgrenze vortäuschen (Schweingruber, 1983). Diese so genannten Dichteschwankungen bergen weitere Schwierigkeiten bei der Datierung. Aufgrund dieser Fehlerquellen ist die Methode des bloßen Auszählens der Jahrringe lediglich eine grobe Orientierungshilfe für das nachfolgende Messen der Jahrringbreiten.

3 Material und Methoden

Das Messen erfolgte mit einem LINTAB Linearmesstisch mit einer Genauigkeit von 1/100 mm. Des Weiteren wurde die Software TSAP (Rinntech, Heidelberg) für die Verarbeitung der digitalen Messdaten verwendet. Von jedem beprobten Baum konnten zwei Radien gemessen werden, welche anschließend zu einem gemittelten Zuwachsverlauf zusammengefügt wurden. Die Notwendigkeit dieser Mittelung begründet sich in dem über den Radius unterschiedlich stark ausgeprägten Dickenwachstum des Baumes. Es ermöglicht in vielen Fällen einseitig ausgefallene oder auskeilende Jahrringe zu identifizieren.

Aus den Baummittelkurven einer Baumart kann schließlich eine Standorts-Chronologie gebildet werden. Sie repräsentiert das durchschnittliche Zuwachsverhalten von wenigstens 15 Bäumen einer Art desselben Standortes (Schweingruber, 1983). Mittels *cross-dating* (Cook und Kairiukstis, 1990) kann die Synchronlage zweier Wachstumskurven ermittelt werden. Dieses Verfahren ermöglicht eine jahrgenaue Datierung von Holzproben und das Auffinden von möglichen Fehlern sowie ausgefallene oder falsche Jahrringe in den gemessenen Kurven. *Cross-dating* wird mit zwei grundsätzlich verschiedenen Methoden durchgeführt: Visuell und statistisch. Das visuelle Vergleichen von möglichen Synchronlagen zweier Kurven ist unverzichtbar für die Datierung von Holzproben und nachfolgende Zeitreihen-Analysen. Trotz der mannigfaltigen statistischen Berechnungsmöglichkeiten ist das menschliche Auge ein äußerst wichtiges Kriterium.

Einige der wichtigsten statistischen Parameter, die in dieser Untersuchung Anwendung fanden, sollen hier kurz erläutert werden. Die Gleichläufigkeit wurde als besonderes Mittel zum *cross-dating* von Eckstein und Bauch (1969) entwickelt. Sie drückt aus, wie häufig der Zuwachstrend gegenüber dem des Vorjahres zwischen zwei zu vergleichenden Wachstumskurven gleiche Tendenzen aufweist. Die Gleichläufigkeit stellt in Prozent dar, wie viele Intervalle über den gesamten überlappenden Zeitraum steigend, fallend oder gleichbleibend sind. Mit Formel 3.2 wird die Gleichläufigkeit berechnet. Aussagekräftig sind diese Werte jedoch erst im Zusammenhang mit den Überlappungslängen der zu untersuchenden Kurven. Eckstein und Bauch (1969) errechneten eine notwendige Gleichläufigkeit von mindestens 65 % bei einer Überlappungslänge von 100 Jahren, um eine korrekte Synchronlage mit einer statistischen Sicherheit von 99 % zu bestätigen. Verkürzt sich die Überlappungslänge auf 50 Jahre, so steigt die benötigte Gleichläufigkeit auf mindestens 70 %.

$$GLK = \sum (y_{ij} = x_{ij}) \quad (3.2)$$

3 Material und Methoden

Neben der alleinigen Änderung des Vorzeichens spielt auch die Stärke der Zuwachsveränderung eine Rolle. Diese wird bei der Berechnung der empirischen Korrelationen (nach Bravais-Pearson) berücksichtigt (Formel 3.3).

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \times (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \times \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3.3)$$

Die Berechnung von t-Werten beachtet die unterschiedlichen Überlappungslängen der Einzelkurven mit der Chronologie. Weiterhin berücksichtigen t-Werte im Gegensatz zu Gleichläufigkeiten die Anzahl der zu vergleichenden Wertepaare. Aus dem zuvor berechneten Korrelationskoeffizienten r , wird der Student´s t-Wert mit Formel 3.4 errechnet. Die empirische Irrtumswahrscheinlichkeit der t-Werte wird mittels 2-seitigem Test berechnet.

$$t = |r| \times \sqrt{\frac{n-2}{1-r^2}} \quad (3.4)$$

Langfristige Trends sollten vor der t-Wert Berechnung entfernt werden. Baillie und Pilcher (1973) nutzen dazu ein 5jähriges gleitendes Mittel als Ausgleichskurve. Zur Umwandlung der schiefen Werteverteilung in eine Normalverteilung werden anschließend alle Werte logarithmiert.

Zum Vergleich und zur erhöhten Sicherheit bei der Synchronisierung wurde neben dem Student´s t-Wert und dem t-Wert nach Baillie und Pilcher ein weiterer t-Wert nach Hollstein (1980) hinzugezogen. Er unterscheidet sich allein in der Indexierung der Ausgangskurven. Hollstein verwendet den sogenannten Wuchswert. Er berechnet sich als Logarithmus der Differenz zweier aufeinanderfolgender Jahrringbreiten.

Ein sehr nützliches Instrument der Synchronisation ist der Cross-Date Index (CDI, Rinn). Er kombiniert die Ergebnisse einer t-Wert Analyse mit den Werten der Gleichläufigkeit, indem er die über die gesamte Zeitreihe greifende Wuchstrendbetrachtung mit der Sensitivität des t-Werts auf einzelne Extremwerte verbindet. Der CDI bietet daher die Möglichkeit, die Güte einer möglichen Synchronlage zweier Kurven auf einen Blick einzuschätzen, da er die Vorteile des t-Wertes mit denen der Gleichläufigkeit gemeinsam darstellt. In der zugehörigen Formel 3.5 steht G für eine Kombination von Berechnungen

der Gleichläufigkeit und T für einen Wert aus dem t-Wert nach Baillie und Pilcher und dem nach Hollstein.

$$CDI = \frac{(G - 50 + 50 \times \sqrt{\frac{overlap}{maxoverlap}}) \times T}{10} \quad (3.5)$$

Zur Überprüfung der korrekten Synchronisation fand die Software COFECHA (Holmes, 1983) Anwendung. Dieses Programm erstellt aus den Baummittelkurven eine Master-Chronologie und testet jede Einzelkurve an dieser. Es überprüft die Synchronlage für Abschnitte von jeweils 25 Jahren Länge mit 5 jähriger Überlappung und vergleicht die gewählte Lage mit anderen möglichen, so dass auch einzelne schlecht synchronisierte Bereiche einer Einzelkurve aufgedeckt werden können. COFECHA erstellt die Master-Chronologie mittels einer Spline-Funktion individuell angepasst über 32 Jahre, wodurch die jeweilige Varianz der Baummittelkurven auf 50 % reduziert wird. Anschließend wird zur Entfernung der Autokorrelation innerhalb der Zeitreihen, einer jahrringübergreifenden Nachwirkung von Signalen, eine Autoregressive Modellierung angewendet (Grissino-Mayer, 2001). Auf diese Weise wurden störende langfristige Trends entfernt. Nach der Überprüfung der Baummittelkurven jeden Standorts konnten einzelne leichte Fehler bei der Synchronisation aufgespürt und berichtigt werden. Im Anschluss wurde die rohe Chronologie jeder Baumart für jeden Standort durch einfache Mittelwertbildung erstellt.

Modifizierte Methode des Cross-datings

Die einzelnen Baummittelkurven einer Art können mit Hilfe der statistischen Berechnungen und des optischen Vergleichs synchronisiert und zu einer Chronologie zusammengefügt werden. In dieser Untersuchung konnte diese Methode für sämtliche Fichten auf allen Standorten angewendet werden. Doch für die Buchen auf den Standorten Siggaboda und Tulseboda musste sie modifiziert werden. Aufgrund zahlreicher ausgefallener und auskeilender Jahrringe war es in vielen Fällen nicht möglich, eine Baummittelkurve aus den zwei Radien zu erstellen. Daher mussten diese Bäume zurückgestellt werden und aus wenigen Messreihen, die statistisch und optisch korrekt synchronisiert werden konnten, eine erste noch nicht statistisch ausreichend abgesicherte Standorts-Chronologie generiert werden. Mit dieser vorläufigen Chronologie wurde dann einer der beiden Radien eines unsicheren Baumes synchronisiert und fehlende Jahrringe konnten somit identifiziert werden. Anschließend wurde der zweite Radius an den nun korrekt datierten

angepasst und um die fehlenden Jahrringe korrigiert. Auf diese Art und Weise konnten alle Baummittelkurven erstellt und die Standorts-Chronologie nach und nach ergänzt werden (Grundmann u. a., 2008). Anschließend durchliefen auch diese Baummittelkurven eine Überprüfung durch COFECHA mit weiteren notwendigen Korrekturen und der Mittelung zu einer rohen Chronologie.

3.2.2 Statistische Analysen der Standorts-Chronologien

Neben deskriptiven Details einer rohen Standorts-Chronologie wie Länge, minimale, durchschnittliche und maximale Jahrringbreite, Variation und Standardabweichung spielen zwei Eigenschaften eine übergeordnete Rolle bei der Interpretation des Wachstums.

Sensitivität

Ein Maß für die Empfindlichkeit und Reaktionsfähigkeit eines Baumes auf Umwelteinflüsse soll mit der Sensitivität bereitgestellt werden. Hierbei wird die Stärke der Reaktionen anhand der Jahrringbreiten zweier aufeinanderfolgender Jahre betrachtet. Eine stark variierende Wachstumskurve wird als sensitiv bezeichnet. Der Einfluss der Umweltfaktoren ist deutlich zu erkennen. Sind die Reaktionen gemäßigter, wird das Wachstum als gleichförmig (*complacent*) bezeichnet. Errechnet wird die Sensitivität mit der Formel 3.6 und kann theoretisch Werte zwischen > -2 bis $< +2$ annehmen (Fritts, 1976).

$$S_{i+1} = \frac{(x_{i+1} - x_i) \times 2}{(x_{i+1} + x_i)} \quad (3.6)$$

Hierbei sind S_{i+1} die Sensitivität im Jahr $i+1$ und x_i der Zuwachs im Jahr i . Die mittlere Sensitivität (Formel 3.7) wird berechnet, um die Stärke der Umwelteinflüsse an einem Standort beurteilen zu können. Sie ist das arithmetische Mittel der Summe der Jahressensitivitäten und wird in Prozent angegeben. Hierbei sind \bar{S} die mittlere Sensitivität und n die Anzahl der Ringbreitenwerte.

$$\bar{S} = \frac{\sum_{i=2}^n |S_i|}{n - 1} \quad (3.7)$$

Autokorrelation

Die Witterungsbedingungen einer Vegetationsperiode haben Auswirkungen auf den laufenden Zuwachs eines Baumes, doch ebenso auf die Anreicherung von Speicherstoffen für die folgende Vegetationsperiode. Daher ist bei vielen Baumarten zu beobachten, dass eine mittelbare Abhängigkeit zwischen der Breite eines Jahrringes von der des Vorjahres besteht. Bei günstigen Witterungsbedingungen ist es dem Baum möglich, einen breiten Jahrring zu produzieren und gleichzeitig genug Speicherstoffe zu bilden, so dass auch der folgende Jahrring von großer Breite sein kann. Dies existiert natürlich ebenso im umgekehrten Fall.

Um die Stärke dieses Zusammenhangs beziffern zu können, wird die Autokorrelation berechnet. Hierbei wird eine Zeitreihe phasenverschoben mit sich selbst korreliert. Die Autokorrelation 1. Ordnung (r_1) wird mit Formel 3.8 nach Neumann (2001) berechnet. Sie spiegelt die mittlere, lineare Abhängigkeit eines Zuwachswertes von dem des Vorjahres wider. Eine Autokorrelation kann für beliebig viele Jahre phasenverschoben errechnet werden. Ein indirekter Zusammenhang kann auch zu weiter zurück liegenden Jahren bestehen.

$$r_1 = \frac{\sum_{t=2}^u (Z_t - m_Z) \times (Z_{t-1} - m_Z)}{(s - 1) \times s_Z} \quad (3.8)$$

Hierbei sind Z die Zeitreihe mit den Anfangs- und Endzeitpunkten $t = 1$ und $t = u$, dem Mittelwert m_Z und der Standardabweichung s_Z .

3.2.3 Methoden der Klima-Zuwachs-Analysen

Die Jahrringe eines Baumes bestehen aus einer Vielzahl von Signalen, die von Cook (1990) auf folgende Weise trefflich dargestellt wurden (Formel 3.9). Eine Jahrringserie besteht vereinfacht aus einer linearen Aggregation vieler Unterserien, die folgendermassen zusammengefasst werden können:

$$R_t = A_t + C_t + \delta D1_t + \delta D2_t + E_t \quad (3.9)$$

Hierbei ist:

- R_t = beobachtete Jahrringserie
- A_t = Alterstrend
- C_t = klimatische Einflüsse
- $D1_t$ = lokale, endogene Störungseinflüsse
- $D2_t$ = bestandesweite, exogene Störungseinflüsse
- E_t = weitgehend unerklärliche Variation von Jahr zu Jahr

Das δ bei den Elementen $D1$ und $D2$ ist ein binärer Indikator für die Anwesenheit ($\delta = 1$) oder das Fehlen ($\delta = 0$) einer dieser möglichen Störungseinflüsse zu einer Zeit t . Somit besteht eine Zeitreihe wenigstens immer aus A_t , C_t und E_t . Nun gilt es für die gewählte Untersuchung die entsprechenden Signale herauszuarbeiten und das unerwünschte Rauschen zu entfernen. Als Teil der Indexierung oder Standardisierung von Jahrringserien für dendroklimatologische Untersuchungen muss der geschätzte Zuwachstrend G_t entfernt werden. Analog zu Formel 3.9 stellt sich dieser so dar:

$$G_t = f(A_t, \delta D1_t, \delta D2) \quad (3.10)$$

Der geschätzte Zuwachstrend G_t ist demnach eine Funktion des reinen Alterstrends und möglichen Störeinflüssen. Diese Komponenten sind gänzlich unabhängig vom Klima und sind somit als Rauschen zu interpretieren (Fritts, 1976).

Durch die Standardisierung entsteht ein relativer Jahrringindex, der um den definierten Mittelwert 1,0 schwankt und eine möglichst konstante Varianz aufweist. Dies wird erreicht mittels Division der beobachteten Jahrringbreiten durch die erwarteten Werte, die durch G_t geschätzt werden. Das entspricht:

$$I_t = R_t/G_t \quad (3.11)$$

wobei I_t der relative Jahrringindex ist.

Standardisierung der Zuwachszeitreihen

Es werden in der Dendroökologie zahlreiche verschiedene Verfahren zur Trendbereinigung und Standardisierung der Zuwachszeitreihen angewendet. Für die folgende Untersuchung fand das von Holmes u. a. (1986) und Cook und Kairiukstis (1990) erprobte und allgemein akzeptierte zweistufige Verfahren Anwendung. In Stufe 1 wird zunächst eine deterministische Funktion angepasst. Die einfachste Funktion ist hier die lineare Regression.

$$G_t = b_0 + b_1 t \quad (3.12)$$

b_0 ist hierbei der Schnittpunkt mit der y-Achse, b_1 der Anstieg der angepassten linearen Regression und t steht für die Zeit in Jahren von 1 bis n . Diese einfachste Form der Trendbereinigung fand jedoch nur Anwendung, wenn keine negative Exponentialfunktion angepasst werden konnte, die nach Fritts (1963) in folgender Form variiert wurde:

$$G_t = a \exp^{-bt} + k \quad (3.13)$$

Hierbei sind a , b und k Koeffizienten der nichtlinearen Regressionsfunktion über der Zeit t . In Einzelfällen konnte keiner der beiden Funktionen an die Zuwachszeitreihe angepasst werden, so dass die generalisierte Exponentialfunktion nach *Hugershoff* (Bräker, 1981) angewendet wurde:

$$G_t = at^b \exp^{-gt} \quad (3.14)$$

3 Material und Methoden

Diese Funktion berücksichtigt den juvenilen Zuwachsanstieg und die folgende exponentielle Abnahme der Jahrringbreiten. In Stufe 2 der Standardisierung wird eine stochastische Methode der Trendbereinigung, eine kubische Spline-Funktion, an jede einzelne Jahrringzeitreihe angepasst, um langwellige Zuwachsschwankungen zu eliminieren (Cook und Peters, 1981). Diese sind polynomische Funktionen mit einer an die Zeitreihe angepassten Anzahl von Wendepunkten, die an den Knotenpunkten angebunden sind.

Die Standardisierung der Zeitreihen wurde mit Hilfe der Software ARSTAN (Holmes u. a., 1986) durchgeführt. Im Ergebnis entsteht eine standardisierte Chronologie, welche jedoch in dieser Form für klimatologische Untersuchungen noch nicht geeignet ist. Die Zeitreihen, die in eine indexierte Standorts-Chronologie zusammengeführt werden, müssen noch von möglicher Autokorrelation befreit werden, da Signalwirkungen auf Folgejahre ausgeschlossen werden müssen, um ausschließlich das Klimasignal in der Chronologie zu belassen. Dies geschieht mittels autoregressiver Modellierung. In einem abschließenden Schritt wird die Varianz innerhalb der Zeitreihen stabilisiert, so dass im Endergebnis eine *Residual*-Chronologie entsteht, die als dimensionslose Indexreihe um den Wert 1 schwankt.

Eingang in die standardisierten Standorts-Chronologien fanden in der Regel nur Bäume der sozialen Klassen 1 und 2, da deren Zuwachsverhalten wenig durch Konkurrenz mit anderen Bäumen beeinflusst wird wie dies bei unterdrückten Bäumen der Fall ist. Ausnahmen bilden die Buchen-Chronologien der schwedischen Standorte. Hier mussten einzelne Bäume der Kraft'schen Klasse 3 mit eingebunden werden, da zu wenige sozial stärkere Buchen auf den Standorten wachsen, um eine ausreichende Anzahl an Bäumen für eine gesicherte Standorts-Chronologie zu stellen. Die Buchen der Klasse 3 gehören zudem an den schwedischen Standorten zur Repräsentativität des Wachstums der Buchen dieser Standorte hinzu.

Beispiel einer Standardisierung für die Buchen vom Rehberg Hier wird nun anhand der Buchen des Standorts Rehberg die Methode der Standardisierung bzw. Indexierung in ARSTAN demonstriert. In Abbildung 3.11 ist auf der linken Seite die Trendbereinigung in Schritt 1 mittels einer angepassten, negativen Exponentialfunktion und die daraus resultierende Indexkurve zu sehen. Auf der rechten Seite ist ein Fall zu sehen, in dem keine negative Exponentialfunktion angepasst werden konnte, sondern auf eine einfache, lineare Regression zurückgegriffen wurde.

Auf der linken Seite in Abbildung 3.12 ist eine der selteneren Anwendungen der Hugerhoff'schen Formel im Standardisierungsschritt 1 zu sehen, in diesem Fall bei einer Buche

3 Material und Methoden

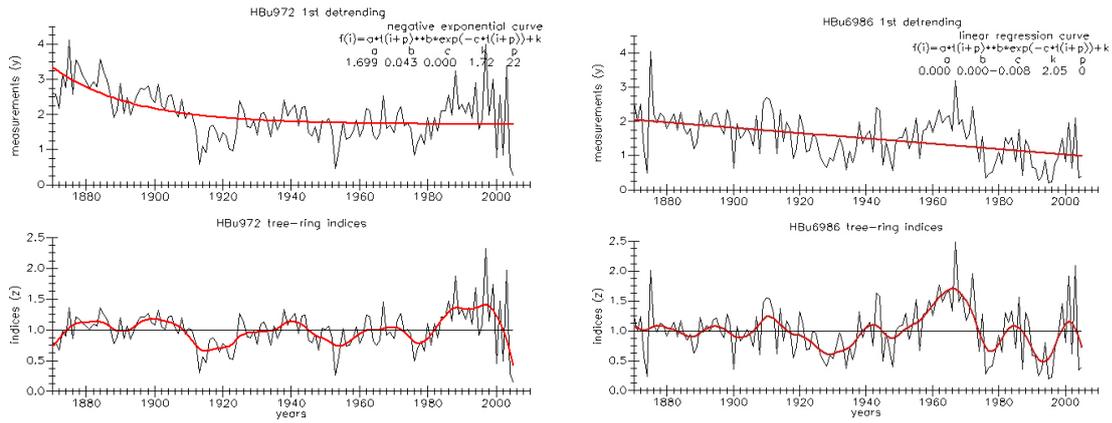


Abbildung 3.11: Trendbereinigung Schritt 1 mittels negativer Exponentialfunktion (links oben) und Indexkurve (links unten); mittels linearer Regression (rechts oben) und Indexkurve (rechts unten)

des Standortes Siggaboda. Auf der rechten Seite ist beispielhaft der Trendbereinigungsschritt 2 mittels einer kubischen Splinefunktion angepasst über 120 Jahre dargestellt, wie er bei allen Bäumen angewendet wurde.

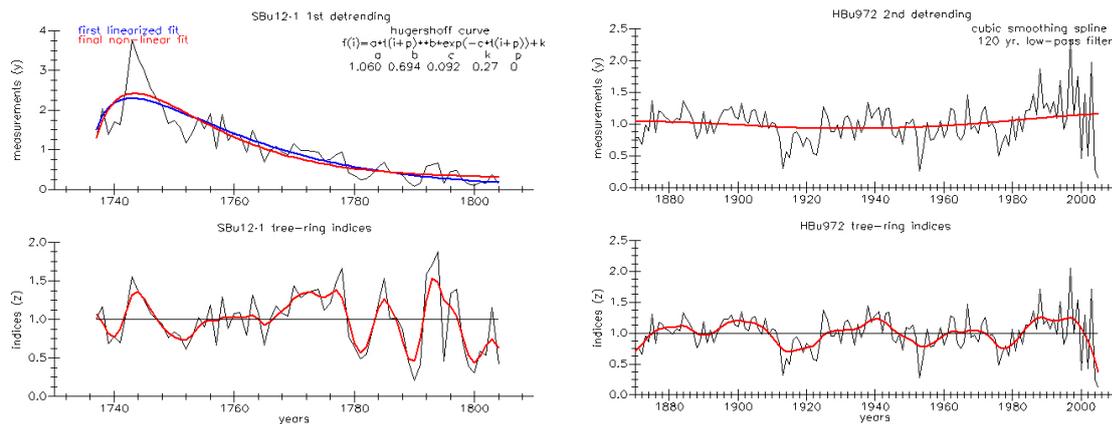


Abbildung 3.12: Trendbereinigung Schritt 1 mittels Hugershoffscher Formel (links oben) und Indexkurve (links unten); Trendbereinigung Schritt 2 mittels kubischer Splinefunktion über 120 Jahre (rechts oben) und Indexkurve (rechts unten)

In Abbildung 3.13 ist nun auf der linken Seite die rohe Chronologie zu sehen, darunter die Standard-Chronologie, in die alle Zuwachskurven integriert sind, nachdem sie beide Schritte der Trendbereinigung durchlaufen haben. Unten ist die Belegung der Chronologie dargestellt. Auf der rechten Seite ist oben die Residual-Chronologie abgebildet, die aus den Zuwachskurven besteht, die nach der Trendbereinigung nun auch von Autokorrelation befreit sind und deren Varianz stabilisiert wurde. Darunter ist die Arstan-Chronologie dargestellt, die in der vorliegenden Untersuchung keine Verwendung

3 Material und Methoden

gefunden hat, da sie für freistehende Bäume konzipiert wurde.

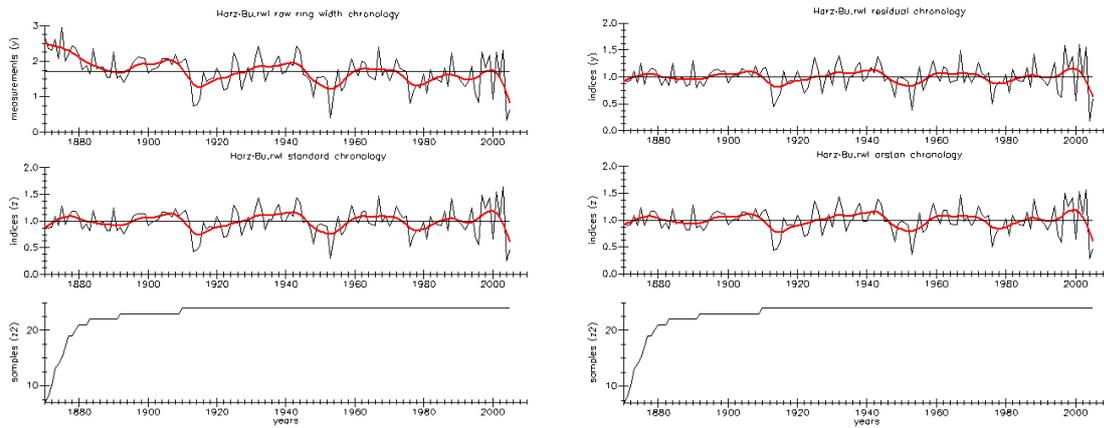


Abbildung 3.13: Rohe Standorts-Chronologie (links oben), Standard-Chronologie (Mitte) und Belegung der Chronologie (unten); Indexierte Residual-Chronologie (rechts oben), Arstan-Chronologie (Mitte) und Belegung der Chronologie (unten)

Prüfung der Zuverlässigkeit der Chronologien

Es gilt die Stärke des gesuchten Signals in einer Indexreihe durch Methoden der Standardisierung zu maximieren. Das *Signal-to-Noise Ratio* (SNR) beschreibt den Anteil der durch klimatische oder andere Faktoren erklärbaren Variation in einer Chronologie geteilt durch den nicht erklärbaren Anteil (Formel 3.15). Je größer der Stichprobenanteil, also die Anzahl an Einzelbäumen, die in eine Standorts-Chronologie eingehen, desto geringer wird die individuelle Variation. Somit verstärkt sich das klimatische Signal und das SNR steigt (Fritts und Swetnam, 1989).

$$SNR = \frac{Signal}{Fehlervarianz} \quad (3.15)$$

Das SNR wird häufig als Maß für die Qualität einer Chronologie verwendet, doch aufgrund einer fehlenden Wertgrenze nach oben wird die Interpretation und auch der Vergleich von Chronologien erschwert. Eine andere Methode ist es, das Signal einer Chronologie als Verhältnis der Signalvarianz zur Gesamtvarianz der Chronologie auszudrücken. Dieses *Expressed Population Signal* (EPS, Formel 3.16) charakterisiert eine standardisierte Chronologie bezüglich des Grades, zu welchem sie die hypothetisch perfekte Chronologie wiedergibt (Briffa, 1984).

$$EPS = \frac{S}{S + \frac{1-S}{n}} \quad (3.16)$$

Das EPS kann theoretisch Werte von 0,0 bis 1,0 annehmen. Es gibt keinen Schwellenwert, der einer Chronologie eine ausreichende Zuverlässigkeit und Güte zur Analyse von Klimasignalen bestätigt, doch wurde von Wigley u. a. (1984) der Wert von 0,85 festgelegt, eine ausreichende statistische Qualität zu belegen. Da beide Größen, SNR und EPS, Funktionen auf Basis der Größe der zugrunde liegenden Stichprobe darstellen und unmittelbar voneinander abhängig sind (Neumann, 2001), wurde in der vorliegenden Untersuchung das EPS zur Charakterisierung der Zuverlässigkeit der Chronologien verwendet. Die Berechnung wurde phasenweise über 50 Jahre mit einer 25-jährigen Überlappung mit der Software ARSTAN durchgeführt. Beim Standort Rågetaåsen musste aufgrund der Kürze beider Chronologien die Phasenlänge auf 10 Jahre mit einer Überlappung von 5 Jahren verkürzt werden.

Klima-Zuwachs-Analysen

Zusammenhänge zwischen den standardisierten Jahrringbreiten und den Klimavariablen monatliche Niederschlagssumme und Monatsmittel der Temperatur wurden mit Hilfe der Software *Dendroclim2002* (Biondi und Waikul, 2004; Biondi, 1997) berechnet. Dieses Programm ist ein statistisches Hilfsmittel, um Zusammenhänge zwischen Zuwachs und Klimavariablen zu berechnen. Anwendung finden hierbei lineare Korrelationen, Einzelwertzerlegungen, lineare Regressionen sowie Elemente der Hauptkomponentenanalyse (*principal component analysis*). Das Signifikanzniveau der Korrelationskoeffizienten wird mit Konfidenzintervallen nach der Bootstrap-Methode überprüft und beträgt 95%. So können die wachstumsbestimmenden Monate jeweils für das aktuelle und das vorangegangene Jahr bestimmt werden. Doch zu beachten ist hierbei, wie bei jeder statistischen Analyse, bei der der Erwartungswert jährlich aufgelöst ist und die Einflussvariablen monatlich, dass das Ergebnis nicht besagt, in welchem Monat ein größerer Einfluss auf das Baumwachstum besteht. Lediglich die Variabilität der monatlichen Werte wird quantifiziert, die wiederum Einfluss auf die Variabilität des Baumwachstums hat (Biondi, 1997). Daher müssen die ermittelten signifikanten Korrelationskoeffizienten anschließend an ihre Berechnung aus ökologischer und physiologischer Sicht auf ihre Plausibilität hin geprüft werden. Berechnet wurden die monatlichen Korrelationen jeweils für Temperatur und Niederschlag vom Januar des Vorjahres bis zum Dezember des aktuellen Jahres. Nach einer ersten Interpretation der Ergebnisse wurde zur weiteren Auswertung eine

3 Material und Methoden

Zeitspanne vom Juni des Vorjahres bis zum Oktober im Jahr der Ringbildung gewählt. Innerhalb dieser Zeitspanne kann ein klimatischer Einfluss auf das Baumwachstum öko-physiologisch möglich sein. In der vorliegenden Untersuchung wurde auf die Auswertung der ebenfalls durch *Dendroclim* ermittelten response functions verzichtet, da sie keine höhere Aussagekraft als einfache Korrelationen besitzen (Eckstein, mündl.).

Neben der Analyse von Klima-Wachstums-Beziehungen anhand von Korrelationen werden ergänzend Gleichläufigkeiten und t-Werte zwischen den Wachstums- und Klimakurven berechnet. Im Gegensatz zu der Korrelation berücksichtigt der t-Wert die Anzahl der zu vergleichenden Wertepaare. Die Berechnungen werden jeweils getrennt für die mittlere Monatstemperatur und monatliche Niederschlagssumme, nach einer Zusammenfassung mehrerer Monate über die Vegetationsperiode hinweg durchgeführt, um einer Saisonalität der Witterungseinflüsse gerecht zu werden: März-April, März-Mai, März-Juni, März-Juli, März-August, April-Mai, April-Juni, April-Juli, April-August, Mai-Juni, Mai-Juli, Mai-August, Juli-August und Januar-Dezember. Weiterhin werden entsprechend den Korrelationsanalysen auch Temperatur- und Niederschlagskurven einzelner Monate auf ihre Gleichläufigkeiten und t-Werte untersucht. Das Signifikanzniveau der t-Werte wird mittels 2-seitigem Test geprüft und in drei Stufen von Irrtumswahrscheinlichkeiten unterteilt: $\alpha = 0,001 \rightarrow 1$; $\alpha = 0,01 \rightarrow 2$; $\alpha = 0,05 \rightarrow 3$. In den Fällen, in denen eine negative Korrelation zwischen der Temperatur und dem Wachstum besteht, werden zur Berechnung der Gleichläufigkeiten inverse Temperaturzeitreihen verwendet.

Mittels einer schrittweisen Regression, die rückwärts fortschreitend nicht signifikante Einflussvariablen ausschaltet, werden zur Bestätigung der Korrelationsanalyse die wesentlichen Witterungsvariablen je Baumart und Standort erfasst. Die Berechnung erfolgt durch die Statistik-Software *R*. Zunächst wird ein lineares Regressionsmodell errechnet, in das sämtliche Variablen der Temperatur und des Niederschlags vom Januar des Vorjahres bis zum Dezember des laufenden Jahres einfließen. Anwendung findet die Funktion *ols* (Ordinary Least Squares Linear Model). Im Ergebnis liefert das korrigierte Bestimmtheitsmass den Anteil der Varianz, der durch sämtliche Variablen in ihrer Gesamtheit erklärt wird. Im Anschluss werden nun in einer rückwärtsschreitenden Prozedur die jeweils nicht signifikanten Einflussvariablen aus dem Modell gelöscht bis die wesentliche, zuwachsbestimmende Größe übrigbleibt (Funktion *fastbw* aus dem Paket *Design* nach Harrel). Dieses Verfahren ist AIC basiert (Akaike Information Criterion). Durch dieses Informationskriterium erhält man eine Aussage über die Güte der Anpassung des gewählten Modells, wobei die Anzahl der eingehenden Parameter strafend berücksichtigt wird. Daher sollte der AIC-Wert möglichst klein sein. Unterstützt werden die erhaltenen Ergebnisse zusätzlich durch eine Varianzanalyse (ANOVA).

Eine weitere Herangehensweise, um die Haupteinflussfaktoren zu ermitteln, ist die Funktion *RegTree* in *R*. Diesem Modell liegt ebenfalls ein schrittweises Prinzip zugrunde. Es berücksichtigt Probleme der möglichen Interkorrelation innerhalb der erklärenden Variablen oder eine möglicherweise nicht-lineare Beziehung zwischen der zu erklärenden und der erklärenden Variablen. Mittels Regressionsanalyse wird der Haupteinflussfaktor ermittelt und dessen Schwellenwert, durch welchen die Varianz der zu erklärenden Variable am besten wiedergegeben wird. In den anschließenden Schritten werden nun von diesem Schwellenwert ausgehend die übrigen Variablen betrachtet. Es wird berechnet, wieviel der Varianz bei hohen oder niedrigen Werten des Haupteinflussfaktors die nächstwichtigen Einflussgrößen erklären. Diese Schritte wiederholen sich anschließend mehrfach und werden im Ergebnis in einem Baumdiagramm dargestellt.

Klimaphasen

Durch die Berechnung von Korrelationen zwischen Klimavariablen und einer indexierten Standorts-Chronologie wird der durchschnittliche Zusammenhang über das gesamte bisherige Baumleben analysiert. Ergebnisse einer solchen Untersuchung täuschen jedoch eine gewisse Konstanz beider Parameter vor. Durch Unterteilung des Gesamtzeitraums können dynamische Veränderungen beider Variablen aufgedeckt werden.

Trennung 1950 Die Zeitreihen wurden in einer zweiten Untersuchung in zwei Abschnitte geteilt, um eine mögliche Änderung des Klimasignals im Baumwachstum über die Zeit nachzuweisen. Die Trennung wurde 1950 vorgenommen, um handhabbare Datensätze zu erzeugen und der Geschichte der gesellschaftlichen Entwicklung in Europa gerecht zu werden. Nach den zwei großen Weltkriegen erlebte die Wirtschaft in den Industrieländern einen rasanten Aufschwung. Im Zuge der Weiterentwicklung von Industrie und Technik erhöhten sich u.a. die Treibhausgasemissionen vorrangig durch Verbrennung fossiler Energieträger. Mit der Trennung der Zeitabschnitte in vor und nach 1950 soll der gesteigerten Luftverschmutzung und dem Anstieg der globalen Temperatur nachgegangen und mögliche Änderungen im Baumwachstum nachgewiesen werden. Die zwei Zeitabschnitte sehen wie folgt aus:

1. 1894 - 1949
2. 1950 - 2005

Um zwei gleichlange Abschnitte von in diesem Falle 56 Jahren zu untersuchen, beginnt der erste 1894. Eine Ausnahme bildet der Standort Rågetaåsen. Da die Chronologie der

Buche erst 1908 beginnt, verkürzt sich der erste Zeitabschnitt auf 42 Jahre. Eine Unterteilung der Chronologie der Fichten war aufgrund des Beginns 1945 nicht möglich.

Trennung nach globaler Klimaerwärmung Werden in den vorangegangenen Untersuchungen mögliche Trendwechsel in der Klimaabhängigkeit des Baumwachstums entdeckt, sollen diese Ergebnisse mit einer weiteren Untersuchung von Klima-Zuwachskorrelationen gestützt werden.

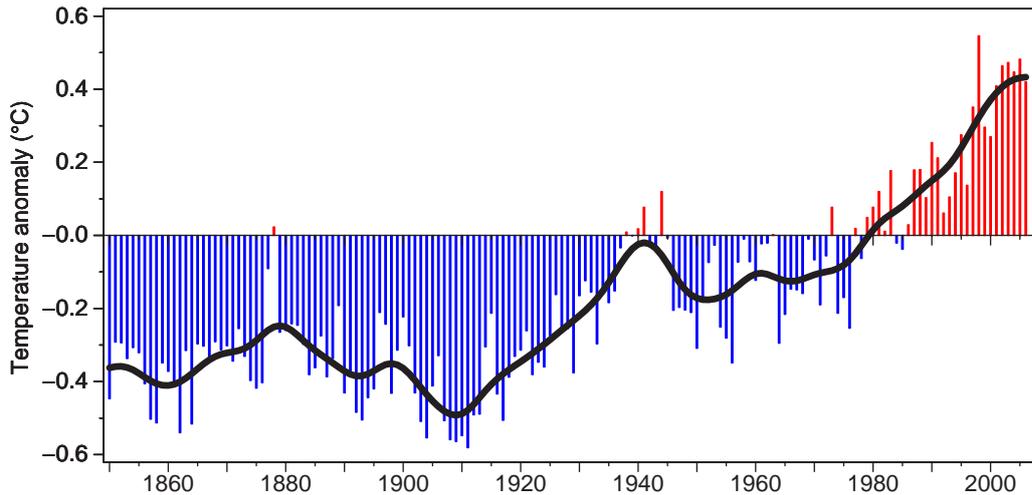


Abbildung 3.14: Globale, gemittelte Lufttemperatur, Jahreswerte und über 11 Jahre gemittelter Verlauf. Die Null-Linie stellt als Bezugswert die gemittelte globale Temperatur des Zeitraumes 1961-90 dar. Quelle: Hadley Centre, 2006

Die Trennung der zu untersuchenden Zeit-Phasen geschieht hier nach dem Gesichtspunkt der globalen Klimaerwärmung. Rahmstorf und Schellnhuber (2006) stellen in Abbildung 3.14 den gemittelten globalen Temperaturanstieg seit 1850 dar. Genau betrachtet können vier Phasen unterschieden werden. Zunächst ist die Temperatur annähernd stagnierend von 1860 bis 1900, darauf folgt ein Anstieg der Temperatur bis 1940. Von 1940 bis etwa 1980 folgt erneut eine Phase der Stagnation und seither erfahren wir einen kontinuierlichen Anstieg der Temperaturen. Diese vier Phasen lassen sich in derselben Form in den vorliegenden Klimadatensätzen finden. Als Beispiel sei hier die Temperaturaufzeichnung der Klimastation Växjö in Abbildung 3.15 dargestellt.

Um eine Bestätigung der vorangegangenen Ergebnisse zu untermauern und zusätzlich eine mögliche Widerspiegelung dieses globalen Trends im radialen Wachstum der beprobten Bäume zu untersuchen, wurden die Zeitreihen in Abschnitte von 40 Jahren geteilt:

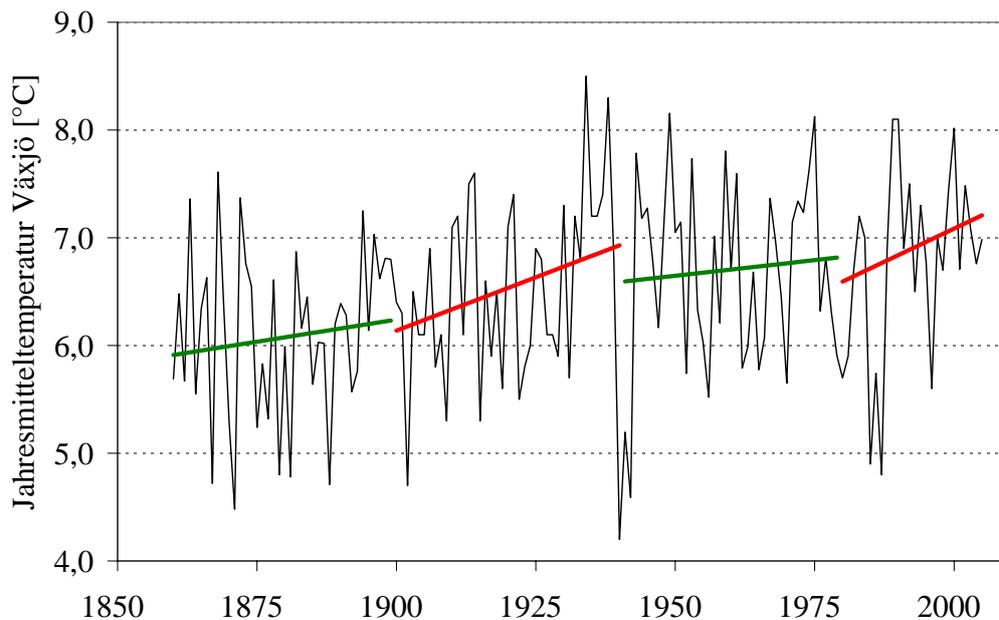


Abbildung 3.15: Jahresmitteltemperatur der Klimastation Växjö mit Regressionen der vier Phasen entsprechend der globalen Erwärmung

1. 1860 - 1899
2. 1900 - 1939
3. 1940 - 1979
4. 1965 - 2005

Der vierte Abschnitt überlagert sich mit dem dritten, da den letzten 40 Jahren ausgehend von 2005 besondere Bedeutung zukommt. Zeitabschnitte von 40 Jahren finden auch in der meteorologischen Forschung Anwendung und liefern ausreichend abgesicherte Ergebnisse. Aufgrund der unterschiedlichen Länge der Jahrringzeitreihen konnten nur für die Buchen der Standorte Tolseboda und Siggaboda alle vier Zeitabschnitte untersucht werden. Für die Buchen des Standortes Rehberg und die Fichten der Standorte Tolseboda, Siggaboda und Rehberg konnten bis auf den ersten Abschnitt alle analysiert werden. Da die Chronologie der Buchen in Rågetaåsen erst 1908 beginnt, wurde hier der erste Abschnitt entsprechend modifiziert:

1. 1908 - 1947
2. 1940 - 1979
3. 1965 - 2005

Die Chronologie der Fichten in Rågetaåsen beginnt erst 1945, so dass eine Unterteilung nicht möglich ist.

Moving Intervals Zur Unterstützung und Bestätigung der phasenweise getrennt berechneten Korrelationen finden *moving intervals* (Dendroclim2002) Anwendung. Mittels dieser können Veränderungen der Klimateinflüsse über die Zeit festgestellt werden. Bei dieser Methode werden eine festgelegte Anzahl von Jahren, in dieser Untersuchung 70 Jahre, beständig um ein Jahr versetzt über die Zeitreihe bewegt und Korrelationen und Regressionen berechnet. Nach der Zusammenfassung aller Einzelintervall-Ergebnisse kann ebenfalls eine Dynamik in den Klima-Wachstums-Beziehungen aufgedeckt werden.

Die Chronologien der Buchen der Standorte Telseboda und Siggaboda beginnen bereits 1736 bzw. 1737. Um diese lange Zeitspanne auch klimatisch untersuchen zu können, wurden zusätzlich monatliche Niederschlagssummen von der Klimastation in Lund (1753) und monatliche Temperaturmittel aus Uppsala (1774) herangezogen (Tab. 3.5). Die Entfernung zu den Probestandorten liegt deutlich über der üblichen Obergrenze für klimatische Untersuchungen und daher sollten die Ergebnisse differenziert betrachtet werden. Gerade Niederschläge sind in ihrer kleinräumigen Ausprägung sehr variabel. Dennoch wurden *moving intervals* mit diesen Daten berechnet, um die Klima-Zuwachs-Beziehungen bis in das 18. Jahrhundert verfolgen zu können.

Ereignis- und Weiserjahre

Unter besonderen Bedingungen kann ein Baum einen überdurchschnittlich breiten oder schmalen Jahrring ausbilden. Er wird nach Schweingruber u. a. (1990) als Ereignisjahr bezeichnet. Ist dasselbe Ereignisjahr in einem größeren Anteil der Bäume eines Bestandes zu finden, wird es als positives oder negatives Weiserjahr definiert. Das zuwachsbestimmende, klimatische Signal ist in diesen Jahren besonders stark ausgeprägt. Auch Insektenkalamitäten oder andere vom Normalzustand stark abweichende Umweltbedingungen können Ereignis- und Weiserjahre auslösen.

Weiserjahre sind ein hilfreiches Mittel zur Datierung und Synchronisation von Zeitreihen. Zunächst werden sie allein nach subjektiven Kriterien ausgeschieden. Ist ein Jahrring z.B. doppelt oder halb so breit wie benachbarte und tritt er bei wenigstens 50 % der beprobten Bäume auf, dient er als Weiserjahr zum vorläufigen Datieren der Bohrproben (Bonn, 1998).

Zur rechnerischen Ermittlung von Weiserjahren wurden die Chronologien der vorliegenden Untersuchung mit Hilfe eines 13-jährigen gleitenden Mittels von langfristigen Trends bereinigt, damit allein die klimatischen Signale in der Wachstumskurve betrachtet werden können. Ein 13-jähriges gleitendes Mittel wurde entsprechend Cropper (1979) gewählt. Diese Filterung hat einen geringen Einfluss auf sensitive Zuwachsreihen, jedoch einen größeren auf ausgeglichene (*complacente*) Zeitreihen, die für die Identifizierung von Weiserjahren komplizierter sind. Die nach der Filterung entstandene Ausgleichskurve wird wiederum mit der ursprünglichen Chronologie in Beziehung gesetzt. Weicht diese nun in einem Jahr um einen festgesetzten Schwellenwert von der Ausgleichskurve ab, wird das Jahr als positives bzw. negatives Weiserjahr ausgewiesen. In der Regel wurde der Schwellenwert bei 30% über bzw. unter dem Ausgleichswert festgelegt. Eine Ausnahme gibt es bei den Fichten am Standort Rågetaåsen. Hier wurde der Schwellenwert auf 15% gesenkt, da aufgrund der niedrigen Sensitivität der Chronologie (Kap. 4.2.3) bei einem Wert von 30% nur ein Weiserjahr ausgeschieden worden wäre. Dittmar und Elling (2007) verwendeten ebenfalls einen Schwellenwert von 30%, jedoch im Bezug auf die vorangegangenen 10 Jahrringe.

Da Weiserjahre meist Reaktionen auf Witterungsereignisse zeigen, wurden für jede Chronologie die jeweils sechs stärksten positiven wie negativen Weiserjahre mit der Methode der Einzeljahranalyse (Dittmar und Elling, 1999) untersucht. Sie wurden mit den jeweiligen Monatswerten von Temperatur und Niederschlag in Beziehung gebracht, wodurch die am stärksten beeinflussenden Witterungsereignisse nach Monat und Klimavariablen identifiziert werden konnten und die Weiserjahre individuell erklärt wurden. Unter Berücksichtigung der zuvor errechneten Korrelationen zwischen den Klimavariablen und der Jahrringbreite (Kap. 3.2.3) wurde nach Übereinstimmungen zwischen den Einzelfaktoranalysen und den Einzeljahranalysen gesucht. Für die Standorte Siggaboda und Tolseboda konnten ebenfalls Einzelereignisse wie z.B. Spätfröste in Betracht gezogen werden, da für die Klimastation Växjö Tagesminimal- und Tagesmaximalwerte zur Verfügung standen.

3.2.4 Analysen zur Konkurrenz zwischen den Baumarten

In dieser Studie wird mittels dendroökologischer Methoden die Konkurrenzsituation von Buche und Fichte auf den Untersuchungsflächen analysiert (vgl. Kap. 2.2). Zur Beschreibung der Konkurrenz zwischen Baumarten eignen sich in besonderem Maße Konkurrenzindizes. Eingang in deren Berechnung finden Eigenschaften der Bäume wie Höhe, BHD,

3 Material und Methoden

Abstand zu den Nachbarn, Kronendurchmesser oder Überlappung der Kronenschirmflächen. In ersten Voruntersuchungen ergab sich eine gute Eignung des positionsabhängigen Indexes nach Pretzsch (1992, 1995) zur Beschreibung der Konkurrenz. Die Berechnung dieser Indizes liegt auf der Seite des Projektpartners. Leider standen aufgrund zeitlicher Verzögerung zwischen den Arbeiten die Indizes für die vorliegende Arbeit nicht zur Verfügung. Daher muss auf eine vergleichende Interpretation der Indizes mit den dendroökologischen Analysen verzichtet werden.

Die beiden grundsätzlich leistungsstarken Baumarten befinden sich auf den Standorten in Südschweden an den Grenzen ihrer Verbreitungsgebiete. Somit ergibt sich die interessante Fragestellung nach einem möglichen Konkurrenzgleichgewicht zwischen den Arten. Anhand langjähriger Zuwachszeitreihen kann eine dynamische Entwicklung im vergangenen Konkurrenzgeschehen beleuchtet werden. Aus dieser Untersuchung lässt sich möglicherweise die Entstehung des heutigen Bestandesbildes erschließen. Ebenso können in der vergangenen Entwicklung gegebenenfalls Hinweise auf den zukünftigen Aufbau der Mischbestände erkennbar sein.

Für diese Fragestellungen wurden zunächst die Konkurrenzsituationen von Buche und Fichte auf der Bestandesebene betrachtet. Dies geschieht mittels der rohen Zuwachsreihen und den über 11 Jahre gebildeten Trends.

Zur Untersuchung des Konkurrenzgeschehens in unmittelbarer Nachbarschaft beider Baumarten wurden die Bäume in situ in direkten Konkurrenzsituationen ausgewählt (Kap. 3.1.2). Anhand dieser Plots kann das Wachstum des Zentralbaumes mit dem seiner Konkurrenten verglichen werden. Für die Analyse mittels Zuwachszeitreihen kommt der sozialen Stellung der Bäume eine zentrale Bedeutung für die Konkurrenzsituation zu. Selten war es möglich, bei der Auswahl der Plots bei den gleichen Konkurrenzkonstellationen auch die gleichen sozialen Klassen vorzufinden. Daher werden die Konkurrenten eines Plots nach ihrer sozialen Klasse nach Kraft (Kraft, 1884) in eine wuchskräftigere Gruppe und eine geringer wuchskräftige unterteilt. Die Festlegung der Trennungsgrenze richtete sich nach dem individuellen Potential des Plots. In einigen Fällen war eine Unterteilung der Konkurrenten in zwei Gruppen nicht möglich, da nur eine Wuchsklasse auftrat. Bei diesen Plots wurde der Zentralbaum der Gruppe der Konkurrenten insgesamt gegenübergestellt. Zur Auswertung wurde das Wuchsverhalten des Zentralbaumes gegenüber der Gesamtheit seiner Konkurrenten und der beiden Wuchsgruppen im Detail betrachtet.

Eine Unterteilung der unterschiedlichen Wuchsgruppen der Konkurrenten eines Plots wurde auch mittels Clusteranalyse vorgenommen. Hierbei wurden die jeweils letzten 21

3 Material und Methoden

Jahre des Zuwachses betrachtet. Im Falle der längsten Zuwachsreihen der Buchen der Standorte Tolskeboda und Siggaboda wurden zur Angleichung die letzten 51 Jahre gewählt. Als Grundlage der Clusteranalyse zur Einteilung der Konkurrenten eignen sich die letzten Jahre des Zuwachses, da sich die soziale Stellung im Wesentlichen aus dem Wachstum der letzten 20-50 Jahren ergibt. Eingang in die Clusteranalyse fanden aus drei aufeinanderfolgenden Zuwachswerten gemittelte Werte jeweils zu Beginn der Zeitreihe, bei 25 %, bei 50 %, bei 75 % und am Ende der Reihe. Diese Mittelwerte repräsentieren den Zuwachsverlauf der Einzelbäume und ermöglichen eine Gruppenbildung. Nach Auswertung der Clusteranalyse ergab sich jedoch nicht die gewünschte klare Trennung zwischen den Wuchsgruppen. Dieses Ergebnis legt die Vermutung nahe, dass die soziale Klasse eines Baumes nicht wie eingangs vermutet allein durch die radialen Zuwächse der letzten Jahre zu erklären ist. Daher wurde für die Gruppenunterteilung auf die Baumklasse als unterscheidendes Merkmal zurückgegriffen.

Die Analysen wurden mit den rohen Zuwachskurven durchgeführt, um wichtige Einzeljahranalysen einschließen zu können. Zur Darstellung wird jedoch der Wachstumstrend über 11 Jahre gewählt, da er ein übersichtlicheres Bild des Zuwachsgeschehens vermittelt. In einzelnen Fällen werden dennoch zusätzlich die rohen Zuwachskurven dargestellt, wenn interessante Informationen durch die Trenddarstellung verborgen bleiben.

Das Zuwachsverhalten und die Sensitivität der Zentralbäume wurde nochmals gesondert betrachtet. Hierbei wurde untersucht, ob Zentralbäume derselben Art unter intraspezifischer Konkurrenz ein anderes Verhalten aufweisen als unter interspezifischer.

Im Anschluss an die detaillierten Auswertungen werden für jeden Standort je Konkurrenz-Konstellation gleichsinnige Reaktionen der Zentralbäume zusammengefasst. In der Summe können so trotz der unterschiedlichen sozialen Klassen der Zentralbäume Eindrücke gewonnen werden, wie sich die Konkurrenz-Situation zwischen den beiden Baumarten darstellt.

Weitere für das Verständnis der Konkurrenzbeziehungen wichtige Informationen lassen sich aus dem Zuwachsprozent vom langjährigen Mittel beider Arten und dem Verhältnis der mittleren Zuwächse der Fichte gegenüber der Buche gewinnen.

Um den möglichen klimatisch bedingten Zuwachsvorteilen einer Baumart aufzudecken, werden extreme Witterungsereignisse anhand der 20 schmalsten Jahreszuwächse untersucht. Auf diese Weise können vorstellbare Konkurrenzvorteile einer Baumart, resultierend aus der bereits gegenwärtigen, globalen Temperaturerhöhung, veranschaulicht werden.

4 Ergebnisse

4.1 Synchronisation der Jahrringserien

Insgesamt wurden 372 Bohrkerne ausgewertet (Tab. 3.4). In Tabelle 4.1 sind die wichtigsten Angaben zur Auswertung und Bearbeitung der Jahrringserien zu finden. In Spalte 3 sind die Gesamtanzahlen der sicher datierten Bäume, die zur Bildung der Standorts-Chronologien herangezogen wurden, angegeben.

Tabelle 4.1: Angaben zu Jahrringserien; Re = Rehberg, Rå = Rågetaåsen, Si = Siggaboda, To = Tulseboda, Art = Baumart, Chr. = Chronologie, R. = Ringe/Jahrringe

Sto.	Art	Sicher da- tierte Bäume	Nicht aus- wertbar	Alter n. schätz- bar	für Chr. geschnit- ten	nur 1 Bohr- kern	ergänzte R. ein Radius	ergänzte R. ges. Baum
Re	Bu	25	2	4			7	10
	Fi	21		9		1	3	
Rå	Bu	26	1	1	2	1	7	1
	Fi	30			1	1	1	
Si	Bu	27	1	6	2	1		15
	Fi	23		1		1		
To	Bu	23	3	6	4	5	3	8
	Fi	25		3	1			2

Von jedem Standort konnte mindestens eine Buche aufgrund von zu vielen ausgefallenen und zu engen Jahrringen nicht ausgewertet werden. Bei vielen Bäumen war infolge von Stammfäulen oder Hohlräumen das genaue Alter nicht zu bestimmen und die fehlenden Jahrringe konnten auch nicht geschätzt werden. Einige Serien mussten zur Chronologie-Bildung gekürzt werden, da einzelne Teile durch Wuchsanomalien oder eingewachsene Äste nicht auszuwerten waren. Bei drei Fichten konnte jeweils nur ein Kern genutzt werden. Die Buchen, bei denen nur ein Kern entnommen wurde, dienten lediglich der Ergänzung der Standorts-Chronologie. Bei einigen Bäumen konnten fehlende Jahrringe

in einem Radius durch Abgleichen mit dem zweiten ergänzt werden. Nach der Synchronisation der Jahrringserien untereinander konnten fehlende Jahrringe identifiziert und eingefügt werden. Hier fallen 10 ergänzte Serien bei den Buchen vom Standort Rehberg auf. Es handelt sich dabei um das Jahr 2004, in dem die Buchen einen äußerst starken Befall durch die Buchen-Wollschildlaus (*Cryptococcus fagisuga* Lind.) bis hin zur Entlaubung erlitten. Bei 37 % der Buchen ist dieser Jahrring komplett ausgefallen. Weiterhin fallen 15 ergänzte Buchenserien vom Standort Siggaboda auf. Neben anderen Jahren ist es bei allen das Weiserjahr 1847, dessen Zuwachs an diesem Standort nahezu komplett ausgefallen ist. Bei 8 Zeitreihen der Buchen in Tulseboda mussten in der Regel markante Weiserjahre ergänzt werden, doch konzentrierten sich die Ausfälle nicht wie im Fall Siggaboda auf ein bestimmtes Jahr. Die wichtigsten Kenngrößen zu allen Probestämmen sind im Anhang nachzulesen.

4.1.1 Erstellung der Baummittelkurven

Um die korrekte Synchronlage der beiden Radien eines Baumes zu ermitteln, wurden nach einem visuellen Vergleich die statistischen Mittel Gleichläufigkeit, t-Werte nach Baillie und Pilcher und nach Hollstein und CDI herangezogen. Zur beispielhaften Erläuterung sind in Tabelle 4.2 die Ergebnisse der Synchronisierung der Buchen vom Standort Rehberg dargestellt.

Der CDI, der eine Kombination aus der Gleichläufigkeit und den t-Werten darstellt, dient als gute Orientierung und umfasst eine Spanne von 67 bis 235. Die Buche 981 mit dem CDI von 67 zeigte schon in sich selbst ein so stark variierendes Wachstum, dass sie auch nicht mit den anderen Buchen synchronisiert werden konnte. Dies spiegelt sich ebenfalls in den niedrigen t-Werten wider. Sie wurde daher von der Chronologie-Bildung ausgeschlossen. Auch die Buche Nummer 6991 mit einem niedrigen CDI von 72 konnte nicht in die Chronologie eingefügt werden. Die Werte der Gleichläufigkeit sind stets sehr hoch und reichen von 73 bis 89%. Jedoch erst in gemeinsamer Betrachtung mit der Überlappungslänge wird die Glk zu einem sicheren Mittel der Synchronisation. Bei einer Überlappungslänge von 50 Jahren wird eine Glk von wenigstens 70 % zur korrekten Datierung benötigt. Im Falle der Buche 975 wird bei einer Überlappungslänge von 53 Jahren jedoch bereits eine Glk von 82 % erreicht; alle anderen Buchen erreichen eine Überlappung von 94 bis 136 Jahren. Der niedrigste t-Wert nach Baillie und Pilcher liegt bei 7,7 und der höchste bei 25,5. Mit einer empirischen Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha = 0,001$ sind alle berechneten t-Werte signifikant. Die am besten zu synchronisierende

4 Ergebnisse

Tabelle 4.2: Rechnerische Synchronisation der Baumradien der Buchen (Rehberg), CDI = Cross-Date-Index; Glk = Gleichläufigkeit in %; OVL = Überlappungslänge; TV = Standard t-Wert; TVBP = t-Wert nach Baillie und Pilcher; TVH = t-Wert nach Hollstein; Datierung = Datum des ältesten sichtbaren Jahrrings

Nr.	CDI	Glk [%]	OVL	TV	TVBP	TVH	Datierung
966	168	84	116	8,6	17,5	22,3	1883
968	87	73	123	11,9	11,2	12,8	1873
969	149	78	136	7,0	19,0	19,0	1866
970a	107	81	126	21,1	14,1	12,2	1877
970b	139	79	125	14,4	17,2	17,9	1875
971	151	83	134	10,3	17,9	18,6	1870
972	99	83	134	15,1	12,8	11,3	1865
973	163	81	133	12,5	18,4	22,1	1870
974	173	85	127	14,7	16,9	23,6	1877
975	90	82	53	10,1	10,8	11,0	1874
976	137	83	118	12,5	14,9	17,9	1876
977	99	84	136	18,0	13,1	10,5	1879
978	113	81	114	12,1	14,2	14,1	1878
979	216	85	96	18,8	22,9	27,7	1910
980	140	76	127	11,1	17,4	19,7	1871
981	67	85	62	14,2	7,7	8,1	1942
982	153	79	129	13,0	18,4	20,6	1870
983	69	76	114	10,1	8,9	9,5	1872
984	147	82	133	21,9	17,1	18,6	1873
985	71	75	119	13,1	7,9	11,0	1880
6978	235	89	130	22,6	25,5	27,3	1873
6981	143	79	128	9,8	17,4	18,7	1867
6983	160	84	132	16,0	17,3	20,8	1868
6984	82	78	94	9,1	11,1	9,9	1892
6986	118	83	130	11,2	14,0	14,4	1863
6991	72	73	124	16,1	8,2	11,5	1882
6992	158	79	131	15,0	18,9	21,2	1872

Buche ist die 6978. Der CDI von 235 ist der höchste, der in der vorliegenden Arbeit berechnet wurde, und mit einer Glk von 89 % bei einer Überlappungslänge von 130 Jahren, dem Standard t-Wert von 22,6, dem t-Wert nach Baillie und Pilcher von 25,5 und einem t-Wert nach Hollstein von 27,3 erreicht sie bei allen Berechnungen die höchsten Werte.

Zum Vergleich sind in Tabelle 4.3 die Ergebnisse der Fichten vom Standort Rehberg aufgeführt. Die Angaben zu den übrigen Standorten sind im Anhang nachzulesen.

4 Ergebnisse

Tabelle 4.3: Rechnerische Synchronisation der Baumradien der Fichten (Rehberg)

Nr.	CDI	Glk [%]	OVL	TV	TVBP	TVH	Datierung
933	108	79	125	15,4	13,8	13,6	1876
934	88	72	125	7,5	11,0	13,2	1879
935	105	75	107	10,8	12,4	15,6	1887
936	112	79	126	14,9	11,8	16,7	1877
937	82	70	112	13,1	11,1	12,1	1890
938	57	71	114	11,1	8,2	7,7	1889
939	86	79	117	11,1	10,5	11,4	1879
940	30	74	35	16,6	3,9	4,0	1971
941	49	72	106	14,7	5,8	7,9	1887
942	32	66	53	1,8	5,2	4,4	1890
960	93	78	98	16,7	12,2	11,7	1875
961	73	74	127	20,2	9,2	10,5	1875
962	107	76	125	13,2	12,9	15,3	1876
963	58	76	73	1,1	7,7	7,7	1894
964	128	79	125	12,0	16,0	16,4	1876
965	74	77	52	6,5	9,8	9,5	1915
967	76	72	132	8,0	9,7	11,6	1873
6977	62	74	117	8,8	7,6	9,1	1880
6979							1955
6980	33	76	47	1,9	4,4	4,2	1950
6982	107	76	130	13,6	13,8	14,5	1870

Die CDI-Werte liegen für die Fichten zwischen 30 und 128 und somit deutlich unter denen der Buche. Die Gleichläufigkeit umfasst eine Spanne von 66 bis 79% bei Überlappungslängen von 35 bis 132 Jahren und die t-Werte nach Baillie und Pilcher reichen von 5,2 bis 16,0. Mit Ausnahme der t-Werte der Bäume 942, 963 und 6980 sind alle t-Werte mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha = 0,001$ signifikant. Die Fichten 940 und 6980 erreichen trotz ihrer kurzen Überlappungslängen von 35 und 47 Jahren hohe Glk von 74 % bzw. 76 % und konnten daher dennoch sicher synchronisiert werden. Am umgekehrten Beispiel der Fichte 942, deren Glk nur 66 % bei einer Überlappung von 53 Jahren beträgt, war durch visuelle Nachprüfung, trotzdem eine korrekte Synchronisation möglich. Trotz nicht signifikanten t-Werts konnte auch Baum 963 mit ausreichend hoher Glk sicher synchronisiert werden. Für die Fichte 6979 existierte nur ein Bohrkern, daher war keine Synchronisation möglich oder notwendig.

In Tabelle 4.4 sind die Mittelwerte der Synchronisationsergebnisse nach Standorten und Baumarten getrennt dargestellt. Die Gleichläufigkeit variiert kaum zwischen den Arten und Standorten. Es ist jedoch zu erkennen, dass die Werte des CDI und die t-Werte

4 Ergebnisse

der Buchen an jedem Standort deutlich über denen der Fichte liegen. Die t-Werte berücksichtigen im Gegensatz zu den Glk die Anzahl der zu vergleichenden Wertepaare. Gemäß des höheren Alters der Buchen ist diese Anzahl, wie dementsprechend auch die Überlappungslängen der Buchen, höher als die der Fichten. Daher ergeben sich bessere t-Werte und CDI für die Buchen; genau wie eine höhere Sensitivität, wie sie die Buchen aufweisen (Kap. 4.2.3), zu höheren Werten führen.

Tabelle 4.4: Gemittelte Ergebnisse der Synchronisation und durchschnittliche Datierung nach Standorten und Baumarten getrennt

Standort	Baumart	CDI	Glk [%]	OVL	TV	TVBP	TVH	Datierung
Rehberg	Buche	130	81	119	13,7	15,2	16,8	1878
	Fichte	78	75	102	11,0	9,9	10,9	1894
Rågetaåsen	Buche	83	76	78	11,9	10,8	10,8	1921
	Fichte	44	76	45	8,8	5,9	5,6	1959
Siggaboda	Buche	100	78	140	19,3	12,9	12,6	1843
	Fichte	68	77	75	12,7	8,8	8,8	1928
Tolseboda	Buche	126	76	215	20,2	16,1	16,7	1763
	Fichte	86	77	106	13,7	10,5	11,2	1891

4.1.2 Schardarstellungen

Zur visuellen Unterstützung der Untersuchung von Gleichläufigkeiten werden in der Dendrochronologie Schardarstellungen angewendet. Weiserjahre durch anhaltende Trockenheiten oder andere gleichsinnige Reaktionen eines ganzen Kollektivs können so sichtbar gemacht werden (Riemer, 1994). In den Abbildungen 4.1 und 4.2 sind jeweils sämtliche Mitglieder der Standorts-Chronologien für Buchen und Fichten des Standortes Rehberg dargestellt.

Zum Vergleich soll hier nur einer der schwedischen Standorte (Tolseboda) in den Abbildungen 4.3 und 4.4 aufgeführt werden. Die Darstellungen der übrigen Standorte sind im Anhang zu finden.

4 Ergebnisse

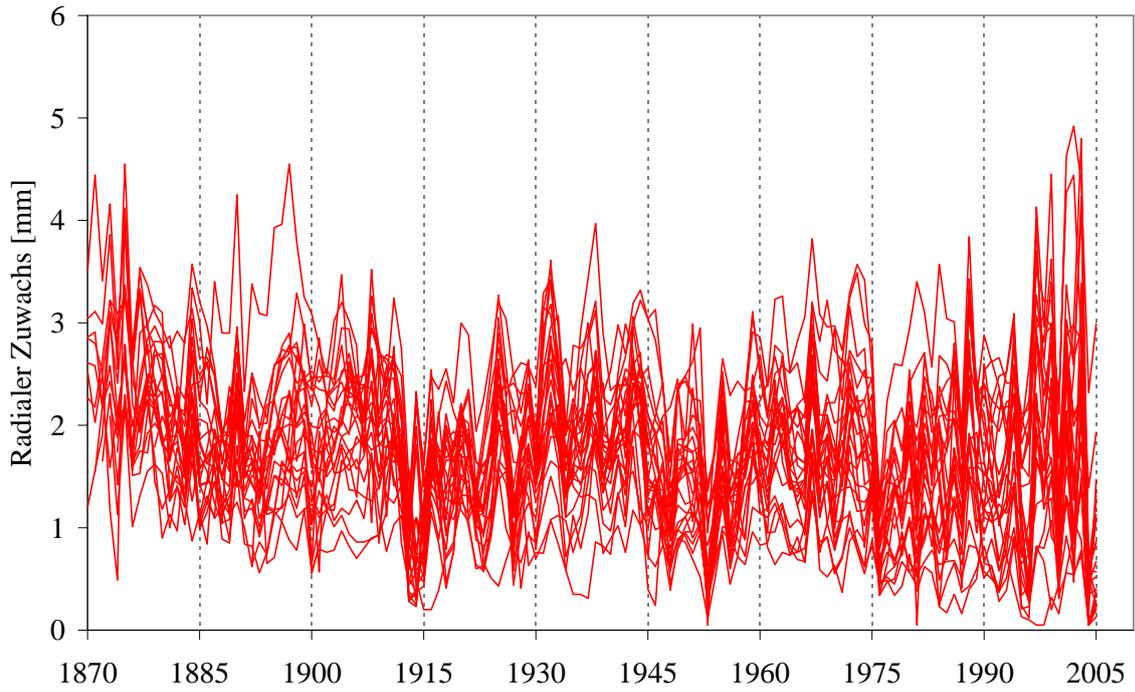


Abbildung 4.1: Schardarstellung der Buchen (Rehberg)

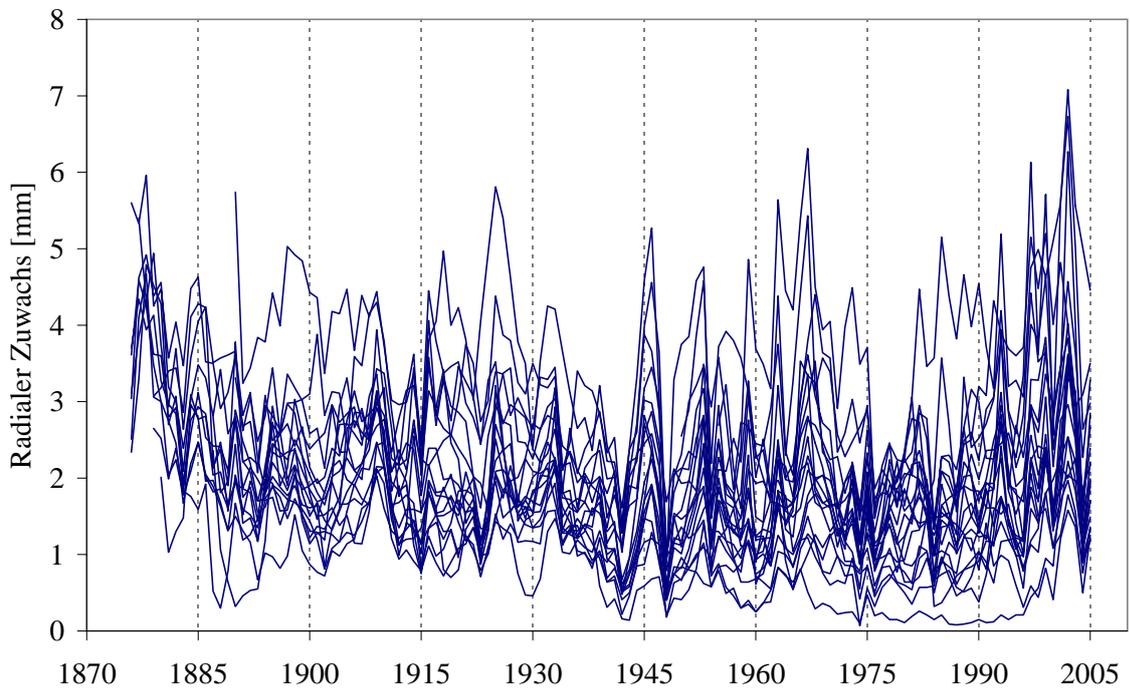


Abbildung 4.2: Schardarstellung der Fichten (Rehberg)

4 Ergebnisse

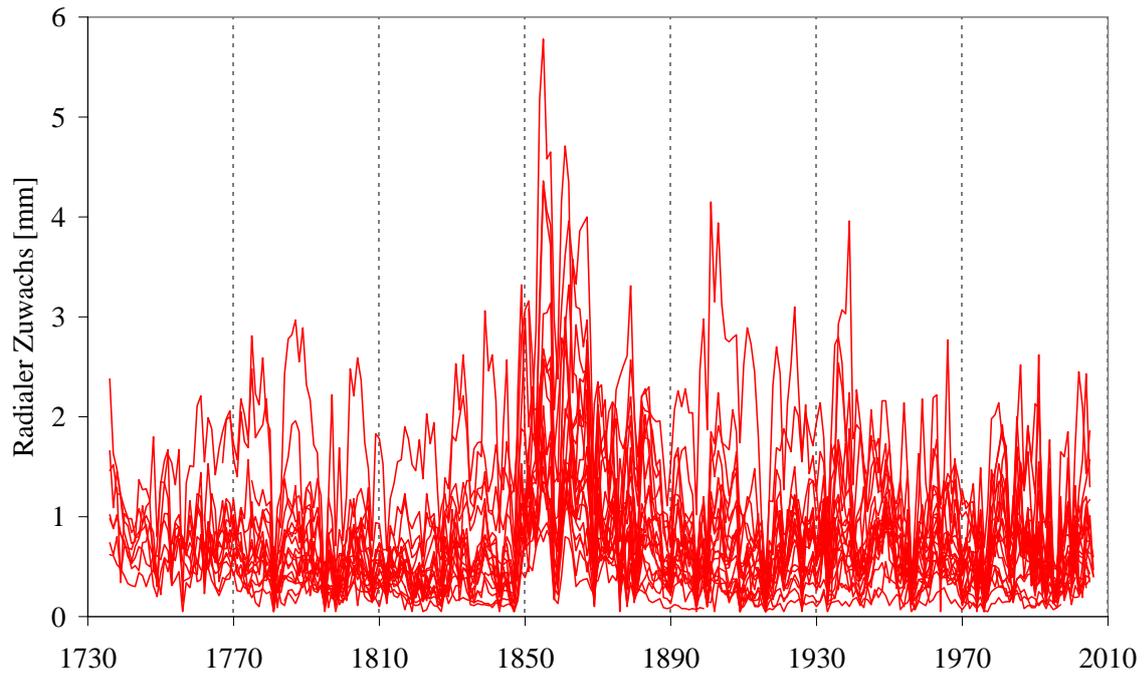


Abbildung 4.3: Schardarstellung der Buchen (Tolseboda)

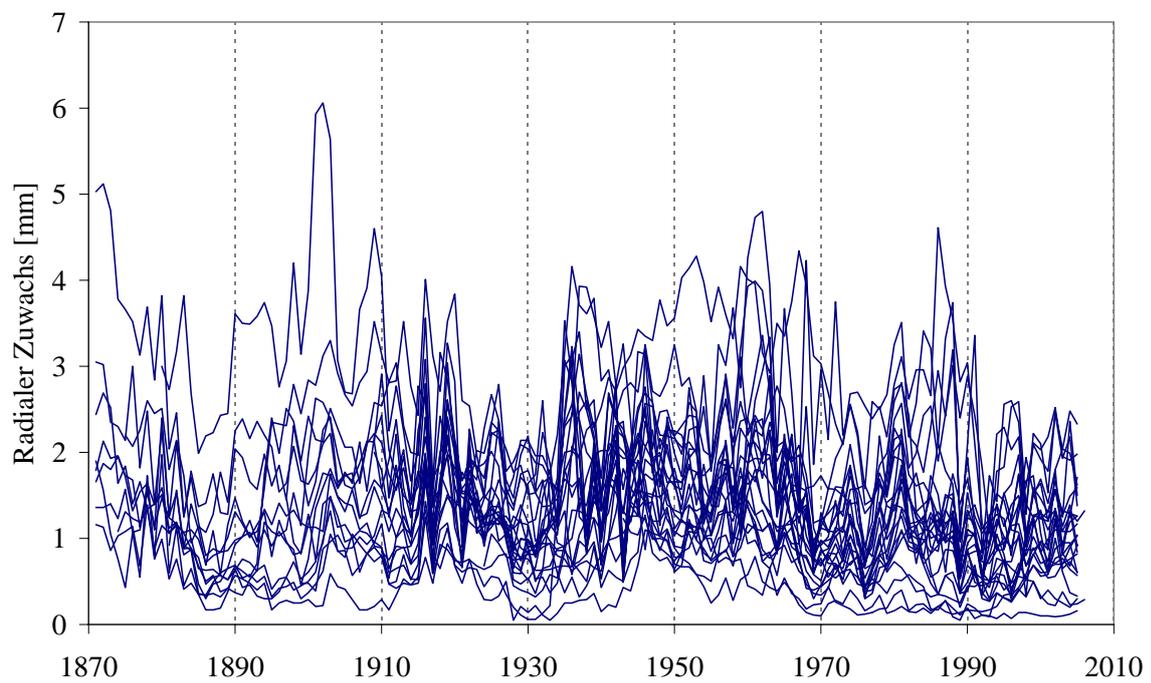


Abbildung 4.4: Schardarstellung der Fichten (Tolseboda)

4.2 Standorts-Chronologien

Der Begriff Standorts-Chronologie wird hier verwendet für die gemittelten Zuwachszeitreihen eines Kollektivs von Bäumen derselben Art und desselben Standorts. Sie unterliegen denselben kleinstandörtlichen exogenen Einflüssen und zeigen somit vergleichbare Reaktionen in ihrem Zuwachsverhalten. In der vorliegenden Arbeit bilden die gewählten Kleingruppen unter Ergänzung der jeweils stärksten und vitalsten Bäume des Standorts das Kollektiv. Tabelle 4.5 zeigt die Ergebnisse der Synchronisation der Einzelkurven mit den Standorts-Chronologien, jeweils unter Ausschluss der zu untersuchenden Kurve. Die detaillierten Angaben zu den einzelnen Bäumen aller Standorte befinden sich im Anhang.

Tabelle 4.5: Statistiken der Einzelkurven gegenüber der Chronologie, OVL = Überlappungslänge der Einzelkurve mit der Chronologie in Jahren; Glk = Gleichläufigkeit; TV = Standard t-Wert; TVBP = t-Wert nach Baillie und Pilcher; CDI = Cross-Date-Index

Sto.	Art	Werte	OVL	Glk	TV	TVBP	CDI
Re	Bu	Mittel	130	76	8,5	13,6	104
		Min - Max	96 - 136	65 - 86	3,1 - 13,6	5,2 - 19,7	34 - 156
	Fi	Mittel	112	78	8,6	12,3	98
		Min - Max	35 - 130	61 - 85	1,9 - 17,4	2,9 - 18,5	17 - 155
Rã	Bu	Mittel	84	76	9,7	8,6	63
		Min - Max	35 - 99	62 - 85	3,0 - 17,8	1,8 - 13,3	9 - 96
	Fi	Mittel	47	73	6,0	5,2	39
		Min - Max	29 - 62	54 - 85	0,1 - 14,2	2,8 - 9,2	17 - 73
Si	Bu	Mittel	153	68	9,6	7,3	51
		Min - Max	47 - 277	47 - 77	1,2 - 25,4	2,4 - 13,7	12 - 101
	Fi	Mittel	78	73	4,0	6,9	49
		Min - Max	39 - 130	60 - 85	0,1 - 7,1	3,9 - 11,5	26 - 77
To	Bu	Mittel	226	72	11,3	13,0	95
		Min - Max	97 - 272	65 - 78	3,9 - 19,9	7,2 - 18,3	45 - 140
	Fi	Mittel	112	71	5,7	7,4	54
		Min - Max	63 - 136	59 - 84	0,7 - 11,7	2,5 - 12,2	15 - 97

Die Mittelwerte zeigen, dass die verwendeten Einzelkurven i.d.R. sicher synchronisiert werden konnten. An den Minimalwerten ist jedoch zu erkennen, dass an allen Standorten einzelne Buchen wie Fichten nur mit Hilfe visueller Kontrolle korrekt synchronisiert werden konnten. Ausnahmen sind lediglich die Buchen der Standorte Rehberg und Tulseboda. Ihre Synchronlagen konnten alle uneingeschränkt visuell wie statistisch erwiesen werden. Durch die anschließende Überprüfung der Synchronisation mit COFECHA, konnten einzelne wenige Fehllagen entdeckt und korrigiert werden.

4.2.1 Buchen

Die Chronologien der Buchen sind für jeden Standort gemeinsam in Abbildung 4.5 dargestellt. Die längsten Chronologien sind die der schwedischen Standorte Tulseboda (1736) und Siggaboda (1737), doch ihr radiales Zuwachsniveau liegt deutlich unter dem der jüngeren Buchen der beiden Standorte Rehberg (1870) und Rågetaåsen (1908). Nur im Jugendwachstum erreichen die Buchen von Siggaboda ein ähnlich hohes Niveau. Gleichsinnige Reaktionen zeigen die schwedischen Buchen zum Beispiel in den Jahren 1795, 1847 und 1916. Auch mit den Rehberger Buchen gibt es gemeinsame Extremjahre wie 1953, 1976 und 1992/93.

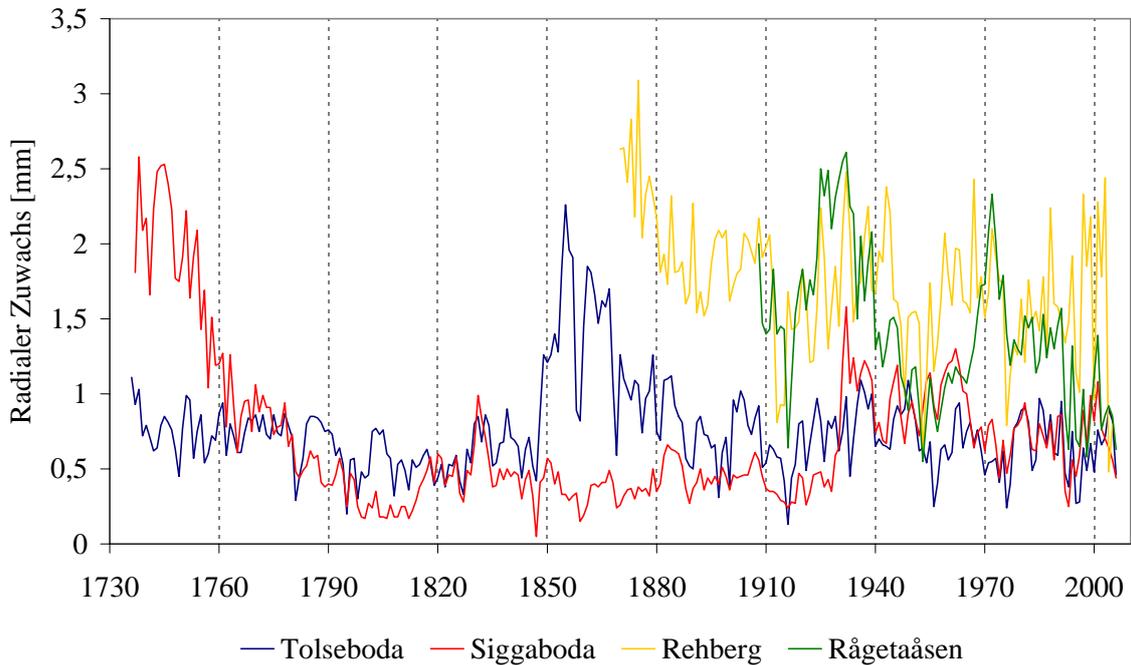


Abbildung 4.5: Standorts-Chronologien der Buchen

Der Wachstumsverlauf der Buchen auf den Standorten Tulseboda und Siggaboda ist sehr ähnlich. Die Weiserjahre sind in der Regel bei beiden Standorten vergleichbar ausgeprägt und das Wachstum findet generell auf gleichem Niveau statt. Dies tritt noch deutlicher hervor, werden die langfristigen Trends herausgerechnet. Dies geschah mit Hilfe eines 11-jährigen gleitenden Mittels; die Chronologie wurde dabei am Mittelwert ihrer Jahrringbreiten ausgerichtet (Abb. 4.6).

4 Ergebnisse

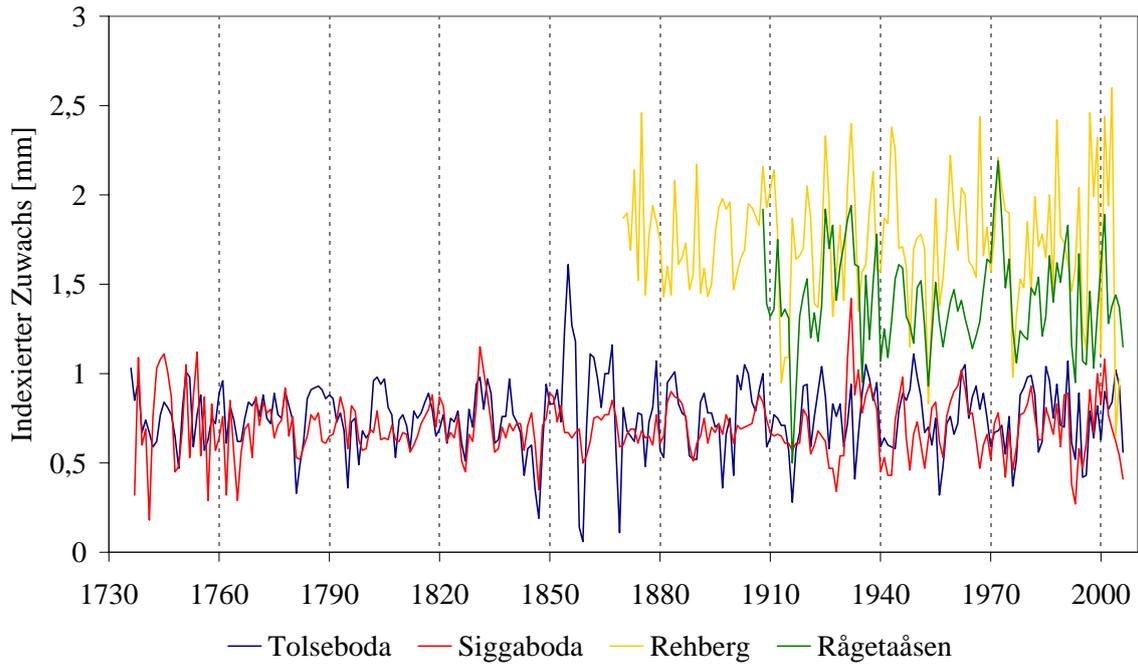


Abbildung 4.6: Standorts-Chronologien der Buchen indexiert mit einem 11-jährigen gleitenden Mittel

Die Ähnlichkeit bestätigen auch die Gleichläufigkeitswerte zwischen den Standorts-Chronologien in Tabelle 4.6. Die Gleichläufigkeiten der schwedischen Standorte untereinander ist höher als mit dem Standort Rehberg. Bei einer Überlappungslänge von 100 Jahren kann eine sichere Synchronlage ab einer Gleichläufigkeit von 65 % angenommen werden. Daher kann von einer Ähnlichkeit des Wachstums zwischen den Standorten Tulseboda und Siggaboda und dem Standort Rehberg abgesehen werden. Die Gleichläufigkeiten zwischen den Standorten Rågetaåsen und Rehberg und denen zwischen Rågetaåsen und Tulseboda sind nicht klar zu interpretieren. Erst durch die t-Wert Vergleiche (Tab. 4.7) wird die Ähnlichkeit der schwedischen Standorte untereinander und der Unterschied zwischen den schwedischen Standorten und dem Rehberg deutlich.

Tabelle 4.6: Gleichläufigkeiten [%] der Buchen-Chronologien untereinander und deren Überlappungslängen in Jahren in Klammern

	Tulseboda	Siggaboda	Rågetaåsen	Rehberg
Tulseboda	-	73 (270)	64 (99)	59 (136)
Siggaboda		-	73 (99)	58 (136)
Rågetaåsen			-	66 (98)
Rehberg				-

4 Ergebnisse

Ein t-Wert von 12,1 belegt eine hohe Ähnlichkeit zwischen den Chronologien Tulseboda und Siggaboda. Die Chronologie von Rågetaåsen ist die kürzeste und auch das Wachstumsniveau ist höher als bei den anderen schwedischen Standorten, doch durch die Übereinstimmung einiger Weiserjahre und der höheren Gleichläufigkeiten kann eine größere Ähnlichkeit mit den zwei anderen schwedischen Standorten als mit Rehberg festgestellt werden. Die t-Werte zwischen den schwedischen Standorten sind auch mit einer empirischen Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha = 0,001$ hochsignifikant. Dagegen sind die t-Werte zwischen den schwedischen Standort und dem Rehberg lediglich mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha = 0,05$ signifikant sind, wodurch nur eine schwache Ähnlichkeit besteht.

Tabelle 4.7: T-Werte (nach Baillie und Pilcher) der Buchen-Chronologien untereinander

	Tulseboda	Siggaboda	Rågetaåsen	Rehberg
Tulseboda	-	12,1	7,1	3,0
Siggaboda		-	7,3	2,3
Rågetaåsen			-	2,2
Rehberg				-

4.2.2 Fichten

Die älteste Fichten-Chronologie ist die des Standortes Tulseboda (1871), gefolgt von Rehberg (1876) und Siggaboda (1877). Die jüngste Chronologie, wie schon bei den Buchen, ist die des Standortes Rågetaåsen (1945). Zum direkten Vergleich sind alle Chronologien in Abbildung 4.7 zusammengefasst. Das Wachstumsniveau ist einheitlicher als bei den Buchen und gleichsinnige Reaktionen wie 1881, 1946 und 1976 sind deutlich zu erkennen. Doch genau wie bei den Buchen zeigen die Standorte Rågetaåsen und Rehberg ein zum Teil stärkeres Wachstum. Dies ist deutlicher nach der Trendbereinigung (Abb. 4.8) zu erkennen.

Die Gleichläufigkeiten der Fichten-Chronologien (Tab. 4.8) sind wie bei den Buchen zwischen dem Standort Rehberg und den schwedischen Standorten geringer als innerhalb der schwedischen. Dies verdeutlicht erneut das unterschiedliche Wachstum der Bäume der weit entfernt liegenden Versuchstandorte.

Die höchste Gleichläufigkeit (77 %) findet sich erneut zwischen den Standorten Tulseboda und Siggaboda. Die besondere Ähnlichkeit des Wachstums wird untermauert durch den höchsten t-Wert von 10,5 (Tab. 4.9). Die Gleichläufigkeiten zwischen den Standorten Tulseboda und Siggaboda und dem Standort Rågetaåsen können eine Ähnlichkeit

4 Ergebnisse

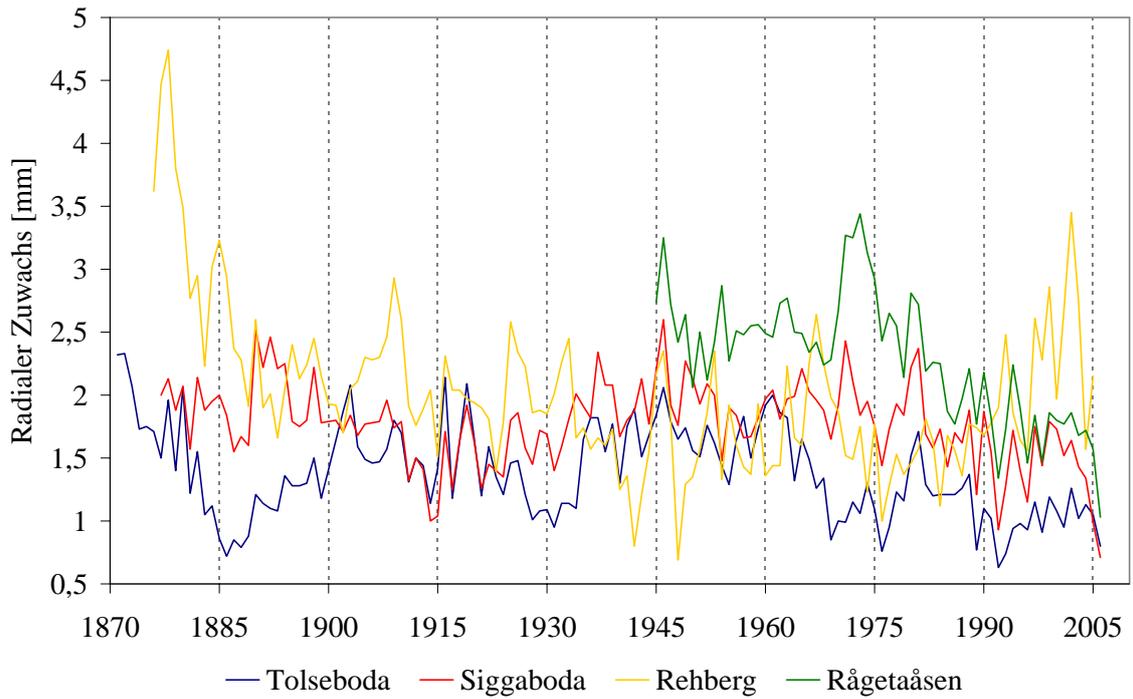


Abbildung 4.7: Standorts-Chronologien der Fichten

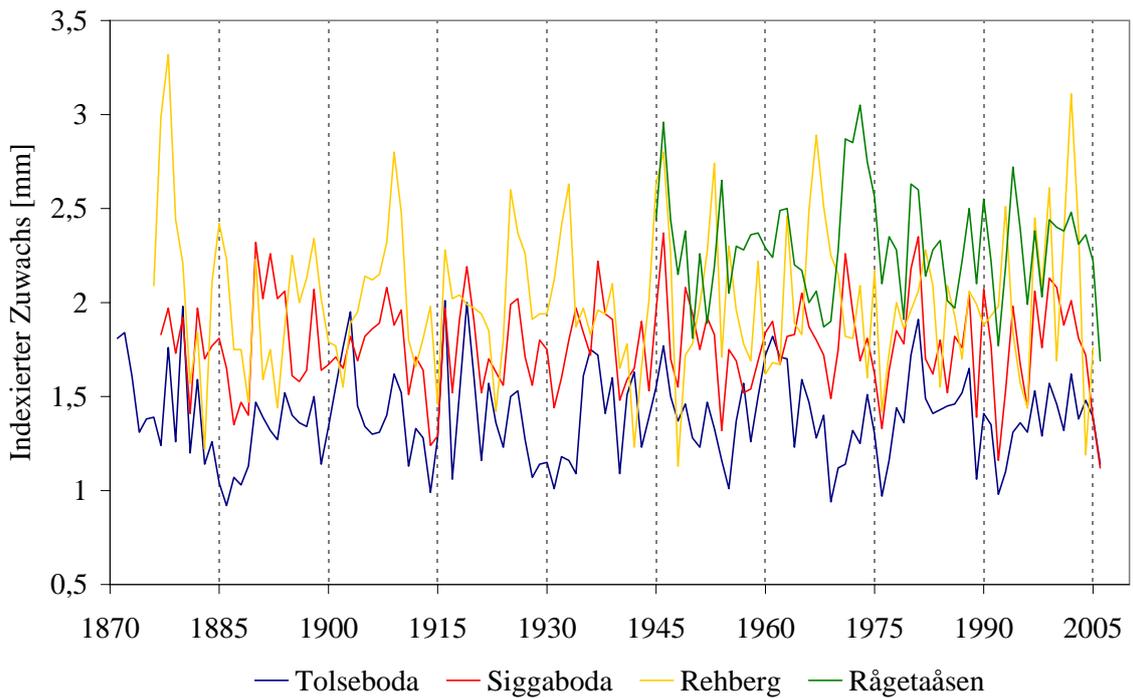


Abbildung 4.8: Standorts-Chronologien der Fichten indexiert mit einem 11-jährigen gleitenden Mittel

4 Ergebnisse

Tabelle 4.8: Gleichläufigkeiten [%] der Fichten-Chronologien untereinander und deren Überlappungslängen in Jahren in Klammern

	Tolseboda	Siggaboda	Rågetaåsen	Rehberg
Tolseboda	-	77 (130)	62 (62)	57 (130)
Siggaboda		-	65 (62)	63 (129)
Rågetaåsen			-	58 (61)
Rehberg				-

des Wachstums nicht klar bestätigen, doch die t-Werte belegen diese mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha = 0,001$. Dagegen sind die t-Werte zwischen den schwedischen Standorten Tolseboda und Rågetaåsen und dem Standort Rehberg nicht signifikant. Aber eine leichte Ähnlichkeit des Wachstums kann zwischen Rehberg und Siggaboda durch einen mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha = 0,05$ signifikanten t-Wert festgestellt werden.

Tabelle 4.9: T-Werte (nach Baillie und Pilcher) der Fichten-Chronologien untereinander

	Tolseboda	Siggaboda	Rågetaåsen	Rehberg
Tolseboda	-	10,5	5,4	1,9
Siggaboda		-	6,6	2,1
Rågetaåsen			-	0,7
Rehberg				-

4.2.3 Statistiken der Standorts-Chronologien

Die wichtigsten deskriptiven Merkmale aller Standorts-Chronologien zeigt Tabelle 4.10. Neben dem Beginn und der Länge der Chronologien sind die Minima, Maxima sowie die mittleren Jahrringbreiten aufgeführt.

Das kräftigere Wachstum der Fichten gegenüber den Buchen wird deutlich. Lediglich die Maximalwerte der Standorte Tolseboda und Siggaboda sind bei beiden Baumarten auf ähnlich hohem Niveau. Weiterhin ist der höhere Zuwachs beider Arten der beiden Standorte Rehberg und Rågetaåsen gegenüber Siggaboda und Tolseboda zu erkennen. Am deutlichsten ist der Unterschied jeweils bei den mittleren Jahrringbreiten zu erkennen. Bei den Buchen erreichen Siggaboda und Tolseboda gerade die Hälfte der Jahrringbreite von Rehberg und Rågetaåsen.

Im Detail betrachtet, liegen die Minima der Buchen mit 0,05 mm - 0,55 mm deutlich unter denen der Fichten (0,63 mm - 1,03 mm). Der niedrigste Wert aller Chronologien

4 Ergebnisse

Tabelle 4.10: Allgemeine statistische Angaben zu den Standorts-Chronologien, BA = Baumart; Länge = Länge der Chronologie in Jahren; ält. Ring = Belegung des ältesten Jahrringes; Min/Mittl/Max = Minimal-/Mittel-/Maximalbreite der Jahrringe [mm]; Stdv = Standardabweichung; Atk = Autokorrelation 1. Ordnung; mSens = mittlere Sensitivität

BA	Sto.	Beginn	Länge	ält. Ring	Min	Mittl	Max	Stdv	Atk	MSens
Buche	Re	1870	136	8	0,48	1,74	3,09	44,5	0,42	0,21
	Rå	1908	99	4	0,55	1,41	2,61	49,4	0,81	0,19
	Si	1737	270	4	0,05	0,70	2,58	48,5	0,92	0,21
	To	1736	271	7	0,13	0,76	2,26	30,6	0,75	0,23
Fichte	Re	1876	130	7	0,69	2,01	4,74	63,8	0,75	0,18
	Rå	1945	62	4	1,03	2,30	3,44	50,6	0,78	0,13
	Si	1877	130	5	0,71	1,77	2,60	32,8	0,55	0,14
	To	1871	136	8	0,63	1,39	2,33	36,6	0,70	0,16

ist bei den Buchen in Siggaboda zu finden, da der Jahrring 1847 im gesamten Kollektiv ausgefallen war (Kap. 4.3.4). Jeder ausgefallene Jahrring wurde für weitere Analysen mit 0,05 mm ergänzt. Die Maxima der Buchen sind dagegen auf ähnliche hohem Niveau, bei den Fichten heben sich die Standorte Rehberg und Rågetaåsen wieder deutlich hervor. Die Standardabweichung ist bei den Fichten am Rehberg mit 63,8 am höchsten. Bei den übrigen erreicht sie Werte bis 50,6. Die niedrigste Standardabweichung zeigt die Buche in Tulseboda mit 30,6.

Autokorrelation

Die Stärke des Einflusses vorangegangener Jahre auf das aktuelle Jahrringwachstum gibt die Autokorrelation an. In diesem Falle wurde die Autokorrelation 1. Ordnung berechnet, um noch ökologisch und pflanzenphysiologisch erklärable Ergebnisse zu erzielen. Die Spannweite der Autokorrelation der Buchen ist sehr weit und reicht von 0,42 am Standort Rehberg bis 0,92 am Standort Siggaboda. Die Buchen am Rehberg sind demnach weniger durch die Umweltbedingungen des Vorjahres beeinflusst. Nur knapp 18 % der Varianz des Wachstums eines Jahres werden durch die Bedingungen des Vorjahres erklärt. Dagegen können in Siggaboda fast 85 % der Varianz auf das Vorjahr zurückgeführt werden. Tulseboda und Rågetaåsen weisen ebenfalls deutlich höhere Autokorrelationen als Rehberg auf. Bei den Fichten ist die Autokorrelation ähnlich hoch und liegt zwischen 0,55 in Rågetaåsen, als dem Standort mit der geringsten Beeinflussung durch das Vorjahr, und 0,78 in Siggaboda mit dem höchsten Wert unter den Fichten.

Sensitivität

Die Sensitivität ist ein Maß für die Reaktionsfähigkeit oder Empfindlichkeit eines Baumes auf exogene Faktoren wie Temperatur oder Niederschlag und ist eine Funktion der Autokorrelation 1. Ordnung und der Standardabweichung. Die Sensitivitäten der Buchen liegen mit 0,19 - 0,23 deutlich über denen der Fichten mit 0,13 - 0,18. Das bedeutet, die Buchen reagieren sichtbarer und stärker auf sich jährlich ändernde Umwelteinflüsse als die Fichten. Der am wenigsten sensitive Standort ist Rågetaåsen, bei Buchen wie Fichten. Die sensitivsten Buchen wachsen in Tulseboda. Die schwedischen Fichten zeigen gegenüber den Rehberger Fichten deutlich geringere Sensitivitäten. Sie sind sichtbar weniger beeinträchtigt durch exogene Einflüsse.

Betrachtet man die Sensitivitäten der Einzelbäume, so fällt auf, dass die soziologische Klasse einen maßgeblichen Einfluss haben kann. Auf dem Standort Rehberg wird dies besonders deutlich, da die Sensitivität der Bäume beider Arten der Baumklasse 3 um durchschnittlich 15 % gegenüber der Baumklassen 1-2 erhöht ist (Abb. 4.9).

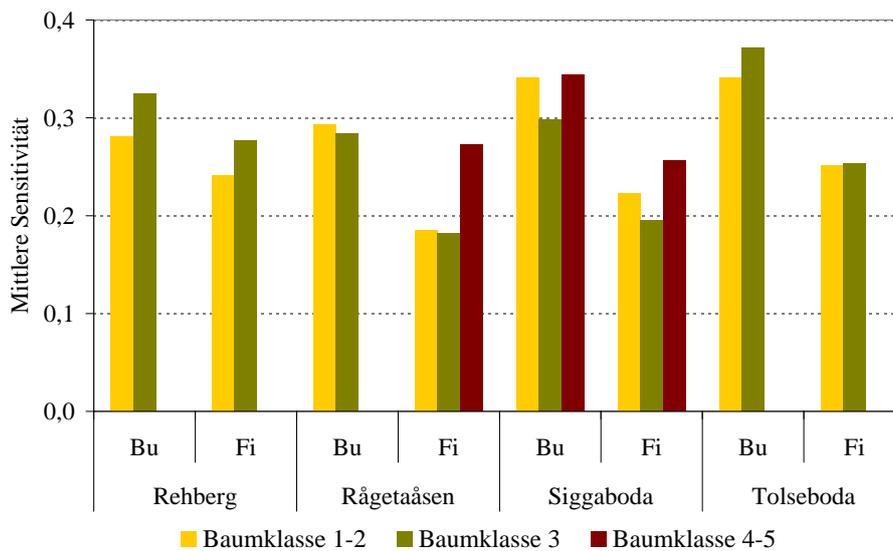


Abbildung 4.9: Mittlere Sensitivität in Abhängigkeit von der soziologischen Klasse

Auf den schwedischen Standorten zeigt sich ein anderes Bild. Hier wird erst bei der unterdrückten Baumklasse 4-5 bei den Fichten in Rågetaåsen und Siggaboda eine erhöhte Sensitivität feststellbar. Hier ist die Sensitivität um 47 % bzw. 15 % erhöht. Des Weiteren zeigen lediglich die Buchen am Standort Tulseboda eine höhere Sensitivität in niedrigeren Baumklassen. Bei den übrigen Bäumen zeigen sich teilweise sogar absinkende Sensitivitäten mit fallender Baumklasse. An dem stark unterschiedlichen Ergebnis der

schwedischen Standorte im Gegensatz zum Rehberg spiegelt sich die große Heterogenität in der Struktur der Baumschichten dieser Naturwald-Standorte wider.

4.3 Klima-Zuwachs-Beziehungen

Der Einfluss der Witterung auf das Wachstum von Bäumen ist in bestimmten Monaten der Vegetationsperiode größer als in anderen. Faktoren wie Klimavariablen, Baumart, Höhenlage, Boden und Relief des Standortes spielen hierbei wichtige Rollen. In der Regel ist auf trockenen Standorten der Einfluss des Niederschlags bedeutender als der der Temperatur. Auf montanen Standorten hingegen ist das Verhältnis umgekehrt, die Temperatur bestimmt hier die Länge der Vegetationszeit. Daher müssen Ergebnisse von Klima-Wachstums-Analysen stets unter Berücksichtigung der beeinflussenden Faktoren und der standörtlichen Gegebenheiten interpretiert werden.

Die Vegetationsperiode wird maßgeblich durch die Photoperiode bestimmt, die durch die Thermoperiode erweitert wird. Zum Ende der Vegetationszeit werden die Tage kürzer, und der Baum beginnt durch Absinken der Konzentration an Auxinen und Gibberellinen, welches Phytohormone sind, die als Wachstumshormone wirken, und gleichzeitigem Anheben des Abszissinsäure-Spiegels, einem Wachstumsinhibitor, die Vegetationstätigkeit herabzusetzen und in den Zustand der Vorruhe überzugehen. Die Teilungstätigkeit der Meristeme wird heruntergefahren oder völlig eingestellt. In den mittleren und nördlichen Breiten wird das Stadium der Vollruhe im November und Dezember erreicht. In diesem Zustand können die Pflanzen nicht durch eine vorübergehende Erwärmung aktiviert werden. Nach der Erfüllung eines individuellen Kältebedürfnisses, einer gewissen Anzahl von Wochen bei Temperaturen zwischen 2 und 7 °C, steigen in der Nachruhe die Konzentrationen der wachstumsfördernden Hormone wie Gibberelline oder Cytokinine bei erhöhten Tageslängen und Temperaturen an, und der Betriebsstoffwechsel, die Reservemobilisierung und die Biosynthese werden angekurbelt. Die Dormanz ist beendet und bei ausreichender Temperatur beginnen die Meristeme ihre Teilungstätigkeit.

4.3.1 Korrelationsanalysen

Qualitätsprüfung der Standardisierung

Die Identifikation der stärksten Klimasignale wurde an den Residual-Chronologien (ARS-TAN) durchgeführt. Die Zuverlässigkeit der Chronologien wurde anhand des EPS (Expressed Population Signal) überprüft (Kap. 4.3.1). Als Beispiele seien hier die Ergebnisse der Buchen für die Standorte Rehberg und Rågetaåsen (Abb. 4.10 und 4.11) dargestellt.

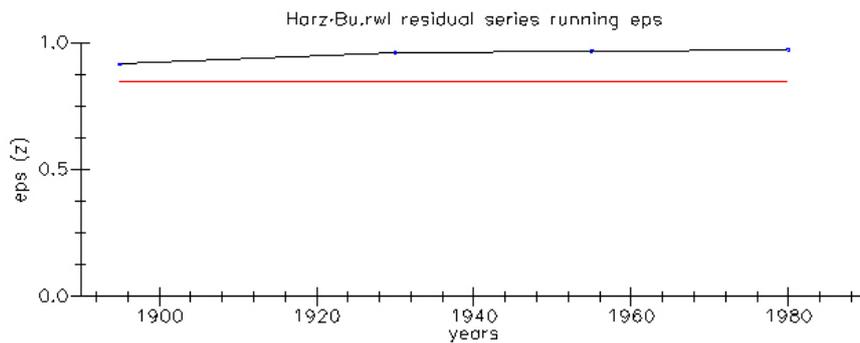


Abbildung 4.10: EPS der Residual-Chronologie der Buchen vom Standort Rehberg

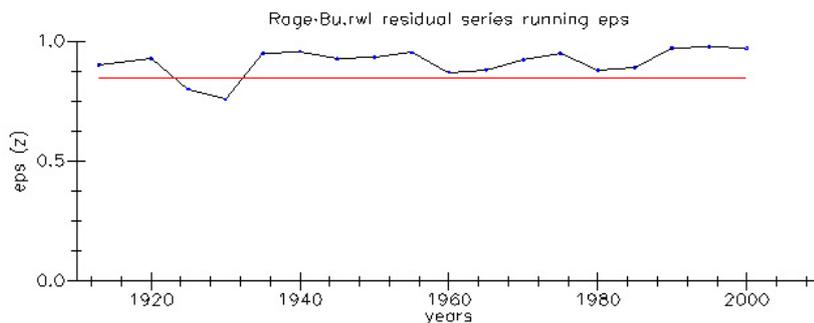


Abbildung 4.11: EPS der Residual-Chronologie der Buchen vom Standort Rågetaåsen

Die Standardisierung der Chronologie der Buchen vom Rehberg ergab eine hervorragende Signalstärke. Dagegen ließ sich das Klimasignal in den 1930er Jahren bei den Buchen am Standort Rågetaåsen auch nicht durch eine Variation der Standardisierungs-Methoden verbessern. Doch im Mittelwert (Tab. 4.11) zeigt sich eine gute Signalstärke. Das mittlere EPS der Buchen-Chronologien beträgt 0,91 und das der Fichten liegt bei 0,88.

Das EPS beider Chronologien in Siggaboda liegt knapp unter dem Schwellenwert von 0,85, der eine hohe Zuverlässigkeit der Chronologie belegt (Wigley u. a., 1984). Die Si-

Tabelle 4.11: Mittleres EPS für die standardisierten Chronologien

	Rehberg		Rågetaåsen		Siggaboda		Tolseboda	
	Buche	Fichte	Buche	Fichte	Buche	Fichte	Buche	Fichte
mittl. EPS	0,95	0,95	0,91	0,80	0,84	0,84	0,94	0,92

gnalstärke der Chronologie der Fichten in Rågetaåsen konnte auch nicht durch eine modifizierte Standardisierung erhöht werden. Dieser geringe EPS-Wert kommt zustande durch die geringe Belegung der Phase von 1945-1965, die lediglich einen gemittelten Wert von 0,48 zeigt (Abb. 4.12). Ab etwa 1970 steigt das EPS auf gemittelt 0,94.

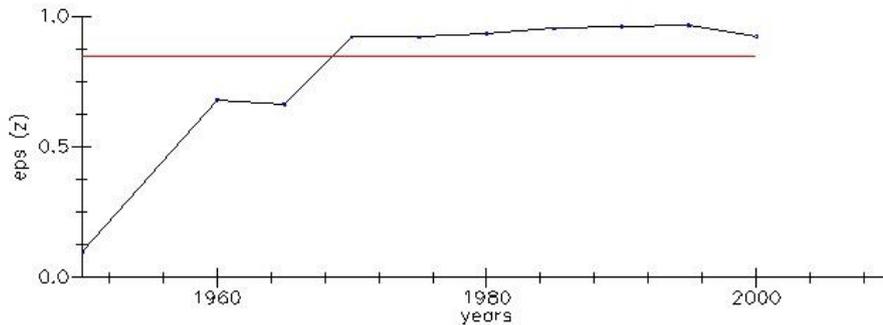


Abbildung 4.12: EPS der Residual-Chronologie der Fichten vom Standort Rågetaåsen

Es werden in allen folgenden Diagrammen sämtliche signifikanten Korrelationen dargestellt, doch beschränkt sich die Interpretation hauptsächlich auf die ökologisch und baumphysiologisch relevanten bzw. erklärbaren Ergebnisse.

Temperatur

Um die zuwachswirksamen Monate zu identifizieren, wurden zunächst Korrelationen zwischen der Klimavariablen Temperatur und dem standardisierten Zuwachs errechnet. Die Temperaturdaten liegen als monatliche Mittelwerte vor. In Abbildung 4.13 sind die signifikanten Korrelationskoeffizienten der Buchen (rote Säulen) und der Fichten (blaue Säulen) für das Vorjahr (Großbuchstaben) und das Jahr der Ringbildung (Kleinbuchstaben) dargestellt.

Zunächst ist ein markanter Unterschied zwischen dem Vorjahreseinfluss und dem des aktuellen Jahres zu erkennen. Der bedeutende negative Einfluss der Spätsommertemperatur auf die Fichten und besonders auf die Buchen wird deutlich. Im laufenden Jahr sind die Temperatureinflüsse differenzierter.

4 Ergebnisse

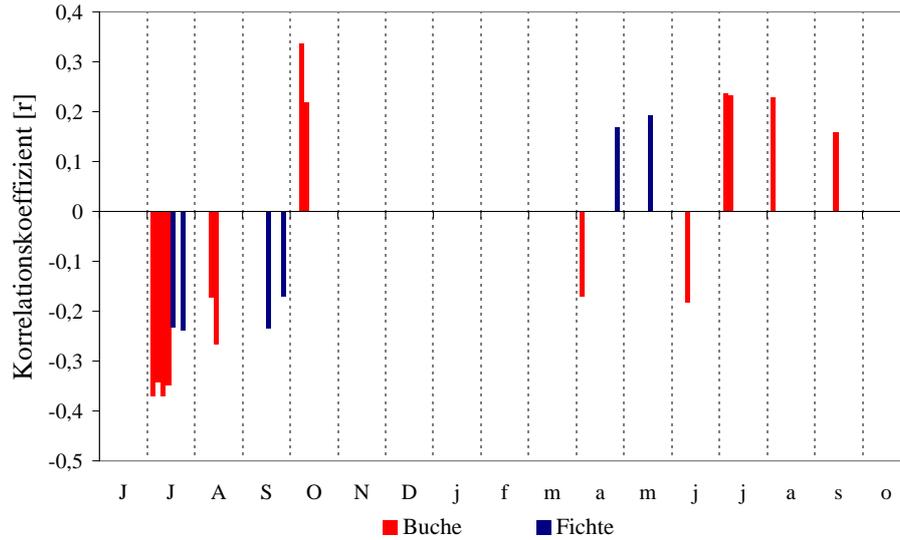


Abbildung 4.13: Monatsweise Korrelationen des standardisierten radialen Wachstums von Buche und Fichte aller 4 Standorte mit der Klimavariablen Temperatur

Die Korrelationskoeffizienten für die Buchen sind deutlich. Prägend für ihr Wachstum sind die Temperaturen im Juli des Vorjahres bis hinein in den August. Hier sind die Korrelationen negativ. Der Oktober vor der Ringbildung hat ebenfalls einen signifikanten, jedoch positiven Einfluss.

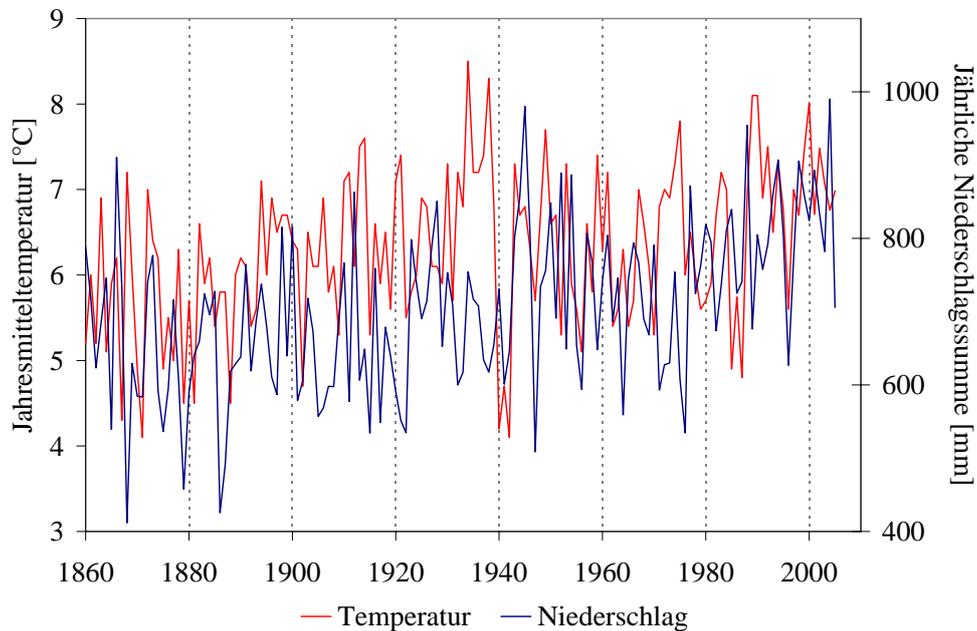


Abbildung 4.14: Jährliche Niederschlagssummen und Jahresmitteltemperaturen der Klimastation Vaxjö

4 Ergebnisse

In den Sommermonaten sind Temperatur und Niederschlag in Mitteleuropa grundsätzlich negativ korreliert (Neumann, 2001). In Abbildung 4.14 ist diese Gegenläufigkeit am Beispiel der jährlichen Niederschlagssummen und den Jahresmitteltemperaturen der Klimastation Väjö dargestellt.

Positive Korrelationen im aktuellen Jahr bestehen zwischen den Temperaturen des Juli bis September. Die Korrelationen der Buchen nach ihren Standorten getrennt sind in Darstellung 4.15 zu erkennen.

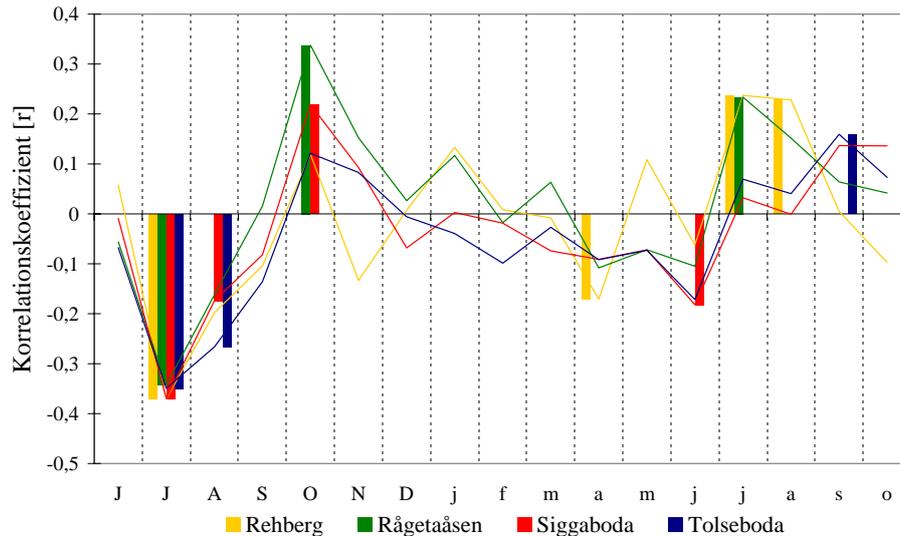


Abbildung 4.15: Monatsweise Korrelationen des standardisierten radialen Wachstums der **Buchen** mit der Temperatur nach Standorten getrennt, signifikante Korrelationen als Säulen

Hohe Temperaturen im Juli des laufenden Jahres wirken sich positiv auf das Wachstum der Buchen in Rågetaåsen aus. Auch der montan gelegene Rehberg kann von höheren Temperaturen in Juli und August im Jahr der Ringbildung profitieren. Der Zuwachs der Buchen am Rehberg zeigt weiterhin einen negativen Einfluss der April-Temperatur.

Der Zuwachs der Fichten reagiert negativ auf erhöhte Temperaturen im Juli und September des Vorjahres. Ein starker positiver Einfluss der Temperatur im Frühsommer der laufenden Vegetationsperiode ist sichtbar. Die Abbildung 4.16 verdeutlicht die Korrelationen des Wachstums mit der Temperatur nach Standorten getrennt. Interessant ist die fehlende Signifikanz der Korrelation zwischen der Temperatur und dem Zuwachs der Fichten am Standort Rågetaåsen. Auf allen Standorten mit Ausnahme von Rågetaåsen reagieren die Fichten auf die Temperatur des Vorjahres-Oktober, doch liegen diese Korrelationen unterhalb der Signifikanzgrenze.

4 Ergebnisse

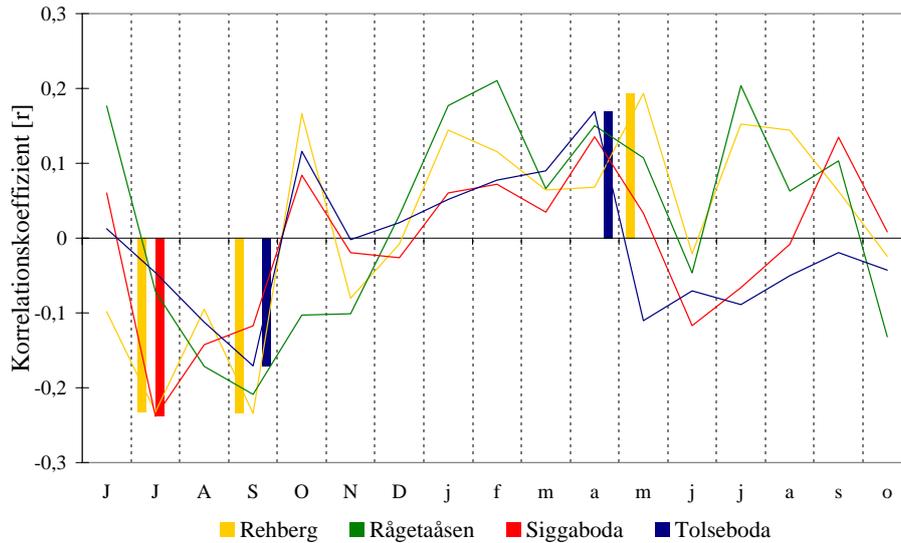


Abbildung 4.16: Monatsweise Korrelationen des standardisierten radialen Wachstums der **Fichten** mit der Temperatur nach Standorten getrennt, signifikante Korrelationen als Säulen

Niederschlag

Neben der Temperatur wurden Korrelationen des Wachstums mit monatlichen Niederschlagssummen berechnet. Abbildung 4.17 stellt die signifikanten Korrelationskoeffizienten von Buchen (rote Säulen) und Fichten (blaue Säulen) aller Standorte vom Juni des Vorjahres (Großbuchstaben) bis zum Oktober des Jahres der Ringbildung (Kleinbuchstaben) dar. Im Gegensatz zu den Korrelationen mit der Temperatur (Abb. 4.13) sind die Beziehungen des Wachstums zum Niederschlag ausschließlich positiv.

Entsprechend dem Vorjahres-Einfluss der Temperaturen auf das Wachstum der Buchen, ist auch der Niederschlag des Julis für das Folgejahr ausschlaggebend, jedoch mit positiver Korrelation. Genauer ist es eine Periode vom Juni bis zum August. Weiterhin besteht ein positiver Zusammenhang mit Niederschlägen im April und Mai des aktuellen Jahres. Nach Standorten getrennt sind die Korrelationen in Abbildung 4.18 zu sehen. Rågetaåsen zeigt lediglich eine schwache Korrelation mit dem aktuellen April, Auch Rehberg und Siggaboda werden von April- bzw. Mai-Niederschlägen positiv beeinflusst. Der Vorjahres-Sommer ist jedoch maßgeblich. Insgesamt ist jedoch ein deutlich weniger straffer Zusammenhang zu erkennen als bei der Temperatur.

4 Ergebnisse

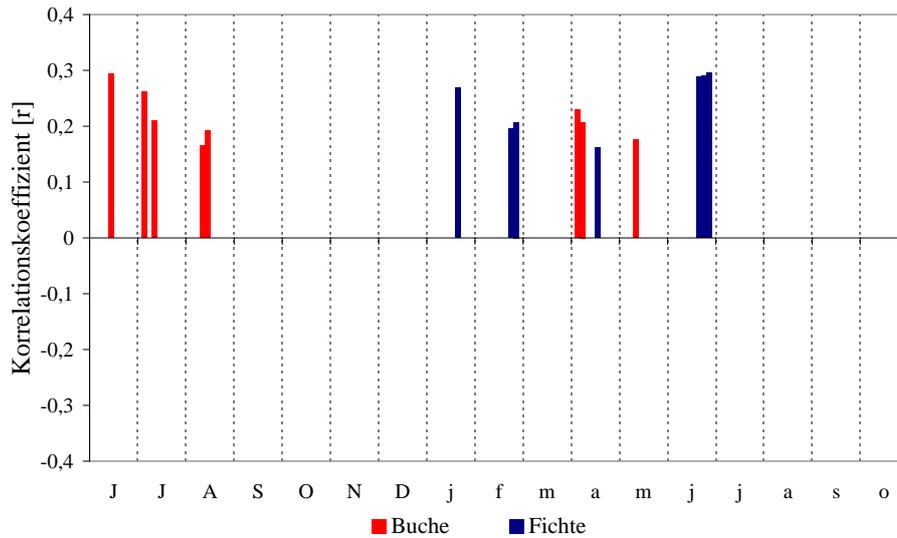


Abbildung 4.17: Monatsweise Korrelationen des standardisierten radialen Wachstums von Buche und Fichte aller Standorte mit der Klimavariablen Niederschlag

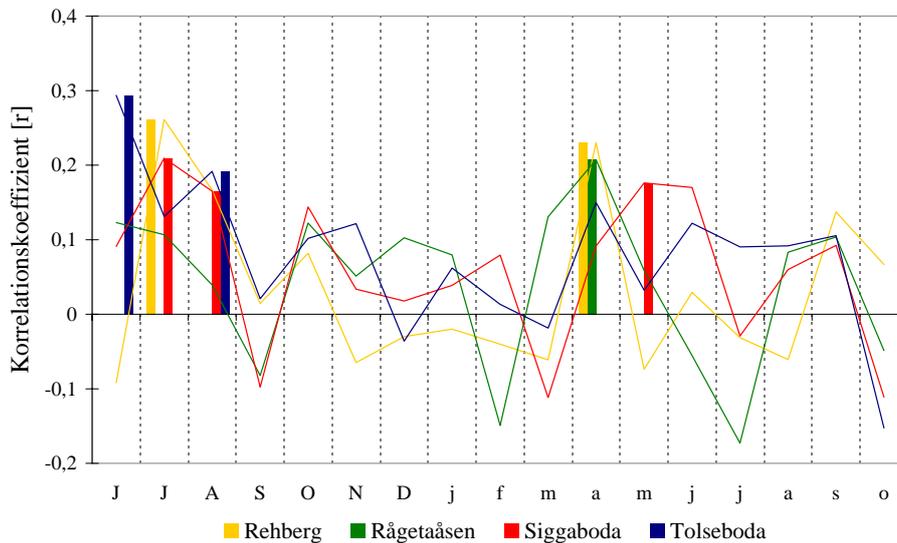


Abbildung 4.18: Monatsweise Korrelationen des standardisierten radialen Wachstums der **Buchen** mit dem Niederschlag nach Standorten getrennt, signifikante Korrelationen als Säulen

Die enge Beziehung des Niederschlags zum Wachstum ist bei den Fichten mit hohen Korrelationen belegt. Der Juni im Jahr der Ringbildung begünstigt das Wachstum erkennbar. Erhöhte Niederschläge im Januar und Februar des Jahres der Ringbildung wirken sich ebenso positiv auf den Zuwachs aus. Abbildung 4.19 zeigt die Korrelationen mit dem Niederschlag nach Standorten getrennt. Die einzige signifikante Korrelation der Fichten des Rehbergs mit Niederschlägen zeigt sich mit dem laufenden April.

4 Ergebnisse

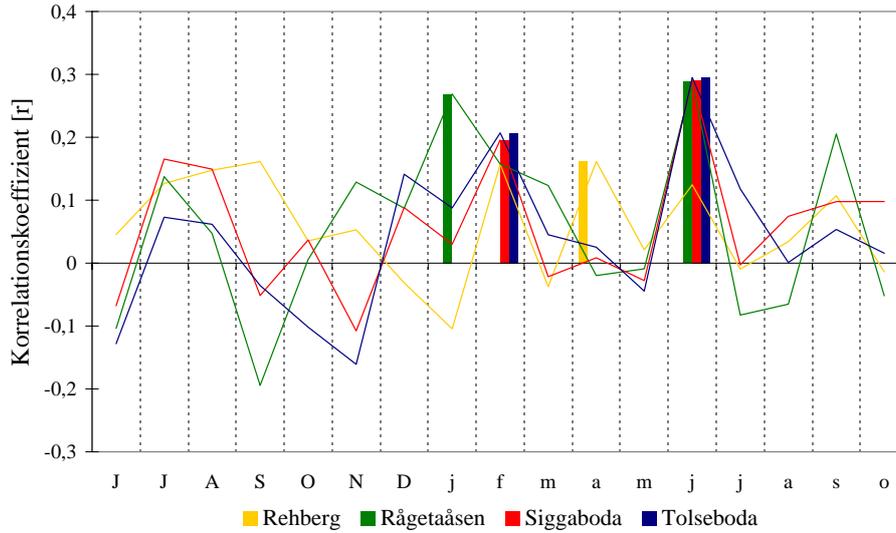


Abbildung 4.19: Monatsweise Korrelationen des standardisierten radialen Wachstums der **Fichten** mit dem Niederschlag nach Standorten getrennt, signifikante Korrelationen als Säulen

Zusammenfassung der wesentlichen Witterungssignale

Im Allgemeinen ist das radiale Wachstum der Buchen auf den untersuchten Standorten stärker durch Temperatur limitiert als durch Niederschlag. Die Maximalwerte sind in Tabelle 4.12 rot hervorgehoben.

Tabelle 4.12: Klima-Zuwachs Beziehungen der Buche auf allen Standorten, + / - = positive / negative Korrelation, rot hervorgehoben = höchster Wert; Signifikanz $P < 0,05$; R^2 = Bestimmtheitsmaß des höchsten Wertes

	Temperatur																R^2 [%]	
	Vorjahr					Jahr der Ringbildung												
	J	J	A	S	O	N	D	j	f	m	a	m	j	j	a	s		o
Rehberg	-													+	+			13,7
Rågetaåsen	-				+										+			11,7
Siggaboda	-	-			+									-				13,7
Tolseboda	-	-															+	12,2
	Niederschlag																R^2 [%]	
	Vorjahr					Jahr der Ringbildung												
	J	J	A	S	O	N	D	j	f	m	a	m	j	j	a	s		o
Rehberg	+													+				5,3
Rågetaåsen														+				4,3
Siggaboda		+	+											+				4,4
Tolseboda	+		+															8,6

4 Ergebnisse

Die höchsten signifikanten Korrelationen bestehen zwischen der Temperatur im Juli des Vorjahres und dem radialen Zuwachs. Die Juli-Temperatur beeinflusst die Jahrringbildung des folgenden Jahres negativ. Bevorteilt durch günstigere Standorts- und Witterungsbedingungen, sind die Zuwächse der Buchen der Standorte Rehberg und Rågetaåsen zusätzlich positiv mit der Juli- und August-Temperatur im Jahr der Ringbildung korreliert. Die Buchen sind in der Regel weniger stark mit dem Niederschlag korreliert, was sich deutlich am niedrigen Bestimmtheitsmaß zeigt. Doch auch beim Niederschlag spielt das Vorjahr eine größere Rolle als das Jahr der Ringbildung. Eine Periode von Juni bis August mit Schwerpunkt auf dem Juli ist positiv mit dem Wachstum korreliert. Schwächere Korrelationen bestehen bei drei Standorten mit den Niederschlägen des April bzw. Mai im aktuellen Jahr. Die Buchen der Standorte Siggaboda und Rågetaåsen können erhöhte Herbsttemperaturen positiv für den radialen Zuwachs nutzen.

Im Unterschied zu den Buchen wird das Wachstum der Fichten vorrangig vom Niederschlag positiv beeinflusst (Tab. 4.13). Die höchsten signifikanten Korrelationen bestehen mit dem Niederschlag des Juni im Jahr der Ringbildung. Die stärksten Einflüsse der Temperatur finden sich analog zu den Buchen im Spätsommer des Vorjahres in negativer Form.

Tabelle 4.13: Klima-Zuwachs Beziehungen der Fichte auf allen Standorten, + / - = positive / negative Korrelation, rot hervorgehoben = höchster Wert; Signifikanz $P < 0,05$; R^2 = Bestimmtheitsmaß des höchsten Wertes

	Temperatur																R^2 [%]	
	Vorjahr								Jahr der Ringbildung									
	J	J	A	S	O	N	D	j	f	m	a	m	j	j	a	s		o
Rehberg		-		-													+	5,5
Rågetaåsen																		5,7
Siggaboda		-																2,9
Tolseboda				-													+	

	Niederschlag																R^2 [%]	
	Vorjahr								Jahr der Ringbildung									
	J	J	A	S	O	N	D	j	f	m	a	m	j	j	a	s		o
Rehberg																	+	2,6
Rågetaåsen								+									+	8,3
Siggaboda									+								+	8,5
Tolseboda									+								+	8,7

Gleichläufigkeiten und t-Werte

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Analysen der Gleichläufigkeiten (Glk) und t-Werte zwischen den standardisierten Standorts-Chronologien, und den Klimakurven getrennt für Temperatur und Niederschlag aufgeführt. Dargestellt werden nur die jeweils drei besten Übereinstimmungen.

In Tabelle 4.14 sind die Ergebnisse zum Standort **Rehberg** aufgeführt. Da der Korrelationskoeffizient in die Berechnung der t-Werte eingeht, sind Übereinstimmungen in den Ergebnissen zwischen der Korrelations-Analyse und den t-Werten nicht überraschend. Aber auch die Glk bestätigen die bereits gewonnenen Erkenntnisse. Bei den Buchen wird wiederum die Temperatur im Juli und August im Jahr der Ringbildung als entscheidender Einfluss errechnet. Ein hochsignifikanter t-Wert und hohe Glk bestätigen dies. Der alleinige Einfluss des Julis wird für das aktuelle Jahr höher berechnet als für das Vorjahr. Doch die stärkeren Korrelationen finden sich für den Einfluss des Vorjahres. Beim Niederschlag sind in beiden Analysen der Vorjahres-Juli und August dominant. Bei den Fichten wird der inverse Zusammenhang zwischen der Temperatur des Vorjahres-September durch signifikante Korrelationen wie auch hohe Glk bestätigt. An zweiter Stelle spielt die Temperatur des Zeitraumes März-August im Jahr der Ringbildung eine wichtige Rolle. Für den Niederschlag gibt es weder hohe Korrelationen noch konnten ausreichend hohe Glk eine Abhängigkeit zeigen. Zudem weisen die t-Werte erhöhte Irrtumswahrscheinlichkeiten auf.

Auch am Standort **Rågetaåsen** gibt es Übereinstimmungen zwischen beiden Analysen (Tab. 4.15). Die Buchen von Rågetaåsen zeigen in ihrem Zuwachs ebenfalls eine Abhängigkeit von den Temperaturen des Juli und August im aktuellen Jahr wie auch im Vorjahr. Beim Niederschlag zeigen beide Analysen den Zusammenhang mit dem April im Jahr der Ringbildung. Der durch etwas höhere Glk berechnete Einfluss des Niederschlags im Zeitraum vom Mai - Juli des Vorjahres kann nicht mit signifikanten Korrelationen belegt werden. Auch die t-Wert-Analysen weisen nur geringe Signifikanzen auf. Für die Fichten zeigt sich ein negativer Zusammenhang des Zuwachses mit der Temperatur des Vorjahres-September durch hohe Glk. Der Niederschlag im Juni im Jahr der Ringbildung wird durch beide Analysen als ein wachstumsbestimmender Faktor bestätigt.

4 Ergebnisse

Tabelle 4.14: Gleichläufigkeiten und t-Werte zwischen Wachstums- und Klimakurven des Standortes **Rehberg**, Bu=Buche, Fi=Fichte; Zeitraum: V=Vorjahr, A=aktuelles Jahr der Ringbildung; Glk=Gleichläufigkeit; PGLK=Signifikanzlevel der Gleichläufigkeit: 1<0,001, 2<0,01, 3<0,05; TVBP= t-Wert nach Baillie und Pilcher; PTV= Signifikanzlevel des t-Werts: 1<0,001, 2<0,01, 3<0,05

Baumart	Klimavariablen	Monat(e)	Zeitraum	Glk	PGLK	TVBP	PTV
Buche	Temperatur	Juli / August	A	68	1	5,5	1
		Juli	A	66	1	4,7	1
		Juli	V	64	2	4,6	1
	Niederschlag	Juli / August	V	63	2	3,7	1
		Juli	V	57	3	3,7	1
		April	A	54		1,6	
Fichte	Temperatur	September	V	65	2	2,8	2
		März-August	A	52		2,8	2
		März-Juli	A	50		3,3	2
	Niederschlag	Februar	V	58	3	2,5	3
		gesamt	V	57	3	0,7	
		April	A	57		1,5	

Tabelle 4.15: Gleichläufigkeiten und t-Werte zwischen Wachstums- und Klimakurven des Standortes **Rägetaäsen**

Baumart	Klimavariablen	Monat(e)	Zeitraum	Glk	PGLK	TVBP	PTV
Buche	Temperatur	Juli	V	60	3	3,6	1
		Juli / August	A	56		3,0	2
		April / Mai	V	54		3,1	2
	Niederschlag	Mai-Juli	V	60	3	2,1	3
		April	A	58		1,1	
		Juni	V	53		0,8	
Fichte	Temperatur	September	V	66	2	2,6	2
		März / Mai	A	58		1,1	
		August / Sept.	A	54		0,4	
	Niederschlag	April	A	59		1,2	1
		Juni	A	57		3,3	2
		Mai-August	V	56		1,5	

In **Siggaboda** (Tab. 4.16) zeigt das Wachstum der Buchen Zusammenhänge mit der Temperatur des Juli und August für das Vor- wie auch das aktuelle Jahr. Auch der Niederschlag zeigt hohe Glk wie signifikante t-Werte. Belegt durch Korrelationen, Glk und t-Werte, spielt besonders der Juli des Vorjahres eine entscheidende Rolle. Bei den Fichten ist der jahreszeitliche Verlauf des Klimaeinflusses besonders gut zu erkennen. Zunächst spielen sich viele wichtige Zusammenhänge zwischen Klima und Wachstum im

4 Ergebnisse

Jahr der Ringbildung ab. Zu Beginn spielt der Niederschlag im Februar eine große Rolle. Anschließend haben die Temperaturen des März bis Mai einen besonderen Einfluss auf das Wachstum. Im weiteren Verlauf der Vegetationsperiode nimmt nun der Einfluss des Niederschlags wieder an Bedeutung zu. Der Niederschlag des Juni wird durch hochsignifikante Glk und t-Werte als besonders entscheidend bestätigt. Ein ähnlicher, jahreszeitlicher Ablauf der Klimaeinflüsse kann ebenso bei den Fichten des Standortes Tolseboda (siehe Tab. 4.17) erkannt werden. Weiterhin wird deutlich, dass nicht immer ganze Zeiträume für das Wachstum einer Baumart entscheidend sein müssen. Die Korrelationen wie auch die Glk und t-Werte sind für den einzelnen Monat Juni bedeutend höher als beispielsweise für den Zeitraum April-Juni. Auch die Zeiträume Mai-Juli oder Mai-Juni, hier nicht dargestellt, erreichen mit weniger hohen Glk und t-Werten keine so eindeutigen Zusammenhänge wie der Juni allein. Gegen Ende des den radialen Zuwachs bestimmenden Zeitraumes zeigt sich der negative Zusammenhang mit der Temperatur des Juli, dessen Auswirkungen den Jahrring des Folgejahres treffen.

Tabelle 4.16: Gleichläufigkeiten und t-Werte zwischen Wachstums- und Klimakurven des Standortes **Siggaboda**

Baumart	Klimavariablen	Monat(e)	Zeitraum	Glk	PGLK	TVBP	PTV
Buche	Temperatur	Juli	V	65	1	4,0	1
		Juli / August	V	62	2	3,5	1
		Juli	A	57		2,1	3
	Niederschlag	Juli	V	64	1	3,0	2
		Mai-Juli	V	63	1	2,2	3
		Mai-August	V	62	2	2,6	3
Fichte	Temperatur	März-Mai	A	59	3	1,9	
		April	A	59	3	2,4	3
		Juli	V	58	3	2,0	3
	Niederschlag	Juni	A	61	2	4,3	1
		Februar	A	61	2	2,0	3
		April-Juni	A	55		2,3	3

In Tabelle 4.17 sind die Ergebnisse zum Standort **Tolseboda** aufgelistet. Die Temperatur des Vorjahres Juli und August wird erneut als bedeutender Faktor für das Wachstum der Buchen bestätigt. Durch die Berechnung der Glk zeigt sich der besonders starke Einfluss des Julis. In Abbildung 4.20 ist dieser Zusammenhang grafisch dargestellt. Die Kurve des indexierten Zuwachses der Buchen und die invers dargestellte Kurve der Juli-Temperatur des Vorjahres verlaufen zu 72 % parallel. Besonders die negativen Ausschläge verlaufen synchron. Lediglich das Jahr 1916 fällt hier aus der Reihe, da dieses Weiserjahr maßgeblich durch mangelnden Niederschlag geprägt wurde (Kap. 4.3.4). Im

4 Ergebnisse

Jahr der Ringbildung ist die Glk für die Temperatur im September hoch, der t-Wert ist dagegen niedrig und nicht signifikant. Weiterhin sind die t-Werte wie auch die Glk alle- samt hochsignifikant für den Niederschlag der Vegetationsperiode vor der Ringbildung. Insgesamt zeigt sich durch die höchsten Signifikanzen der bedeutende Einfluss des Vor- jahres auf den Zuwachs der Buchen. Bei den Fichten sind die Frühjahrs-Temperaturen, besonders des April im aktuellen Jahr, von entscheidendem Einfluss für das Wachstum. Der Zusammenhang mit dem Niederschlag des Juni im Jahr der Ringbildung wird durch hohe Korrelationen wie auch hohe Glk und einen hochsignifikanten t-Wert deutlich. Der Einfluss des Juni allein scheint auch hier wieder stärker zu sein, als der eines Zeitraumes, in den der Juni eingeschlossen ist.

Tabelle 4.17: Gleichläufigkeiten und t-Werte zwischen Wachstums- und Klimakurven des Standortes **Tolseboda**

Baumart	Klimavariablen	Monat(e)	Zeitraum	Glk	PGLK	TVBP	PTV
Buche	Temperatur	Juli	V	72	1	5,2	1
		Juli / August	V	69	1	6,0	1
		September	A	57	3	1,2	
	Niederschlag	Mai-August	V	67	1	5,2	1
		April-August	V	64	1	4,0	1
		Juni	V	64	1	3,7	1
Fichte	Temperatur	März / April	A	60	2	2,4	3
		April	A	56		1,8	
		Mai-Juli	A	50		3,5	1
	Niederschlag	Juni	A	61	2	4,5	1
		Mai-Juli	A	55		4,1	1
		Juni-August	A	55		3,4	1

4 Ergebnisse

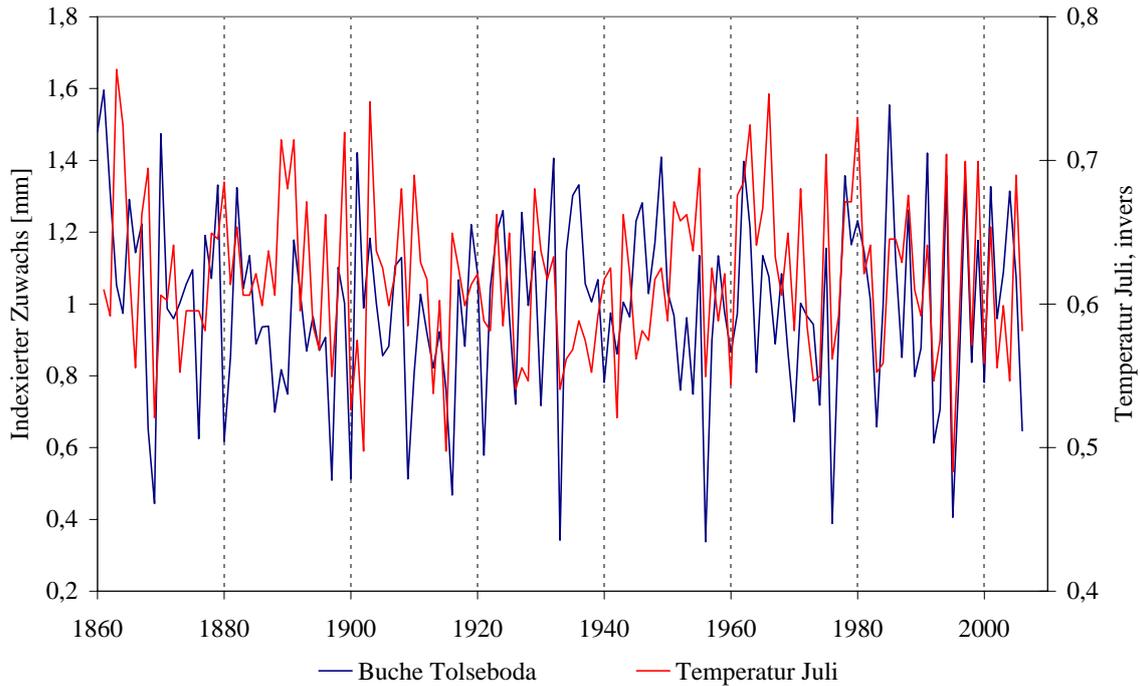


Abbildung 4.20: Standardisierte Chronologie der Buchen vom Standort Tulseboda und die monatlichen Mitteltemperaturen des Vorjahres-Juli in inverser Darstellung

4.3.2 Regressionsanalysen

Um eine Vergleichbarkeit zwischen den Ergebnissen zu erhalten, fließen wie zuvor in die Korrelationen auch in das lineare Regressionsmodell sämtliche Witterungsvariablen ein: monatliche Temperaturmittelwerte und Niederschlagssummen, jeweils für das Vorjahr und das Jahr der Ringbildung. Das Modell erklärt lediglich für die Buchen der Standorte Rehberg, Siggaboda und Tulseboda einen kleinen Teil der Zuwachsvarianz mit einem korrigierten Bestimmtheitsmass von 0,23 - 0,34 (Tab. 4.18). Der Zuwachs der Fichten des Standorts Rehberg lässt sich gerade noch mit einem R^2 von 0,19 erklären. Die übrigen Werte sind nicht signifikant. Die Varianzen der Fichten in Tulseboda und beider Baumarten in Rågetaåsen lassen sich nicht durch ein lineares Regressionsmodell erläutern.

Tabelle 4.18: Statistik des Gesamtmodells

Standort	Baumart	Stdf.	FG	multiples R ²	korr. R ²	F-Test	p
Rehberg	Bu	0,19	71	0,61	0,34	2,27	0,0008
	Fi	0,18	71	0,51	0,19	1,57	0,0415
Rågetaåsen	Bu	0,18	49	0,54	0,09	1,20	0,2651
	Fi	0,11	12	0,81	0,06	1,08	0,4728
Siggaboda	Bu	0,20	96	0,49	0,23	1,90	0,0040
	Fi	0,13	80	0,47	0,15	1,46	0,0678
Tolseboda	Bu	0,22	98	0,49	0,25	2,05	0,0016
	Fi	0,16	87	0,39	0,07	1,21	0,2250

Schrittweise Regression

Durch eine schrittweise Regression, in der rückwärts fortschreitend nicht signifikante Witterungsvariablen aus dem Modell gelöscht werden, sollen die wesentlichen Einflussgrößen für den Zuwachs der Baumarten herausgearbeitet werden. Im Ergebnis zeigt sich ein vergleichbares Bild zum vorangegangenen linearen Modell. Nur für die besten Ergebnisse, die Buche am Standort Rehberg sowie Tolseboda, kann für den Zuwachs ein Haupteinflussfaktor berechnet werden. In beiden Fällen ist es die Temperatur des Juli im Vorjahr (Tab. 4.19). In allen anderen Fällen kann keine Variable als maßgeblich für den Zuwachs erkannt werden. Dies zeigt deutlich, dass es sich bei den zuwachsbeeinflussenden Größen um komplexe Systeme handelt, die nicht auf einzelne wenige Faktoren beschränkt werden können.

Tabelle 4.19: Ergebnisse der schrittweisen Regression für den Zuwachs der Buchen der Standorte Tolseboda und Rehberg mit dem Haupteinflussfaktor: Temperatur des Julis im Vorjahr

	Intercept	Slope	Stdf.	korr. R ²	Wald-Z	p
Tolseboda	1,972	-0,060	0,012	0,12	-4,873	0,0000
Rehberg	1,755	-0,052	0,010	0,13	-4,97	0,0000

Mittels einer Varianzanalyse (ANOVA) können die komplexen Gemeinschaften der Einflussgrößen beschrieben werden. In Tabelle 4.20 sind alle durch die Varianzanalyse berechneten Witterungseinflüsse auf den Buchenzuwachs je Standort mit dem jeweiligen Signifikanzlevel dargestellt. Die Temperatur des Vorjahres-Juli taucht erneut auf allen Standorten auf, jedoch mit unterschiedlichem Signifikanzlevel. Nur in Siggaboda und Tolseboda zeigt er die höchsten Signifikanzen. Im Gegensatz zum linearen Regressionsmodell, in dem auch für den Standort Rehberg der Juli als der maßgebliche Einfluss

4 Ergebnisse

berechnet wurde. In Rågetaåsen zeigen sich erneut weniger beeinflussende Variablen und hier ist die Oktober-Temperatur des Vorjahres entscheidend für den Zuwachs. Die Ergebnisse für Rågetaåsen entsprechen fast der Korrelationsanalyse, bis auf die Ausnahme, dass die Signifikanz für den April-Niederschlag des aktuellen Jahres in der Varianzanalyse nur bei 0,07 liegt. Auch die höhersignifikanten Variablen des Temperatureinflusses von Tolseboda entsprechen der Korrelationsanalyse. Insgesamt ist die Ähnlichkeit der Ergebnisse zur Korrelationsanalyse deutlich.

Tabelle 4.20: Ergebnisse der Varianzanalyse der zuwachsbeeinflussenden Witterungsvariablen für die Buchen getrennt nach Vor- und aktuellem Jahr; Signifikanzlevel: **fett** = $p < 0,001$; *kursiv* = $p < 0,01$; normal = $p < 0,05$

		Rehberg	Rågetaåsen	Siggaboda	Tolseboda
Temperatur	Vorjahr	Januar <i>März</i> <i>Juli</i> Oktober November	Juli <i>Oktober</i>	Juli	Juli <i>August</i>
	akt. Jahr	<i>Juli</i> August	Juli	September	Juni Juli <i>September</i> November
Niederschlag	Vorjahr	<i>Januar</i> <i>Juli</i>		<i>Juli</i> August	<i>Juni</i>
	akt. Jahr	<i>April</i> September November		Mai Juni	April Oktober

Entsprechend der ergebnislosen schrittweisen Regression zeigen sich auch in den Ergebnissen der Varianzanalyse für die Fichten wenige signifikante Einflussvariablen (Tab. 4.21). In der Korrelationsanalyse stach der positive Einfluss des Juni-Niederschlags im laufenden Jahr deutlich hervor, hier zeigen lediglich die Fichten am Standort Siggaboda diesen Zusammenhang. In Rågetaåsen liegt der Signifikanzlevel für den Juni nur bei 0,05. Interessant ist aber die Übereinstimmung des Einflusses des Februar-Niederschlags im aktuellen Jahr für die Fichten in Tolseboda und Siggaboda in der Korrelationsanalyse wie in der ANOVA. Er ist in beiden Analysen nicht bedeutend hoch, aber signifikant.

4 Ergebnisse

Tabelle 4.21: Ergebnisse der Varianzanalyse der Zuwachsbeeinflussenden Witterungsvariablen für die Fichten getrennt nach Vor- und aktuellem Jahr; Signifikanzlevel: **fett** = $p < 0,001$; *kursiv* = $p < 0,01$; normal = $p < 0,05$

		Rehberg	Rågetaåsen	Siggaboda	Tolseboda
Temperatur	Vorjahr	März <i>September</i> Oktober	August	Januar <i>Juli</i>	
	akt. Jahr				September
Niederschlag	Vorjahr	August		Februar November	Februar Juni Dezember
	akt. Jahr			Februar <i>Juni</i>	

Regressions-Baum

Die Funktion *RegTree* der Software *R* berechnet ebenfalls mittels einer schrittweisen Regression die Haupteinflussgröße auf den Zuwachs. In einem Baumdiagramm steht diese in Beziehung zu den nächstwichtigen Einflussgrößen an oberster Stelle. Daneben steht der zugehörige Wert, der die beste Erklärung der Varianz liefert. Dieser Wert ist gleichzeitig ein Schwellenwert, für dessen höher bzw. niedriger liegende Werte die anschließend wichtigen Einflussgrößen angeschlossen werden. Diese Art der grafischen Darstellung wurde gewählt, da sie einen hervorragenden Überblick über die wesentlichen Witterungseinflüsse und deren Zusammenhänge gibt. Es wird so deutlich, ob eine Baumart an diesem speziellen Standort im Wesentlichen von der Temperatur oder dem Niederschlag abhängig ist, oder ob dieser Standort keine wirkliche Haupteinflussgröße erkennen lässt. Eingang in die Berechnung fanden diejenigen Witterungsvariablen, die ökophysiologische Relevanz für den radialen Zuwachs aufweisen. Dies sind monatliche Temperaturmittelwerte und Niederschlagssummen der Monate Juni bis Dezember des Vorjahres und Januar bis Oktober im Jahr der Ringbildung. Im Folgenden werden beispielhaft die Regressions-Bäume für Buche der Standorte Rehberg und Tolseboda und für Fichte der Standorte Siggaboda und Tolseboda dargestellt und knapp beschrieben. Die übrigen Darstellungen sind im Anhang nachzusehen.

Beispiele Buchen

Der Regressions-Baum der Zuwachseinflüsse der Buchen am Standort **Rehberg** (Abb. 4.21) zeigt an oberster Stelle die Juli-Temperatur des Vorjahres. Bei einem Wert von $16,15^{\circ}\text{C}$ wird der größte Teil der Varianz erklärt. Steigt die Temperatur z.B. über diesen Wert, so spielt im Anschluss der Niederschlag des laufenden Oktobers eine Rolle. Sind in dieser Konstellation die Niederschläge niedriger als $73,1\text{ mm}$, so nimmt der Jahrring theoretisch eine mittlere Breite von $0,4553\text{ mm}$ an. Liegt die Temperatur unter $16,15^{\circ}\text{C}$, so ist der nächstwichtigste Faktor die Juli-Temperatur des laufenden Jahres, mit einem zentralen Wert von $16,55^{\circ}\text{C}$. So lassen sich verschiedene, dennoch theoretische Szenarien vorstellen. Aber im Wesentlichen zeigt dieses Ergebnis die hohe Abhängigkeit der Buchen an diesem Standort von den Temperaturen, speziell den Juli-Temperaturen. Nur äußerst wenige Einflussgrößen folgen dem Ast des Baumes im Falle einer höheren Juli-Temperatur. Hier besteht demnach wenig Spielraum, der Jahrring wird schmal.

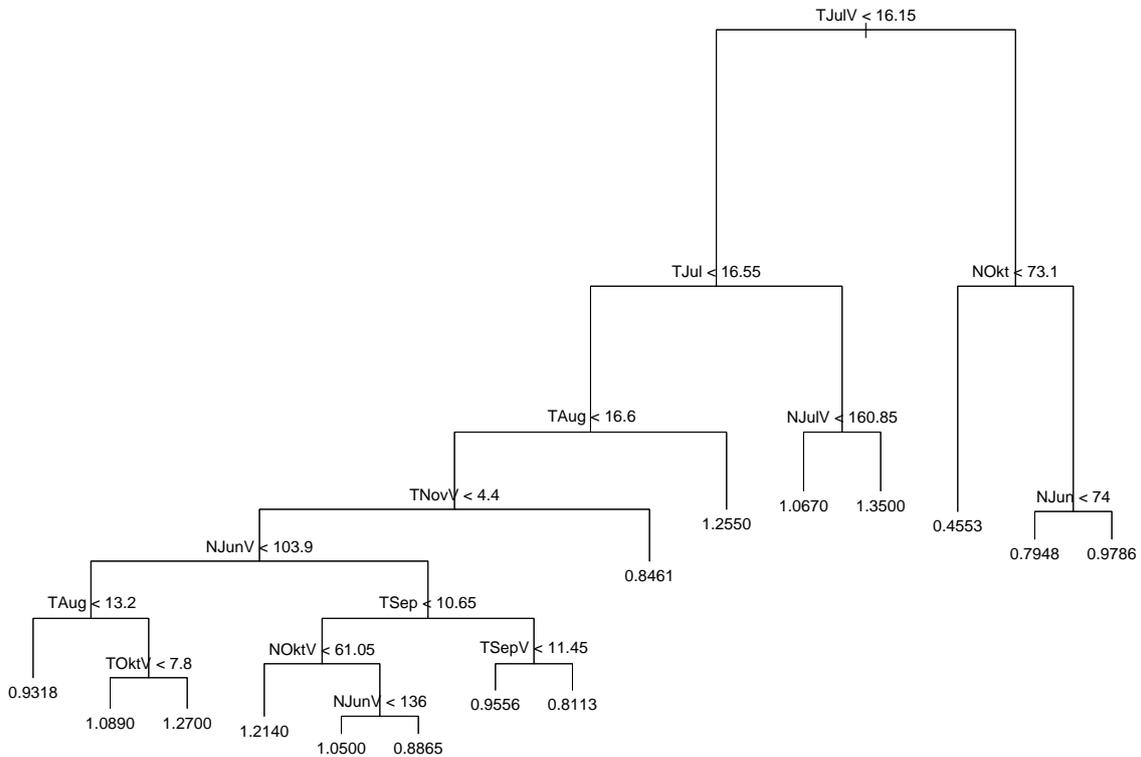


Abbildung 4.21: Regressionsbaum der Buchen vom Standort Rehberg; T = Temperatur, N = Niederschlag, V = Vorjahr

4 Ergebnisse

Der Haupteinflussfaktor am Standort **Tolseboda** ist die Temperatur des Vorjahres-Juli mit einem Schwellenwert von $18,15^{\circ}\text{C}$ (Abb. 4.22). Beim Überschreiten dieses Wertes gibt es nur noch zwei Faktoren, die den Zuwachs beeinflussen können, der Niederschlag im September und im November, beide des Vorjahres. Der Schwellenwert liegt mit $18,15^{\circ}\text{C}$ für die Juli-Temperatur jedoch bedeutend höher als am Standort Rehberg. Es ist somit davon auszugehen, dass nur in Extremjahren dieser Wert überschritten wird. Niedrigere Temperaturen ziehen dagegen eine ganze Reihe weiterer wichtiger Einflussgrößen nach sich. An erster Stelle steht hier der Niederschlag des Vorjahres-Juni. Die Struktur des Regressionsbaumes ist dem vorigen sehr ähnlich. Wenige Größen haben noch einen Einfluss auf den Zuwachs bei besonders hohen Juli-Temperaturen, viele dagegen bei niedrigeren.

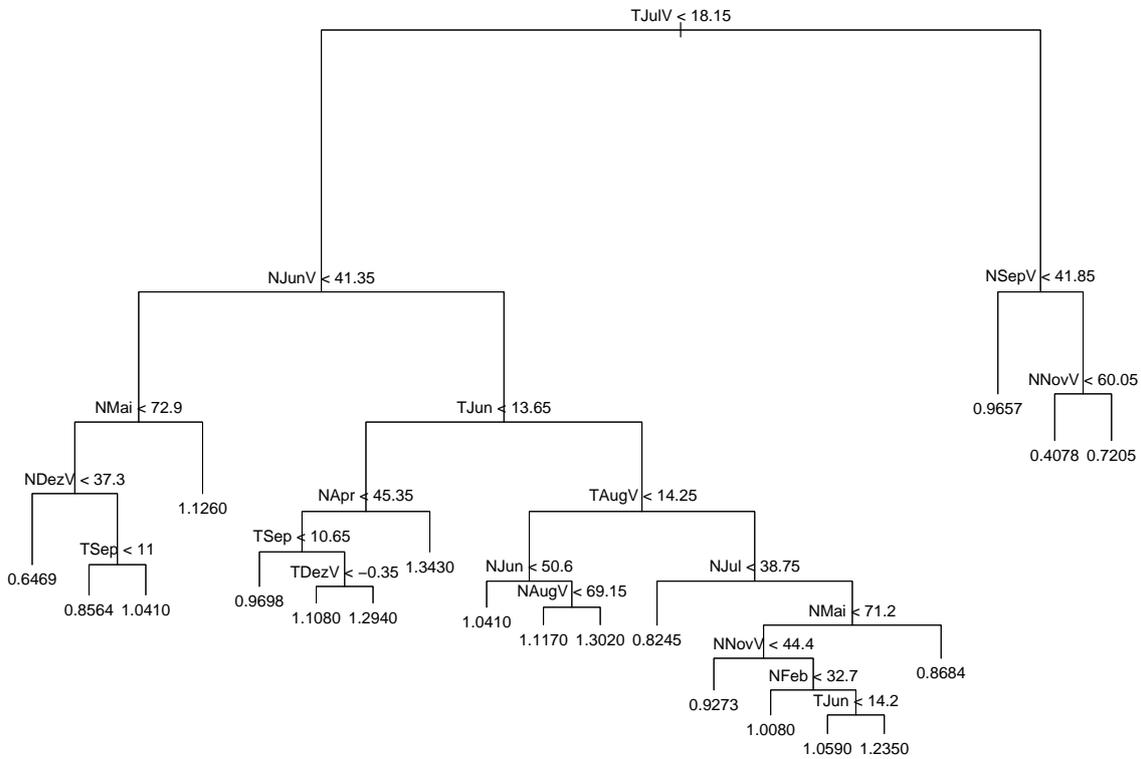


Abbildung 4.22: Regressionsbaum der Buchen vom Standort Tolseboda

Beispiele Fichten

Der Regressions-Baum der Fichten vom Standort **Siggaboda** zeigt als den signifikantesten Faktor den Niederschlag des laufenden Junis (Abb. 4.23). Fällt dieser unter den Wert von 39,8 mm, so gewinnt der Niederschlag des Vorjahres-Juli an Bedeutung. Ist der Niederschlag jedoch höher, so reihen sich nach der Temperatur des laufenden Dezember eine Vielzahl an Faktoren an. Als bedeutender Faktor zeigt sich die Temperatur des aktuellen April, ist sie höher oder niedriger als 4,05°C, so haben verschiedene weitere Faktoren Einfluss auf den Zuwachs.

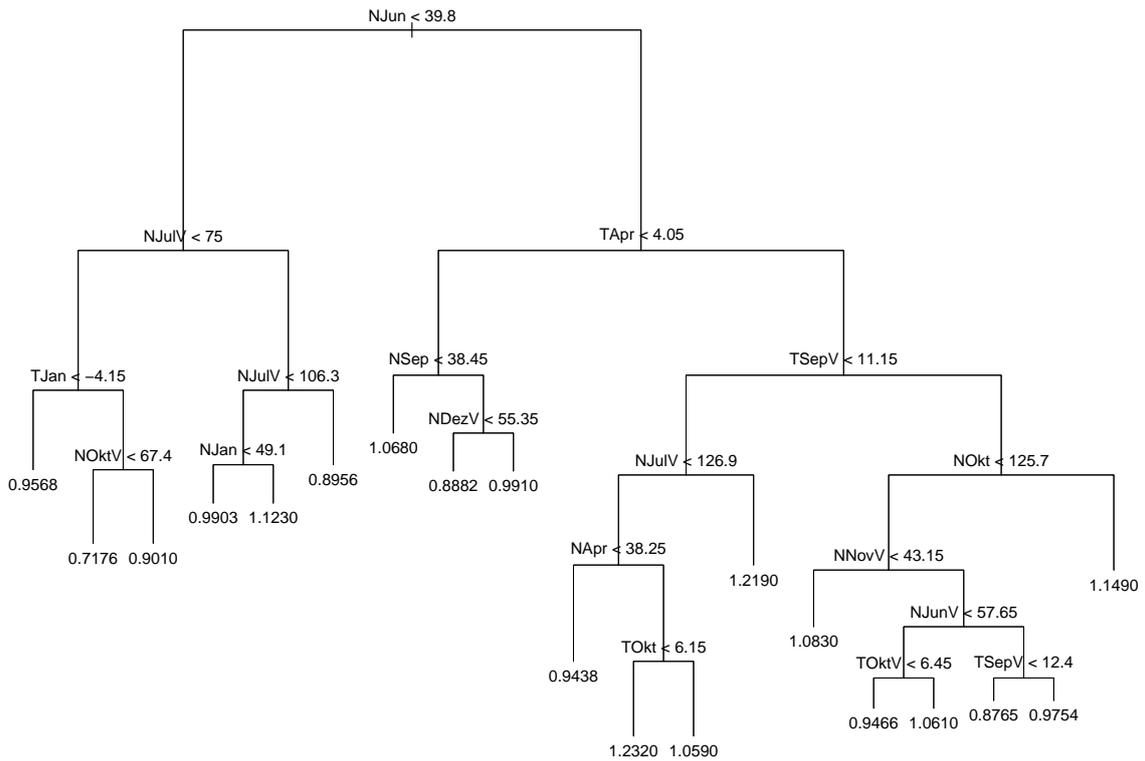


Abbildung 4.23: Regressionsbaum der Fichten vom Standort Siggaboda

4 Ergebnisse

Der Niederschlag des Juni ist am Standort **Tolseboda** der Haupteinflussfaktor (Abb. 4.24), jedoch vom Vorjahr. Fällt dieser unter 35,45 mm, so nehmen nur noch wenige Faktoren Einfluss, ist er jedoch höher, so spielt als nächstes die Frühjahrstemperatur im laufenden März eine wesentliche Rolle. Insgesamt reihen sich auch hier an die Haupteinflussgröße an der Seite des Baumes, die den für den Zuwachs positiven Ast darstellt, in diesem Fall hoher Niederschlag, viele weitere Faktoren an, wogegen auf der negativen Seite wenige Größen hinzukommen.

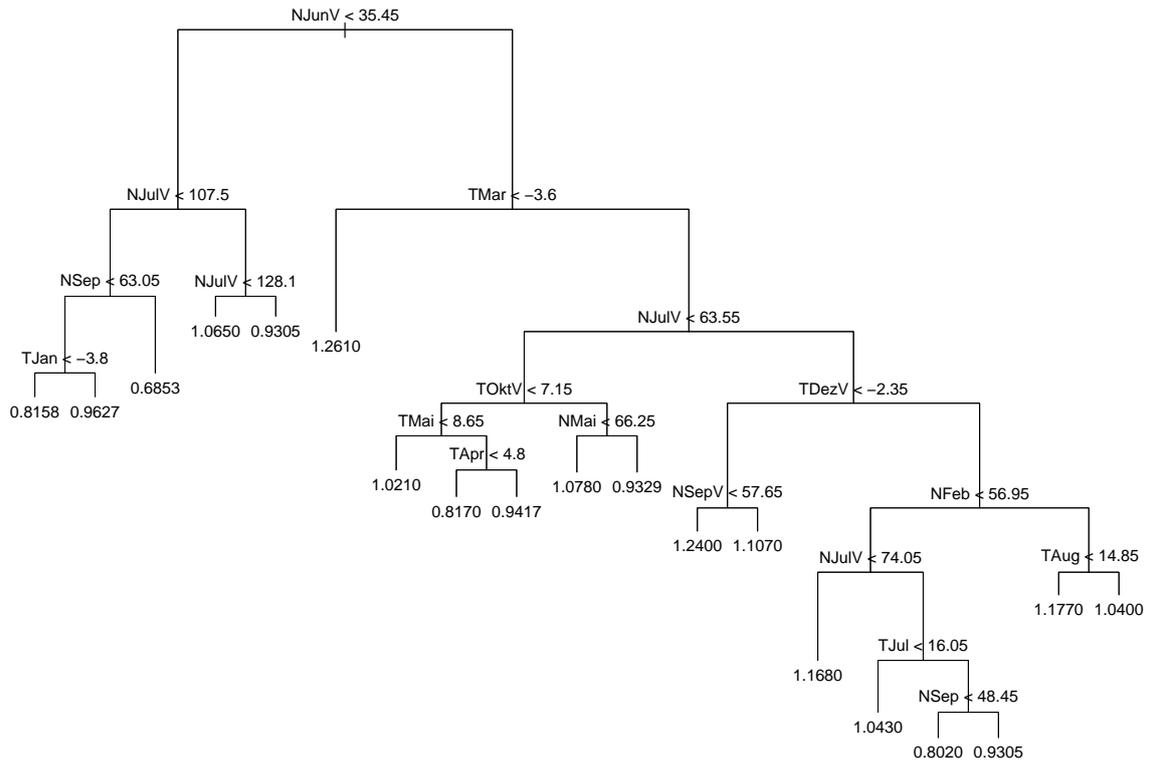


Abbildung 4.24: Regressionsbaum der Fichten vom Standort Tolseboda

Zusammenfassung der Ergebnisse: *Regressions-Baum*

Insgesamt zeigen die Regressions-Bäume von Buche und Fichte ein ähnliches Bild. Nach dem jeweiligen Haupteinflussfaktor, im Fall der Buchen die Temperatur des Vorjahres-Juli, bei den Fichten ist es in unterschiedlichen Jahreszeiten der Niederschlag, folgen an demjenigen Ast, der den für Zuwachs negativen Einfluss zeigt (hohe Temperatur bzw. niedriger Niederschlag), nur noch wenige weitere Faktoren, die in einem Komplex auf die Breite des Jahrrings wirken. An dem Ast, der den positiven Einfluss zeigt, folgen in der Regel eine große Zahl an weiteren Einflussgrößen, die insgesamt die Jahrringbreite determinieren. Die Ergebnisse dieser Berechnungen sehen für den Standort Siggaboda ähnlich den gezeigten Beispielen aus. Der wichtigste Einfluss ist für die Buchen erneut die Temperatur des Vorjahres-Juli. Doch am Standort Rågetaåsen entsprechen die Ergebnisse in keiner Weise den übrigen Analysen. Eine Ursache hierfür könnte die Ausgeglichenheit dieses Standortes sein, der keinen eindeutigen Haupteinflussfaktor erkennen lässt. Grundsätzlich ist jedoch die Anwendung dieser Funktion kritisch zu sehen, da hier ein bivariates Verfahren zugrunde liegt. Das Zusammenspiel der einzelnen Witterungsgrößen ist nicht in dieser einfachen Struktur auszudrücken. Andererseits liefert diese Art der Darstellung einen schnellen und auf das Wesentliche reduzierten Überblick, über die groben Zusammenhänge und die hervorstechendsten Unterschiede zwischen den Baumarten.

4.3.3 Klimaphasen

Trennung 1950

Nach der Darstellung der allgemeinen Zusammenhänge zwischen den Klimavariablen Temperatur und Niederschlag mit dem Baumwachstum, soll nun in einem zweiten Schritt untersucht werden, ob es innerhalb der letzten 100 Jahre eine Verschiebung der Wachstumsabhängigkeit gegeben hat. Dazu wurden die Zeitreihen in zwei Abschnitte von jeweils 56 Jahren geteilt. Die Trennung wurde 1950 vollzogen, um der gesellschaftlich-ökologischen Veränderung im Umgang mit Energieressourcen gerecht zu werden. Die Korrelationen mit der Temperatur sind mit Rottönen und die des Niederschlags mit Blautönen gekennzeichnet. Die Großbuchstaben stehen für die Werte des Vorjahres, die Kleinbuchstaben für die des Jahres der Ringbildung.

4 Ergebnisse

Rehberg In der Abbildung 4.25 sind im linken Diagramm die Veränderung der Wachstumsabhängigkeiten der **Buchen** des Rehberg dargestellt. Starke Veränderungen haben sich für die Buchen des Rehberg bezüglich der ökophysiologicalen Relevanz der Korrelationen mit Niederschlag und Temperatur ergeben. In Phase 1 (1849-1949) zeigen sich kaum physiologisch relevante Korrelationen, wogegen sich seit Phase 2 (1950-2005) ein starker negativer Einfluss der Juli- und August-Temperatur des Vorjahres bei gleichzeitig positivem Einfluss des Juli-Niederschlags zeigt. Weiterhin ergibt sich ein positiver Zusammenhang zum April-Niederschlag des laufenden Jahres und eine signifikante Verschiebung des Einflusses der Temperatur vom aktuellen August in den Juli.

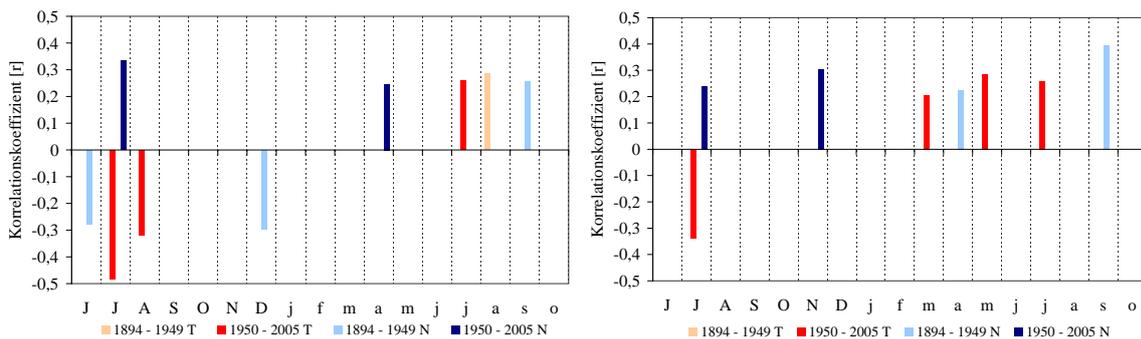


Abbildung 4.25: Korrelationen des Wachstums der Buchen (links) und Fichten (rechts) am Rehberg mit Temperatur und Niederschlag; Trennung in 2 Phasen: 1. 1894-1949, 2. 1950-2005

Die Korrelationen des Wachstums der **Fichten** am Rehberg sind in Abbildung 4.25 auf der rechten Seite dargestellt. Zusammenfassend gab es in Phase 1 für die Fichten des Rehberg bei den Temperaturen keine Korrelationen mit dem Wachstum und beim Niederschlag eine leichte mit dem laufenden April und eine deutlichere mit dem aktuellen September. Doch seit Phase 2 entwickeln sich deutliche, den Buchen ähnliche, starke Korrelationen mit dem Vorjahres-Juli (Temperatur negativ und Niederschlag positiv). Weiter spielen auch die Temperaturen der Sommermonate des laufenden Jahres eine Rolle.

Rågetaåsen Die Abbildung 4.26 zeigt die zuwachswirksamen Klimaeinflüsse für die **Buchen** auf dem Standort Rågetaåsen. Aufgrund der kürzeren Standorts-Chronologie beginnt Phase 1 erst 1908. Der limitierende Faktor ist hier die Temperatur. Der positive Einfluss der Oktober- und November-Temperatur zeigt sich nur in Phase 1. Seit etwa 1950 ergibt sich ein negativer Einfluss des Juli-Niederschlags im laufenden Jahr und ein besonders deutlicher negativer Zusammenhang mit der Spätsommer-Temperatur des

4 Ergebnisse

Vorjahres, ohne jedoch den parallelen positiven Einfluss der Niederschläge, wie er sich bei den übrigen Standorten zeigt.

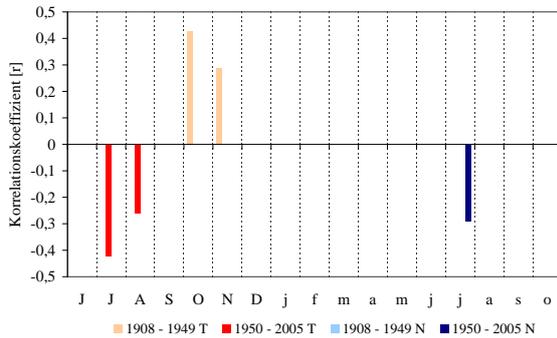


Abbildung 4.26: Korrelationen des Wachstums der Buchen in Rågetaåsen mit Temperatur und Niederschlag; Trennung in 2 Phasen: 1. 1908-1949, 2. 1950-2005

Die Methode der Unterteilung der Zeitreihen konnte bei den **Fichten** des Standortes Rågetaåsen aufgrund der Kürze der Standorts-Chronologie keine Anwendung finden.

Siggaboda Die zuwachswirksamen Witterungseinflüsse auf **Buchen** des Standortes Siggaboda sind Abbildung 4.27 (linke Seite) zu entnehmen. Die Buchen zeigen in Phase 1 einen positiven Einfluss der Sommer-Niederschläge im Mai und einen negativen der Temperatur im Juni im Jahr der Ringbildung. Der positive Zusammenhang mit den Niederschlägen des Vorjahres-August verschiebt sich seit Phase 2 in den Juli. Der negative Einfluss der Juli-Temperatur des Vorjahres hat sich seit etwa 1950 deutlich verstärkt und in den August ausgedehnt. Der Niederschlag des Septembers im Vorjahr zeigt einen starken negativen Einfluss. Weiterhin zeigt sich seit Phase 2 ein positiver Zusammenhang des Zuwachses mit einem warmen und feuchten Oktober im Vorjahr.

In Abbildung 4.27 sind die Ergebnisse der Korrelationsberechnungen für das Wachstum der **Fichten** in Siggaboda auf der rechten Seite zusammengefasst. Ein Trendwechsel ist zu erkennen von einer Korrelation des Wachstums mit Niederschlägen hin zu einer mit Temperaturen. In Phase 1 besteht noch eine deutliche Abhängigkeit von Niederschlägen im Juni des Jahres der Ringbildung. Seit Phase 2 bestimmt nun ein markanter, negativer Einfluss der Temperatur des Vorjahres-Sommers (Juli/August) den Zuwachs. Diese Reaktion ist ähnlich der der Buchen Siggabodas, die Korrelationen des Fichtenwachstums sind jedoch schwächer. Weiterhin war in Phase 1 noch ein deutlicher Einfluss der Februar-Niederschläge zu erkennen. Dieser verliert sich jedoch seit etwa 1950. Ebenso wie bei den Buchen desselben Standortes reagiert der Zuwachs der Fichten auf Niederschläge des Vorjahres-September negativ.

4 Ergebnisse

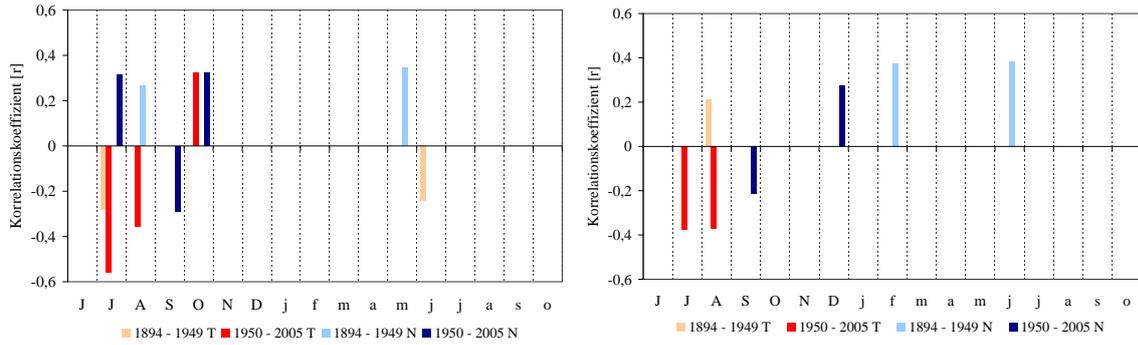


Abbildung 4.27: Korrelationen des Wachstums der Buchen (links) und Fichten (rechts) in Siggaboda mit Temperatur und Niederschlag; Trennung in 2 Phasen: 1. 1894-1949, 2. 1950-2005

Tolseboda Die Korrelationen des Wachstums der **Buchen** in Tolseboda sind in Abbildung 4.28 auf der linken Seite zu sehen. In Phase 1 bestand eine wesentliche Korrelation im Jahr der Ringbildung zwischen dem Niederschlag im April und dem Wachstum der Buchen. Gleichzeitig bestand ein leichter Einfluss des Juni- und August-Niederschlags und der Juli-Temperatur beides des Vorjahres. Seit 1950 hat sich das Bild gewandelt. Der Einfluss des Vorjahres hat sich verstärkt und ist für die Buchen in Tolseboda so deutlich wie bei keinem anderen Standort. Der Niederschlag (Juni/Juli) beeinflusst positiv, die Temperatur (Juli-September), mit dem Juli als dem signifikantesten Einfluss. Eine schwache positive Korrelation besteht noch mit dem Niederschlag des Junis im aktuellen Jahr.

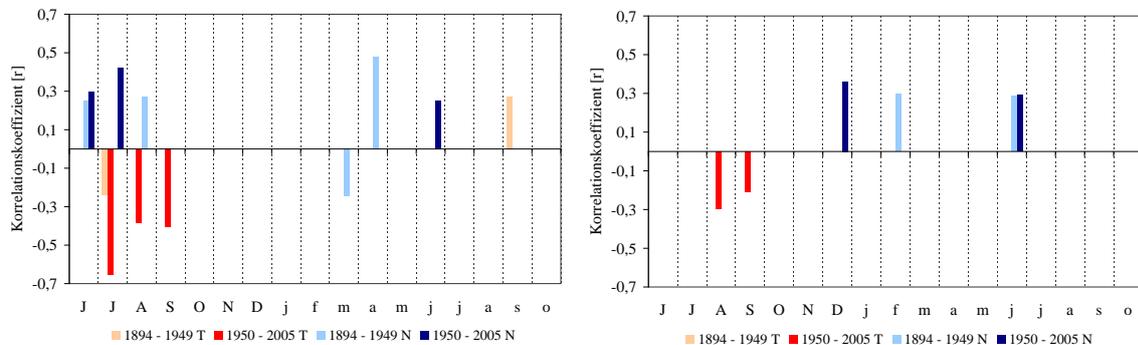


Abbildung 4.28: Korrelationen des Wachstums der Buchen (links) und Fichten (rechts) in Tolseboda mit Temperatur und Niederschlag; Trennung in 2 Phasen: 1. 1894-1949, 2. 1950-2005

Die Abbildung 4.28 zeigt auf der rechten Seite die Korrelationskoeffizienten der **Fichten** von Tolseboda. Der Einfluss des aktuellen Juni-Niederschlags auf das Wachstum der Fichten ist in beiden Phasen konstant. In Phase 2 kommt eine deutliche Korrelation mit

Dezember-Niederschlägen vor der Ringbildung hinzu. Der einzige Zusammenhang mit Temperaturen besteht etwa seit 1950 mit dem Vorjahres-August und -September.

Zusammenfassung der Ergebnisse: Trennung 1950

Vergleicht man die Ergebnisse der Untersuchung der Klimaabhängigkeiten der Bäume über den Gesamtzeitraum (Kap. 4.3.1) mit denen nach zwei getrennten Zeit-Phasen, so zeigen sich Gemeinsamkeiten, aber auch interessante Unterschiede. Die Korrelationen über den Gesamtzeitraum ergeben in der Regel ähnliche Ergebnisse wie Korrelationen mit der Phase von 1950-2005. Die Zusammenhänge zwischen den Klimavariablen Niederschlag und Temperatur und dem Baumwachstum sind demnach in den letzten 56 Jahren möglicherweise deutlicher und stärker geworden, so dass sie die Korrelationen im jüngeren Baumleben überlagern. Dazu weisen die nach den zwei Phasen berechneten Korrelationen erkennbar höhere Werte auf als die allgemeinen Korrelationen.

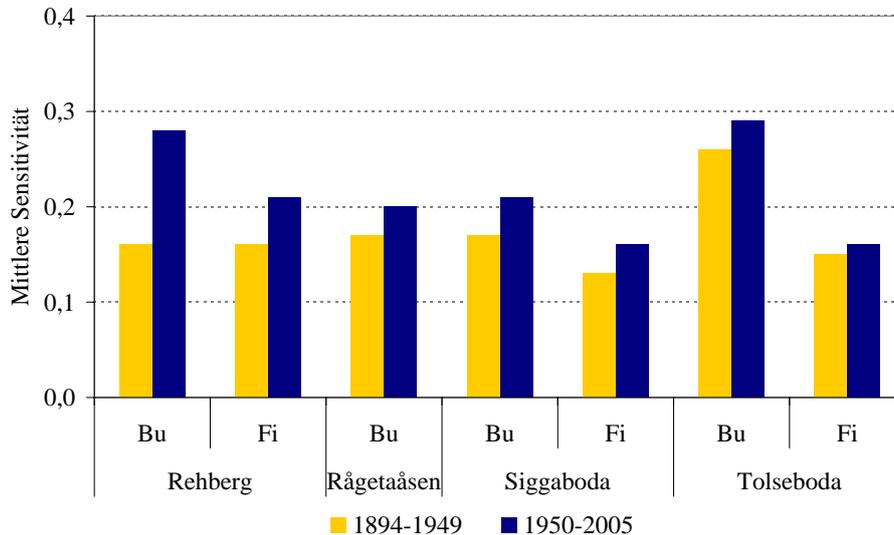


Abbildung 4.29: Mittlere Sensitivität für Phase 1 (1894-1950) und Phase 2 (1950-2005)

Die mittlere Sensitivität der Standorts-Chronologien hat seit 1950 zugenommen (Abb. 4.29). Auf den schwedischen Standorten ist sie bei beiden Baumarten im Schnitt um 3 % gestiegen. Die höchste Sensitivität weisen seit 1950 die Buchen von Tulseboda mit 29 % auf. Erstaunlicherweise erhöhte sich am Standort Rehberg die Sensitivität der Fichten um 5 % und die der Buchen sogar um 12 %. Für die Fichten in Rågetaåsen können die beiden Phasen leider nicht unterschieden werden. Neben der Sensitivität geben die Parameter Standardabweichung und Autokorrelation 1. Ordnung Auskunft über

4 Ergebnisse

eine mögliche Veränderung der Witterungssensibilität in den letzten Jahrzehnten. Die mittlere Sensitivität ist eine Funktion dieser beiden Parameter, so dass eine nähere Betrachtung dieser beiden Eigenschaften Aufschluss über die Ursache erhöhter Sensitivität geben kann (Strackee und Jansma, 1992).

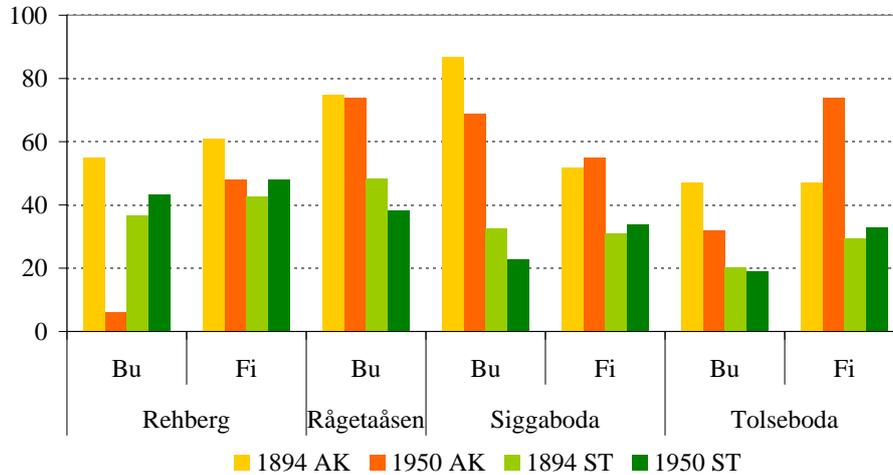


Abbildung 4.30: Autokorrelation 1. Ordnung (AK) und Standardabweichung (ST) für Phase 1 (1894-1950) und Phase 2 (1950-2005)

Interessant ist, dass die Autokorrelation bei den Buchen am Rehberg seit 1950 drastisch gesunken ist, daher ist davon auszugehen, dass die erhöhte Sensitivität durch die Standardabweichung zu erklären ist (Abb. 4.30). Auch bei den Buchen der übrigen Standorte sank die Autokorrelation, am geringsten in Rågetaåsen. Doch im Gegensatz zum Rehberg sieht man keinen Anstieg der Standardabweichung. Die Fichten am Rehberg zeigen die gleiche Tendenz wie die Buchen des Standorts, nur sinkt die Autokorrelation weniger. Bei den Fichten in Siggaboda steigen beide Parameter leicht an, während sich am Standort Tulseboda ein gänzlich anderes Bild zeigt. Hier stieg die Autokorrelation seit 1950 stark an.

Ein *buchenfreundliches* Klima zeichnet sich durch relativ niedrige Sommertemperaturen und hohe Niederschläge aus. Um verschiedenen klimatische Standorte auf diese Eigenschaft hin vergleichen zu können, erwies sich der Eichen/Hainbuchen-Quotient nach Ellenberg (1996) als hilfreich. Dieser Quotient errechnet sich aus dem tausendfachen Julimittel der Lufttemperatur und dem mittleren Jahresniederschlag. So lässt sich die Konkurrenzkraft der Rot-Buche in klimatisch bedingten Eichen/Hainbuchenwäldern einschätzen. Je kleiner der Quotient, desto besser eignet sich der Standort klimatisch für die Rot-Buche. Steigt er jedoch über 30, so kann die Buche möglicherweise Schwierigkeiten bekommen (Eichenmischwald). Diese kritische Grenze liegt bei etwa unter 600 mm jährlichem Nie-

erschlag und Temperaturen von im Mittel 18-20 °C des wärmsten Monats. Schätzt man das Klima der drei verwendeten Klimastationen auf diese Art ein, und betrachtet man zusätzlich die beiden untersuchten Zeitphasen, so fällt auf, dass das Klima am Standort Rehberg im Harz (Clausthal-Zellerfeld) besonders geeignet ist für die Buche und sich in der 2. Phase seit 1950 wenig verändert hat (Tab. 4.22). An den schwedischen Standorten Rågetaåsen (Halmstad) und Siggaboda und Tulseboda (Växjö) dagegen, ist das Klima ebenso geeignet und wird zunehmend besser geeignet für Rot-Buche.

Tabelle 4.22: Ellenberg-Quotient der verwendeten Klimastationen für Phase 1 (1894-1949) und Phase 2 (1950-2005)

	1. Phase	2. Phase
Clausthal-Z.	9,6	9,8
Halmstad	21,7	19,0
Växjö	24,5	21,3

Trennung nach Tendenzen der globalen Klimaerwärmung

Mit einer weiteren Untersuchung der wachstumsrelevanten Korrelationen zwischen den Klimavariablen Niederschlag und Temperatur und dem indexierten Zuwachs der Bäume soll die vorangegangene Vermutung des Trendwechsels um 1950 geprüft oder erweitert werden. Weiterhin soll das Baumwachstum entsprechend des bestätigten globalen Temperaturanstieges (Rahmstorf und Schellnhuber, 2006) in 3 bzw. 4 Phasen betrachtet werden. Analog zu Kapitel 4.3.1 sind die Ergebnisse im Folgenden in Form von Korrelationskoeffizienten in Diagrammen je Baumart und Standort dargestellt. Da nun mehr als zwei Phasen betrachtet werden, wurden der Übersichtlichkeit halber jeweils getrennte Diagramme für Niederschlag und Temperatur erstellt. Die Interpretation der Ergebnisse soll verkürzt erfolgen und beschränkt sich somit auf die ökophysiologisch interpretierbaren Korrelationen. Die Phasen der Stagnation der Temperatur sind hier grün dargestellt (hellgrün 1860-1899, dunkelgrün 1940-1979), die Phasen der Erwärmung in warmen Farben (gelb 1900-1939, rot 1965-2005). Auch hier stehen die Großbuchstaben für die Monate des Vorjahres, die Kleinbuchstaben für das Jahr der Ringbildung.

Rehberg, Buchen In Abbildung 4.31 sind auf der linken Seite die Ergebnisse der Korrelationen des Wachstums der Buchen am Rehberg mit der Temperatur dargestellt, auf der rechten Seite die Korrelationen mit dem Niederschlag. Zusammenfassend lässt sich durch die Untersuchung in drei Phasen erkennen, dass der Einfluss des Spätsommers

4 Ergebnisse

(vorrangig Juli) des Vorjahres (Temperatur negativ, Niederschlag positiv) bereits um 1940 einsetzt. Dazu kommt seit etwa 1940 ein positiver Einfluss der April-Niederschläge, der sich bis heute hält. Interessant ist der Vorzeichenwechsel beim Einfluss der Mai-Temperatur von Phase 2 zu Phase 3. Weiterhin erkennt man eine auffällige Änderung

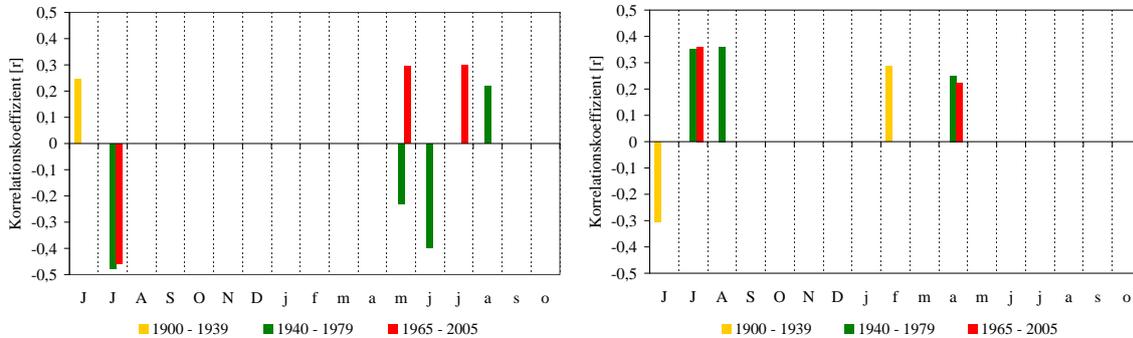


Abbildung 4.31: Korrelationen des Wachstums der Buchen (Rehberg) mit Temperatur (links) und Niederschlag (rechts) in 3 Phasen: 1. 1900-1939, 2. 1940-1979, 3. 1965-2005

der Korrelationen nach Phase 1, für die Temperatur wie für den Niederschlag. Bis 1940 ergab sich ein komplett unterschiedliches Bild der Korrelationen im Gegensatz zu den letzten beiden Phasen, die sich in den stärksten Korrelationen sehr ähneln. Die klimatischen Einflüsse des Vorjahres beschränkten sich bis 1940 auf einen starken negativen des Juni-Niederschlags und einen positiven der Juni-Temperatur. Im Jahr der Ringbildung konnten Februar-Niederschläge positiv genutzt werden. Unterschiedliche, witterungsbedingte Reaktionen des Wachstums während Phasen der Stagnation und der Erwärmung äußern sich hier keine.

Rehberg, Fichten Die Ergebnisse zu den Fichten des Rehberg (Abb. 4.32) zeigen, dass auch hier der Einfluss des Vorjahres-Juli (Temperatur wie Niederschlag) bereits etwa 1940 eingesetzt hat. Im Jahr der Ringbildung ist der Temperatur-Einfluss von Phase 2 zu Phase 3 vom Juli zum Mai übergegangen.

In Phasen der globalen Temperatur-Erhöhung reagiert der Zuwachs der Fichten auf Niederschläge im April während der Ringbildung.

4 Ergebnisse

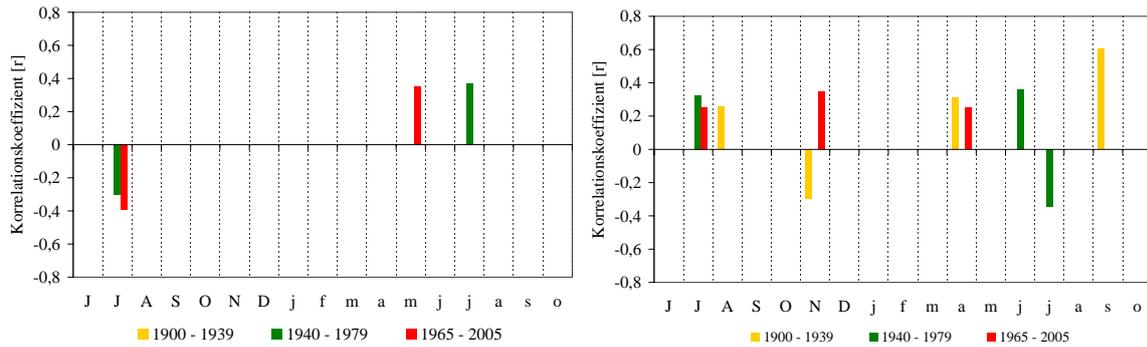


Abbildung 4.32: Korrelationen des Wachstums der Fichten (Rehberg) mit Temperatur (links) und Niederschlag (rechts) in 3 Phasen: 1. 1900-1939, 2. 1940-1979, 3. 1965-2005

Rågetaåsen, Buchen Abbildung 4.33 stellt die Ergebnisse der Korrelationen des Wachstums der Buchen in Rågetaåsen dar. Aufgrund der Kürze der Standorts-Chronologie umspannt Phase 1 hier 1908-1947. Die übrigen Phasen laufen konform der der anderen Standorte. Die hohe Abhängigkeit des Zuwachses von der Temperatur wird erneut deutlich. Im Gegensatz zu den vorangegangenen Standorten zeigt sich jedoch, dass der Einfluss des Vorjahres-Juli und -August nicht bereits seit 1940 besteht, sondern aufgrund der vorangegangenen Analyse, tatsächlich erst seit etwa 1950. Bis etwa 1970 (aufgrund der Überlappung der letzten beiden Phasen ist dies nicht genau festzulegen) dominieren herbstliche Temperaturen des Vorjahres und April-Niederschläge des laufenden Jahres den Zuwachs. Es gibt keine unterschiedlichen Klimasignale, die den Phasen der globalen Temperatur entsprechen.

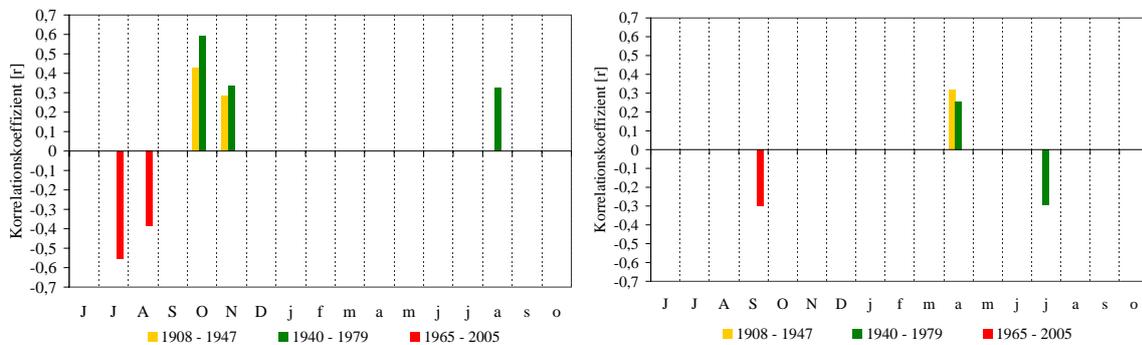


Abbildung 4.33: Korrelationen des Wachstums der Buchen (Rågetaåsen) mit Temperatur (links) und Niederschlag (rechts) in 3 Phasen: 1. 1908-1947, 2. 1940-1979, 3. 1965-2005

Rågetaåsen, Fichten Aufgrund der Kürze der Standorts-Chronologie (Beginn 1945), ist eine Unterteilung den Klimaphasen entsprechend nicht möglich, so dass sich keine weiteren Ergebnisse berechnen lassen.

Siggaboda, Buchen Für die Buchen in Siggaboda konnten für diese Untersuchung alle vier Phasen seit 1860 ausgewertet werden. In Abbildung 4.34 sind die Ergebnisse graphisch dargestellt. Zusammenfassend zeigen sich die signifikantesten Korrelationen mit der Temperatur des Vorjahres-Spätsommers (Juli-September) verstärkt seit Phase 4. Doch entsprechend der vorangegangenen Analyse besteht schon seit wenigstens 1894 eine leichte Korrelation mit der Juli-Temperatur. Der Einfluss des vorjährigen Spätsommer-Niederschlags war in der Zeit von etwa 1940-1960 von Bedeutung, hat sich jedoch seither reduziert und beschränkt sich auf den Juli. In jüngster Zeit spielt im Gegensatz zur Temperatur der Niederschlag des Vorjahres-Oktober eine prägende Rolle. Der einzige Einfluss, der sich für Phase 2 ergab, waren Niederschläge im April-Mai im Jahr der Ringbildung. Dieser Zusammenhang verschiebt sich seit 1940 in den Juni. Der positive Einfluss eines warmen Herbstes ergab sich nur in den Phasen entsprechend der globalen Temperatur-Stagnation.

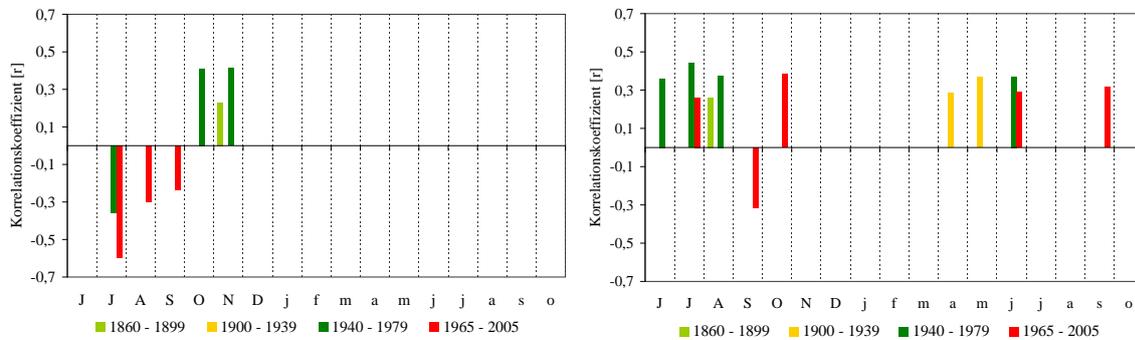


Abbildung 4.34: Korrelationen des Wachstums der Buchen (Siggaboda) mit Temperatur (links) und Niederschlag (rechts) in 4 Phasen: 1. 1860-1899, 2. 1900-1939, 3. 1940-1979, 4. 1965-2005

Siggaboda, Fichten Die Reaktionen des radialen Wachstums der Fichten in Siggaboda auf Temperatur und Niederschlag sind in drei Phasen in Abbildung 4.35 zu sehen. Die Temperatur des Vorjahres Spätsommers ist schon seit etwa 1950, was durch die vorangegangene Analyse bestätigt wird, der prägende Einfluss. Das einzige physiologisch erklärbare Klimasignal in der Phase von 1940-1979 war die Temperatur im April des laufenden Jahres. Im Zeitraum 1900-1939 war der Niederschlag im Juni des aktuellen Jahres maßgeblich. Es gibt jedoch keine unterschiedlichen Reaktionen entsprechend der globalen Temperaturphasen.

4 Ergebnisse

des Vorjahres hatten nur in Phase 2 einen wichtigen Einfluss. Für die Phasen der globalen Temperatur-Erhöpfung bzw. Stagnation gibt es keine parallelen Tendenzen.

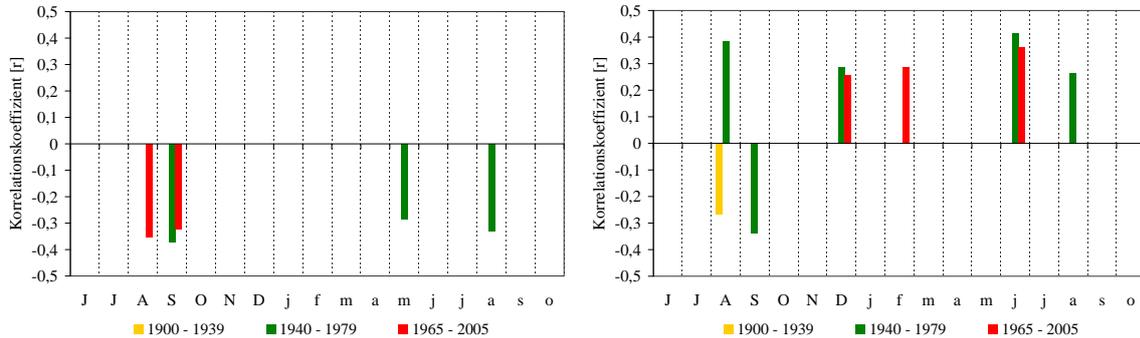


Abbildung 4.37: Korrelationen des Wachstums der Fichten (Tolseboda) mit Temperatur (links) und Niederschlag (rechts) in 3 Phasen: 1. 1900-1939, 2. 1940-1979, 3. 1965-2005

Zusammenfassung der Ergebnisse: *Trennung nach globaler Temperaturerhöhung*

Durch die zweite, modifizierte Untersuchung der Korrelationen des Wachstums mit den beiden Klimavariablen wurden viele Ergebnisse verdeutlicht. Zum einen konnten Zusammenhänge zwischen radialem Zuwachs und Witterungseinflüssen bestätigt und erweitert werden, zum anderen konnten Zeiträume, in denen ein Wechsel der Abhängigkeiten stattgefunden hat, genauer eingegrenzt werden. Die Phasen der globalen Temperatur-Erhöpfung bzw. Stagnation ließen sich nur in wenigen Fällen in Reaktionen des Dickenwachstums nachweisen. Der Zuwachs der Fichten vom Standort Rehberg reagierte ausschließlich auf Niederschläge im April des laufenden Jahres während Phasen der Temperatur-Erhöpfung. In Phasen der Stagnation können die Buchen am Standort Sigaboda erhöhte Temperaturen im Herbst positiv umsetzen.

Moving Intervals

Rehberg Durch die Anwendung der moving intervals (MI) auf die Zuwachsdaten der Buchen kann der starke Einfluss des Juli-Niederschlags ($r > 0,3$), der seit den 1990er Jahren besteht, bestätigt werden (Abb. 4.38). Der Niederschlag im April ist dagegen schwächer korreliert ($r > 0,2$) und seit den 1960er Jahren weniger konstant. In den 1950/60er Jahren bestand ein negativer Zusammenhang mit dem Niederschlag des Vorjahres-Juni, der sich danach verliert. Die Ausprägung der Zuwachswirksamkeit der Temperatur des

4 Ergebnisse

Vorjahres-Juli hat sich in der phasenweisen Analyse in den letzten Jahrzehnten verstärkt. Diese Entwicklung bestätigt sich ebenfalls durch die MI.

Mit $r > 0,3$ ist der Juli-Einfluss stets hoch, doch seit Mitte der 1990er Jahre steigt er auf $r > 0,5$. Für das Jahr der Ringbildung ergeben die Korrelationen eine signifikante Verschiebung des Einflusses der Temperatur vom aktuellen August in den Juli. Mittels der MI zeigt sich ebenfalls der positive Einfluss der aktuellen Juli-Temperatur, doch beständiger wirkt der August auf das Wachstum.

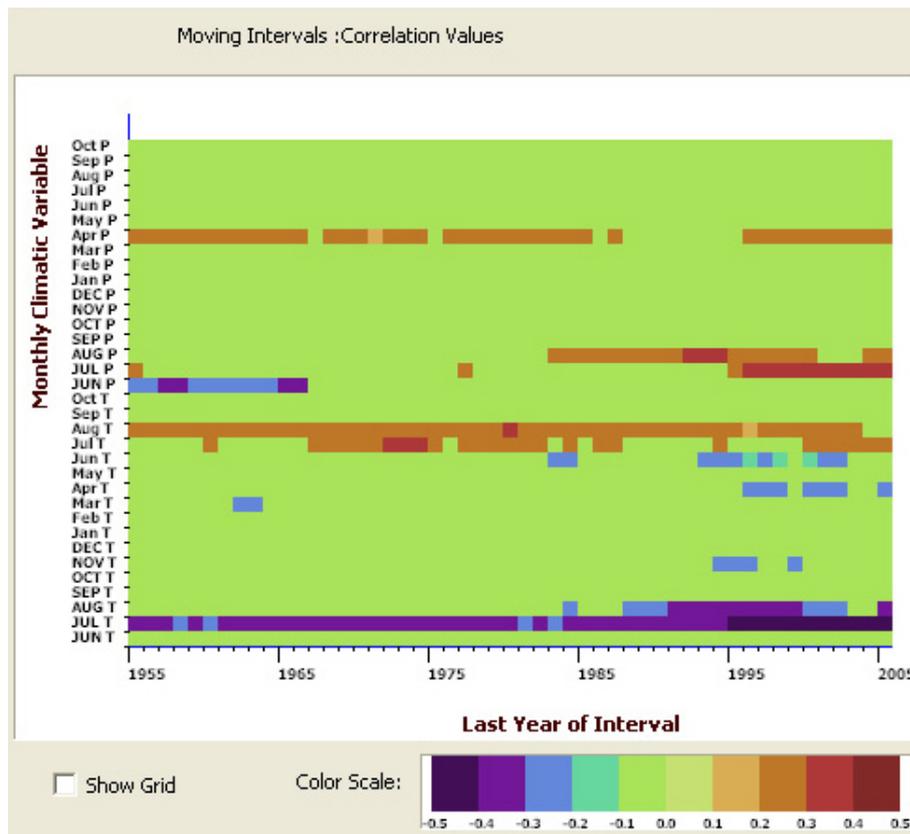


Abbildung 4.38: Moving Intervals mit einer Intervallbreite von 70 Jahren für die Buchen am Standort Rehberg (DendroClim2002); die x-Achse zeigt den Zeitverlauf (angegeben ist jeweils das letzte Jahr des berechneten Zeitintervalls), die y-Achse zeigt die monatlichen Witterungsvariablen: im oberen Teil der Niederschlag (P), im unteren die Temperatur (T), sind die Monate mit Großbuchstaben abgekürzt, beziehen sie sich auf den Vorjahreseinfluss, normale Buchstaben stehen für das Jahr der Ringbildung; blaue Farbtöne stehen für negative Korrelationen, rote für positive, je dunkler eine Korrelation dargestellt ist, desto stärker ist sie

4 Ergebnisse

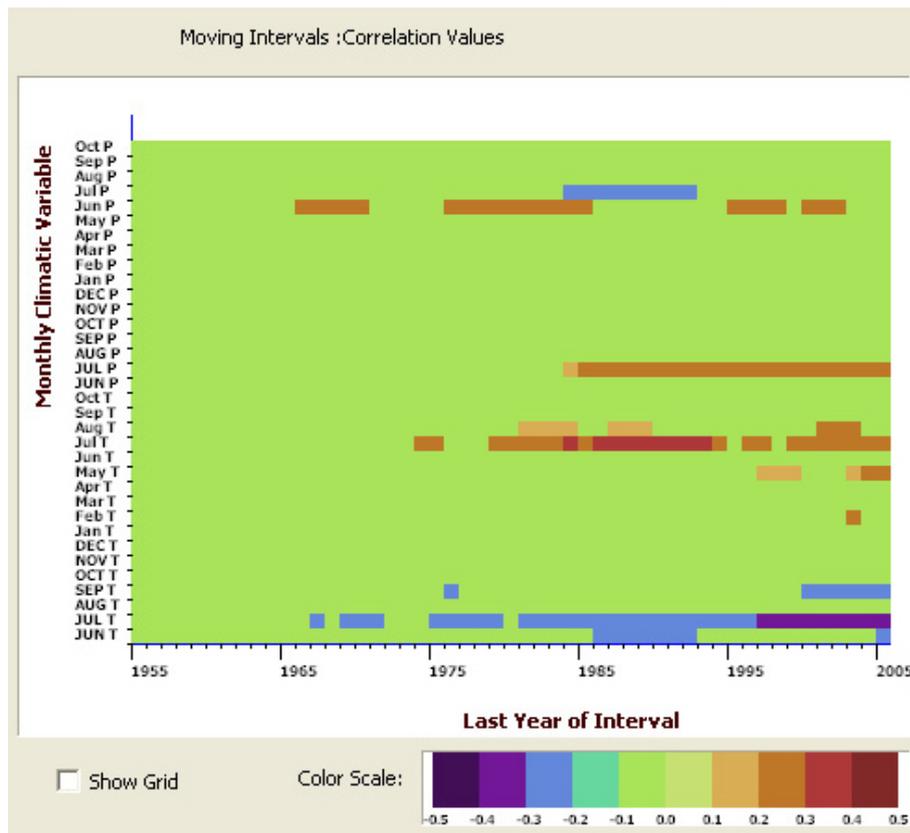


Abbildung 4.39: Moving Intervals mit einer Intervallbreite von 70 Jahren für die Fichten am Standort Rehberg (DendroClim2002)

Mit Hilfe der MI kann bestätigt werden, dass relevante und signifikante Zusammenhänge mit dem Klima und dem Zuwachs der Fichten erst in jüngster Zeit auftreten (Abb. 4.39). Beim Niederschlag waren der aktuelle Juni und Juli in einem Zeitraum von den 1970er Jahren bis Anfang 2000 stark zuwachsbeeinflussend, doch seit den 1980er Jahren verschiebt sich der Einfluss hin zum Niederschlag des Vorjahres-Juli. Doch wie auch schon in der einfachen Korrelationsanalyse vermutet, ist der Einfluss der Temperatur stärker und beständiger als der des Niederschlags. Zum einen Teil die des laufenden Julis, der besonders in den 1980er Jahren deutlich war ($r > 0,3$), zum anderen Teil die Juli-Temperatur des Vorjahres in negativer Form. Dieser Einfluss nimmt seit Ende der 1990er Jahre weiter zu ($r > 0,3$).

4 Ergebnisse

Rågetaåsen Die MI bestätigen das bisherige Ergebnis, dass der Niederschlag für das Wachstum der Buchen eine untergeordnete Rolle spielt (Abb. 4.40). Es bestand lediglich in einer Phase von den 1970-90er Jahren ein leichter Zusammenhang mit Niederschlägen im Januar und April des aktuellen Jahres. Einen deutlichen Einfluss hatte jedoch die Temperatur des Juli und August im Jahr der Ringbildung, doch verliert sich dieser Anfang der 2000er Jahre. Besonders interessant sind die Vorjahres-Temperatureinflüsse. Der negative Zusammenhang des Zuwachses mit der Juli-Temperatur setzt erst Mitte der 1990er Jahre ein und verstärkt sich beständig ($r > 0,4$). Den jedoch dauerhaftesten und stärksten Einfluss zeigt die Oktober-Temperatur mit $r > 0,4$.

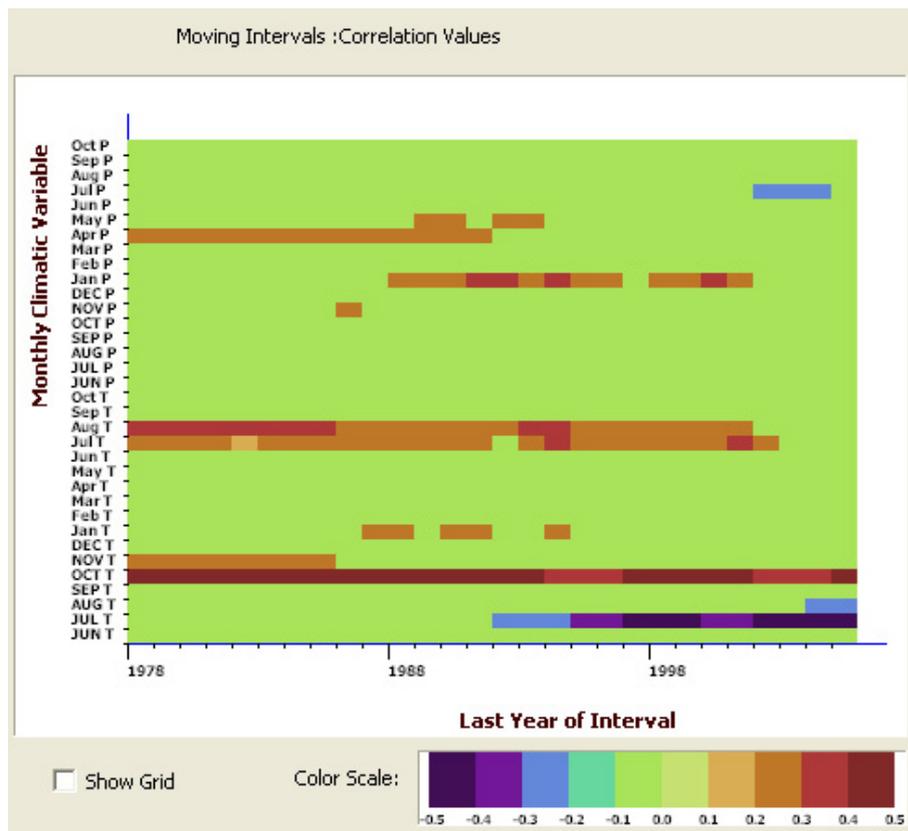


Abbildung 4.40: Moving Intervals mit einer Intervallbreite von 70 Jahren der Buchen am Standort Rågetaåsen (DendroClim2002)

Die Anwendung von MI war aufgrund der Kürze der Chronologie für die Fichten in Rågetaåsen nicht möglich.

4 Ergebnisse

Siggaboda Durch die Anwendung von MI zeigt sich in einer Phase von etwa 1930-1975 ein starker Zusammenhang zwischen dem Zuwachs der Buchen und Niederschlägen im Mai des laufenden Jahres (Abb. 4.41, links). Die Einflüsse der August- und Juli-Niederschläge bestehen ebenfalls seit etwa 1940 bzw. 1960, und seit der Einfluss des Mai verloren gegangen ist wurde er durch den des August und dann Juli ersetzt. Die Temperaturen der Vorjahres-Oktober und -November zeigen seit den 1950/60er Jahren einen hohen Einfluss auf das Wachstum ($r > 0,3$). Doch der deutlichste und seit den 1950er Jahren beständige Einfluss der Juli-Temperatur des Vorjahres ist sichtbar. Er hat fortwährend an Relevanz zugenommen von $r > 0,2$ bis seit Anfang der 1990er Jahren mit $r > 0,4$.

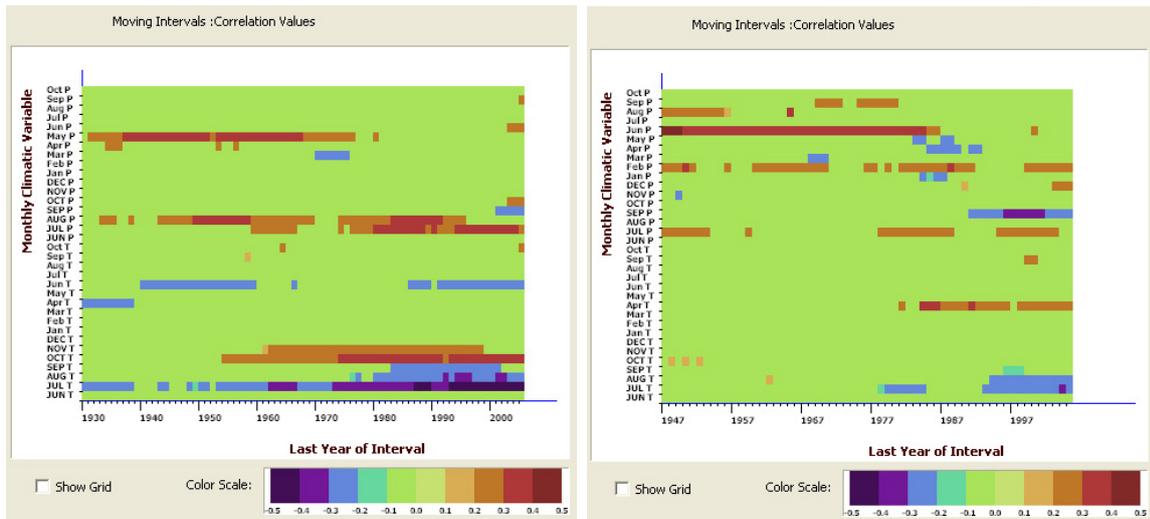


Abbildung 4.41: Moving Intervals mit einer Intervallbreite von 70 Jahren der Buchen (links) und Fichten (rechts) am Standort Siggaboda (DendroClim2002)

Aufgrund der Länge der Chronologie können für die Buche ältere Klimareihen hinzugezogen werden. Die Temperaturaufzeichnungen aus Uppsala beginnen bereits 1774. Durch MI ergibt sich, dass seit etwa 1774 bis in die 1920er Jahre negative Korrelationen mit der Temperatur des Augusts des Vorjahres bestanden. Diese verschwinden dann jedoch und gehen über in die Oktober / November Korrelationen. Die ältesten Niederschlagsaufzeichnungen mit Beginn 1753 bietet die Klimastation Lund. Die MI ergeben wenige Parallelen zu den Ergebnissen der vorherigen Analysen. Dies hat seine Ursache in der zu großen Entfernung der Untersuchungsstandorte zur Klimastation Lund (118 km). Die große Variabilität von Niederschlägen und die kleinräumige Ausprägung erlauben keine Korrelationen über solche Entfernungen. Die einzige Gemeinsamkeit zeigt sich in der zunehmenden Korrelation mit den Niederschlägen des Junis im Jahr der Ringbildung seit den 2000er Jahren.

4 Ergebnisse

Für die Klima-Zuwachs-Beziehungen der Fichten bestätigen die MI die vorangegangenen Analysen (Abb. 4.41, rechts). Der beständige Einfluss des Juni-Niederschlags im Jahr der Ringbildung ($r > 0,2$) verliert sich Mitte der 1980er Jahre. Seither zeigen sich Korrelationen zwischen September-Niederschlägen des Vorjahres und der April-Temperatur des laufenden Jahres, doch insgesamt sind sie von geringerem Einfluss. In den vorangegangenen Analysen wurde seit etwa 1950 ein starker Zusammenhang zwischen dem Zuwachs und den Temperaturen des Vorjahres-Spätsommers festgestellt. Doch die MI zeigen lediglich schwächere Korrelationen ($r > 0,2$) mit der Juli- und August-Temperatur seit Anfang der 1990er Jahre.

Tolseboda Durch die Ergebnisse der MI kann das zuvor beschriebene Abhängigkeitsverhältnis zwischen den Klimavariablen und dem Zuwachs der Buchen bestätigt werden (Abb. 4.42, links). Der Niederschlag war seit den 1930er Jahren zunächst deutlich vom April des aktuellen Jahres bestimmt, doch verlor sich dieser Zusammenhang Anfang der 1990er Jahre. Dagegen besteht ein dauerhafter Einfluss des Juni-Niederschlag des Vorjahres. Seit den 1990er Jahren kommt jedoch der Einfluss des Juli-Niederschlags hinzu. Auch der August-Niederschlag war lange Zeit bis in die 1990er Jahre von großer Bedeutung. In einer Phase von etwa 1940-1985 war die Temperatur des aktuellen Septembers relevant, doch mit zunehmender Stärke nimmt die Temperatur des Vorjahres-Spätsommers seit den 1960er Jahren stetig deutlich zu. Seit Ende der 1990er Jahren hat die Juli-Temperatur den größten Einfluss auf den Zuwachs der Buchen ($r > 0,5$).

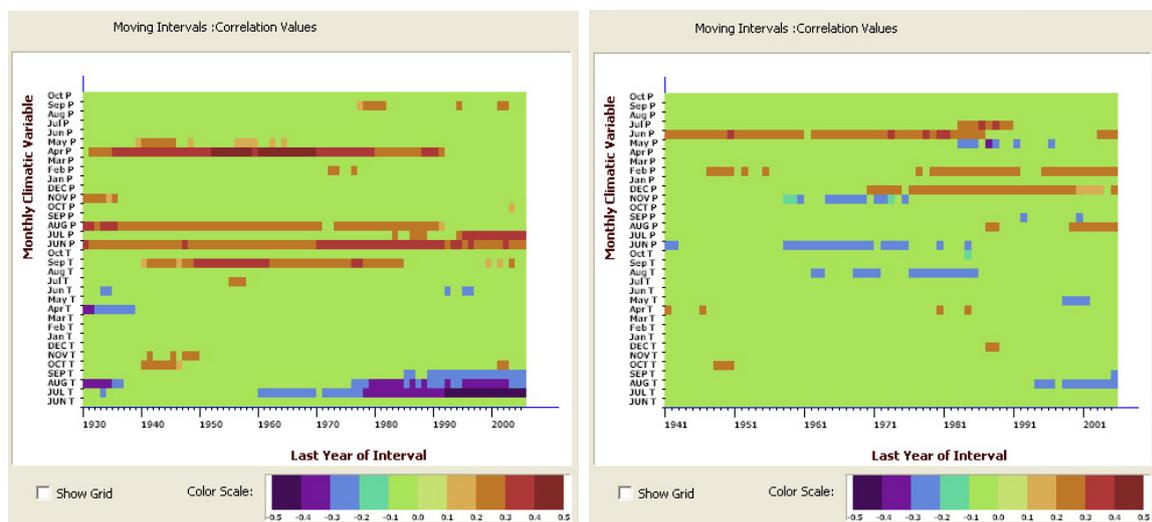


Abbildung 4.42: Moving Intervals mit einer Intervallbreite von 70 Jahren der Buchen (links) und Fichten (rechts) am Standort Tolseboda (DendroClim2002)

4 Ergebnisse

Die MI mit den Niederschlagsdaten aus Lund ergeben keine Parallelen zu den vorherigen Ergebnissen und bleiben daher unberücksichtigt. Die Anwendung der MI auf die Temperaturdaten von Uppsala liefert die Erkenntnis, dass der Einfluss des August des Vorjahres seit mindestens 1774 hochsignifikant besteht. In einer Periode von den 1860 - 1890er Jahren sogar mit $r > 0,5$. In den 1930er Jahren verschwindet der Einfluss und taucht in den 1980er Jahren erneut auf. Doch seit den 1960er Jahren tritt der Einfluss des Vorjahres-Juli hinzu und dominiert seither den des August. Seit etwa 1930 kommt ein positiver Zusammenhang mit den Temperaturen des aktuellen September dauerhaft hinzu.

Nur wenige konstante und starke Einflüsse auf den Zuwachs der Fichten können durch die MI bestätigt werden (Abb. 4.42, rechts). Bis in die 1980er Jahre war der Niederschlag des laufenden Junis von Bedeutung. Erst in den letzten Jahren kehrt dieser Zusammenhang in abgeschwächter Form zurück. Die Februar-Niederschläge des aktuellen Jahres zeigen einen schwachen Einfluss, der bis heute anhält, ebenso wie der Niederschlag des Vorjahres-Dezember. Wie in der vorangegangenen Analyse festgestellt, kommt seit Beginn der 1990er Jahren ein negativer, jedoch schwächerer ($r > 0,2$) Einfluss der Temperatur des vorjährigen Augusts hinzu.

Zusammenfassung der Ergebnisse: *Moving Intervals*

Die Anwendung der MI erbrachte in der Regel ähnliche Ergebnisse wie die einfachen Korrelationen. Der Zeitpunkt eines Wechsels oder der Verstärkung eines Einflusses einer Klimavariablen konnte jedoch genauer eingegrenzt werden. Den zunehmenden Einfluss der Juli-Temperatur des Vorjahres auf den Buchenzuwachs aller Standorte können die MI deutlich belegen.

Buchenzuwachs und Juli-Temperatur

In den vorangegangenen Analysen konnte deutlich herausgestellt werden, dass der wesentliche, zuwachsbestimmende Witterungsfaktor für die Buchen auf allen Beobachtungsstandorten die Temperatur des Julis im Vorjahr ist. Ebenso konnte gezeigt werden, dass diese Beziehung erst seit etwa 1950 in dieser straffen Form vorhanden ist und sich sogar weiter verstärkt. In den folgenden Diagrammen sind die standardisierten Zuwachsreihen der Buchen jedes Standorts gemeinsam mit der inversen Temperatur des Vorjahres-Juli dargestellt (Abb. 4.43 und 4.44).

4 Ergebnisse

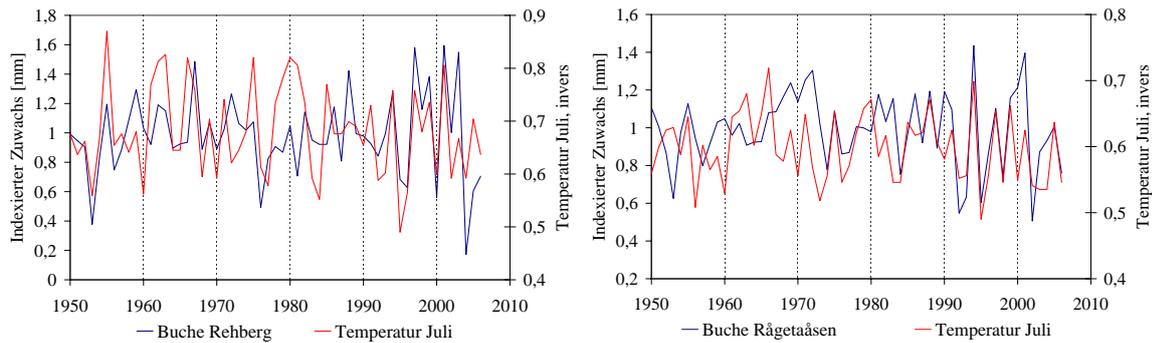


Abbildung 4.43: Standardisierte Zuwachsreihen der Buchen der Standorte Rehberg (links) und Rågetaåsen (rechts) ab 1950 und die inverse Juli-Temperatur des Vorjahres

Die Zeitreihen beginnen 1950 und man erkennt deutlich, dass eine hohe Gleichläufigkeit mit der Temperatur besteht, doch seit etwa Mitte der 1990er Jahre sieht man einen weitaus strafferen Zusammenhang. Dieser Zeitraum ist leider zu kurz, um diese Beobachtung durch eine statistische Analyse zu bestätigen, doch ist er visuell deutlich festzustellen.

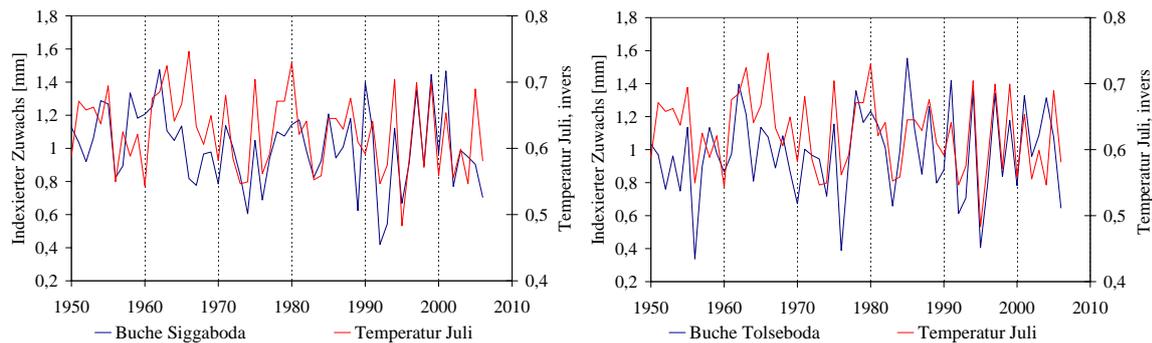


Abbildung 4.44: Standardisierte Zuwachsreihen der Buchen der Standorte Siggaboda (links) und Tulseboda (rechts) ab 1950 und die inverse Juli-Temperatur des Vorjahres

4.3.4 Weiserjahre

Da Weiserjahre in den meisten Fällen die deutlichsten Reaktionen des Baumwachstums auf Witterungsereignisse zeigen, ist es möglich durch sie mittels einer Einzeljahranalyse Klima-Wachstums-Beziehungen festzustellen. Weiserjahre sind jedoch nicht immer allein Reaktionen auf Witterung. Auch Ereignisse wie Insektenkalamitäten, Immissionen oder Mastjahre können breite oder schmale Jahrringe hervorrufen. Weicht die Ringbreite eines

4 Ergebnisse

Jahres um mindestens 30 % von der 13-jährigen Ausgleichskurve einer Chronologie ab, so wurde ein Weiserjahr ausgeschieden.

In Tabelle 4.23 sind die Gesamtanzahl der Weiserjahre, positiv wie negativ, und ihre Anteile bezogen auf die Länge der Chronologie, für jede Baumart nach Standort getrennt dargestellt. Die Buchen haben einen deutlich höheren Anteil an Weiserjahren als die Fichten. Dies ist zum größten Teil den Buchen auf den Standorten in Siggaboda und Tolseboda zuzuschreiben. In der Regel zeigt sich, dass bei beiden Baumarten der Anteil der negativen Weiserjahre den der positiven übertrifft. Eine Ausnahme stellt lediglich der Rehberg dar, hier liegt für beide Baumarten der Anteil der positiven über dem der negativen Weiserjahre.

Tabelle 4.23: Positive und negative Weiserjahre nach Baumart und Standort getrennt

Baumart	Standort	Anzahl Jahre gesamt	positive Weiserj. [Anzahl]	positive Weiserj. [%]	negative Weiserj. [Anzahl]	negative Weiserj. [%]
Buche	Rehberg	136	12	8,8	10	7,4
	Rågetaåsen	99	6	6,1	7	7,1
	Siggaboda	270	27	10,0	34	12,6
	Tolseboda	271	32	11,8	30	11,1
Fichte	Rehberg	130	11	8,5	5	3,8
	Rågetaåsen	62	6	9,7	8	12,9
	Siggaboda	130	2	1,5	4	3,1
	Tolseboda	136	5	3,7	8	5,9

Buchen

Die jeweils sechs ausgeprägtesten Weiserjahre der Buchen aller Standorte sind in Tabelle 4.24 zusammengefasst. Weiserjahre, die auf mindestens zwei Standorten auftraten sind farblich markiert. Es fällt auf, dass 5 negative Weiserjahre auf mindestens zwei Standorten vorkommen, positive dagegen nur 2. Die negativen Weiserjahre 1953 und 1976 sind in Rehberg und Rågetaåsen nachzuweisen. Auch in Siggaboda weicht das Jahr 1976 um 37 % von der Ausgleichskurve ab. Somit scheint 1976 ein europaweit vertretenes Weiserjahr zu sein. Bei den schwedischen Standorten ist 1916 ein überregionales negatives Weiserjahr. In Rågetaåsen und Tolseboda ist es der schmalste Jahrring der Chronologie.

4 Ergebnisse

Das Jahr 1993 wird in Rågetaåsen und Siggaboda als Weiserjahr eingeteilt, auch in Tolseboda weicht dieses Jahr um 40 % vom langjährigen Trend ab. Der kleinste Jahrring der Buchen von Siggaboda ist das Jahr 1847. Diese Jahr ist bei allen Buchen ausgefallen.

Tabelle 4.24: Minimale (oben) und maximale (unten) Jahrringbreiten der Standorts-Chronologien der Buchen, gleiche Jahre sind mit denselben Farben markiert

Rehberg	Rågetaåsen	Siggaboda	Tolseboda
Negative Weiserjahre			
2004	1916	1847	1916
1953	1953	1993	1795
1913	1993	1859	1956
1976	1998	1928	1976
2005	1996	1992	1781
1915	1917	1812	1847
Positive Weiserjahre			
2003	1972	1932	1855
1997	2001	1831	1991
1988	1971	1832	1949
2001	1991	2001	1963
1967	1908	1931	2004
1943	1973	1850	1924

Unter den positiven Weiserjahren ist das Jahr 2001 in Mittel- und Nordeuropa vertreten (Rehberg, Rågetaåsen, Siggaboda). Nur ein weiteres Jahr, 1991, ist in Rågetaåsen und Tolseboda gleichsam positiv. Die übrigen Weiserjahre sind sehr differenziert und machen so deutlich, dass die Voraussetzungen für überdurchschnittliches Wachstum vielfältigerer Natur sein müssen als die für stark unterdurchschnittliches Wachstum. Bemerkenswert ist das unmittelbare Aufeinanderfolgen des schmalsten (2004) auf den breitesten (2003) Jahrring bei den Buchen des Standortes Rehberg.

Fichten

An den Standorten Tolseboda, Siggaboda und Rehberg konnten nicht in jedem Fall 6 Weiserjahre ausgeschieden werden, da der Schwellenwert von 30 % Abweichung von der Ausgleichskurve nicht so oft erreicht wurde (Tab. 4.26). Daher wurden zur Ergänzung die nächstliegenden kleinsten bzw. größten Jahrringe herangezogen. Sie sind in Tabelle 4.25 aufgelistet und die sich auf mehreren Standorten wiederholenden Weiserjahre

4 Ergebnisse

sind farblich markiert. Generell überwiegen bei den Fichten die gemeinsamen positiven Weiserjahre leicht mit 4 gegenüber 3 gemeinsamen negativen. Bei den gemeinsamen Weiserjahren fällt zunächst auf, dass auch bei den Fichten das europaweit negative Weiserjahr 1976 auftaucht (Rehberg, Tulseboda). Weiter zeigen alle schwedischen Standorte das gemeinsame Weiserjahr 1992 und zwar auch in derselben Intensität. Es ist bei allen das zweitkleinste Weiserjahr. 2006 ist in Rågetaåsen und Siggaboda das schmalste Weiserjahr.

Tabelle 4.25: Minimale (oben) und maximale (unten) Jahrringbreiten der Standorts-Chronologien der Fichten, gleiche Jahre sind mit denselben Farben markiert

Rehberg	Rågetaåsen	Siggaboda	Tulseboda
Negative Weiserjahre			
1948	2006	2006	1886
1942	1992	1992	1992
1976	1950	1914	1976
2004	1996	1915	1969
1984	1986	2005	1888
1923	1952	1989	1885
Positive Weiserjahre			
1967	1973	1981	1981
1946	1946	1946	1919
2002	1971	1890	1916
1953	1994	1919	1880
1878	1972	1892	1903
1909	1974	1971	1980

Bei den positiven Weiserjahren wiederholt sich das Jahr 1946 in Mittel- und Nordeuropa (Rehberg, Rågetaåsen, Siggaboda). 1981 ist bei Siggaboda und Tulseboda das größte Weiserjahr und auch 1919 taucht auf beiden Standorten auf. Ein gemeinsames Weiserjahr von Rågetaåsen und Siggaboda ist 1971.

Vergleich

Nach der Betrachtung der intraspezifischen Weiserjahre sollen nun die interspezifisch gleichen wie auch gegensätzlichen Weiserjahre standortsweise betrachtet werden. Tabelle 4.26 zeigt eine Gegenüberstellung der 6 negativen sowie der 6 positiven Weiserjahre beider Arten je Standort, rot hervorgehoben sind die gleichen Weiserjahre an einem Standort, blau kennzeichnet entgegengesetzte Jahre. Dies sind Jahre, die bei der einen

4 Ergebnisse

Baumart als positive Weiserjahre und bei der anderen als negative Weiserjahre ausgewiesen wurden. Als drittes sind einige Weiserjahre grün gekennzeichnet. In diesen Fällen handelt es sich um Jahre, welche unmittelbar aufeinander folgen und bei der einen Baumart positiv, bei der anderen negativ ausgeprägt sind. Ein Versuch der Erklärung einzelner Weiserjahre kann hier lediglich mit Hilfe der Klimavariablen Niederschlag und Temperatur erfolgen. Da jedoch weit mehr Faktoren das Wachstum der Bäume beeinflussen, wird die Ursache einiger Weiserjahre nicht zu erläutern sein. Weiterhin liegen die vorhandenen Daten in Form von monatlichen Summen bzw. Mittelwerten vor. Gerade negative Weiserjahre können ihre Ursache jedoch in kurzfristigen Einzelereignissen haben. Da jedoch nur für die Klimastation Väjö Minimal- und Maximalwerte der Temperatur vorliegen, ist es nur für die Standorte Siggaboda und Tulseboda möglich z.B. Spätfröste, die gravierenden Einfluss besonders auf das Buchenwachstum haben können, zu entdecken. Positive Weiserjahre bedürfen dagegen einer Kombination aus Einflussvariablen, die sich nahezu in einem für die Baumart optimalen Bereich befinden müssen. Daher ist es besonders in solchen Fällen nicht immer möglich den überdurchschnittlichen Zuwachs zu erläutern. Dennoch kann mit Hilfe der maßgeblich wachstumsbeeinflussenden Variablen Temperatur und Niederschlag ein wesentlicher Eindruck über die Abhängigkeiten des arteigenen Baumwachstums ermittelt werden.

Tabelle 4.26: Negative (oben) und Positive (unten) Weiserjahre beider Baumarten aller Standorte, gleiche Reaktionen innerhalb des Sto = rot; entgegengesetzte Reaktionen innerhalb des Sto = blau; versetzt und gleichzeitig entgegengesetzte Reaktionen = grün

Rehberg		Rågetaåsen		Siggaboda		Tulseboda	
Buche	Fichte	Buche	Fichte	Buche	Fichte	Buche	Fichte
Negative Weiserjahre							
2004	1948	1916	2006	1847	2006	1916	1886
1953	1942	1953	1992	1993	1992	1795	1992
1913	1976	1993	1950	1859	1914	1956	1976
1976	2004	1998	1996	1928	1915	1976	1969
2005	1984	1996	1986	1992	2005	1781	1888
1915	1923	1917	1952	1812	1989	1847	1885
Positive Weiserjahre							
2003	1967	1972	1973	1932	1981	1855	1981
1997	1946	2001	1946	1831	1946	1991	1919
1988	2002	1971	1971	1832	1890	1949	1916
2001	1953	1991	1994	2001	1919	1963	1880
1967	1878	1908	1972	1931	1892	2004	1903
1943	1909	1973	1974	1850	1971	1924	1980

Am Standort **Rehberg** finden sich bei beiden Arten die negativen Weiserjahre 2004 und 1976. Auch ein positives Jahr, 1967, ist bei beiden zu finden. Äußerst interessant ist hier das Jahr 1953. Es ist für die Buchen ein stark negatives, jedoch für die Fichten ein deutlich positives Jahr. Die Jahre 1942/43 (grün) sind versetzte und entgegengesetzte Weiserjahre.

Der Standort **Rågetaåsen** zeigt nicht nur einzelne Jahre, die gleichartige Zuwachsreaktionen bei beiden Arten hervorrufen, sondern ganze Perioden. Im Zeitraum 1971 bis 1973 wird das Wachstum für beide positiv beeinflusst, nur die Intensität ist unterschiedlich. Nicht eindeutig zu analysieren ist der Zeitraum 1991 bis 1994 (grün). Hier zeigt sich ein ungleiches Verhalten der Arten. Das Jahr 1996 ist ein negatives Weiserjahr für Buche wie Fichte.

Die Weiserjahre am Standort **Siggaboda** sind sehr differenziert. Es gibt nur ein einziges Jahr mit einer gleichsinnigen Reaktion, 1992 ist bei beiden Arten ein negatives Weiserjahr.

Das überregionale Weiserjahr 1976 ist am Standort **Tolseboda** bei Buchen wie auch Fichten als negatives Jahr ausgeprägt. Weiterhin findet man hier ein gegensätzliches Weiserjahr. 1916 ist das am stärksten ausgeprägte negative Jahr bei den Buchen. Dagegen ist es für die Fichten ein deutlich positives Jahr.

Einzeljahranalyse der Weiserjahre

Rehberg Die Witterung im Jahr der Ringbildung ist für die **Buche** wenig ausschlaggebend. Negative Weiserjahre treten bevorzugt nach extrem heißen Sommern (Juni, Juli - August) des Vorjahres ein. In Jahr 1976 war jedoch zusätzlich das aktuelle Jahr äußerst heiß und trocken. Leider können aufgrund fehlender Minimal- und Maximaltemperaturen für die vorliegende Untersuchung keine Einzelereignisse wie Spätfröste belegt werden, doch Dittmar und Elling (2007) können die Ursache des auch in den Bayerischen Alpen bei Buche auftretenden Weiserjahres 1953 auf ein Spätfrostereignis im Mai zurückführen. Die Weiserjahr-Perioden 1913 - 1915 und 2004 - 2005 sind zurückzuführen auf einen Ursachenkomplex von einem heiß-trockenen Vorjahres-Sommer, in dessen Folge eine Kalamität von Wollschildläusen eine Entlaubung der Buchen zur Folge hatte (Rust, mündl.). Dittmar und Elling (1999) nennen für das Weiserjahr 1915 ebenso in den Alpen warme und trockene Witterung als Ursache.

4 Ergebnisse

Auch positive Weiserjahre beruhen auf den Witterungsbedingungen des Vorjahres. Kühle und feuchte Sommer (Mai / Juli - August) stellen ideale Voraussetzungen dar. Der Vorjahres-Sommer zum Weiserjahr 2003 war dagegen warm (1,64 °C wärmer, Juli - August), doch zusätzlich bedeutend feuchter. Juli-August fiel 83,5 % mehr Niederschlag als das langjährige Mittel. Das Jahr 2001 ist ebenfalls in Rågetaåsen und Siggaboda ein positives Weiserjahr. Weiterhin spielen für überdurchschnittlich breite Jahrringe zusätzlich zu den Vorjahres-Bedingungen erhöhte Niederschläge im Jahr der Ringbildung eine wichtige Rolle. Dittmar und Elling (1999) erklären die Weiserjahre 1967 und 1988 mit warmer und trockener Witterung im laufenden Jahr bzw. im Vorjahres-Herbst. Für das positive Weiserjahr 1943 finden sie jedoch keine befriedigende Erklärung, während am Rehberg eindeutig ein kühler und feuchter Vorjahres-Juli Auslöser war.

In der Regel sind extrem warme und trockene Sommer die Ursache für negative Weiserjahre bei der **Fichte**, im Vorjahr wie im aktuellen Jahr der Ringbildung. Hinzu kommen deutlich verringerte Niederschläge, besonders von Juni-August des Vorjahres. Beim europaweiten Weiserjahr 1976 war das Vorjahr wie auch das aktuelle Jahr extrem heiß und trocken. Bei der Fichte kann aber auch große Kälte der Auslöser für ein negatives Weiserjahr sein. Der Januar im Jahr 1942 war um 8,2 °C kälter als das langjährige Mittel. 1923 war der Juni im Jahr der Ringbildung um 5,3 °C kälter. Dittmar und Elling (1999) bestätigen kühle und feuchte Witterung als Ursache für die negativen Weiserjahre 1942 und auch 1948, obwohl für dieses Jahr die Höhenlage des untersuchten Standortes von Bedeutung ist. In einer Höhenlage über 1300 m über NN im Bayerischen Wald reagieren die Fichten auf eine kühl-feuchte Witterung, doch bei einer Höhe von 450 m über NN in Mittelfranken scheinen die Nachwirkungen der Trockenheit im Vorjahr ursächlich zu sein (Dittmar und Elling, 1999). Die etwa mittlere Höhenlage von 680 m über NN des Rehberg und die tatsächlich große Trockenheit des Jahres 1947 lässt eher dies als die Ursache für das Weiserjahr erkennen.

Positive Weiserjahre werden dagegen durch erhöhte Niederschläge im Vorjahr und speziell Juli - August im aktuellen Jahr ausgelöst. Eine kühle und feuchte Witterung stellt ideale Bedingungen für das Wachstum der Fichte dar. Der Niederschlag im Juni 1946 war europaweit außerordentlich hoch, so dass auch in Rågetaåsen und Siggaboda die Fichten ein positives Weiserjahr zeigen. Dittmar und Elling (1999) finden dagegen keine befriedigende Erklärung für das Jahr 1946. Das Weiserjahr 1953 wird von ihnen jedoch ebenfalls mit Ursache in kühl-feuchter Witterung genannt.

Rågetaåsen In der Regel sind kühle, feuchte Sommer (Juni - August) im aktuellen Jahr die Ursache für negative Weiserjahre bei der **Buche** in Rågetaåsen. Aber auch die umgekehrte Situation, heiß-trockene Sommer (Mai - Juli) beeinflusst das Wachstum negativ. In wenigen Fällen kommt auch ein kaltes Frühjahr (Februar / März 2 - 4 °C kälter) als ausschlaggebender Faktor in Frage. Das schmalste Weiserjahr 1916 belegt, dass die Buchen hauptsächlich vom Vorjahr beeinflusst werden können. Im Juni 1915 war der Niederschlag um 90 % geringer als das langjährige Mittel. Die allgemeinen Witterungsbedingungen bieten keine Erklärung für den schmalen Jahrring von 1953, daher ist die Annahme, dass es sich hier um ein starkes Spätfrostereignis, ähnlich wie in Mitteleuropa gehandelt haben kann, plausibel. Das mit Siggaboda gemeinsame negative Weiserjahr 1993 hat voneinander abweichende Ursachen. In Rågetaåsen liegen sie in einem überaus kühlen und feuchten Sommer, während in Siggaboda der geringe Vorjahres-Niederschlag von Bedeutung ist.

Positive Weiserjahre finden sich bei der Buche in Jahren mit mittleren Witterungsbedingungen. Leicht wärmere (1 - 2,3 °C) Sommer (Juli - August) und erhöhte Niederschläge (Mai - August) rufen ein starkes Wachstum der Buche hervor. Im Jahr 1991, welches auch in Tulseboda ein positives Jahr ist, profitieren die Buchen von außerordentlich hohen Niederschlägen im Juni der Ringbildung. Die für die Fichte ebenfalls positiven Jahre 1971 und 1973 lassen sich allein durch Niederschlags- und Temperaturdaten nicht erklären.

Die **Fichte** reagiert besonders stark auf reduzierte Niederschläge im Sommer der Ringbildung (Mai - August) mit extrem schmalen Jahrringen. Dazu kommen hohe Sommer-Temperaturen (Mai - Juli), die zu negativen Weiserjahren führen können. In zwei Fällen (1986, 1996) kam zu einem besonders trockenen Sommer (1996, Juni-Niederschläge -90 %) noch ein extrem kalter Winter hinzu. Der Februar war bis zu 6 °C kälter als das langjährige Mittel.

Die Ursachen für positive Weiserjahre sind für die Fichte schwer zu identifizieren. Ausschlaggebend kann der erhöhte Niederschlag im Sommer (Juni - Juli) im Jahr der Ringbildung sein. Der Einfluss der Temperatur zeigt hier keinen eindeutigen Trend. Die Weiserjahre 1994 (positiv) und 2006 (negativ) zeigen im Jahr der Ringbildung sehr ähnliche, heiß - trockene Witterungsbedingungen, trotzdem reagiert die Fichte genau gegenteilig. Hier zeigt sich der auch für die Fichte wichtige Einfluss des Vorjahres. Im Mai 2005 fielen die Niederschläge komplett aus, im Gegensatz dazu brachte der Juli 1993 60 % mehr Niederschlag als im Durchschnitt. Kühl-feuchte Witterung beeinflusste das Wachstum im Jahr 1953 positiv.

4 Ergebnisse

Siggaboda Für negative Weiserjahre bei der **Buche** sind trocken - heiße Vorjahres-Sommer verantwortlich. Die Temperaturen im Juni, bzw. Juli - August können bis zu 3,8 °C (1847 bzw. 1846) erhöht sein. In Hannover wurde im Jahr 1846 eine Juli-Temperatur von 19 °C und eine August-Temperatur von 20,8 °C gemessen bei gleichzeitigem Niederschlag von 2,2 mm im August. Gleichzeitig war der Winter 1846/1847 von extremer Härte; dies wird besonders für Irland berichtet. Entscheidend für den Zuwachs ist ebenso der Niederschlag im Vorjahr (Juni - August) und in abgeschwächter Form auch im Jahr der Ringbildung. Dies zeigt das Jahr 1992, hier war der Niederschlag um 99,3 % reduziert. Dieses Jahr ist darüber hinaus auch bei den Fichten in Siggaboda sowie Tulseboda zu finden. Bei der Buche hat das Jahr 1992 überdies Einfluss auf das Jahr 1993, welches der zweit schmalste Jahrring ist.

Für die Ausbildung von positiven Weiserjahren spielt die Temperatur eine untergeordnete Rolle, sie ist in der Regel im mittleren Bereich oder wenig kühler (Juni - August). Dagegen sind die Niederschläge maßgebender. Sie sind im Vorjahr wie auch im aktuellen Jahr deutlich erhöht (Juni, Juli - August). Bei den Buchen in Siggaboda tritt erneut der bedeutende Einfluss des Vorjahres in den Vordergrund. Der Einfluss der Witterung im Jahr der Ringbildung ist auf den Niederschlag beschränkt.

Neben erhöhten Sommer-Temperaturen (Mai - Juni / Juli) und besonders niedrigen Temperaturen im März (2,5 - 3,3 °C kühler), sind jedoch geringere Niederschläge im Juni für negative Weiserjahre bei der **Fichte** ausschlaggebend. Sie sind stark reduziert bis nahezu ausgeblieben.

Für positive Weiserjahre bleibt die Temperatur in mittleren Bereichen oder ist in geringem Maße (1 - 1,8 °C) kühler. Doch auch hier bestimmt der Niederschlag im Juni das Wachstum. Niederschläge bis zu 122,4 % höher als das langjährige Mittel im Juni steigern den Zuwachs der Fichte deutlich. Das Jahr 1981, welches auch bei den Fichten in Tulseboda den breitesten Jahrring hervorgebracht hat, liegt mit einem um 1 °C kühleren Sommer (Juni- August) und lediglich um 36,6 % erhöhtem Niederschlag im Juni, in mittleren Bereichen der Witterung. Hier kann das starke Wachstum nicht allein durch die Klimavariablen Niederschlag und Temperatur erklärt werden.

Tulseboda Für die **Buche** in Tulseboda sind die Witterungsbedingungen des Vorjahres entscheidend. Negative Weiserjahre werden hervorgerufen durch trocken - heiße Sommer. Die Temperatur im Juli - August kann mittlere Werte annehmen aber auch Anstiege auf 2,3 - 3,8 °C aufweisen. Der Niederschlag ist in Jahren erhöhter Temperatur im Juni - August um 60 - 70 % reduziert, in Jahren mittlerer Temperatur dagegen um bis zu 98,5

4 Ergebnisse

%. Im Jahr 1916, dem schmalsten Jahrring, war das aktuelle wie das Vorjahr geprägt von mittleren Temperaturen. Der Niederschlag stellt hier den entscheidenden Faktor dar. Im Vorjahres-Juni war er um 98,1 % geringer als das langjährige Mittel. Trotz des um 32 % erhöhten Niederschlags im folgenden Juli, war die Buche in ihrem Zuwachs extrem reduziert. Aber auch Spätfrostergebnisse können zu Zuwachsverlusten führen. Dies war im Jahr 1956 (Minimaltemperatur im April $-10,5^{\circ}\text{C}$) der Fall und auch im Jahr 1916 spielte ein Spätfrost im Mai von -4°C eine Rolle.

Die Ursache von positiven Weiserjahren liegt erneut in den Niederschlägen, im Besonderen im Jahr der Ringbildung. In der Phase von Juni - August (mit Schwerpunkt Juli) kann der Niederschlag um bis zu 157 % höhere Werte erreichen. Sind die Niederschläge im Vorjahr in Einzelfällen sogar reduziert, sind sie um so höher im aktuellen Jahr. Die Temperatur spielt weder im aktuellen noch im Vorjahr eine entscheidene Rolle.

Negative Weiserjahre der **Fichte** werden maßgeblich von kühlen bis kalten Früh-Sommern (März - Mai), mit Temperaturen, die 3 - 6 °C kälter sind als der mittlere Durchschnitt, verursacht. Hinzu kommt ein deutlich reduzierter Niederschlag im Juni (ca. 50 % geringer). In wenigen Fällen ist der Sommer etwas wärmer als im Mittel, die Niederschläge in diesen Jahren im Juni jedoch extrem gering (70 - 99 %). Spätfrostergebnisse waren in vielen Fällen Ursachen für negative Weiserjahre. So waren in den Fällen 1885 und 1886 Tiefsttemperaturen von $-3,5^{\circ}\text{C}$ bzw. $-4,0^{\circ}\text{C}$ im Mai ausschlaggebend und in den Jahren 1888 und 1969 verursachten Apriltemperaturen von $-8,^{\circ}\text{C}$ und $-8,0^{\circ}\text{C}$ besonders schmale Jahrringe. Korrelationsanalysen der monatlichen Tiefsttemperaturen und dem Zuwachs der Fichten ergaben eine Korrelation von $r = 0,22$ mit den Minimaltemperaturen des Mai.

Für positive Weiserjahre spielt der Niederschlag im Juni die entscheidende Rolle. Höhere Niederschläge und mittlere Temperaturen führen zu ausgeprägtem Zuwachs.

4.3.5 Anteile an erklärter Varianz

Gesamtzeitraum

Insgesamt betrachtet ist es für Buchen wie auch Fichten an den untersuchten Standorten mit den gegebenen Witterungsdaten nur möglich, einen äußerst kleinen Anteil der indexierten Chronologie-Varianz zu erklären.

Buche Die höchsten Anteile des witterungsbedingten Einflusses lassen sich bei den Buchen den Juli-Temperaturen des Vorjahres mit 12-13 % zuschreiben (Abb. 4.45). Einen wesentlichen Anteil vermag auch die Oktober-Temperatur am Standort Rågetaåsen zu erklären. Nur im Juni und Juli des Vorjahres haben Niederschläge einen Anteil von etwa 5-8 %.

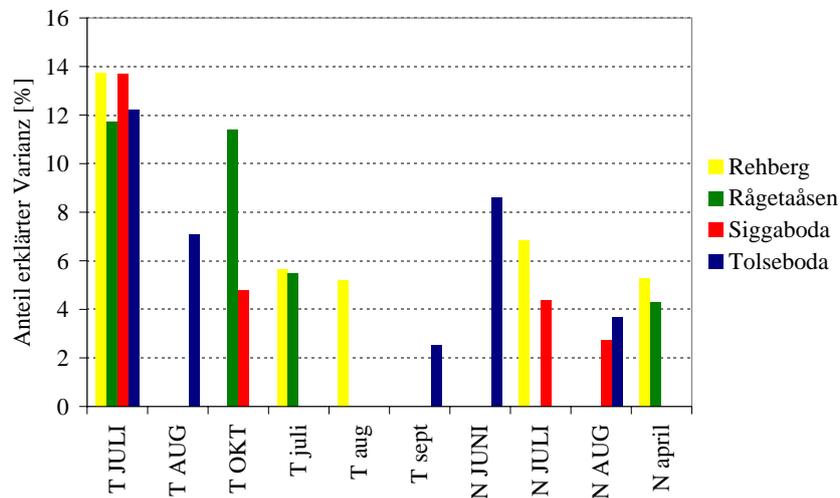


Abbildung 4.45: Anteile der Witterungsvariablen an der erklärten Varianz der Zuwächse der indexierten Standorts-Chronologien der Buchen, bezogen auf den Gesamtzeitraum; T = Temperatur, N = Niederschlag, Großbuchstaben = Vorjahr, Kleinbuchstaben = aktuelles Jahr

Fichte Die Niederschläge des Junis im Jahr der Ringbildung nehmen mit etwa 8-9 % den höchsten mit den gegebenen Klimavariablen erklärbaren Anteil der Chronologie-Varianz ein (Abb. 4.46). Am Standort Rågetaåsen hat auch der Niederschlag im Januar einen Anteil von über 7 %. Im Gegensatz zu den Buchen lassen sich nur geringe Anteile von etwa 4-5 % dem Einfluss der Temperatur des Vorjahres (Juli und September) zuschreiben.

4 Ergebnisse

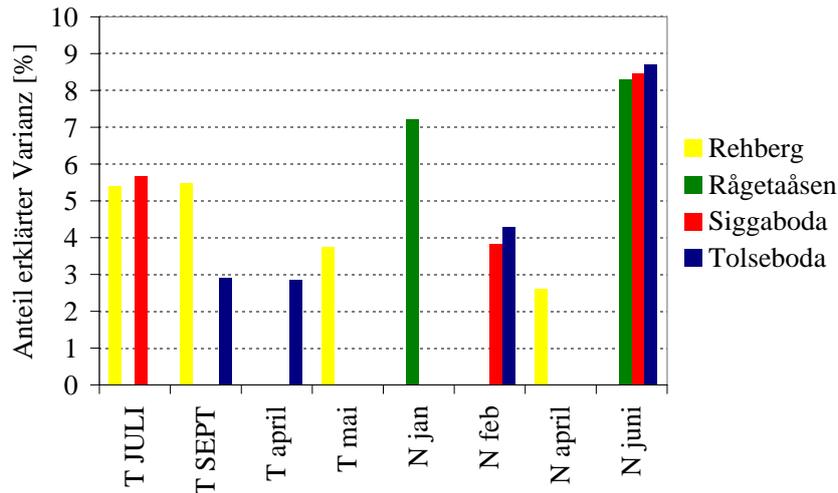


Abbildung 4.46: Anteile der Witterungsvariablen an der erklärten Varianz der Zuwächse der indexierten Standorts-Chronologien der Fichten, bezogen auf den Gesamtzeitraum

Seit 1950

Durch die vorangegangenen Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass die Klimasignale im Zuwachs der Bäume seit den letzten Jahrzehnten stark zugenommen haben bzw. ist die Klimasensitivität seit etwa 1950 deutlich angestiegen. In Abbildung 4.47 erkennt man den starken Anstieg der erklärten Varianz der Buchen durch die Juli-Temperatur des Vorjahres. Dies wird besonders bei den Buchen in Tolseboda deutlich. Hier erklärt die Juli-Temperatur 42,5 %. Auch der Anteil erklärt durch den Juli-Niederschlag ist in Tolseboda auf 18 % gestiegen.

Bei den Fichten (Abb. 4.48) zeigt sich erneut deutlich der starke Rückgang des Einflusses der Juni-Niederschläge im laufenden Jahr. Die Varianz wird seit 1950 durch sehr unterschiedliche Variablen erklärt. Auch hier ist der Einfluss des Vorjahres deutlicher geworden. Für die Fichten des Standortes Rågetaåsen lässt sich aufgrund der Kürze der Chronologie keine Veränderung seit 1950 feststellen.

4 Ergebnisse

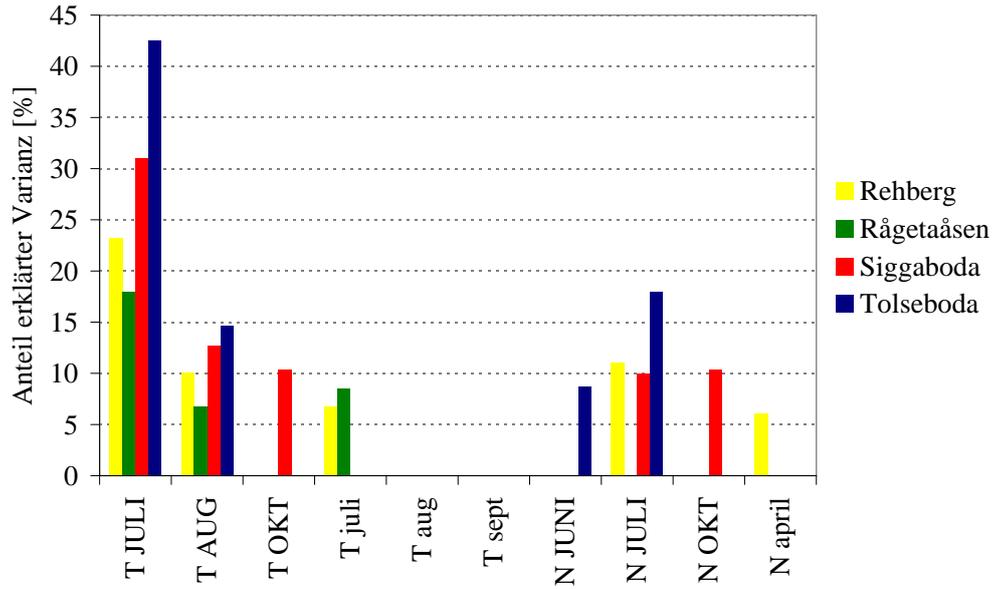


Abbildung 4.47: Anteile der Witterungsvariablen an der erklärten Varianz der Zuwächse der indexierten Standorts-Chronologien der Buchen, seit 1950

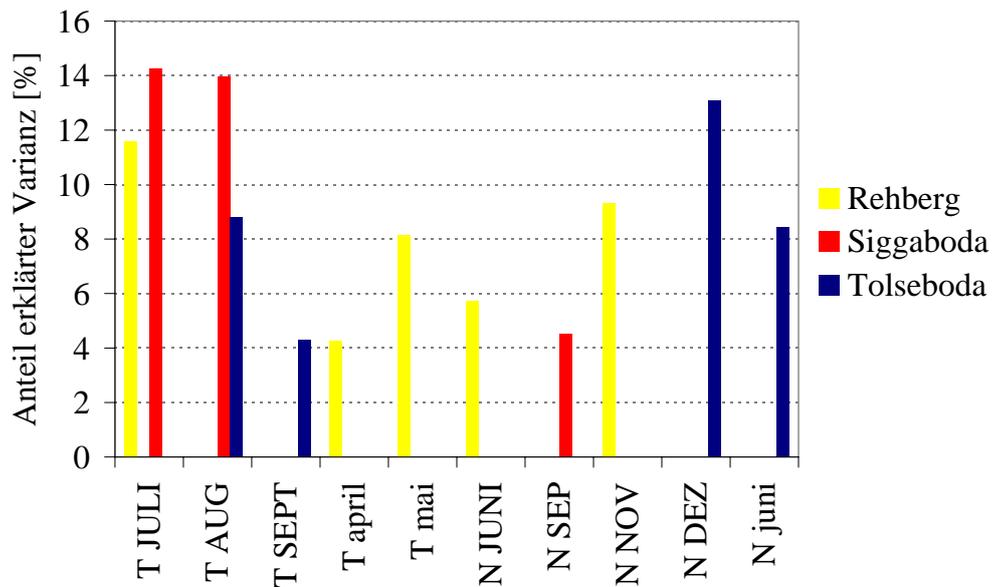


Abbildung 4.48: Anteile der Witterungsvariablen an der erklärten Varianz der Zuwächse der indexierten Standorts-Chronologien der Fichten, seit 1950

Tabelle 4.27 ist zu entnehmen, wie stark der Anteil der erklärten Varianz durch ausgewählter Klimavariablen gestiegen ist. Entsprechend der vorangegangenen Abbildungen 4.47 und 4.48 wurden für beide Baumarten die jeweils wesentlich prägenden Witterungsvariablen ausgewählt und im Regressionsmodell zusammengeführt. Es zeigt sich,

4 Ergebnisse

dass bei fast allen der Anteil an der erklärten Varianz steigt. Am deutlichsten bei den Buchen in Tulseboda. Die wichtigsten Witterungseinflüsse für das Wachstum der Fichten in Tulseboda lassen sich nicht durch ein lineares Regressionsmodell erklären (siehe Kap. 4.3.2). Die vorangegangenen Korrelationsanalysen zeigen dagegen signifikante Beziehungen auf.

Tabelle 4.27: Anteil erklärter Varianz durch ausgewählte Klimavariablen (siehe Text), für den Gesamtzeitraum und seit 1950

Standort	Art	Zeitraum	Stdf.	FG	multiples R^2	korr. R^2	F-Test	p
Rehberg	Bu	ges.	0,20	109	0,33	0,27	5,43	0,0000
		ab 1950	0,23	45	0,42	0,29	3,28	0,0029
	Fi	ges.	0,19	109	0,18	0,11	2,45	0,0113
		ab 1950	0,18	45	0,42	0,29	3,28	0,0029
Rågetaåsen	Bu	ges.	0,17	87	0,27	0,18	3,17	0,0017
		ab 1950	0,18	45	0,29	0,14	1,88	0,0743
Siggaboda	Bu	ges.	0,21	134	0,22	0,16	3,80	0,0002
		ab 1950	0,18	45	0,48	0,37	4,18	0,0004
	Fi	ges.	0,13	118	0,20	0,13	2,99	0,0021
		ab 1950	0,14	45	0,34	0,19	2,31	0,0273
Tulseboda	Bu	ges.	0,23	134	0,25	0,19	4,37	0,0000
		ab 1950	0,19	45	0,55	0,45	5,57	0,0000
	Fi	ges.	0,16	123	0,13	0,06	1,90	0,0508
		ab 1950	0,17	45	0,14	-0,06	0,70	0,7149

4.3.6 Stärkste Witterungseinflüsse

Am Beispiel der Buchen am Standort Tulseboda soll verdeutlicht werden, in wie weit die Abhängigkeit des Zuwachses von einer Witterungsvariablen durch Einflüsse extremer Witterungslagen überdeckt wird.

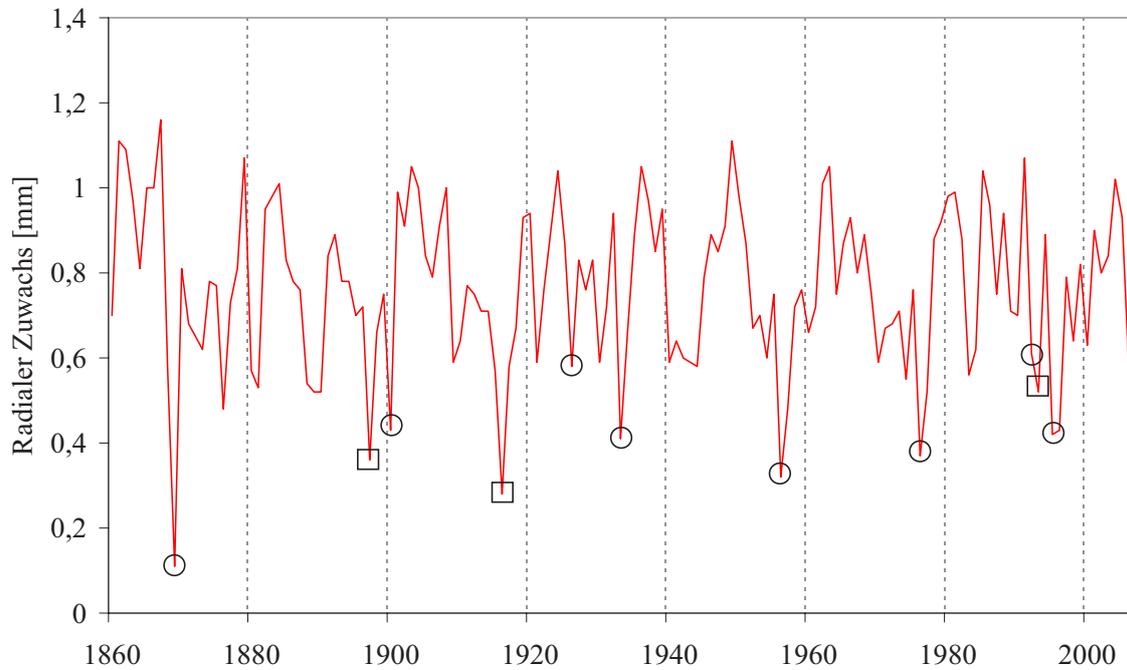


Abbildung 4.49: Indexierte Zuwachs-Chronologie der Buchen am Standort Tulseboda mit Markierung der negativen Extremjahre nach deren Witterungsursache (\circ = Juli-Temperatur des Vorjahres; \square = Juni-Niederschlag des Vorjahres, mit Ausnahme 1897 - Juni des aktuellen Jahres)

Der indexierte Zuwachs der Buchen ist in Abbildung 4.49 verkürzt ab 1860 dargestellt, da die Klimadaten ab diesem Zeitpunkt vorliegen. Die Zuwachsminima korrespondieren stets mit den Witterungsbedingungen im Jahr vor der Ringbildung, zum größeren Teil mit den höchsten Juli-Temperaturen (\circ) oder auch mit den niedrigsten Juni-Niederschlägen (\square). Eine Ausnahme bildet der Jahrring 1897, da der Zuwachs dieses Ringes durch hohe Juli-Temperaturen des Vorjahres und gleichzeitig durch niedrige Juni-Niederschläge im Jahr der Ringbildung (14 % des langjährigen Juni-Mittels) geprägt wurde. Die Extremjahre 1992 und 1993 wurden zunächst durch einen besonders heißen Juli 1991 und durch äußerst geringe Niederschläge im Juni 1992 (0,6 %) beeinflusst. Das Jahr 1916 wurde dagegen ausschließlich durch extrem geringe Juni-Niederschläge des Vorjahres geprägt (1,9 % des langjährigen Juni-Mittels).

4 Ergebnisse

Die starke Abhängigkeit des Zuwachses der Buchen von der Juli-Temperatur und dem Juni-Niederschlag des Vorjahres ist deutlich, doch ob der statistische Zusammenhang ausschließlich aufgrund der Extremjahre geprägt wird, soll durch einen Ausschluss dieser bei der Berechnung von Korrelationen untersucht werden. In Abbildung 4.50 ist der indexierte Zuwachs der Buchen in Abhängigkeit von der Juli-Temperatur des Vorjahres dargestellt. Die blauen Kreise markieren die Extremjahre. Anhand der Regressionsbeziehungen wird deutlich, wie stark der Einfluss der Extreme auf die Strenge der Beziehung wirkt. Zwar ist die Korrelation zwischen Zuwachs und Temperatur auch nach Entfernung der Extremjahre noch signifikant ($p=0,0375$), doch wie es zu erwarten war, beeinflussen die Extremjahre die Stärke des Zusammengangs maßgeblich (Tab. 4.28).

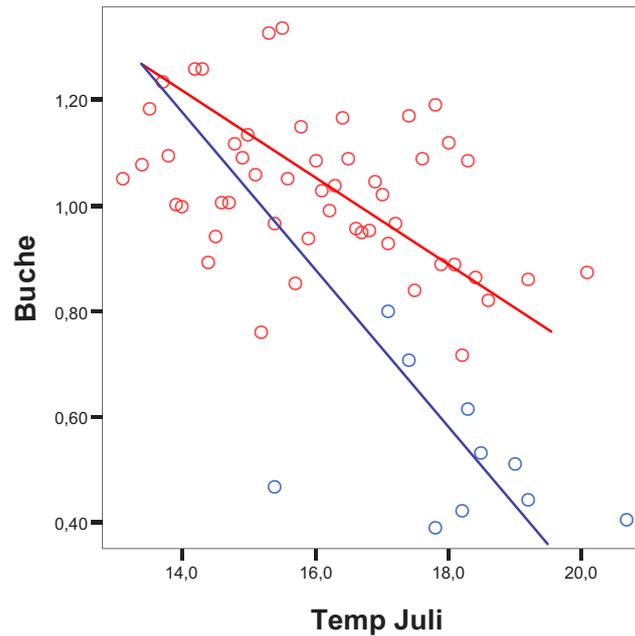


Abbildung 4.50: Zusammenhang zwischen indexiertem Zuwachs der Buchen am Standort Tolseboda und der Juli-Temperatur des Vorjahres (die Extremwerte sind blau markiert; blaue Regression incl. Extrema, rote excl.)

Tabelle 4.28: Statistik der Regressionen des Buchenzuwachses und der Juli-Temperatur des Vorjahres inclusive und exclusive der Extremwerte am Beispiel des Standortes Tolseboda

	Intercept	Slope	Stdf.	korr. R^2	t-Wert	p
incl. Extrema	1,98356	-0,061	0,013	0,12	-4,548	0,0000
excl. Extrema	1,48612	-0,028	0,013	0,03	-2,102	0,0375

4.4 Bestandesanalysen

Die Frage nach der Konkurrenzbeziehung zwischen den beiden ähnlich leistungsstarken Baumarten Buche und Fichte wird besonders interessant, begibt man sich an deren derzeitige Arealgrenzen in Südschweden. Der Standort Rehberg im Harz dient hervorragend als Vergleichsfläche, da er sich im zentralen Verbreitungsgebiet der Buche befindet und durch die montane Höhenlage auch der Fichte optimale Wuchsbedingungen liefert. Zur Beantwortung der Fragestellungen nach einem möglichen Gleichgewicht zwischen den Arten und einer dynamischen Entwicklung des Bestandesbildes in der Vergangenheit werden auf der Ebene des Bestandes verschiedene Analysen durchgeführt.

Anschließend werden Betrachtungen auf der Ebene der Einzelplots angestellt. Getrennt nach Konkurrenz-Konstellationen und Standorten werden zunächst die innerartlichen Situationen analysiert. Darauf folgen die zwischenartlichen Konstellationen und die Betrachtung der Zentralbäume im Detail.

Um bereits an dieser Stelle eine erste Verknüpfung zwischen klimatischen Abhängigkeiten des Zuwachses mit dem Konkurrenzgeschehen zu erstellen, sollen am Schluss des Kapitels die Auswirkungen extremer Witterungsereignisse auf das Zuwachsverhalten erläutert werden.

4.4.1 Konkurrenzanalysen auf der Ebene des Bestandes

Die mittleren Radialzuwächse von Buche und Fichte werden in ihrer zeitlichen Entwicklung auf der Standortebene betrachtet und analysiert. Auf diese Weise kann das Zuwachsverhalten und die daraus resultierende Konkurrenz und ihre Dynamik verglichen werden. Anhand von rohen Zuwachswerten und ihren über 11 Jahre indexierten Trends können die Einzeljahreszuwächse wie auch die langfristige Entwicklung ausgewertet werden.

Rågetaåsen

Die Fichten in Rågetaåsen (Abb. 4.51) liegen mit ihrem Zuwachs deutlich über den Buchen. Sie zeigen beide den gleichen Trend, der im Wesentlichen von Beginn an, mit zwischenzeitlichen Zuwachsstärkungen, fallend ist. Seit Anfang der 1970er Jahre sinken die Zuwächse beider Baumarten bisher ungebrochen.

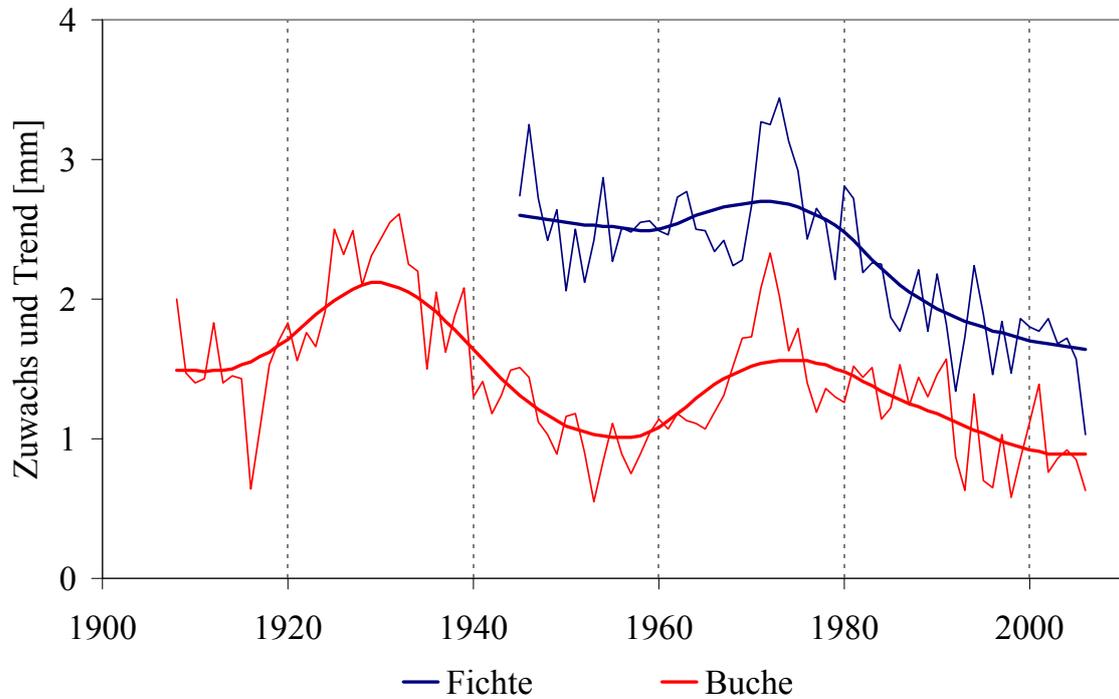


Abbildung 4.51: Rohzuwachs und 11-jähriger Trend von Fichte und Buche, Standort Rågetaåsen

Siggaboda

Auch in Siggaboda liegen die wesentlich jüngeren Fichten mit ihrem Zuwachs deutlich über den Buchen (Abb. 4.52). Der Trend ist bei beiden Baumarten grundsätzlich sehr ähnlich, wobei sich hier seit den 1980er Jahren eine Trendwende abzeichnet. Während die Fichten in ihren Zuwächsen zurückgehen, bleiben sie bei den Buchen annähernd konstant und zeigen sogar eine leicht ansteigende Tendenz. Anhand der Rohwerte ist jedoch weiterhin zu erkennen, dass seit 2002 (Buche) bzw. 2003 (Fichte) die Zuwächse stark sinken.

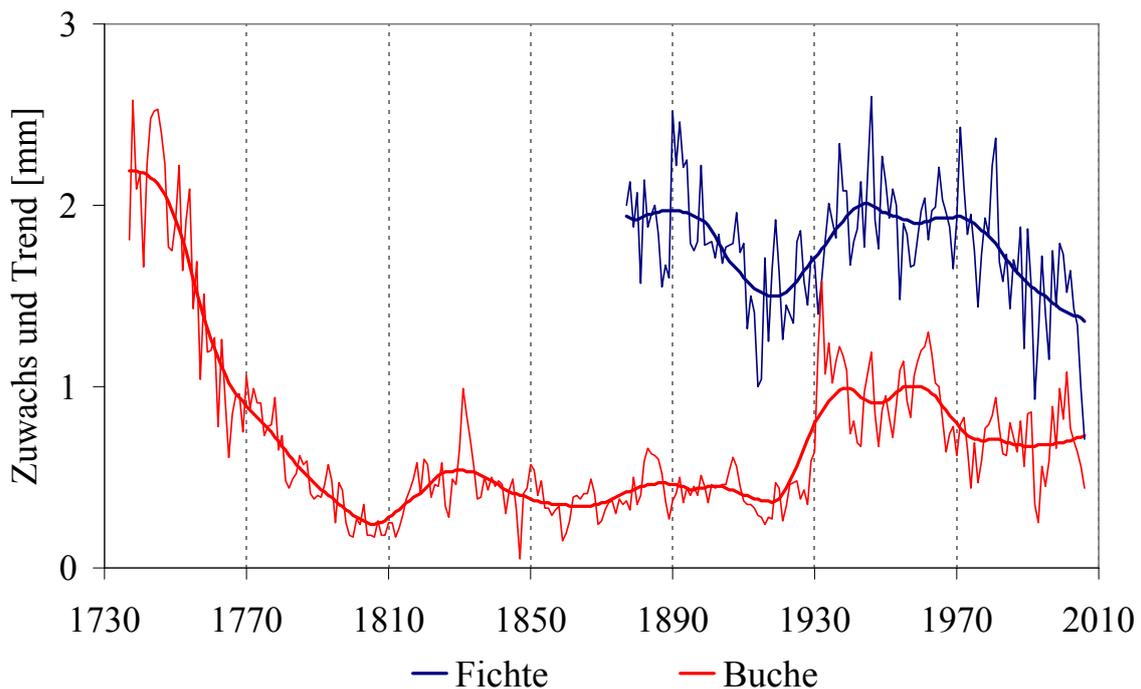


Abbildung 4.52: Rohzuwachs und 11-jähriger Trend von Fichte und Buche, Standort Siggaboda

Tolseboda

In Tolseboda (Abb. 4.53) sind die jüngeren Fichte den Buchen wiederum im Zuwachs deutlich überlegen und es hat den Anschein, dass sie die Buchen an diesem Standort unter einen starken Konkurrenzdruck setzen. Zwar befinden sich beide Baumarten seit dem Aufkommen der Fichte gemeinsam in einem abfallenden Trend, doch die Fichten erholen sich schneller und scheinen die Buchen in ihrem Zuwachs stark zu bedrängen. In einer Periode beginnend mit den 1880er Jahren bis in die 1950er folgen beide Baumarten gegensätzlichen Trends. Steigt der Zuwachs der Fichten, sinkt der der Buchen und umgekehrt. Seit etwa 1950 zeigen beide wieder nahezu synchrone Trendverläufe und steigen seit 1996 gemeinsam an. Mittels der Rohwerte ist ein Abfallen der Zuwächse seit 2005 bei beiden Arten zu erkennen.

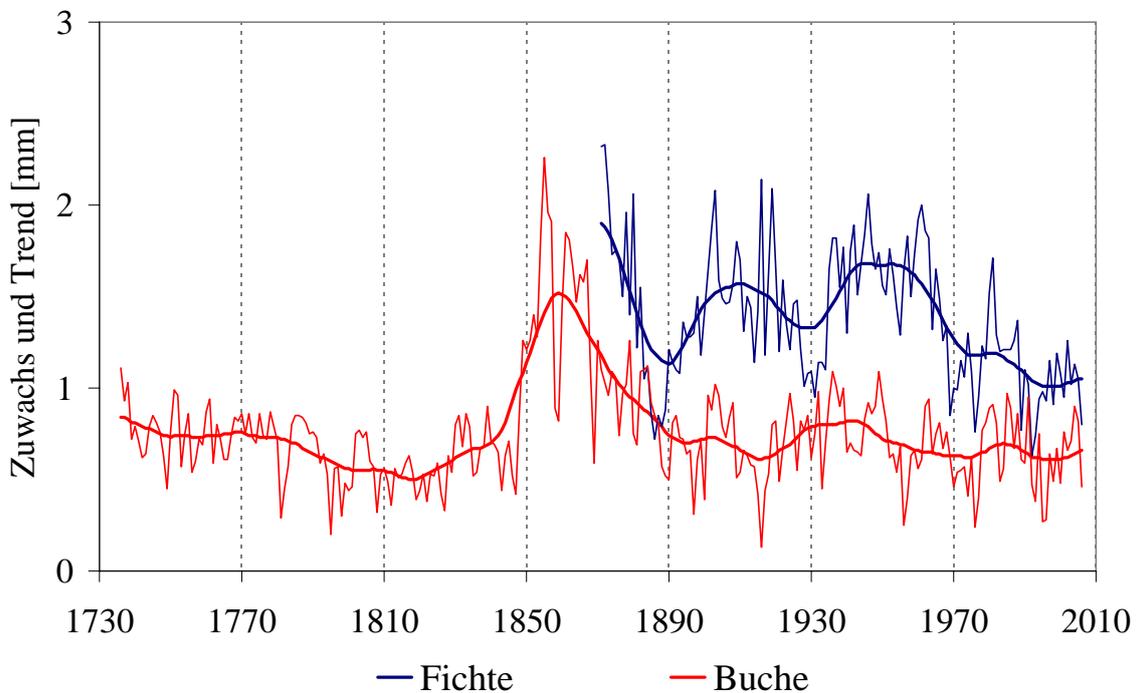


Abbildung 4.53: Rohzuwachs und 11-jähriger Trend von Fichte und Buche, Standort Tolseboda

Rehberg

Gänzlich anders als auf den schwedischen Standorten zeigt sich das Zusammenspiel von Buche und Fichte am Vergleichsstandort Rehberg. In Abbildung 4.54 erkennt man zunächst, dass die Zuwächse beider Baumarten sich auf etwa dem gleichen Level befinden. Auf den schwedischen Flächen liegt die Fichte mit ihrem Zuwachs uneinholbar über der Buche. Am Rehberg hat die Fichte lediglich in ihrer Jugend einen sichtbaren Vorsprung in ihren Zuwächsen. Danach gleichen die Zuwächse sich einander an und in einer Periode von den 1950er Jahren bis in die 1980er sind auch die Trendverläufe ähnlich. Etwa 1980 ist jedoch ein Wendepunkt und die Fichte übertrifft erneut die Buche in ihren Zuwächsen.

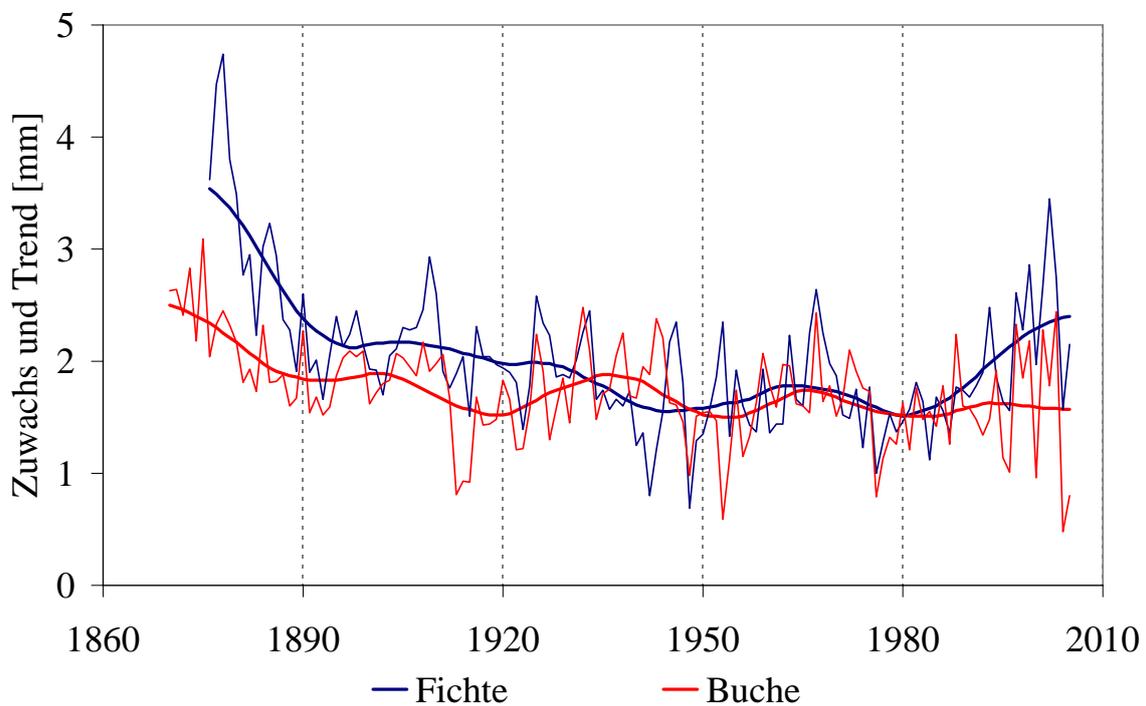


Abbildung 4.54: Rohzuwachs und 11-jähriger Trend von Fichte und Buche, Standort Rehberg

Vergleich wichtiger Kenngrößen

Ein Vergleich der absoluten Kennwerte beider Baumarten ist in Tabelle 4.29 zu sehen. Der durchschnittliche BHD der Fichte ist nicht immer größer als der der Buchen. In Rågetaåsen und Tulseboda ist das Verhältnis fast ausgeglichen. Durch einen Höhenvergleich

4 Ergebnisse

zeigt sich der große Konkurrenzvorteil der Fichten an den schwedischen Standorten Tulseboda und Siggaboda. Die Fichten sind hier im Durchschnitt 4,9 bzw. 6,5 m höher. In Rågetaåsen ist das Höhenverhältnis gänzlich ausgeglichen und am Rehberg erkennt man einen leichten Vorsprung der Fichte von 2,2 m. Die Auswertung der durchschnittlichen sozialen Klasse zeigt nur am Rehberg und in Siggaboda leichte Vorteile bei den Fichten. Die Fichten am Rehberg lassen in der gemittelten Vitalität die mit Abstand besten Werte erkennen. Im Allgemeinen zeigt sich hier die deutlich höhere Vitalität der Fichten auf allen Standorten.

Tabelle 4.29: Direktvergleiche der durchschnittlichen Dimensionsleistung in Höhe und Durchmesser, der sozialen Stellung und Vitalität

		BHD [cm]	Höhe [m]	soz. Klasse	Vitalität
Rehberg	Fichte	57,2	30,4	1,8	0,5
	Buche	51,0	28,2	2,4	1,3
Rågetaåsen	Fichte	23,5	17,6	2,5	1,4
	Buche	25,3	17,6	2,2	1,7
Siggaboda	Fichte	33,1	24,2	2,4	2,0
	Buche	28,0	17,7	2,8	2,2
Tulseboda	Fichte	39,2	27,6	2,4	1,4
	Buche	41,9	22,7	2,3	2,3

Kumulierte Zuwächse von Buchen und Fichten

Nach der Betrachtung der Konkurrenzverhältnisse von Buche und Fichte ermöglicht die kumulative Darstellung der Zuwächse eine Interpretation der Dynamik in der Konkurrenz. Durch die Addition der Jahrringbreiten werden Einflüsse wie große Altersunterschiede berücksichtigt. Der Wachstumsvorsprung der wesentlich älteren Buchen an den Standorten Siggaboda und Tulseboda wird so beachtet. Das Alter der Bäume wurde in einer Höhe von 1,3 m ermittelt, so dass über die ersten etwa 10 Jahre der Pflanzen bis sie diese Höhe erreicht haben, keine Aussagen getroffen werden können. In der kumulativen Darstellung entspricht also der maximale Durchmesser dem mittleren Brusthöhendurchmesser des Bestandes und steht in einer Abhängigkeit von der Bestandesdichte der jeweiligen Untersuchungsfläche.

Als weiterer Schritt wurden die Kurven nach ihrem Markalter gemittelt, um Altersunterschiede gänzlich auszuschließen. Das Markalter entspricht hier dem Alter in 1,3 m Höhe. Durch diese Art der Darstellung wird eine potentielle Konkurrenzsituation gleichaltriger Buchen und Fichten abgebildet.

4 Ergebnisse

Rågetaåsen Durch die kumulative Darstellung der Zuwachswerte nach absolutem Alter (4.55, links) wird deutlich, dass die jüngere Fichte durch ihren größeren Zuwachs den Durchmesser der Buchen in den letzten Jahren bereits eingeholt bzw. überholt hat. Nach dem Markalter kumuliert (rechte Seite) ist die Fichte jedoch von Beginn an der Buche überlegen.

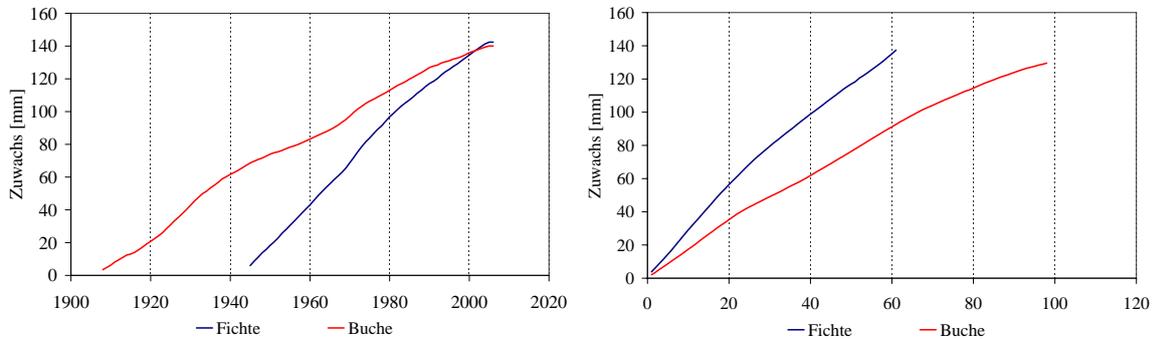


Abbildung 4.55: Kumulative Darstellung der Standort-Chronologien, links nach absolutem Alter, rechts nach Markalter, Standort Rågetaåsen

Siggaboda Die wesentlich ältere Buche am Standort Siggaboda kann trotz dieses Wachstumsvorsprunges den Durchmesser der Fichten nicht erreichen und wird von dieser bald übertroffen (4.56, links). In der nach dem Markalter kumulierten Darstellungsweise (rechts) wird die uneingeschränkte Überlegenheit der Fichte deutlich.

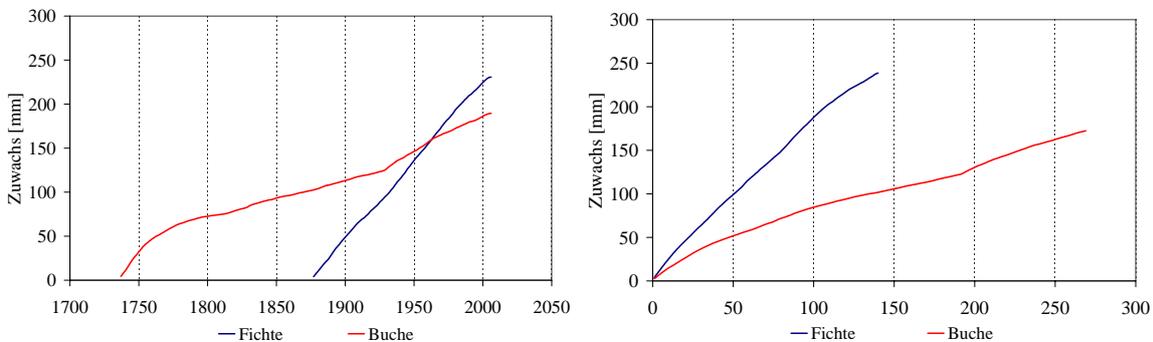


Abbildung 4.56: Kumulative Darstellung der Standort-Chronologien, links nach absolutem Alter, rechts nach Markalter, Standort Siggaboda

Tolseboda Am Standort Tolseboda konnte die bedeutend jüngere Fichte die Buche bisher nicht im erreichten Durchmesser einholen, doch kann man davon ausgehen, dass dieser Punkt sehr bald erreicht sein wird (4.57, links). Auf der rechten Seite der Abbildung erkennt man erneut den Konkurrenzvorteil der Fichte.

4 Ergebnisse

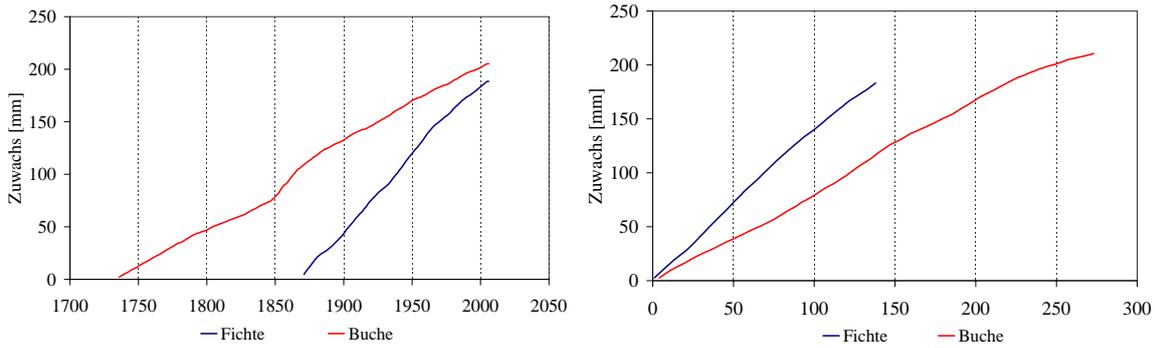


Abbildung 4.57: Kumulative Darstellung der Standort-Chronologien, links nach absolutem Alter, rechts nach Markalter, Standort Tulseboda

Rehberg Vergleichsweise anders stellt sich die Dynamik der Konkurrenz zwischen Buche und Fichte am Standort Rehberg dar. Zwar ist in Abbildung 4.58 in beiden Darstellungen die Überlegenheit der Fichte ebenso wie auf den schwedischen Standorten zu erkennen, aber die Buche beweist ihr hohes Potential in demselben Zeitraum vergleichbare Durchmesser zu erreichen. Auf diesem Standort arrangieren sich Buche und Fichte bislang in einem Konkurrenzgleichgewicht.

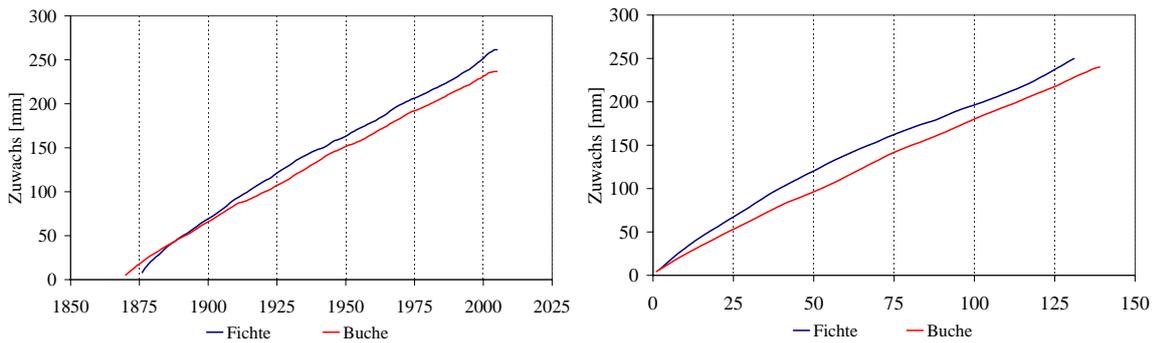


Abbildung 4.58: Kumulative Darstellung der Standort-Chronologien, links nach absolutem Alter, rechts nach Markalter, Standort Rehberg

Dynamik der Zuwachsverhältnisse

Die Entwicklung der Zuwächse in den letzten 100 Jahren soll für die bereits festgesetzten Phasen von 1894-1949 und 1950-2005 analysiert werden. In Tabelle 4.30 ist dargestellt, wie sich die Zuwächse in Prozent vom langjährigen Mittel seit 1894 verändert haben. Der Betrachtungszeitraum für die Buchen in Rågetaåsen beginnt 1908, für die Fichten des Standorts ist die Unterteilung nicht möglich. Es ist zu erkennen, dass beide Baumarten auf allen Standorten in der zweiten Periode deutlich an Zuwachs abgenommen haben.

4 Ergebnisse

Die Fichten in Siggaboda mit nur 1,4 % am geringsten und die Buchen in Rågetaåsen mit 35,8 % am stärksten. Andererseits haben die Buchen in Siggaboda seit 1950 deutlich in ihren Zuwächsen zugelegt, sie stiegen um 23,6 %.

Tabelle 4.30: Zuwachs in Prozent vom langjährigen Mittel (1894-2005)

		1894-1949	1950-2005
Rehberg	Bu	105,1	94,9
	Fi	103,3	96,7
Rågetaåsen	Bu	120,6	84,8
	Fi	-	-
Siggaboda	Bu	88,1	111,7
	Fi	100,7	99,3
Tolseboda	Bu	106,2	93,9
	Fi	109,0	91,1

Bei der Interpretation dieser Ergebnisse darf nicht vergessen werden, dass die rohen Zuwachsverläufe als Grundlage dienen und daher der natürliche Alterstrend noch enthalten ist. Umso interessanter ist der markante Anstieg des Zuwachses der Buchen in Siggaboda. In Tabelle 4.31 sind nun die mittleren Zuwächse im Verhältnis Fichte zu Buche dargestellt.

Tabelle 4.31: Verhältnis mittlerer Zuwachs Fichte zu mittlerer Zuwachs Buche in Prozent

	gesamt	1894-1949	1950-2005
Rehberg	115,6	110,6	114,8
Rågetaåsen	162,3		
Siggaboda	252,8	282,4	219,6
Tolseboda	183,0	206,4	195,1

Über den gesamten Zeitraum (1894-2005) sind zunächst die deutlich höheren Zuwächse der Fichten zu erkennen. Am geringsten sind sie am Rehberg, am höchsten in Siggaboda. Betrachtet man nun die dynamische Entwicklung über die zwei Perioden, erkennt man, dass der Zuwachsvorteil der Fichten am Rehberg seit 1950 um 4,2 % zugenommen hat. Auf den beiden schwedischen Standorten, Rågetaåsen ließ sich hier nicht auswerten, ist der Vorsprung der Fichte jedoch deutlich gesunken. In Tolseboda um 11,3 % und in Siggaboda sogar um 62,8 % im Vergleich zur 1. Periode. In Siggaboda verbirgt sich dahinter der schwach gesunkene Zuwachs der Fichten und der gleichzeitig stark gestiegene der Buchen.

4.4.2 Konkurrenzanalysen auf der Ebene des Einzelplots

Nach der Untersuchung des Zuwachsverhaltens von Buche und Fichte auf der Bestands-ebene soll in diesem Kapitel die Konkurrenzsituation in den direkten Wuchskonstellationen, intra- und interspezifisch, betrachtet werden. Die Vorgehensweise ist ähnlich der Bestandsanalyse, doch überwiegt hier die Einzeljahranalyse gegenüber der des 11-jährigen Trends. Für die grafische Darstellung wird dennoch der Zuwachstrend gewählt, da dieser einen wesentlichen Überblick über das Zuwachsverhalten und dessen Dynamik im Verlauf der Zeit wiedergibt. Zur intraspezifischen Konkurrenz wird jeweils ein Plot eines Standorts als repräsentatives Beispiel dargestellt. Zur interspezifischen Konkurrenz wird je Standort ein Plot dargestellt, in Einzelfällen auch ein zweiter, wenn sich die interspezifische Konkurrenzsituation als sehr variabel gezeigt hat. Die übrigen Plots sind im Anhang zu finden. Die Ergebnisse werden getrennt nach den vier Konstellationen aufgeführt, um anschließend standortsübergreifende Parallelen und Unterschiede aufzudecken. In Einzelfällen werden zusätzlich zur Trenddarstellung die rohen Zuwachsreihen abgebildet, wenn interessante Einzeljahranalysen verborgen blieben. Die vollständigen Angaben zu den einzelnen Plot-Mitgliedern finden sich im Anhang.

Bei den folgenden Darstellungen der Ergebnisse ist jeweils hinter dem Zentralbaum und den beiden Gruppen von Konkurrenten in Klammern ihre durchschnittliche soziale Stellung in Form von Kraft'schen Klassen angegeben. In den Diagrammen ist der Zentralbaum mit roter durchgezogener Linie dargestellt, die sozial schwächere Gruppe der Konkurrenten mit grünen Strichen und die sozial stärkere Gruppe mit schwarzen Strichen.

Fichte in Konkurrenz zu Fichte

Die Konstellation Fichte als Zentralbaum mit Fichten als Konkurrenten konnte auf allen Standorten gefunden werden. Die Zentralbäume wiesen in der Regel vor- bis mitherrschende soziale Stellungen auf. Der Wuchstrend aller Fichten eines Plots zeigte in den meisten Fällen gleiche Tendenzen, obgleich auf verschiedenem Leistungsniveau je nach sozialer Stellung. Auffällig war die erhöhte Sensitivität der vorherrschenden Fichten, seien es die Zentralbäume oder die stärkere Gruppe der Konkurrenten. Sie reagieren stärker auf extreme Witterungsereignisse als benachbarte, sozial schwächere Fichten, positiv wie negativ. Die negativen Ereignisse treten jedoch nur in einzelnen Jahren auf, wogegen positive Witterungsbedingungen für extreme Wachstumsschübe genutzt werden können.

Beispiel Rehberg In Plot 25 (Abb. 4.59) liegt die schwächere Gruppe der Konkurrenten (2) seit 1910 sichtlich unter dem Wuchsniveau der stärkeren Fichten (1). Die zentrale Fichte (1) wächst trotz ihrer gleichen sozialen Stellung auf einem schwächeren Niveau als ihre starken Konkurrenten. Sie zeigen alle den gleichen Trend, doch die starke Gruppe erreicht ihr erstes Zuwachsmaximum früher als die zentrale Fichte, das zweite ist stärker und das dritte hält weiterhin an. Im Gegensatz dazu fällt die schwächere Gruppe wie auch die zentrale Fichte in den 1970er Jahren eher im Wachstum ab als die starke Gruppe. Die zentrale Fichte nimmt eine Mittelstellung zwischen den beiden Gruppen der Konkurrenten ein.

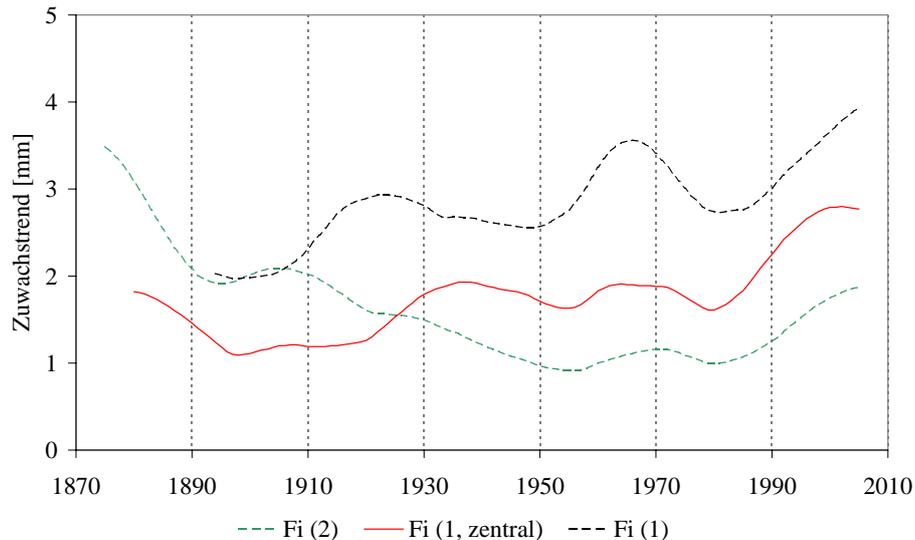


Abbildung 4.59: 11-jähriger Trend der zentralen Fichte und ihrer Konkurrenten (Fi), Plot 25, Rehberg; nach der Baumart ist in Klammern deren soziale Klasse angegeben

Buche in Konkurrenz zu Buche

Die Konstellation Buche als Zentralbaum umstanden von Buchen konnte auf allen Standorten gefunden werden. Die Zentralbäume waren in der Regel mitherrschend, in einem Fall auch vorherrschend. Doch ungeachtet der sozialen Stellung zeigten die Buchen in jedem Plot den gleichen Wachstumstrend. Selbst nach einschneidenden Ereignissen wie einem negativen Weiserjahr reagieren die Buchen gleichsinnig mit einem Absinken des Wachstumsniveaus. Lediglich die Stärke der Reaktion ist abhängig von ihrer sozialen Stellung. Hervorzuheben ist auch die Tatsache, dass in der Hälfte der untersuchten Plots keine Unterteilung der Konkurrenten in zwei unterschiedlich starke Gruppen möglich war. Dies unterstreicht das Wachstum der Buchen eines Plots als Kollektiv.

Beispiel Tolseboda Abbildung 4.60 zeigt das Zusammenspiel der Buchen in Plot 24. Auch hier war keine Unterteilung der Konkurrenten möglich. Die Konkurrenten (2) wie auch der Zentralbaum (2) sind sich äußerst ähnlich von der sozialen Stellung wie auch vom Wachstumstrend und -niveau. Es gibt keine hervorstechenden Konkurrenzerscheinungen.

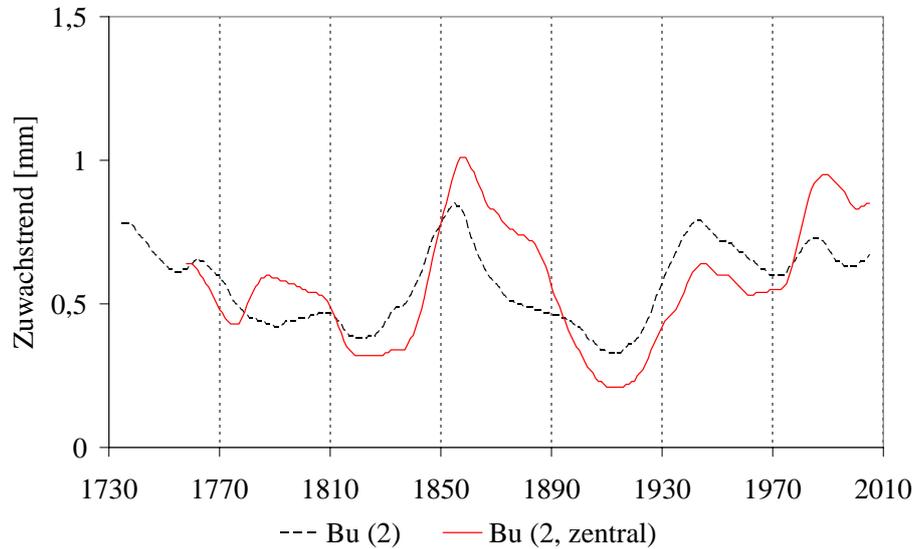


Abbildung 4.60: 11-jähriger Trend der zentralen Buche und ihrer Konkurrenten (Bu), Plot 24, Tolseboda

Buche in Konkurrenz zu Fichte

Die Konstellation Buche als Zentralbaum umringt von Fichten konnte auf allen Standorten nur selten gefunden werden. Die zentralen Buchen sind in einer solchen Konstellation den Fichten in der Regel unterlegen. Die Untersuchungen des radialen Zuwachses zeigten, dass die Buchen zwar den Fichten ähnliche Wachstumstrends aufwiesen, aber ihr Zuwachsniveau blieb in den meisten Fällen unter dem der Fichten. Selbst in den wenigen Fällen, in denen die Buche eine mitherrschende Position einnahm, blieben sie niedriger. Ebenso wie die Buche deutlich sensitiver wächst als die Fichte. Sie reagiert bedeutend heftiger auf positive wie negative exogene Einflüsse. Im Zusammenspiel zwischen Buche und Fichte wird weiterhin bedeutsam, dass sie versetzte und entgegengesetzte Weiser- bzw. Extremjahre haben. Selbst unterlegene Buchen können in einzelnen Jahren, in denen die Fichten unter den äußeren Bedingungen leiden, höhere Zuwächse bringen. Aufgrund ihres sensitiveren Wachstums ist die Buche jedoch in der Lage, kurzfristig positive Umweltbedingungen gewinnbringender umzusetzen als die Fichte.

Weitere standortsübergreifende gleichsinnige Reaktionen der Buchen und Fichten waren in dieser Konkurrenz-Konstellation nicht zu finden. Es lassen sich zwischen den schwedischen Standorten keine Gemeinsamkeiten hinsichtlich des langfristigen Wachstumstrends finden. In Rågetaåsen zeigen beide Baumarten gleichsam seit den 1980er Jahren einen abfallenden Trend, während in Siggaboda die Buche in ihrem Zuwachs ansteigt und die Fichte gleichzeitig sinkt und in Tolseboda beide Baumarten grundsätzlich eine Tendenz zur Ko-Existenz selbst in direkter Konkurrenz zeigen. Neben den oben genannten Gemeinsamkeiten zeigen die Buchen am Vergleichsstandort Rehberg in einer solchen Konkurrenzsituation Tendenzen zu starkem Wuchspotential. Dies äußert sich in Phasen der drastischen Zuwachssteigerung bei günstigen Bedingungen selbst bei unterdrückten Buchen und nach langen depressiven Phasen. Weiterhin zeigt sich dies in einem stetigen Anstieg der Zuwächse und einem langsamen Überholen der Fichten aus einer mitherrschenden Position heraus.

Beispiel Rågetaåsen Die zentrale Buche (1) in Plot 1 ist wesentlich älter als die sie umgebenden Fichten (Abb. 4.61). Dennoch zeigen beide Arten den gleichen Wachstumstrend. Trotz ihrer vorherrschenden Stellung befindet sie sich stets auf einem Zuwachsniveau zwischen den sozial stärkeren (2) und den schwächeren (3-4) Fichten. Seit den 1990er Jahren nähert sie sich dazu deutlich den sozial schwächeren Fichten an.

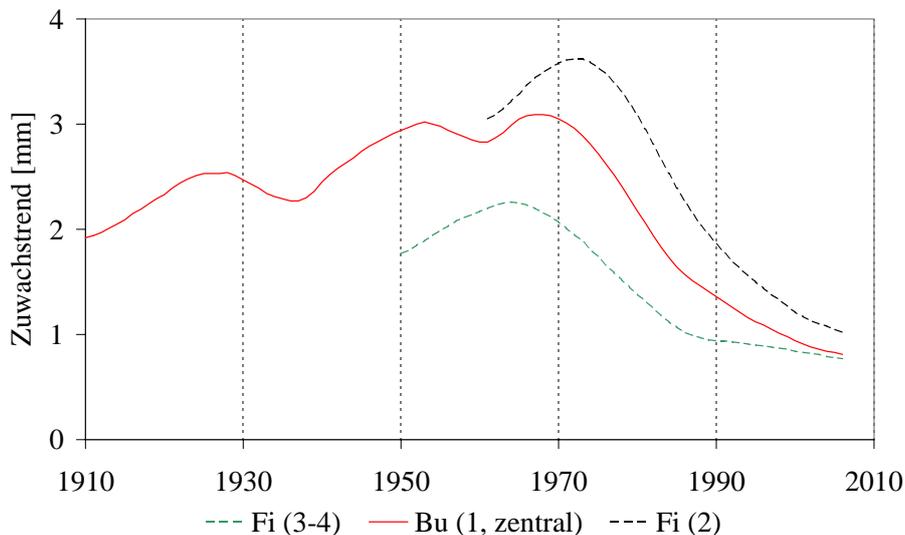


Abbildung 4.61: 11-jähriger Trend der zentralen Buche und ihrer Konkurrenten (Fi), Plot 1, Rågetaåsen

Zusammenfassend sind die Buchen in direkter Konkurrenzsituation den Fichten am Standort Rågetaåsen unterlegen. Das Wachstumsniveau liegt dauerhaft unter dem der

Fichten, zumindest unter dem der sozial stärkeren. Lediglich bei starken negativen Weiserjahren der Fichten kann die Buche kurzzeitig stärkeres Wachstum bringen. Entgegengesetzte Weiserjahre sind zu finden. Die Buche hat einen den Fichten sehr ähnlichen Wachstumstrend, reagiert jedoch sensitiver, positiv wie negativ. Grundsätzlich zeigen jedoch beide Baumarten in Rågetaåsen in der Konstellation Buche unter Fichte seit etwa den 1980er Jahren ein abfallendes Wuchsniveau.

Beispiel Siggaboda In Plot 10 (Abb. 4.62) ist zunächst einmal die intraspezifische Konkurrenz bei den Fichten interessant. Die schwächere Gruppe (2-3) ist älter und zu Beginn sehr wuchskräftig, verliert aber stark an Zuwachs. Mit dem Aufkommen der jüngeren und in diesem Fall auch stärkeren Fichten (2), sinkt das Niveau weiter ab, pegelt sich zunächst ein, fällt jedoch seit den 1980er Jahren erneut, ebenso wie die stärkeren Fichten. Die zentrale Buche (3) hat stets einen sehr niedrigen Zuwachs, zeigt jedoch einen ähnlichen Wachstumstrend wie die Fichten. Von Beginn an sinkt ihr Wuchsniveau während das der stärkeren Fichten steigt. Der Kulminationspunkt der Buche kommt später als der der Fichten. Seit dem zweiten Zuwachshöhepunkt der stärkeren Fichten sinkt ihr Niveau jedoch seit 1991, wogegen die Buche ansteigt. Seit 1989 hat sie auch das Niveau der schwächeren Fichten überschritten. Die Buche war bis Ende der 1970er Jahre im Wuchsniveau unterlegen, nähert sich jedoch seither dem der Fichten an, während der Zuwachs dieser sinkt.

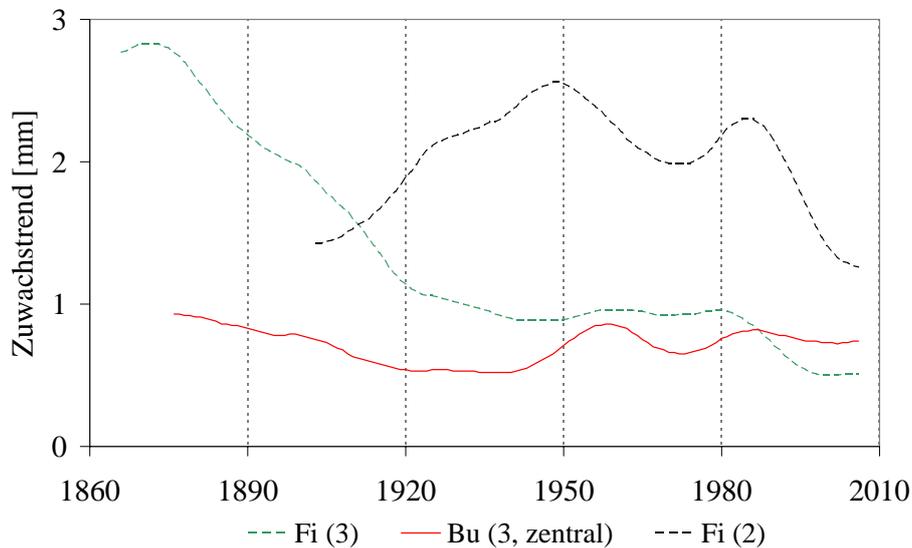


Abbildung 4.62: 11-jähriger Trend der zentralen Buche und ihrer Konkurrenten (Fi), Plot 10, Siggaboda

Zusammenfassend ist die Buche in Siggaboda als Zentralbaum umringt von Fichten deutlich unterlegen. In dieser Konstellation konnten keine Buchen mit vorherrschender sozialer Stellung gefunden werden, lediglich in einem Plot (Plot 9) war die Buche mit-herrschend. Doch auch trotz der gleichen sozialen Klasse ist die Buche stets auf deutlich niedrigerem Wuchslevel. Der Wachstumstrend ist den Fichten jedoch sehr ähnlich, bis auf die letzten 20 Jahre. Hier kommt es zu einer Annäherung im Wuchsniveau beider Baumarten. Die Fichten sinken, wogegen die Buchen steigen und die Gruppe der schwächeren Fichten sogar überholen.

Beispiel Tulseboda In Plot 18 können die Fichten aufgrund der gleichen sozialen Stellung (2) nicht unterteilt werden (Abb. 4.63). Die zentrale Buche (2) ist wesentlich älter als die sie umgebenden Fichten, doch zeigt sie seit dem Einwachsen der Fichten den gleichen Trend. Einem gemeinsamen Hoch um 1900 folgt ein Absinken mit erneutem Ansteigen versetzt für beide Baumarten. Diese Abweichungen sind zurückzuführen auf entgegengesetzte und versetzte Weiserjahre bei beiden Baumarten. Um dies sichtbar zu machen, werden in Abbildung 4.64 die Zuwachskurven des Plots mit Beginn 1870 dargestellt.

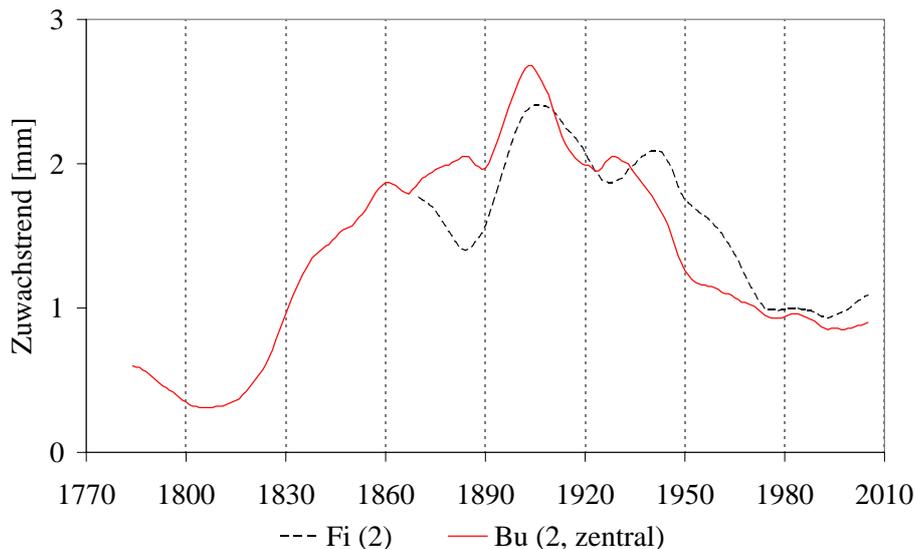


Abbildung 4.63: 11-jähriger Trend der zentralen Buche und ihrer Konkurrenten (Fi), Plot 18, Tulseboda

Einige gemeinsame Extrem- und Weiserjahre finden sich: 1919, 1921, 1933, 1940, 1968, 1976, 1983, 1987, 1998. Zahlreiche entgegengesetzte Extrem- und Weiserjahre sind zu finden: 1872, 1879, 1899, 1909, 1916, 1924, 1931, 1956/57, 1973, 1974 und 2002. Auch

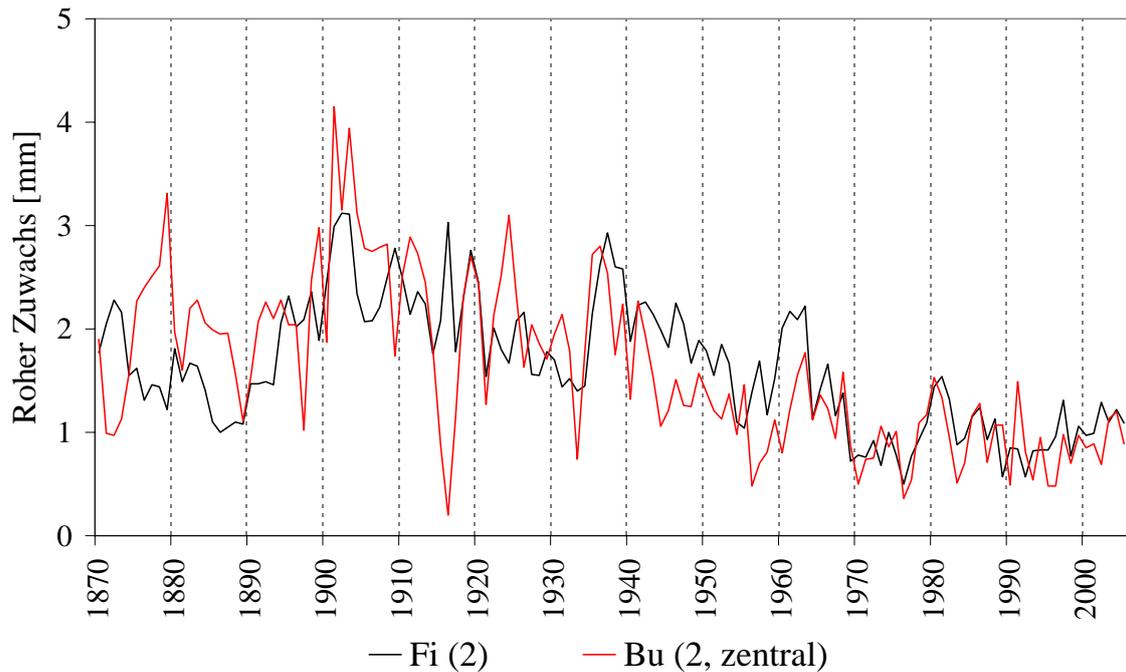


Abbildung 4.64: Zuwachskurven der zentralen Buche und ihrer Konkurrenten (Fi), Plot 18, Tulseboda

versetzte Weiserjahre gibt es zwischen der Buche und den Fichten, besonders Ende des letzten Jahrhunderts: 1899/1900, 1954/1955, 1989/1990, 1992/1993. Insgesamt zeigt die Buche ein sensitiveres Wachstum als die Fichten. Ihre Reaktionen auf positive wie auch negative Einflüsse sind besonders stark.

Zusammenfassend ist die Buche von Tulseboda in einer Konkurrenz-Situation mit Fichten in einer mitherrschenden Position. Sie ist bedeutend älter, aber zeigt den gleichen Wachstumstrend wie die Fichten. Dennoch liegt ihr Zuwachs auf einem niedrigeren Niveau als der der Fichten. In einem Plot (Plot 17) weicht der Wachstumstrend jedoch in den letzten 10 Jahren deutlich voneinander ab. Während der Zuwachs der zentralen Buche sinkt, steigt der der Fichten leicht an. Da sich diese Bild in keinem der anderen Plots wiederholt, kann dieser Trend nicht verallgemeinernd auf den gesamten Standort übertragen werden.

Beispiel Rehberg Zunächst ist in Plot 26 die intraspezifische Konkurrenz bei den Fichten interessant (Abb. 4.65). Nach einem anfänglich stärkeren Zuwachs sinken die schwächeren Fichten (2) seit 1910 unter das Zuwachsniveau der stärkeren Fichten (1). Die zentrale Buche (3) liegt aufgrund ihrer sozialen Stellung stets unter dem Niveau der stärkeren Fichten. Mit der Gruppe der schwächeren Fichten gab es zwischenzeitlich seit

4 Ergebnisse

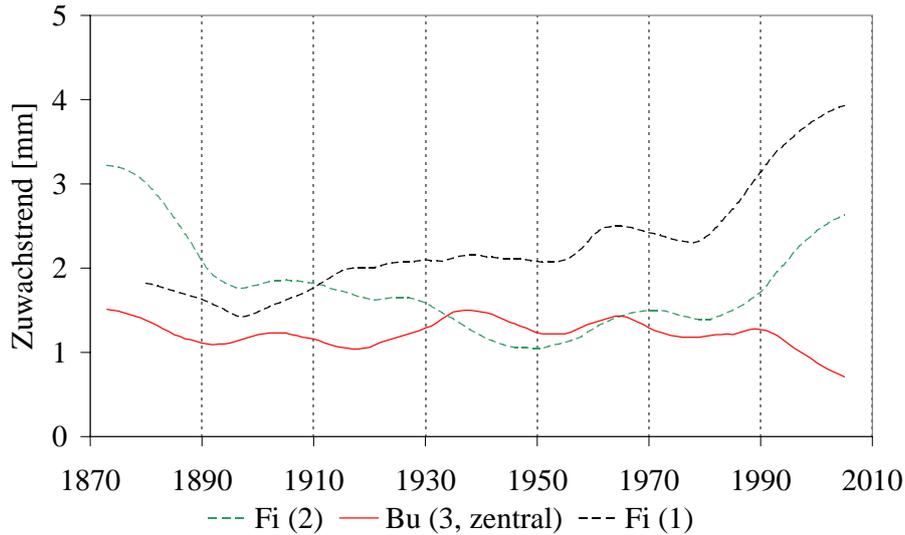


Abbildung 4.65: 11-jähriger Trend der zentralen Buche und ihrer Konkurrenten (Fi), Plot 26, Rehberg

1936 ein Wechselspiel, doch seit 1976 liegt die Buche erneut unter ihrem Niveau. Das für beide Baumarten negative Weiserjahr 1976 brachte eine Wende in die Konkurrenz-Situation. Während die Fichten, besonders die starken, sich danach rasch und deutlich erholten, war dieses Jahr für die zentrale Buche ausschlaggebend für ein bisher ungebrochenes Absinken im Zuwachs. Wenige Jahre verblieb ihr Zuwachs auf einem Level, doch seit 1987 entsteht ein deutlicher Unterschied zwischen dem Zuwachs der Buche und der sie umringenden Fichten. Weiterhin können auch in diesem Plot, wie schon am Standort Tulseboda, entgegengesetzte Weiserjahre gefunden werden. In für die Fichte negativen Jahren erreicht die Buche stärkere Zuwächse. Dies ist der Fall in 1942 und 1984.

Die Fichten von Plot 32 (2 bzw. 3) zeigen seit 1911 große Unterschiede in ihren Zuwachsniveaus, gleichen sich dann jedoch in ihren Trends und seit den letzten 10 Jahren auch in ihrem Zuwachsniveau an (Abb. 4.66). Die zentrale Buche (2) verfolgt ihren individuellen Wachstumstrend und befindet sich gemäß ihrer sozialen Stellung auf einem mittleren Zuwachsniveau zwischen beiden Fichtengruppen. Eine detaillierte Betrachtung ermöglicht Abbildung 4.67. Nach einem Einbruch der Zuwächse in den Weiserjahren 1913-1915 befindet sich ihr Zuwachs in einem stetig ansteigenden Trend. Ihr Wachstum ist jedoch äußerst sensitiv, sie reagiert sehr heftig auf negative Einflüsse. Seit 1997 liegt ihr Zuwachsniveau sogar über dem der starken Fichten, doch die starken Zuwachseinbrüche in 2000, 2004 und 2005 beeinflussen den Trend maßgeblich.

4 Ergebnisse

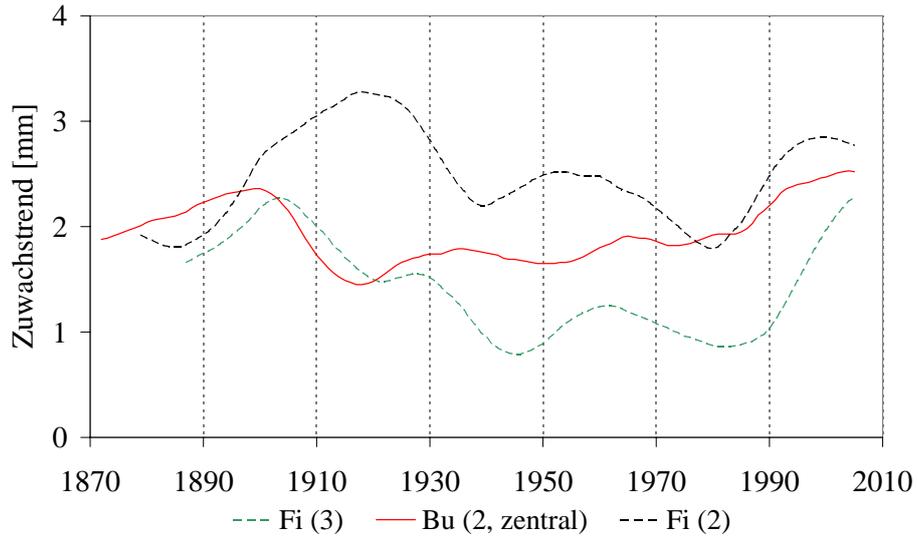


Abbildung 4.66: 11-jähriger Trend der zentralen Buche und ihrer Konkurrenten (Fi), Plot 32, Rehberg

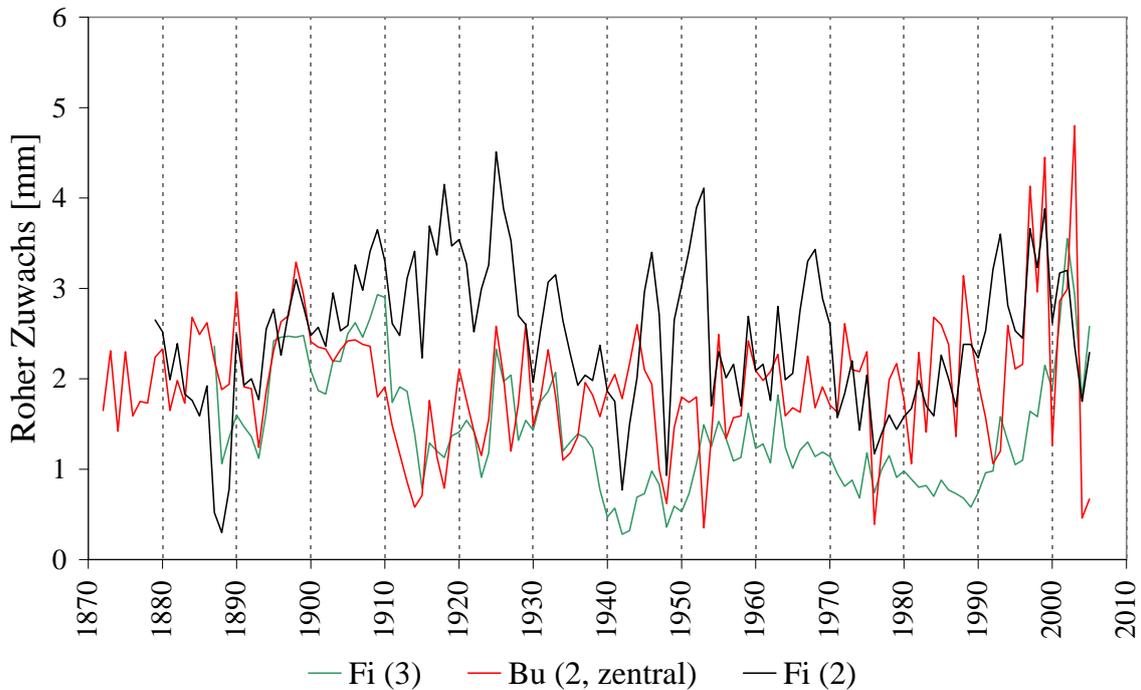


Abbildung 4.67: Zuwachskurven der zentralen Buche und ihrer Konkurrenten (Fi), Plot 32, Rehberg

Zusammenfassend ist die Konstellation von Buche als Zentralbaum und Fichte als umstehende Konkurrenten am Standort Rehberg selten zu finden. Die untersuchten Plots sind aufgrund der drei unterschiedlichen sozialen Klassen der Zentralbäume schwer mitein-

ander zu vergleichen. Doch auch hier lässt sich ein Trend erkennen. Ist eine von Fichten umringte Buche von hoher sozialer Stellung (Kraft'sche Klasse 2, Plot 32), kann sie ihren Zuwachs unabhängig von den Fichten steigern und am Ende sogar den der Fichten übertreffen. Ist eine zentrale Buche in der sozialen Klasse 3 (Plot 26), kann sie zwar auf einem niedrigeren Zuwachsniveau mit den Fichten mithalten, zeigt auch ähnliche Wachstumsgänge, erleidet jedoch durch stark negative exogene Einflüsse Schäden, die sie in ihrem Zuwachs weit zurückwerfen. Sie kann sich in solchen Fällen schwer wieder erholen und die Fichten übertreffen sie im Zuwachs. Im dritten Beispiel (Plot 31) ist die zentrale Buche in der sozialen Stufe 4 bereits von den Fichten unterdrückt und kämpft mit individuellen Einflüssen. Doch auch in dieser Lage ist sie fähig, ihren Zuwachs bei günstigen Bedingungen deutlich zu steigern.

Insgesamt ist das Wachstum der zentralen Buchen deutlich sensitiver als das der Fichten. Sie reagieren sehr heftig auf negative wie auch positive Einflüsse. Im Falle der negativen Einflüsse kann der Zuwachs der Buche, in Abhängigkeit von ihrer sozialen Stellung, sich rasch erholen oder aber Jahre bis Jahrzehnte auf niedrigstem Niveau verbleiben. In Plot 31 ist eine solche Phase deutlich zu erkennen, in Plot 26 ist dagegen erst der Beginn einer solchen Phase aufgezeichnet.

Fichte in Konkurrenz zu Buche

Die Konstellation Fichte als Zentralbaum umringt von Buchen als Konkurrenten konnte auf allen Standorten häufiger gefunden werden als die umgekehrte Situation. Dementsprechend gehörten die Fichten höheren sozialen Klassen an als zuvor die zentralen Buchen. Die Fichten waren als Zentralbaum in der Regel in einer mit- bzw. vorherrschenden Position. Ihre Zuwächse waren auf einem sichtlich höheren Niveau als die der Buchen, selbst wenn die Fichte in einer mitherrschenden oder seltener leicht unterdrückten Position war. Weiterhin kommt hinzu, dass die Fichten oft wesentlich jünger waren als die Buchen.

Auch in dieser Konkurrenz-Konstellation lassen sich keine weiteren gleichgerichteten Reaktionen der Baumarten zwischen den Standorten finden. In Rågetaåsen dominiert die zentrale Fichte die benachbarten Buchen sichtlich, so dass die Schwächeren unter den Konkurrenten sogar zu komplazentem Wachstum neigen. Seit den 1990er Jahren ist eine deutlich ansteigende Tendenz des Fichtenzuwachses zu erkennen, während die Buchen gleichzeitig absinken. In Siggaboda herrscht dagegen in einer solchen Konstellation

ein scheinbares Gleichgewicht. Die Fichten liegen zwar in ihrem Zuwachs ohne Weiteres über den Buchen, doch sind diese unbeeinflusst davon und verfolgen ihren eigenen Wachstumstrend. An diesem Standort gibt es erstaunliche Beispiele für die erstaunliche Zuwachssteigerungsfähigkeit der Buche nach langem, nahezu depressivem Wachstum. Am Standort Tolseboda ist die Konkurrenzsituation sehr zwiegespalten und abhängig von der sozialen Stellung der zentralen Fichte. Auf dem Vergleichsstandort Rehberg zeigt sich wieder ein anderes Bild. Nach einem besonders starken Jugendwachstum sinkt das Zuwachsniveau der zentralen Fichte auf das der Buchen und es mündet in eine Phase des Zuwachsgleichgewichts. Doch seit den letzten 10-20 Jahren steigert die Fichte ihren Zuwachs erneut und übertrifft die Buchen, die einen gleichbleibenden Trend aufweisen.

Beispiel Rågetaåsen Die zentrale Fichte (1) in Plot 4 ist deutlich jünger und auch kräftiger als die sie umstehenden Buchen (Abb. 4.68). Die Gruppe der schwächeren Buchen (3) zeigt nach einem leichten Rückgang des Zuwachses aufgrund der intraspezifischen Konkurrenz durch die stärkeren Buchen (2) den gleichen Wachstumstrend wie diese. Der Zuwachs der stärkeren Buchen steigt in den ersten 30 Jahren stark an, doch 1939/1940 kommt es zum Überwachsen der Buchen durch die zentrale Fichte und der Zuwachs beider Buchengruppen sinkt deutlich. Der Zeitpunkt des Beginns dieser deutlichen Konkurrenz zwischen beiden Baumarten ist in Abbildung 4.69 anhand der rohen Zuwachswerte leicht nachvollziehbar.

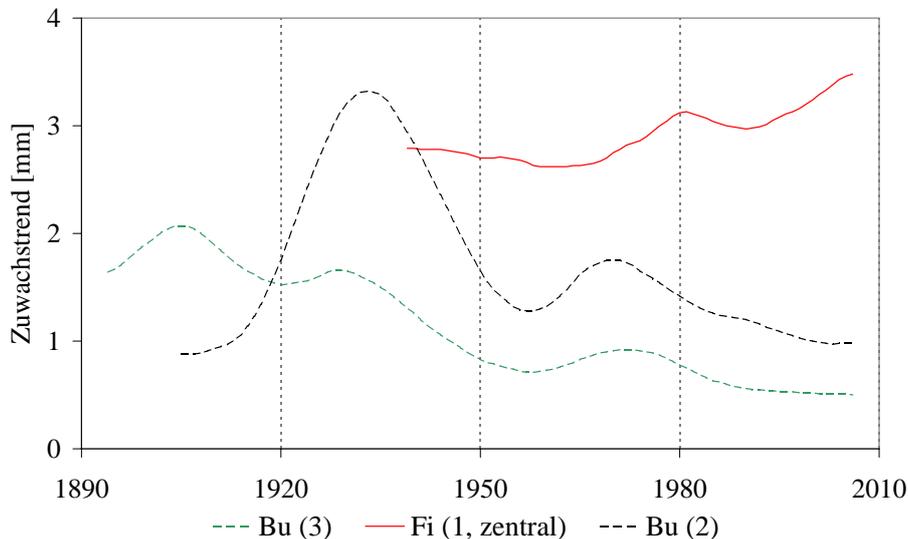


Abbildung 4.68: 11-jähriger Trend der zentralen Fichte und ihrer Konkurrenten (Bu), Plot 4, Rågetaåsen

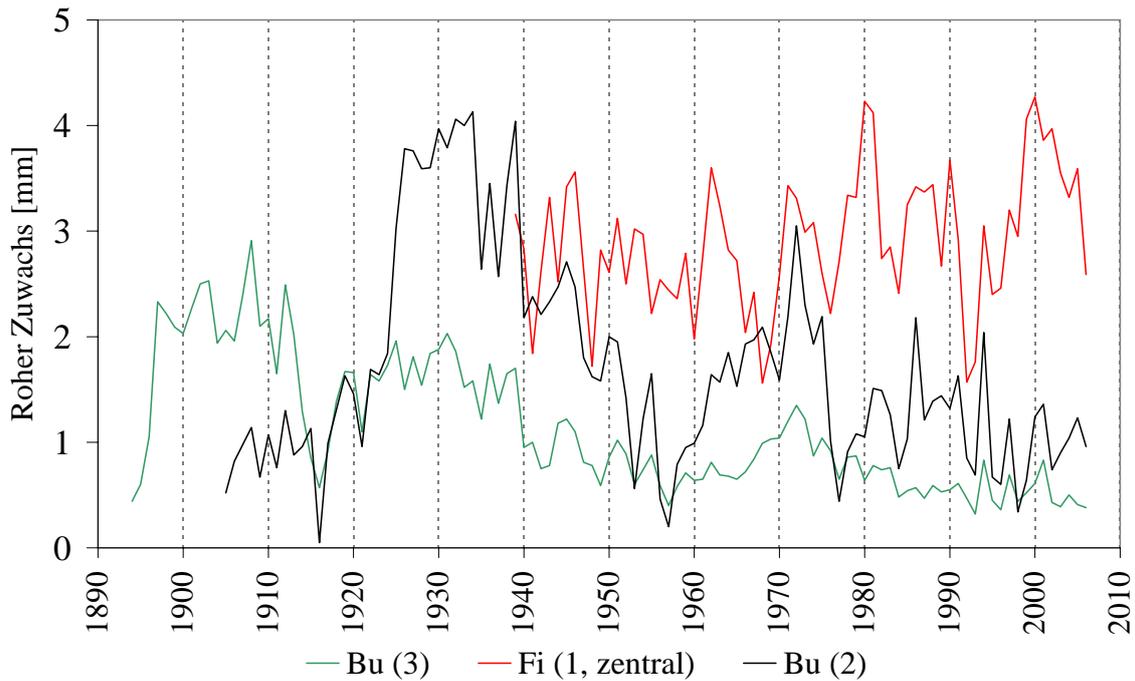


Abbildung 4.69: Zuwachskurven der zentralen Fichte und ihrer Konkurrenten (Bu), Plot 4, Rågetaåsen

Seit der Konkurrenz durch die Fichte fällt der Zuwachs der starken Buchen erkennbar ab und sinkt nach einem kurzzeitigen Hoch bis heute weiter ab. Noch deutlicher äußert sich der starke Konkurrenzdruck bei der Gruppe der schwächeren Buchen. Seit 1940 wird ihr Wachstum immer schwächer, nahezu komplazent. Das Wachstum der Fichte ist in seiner Sensitivität der der stärkeren Buche recht ähnlich. Der Wachstumstrend der Fichte weicht sichtlich von dem der Buchen ab. Während die Fichte einen stetig steigenden Trend äußert, sinken die Buchen gleichzeitig ab.

Die zentrale Fichte (2) in Plot 6 ist in diesem Falle in einer mitherrschenden Position mit den Buchen (Abb. 4.70). Die Unterschiede zwischen den beiden Gruppen der Buchen sind hier nicht gravierend. Die schwächeren Buchen (2-3) zeigen einen ähnlichen Trend wie die stärkeren (2), liegen zunächst in ihrem Wachstumsniveau unter den stärkeren, überholen sie aber sogar in den letzten 10 Jahren. Insgesamt äußern jedoch alle Buchen einen abfallenden Trend. Die Fichte hingegen folgt ihrem eigenen Trend. Ihr Zuwachs liegt lange Zeit zwischen dem der Buchen, doch seit 1995 steigt er bedeutend an und eine Schere klafft auf zwischen den Baumarten.

4 Ergebnisse

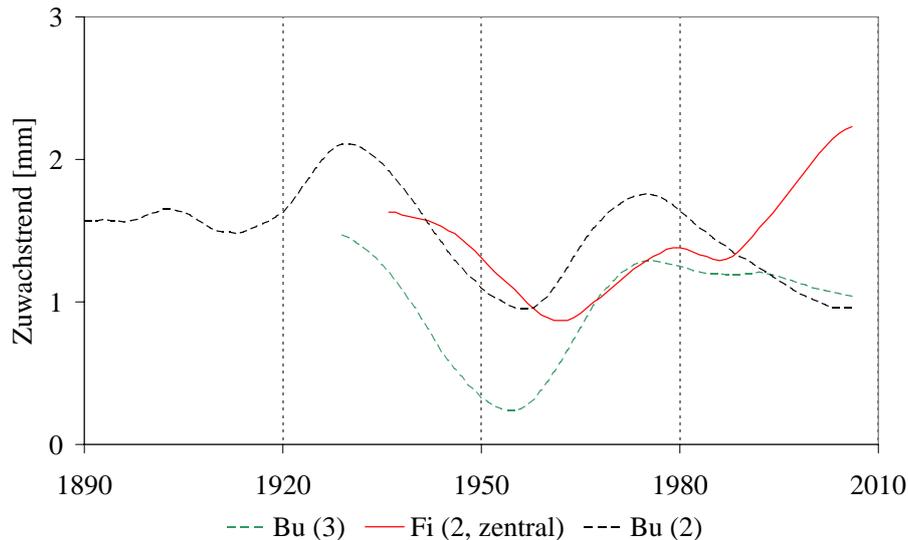


Abbildung 4.70: 11-jähriger Trend der zentralen Fichte und ihrer Konkurrenten (Bu), Plot 6, Rågetaåsen

Zusammenfassend ist die Konstellation Fichte als Zentralbaum umringt von Buchen in Rågetaåsen häufiger zu finden als die umgekehrte Situation. Die soziale Stellung der Fichten ist primär eine vorherrschende. Sie ist der Buche in ihrem Zuwachs deutlich überlegen und der Trend ist grundsätzlich positiv. In einem Plot (Plot 5) sinkt der Zuwachs der Fichte nach einem extrem starken Jugendwachstum ab, scheint sich jedoch wieder im Aufwärtstrend zu befinden. Die Buchen hingegen passen sich dem Wachstum der Fichte regelrecht an. Ihr Trend ist nahezu gegenläufig. Steigt die Fichte in ihrem Zuwachs, so sinken die Buchenzuwächse und umgekehrt. Ein besonders drastisches Beispiel lieferte Plot 4. Seit dem Aufkommen der Fichte wurde der Zuwachs der zunächst kräftigsten Buchen radikal gebremst. Das Wachstum der schwächeren Buchen nahm sogar komplazente Züge an, wie auch geschehen in Plot 5. Spätestens seit den 1990er Jahren findet eine dramatische Wendung in den Zuwachstrends statt. Während die Fichten sichtlich zunehmen, fallen die Buchen stark zurück. Selbst in Plot 6, wo die Buchen in gleicher sozialer Stellung mit der Fichte wachsen.

Beispiel Siggaboda In Plot 13 (Abb. 4.71) war es nicht möglich, die Buchen nach ihrer sozialen Stellung in zwei Gruppen zu unterteilen, daher wurden sie zusammengefasst (3). Nach einer wuchskräftigen Jugend ist der Zuwachs der Buchen seit über 200 Jahren auf einem konstant niedrigen Niveau. Die zentrale Fichte (1) ist auch hier wesentlich jünger, jedoch in einer vorherrschenden Stellung. Ihr Wachstumsniveau liegt weit über dem der Buchen, trotzdem zeigt sie den gleichen Trend. Die Zuwachsschwankungen der Buchen

4 Ergebnisse

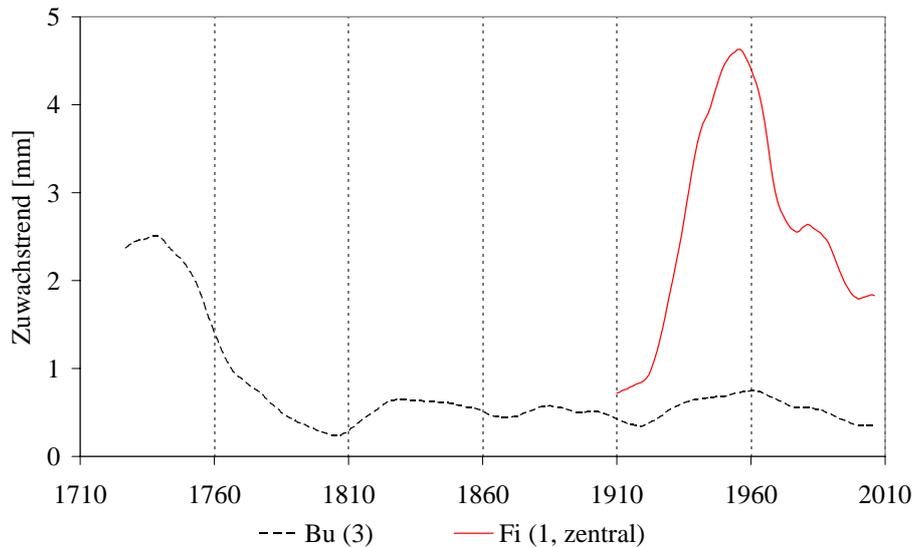


Abbildung 4.71: 11-jähriger Trend der zentralen Fichte und ihrer Konkurrenten (Bu), Plot 13, Siggaboda

sind lediglich bedeutend schwächer ausgeprägt. Ihr Zuwachs liegt jedoch schon lange vor der Konkurrenz durch diese Fichte auf einem extrem niedrigen Level. Die Fähigkeit der Buchen, bei günstigeren Bedingungen bedeutsame Steigerungen im Zuwachs leisten zu können, selbst nach langen, extrem schwachen Phasen, beweist Plot 12. Daher könnten auch die Buchen in Pot 13 noch eine Zuwachssteigerung erfahren.

Zusammenfassend wachsen die Buchen in Siggaboda in der Konstellation als Konkurrenten um eine zentrale Fichte in der Regel unbeeinflusst vom wesentlich stärkeren Zuwachs und der höheren sozialen Stellung der Fichten. Anders herum wachsen die zentralen Fichten hier ohne Einfluss durch die sie umstehenden Buchen auf einem deutlich höheren Zuwachsniveau. Die Buchen beweisen ihre Fähigkeit, lange Zeit unter widrigen Umständen auf niedrigem Level wachsen zu können, um sich anschließend bei günstigeren Bedingungen stetig zu erholen oder sogar innerhalb von nur 3 Jahren bedeutende Zuwachsleistungen zu bringen (Plot 12).

Beispiel Tolseboda Die beiden Kollektive der Buchen in Plot 20 weichen erst seit den 1840er Jahren in ihrem Zuwachsniveau bei jedoch gleichem Trend voneinander ab (Abb. 4.72). Der Abstand der schwächeren Gruppe (3) wird zunehmend größer, bis sie seit den 1990er Jahren kräftig zulegt und sich den stärkeren Buchen (2) wieder annähert. Die zentrale Fichte (4) beginnt zunächst mit einem kräftigen Jugendwachstum, das auf einem höheren Niveau liegt aber den gleichen Trend der Buchen zeigt. Seit etwa 1960

4 Ergebnisse

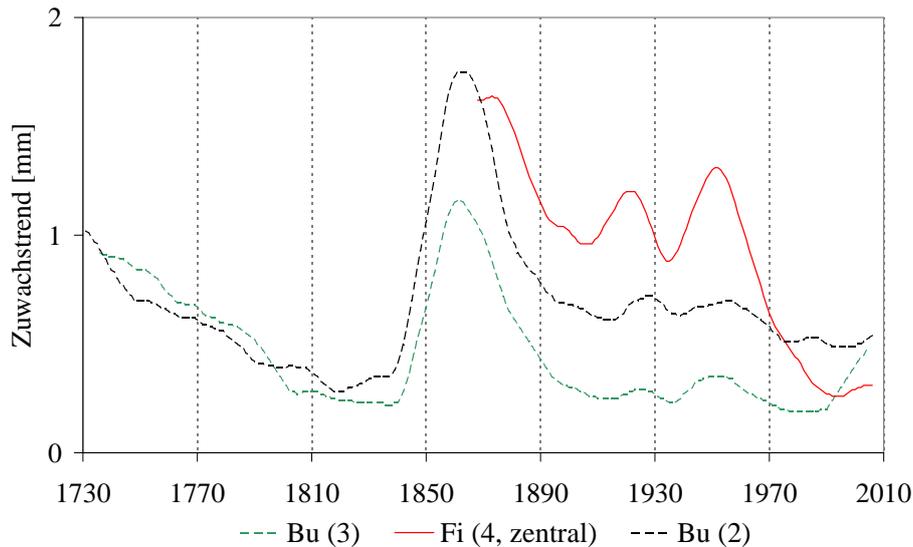


Abbildung 4.72: 11-jähriger Trend der zentralen Fichte und ihrer Konkurrenten (Bu), Plot 20, Tulseboda

sinken die Zuwächse und seit dem negativen Weiserjahr 1969 auch unter das Niveau der starken Buchen. Es befindet sich seit 2000 dauerhaft unter allen sie umstehenden Buchen. Hierin liegt die Einschätzung der unterdrückten Stellung begründet. So wird auch die Kurzfristigkeit der sozialen Stellung eines Baumes sichtbar. Bis 1960 muss die Fichte von größerer Vitalität gewesen sein, die dann rapide abgesunken ist. Dies kann auch die Ursache für den gleichzeitig ansteigenden Zuwachs der schwächeren Buchengruppe erklären.

Die Buchen in Plot 21 (Abb. 4.73) zeigen grundsätzlich den gleichen Trend, doch liegen die schwächeren Buchen (2-3) zwischen 1808 und 1933 deutlich unter den stärkeren (2). Seit 1934 nähern sich beide Gruppen einander an, indem die stärkere stetig an Zuwachs abnimmt. Die zentrale Fichte (3) zeigt in den ersten 20 Jahren den gleichen abfallenden Trend wie die Buchen, ist ihnen aber im Zuwachs deutlich unterlegen. Seit etwa 1890 steigert sich ihr Zuwachs und übertrifft ihre Konkurrenten kurzzeitig, pendelt sich her nach jedoch auf dem gleichen Niveau ein. In einzelnen schlechten Jahren oder Perioden der Buche, kann die Fichte kurzzeitig höhere Zuwächse erzielen, wie auch umgekehrt.

4 Ergebnisse

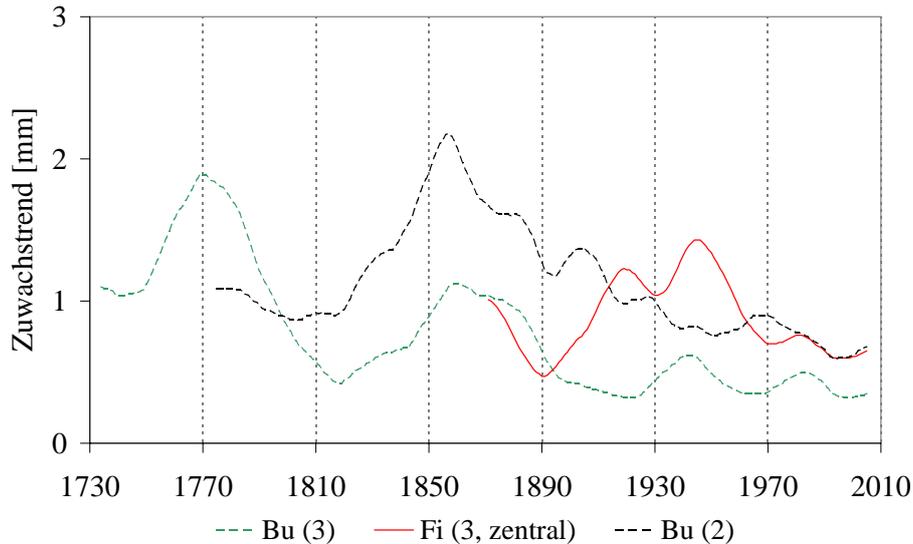


Abbildung 4.73: 11-jähriger Trend der zentralen Fichte und ihrer Konkurrenten (Bu), Plot 21, Tulseboda

Zusammenfassend erreicht die Fichte trotz der direkten Konkurrenz durch die sie umringenden Buchen deutlich höhere Zuwächse. Zur weiteren Betrachtung muss man zwei Fälle unterscheiden. In Situationen, in denen die Fichte ihren Konkurrenten in der sozialen Stellung unterlegen ist, hat sie dennoch hohe bis höhere Zuwächse, aber ihr Wachstumstrend ist am Ende dem der Buchen unterlegen. Für die Fichte besonders ungünstige Witterungsbedingungen können in solchen Fällen den Ausschlag für einen anhaltend starken Rückgang im Zuwachs geben. Ist dagegen die Fichte in einer Konkurrenzsituation den Buchen durch die soziale Stellung überlegen, stellt sie einen ernstzunehmenden Konkurrenten für die Buchen dar. In Phasen, in denen der Zuwachs der Buchen im Rückgang befindlich ist, kann die Fichte sie übertreffen und die Buchen verbleiben durch den Konkurrenzdruck in ihrem Zuwachs auf einem konstant niedrigeren Niveau.

Beispiel Rehberg In Plot 30 ist das Zuwachsniveau der beiden Buchengruppen wenig unterschiedlich (Abb. 4.74). Erst seit 1961 übertreffen die stärkeren (2) die schwächeren Buchen (3) im Wachstum, aber der Trend beider ist weiterhin sinkend. Die zentrale Fichte (1), in diesem Falle mit dem gleichen Alter der konkurrierenden Buchen, fällt in ihrem Zuwachs nach einer starken Jugend deutlich ab und nähert sich den Buchen an. Im Zeitraum 1941-1995 befindet sich die Fichte mit ihrem Zuwachs auf gleichem Level wie die Buchen, zum Teil sogar darunter bzw. zwischen den beiden sozialen Gruppen. Entgegengesetzte Weiserjahre sind in den Jahren 1942/43 und 1953 zu finden. Seit 1995 nimmt die Fichte im Zuwachs jedoch erneut zu und übertrifft die Buchen seither.

4 Ergebnisse

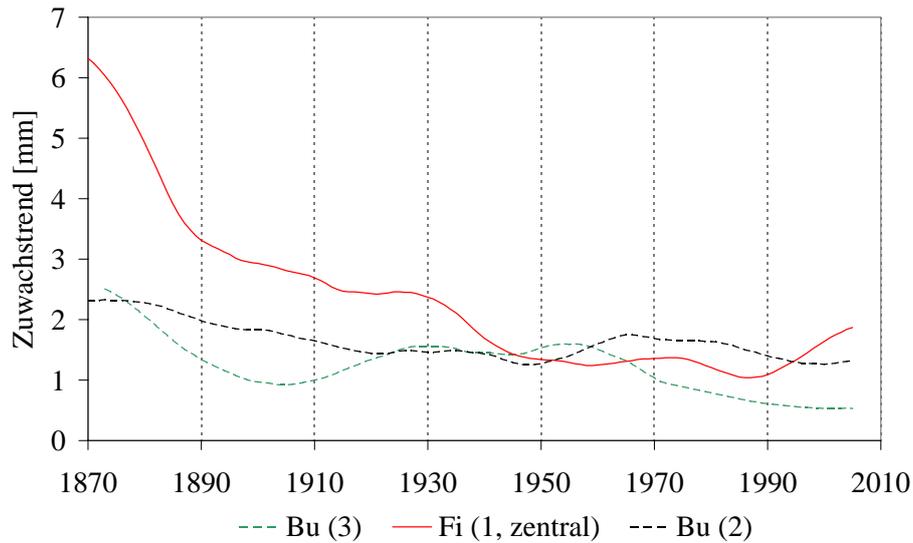


Abbildung 4.74: 11-jähriger Trend der zentralen Fichte und ihrer Konkurrenten (Bu), Plot 30, Rehberg

Zusammenfassend sind die Fichten am Rehberg in einer direkten Konkurrenzsituation den Buchen eher überlegen. Nach einer starken Jugend fällt ihr Zuwachs zurück, teilweise auch unter das Niveau der sie umstehenden Buchen, und eine Phase des Zuwachsgleichgewichts bestimmt den Zuwachs beider Baumarten. In den letzten 10-20 Jahren nimmt der Zuwachs der Fichten jedoch wieder deutlich zu und ihr Trend ist sichtlich positiver als der der Buchen.

Zentralbäume unter intra- und interspezifischer Konkurrenz

Im Folgenden soll untersucht werden, ob die zentralen Bäume ein verändertes Zuwachsverhalten aufweisen, sobald sie lediglich intraspezifischer Konkurrenz unterliegen. Bei der Auswertung der Ergebnisse muss jedoch beachtet werden, dass die innerartliche Konkurrenzkonstellation nur einmal je Standort aufgenommen wurde. Aufgrund dessen und der daraus folgenden geringen Stichprobenzahl können die Ergebnisse nicht gesichert verallgemeinert werden. Die mittleren Jahrringbreiten und Sensitivitäten der zentralen Bäume der intraspezifischen Konstellation werden den gemittelten Werten der zentralen Bäume der interspezifischen Konstellationen gegenübergestellt.

Fichte Diejenigen Fichten, die unter intraspezifischer Konkurrenz wachsen, haben auf zwei Standorten (Rehberg, Rågetaåsen) einen kleineren mittleren Zuwachs als die zentralen Fichten, die unter interspezifischer Konkurrenz wachsen (Tab. 4.32). Auf den

anderen beiden Standorten sind die Werte genau umgekehrt. Die Sensitivität ist auf dem Standort Tulseboda deutlich höher in der intraspezifischen Situation. Auf den anderen Standorten ist sie jedoch gleich oder sogar geringer. Somit ergeben sich bei den Fichten-Zentralbäumen keine erkennbaren, gleichgerichteten Zuwachsmuster für die beiden Konkurrenzkonstellationen.

Tabelle 4.32: Mittlere Jahrringbreite und Sensitivität der zentralen Fichten unter intra- bzw. interspezifischer Konkurrenz; Mean = mittlere Jahrringbreite in 1/100 mm; MS = mittlere Sensitivität in %; intra = intraspezifische Konkurrenzkonstellation; inter = interspezifische Konkurrenzkonstellation

Standort	Konstellation	Mean	MS [%]
Rehberg	intra	174	26
	inter	240	26
Rågetaåsen	intra	215	17
	inter	251	19
Siggaboda	intra	375	20
	inter	227	24
Tulseboda	intra	124	34
	inter	95	24

Buche Betrachtet man das Zuwachsverhalten der Buchen-Zentralbäume unter intraspezifischer Konkurrenz im Vergleich zur interspezifischen, so fällt auf, dass die mittleren Jahrringbreiten (Tab. 4.33) ebenfalls zwischen den Standorten variieren und sich somit kein deutlicher Trend abzeichnet. Die Buchen haben nur in einzelnen Fällen einen größeren Zuwachs, wenn sie ausschließlich innerartlicher Konkurrenz unterliegen. Doch die Sensitivität der zentralen Buchen unter intraspezifischer Konkurrenz ist an den schwedischen Standorten deutlich erhöht gegenüber der interspezifischen Konstellation. Am Standort Rehberg ist die Sensitivität dagegen niedriger, wenn die Buche unter intraspezifischer Konkurrenz wächst.

Tabelle 4.33: Mittlere Jahrringbreite und Sensitivität der zentralen Buchen unter intra- bzw. interspezifischer Konkurrenz

Standort	Konstellation	Mean	MS [%]
Rehberg	intra	185	26
	inter	137	35
Rågetaåsen	intra	146	32
	inter	164	30
Siggaboda	intra	120	34
	inter	67	27
Tolseboda	intra	57	38
	inter	111	27

Standortsvergleich Gleichgerichtete Tendenzen hinsichtlich der Sensitivität oder des Zuwachses der Zentralbäume beider Arten innerhalb desselben Standortes lassen sich nur in Tolseboda und Siggaboda erkennen. Die Sensitivität der zentralen Buche und auch der Fichte am Standort Tolseboda ist unter intraspezifischer Konkurrenz in beiden Fällen deutlich erhöht. Am Standort Siggaboda zeigen beide Zentralbäume einen stark erhöhten Zuwachs in intraspezifischer Situation gegenüber den Zentralbäumen in interspezifischer. Auf den übrigen Standorten lassen sich keine ähnlichen Muster erkennen.

4.4.3 Extreme Witterungsereignisse

Das zukünftige Konkurrenzgeschehen wird in hohem Maße beeinflusst von der Witterungssensitivität der Baumarten. Im Kapitel Klima-Zuwachs-Beziehungen (Kap. 4.3) wurde abgehandelt, welche Klimavariablen die zuwachswirksamsten sind und in welchen Zeiträumen. Auch Veränderungen über die Zeit hinweg konnten nachgewiesen werden. Doch entscheidend wird sein, in wie weit die Arten von extremen Witterungsereignissen beeinflusst werden. Die prognostizierte Klimaveränderung wird in nicht allzu ferner Zukunft eine Häufung von besonders heißen und trockenen Sommern, Sturmereignissen, Starkniederschlägen und Überflutungen mit sich bringen. Wie die einzelnen Baumarten damit umgehen werden, lässt sich heute schwer einschätzen. Doch es ist möglich, aus den vergangenen Zuwachsgeschehen Potentiale und Vorteile einer Baumart gegenüber einer anderen abzuleiten. Hierzu betrachtet man die Einzeljahre mit den geringsten Zuwachswerten, da diese im besonderen Maße den Einfluss von Extremereignissen widerspiegeln. Es wurden die 20 Einzeljahre ausgewählt, die in ihrem Zuwachs die größte Abweichung von einer 13-jährigen Ausgleichskurve haben. Auf diese Art werden ausschließlich die kurzfristigen, witterungsbedingten Zuwachswerte betrachtet. Zunächst werden die mitt-

4 Ergebnisse

leren Rohzuwächse der Standort-Chronologien ins Verhältnis zueinander gesetzt. Hierzu wurden die Zeitreihen der Buchen auf die Länge der Fichten gekürzt, um ausschließlich die jeweils für beide Baumarten gleichen klimatischen Einflüsse zu betrachten. In Tabelle 4.34 sind die mittleren Rohzuwächse beider Baumarten je Standort aufgetragen. In der vierten Spalte sind die Verhältnisse der Fichten-Zuwächse zu denen der Buchen berechnet. Erneut erkennt man den stärkeren Zuwachs der Fichten, der am Standort Siggaboda sogar über 260 % vom Buchen Zuwachs erreicht.

Tabelle 4.34: Zuwachsverhältnisse der mittleren Rohzuwachswerte von Fichte zu Buche

	mittl. Buchen Rohzuwachs [mm]	mittl. Fichten Rohzuwachs [mm]	Fi-Zuwachs in % vom mittl. Bu- Zuwachs
Rehberg	1,70	2,01	118,3
Rågetaåsen	1,20	2,30	191,3
Siggaboda	0,67	1,77	264,7
Tolseboda	0,72	1,39	192,4

Als zweiter Schritt wurden nun die mittleren Zuwachswerte der 20 schmalste Jahrringe je Baumart berechnet (Tab. 4.35). Hier ist zu erkennen, dass die Jahre mit den geringsten Zuwächsen der Buchen einen wesentlich kleineren Mittelwert aufweisen als die der Fichten. In Spalte vier ist erneut das Verhältnis der Fichten-Zuwächse in % vom Buchen-Zuwachs dargestellt. Am Standort Rehberg ist der Vorsprung der Fichten in den Extremjahren mit 136 % immer noch sehr deutlich, doch an den schwedischen Standorten zeigt sich ein bedeutender Vorteil der Fichten. Der Standort Siggaboda zeigt abermals einen gewaltigen Zuwachsvorteil der Fichte von über 440 %.

Tabelle 4.35: Zuwachsverhältnisse der 20 geringsten Rohzuwachswerte von Fichte zu Buche

	mittl. geringster Zuwachs Fichte [mm]	mittl. geringster Zuwachs Buche [mm]	geringster Zu- wachs Fichte in % Buche
Rehberg	1,39	1,02	135,9
Rågetaåsen	1,95	0,88	221,1
Siggaboda	1,30	0,29	442,5
Tolseboda	0,91	0,37	246,8

4 Ergebnisse

Vergleicht man nun den Zuwachsvorsprung der Fichten der gesamten Zeitreihe mit dem in den 20 zuwachsschwächsten Jahren, so erhält man ein relatives Maß dafür, welches Potential die Fichte selbst noch in Extremjahren gegenüber der Buche hat (Tab. 4.36). Der Vorteil der Fichte ist in Extremjahren noch stärker als bereits im gesamten Mittel. Am Standort Rehberg und auch in Rågetaåsen fällt er geringer aus, ist aber dennoch deutlich. In Tulseboda erreichen die Fichten in schlechten Jahren nochmals 54 % mehr Zuwachs gegenüber dem Mittelwert der Buchen. Und ganz herausragend ist der Vorteil wieder in Siggaboda. Hier schafft die Fichte in schlechten Jahren einen Zuwachsvorteil von nochmals 178 % gegenüber dem Mittel.

Tabelle 4.36: Zuwachsverhältnisse der mittleren zu den 20 geringsten Rohzuwachswerte von Fichte zu Buche

	Fi-Zuwachs in % vom mittl. Bu- Zuwachs	geringster Zu- wachs Fichte in % Buche	Differenz
Rehberg	118,3	135,9	17,6
Rågetaåsen	191,3	221,1	29,8
Siggaboda	264,7	442,5	177,8
Tulseboda	192,4	246,8	54,3

5 Diskussion und Schlussfolgerungen

Vor Beginn der eigentlichen Ergebnisdiskussion ist eine kritische Betrachtung des Ausgangsmaterials und der gewählten Methoden unerlässlich, um anschließend die Repräsentativität der gewonnenen Erkenntnisse bewerten zu können. In der vorliegenden Studie wurden die klimatischen Abhängigkeiten des radialen Zuwachses von Buchen und Fichten auf vier Naturwaldstandorten analysiert. Drei Untersuchungsflächen befanden sich in Südschweden (Rågetaåsen, Tulseboda und Siggaboda) und eine vierte Fläche, die im Wesentlichen als Vergleichsstandort diente, befand sich im Harz (Rehberg). Neben dem Einfluss extremer Witterungsbedingungen auf das Zuwachsverhalten der Baumarten wurde das inner- und zwischenartliche Konkurrenzverhalten in den Naturreservaten untersucht. Wesentliche Grundlage für die vorliegenden Ergebnisse waren Holzbohrkerne, die mittels dendroklimatologischer und -ökologischer Methoden ausgewertet wurden.

5.1 Bewertung des Ausgangsmaterials

Zunächst eine vergleichende Betrachtung der Untersuchungsflächen. Alle Bestände befinden sich in Naturreservaten und unterliegen daher seit geraumer Zeit keiner menschlichen Nutzung mehr, wodurch sich waldbaulich bedingte Einflüsse auf das Wachstum der Bäume minimieren. Humusform, Bodenart und Bodentyp, Wasser- und Nährstoffversorgung stellen auf allen Standorten vergleichbare Ausgangsbedingungen. Durch die klimatischen Bedingungen zeigen sich jedoch Unterschiede, die bei der Interpretation der Ergebnisse von Belang sind. Die mittlere jährliche Lufttemperatur beträgt 6,0 - 6,5 °C und ist somit vergleichbar, ebenso wie die mittlere Temperatur der Vegetationsperiode von 12,0 - 13,0 °C. Doch der jährliche Niederschlag trennt die vier Bestände in zwei mäßigen Niederschlags, Siggaboda und Tulseboda (650 - 700 mm), und zwei höheren, Rehberg und Rågetaåsen (1200 - 1300 mm). Dieser Unterschied spiegelt sich grundsätzlich in der Leistungsfähigkeit besonders des Buchen-Zuwachses wie auch in den witterungsbedingten Einflüssen auf das radiale Wachstum wider. Auch die Höhenstufen der Bestände unterscheiden sich deutlich, während die Fläche Rehberg montan gelegen ist (650 m ü.

NN), liegen die schwedischen Standorte planar-collin (Tolseboda, 80-90 m, Rågetaåsen und Siggaboda, 140 m ü. NN). Ein Einfluss dieser Höhenstufen zeigt sich jedoch nicht im Konkurrenzverhalten und nur wenig in Klima-Zuwachs-Beziehungen.

Die beprobten Bäume in den Untersuchungsgruppen stellen dagegen eine Fehlerquelle dar, der Beachtung geschenkt werden muss. Es wurde je Bestand lediglich ein Plot mit intraspezifischer Konkurrenzsituation je Art ausgewählt. Dies schränkt die Aussagekraft über die innerartliche Wachstumshemmung oder -begünstigung aufgrund der geringen Stichprobe erheblich ein. Die übrigen Konkurrenzkonstellationen, Buche in Konkurrenz zu Fichte und Fichte in Konkurrenz zu Buche, wurde jeweils in dreifacher Ausführung in die Untersuchung eingeschlossen, womit eine ausreichende Grundlage zur Verfügung stand. Einen wesentlichen Kritikpunkt stellt diese Art der Auswahl der Probebäume zur Untersuchung von witterungsbedingten Einflüssen dar, da sie großen Einfluss auf die soziale Klasse der Bäume hat. Buchen wachsen unter natürlichen Bedingungen in seltenen Fällen als Einzelbaum in direkter Konkurrenz zu Fichten, daher sind diese Bäume häufig von geringer sozialer Stellung. An Randzonen reinartiger Gruppen kommt es zwar zu Kontakt und Konkurrenz zwischen den Baumarten, aber die gesuchten Extremsituationen direkter Umschließung eines Zentralbaumes kommen selten in natürlich gewachsenen Wäldern vor. Da in solchen Fällen die offensichtlich konkurrenzbedingten die klimatischen Einflüsse auf den Zuwachs überlagern, wurden unterlegene Bäume ab der Kraft'schen Klasse 4 von den Klima-Zuwachs-Analysen ausgeschlossen (Lorimer u. a., 1999). Ihr Wert hingegen für Konkurrenz-Analysen ist uneingeschränkt.

Die Klima-Zuwachs-Analysen wurden mit Klimazeitreihen durchgeführt, deren primäre Qualifikation die Länge der Aufzeichnung (Beginn 1860) und erst an zweiter Stelle deren Nähe zum Probenstandort war. Niederschlagsereignisse unterliegen in besonderem Maße den orographischen Gegebenheiten und sind daher von kleinräumlicher Ausprägung, wodurch die Entfernung der Klimastationen zu den Probenstandorten großen Einfluss auf die Aussagekraft der Niederschlagsauswirkungen hat. Doch unter gegebenen Umständen erbrachten die Analysen trotz der nicht geringen Entfernung erfreulich deutliche Ergebnisse zu den wesentlichen Witterungseinflüssen. Die Beschränkung der Untersuchung von Klima-Zuwachs-Analysen auf Temperatur und Niederschlag bringt naturgemäß einen großen Unsicherheitsfaktor mit sich. Wesentliche wachstumsbeeinflussende Faktoren wie Strahlung, Sonnenscheindauer, Schneedecke, Windrichtung oder Windgeschwindigkeit wurden nicht berücksichtigt, ebenso wie der Niederschlagsverlust durch Interzeption und Bodeneigenschaften wie Wasserspeicherkapazität. Eine weitere Eigenschaft der Klimazeitreihen, die das Ergebnis beeinflussen können, ist die grobe Auflösung der Daten in Monatswerte, wodurch bedeutende Einzelereignisse wie Spätfröste keine Berücksichti-

gung finden konnten. Lediglich für die Klimastation Växjö lagen Tagesmaximal- und Tagesminimalwerte vor, so dass für die Standorte Siggaboda und Tulseboda einzelne Weiserjahre auf Spätfrostereignisse zurückgeführt werden konnten. Weiterhin bergen die kalendarisch bedingten Monatsgrenzen Fehlerquellen für die Interpretation der Ergebnisse. So ist es möglich, dass der Zuwachseinfluss des Niederschlags eines Einzelmonats überschätzt wird, da es sich z.B. um eine ganze niederschlagsfreie Periode gehandelt haben kann, zu deren Beginn und Ende es jedoch ausreichend geregnet hat. So kann fälschlicherweise der Monat im Zentrum der Trockenphase als der einzig beeinflussende interpretiert werden.

5.2 Zuwachszeitreihen

5.2.1 Buchen

Erwartungsgemäß liegt das mittlere Zuwachsniveau der Buchen am Standort Rehberg (1,7 mm) höher als auf den schwedischen Standorten. Ebenfalls zu erwarten war das stärkere Wachstum der Buchen am Standort Rågetaåsen (1,4 mm) gegenüber Tulseboda und Siggaboda (0,7 mm). Außerdem, wie in Abbildung 3.2 zu erkennen, liegt Rågetaåsen noch knapp innerhalb des Areals der natürlichen Buchenwaldgesellschaften. Zwar befinden sich alle schwedischen Standorte innerhalb des Gebiets der Buchen-Fichten-Wälder, aber es ist deutlich das niedrigere Leistungsniveau der Buchen zu erkennen. Die mittleren jährlichen Temperaturen der Standorte sind vergleichbar, doch ausschlaggebend für den Unterschied im Zuwachs ist die wesentlich höhere Jahresniederschlagssumme in Rågetaåsen und Rehberg.

Auch die zum Teil besonders lichte Struktur der schwedischen Bestände trägt zu dem geringeren Zuwachs bei, wie nachfolgend erläutert wird (Tab. 3.1). Das Relief der Untersuchungsfläche in Tulseboda ist sehr vielgestaltig. Durch kleinere Hügel, Hänge und Tälchen auf der Fläche erreicht viel Strahlung Boden und Stämme. Siggaboda und Rågetaåsen sind geprägt von zahlreichen eiszeitlichen Findlingen, die teilweise größere Abstände zwischen den Bäumen erzwingen, so dass auch hier die Bestockung als locker bzw. dicht bis räumdig eingeschätzt werden kann. Der Orkan Gudrun im Januar 2005 trug maßgeblich zu einer weiteren Auffichtung der Bestände bei. Der Stamm der Buche ist nun durch sein Oberflächenperiderm, das beständig Kork in Staubform absondert, besonders strahlungsempfindlich und sonnenbrandgefährdet. Der Status der Buche als Schattbaumart wirkt dieser Gefährdung eigentlich entgegen, doch die Kronenstruktur

der Buchen dieser beiden Versuchsstandorte ist im Vergleich zu Buchen des Kernverbreitungsgebietes bedeutend lichter aufgebaut. Die Buche besitzt jedoch die Fähigkeit sich auch an strahlungsreichere Bedingungen anzupassen, indem sie sekundär ein Tiefenperiderm bildet und somit eine schützende Borke aufbauen kann. Dies bedeutet jedoch, dass fortlaufend in Bereichen des Phloems Zellen reembryonalisiert werden, um ein Phellogen zu bilden. Dieses Korkkambium bildet nun ein tieferliegendes Periderm. So entsteht eine Borke, die aus Schichten abgestorbenen Phloems, und stets nach außen geschobenen, älteren Peridermen besteht. Dieser Sonnenschutz bedeutet jedoch für die Buchen einen ungewohnten Assimilatverbrauch, der sich natürlich negativ auf die Holzbildung auswirkt. Weiterhin könnte die lichtere Kronenstruktur eine veränderte Auxinproduktion bewirken, die die Kambialaktivität in der Form reguliert, als vorrangig das Wurzelwachstum mit Assimilaten versorgt wird (Fritts u. a., 1965). Aber der wohl entscheidende Einfluss, der in lichtreichen Beständen zur Reduktion des radialen Zuwachses führen kann, ist häufigere Fruktifikation. In der Regel äußert sich ein Mastjahr allerdings durch einen deutlichen, kurzzeitigen Zuwachseinbruch und nicht durch ein konstant niedriges Zuwachsniveau. Andererseits ist es möglich, dass die Buchen der Bestände Tolseboda und Siggaboda nicht in ausgeprägten Masten fruktifizieren, sondern unregelmäßiger und häufiger. Dem würde auch das lichte Blätterdach als weitere Folge entsprechen. Aber leider existieren keine Aufzeichnungen über Fruktifikation der Bestände.

Die mittlere Sensitivität liegt bei allen Standorten auf einem mäßig hohen Niveau (0,19 - 0,23). Die Autokorrelation der Buchen ist auf den schwedischen Standorten (0,75 - 0,92) wesentlich höher als am Rehberg (0,42). Aber die Standardabweichung ist auf drei Standorten relativ ähnlich (44,5 - 49,4), nur in Tolseboda ist sie deutlich niedriger (30,6). Daraus wird ersichtlich, dass das Wachstum der Buchen auf den schwedischen Standorten in großem Maße vom Vorjahreszuwachs geprägt wird. Im Gegenteil dazu sind die Buchen am Rehberg deutlich sensitiver für die aktuellen Bedingungen.

Die statistischen Merkmale der Buchen in Zentral-Italien (Piovesan u. a., 2003) sind denen der schwedischen Standorte ähnlich. Der mittlere Zuwachs beträgt 0,82 mm, die Autokorrelation liegt bei 0,81, die Sensitivität ist 0,23, nur die Standardabweichung ist ein wenig geringer und liegt bei 37,9. Sehr niedrige Sensitivitäten findet Gutiérrez (1988) bei Buchen in Spanien an der südlichen Arealgrenze mit Werten zwischen 0,16 und 0,22. Sehr hohe beschreiben Worbes u. a. (1992) für Buchen in Nordwest-Deutschland mit 0,38.

5.2.2 Fichten

Die jährlichen Zuwächse der Fichten sind alle auf vergleichbarem, hohem Niveau. Die Standorte Rehberg und Rågetaåsen liegen im Mittelwert (2,0 und 2,3 mm), entsprechend der standörtlich bedingten Vorteile, leicht über Siggaboda und Tulseboda (1,8 und 1,4 mm), doch im Gegensatz zu den Buchen zeigen hier die Fichten in Rågetaåsen den höchsten Zuwachs.

Die mittlere Sensitivität ist auf allen Standorten mit 0,13 - 0,18 verhältnismäßig niedrig. Die Autokorrelation zeigt keine einheitlichen Trends unter den Standorten. Sie ist in Siggaboda niedriger (0,55) als auf den übrigen Standorten (0,70 - 0,78). Die Standardabweichung ist auf den Standorten Siggaboda und Tulseboda niedriger (32,8 und 36,6) als in Rågetaåsen und Rehberg (50,6 und 63,8). Diese differenzierten Ergebnisse lassen erkennen, dass das Wachstum der Fichten zum einen stark von den aktuellen Bedingungen geprägt wird, aber gleichzeitig auch ein hoher Zusammenhang zum vorjährigen Zuwachs besteht.

Sensitivitätswerte, die in der Literatur bei Fichten gefunden werden können, liegen häufig bei 0,2 (Worbes u. a., 1992; Neumann, 2001).

5.2.3 Standortvergleich

Die Berechnung von Gleichläufigkeiten und t-Werten zwischen den Chronologien der Standorte ergab besonders hohe Ähnlichkeiten der Zuwachsverläufe zwischen den Standorten Siggaboda und Tulseboda bei beiden Baumarten. Die Nähe dieser beiden Untersuchungsstandorte (Entfernung ca. 70 km) erklärt diesen Umstand. Doch auch mit dem Standort Rågetaåsen bestehen bei beiden Arten signifikante Ähnlichkeiten. Umgekehrt sind die Zuwachsverläufe der Buchen und Fichten vom Rehberg nachweislich unterschiedlich zu den schwedischen Standorten. Diese Unterschiede bestehen vor allem in regionalen und standörtlichen Gegebenheiten. Diese zu untersuchen war nicht Ziel der vorliegenden Studie, sondern die klimatisch bedingten Gemeinsamkeiten und Unterschiede in den Zuwachsverläufen zu entdecken. Einzelfaktor- und Einzeljahanalysen sind hierfür das Mittel der Wahl.

5.3 Klima-Wachstums-Relationen

Mittels erprobter Standardisierungsmethoden konnte das Klimasignal in den Zuwachsreihen in z.T. hervorragender Qualität herausgearbeitet werden. Besonders die Chronologien beider Arten des Standortes Rehberg zeigen ein hohes EPS (Expressed Population Signal) von 0,95 für beide Arten (siehe Kap. 4.3.1). Die Chronologien des Standortes Siggaboda liegen knapp unter dem Richtwert von 0,85 nach Wigley et al. (1984). Besonders problematisch ist die Chronologie der Fichten von Rågetaåsen, hier liegt das mittlere EPS bei 0,80. Die Ursache hierfür ist jedoch die älteste Periode der Chronologie, die durch ihre geringe Belegung nur ein EPS von 0,48 hat. Der EPS-Wert nähert sich grundsätzlich asymptotisch der 1,0 sowie die Zahl der integrierten Bäume unendlich wird. Steigt die Anzahl der Bäume von 1 bis etwa 10, steigt auch das EPS rasant. Ab einer Anzahl von 10 Bäumen erhöht es sich dagegen nur noch langsam.

Der mittlere EPS-Wert der Buchen-Chronologien beträgt 0,91, der der Fichten 0,88, welcher somit deutlich unter dem gemittelten EPS-Wert von 0,92 der Fichten-Chronologien von Neumann (2001) aus dem Osterzgebirge liegt.

Mittels Korrelations- und Regressionsanalysen wurden die wesentlichen, zuwachsbeeinflussenden Klimavariablen erfasst.

5.3.1 Langfristige Witterungseinflüsse

Buche

Das hervorstechendste Klimasignal für den Zuwachs der Buchen auf allen Standorten ist die Temperatur des Juli im Vorjahr. Gleichzeitig findet sich eine starke Beziehung zum Niederschlag des Juli im Vorjahr, da in den Sommermonaten Temperatur und Niederschlag in Mitteleuropa grundsätzlich negativ korreliert sind (Neumann, 2001). Der Zuwachseinfluss der Temperatur ist negativ, während der des Niederschlags positiv ist. Das lässt auf eine wahrscheinlich hohe Dürreempfindlichkeit der Buchen schließen. Der Zusammenhang von besonders schmalen oder fehlenden Jahrringen bei Buche mit Dürre wird von einigen Autoren genannt (Eckstein u. a., 1984; Gutiérrez, 1988; Biondi, 1993; Dittmar u. a., 1997; Piovesan u. a., 2003; Wilmking u. a., 2005). Der Vorjahreseinfluss des Spätsommers ist besonders wichtig für die Kohlenstoffspeicherung als Reserven für die Bildung des Frühholzes im Folgejahr (Kahle, 1994; Piovesan u. a., 2003). Im Juli wird

ebenfalls die Anlage der Knospen abgeschlossen, deren Anzahl zwar durch die Spätsommerbedingungen festgelegt wird, auch die Blattgröße, die schließlich die Assimilatproduktion bestimmt, wird durch die Witterungsbedingungen des vorjährigen Frühlings determiniert (Roloff, 1989).

Kommt es in Sommermonaten zum Austrocknen des Bodens, kann dies in der Folge zum Absterben von Feinwurzeln und Mykorrhiza führen. Die Wasser- und Nährstoffaufnahme der Wurzeln wird dadurch stark herabgesetzt (Kahle, 1994). Eine weitere mögliche Erklärung für den strengen, negativen Zusammenhang mit der vorjährigen Juli-Temperatur könnte die Einleitung einer Mast sein, doch aufgrund des gleichzeitigen, positiven Einflusses des Niederschlags sollte hier die Fruktifikation als ursächlicher Faktor ausgeschlossen werden. Bei den schwedischen Standorten Siggaboda und Tulseboda dehnt sich der negative Temperatureinfluss und der positive des Niederschlags im Vorjahr noch auf den August aus.

Die Buchen der Standorte Rågetaåsen und Rehberg zeigen interessanterweise neben dem negativen Einfluss der Juli-Temperatur des Vorjahres gleichzeitig eine positive Korrelation mit der Temperatur des Juli und August im Jahr der Ringbildung. Diese Tatsache irritiert besonders, da beide Witterungsvariablen denselben Jahrring betreffen. Doch ist diese zunächst gleichsinnig erscheinende Witterungsabhängigkeit grundverschieden. Während die Buchen am Rehberg für die Witterung des Vorjahres eine deutliche Dürreempfindlichkeit erkennen lassen, fehlt bei den Buchen in Rågetaåsen die signifikante positive Reaktion auf Juli-Niederschläge des Vorjahres. Somit deutet sich hier weniger eine Dürreempfindlichkeit als Fruktifikation in einer Mast an. Zur Überprüfung dieses Verdachts fehlen leider Informationen über Mastjahre der Standorte. Weiterhin zeigt sich in Rågetaåsen eine negative, aber nicht signifikante Korrelation mit dem Niederschlag des laufenden Juli. Da dieser Standort ausreichend mit Wasser versorgt ist, lösen im Hochsommer niederschlagsbringende Wolken eher ein Strahlungsdefizit aus. Doch der Vorzeichenwechsel vom Vorjahr zum laufenden Jahr ist kein seltenes Phänomen bei Buche. Die Ursachen sind sehr vielfältig und daher schwierig zu interpretieren. Eine hier vermutlich zutreffende Möglichkeit wäre die, dass sich Jahre mit günstiger Witterung in der einen Korrelation widerspiegeln und Jahre mit schlechten Bedingungen in der anderen (Dittmar, mündl.).

Ein weiterer wichtiger Zuwachsbeeinflussender Faktor ist die Temperatur des Vorjahres-Oktober, besonders für die Standorte Rågetaåsen und Siggaboda. Eine Ursache liegt sehr wahrscheinlich in der verstärkten Förderung des Wurzelwachstums zu dieser Jahreszeit. Dadurch profitiert der Baum von einer vergrößerten Oberfläche zur Wasser- und Nähr-

stoffaufnahme im Folgejahr. Dittmar und Elling (1999) sehen den positiven Effekt von niederschlagsarmer und strahlungsreicher Witterung im September und Oktober auch in der Anlage von Assimilatspeichern für das Wachstum im Folgejahr.

Die Buchen am montan gelegenen Standort Rehberg reagieren negativ auf erhöhte Temperaturen im April des laufenden Jahres. Dies beruht vermutlich auf der Erhöhung der Gefahr eines Spätfrostschadens durch frühzeitiges Austreiben der Blätter. Die besondere Empfindlichkeit der Buche gegenüber Spätfrostereignissen wird von vielen Autoren genannt (Biondi, 1993; Piovesan u. a., 2003; Roloff und Bärtels, 2008; Dittmar und Elling, 2007; Schütt u. a., 1994–2008; Roloff und Grundmann, 2008).

Biondi (1993) untersuchte die klimatischen Signale von Buchen in den Apenninen und begründet den positiven Effekt von niedrigen April-Temperaturen in der günstigeren Bereitstellung von Wasser für trockene Sommermonate. Das Wachstum der Buchen in den Apenninen ab einer Höhenlage von 1100 m ü. NN beruht besonders auf der Höhe der Schneedecke, die sich in einer positiven Verbindung mit Dezember-Niederschlägen und einer dagegen negativen mit der April-Temperatur widerspiegelt. Im Dezember häuft sich die Schneedecke an und schmilzt im April, wodurch eine gute Bodenwassersättigung erreicht wird. Ist die Temperatur im April aber hoch, schmilzt der Schnee schnell und das Wasser fließt größtenteils ab.

Im Frühjahr sind hohe Niederschläge in der Regel mit gutem Wachstum verbunden. Zum Blattaustrieb sind genügend Niederschläge essentiell für eine große Blattmasse, die wiederum durch erhöhte Photosyntheseraten das radiale Wachstum fördert. Die Buchen in Rågetaåsen zeigen ihre einzige signifikante Korrelation mit Niederschlägen mit denen des aktuellen April, wodurch die ansonsten geringe Abhängigkeit von Niederschlägen auf diesem sehr niederschlagsreichen Standort unterstrichen wird.

Auch für die Douglasie konnte Biondi (2000) eine hohe negative Korrelation mit den Juli-Temperaturen des Vorjahres feststellen. Positiven Einfluss auf den Zuwachs der Douglasien auf einem trockenen Versuchsstandort haben Niederschläge während der Vegetationszeit, April-Juni mit Schwerpunkt im Mai. Bedingt wird diese starke Niederschlagsabhängigkeit durch die Beschaffenheit des Standortes, der grundsätzlich wenig niederschlagsreich ist, eine Hangneigung von 50-60% hat und eine besonders geringmächtige Bodenauflage aufweist. Zum Vergleich besitzt auch der Standort Siggaboda eine nur wenige cm starke Bodenschicht über dem hochanstehenden Grundgestein, weshalb auch hier eine hohe Korrelation mit Mai-Niederschlägen im laufenden Jahr zu erkennen ist. Gleichzeitig erklärt sich dadurch möglicherweise die negative Korrelation mit

Juni-Temperaturen des aktuellen Jahres, da hohe Temperaturen die schwache Bodenschicht schnell austrocknen, was ein Absterben der Mykorrhiza nach sich ziehen kann. Auch Gutiérrez (1988), die Buchen auf Trockenstandorten in Südspanien untersucht hat, bestätigt die hohe Sensitivität der Buche gegenüber dem Bodenwasserhaushalt. Der Niederschlag des aktuellen wie des Vorjahres bestimmt hier das Wachstum. Meyer u. a. (2000) bekräftigen ebenfalls eine hohe Empfindlichkeit gegenüber dem Wasserangebot. Extrem nasse Jahre können im Feinwurzelsystem der Buche durch Überstauung auf verdichteten Böden zu Schädigungen führen. Die Wasser- und Nährstoffnachlieferung ist infolge dessen gemindert. Auch eine mögliche Ortsteinbildung in den Podsolen auf den schwedischen Untersuchungsflächen könnte zu örtlichen Überstauungen führen. Die Buche ist unter den heimischen Laubbaumarten eine der wenigen Arten, die Überflutung des Wurzelsystems nur wenige Tage unbeschädigt übersteht (Späth, 2002). Auch van der Werf u. a. (2007) entdecken einen signifikanten, negativen Einfluss der Juni-Temperatur auf Buchen auf einem Trockenstandort in den Niederlanden.

Fichte

Die wesentliche, zuwachsbeeinflussende Witterungsgröße für die Fichten ist der Niederschlag im Juni im Jahr der Ringbildung. Neumann (2001) untersuchte den Zusammenhang von Witterungsgeschehen und Zuwachsverläufen in Fichtenbeständen im Osterzgebirge. Auch diese Fichten zeigen mit Abstand die höchsten Korrelationen mit dem Niederschlag des Junis, bei einem Mittelwert von $r = 0,36$, während in der vorliegenden Untersuchung Korrelationen von $r = 0,29$ bis $r = 0,30$ erreicht werden. In der Vegetationsperiode sind Niederschläge maßgeblich für die Ringbildung notwendig. Umgekehrt, steht viel Wasser zur Verfügung, kann ein Baum seinen wasserleitenden Querschnitt vergrößern, um das erhöhte Angebot nutzen zu können. Auch Dittmar und Elling (1999) beschreiben die Abhängigkeit des Zuwachses von Niederschlägen in der Vegetationszeit von Fichten in Höhenlagen bis etwa 700 m ü. NN in Süddeutschland. Die Fichten am Standort Rehberg reagieren als einzige weniger auf Juni-Niederschläge als auf Niederschläge im April und verstärkt auf die Temperaturen im Mai, beides im laufenden Jahr. Der montane Einfluss dieses Standorts erhöht die Bedeutung der Temperatur für den Zuwachs.

Nicht nur für die Fichten des Rehbergs sind auch die Temperaturen des Vorjahres von Bedeutung, besonders Juli und September prägen den Zuwachs negativ. Auch Neumann (2001) findet den Zusammenhang mit der September-Temperatur, doch erklärt er diesen mit der Variablenreihenfolge in der Regressionsanalyse. Den negativen Einfluss auf die

Kohlenstoffspeicherung für das Folgejahr sieht er aufgrund der fehlenden positiven Korrelation mit den Niederschlägen des Septembers nicht bestätigt. Eine leichte, positive Reaktion auf September-Niederschläge kann jedoch auf dem Standort Rehberg registriert werden. Zwar ist sie nicht signifikant, bestätigt aber dennoch die Vermutung, dass es sich um eine Verkürzung der Vegetationszeit handeln könnte (Piovesan u. a., 2003).

Im Gegensatz zu der Reaktion des Buchenzuwachses, negativ auf die Temperatur und positiv auf die Niederschläge des Vorjahres, was ein deutliches Dürresignal darstellt, zeigen die Fichten keinen positiven Zusammenhang mit Niederschlägen im gleichen Zeitraum.

Die Fichten in Rågetaåsen lassen keinen signifikanten Einfluss von Temperaturen auf den Zuwachs erkennen, aber neben den Niederschlägen im Juni spielen sie auch im laufenden Januar eine wesentliche Rolle. Das Wachstum der Fichten in Tolseboda und Siggaboda hat einen positiven Zusammenhang mit den Februar-Niederschlägen. In beiden Fällen verbirgt sich dahinter vermutlich die Akkumulation einer Schneedecke, die im Frühjahr einen ausgeglichenen Bodenwasserhaushalt bewirkt.

Bei Neumann (2001) stehen nach den Juni-Niederschlägen als wichtigster Größe die Temperaturen des März und Februar an zweiter Stelle. Dieser Einfluss kann jedoch in der vorliegenden Untersuchung nicht gefunden werden. Insgesamt zeigen die beschriebenen Fichten nur ein schwaches Klimasignal mit wenigen signifikanten Korrelationen.

5.3.2 Einfluss extremer Witterungsereignisse

Weiserjahre der Buche

Die Einzeljahranalyse der extremen Jahrringbreiten bestätigen in der Regel die Klima-Zuwachs-Beziehungen, wie sie die vorangegangenen Korrelations- und Regressionsanalysen ergaben. Der Zuwachs der Buchen wird in erster Linie von den Witterungsbedingungen des Vorjahres bestimmt. Negative Weiserjahre entstehen vornehmlich im Folgejahr von trocken-heißen Sommern (Juli-August). Der Standort Rågetaåsen stellt eine Ausnahme dar. Hier reagieren die Buchen in Extremjahren maßgeblich auf die Witterungsbedingungen im Jahr der Ringbildung. Beide Extremformen der Witterung, heiß und trocken, sowie kalt und feucht, beeinflussen den Zuwachs der Buchen negativ. Positive Weiserjahre werden dagegen auf allen Standorten durch die Bedingungen des aktuellen Jahres festgelegt. Die Temperatur spielt dabei eine eher untergeordnete Rolle. Mittlere bis leicht kühlere Temperaturen im Sommer liefern ideale Bedingungen für das Wachstum, kombiniert mit erhöhten Niederschlägen.

Piovesan u. a. (2003) untersuchten Buchen in einer Höhenlage von 1200-1800 m ü. NN in den Apenninen und stellten fest, dass die Ursachen für negative Weiserjahre in einem kühlen Mai und einem trockenen Sommer (Juli-August) liegen. Zusätzlich spielen Dürre im Vorjahr und Spätfrostereignisse große Rollen. Die umgekehrten Bedingungen, ein feuchter Mai und kühler Sommer erzeugen dagegen besonders breite Jahrringe. Der Wasserhaushalt im aktuellen und Vorjahr, ebenso wie Spätfrost sind also entscheidend für das Buchenwachstum in den Apenninen (Biondi, 1993). Holmsgaard (1962) stellte für die Buche als dem dänischen Nationalbaum fest, dass für diese, im Vergleich zu anderen Laubbaumarten, Spätfrost den größten Einfluss auf das Wachstum, die Kronenarchitektur, sogar die Stammform und nicht zuletzt auf die Reproduktion haben, da die weiblichen Blüten und frühen Früchte bereits bei leichtem Frost (-1,4 bis -3°C) absterben. Die männlichen Blüten sind besonders empfindlich, sie sterben bereits bei -1°C kurz vor dem Blütenaustrieb ab.

Den Einfluss der Sommertrockenheit des Jahres 2003 auf die Jahrringbildung bei Eiche und Buche untersuchten van der Werf u. a. (2007) auf einem Trockenstandort in den Niederlanden. Sie konnten jedoch bei keiner der Arten einen besonders schmalen Jahrring feststellen; die Eichen bildeten sogar im Folgejahr einen besonders breiten Jahrring. Daraus schließen sie, dass weder Eiche noch Buche in den Niederlanden in Zukunft Schwierigkeiten mit Sommerdürren haben werden.

Bei Buchen in Südschweden fanden Dittmar u. a. (2003) nur schwache klimatische Signale im radialen Zuwachs. Lediglich eine leichte Korrelation mit Niederschlägen war feststellbar, so dass negative Weiserjahre vermehrt in Jahren mit Niederschlagsdefiziten auftraten. Dittmar und Elling (2007) nennen nicht nur trocken-warme Witterungsbedingungen als Auslöser für negative Weiserjahre, sondern auch erhöhte Ozon-Werte. Buchen sind auf gut wasserversorgten Standorten nicht dazu gezwungen, bei hoher Sonneneinstrahlung die Stomata zu schließen und nehmen so mehr Ozon auf, welches seinerseits durch erhöhte Strahlung in höherer Konzentration vorliegt. Ozon wirkt grundsätzlich auf zwei verschiedene Wege: direkt durch die Aufnahme durch die Stomata und indirekt durch den Ozon-Abbau in der Stratosphäre und den folglich höheren Anteil an schädigender UV-B-Strahlung (Matyssek, 1998). Ozon wird verdächtigt, durch die Zerstörung der Zellwände und -membranen im Mesophyll in der Konsequenz die Reservestoffbildung zu behindern. Somit kann diese Schädigung zu einer Minderung des Holzzuwachses führen. Überdies kann langfristige Ozon-Einwirkung eine erhöhte Frostgefährdung hervorrufen (Matyssek und Innes, 1999). Andererseits fördert Ozon in Kombination mit Stickstoff das Sprosswachstum auf Kosten der Wurzelentwicklung (Elling und Dittmar, 2003). Braun u. a. (2007) untersuchten das Sprosswachstum erwachsener Buchen und Fichten

auf eine Reaktion auf Ozon. Erhöhte Ozon-Werte führten beim Längenwachstum von Buchen zu einem messbaren Rückgang, besonders im Folgejahr. Die Ergebnisse waren vergleichbar mit denen von Sämlingen, woraus geschlossen werden kann, dass die Ozon-Empfindlichkeit der Buche altersunabhängig ist. Die Fichten zeigten jedoch keine erkennbaren Reaktionen auf höhere Ozon-Werte (Matyssek, 1998), denn ihr Nadelbauplan verhindert eine erhöhte Aufnahme. Matyssek u. a. (2006) beschreiben die Interaktionen zwischen Trockenheit und Ozon-Stress und deren vielfältige physiologische Auswirkungen auf Waldbäume. Beide Faktoren haben einzeln oder in Kombination einen großen Einfluss auf die Kohlenstoffbindung und somit die Holzproduktion. In niedriger Konzentration war Ozon stets Bestandteil der Umwelt doch die langfristigen Risiken einer chronischen Ozon-Belastung sind bislang unbekannt.

Weiserjahre der Fichte

Der Zuwachs der Fichten wird maßgeblich von den Witterungsbedingungen im Jahr der Ringbildung bestimmt. Negative Weiserjahre entstehen, ebenso wie bei der Buche, durch trocken-heiße Sommer. Wie bei den Buchen hat die Temperatur des Vorjahres-Juli an den Standorten Siggaboda und Rehberg einen wesentlichen Einfluss auf den Zuwachs. Zusätzlich zu den Bedingungen im Sommer, stellen kühle bis kalte Frühjahre (Januar - März) einen zuwachsmindernden Faktor dar. Der Standort Tolseboda unterscheidet sich insofern von den anderen, als hier kalte Frühjahre bzw. -sommer (März - Mai), im Gegensatz zu heißen Sommern, die Hauptursache für negative Weiserjahre darstellen. Positive Weiserjahre werden durch mittlere bis kühle Sommer-Temperaturen und in erster Linie durch hohe Juni-Niederschläge hervorgerufen. Diese starke Abhängigkeit vom Juni kommt in beiden Arten von Weiserjahren deutlich zum Ausdruck.

Dittmar und Elling (1999) entdeckten einen starken Einfluss der Höhenlage auf die Richtung des Witterungseinflusses. Es gibt positive Extremjahre in tieferen Lagen, denen negative in höheren Lagen entsprechen und umgekehrt. Für Fichte in den Bayerischen Alpen sind dies die Jahre 1933 und 1954 und im umgekehrten Fall das Jahr 1934. Auch ergiebige Fruktifikation wird als eine Ursache für negative Weiserjahre bei Fichte genannt, dies gilt z.B. für das Jahr 1971 in Süddeutschland (Siegl und Schönborn, 1990). Bei Fichten in Südschweden kann beobachtet werden, dass die Blütenanlage durch hohe Temperaturen und geringe Niederschläge in der zweiten Junihälfte induziert wird (Lindgren u. a., 1977). Im Gegensatz dazu findet Kahle (1994) keine grundlegenden Veränderungen in den Zusammenhangsstrukturen zwischen den Radialzuwachsreaktionen und den Klimavariablen unter Ausschluss der Samenjahre bei Fichte im Südschwarzwald.

Vergleich zwischen den Baumarten

Obwohl Weiserjahre bei Buche und Fichte häufig durch dieselben Ursachen ausgelöst werden, die negativen (durch trocken-heiße Witterung in Sommer und Vorjahressommer) wie auch die positiven (durch kühle Temperaturen und hohe Niederschläge im laufenden Jahr), so kommt es dennoch in wenigen Fällen zu entgegengesetzten Weiserjahren am selben Standort. Dies ist der Fall für das Jahr 1953 am Standort Rehberg und das Jahr 1916 am Standort Tolseboda. Bei beiden Jahren lösten unterschiedliche Ereignisse bei den Buchen ein negatives und bei den Fichten dagegen ein positives Weiserjahr aus. Im Jahr 1953 wurde in den Alpen und vielen Mittelgebirgen ein Frosteinbruch im Mai verzeichnet, der den Zuwachs von Buchen stark beeinträchtigte, da ein Advektiv-Frost besonders in höheren Lagen schädigt (Elling u. a., 1987). Zusätzlich zu diesem Frostergebnis waren die Buchen am Rehberg noch durch eine Vorjahres-Dürre prädisponiert. Die Fichten profitierten dagegen von einer kühl-feuchten Witterung im laufenden Jahr der Ringbildung und möglicherweise auch vom Zuwachsrückgang der Buchen. Deren verringerter Wasserverbrauch stand nun den Fichten zur Verfügung. Die Ursache des negativen Weiserjahres 1916 der Buchen am Standort Tolseboda ist ein Niederschlagsdefizit im Juni des Vorjahres, während die Temperaturen um das langjährige Mittel schwankten. Zu dieser Vorschädigung kam ein starkes Frostereignis im Mai 1916 hinzu. Die Fichten nutzen demgegenüber ein Niederschlagsplus im Juni des laufenden Jahres.

Aus diesen beiden Beispielen wird erneut deutlich, dass die Buchen im Gegensatz zu den Fichten in erheblichem Maße unter Spätfrösten leiden, besonders wenn eine Prädisposition vorliegt. Allerdings konnte in keinem dieser beiden Fälle eine negative Nachwirkung auf das Folgejahr festgestellt werden. Die Buchen zeigen bereits ein Jahr später zwar noch unterdurchschnittlichen Zuwachs, doch eine deutliche Erholung.

5.3.3 Zeitliche Entwicklung der Klima-Zuwachs-Beziehungen

Nach der Unterteilung des Gesamtzeitraumes mit verschiedenen Ansätzen, zum Einen mit der Trennung bei 1950 in zwei Phasen mit 56 Jahren, in 40-Jahres-Abschnitte entsprechend der unterschiedlichen Phasen der globalen Temperaturentwicklung und zum Anderen mit gleitenden Zeitfenstern, ließ die Witterungsabhängigkeit beider Baumarten eine dynamische Entwicklung über die Zeit erkennen.

Bei den **Buchen** zeigt sich besonders deutlich, dass sich die Trockenheitsempfindlichkeit gegenüber dem Vorjahres-Spätsommer erst seit Mitte des letzten Jahrhunderts derart

manifestiert hat, dass auf allen Standorten dieses starke Signal zu finden ist. Seit Mitte der 1990er Jahre verschärft sich diese Beziehung um ein Weiteres. Zuvor zeigten sich wenige signifikante Klimasignale bis auf eine positive Reaktion auf Frühjahrs-/Frühsommer-Niederschläge (Siggaboda, Tolseboda). Im Übrigen sind die Signale sehr differenziert und lassen unter den Buchen keine gleichsinnigen Reaktionen erkennen. Auch der positive Einfluss des Vorjahres-Oktober (Siggaboda) entwickelte sich erst seit etwa 1950, wohingegen er in Rågetaåsen zu Gunsten des Vorjahres-Juli verlorenging.

Das wesentliche Zuwachsbestimmende Klimasignal der Buchen, welches sich in der Untersuchung über den Gesamtzeitraum bereits darlegte, besteht demnach erst seit etwa 50 Jahren. Durch die phasenweise Betrachtung wird auch die Stärke des Signals erhöht. Dies bestätigt auch Neumann (2001) in seiner Untersuchung an Fichten im Osterzgebirge. Er unterteilte den gesamten Beobachtungszeitraum in 3 Abschnitte und bemerkt, dass die Regressionsbeziehungen sich zwischen den Teilzeiträumen unterscheiden und demnach auch das korrigierte Bestimmtheitsmaß höher ist. Jedoch stellte er fest, dass das Hauptklimasignal der Fichten, der Juni-Niederschlag, im frühesten der Abschnitte am stärksten war und sich in den letzten Jahrzehnten abgeschwächt hat.

Auch bei den **Fichten** der vorliegenden Untersuchung war der Juni-Niederschlag die wichtigste Witterungsvariable, doch durch die Unterteilung des Gesamtzeitraumes wird deutlich, dass auch hier die statistische Beziehung zwischen Zuwachs und Witterung nicht konstant ist. Der Juni-Niederschlag verliert ebenso seinen starken Einfluss in den letzten Jahrzehnten und weicht einer starken Korrelation mit dem Vorjahres-Sommer und zeigt eine ähnliche jedoch schwächere Trockenheitsempfindlichkeit wie die Buchen. Auch Kahle (1994) und Dobbertin und Giuggiola (2006) nennen neben den Standortsfaktoren Trockenstress als die wachstumsbestimmenden Umweltfaktoren für die Fichte. Die Phasen extremer Wasserbilanzdefizite in Juli und August sind in jüngerer Zeit extremer ausgeprägt und treten in kürzeren Zeitintervallen auf. Mäkinen u. a. (2001) verglichen die Klimasignale des Fichtenzuwachses in Südfinnland zwischen gesunden und kranken Fichtenbeständen. Sie entdeckten verschiedenartige Reaktionen, wie z.B. hohe Mai-Temperaturen positive Auswirkungen auf den Zuwachs der gesunden Fichten hatten während die kranken keinen höheren Zuwachs zeigten. Doch beide, gesunde wie kranke Fichten, reagierten mit Zuwachsrückgängen infolge heißer Vorjahres-Sommer.

Kern und Popa (2007) beschreiben die gleichen Witterungseinflüsse (niedrige Temperatur und hohe Niederschläge im Juli des Vorjahres) als die Zuwachsbestimmenden für Buche, Fichte und Tanne im Apuseni-Gebirge (1100-1200 m ü. NN) in Rumänien. Doch sie nennen die temperaturbedingte Anregung einer Mast als die Ursache für den star-

ken Einfluss des Julis auf die Buchen und nicht Trockenheitsempfindlichkeit. Weiterhin haben im Apuseni-Gebirge warme Wintertemperaturen einen positiven Einfluss auf den Zuwachs von Buchen und Tannen, denn starker Bodenfrost bringt einen hohen Verlust von Feinwurzelmasse mit sich, die im Frühjahr zur Wasser- und Nährstoffaufnahme fehlt. Dieses Klimasignal findet sich jedoch nicht in der vorliegenden Untersuchung und scheint eher ein Phänomen der höheren Lagen zu sein. In sehr kalten Wintern kann auch Frosttrocknis den Höhen- und Radialzuwachs der Fichte durch hohen Nadelverlust schädigen. Dies berichtet Kullman (1996) für Schweden.

In gleicher Weise erkannten auch Eckstein und Krause (1989) eine gestiegene Klimaabhängigkeit von Fichten in Norddeutschland seit den 1950er Jahren. Ebenso registrierte Röhle (1987) seit Ende der 1960er Jahre eine gestiegene Sensitivität bei Fichten des Bayerischen Waldes. Biondi (2000) untersuchte Klima-Zuwachs-Beziehungen von Douglasien in Idaho, USA, und unterteilte den Beobachtungszeitraum in zwei 50-Jahres-Abschnitte. Er konnte nachweisen, dass sich Wasserstress-Signale seit dem 20. Jahrhundert vom Juni über Mai in den April vorverlegt haben. Dazu kam eine negative Antwort auf April-Temperaturen, was insgesamt auf eine gestiegene Abhängigkeit von Bodenfeuchte deutet. Dittmar u. a. (2003) diskutieren die in den letzten Jahrzehnten gestiegene Spätfrostempfindlichkeit der Buchen und Zuwachsdepressionen nach 1950 auf höher gelegenen Standorten als eine Ursache von erhöhten SO_2 Langzeit-Einträgen. Im Splintholz kranker Buchen ist eine signifikant höhere Konzentration von Schwefel zu finden als in dem gesunder Buchen (Dittmar u. a., 1997).

Aussagekraft gesteigener Sensitivität

Eine mögliche Ursache für die straffere Beziehung zwischen Witterung und Zuwachs in den letzten Jahrzehnten mag im Anstieg der Sensitivität mit steigendem Baumalter liegen. Seit 1950 stieg die Sensitivität beider Baumarten auf den schwedischen Standorten um durchschnittlich 3%, am Rehberg war der Anstieg mit 5% bei den Fichten und sogar 12% bei den Buchen besonders hoch. Doch Strackee und Jansma (1992) beschreiben die mittlere Sensitivität als eine Funktion der Standardabweichung und der Autokorrelation 1. Ordnung. Das bedeutet: hinter einer hohen Sensitivität steckt entweder eine hohe Standardabweichung oder eine niedrige Autokorrelation. Bei der näheren Betrachtung der Parameter Standardabweichung und Autokorrelation zeigen sich interessante Unterschiede zwischen den Baumarten. Die Autokorrelation der Buchen am Rehberg ist in den letzten Jahrzehnten drastisch gesunken. Das ist ein sicheres Zeichen für eine erhöhte Witterungssensitivität gegenüber den aktuellen Bedingungen und dem gleichzeitigen

Verlust des Puffer- und Regelungsvermögens gegenüber externen Einflüssen. Auch Beck (2007) bemerkt diese gesteigerte Sensitivität und das Absinken der Autokorrelation bei Fichten und Buchen in Süddeutschland und beschreibt diese Entwicklung als bedenklich. Fehlt Bäumen ein interner, regelnder Ausgleich, können wiederholte extreme Witterungsbedingungen langanhaltende Zuwachsdepressionen hervorrufen, die langfristig zu Schäden führen können. Das Sinken der Autokorrelation zeigt sich auch auf den schwedischen Buchenstandorten, doch in weit geringerem Ausmaß. Die Reaktionen der Fichten sind differenzierter. Interessant sind die Fichten in Tulseboda, die eine komplementäre Entwicklung zeigen, die Autokorrelation hat seit 1950 stark zugenommen, während die mittlere Sensitivität den geringsten Anstieg aller Standorte erkennen lässt. Diese Divergenz zwischen den Parametern Autokorrelation und Standardabweichung und deren Einfluss in der Funktion als mittlerer Sensitivität, demonstriert die geringe Aussagefähigkeit der mittleren Sensitivität über Empfindlichkeit gegenüber exogenen Einflüssen, da deren Ursachen nicht deutlich werden.

Eine weitere Schwierigkeit bei der Interpretation von mittleren Sensitivitäten liegt in deren Berechnung. Sie ergeben sich aus Differenzen zwischen aufeinander folgenden Jahrringbreiten. Sind also diese Unterschiede klein, da kleine Jahrringe aufeinander folgen, ergibt sich daraus eine geringe Sensitivität. Das hat zur Folge, dass Zuwachszeitreihen mit Zuwachsdepressionen über längere Zeiträume, wie es bei Bäumen, die besonders sensitiv auf ihre Umwelt reagieren, vorkommen kann, geringe Sensitivitäten zugeordnet werden.

Aus diesen Gründen sollte bei der Beurteilung von Reaktionsempfindlichkeit gegenüber externen Einflüssen weniger die mittlere Sensitivität als die Autokorrelation 1. Ordnung und die Standardabweichung bzw. Varianz beachtet werden (Strackee und Jansma, 1992).

5.4 Dendroökologische Konkurrenzanalyse

5.4.1 Bestandesebene

Auf den schwedischen Standorten zeigt sich deutlich der allgemeine Zuwachsvorteil der Fichte, in der Höhe wie in der Breite. In Tolseboda und Siggaboda bilden die Fichten die obere Baumschicht, während die Buche in der Regel in der zweiten Baumschicht zu finden ist. Am Standort Rågetaåsen sind dagegen beide Baumarten gleichermaßen in der oberen Baumschicht vertreten. Doch im radialen Zuwachs ist der große Vorsprung der Fichte auf allen Standorten zu erkennen. Trotz des nicht unwesentlichen Altersunterschiedes legen Untersuchungen des Zuwachses nach dem Markalter das deutlich schwächere Wachstum der älteren Buchen offen dar. Einer Korrektur eines artbedingten Zuwachsunterschiedes bedarf es hier nicht. Dies verdeutlicht die Untersuchung des Vergleichstandortes im Harz. An diesem Standort befinden sich beide Arten in einem Bereich, der ihnen physiologisch gute Bedingungen liefert. Beide Arten sind etwa gleichalt, beide sind an der oberen Baumschicht beteiligt und auch der radiale Zuwachs liegt auf einem vergleichbar hohen Niveau. Das Potential der Buche, eine mittlere Jahrringbreite zu erreichen, die der Fichte ähnelt, ist demnach sehr groß, wenn sie optimale Wuchsbedingungen hat.

Eine mögliche Erklärung für den Zuwachsvorteil der Fichte an den schwedischen Standorten mag im Wurzelraum zu suchen sein. Erste Untersuchungen der Feinwurzelverteilung von Buche und Fichte auf den Versuchsflächen ergab eine Dominanz der Fichtenwurzeln in den oberen 20 cm der Bodenschicht auf den schwedischen Flächen (Kampf, unveröff.). Das sich erst in tieferen Schichten ausbildende Herzwurzelsystem der Buchen ist somit abgeschnitten von kurzfristigen Niederschlagsereignissen. Andererseits hat es aufgrund des hochanstehenden Grundgesteins vermutlich auch keinen Anschluss an das Grundwasser.

An den Standorten Siggaboda und Tolseboda ergibt sich ein besonders großer Altersunterschied zwischen den Arten. Dies ist der Entstehungsgeschichte der Mischbestände geschuldet. Die Buche besiedelte die Standorte lange vor der Fichte, die erst in jüngster Zeit, innerhalb der letzten Generation vom Norden her eingewandert ist (Björkman und Bradshaw, 1996). Die Fichte zeigt an diesen Standorten ein weitaus stärkeres Wachstumspotential als die Buche und hat diese daher in kürzester Zeit im Höhen- wie auch im Radialzuwachs überholt. Die geringen Zuwächse der Buchen sind an diesen Standorten zum Teil auch den lichten Bedingungen geschuldet, deretwegen die Buchen aller Wahrscheinlichkeit nach häufiger fruktifizieren. Hinzu kommt auch die notwendige Borken-

bildung, um der Sonnenbrandgefahr vorzubeugen. Diese anatomische Anpassung erhöht den Assimilatbedarf, der unter anderem zu Lasten der Holzproduktion geschieht.

Anders zeigt sich die Situation in Rågetaåsen. Das eigentliche Alter beider Baumarten konnte leider in den untersuchten Probebäumen nicht nachgewiesen werden, dennoch sind beide an diesem Standort in etwa gleichalt (Niklasson, 2002). Allerdings liegt auch hier der radiale Zuwachs der Fichten über dem der Buchen; jedoch nicht in dem Ausmaß wie in Siggaboda und Tulseboda, denn der Standort Rågetaåsen ist durch die wesentlich niederschlagsreichere Witterung bevorteilt. Auch das ausgeglichene Höhenverhältnis bestätigt diesem Standort eine Tendenz zum Konkurrenzgleichgewicht. Des Weiteren befindet sich Rågetaåsen als der einzige Untersuchungsstandort in Schweden noch innerhalb des Areals der Buchenwälder (Abb. 3.2).

Zeitliche Entwicklung des Zuwachsverhältnisses

Betrachtet man die zeitliche Veränderung der mittleren Zuwächse beider Arten in den bereits festgelegten Zeitperioden von jeweils 56 Jahren mit Trennung der Abschnitte um 1950, so zeigt sich grundsätzlich eine Abnahme in der letzten Periode. Eine Begründung dieses schwächeren Zuwachses durch einen natürlichen altersbedingten Rückgang ist nicht gerechtfertigt, da besonders in den jüngeren Abschnitten der rohen Standort-Chronologien auch jüngere Bäume enthalten sind, die noch keine Jahrringbreitenabnahme verzeichnen lassen.

Eine Ausnahme bilden die Buchen am Standort **Siggaboda**, sie erhöhen ihren Zuwachs seit 1950. Hier verbirgt sich jedoch eine Loslösung von einer etwa 150 Jahre andauernden Zuwachsdepression, die die Buchen des gesamten Standorts betraf. Nach einem starken Jugendwachstum und einem natürlichen, altersbedingten Rückgang des Wachstums, setzt diese Depression etwa 1780 ein und wird durch ein plötzliches Ereignis um 1930 beendet. Anschließend steigt das radiale Wachstum auf ein wesentlich höheres Niveau, welches bis heute besteht (Abb. 4.52). Die beprobten Fichten der Untersuchungsfläche geben aller Wahrscheinlichkeit nach nicht den wirklichen Zeitraum der Besiedelung des Standorts wider. Nach Björkman und Bradshaw (1996) ist die Fichte bereits seit wenigstens 200 Jahren in diesen Beständen etabliert. Das bedeutet: die Zuwachsdepression der Buche kann durch das Aufkommen und den Konkurrenzdruck durch die Fichte begründet sein. Bei dem Ereignis um 1930, welches auch einen Zuwachsanstieg bei den Fichten hervorruft, muss es sich um ein standortweites Ereignis gehandelt haben. Ein größeres Brandereignis kann ausgeschlossen werden. Das letzte Feuer in Siggaboda wird

anhand von Brandnarben an alten Kieferstubben auf 1748 von Niklasson u. a. (2002) datiert. Dieser Kiefernstock befindet sich direkt angrenzend an die Untersuchungsfläche im Naturreservat. In der Buchen-Chronologie kann dieses Feuer als Zuwachseinbruch nachgewiesen werden, doch bereits 2 Jahre später hat sich der Zuwachs normalisiert. In der Folge zeigt sich im Zuwachs der Buchen auch kein dauerhafter Anstieg wie nach 1930. Diese unterschiedlichen Reaktionen müssen daher auch von unterschiedlichen Ereignissen ausgelöst worden sein. Mit hoher Wahrscheinlichkeit ist ein schweres Sturmereignis die Ursache. Am 7. Juli des Jahres 1929 ist die gesamte Ostküste Schwedens von starken Sturmböhen betroffen. Dies mag zu Konkurrenzvorteilen der nicht betroffenen Bäume geführt haben. Leider sind vorort keine Beweise für dieses Ereignis zu finden, da gefallene Stämme entfernt worden sind. Im Zuwachsgeschehen zwischen Buche und Fichte zeichnet sich seit den 1980er Jahren eine Trendwende ab. Während der Zuwachs der Fichten sinkt, steigt der der Buchen leicht an.

Im vergangenen Zuwachsgeschehen der Buchen am Standort **Tolseboda** erkennt man gleichermaßen ungewöhnliche, vom natürlicherweise zu erwartenden Zuwachsverlauf abweichende Trends. Nach 1847, einem Zuwachseinbruch der Buchen kommt es plötzlich zu einem immensen Anstieg des Zuwachses (Abb. 4.53). Solch eine starke Reaktion ergibt sich ganz ähnlich im Falle einer Lichtraumerweiterung durch Entfernen beschattender Konkurrenten und gleichzeitigem Verringern der Wurzelkonkurrenz. Nach Angaben des früheren Gutsbesitzers von Tolseboda hat seit der ersten Hälfte des 18. Jahrhunderts kein Einschlag mehr stattgefunden. Aber nach den vorliegenden Ergebnissen muss um 1848 ein Einschlag oder ein ähnliches, großräumiges Ereignis stattgefunden haben. Nach einem kräftigen Anstieg des Zuwachses fiel er wieder ab und befindet sich seit 1890 auf einem noch heute gehaltenen Niveau. Der abfallende Trend bis 1890 kann in gleicher Weise bei den Fichten des Standorts beobachtet werden. Nach einer kurzen, hochaktiven Phase der Neuordnung des aufgelichteten Bestandes sinken die Zuwächse wieder. In den folgenden Jahren kann man in Tolseboda ein interessantes Wechselspiel zwischen Steigen und Fallen der Zuwächse zwischen Buche und Fichte beobachten. Auch an diesem Standort sind die Fichten vermutlich länger etabliert als dies die beprobten Bäume vermuten lassen. Zunächst scheinen sie recht deutlich den Zuwachs der Buchen zu bestimmen. In einer Phase von 1915-1930 dreht sich das Bild jedoch um, der Zuwachs der Buchen steigt, während der der Fichten sinkt. Erst seit etwa 1950 verlaufen die Zuwachstrends beider Arten annähernd parallel. Seit Mitte der 1990er Jahre steigen die Zuwächse beider Arten gleichermaßen an.

Auf den Standorten Tolseboda und Siggaboda hat es also Ereignisse gegeben, die entweder menschlichen Ursprungs waren oder anderweitiger Art, aber in beiden Fällen solchen

Ausmaßes, dass sie das Zuwachsgeschehen beider Arten derart beeinflussten, dass zumindest kurzzeitig kein natürlicher Zuwachsverlauf mehr zu erkennen ist. Dies erschwert die Interpretation der Zuwachsverhältnisse zwischen Buchen und Fichten. Dennoch kann beobachtet werden, dass in Tulseboda und Siggaboda der Zuwachsvorsprung der Fichten vor den Buchen seit etwa 1950 stark abnimmt.

Der Standort **Rågetaåsen** war vor seiner Besiedelung mit Buchen und Fichten ein ehemals lichter Bestand; noch heute befinden sich einzelne alte Birken als Zeugen dieser Vergangenheit im Bestand. Vermutlich wurden diese Verhältnisse durch Einschlag oder Beweidung erhalten (Niklasson, 2002). Die ältesten Buchen des Bestandes wurden von Niklasson auf 1871 datiert. Die älteste der für die vorliegende Untersuchung beprobten Buchen kann auf 1889 datiert werden, doch leider musste die Standorts-Chronologie aufgrund der geringen Belegung auf 1908 gekürzt werden. Ähnlich verhält es sich mit den Fichten. Der älteste beprobte Baum kann auf 1925 datiert werden, doch musste auch hier die Standorts-Chronologie auf 1945 gekürzt werden. Grundsätzlich zeigt das Zuwachsgeschehen beider Arten an diesem Standort einen gleichmäßigen Verlauf und ist nicht geprägt von einschneidenden Ereignissen. Lediglich in den Jahren nach 1923 erhöht sich der Zuwachs der Buchen kurzzeitig; vermutlich ist dies die positive Folge mehrerer Orkane Ende Januar 1923, die Süd-Götaland beeinträchtigten. Die Zuwachsverhältnisse von Buche und Fichte sind an diesem Standort, abgesehen von einem Vorsprung der Fichte, sehr ausgeglichen und beschreiben ähnliche Trendverläufe mit einem gleichmäßigen Rückgang der Jahrringbreiten seit etwa 1980. Aufgrund der Kürze der Fichten-Chronologie konnte hier keine Unterteilung in zwei Perioden vorgenommen werden.

Zur Untersuchungsfläche **Rehberg** liegen leider keine Angaben zur historischen Entwicklung vor. Der Standort befindet sich in der montanen Höhenstufe im Harz und liegt geografisch zentral in Deutschland und somit im Kern des Verbreitungsgebietes der Buche. Die Zuwachsanalysen belegen deutlich, dass die Buche in einem Mischbestand mit Fichte ein hohes Potential hat, ähnliche Zuwächse zu erzielen. Die beprobten Bäume beider Arten sind alle etwa gleichalt und in den rohen Standorts-Chronologien sind klare Alterstrends zu erkennen. Hier zeigt sich erwartungsgemäß ein Vorteil der Fichte in der Jugend. Während sich die Jahrringbreiten der Buche in einem stetig abnehmenden Trend befinden, erhöhen die Fichten ihre Zuwächse seit etwa 1980 deutlich gegenüber der Buche. Eine Ursache für diese neuerliche Überlegenheit der Fichte könnten die für die Buche seit den 1990er Jahren ungünstigen Bedingungen sein, die deren Konkurrenzkraft reduzieren. Andererseits beobachtet Koutavas (2008) in seiner Untersuchung an Griechischer Tanne (*Abies cephalonica* LOUD.) ebenfalls einen Anstieg des Zuwachses

seit den 1990er Jahren. Da sich keine erklärenden Korrelationen mit Witterungsdaten ergeben, vermutet er einen Düngeeffekt durch atmosphärisches CO_2 . Das Überschreiten einer individuellen Schwelle des CO_2 -Gehaltes führte zu einem markanten Zuwachsgewinn. Die untersuchten Tannen befanden sich auf der griechischen Insel Kefalonia in Höhenlagen von 1300-1600 m ü. NN. Es könnte demnach ein Effekt der höheren Lagen sein, was wiederum dafür spräche, dass auch die Fichten am Rehberg von erhöhten CO_2 -Gehalten profitieren. Auch Hirschberg u. a. (2003) bestätigen die Fähigkeit der Fichte, erhöhte CO_2 -Gehalte nutzen zu können. Die jährlichen Emissionen stiegen zwischen 1970 und 2004 um 80 %. Die atmosphärischen CO_2 Konzentrationen von 379 ppm im Jahr 2005 übertreffen die natürliche Entwicklung der letzten 650 000 Jahre (IPCC, 2007). Bei vergleichenden Untersuchungen der Zuwachstrends verschiedener Baumarten entdecken Spiecker u. a. (1996) im gesamteuropäischen Raum deutliche Anstiege des Baumwachstums, im Besonderen in Mitteleuropa und Süd-Skandinavien (Kap. 2.1). Die Ursachen sind vielgestaltig und reichen von Änderung der Landnutzung durch den Menschen über Klimaänderungen, natürliche Störungen bis hin zu Abweichungen der Konzentrationen von CO_2 , O_3 und SO_2 sowie Stickstoffanreicherung (Spiecker, 1999). Bei Langzeit-Untersuchungen der Jahrringbreiten und des Volumen-Zuwachses von Fichten in Süddeutschland, konnte nachgewiesen werden, dass der radiale Zuwachs sowie die Mortalität stark mit den Witterungsbedingungen des vorjährigen Sommers korreliert (Spiecker, 1995). Insbesondere scheinen erhöhte Stickstoffeinträge die Sensitivität des Wachstums gegenüber dem Wasserangebot zu beeinträchtigen (Spiecker, 1991).

Im Gegensatz zu den Ergebnissen am Standort Rehberg erwartet Röhle (1995) eine Abnahme der Konkurrenzkraft der Fichte in Bayern. Bei steigenden Jahresmitteltemperaturen und veränderter Niederschlagsverteilung wird das Potential von Buche, Eiche und Kiefer steigen. Der Fichte wird für Mitteleuropa das schlechteste Anpassungspotential attestiert, was jedoch hauptsächlich in ihrem künstlichen Anbau auf nicht geeigneten Standorten begründet ist. Hinzu kommt ihre hohe Empfindlichkeit gegenüber heiß-trockenen Sommern (Dobbertin und Giuggiola, 2006) und ihre hohe Kalamitätsanfälligkeit (Lexer u. a., 2006). Jedoch wird sie genau wie Weiß-Tanne und Berg-Ahorn ein wichtiger Bestandteil der Bergmischwälder bleiben (Neumann, 2006; Gemballa und Schlutow, 2007; Kölling u. a., 2007; Profft u. a., 2007).

Die zukünftige Position der Buche in Deutschland wurde sehr kontrovers diskutiert (Felbermeier, 1994; Rennenberg u. a., 2004; Ammer u. a., 2005; Bolte, 2005; Kölling u. a., 2005; Dobbertin und Giuggiola, 2006). Die hohe genetische Variabilität der Buche und ihr oft unterschätztes Anpassungspotential an Trockenstress werden ihr jedoch zweifellos in Zukunft die Stellung als eine der wichtigsten Laubbaumarten Mitteleuropas erhalten

(vgl. Roloff und Grundmann, 2008). Lediglich Extremstandorte werden ihr Schwierigkeiten bereiten, wie es sich bereits am südexponierten Hangstandort Rehberg andeutet.

Matyssek (2003) untersuchte das Konkurrenzverhalten von Buche und Fichte um Energie- und Stoffressourcen bei Umweltveränderungen. Er stellte dabei fest, dass die Fichte in Mischbeständen mit der Buche in Zukunft von deren Ozon-Empfindlichkeit profitieren könnte. Die Fichte scheint dagegen durch den Bau ihrer Nadeln deutlich weniger Ozon aufzunehmen. Zwar wirken sich Ozon-Schäden bislang nicht messbar auf den Stammzuwachs aus, doch Langzeit-Einwirkungen von erhöhten O_3 -Konzentrationen sind noch unbekannt.

Ein wesentlicher Faktor, der die Konkurrenzkraft beider Baumarten bestimmt, ist das Verhältnis des Kohlenstoff-Verbrauchs zur Kohlenstoff-Produktion. Das Kronenvolumen und der eingenommene Kronenraum pro Blattmasse geben Aufschluss über das Potential beider Konkurrenzstrategien. Reiter u. a. (2005) analysierten Kohlenstoff-Verbrauch und Kohlenstoff-Produktion pro Kronenvolumen in Licht- und Schattenkronen von Buchen und Fichten in Süddeutschland. Die Kohlenstoff-Produktion war zwar in den Lichtkronen höher, aber es gab keine Unterschiede zwischen den Arten. Bei Atmungs- oder Transpirationsverlusten gab es weder Unterschiede zwischen Licht- und Schattenkronen noch zwischen den Arten. Die Buche nimmt jedoch grundsätzlich mehr Kronenfläche pro Blattmasse ein. Die Blattmasse in den Schattenkronen der Buchen war deutlich größer, während sich bei den Fichten keine Unterschiede in der Blattmasse zwischen Licht- und Schattenkrone ergab. Reiter u. a. (2005) schlussfolgern daraus, dass die Konkurrenzstärke durch die vorhandene Blattmasse und den jährlichen Zuwachs des Astvolumens bestimmt wird und nicht durch den jährlichen Zuwachs der Blattmasse.

5.4.2 Plotebene

Naturwaldstandorte dienen als ideale Untersuchungsobjekte, um Mischungsstrukturen zu studieren, die sich ohne menschliche Eingriffe einstellen. Als Modellvorgabe für die vorliegende Untersuchung galt es, Konkurrenzsituationen, intra- und interspezifisch zwischen Buche und Fichte, in den Naturwaldreservaten aufzuspüren und auf ihr Zuwachsverhalten zu untersuchen. Waldbaukonzepte wie die Gruppendurchforstung tragen das Prädikat, der natürlichen Waldentwicklung nachempfunden zu sein. Mit Hilfe dieser Untersuchung wird es erneut bestätigt.

Intraspezifische Wuchskonstellation

Der Vorteil der Gruppendurchforstung wird besonders deutlich, betrachtet man natürlich erwachsene Gruppen gleichartiger Bäume. Das Wachstum als Kollektiv kann bei Fichte und Buche beobachtet werden. Besonders die intraspezifischen Buchengruppen zeigen gleichgerichtete Zuwachstrends und es ist selten möglich, zwei unterschiedliche soziale Klassen in der Gruppe auszuscheiden. Dagegen bilden sich bei Fichte deutlich verschiedene Klassen innerhalb einer Gruppe aus. Interessant ist hierbei, dass gerade die sozial stärkeren Individuen der Fichten ein weitaus sensitiveres Wachstum aufweisen. Sie reagieren mit starkem Zuwachsrückgang empfindlicher auf negative Ereignisse oder Bedingungen, aber umgekehrt können sie genauso positive Ereignisse besser umsetzen. Bei den Fichten scheint also das Individuum auch innerhalb einer gleichartigen Gruppe stets im Vordergrund zu stehen.

Diese Ergebnisse gelten standortsübergreifend für beide Arten. Die gesonderte Betrachtung der Zentralbäume auf differenzierende Eigenschaften (mittlere Jahrringbreite und Sensitivität) zwischen Bäumen unter intra- oder interspezifischer Konkurrenz ergab keine Parallelen, mit Ausnahme einer erhöhten Sensitivität der zentralen Buchen in gleichartigen Gruppen gegenüber zentralen Buchen unter interspezifischer Konkurrenz auf den schwedischen Standorten. Am Standort Rehberg dreht sich dieses Verhältnis um. Eine Interpretation dieses Ergebnisses kann nur mit Vorsicht erfolgen, da auf den Versuchstandorten die intraspezifische Konkurrenzsituation je Art nur einfach erhoben wurde und somit die Datengrundlage zu gering ist, als dass man die Ergebnisse verallgemeinern könnte. Dennoch scheinen die reinen Buchengruppen in Schweden intensiver auf Witterungsbedingungen reagieren zu können, während Buchen unter interspezifischer Konkurrenz stärker den standörtlichen Verhältnissen unterliegen.

Interspezifische Wuchskonstellation

Im Gegensatz zu den reinen Gruppen finden sich gemischte Gruppen, bei der eine Baumart der direkten Konkurrenz der anderen Art ausgesetzt ist, relativ selten auf den Untersuchungsflächen.

Buche in Konkurrenz zu Fichte Ist die Buche umstanden von Fichte, zeigt sie eine sichtliche Unterlegenheit. Zwar ist der Wuchstrend häufig ein ähnlicher, aber auf einem weit niedrigeren Zuwachsniveau. Weiterhin ist sie wesentlich sensitiver als die sie umgebenden Fichten und zeigt häufig entgegengesetzte Reaktionen auf Witterungsereignisse.

Grundsätzlich ist es schwer, die individuellen Plotsituationen zu vergleichen, doch standortsübergreifend konnte der Eindruck gewonnen werden, dass die Buche besonders auf den schwedischen Standorten in einer solchen Konstellation Schwierigkeiten hat. Mikrostandörtliche Unterschiede zwischen den Einzelplots ergeben differenzierte Ausgangsbedingungen und so zeigen dennoch einzelne Gruppen Tendenzen eines Konkurrenzgleichgewichts. Am Vergleichsstandort Rehberg ist die Buche nicht weniger unterlegen, doch lässt sie hier ein stärkeres Potential erkennen, selbst aus einer geringeren sozialen Stellung heraus, ihren Zuwachs zu steigern und von den Fichten unabhängigen Wuchstrends zu folgen.

Fichte in Konkurrenz zu Buche Die Fichte behauptet dagegen ihre oftmals sogar vorherrschende Stellung im Falle direkter Buchenkonkurrenz. Auch in der interspezifischen Wuchskonstellation erkennt man erneut das individuell bestimmte Wachstum der Fichte. So kann sie die umstehenden Buchen unter einen besonderen Konkurrenzdruck setzen oder beide Arten wachsen sehr unabhängig voneinander, beides ist gleich zu bewerten. Hierbei können die Buchen trotz der zentralen Fichte ein Wuchskollektiv bilden und ihrem eigenen Trend folgen. Die Überlegenheit der Fichte im Höhen- und Radialzuwachs ist wesentlich abhängig von ihrer sozialen Stellung. So stellt sich die Situation auf den schwedischen Standorten dar. Am Rehberg spiegeln die Einzelplots grundsätzlich die allgemeine Bestandessituation wider. Das bedeutet, dass diese direkte Konkurrenzsituation für die Fichte kein Extrem darstellt. Dies belegt erneut, wie unabhängig die Fichte in einem gleichalten Mischbestand mit Buche wächst. In der Fachliteratur wurde schon auf die bessere Bekronung, die größere Stabilität und letztendlich die bessere Wachstumsleistung von Fichten in Mischung mit Laubgehölzen, im Besonderen mit Buche berichtet (Otto, 1985; Schütz, 1989).

5.4.3 Situation gehäufte Extremereignisse

Temperaturänderungen über Zeiträume von Jahrhunderten stellen für Gehölze geringe Herausforderungen dar, die sie in der erdgeschichtlichen Vergangenheit schon häufig erlebt haben. Anpassungsmechanismen, die über Selektion und Regeneration wirken, und die grundsätzlich hohe genetische Diversität der heimischen Baumarten ermöglichen, derartige Herausforderungen ohne Schwierigkeiten zu überstehen. Neu ist die derzeitige Geschwindigkeit, in der sich Temperaturzunahmen vollziehen. Zeiträume von Jahrzehnten liegen deutlich unterhalb der Verjüngungszeiträume der Waldbaumarten, so dass die natürlichen Selektionsmechanismen nicht mehr greifen, die zu einer Anpasstheit

führen könnten. Doch weitaus größere Schwierigkeiten für die Adaption und am Ende das Überleben der Baumarten, stellt die zunehmende Häufigkeit von Extremereignissen dar (Roloff und Grundmann, 2008).

Auswirkungen von Extremereignissen lassen sich u.a. anhand von besonders schmalen Jahrringen nachweisen. So wurden in der vorliegenden Untersuchung die jeweils 20 schmalsten Jahrringe beider Arten miteinander verglichen. Zunächst zeigen die Vergleiche der mittleren Jahrringbreiten den generell höheren Zuwachs der Fichten. Wie zu erwarten liegen auch die Zuwächse der 20 schmalsten Jahre der Buche im Mittelwert deutlich unter denen der 20 schmalsten der Fichte. Vergleicht man nun den Zuwachsvorteil, den die Fichte im Mittelwert über alle Jahre hat, mit dem, den die Fichte auch noch in Extremjahren hat, so wird deutlich, dass selbst in Extremjahren der Vorsprung der Fichte bedeutend hoch sein kann. Dies ist sehr ausdrücklich am Standort Siggaboda zu sehen. Auch Bonn (1998) führte eine ähnliche Analyse zur Konkurrenzdynamik zwischen Eichen und Buchen in Mischbeständen durch. Er wies eine Steigerung der Konkurrenzkraft der Eichen gegenüber den Buchen in zuwachsschwachen Jahren nach. Grund ist hier u.a. ein ausgeglicheneres Zuwachsverhalten der Eichen. In Extremjahren zeigen sie zwar einen leichten Rückgang in den Jahrringbreiten, doch bedeuten diese für die Buchen deutliche Einbußen.

Mäkinen u. a. (2002) untersuchten die Zuwachsreaktionen von Fichten in einer europäischen Studie. Sie unterteilten die Zuwachsvariation in verschiedene Frequenzen und analysierten diese getrennt auf Unterschiede und Gleichheiten zwischen den Fichten der verschiedenen Regionen. Sie stellten fest, dass die größten Übereinstimmungen der Signale in den mittleren Frequenzen innerhalb der Regionen zu finden waren. Daraus schließen sie, dass insbesondere die mittleren Frequenzen der Zuwachsvariation von extremen Witterungsereignissen beeinflusst werden. Die Verschiedenartigkeit zwischen den Regionen begründet sich in Herkunftsunterschieden und deren unterschiedliche Auswirkungen auf die physiologischen Fähigkeiten der Bäume auf Extreme reagieren zu können.

Die sensitive Buche reagiert auf Extremereignisse wie Dürresommer mit starken Zuwachsrückgängen, von denen sie sich aber ebenso schnell wieder erholen kann. Ein bis maximal zwei Jahre nach einem Dürrejahr liegt der Zuwachs wieder auf mittlerem Niveau. Leuzinger u. a. (2005) konnten bei ihrer Untersuchung der Reaktionen verschiedener Baumarten auf extreme Trockenheit in Mitteleuropa keine deutlichen Veränderungen in Saftfluss oder Photosyntheseleistung erkennen. Kahle (2006) wies zwar reduzierten Zuwachs bei Buchen niedriger und mittlerer Höhenlage in Süddeutschland als Konsequenz starker Trockenheiten nach, doch zeigten die Buchen bereits in den Folgejahren wieder

erholtes Wachstum. Allerdings wird der Aspekt der Sekundärschäden in Zukunft von größerer Bedeutung sein. Das Beispiel der Buchen am Standort Rehberg macht es deutlich: Der starke Rückgang der Buchenzuwächse im Jahr 2004 ist vor allen Dingen auf klimatische Ursachen zurückzuführen. Zum Einen zeigen sich hier die Folgen des trockenen heißen Sommers von 2003, zum Anderen wurden die dadurch prädisponierten Buchen im Jahr 2004 am Rehberg durch extremen Wollschilddlausbefall geschwächt, so dass dieser Jahrring bei 37 % der Buchen ausgefallen ist. Der extrem schmale Jahrring 2005 ist wiederum auf Nachwirkungen dieser Ereignisse zurückzuführen. Auch die Zuwachseinbrüche in den Jahren 1913-1915 sind auf einen Ursachenkomplex von Trockenheit und Kalamitäten im Jahr 1911 zurückzuführen (Schwerdtfeger, 1981). Daraus wird deutlich, dass Zuwachsreaktionen stets unter Berücksichtigung zeitlich vorangegangener Ereignisse zu betrachten sind. Von den Buchen auf den schwedischen Standorten können derartige Sekundärschäden in den letzten Jahrzehnten noch nicht berichtet werden.

Andererseits können auch für die Fichten bereits Sekundärschäden beobachtet werden. Nach dem starken Orkan im Januar 2005 in Südschweden führten Bolte u. a. (2008) Untersuchungen am Standort Siggaboda durch und entdeckten einen hohen Anteil an durch Borkenkäferbefall geschwächten und abgestorbenen Fichten.

5.5 Zukünftige Entwicklung von Buchen-Fichten-Mischbeständen in Südschweden - im Vergleich zum Harz

Im Süden Schwedens treffen zwei ganz unterschiedlich geprägte Waldformationen aufeinander. Vom Norden her die borealen Nadelwälder und vom Süden her die temperaten, mitteleuropäischen Laubmischwälder. Dies ruft unweigerlich interessante Fragestellungen hervor, insbesondere in Betracht des voranschreitenden Klimawandels.

Die **heutigen Bestandesbilder** der untersuchten Standorte zeigen eine deutliche Differenzierung zwischen den schwedischen Flächen und dem Vergleichsstandort im Harz. Grundsätzlich kann im Harz eine Ausgewogenheit zwischen den Arten festgestellt werden. Buche wie Fichte sind in der obersten Bestandesschicht vertreten, sind vital und erreichen vergleichbare Zuwächse. Dagegen erkennt man auf den schwedischen Beständen Siggaboda und Tulseboda ein Ungleichgewicht. Während die Fichte die oberste Bestandesschicht bildet, findet sich die Buche in der zweiten. Besonders auf diesen Untersuchungsflächen leistet sie wesentlich schwächere Zuwächse und ihre Kronenstruktur ist vergleichsweise licht. Sie ist häufiger in niedrigere Vitalitätsstufen einzuordnen und auch die anatomische Anpassung der Borke unterstreichen die herausragende Situation der Buche in Südschweden. Der Standort Rågetaåsen lässt jedoch das mögliche Potential der Buche in Südschweden erkennen. Zwar liegt das radiale Wachstum erkennbar hinter der Fichte, doch im Höhenzuwachs erreichen beide Arten gleiche Höhen. Für die Fichte bedeutet dies, auf Dauer an diesem Standort sehr wahrscheinlich von der Buche ausgedunkelt zu werden. Die günstige Lage des Standorts an der regenreichen Südwestküste Schwedens, die daher als der nördlichste Ausläufer der Buchenwaldverbreitung ausgewiesen ist (Abb. 3.2), bietet dem Buchenwachstum ideale Voraussetzungen.

Auf allen Standorten ist eine natürliche Mischung in Form einer Gruppen- und Horstbildung zu erkennen; ungleich deutlicher auf den schwedischen Flächen. Die Gruppenbildung minimiert direkte Konkurrenz um Raum und Nährstoffe zwischen den Arten. Die Buche profitiert besonders von gleichartigen Gruppen. Befindet sie sich dagegen in direkter Konkurrenz zu Fichten, ist sie stets unterlegen. Bei der Fichte wird hingegen klar, dass ihr Wachstum auch in gleichartigen Gruppen individuell bestimmt ist. Das wird ihr in direkter Konkurrenz zur Buche zum Vorteil. Im Gegenteil profitiert sie sogar von einer Mischung mit der Buche. In Abhängigkeit ihrer sozialen Stellung kann sie die Buchen unter massiven Konkurrenzdruck setzen.

Die Gruppenstruktur wird sehr wahrscheinlich auch in Zukunft die Bestandesbilder prägen. Unkrig (1997) untersuchte die natürliche Verjüngung im Naturwaldreservat *Sonnenkopf* im Harz. Er spricht von einer *natürlichen Persistenz* von Trupp- und Gruppenstrukturen, denn die Verjüngung ist stark mit dem Strahlungsangebot am Waldboden gekoppelt. Unter strahlungsarmen Buchengruppen verjüngt sich die Buche besser als die Fichte. Bei höherem Strahlungsangebot hat jedoch die Fichtenverjüngung Vorteile.

Die dendroökologischen Untersuchungen des **Konkurrenzverhaltens** von Buche und Fichte in der Vergangenheit haben gezeigt, dass die Fichte in Südschweden durchaus das Potential hatte, die Buche in ihrem Zuwachsverhalten negativ zu beeinflussen. Dies konnte besonders deutlich am Standort Siggaboda beobachtet werden. Die Fichte ist zwar nach der Buche eingewandert, hat aber die in den Nischen geschützt vor den Brandrodungen der Menschen gewachsenen Buchen schnell eingeholt und durch Raum-, Wasser- und Nährstoffkonkurrenz in ihrem Wachstum gehemmt. Beschattete Bäume investieren in der Regel noch in den Spross, wodurch das Längen- gegenüber dem Wurzelwachstum gefördert wird. Letzteres kann sogar gänzlich zum Erliegen kommen, was in der Konsequenz zu einem klaren Konkurrenznachteil führt. An diesem Standort ist aber auch ersichtlich, dass die Buche in den letzten etwa 20 Jahren den Zuwachsvorsprung der Fichte mindert, indem sie ihren Zuwachs steigern kann. Vermutlich profitiert sie von gestiegenen Temperaturen, was durch die straffere Beziehung mit der Juli-Temperatur unterstrichen wird. Gleichzeitig mag aber auch ein positiver Düngungseffekt durch gestiegenes atmosphärisches CO_2 hinzukommen. Ein erhöhtes CO_2 -Angebot fördert potentiell das Wurzelwachstum, doch bei gleichzeitiger Einwirkung erhöhter O_3 -Konzentrationen, wodurch eine Limitierung des Wurzelwachstum einhergeht, kommt es lediglich zu einer Kompensation (Matyssek, 1998). Ein positiver Düngungseffekt von CO_2 wird zusätzlich durch die Verfügbarkeit von Stickstoff und anderen Nährstoffen limitiert (Lindner, 1999).

Im Kerngebiet ihrer natürlichen Verbreitung scheint die **Buche** jedoch seit den jüngsten Jahrzehnten bereits mit den Negativfolgen der Temperaturerhöhung konfrontiert zu sein. Auf eine Prädisposition durch extreme Trockenheit oder Spätfrost folgen Sekundärschäden wie z.B. Kalamitäten durch Insekten wie die Wollschilddlaus. Großteile der Buchen bilden in solchen Jahren keinen Jahrring aus und auch das Folgejahr ist geprägt durch weit unterdurchschnittlichen Zuwachs. So geschehen in den Jahren 2003 bis 2005 am Standort Rehberg. Aufgrund des Endes der Zeitreihe konnten die Folgejahre nicht weiter ausgewertet werden. Doch vermutlich konnte keine Erholung stattfinden, da auch das Jahr 2006 von extremer Dürre geprägt war. Das Puffervermögen der Buchen war durch die Vorjahre bereits stark beeinträchtigt, so dass mit großer Wahrscheinlichkeit

erneut ein großer Teil der Buchen keinen Radialzuwachs leisten konnte. Hier zeigen sich also deutlich die Schwierigkeiten der Buche, auf eine Häufung von Extremereignissen zu reagieren. In der Vergangenheit konnte die Buche bereits ein oder spätestens zwei Jahre nach den Auswirkungen eines Extremereignisses wieder normalen Zuwachs leisten. Fehlt ihr allerdings eine Erholungsphase, führt das zu schwerwiegenden Prädispositionen.

Auch Bonn (2000), der Untersuchungen zur Konkurrenzdynamik in Mischbeständen aus Eiche und Buche anstellte, deutet eine Verringerung der Überlegenheit der Buche bei Häufung von Extremereignissen an. Felbermeier (1994) stellte Untersuchungen zur Arealveränderung der Buche infolge von Klimaänderungen an. Auf Bayerischen Versuchsflächen erkannte er, dass Buchen in warmen und verhältnismäßig trockenen Arealen besonders produktiv waren. Daraus leitete er ab, dass die Buche in bisher kühleren Regionen in Zukunft im Wachstum profitieren wird. An der nordöstlichen Verbreitungsgrenze Mitteleuropas untersuchen Czajkowski und Bolte (2006) die Anpassung verschiedener Buchen-Herkünfte an Winter- und Spätfrost. Von Nordwestdeutschland bis nach Zentralpolen erkennen sie eine steigende Winter- und Spätfrosttoleranz in einem klimatischen Gradienten steigender Frostgefahr. Die Herkunft hat einen wesentlichen Einfluss auf die Austriebsphänologie und folglich auf die Frosttoleranz. Weiterhin stellten sie in ihrer Studie fest, dass eine simulierte Trockenheit keinen Einfluss auf die Frosttoleranz der unterschiedlichen Herkünfte hat. Das erhebliche evolutionäre Anpassungspotential der Buche an extreme Frostereignisse und gleichzeitig an Trockenheit an ihrer östlichen Verbreitungsgrenze wird durch diese Untersuchung deutlich. Demzufolge existiert im Osten Mitteleuropas für die Buche keine klimatisch bedingte Arealgrenze.

Die in den letzten zwei Jahrzehnten markant gestiegene Abhängigkeit des Zuwachses der untersuchten Buchen von der Juli-Temperatur des Vorjahres zeigt eine sichtliche Reaktion auf die voranschreitende Klimaveränderung. Dieses Phänomen ist auf allen Standorten nachweisbar. Anders als am Standort Rehberg bleiben auf den schwedischen Standorten die schädigenden Sekundärfolgen bisher aus. Vermutlich ist die erhöhte Temperatur und die somit verlängerte Vegetationsperiode an der nördlichen Verbreitungsgrenze noch positiv belegt. Nach Björkman (1999) scheint die aktuelle Verbreitungsgrenze keineswegs klimatisch bedingt zu sein. Eher sind es Voraussetzungen für die Keimung, wie offener Mineralboden z.B. durch Feuer, die Bedingungen für die Ausbreitung schaffen. In den Vorkommen der Buche in Südschweden gibt es keine logischen Zusammenhänge. Vorgelagert vor die nördliche Verbreitung, die keineswegs als kontinuierliche Frontlinie gesehen werden kann, sind zahlreiche von Menschenhand geschaffene Einzelpopulationen, die als Verbreitungskeime dienen. Das durch den Ellenberg-Quotienten berechnete, buchenfreundlichere Klima Südschwedens begünstigt dazu deren Ausbreitung.

Im Gegensatz zur Buche reagiert die **Fichte** am montanen Standort Rehberg weniger sensitiv auf die Extremereignisse der letzten Jahrzehnte. Im Gegenteil profitiert sie sogar von den Schwierigkeiten der Buche und übertrifft sie nach einem Jahrzehnte währenden vergleichbaren Zuwachs nun in den letzten zwanzig Jahren. Aber ebenso wie Eckstein (1990) eine zunehmende Klimaabhängigkeit der Fichten seit 1950 im Raum Hamburg nachgewiesen hat, kann auch die vorliegende Untersuchung eine zeitliche Veränderung feststellen. Der vormals langjährige Einfluss der Juni-Niederschläge weicht in den letzten Jahrzehnten einer Dürreempfindlichkeit gegenüber den vorjährigen Spätsommern. Am Standort Siggaboda haben Bolte u. a. (2008) nach dem starken Orkan im Januar 2005 Sekundärschäden an der Fichte nachgewiesen. Borkenkäferbefall schwächte zahlreiche Fichten bis zum Absterben. Im Gegensatz zur Verbreitungsrichtung der Buche, die sich in nördliche Richtung bewegt, zielt die Ausbreitung der Fichte nach Süden. Doch hier stellen klimatische Bedingungen Verbreitungshindernisse dar. Die voranschreitende Klimaänderung birgt mit ihrer Häufung an Sturm- und Orkanereignissen eine besondere Gefahr für die sturmgefährdete Fichte. Ungeeignete Standorte, die die Fichte zu flachem Wurzelwachstum zwingen, können nur noch mit Schwierigkeiten besiedelt werden. Prädispositionen durch trockene Sommer und Stürme rufen Folgeschäden wie Borkenkäferkalamitäten hervor; somit liegt in Südschweden mit großer Wahrscheinlichkeit in Zukunft die südliche Verbreitungsgrenze der borealen Fichtenwälder.

Im Folgenden sollen die zu Beginn gestellten Fragen beantwortet werden:

- Auf welche Witterungsfaktoren lassen sich die Zuwachsschwankungen der beiden Baumarten zurückführen und gibt es Unterschiede zwischen den Arten?

Der wesentliche, wachstumsbestimmende Faktor der Buchen aller Untersuchungsstandorte ist eine starke Empfindlichkeit gegenüber Trockenheit im Spätsommer des Vorjahres. Hierbei ist das Signal der Juli-Temperatur besonders hervorzuheben. Es ist weit gewichtiger gegenüber dem Niederschlags-Signal.

Die Fichten reagieren dagegen verstärkt auf den Niederschlag in der laufenden Vegetationsperiode. In besonderem Maße spielt der Niederschlag des Junis eine Rolle für den Zuwachs.

- Welchen Anteil haben diese Faktoren am Zuwachsgeschehen?

Diese Witterungsfaktoren bilden bei beiden Baumarten nur einen sehr kleinen Teil der erklärbaren Varianz ab. Die Juli-Temperatur erklärt gerade 12-13 % der Varianz des Buchenzuwachses und nur 8-9 % sind dem Juni-Niederschlag beim Zuwachs der Fichten zuzuschreiben.

- Ändern sich die Klima-Zuwachs-Beziehungen über die Zeit?

Es gibt eine Veränderung des Klimasignals im Beobachtungszeitraum und seit etwa 1950 wird dies besonders deutlich. Der Einfluss der Spätsommer-Temperaturen auf den Buchenzuwachs verstärkt sich in signifikant hohem Maße. In gleicher Weise erhöht sich der Anteil der zu erklärenden Varianz auf bis über 40 %. Eine abermalige Straffung dieses Signals findet seit Mitte der 1990er Jahre statt, was somit ein erster deutlicher Nachweis einer Reaktion des Buchenzuwachses auf den untersuchten Standorten auf den Klimawandel ist.

Das zuwachsbestimmende Klimasignal der Fichten verändert sich auf andere Art. Seit etwa 1950 geht der Einfluss des Juni-Niederschlags auf fast allen Standorten verloren und weicht einer Trockenheitsempfindlichkeit gegenüber dem vorjährigen Spätsommer. Dieses Signal ist vergleichbar zu dem der Buchen, liegt jedoch in schwächerer Form vor.

- Besteht auf den Untersuchungsstandorten ein Konkurrenzgleichgewicht zwischen den beiden Baumarten?

Die aktuelle Bestandessituation wurde u.a. durch Höhenmessungen und dendroökologische Methoden untersucht. Es zeigten sich große Differenzen zwischen den schwedischen Standorten und dem Vergleichsstandort im Harz. An letzterem existiert ein ausgeglichenes Verhältnis zwischen den Baumarten, während auf den schwedischen Flächen der Zuwachsvorteil der Fichte, in Höhe wie in Breite, überdeutlich nachzuweisen ist.

- Ist es möglich, durch langjährige Zuwachszeitreihen das gegenwärtige Bestandesbild zu erklären?

Langjährige Zuwachsreihen erlauben zunächst eine retrospektive Analyse der Bestandesentwicklung. Jeder Bestand kann anhand dieser Zuwachsbilder beschrieben werden und einige gravierende Einflüsse auf das Zuwachsgeschehen können nachgewiesen und zum Teil interpretiert werden. Aus der Erklärung der vergangenen Entwicklung ist es daher möglich, das Herausbilden der aktuellen Konkurrenzsituation zu erläutern.

- Welches Bild ergibt sich bei direkter Konkurrenz zwischen den Baumarten?

Angrenzend an die natürlich gewachsenen reinartigen Baumgruppen ergeben sich Situationen direkter Konkurrenz zwischen den Baumarten. Diese sind stets sehr individuelle Angelegenheiten. Im Allgemeinen ist jedoch zu erkennen, dass Buchen unter Konkurrenz von Fichten eine unterlegene Position einnehmen. Im umgekehrten Falle zeigt sich, dass Fichten von direkter Konkurrenz durch Buchen in ihrem Zuwachs kaum behindert werden. Großen Einfluss hat hier die soziale Stellung der Fichten, sie bestimmt das Rollenverhältnis. Differenzen ergeben sich in dieser Fragestellung zwischen den schwedischen Standorten und dem Harz. Die genannten Ergebnisse lassen sich ebenso auf den Harz übertragen, doch zeigen hier die Buchen ein größeres Potential, dem Konkurrenzdruck der Fichten entgegen zu stehen als auf den schwedischen Flächen.

- Werden in Zukunft extreme Witterungsereignisse das Konkurrenzverhältnis beeinflussen?

Singuläre Witterungsextreme haben kurzzeitigen Einfluss auf den Zuwachs, der in den meisten Fällen bereits im Folgejahr ausgeglichen ist. Doch eine zukünftige Herausforderung wird die Häufung von Extremen mit fehlenden Erholungsphasen. Im letzten Jahrzehnt konnten bereits Sekundärfolgen großer Trockenheiten und deren Einfluss auf den Zuwachs beobachtet werden. Dies gilt für beide Baumarten gleichermaßen. Ergeben sich

aus derartigen Situationen Schwierigkeiten für eine Baumart, ist dies ein sicheres Zeichen dafür, dass sie an ihre physiologischen Grenzen gerät. Bisher wurde dies im Falle der Fichte auf einem schwedischen Standort (Siggaboda) beobachtet. Ähnliche Reaktionen lassen sich bei den Buchen des Standortes im Harz nachweisen. An beiden Standorten zeigt sich bereits seit etwa 20 Jahren eine Veränderung des Konkurrenzverhältnisses jeweils in Richtung der nicht beeinträchtigten Baumart.

- Wird der Klimawandel die Bestandesbilder in eine erkennbare Richtung beeinflussen?

Aufgrund der bereits zu erkennenden Folgen gehäufte Extremereignisse lässt sich vermuten, dass beim Zuwachs der Buchen auf dem südexponierten Hangstandort im Harz in Zukunft nur mit Schwierigkeiten das frühere hohe Niveau erhalten wird. Andererseits zeigen die Veränderungen der Witterungsbedingungen der schwedischen Standorte positive Signale für den Zuwachs der Buche. Hier profitiert sie möglicherweise von erhöhten Temperaturen und einer gleichzeitigen Verlängerung der Vegetationsperiode. Negative Sekundärfolgen extremer Einzelereignisse konnten hier bisher nicht beobachtet werden. Eine klimatisch bedingte nördliche Verbreitungsgrenze ist für die Buche hier nicht zu erkennen.

In den letzten 20 Jahren steigerten die Fichten im Harz ihren Zuwachs deutlich, was das Konkurrenzverhältnis in Zukunft zu ihren Gunsten entwickeln lassen könnte. Anders stellt sich die Situation in Schweden dar. Negativfolgen der Erwärmung lassen sie hier bereits in sichtbaren Anteilen absterben. Die von Norden her einwandernde Fichte scheint an ihre klimatische Arealgrenze zu geraten.

6 Zusammenfassung

Vor dem Hintergrund sich verändernder Umweltbedingungen durch den allgegenwärtigen Klimawandel wächst das Interesse an Vorhersagen zur zukünftigen Waldentwicklung. Der prognostizierten Häufung von Witterungsextremen wird ein wesentlicher Einfluss auf das Wachstum und die Vitalität der Waldbaumarten zugeschrieben. Wichtige Erkenntnisse bringen hier Untersuchungen zu den physiologischen Wachstumsgrenzen der Gehölze, die sich besonders deutlich an deren heutigen Verbreitungsgrenzen nachweisen lassen. An diesen offenbart sich das Potential einer Baumart, die Migration unter zukünftigen Bedingungen fortsetzen zu können. Großes Interesse herrscht an ökonomisch wichtigen Baumarten wie der Gemeinen Fichte (*Picea abies* [L.] Karst.) und der Rot-Buche (*Fagus sylvatica* L.).

Deren Wuchsverhalten unter natürlichen Bedingungen, in natürlich erwachsenen Mischwäldern wurde in der vorliegenden Arbeit an den derzeitigen Arealgrenzen beider Arten in Südschweden (Rågetaåsen, Siggaboda, Tulseboda) untersucht. Als Vergleichsstandort diente ein Naturwald im Harz (Rehberg), welcher geografisch zentral im Verbreitungsgebiet der Buche liegt und durch seine montane Höhenlage ideale Wuchsbedingungen für die Fichte liefert. Mittels dendroklimatologischer Analysemethoden wurden die wesentlichen, den radialen Zuwachs beeinflussenden Witterungsvariablen bestimmt und deren Anpassung bzw. Veränderung über verschiedene Zeitintervalle untersucht. Dendroökologische Untersuchungen ermöglichten einen Blick in die vergangene Entwicklung der Mischbestände und das Konkurrenzverhalten beider Baumarten untereinander. Diese Untersuchungen wurden auf zwei Ebenen durchgeführt: auf der Bestandesebene und auf der Ebene kleinerer Untersuchungsgruppen, durch welche direkte Konkurrenzsituationen der intra- und interspezifischen Beeinflussung analysiert werden konnten. Beide Methoden sind retrospektiver Natur und ermöglichen daher in der Hauptsache eine Analyse und Interpretation des vergangenen Zuwachsverhaltens. Doch erlauben beobachtete Trends in der Vergangenheit eine vorsichtige Prognose der Entwicklung von Waldbeständen auf vergleichbaren Standorten.

Zuwachsbeeinflussende Witterungsvariablen

Die dendroklimatologischen Analysen zeigten, dass beide Baumarten eine interessante Variabilität in den jeweiligen zuwachsbeeinflussenden Witterungsvariablen aufweisen. Die Haupteinflussgröße für den **Buchen**zuwachs ist ein trocken-heißer Vorjahres-Sommer mit Schwerpunkt auf den Monaten Juli und August. Dieser Einfluss zeigt sich seit Beginn des Beobachtungszeitraums, aber seit etwa 1950 verstärkt er sich bedeutend und erfährt seit Mitte der 1990er Jahre eine weitere Steigerung. Die wesentliche Witterungsvariable für den **Fichten**zuwachs war bis etwa in die 1950er Jahre ein positiver Einfluss der Niederschläge im Sommer der Ringbildung mit Schwerpunkt auf dem Juni. Seither verschwindet dieser Einfluss jedoch auf fast allen Standorten und weicht einer, der Buchen ähnlichen Dürreempfindlichkeit gegenüber den vorjährigen Spätsommern.

Analysen zum Konkurrenzverhalten

Die retrospektive Analyse der Bestandesgeschichte mittels langjähriger Zuwachszeitreihen ermöglicht eine Interpretation der vergangenen Entwicklung der Waldbestände und liefert eine Erklärung für das aktuelle Erscheinungsbild.

Auf den schwedischen Standorten zeigt sich im radialen wie im Höhenzuwachs ein deutlicher Vorteil der Fichten. Auf den Standorten Siggaboda und Tulseboda bildet die Buche unter der Fichte sogar die zweite Baumschicht. Im Gegensatz zum Standort Rågetaåsen liegen diese beiden Standorte bereits außerhalb des natürlichen Verbreitungsgebiets von Buchenwäldern, aber im Gebiet der Buchen-Fichten-Wälder. Hier erkennt man deutlich einen Konkurrenzvorteil der Fichte. Am Vergleichsstandort Rehberg erkennt man dagegen das grundsätzlich große Potential der Buche, ähnliche Zuwächse zu leisten wie die Fichte. Das Konkurrenzverhältnis wirkt hier relativ ausgeglichen.

Direkte Konkurrenzsituationen zwischen den Baumarten ergeben sich an Randzonen der natürlich gewachsenen reinartigen Gruppen. Es zeigte sich, dass die Buche in unmittelbarer Konkurrenz zur Fichte benachteiligt wird. Im umgekehrten Falle kann die Fichte in Abhängigkeit von ihrer sozialen Stellung sogar von einer Mischung mit Buche profitieren. Diese Ergebnisse gelten für die schwedischen Standorte wie auch für den Harz, wobei die Buchen am Rehberg ein größeres Potential erkennen lassen, dem Druck der Fichten entgegenzustehen.

Einfluss extremer Witterungsereignisse

Der Einfluss singulärer Witterungsextreme auf das Wachstum beider Baumarten konnte an starken Zuwachseinbrüchen nachgewiesen werden. Doch in den meisten Fällen zeigte sich bereits im Folgejahr wieder ein ausgeglichenes Wachstum. Eine Herausforderung wird die zukünftige Häufung von Extremen mit fehlenden Erholungsphasen sein. Im letzten Jahrzehnt konnten bereits Sekundärfolgen großer Trockenheiten und deren Einfluss auf den Zuwachs beobachtet werden. Ergeben sich aus derartigen Situationen Schwierigkeiten für eine Baumart, ist dies ein sicheres Zeichen dafür, dass sie an ihre physiologischen Grenzen gerät. Am Standort Siggaboda konnte dies bereits für die Fichten beobachtet werden. Auch am Rehberg stellten sich in den letzten Jahren Bedingungen ein, die der Buche Schwierigkeiten bereiten.

Aus den gewonnenen Erkenntnissen lässt sich entnehmen, dass das Konkurrenzverhältnis zwischen Buche und Fichte seit den letzten zwei Jahrzehnten begonnen hat, sich zu verändern. Am südexponierten Hangstandort im Harz scheint die bisher sehr konkurrenzstarke Buche an ihre physiologische Grenze zu geraten. Auf den schwedischen Standorten wird die Buche möglicherweise von wärmeren Sommern und verlängerten Vegetationsperioden profitieren, während die Fichte an die südliche, klimatische Verbreitungsgrenze der borealen Wälder gelangt zu sein scheint.

7 Summary

Dendroclimatological and dendroecological analysis of growth reactions of beech and spruce in near-natural mixed forests

Against the background of a changing environment due to climate change the interest in prognoses of the development of forest ecosystems increases. The growth and the vitality of forest tree species will mainly be influenced by increased frequency of extreme weather conditions. The analysis of the physiological limits of tree growth has to be conducted at the borders of the natural distribution range of species. Main focus lies on economical important tree species as Common beech (*Fagus sylvatica* L.) and Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst.). Growth and competition performance of these two species was investigated under natural conditions in naturally grown mixed forests at both species distribution limits in Southern Sweden (Rågetaåsen, Siggaboda, Tolseboda). As a reference a natural forest in the Harz Mountains (Rehberg) was chosen. By means of dendroclimatological methods the main influencing climate variables and their modifications over time were analysed. Dendroecological methods allow the retrospective analysis of forest history and the development of the competition behaviour of both species in the past. These analyses were conducted on two levels: stand level and plot level. The latter permits the analysis of direct competition situations, intra- and interspecific. By means of these retrospective methods potential trends might be detected and thus allow forecasts for the development of forest stands on comparable sites.

Climate variables influencing growth

Dendroclimatological analyses showed, that both tree species exhibit interesting variability in its main influencing climate variables. The radial growth of **beech** is mainly determined by warm-dry summers of the previous year with focus on July and August. This influence increases since the 1950s and even stronger since the mid 1990s. Main factor for **spruce** growth was summer precipitation with focus on June. This influence nearly vanished on all sites since the 1950s. Since then the main climate signal of spruce growth is a sensitivity to drought of previous summers, equally to beech.

Competition analyses

The retrospective analysis of forest history by means of long-term tree-ring series allows an interpretation of past development of the forest stands and provides explanations for the current appearance.

On the Swedish sites the advance of spruce in radial as in height growth is obvious. In Siggaboda and Tolseboda beech even forms the secondary species. These sites lie beyond northern limits of *Fagus* forests but within *Fagus-Picea* forests. The advantage of spruce is considerable. Though, on the reference site Rehberg the high potential of beech, to achieve comparable tree-ring widths, is distinct. Here, the competition performance is nearly balanced.

At borders of naturally grown pure groups direct competition situations between the species can be found. It could be shown, that beech is disadvantaged under immediate competition with spruce. But in inverse situations, spruce, depending on its social state, even benefits of growing in mixture with beech. These results can be found on the Swedish sites as well as in the Harz Mountains, though, beech at the Rehberg shows a much higher potential to stand against the competition of spruce.

Influence of extreme weather conditions

Singular impacts of extreme weather conditions on tree growth can be clearly, but in most cases growth is regulated one year later. However, future challenge for tree species will be the increased frequency of extreme conditions without phases of recovery. In the past decade secondary complications of drought and its influence on growth could already be detected. This affects both species similarly. Does a species get disadvantaged due to such situations, would mean that it reaches its physiological limits. In Siggaboda this could be already shown for spruce and at the Rehberg for beech.

As a result this study shows, that the competition situation between beech and spruce has begun to change since the last two decades. On exposed sites as the Rehberg, beech trees might reach its physiological limits. On the Swedish sites, however, beech trees could benefit from warm summers and prolonged vegetation periods. In contrast, spruce probably has reached its southern, climatically determined distribution limit of boreal forests.

Literaturverzeichnis

- [1] ABETZ, P.: Die Genauigkeit der Radialzuwachs- und Jahrringbreitenmessung mit der Eklundschen Jahrringmeßmaschine an Stammscheiben und Bohrspänen. In: *Allg.Forst-u.J.-Ztg.* 131 (1960), S. 74–80
- [2] AMMER, C.: *Konkurrenz um Licht; zur Entwicklung der Naturverjüngung im Bergmischwald.* Forstl. Forschungsber. München 158, 1996
- [3] AMMER, Ch. ; ALBRECHT, L. ; BORCHERT, H. ; BROSINGER, F. ; DITTMAR, Ch. ; ELLING, W. ; EWALD, J. ; FELBERMEIER, B. ; VON GILSA, H. ; HUSS, J. ; KENK, G. ; KÖLLING, Ch. ; KOHNLE, U. ; MEYER, P. ; MOSANDL, R. ; MOOSMAYER, H.-U. ; PALMER, S. ; REIF, A. ; REHFUESS, K.-E. ; STIMM, B.: Zur Zukunft der Buche (*Fagus sylvatica* L.) in Mitteleuropa. In: *Allg.Forst-u.J.-Ztg.* 176/4 (2005), S. 60–67
- [4] BACHMANN, M.: *Indizes zur Erfassung der Konkurrenz von Einzelbäumen; Methodische Untersuchungen in Bergmischwäldern.* Forstl. Forschungsber. München 171, 1998
- [5] BADECK, F.W. ; LASCH, P. ; HAUF, Y. ; ROCK, J. ; SUCKOW, F. ; THONICKE, K.: Steigendes klimatisches Waldbrandrisiko - eine Prognose bis 2050. In: *Allg. Forstzeitschrift-Der Wald* 58 (2003), S. 2–5
- [6] BAILLIE, M.G.L. ; PILCHER, J.R.: A simple cross-dating program for tree-ring research. In: *Tree-Ring Bulletin* 33 (1973), S. 7–14
- [7] BARTHOLD, F. ; CONEDERA, M. ; TORRIANI, D. ; SPINEDI, F.: Welkesymptome an Edelkastanien im Sommer 2003 auf der Alpensüdseite der Schweiz. In: *Schweiz. Z. Forstwes.* 155 (2004), S. 392–399
- [8] BECK, W.: Sensitivität und Autokorrelation in Jahrring-Zeitreihen von Fichten und Buchen. In: *BFH-Nachrichten* 2 (2007), S. 1–2
- [9] BIGING, G.S. ; DOBBERTIN, M.: A comparison of distance-dependent competition measures for height and basal area growth of individual conifer trees. In: *Forest Science* 38 (3) (1992), S. 695–720

- [10] BIONDI, F.: Climatic signals in tree rings of *Fagus sylvatica* L. from Central Apennines, Italy. In: *Acta Oecologica* 14 (1) (1993), S. 57–71
- [11] BIONDI, F.: Evolutionary and moving response functions in dendroclimatology. In: *Dendrochronologia* 15 (1997), S. 139–150
- [12] BIONDI, F.: Are climate-tree growth relationships changing in North-Central Idaho, U.S.A.? In: *Arctic, Antarctic and Alpine Research* 32/2 (2000), S. 111–116
- [13] BIONDI, F. ; WAIKUL, K.: DENDROCLIM2002: A C++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies. In: *Computers & Geosciences* 30 (2004), S. 303–311
- [14] BJÖRKMAN, L.: The establishment of *Fagus sylvatica* at the stand-scale in southern Sweden. In: *The Holocene* 9, 2 (1999), S. 237–245
- [15] BJÖRKMAN, L. ; BRADSHAW, R.: The immigration of *Fagus sylvatica* L. and *Picea abies* (L.) Karst. into a natural forest stand in southern Sweden during the last 2000 years. In: *Journal of Biogeography* 23 (1996), S. 235–244
- [16] BLASCHKE, M. ; CECH, T.L.: Absterbende Weißkiefern - eine langfristige Folge des Trockenjahres 2003? In: *Forstschutz aktuell* 40 (2007), S. 32–34
- [17] BOLTE, A.: Zur Zukunft der Buche in Mitteleuropa - Die klimatische Anpassungsfähigkeit der Mutter des Waldes. In: *AFZ/Der Wald* 62 (2005), S. 572–576
- [18] BOLTE, A. ; GRUNDMANN, B. ; HILBRIG, L. ; KAMPF, F. ; BONN, S. ; ROLOFF, A.: *Climate change effects on the competitive ability of European beech at its northern range margins in southern Sweden*. Verhandlungen der Gesellschaft für Ökologie, Band 38, 2008
- [19] BONN, S.: *Dendroecological investigations of competition dynamics in mixed beech-oak stands and its modifications expected due to climatic changes*. Contributions to Forest Sciences Tharandt 3, 1998
- [20] BONN, S.: Competition dynamics in mixed beech-oak stands and its modifications expected due to climatic changes. In: *Allg.Forst-u.J.-Ztg.* 171/5-6 (2000), S. 81–88
- [21] BONN, S. ; ROLOFF, A.: Konkurrenzdynamik und Ökophysiologie der wichtigsten Baumarten in Hartholzauenwäldern an der mittleren Elbe. In: *Forstwissenschaftliche Beiträge Tharandt/Contributions to Forest Sciences* 17 (2002), S. 7–59
- [22] BRAUN, S. ; SCHINDLER, C. ; RIHM, B. ; FLÜCKIGER, W.: Shoot growth of mature *Fagus sylvatica* and *Picea abies* in relation to ozone. In: *Environmental Pollution* 146 (2007), S. 624–628

- [23] BRIFFA, K.R.: *Tree-climate relationships and dendroclimatological reconstruction in the British Isles*, University of East Anglia, Norwich, England, Diss., 1984
- [24] BRIFFA, K.R. ; OSBORN, T.J. ; SCHWEINGRUBER, F.H. ; JONES, P.D. ; SHIYATOV, S.G. ; VAGANOV, E.A.: Tree-ring width and density data around the Northern Hemisphere: Part 2, spatio-temporal variability and associated climate patterns. In: *The Holocene* 12,6 (2002), S. 759–789
- [25] BRÄKER, O.U.: Der Alterstrend bei Jahrringdichten und Jahrringbreiten von Nadelhölzern und sein Ausgleich. In: *Mitt. Forstl. Bundesversuchsanstalt Wien* 142 (1981), S. 75–102
- [26] CAMARERO, J.J. ; MARTIN, E. ; GIL-PELEGRIN, E.: The impact of a needleminer (*Epinotia subsequana*) outbreak on radial growth of silver fir (*Abies alba*) in the Aragón Pyrenees: A dendrochronological assessment. In: *Dendrochronologia* 21/1 (2003), S. 3–12
- [27] CESCATTI, A. ; PIUTTI, E.: Silvicultural alternatives, competition regime and sensitivity to climate in a European beech forest. In: *Forest Ecology and Management* 102 (1998), S. 213–223
- [28] CHERUBINI, P. ; DOBBERTIN, M. ; INNES, J.L.: Potential sampling bias in long-term forest growth trends reconstructed from tree rings: a case study from the Italian Alps. In: *Forest Ecology and Management* 109 (1998), S. 103–118
- [29] COOK, E.R.: A conceptual linear aggregate model for tree rings. In: *Methods of Dendrochronology: applications in the environmental science*. Cook, E.R. ; Kairiukstis, L.A., 1990
- [30] COOK, E.R. ; KAIRIUKSTIS, L.A. ; COOK, L.A. (Hrsg.): *Methods of Dendrochronology: applications in the environmental science*. Kluwer Academic Publishers, 1990
- [31] COOK, E.R. ; PETERS, K.: The Smoothing Spline: A new approach to standardizing forest interior tree-ring width series for dendroclimatic studies. In: *Tree-Ring Bulletin* 41 (1981), S. 45–53
- [32] CROPPER, J.P.: Tree-ring skeleton plotting by computer. In: *Tree-Ring Bulletin* 39 (1979), S. 47–59
- [33] CZAJKOWSKI, T. ; BOLTE, A.: Frosttoleranz deutscher und polnischer Herkünfte der Buche (*Fagus sylvatica* L.) und ihre Beeinflussung durch Trockenheit. In: *Archiv f. Forstwesen u. Landschaftsökologie* 40 (3) (2006), S. 119–126

- [34] D'ARRIGO, R. ; WILSON, R. ; LIEPERT, B. ; CHERUBINI, P.: On the 'Divergence Problem' in Northern Forests: A review of the tree-ring evidence and possible causes. In: *Global and Planetary Change* 60 (2008), S. 289–305
- [35] DITTMAR, C. ; ELLING, W.: Jahrringbreite von Fichte und Buche in Abhängigkeit von Witterung und Höhenlage. In: *Forstw. Cbl.* 118 (1999), S. 251–270
- [36] DITTMAR, C. ; ELLING, W.: Dendroecological investigation of the vitality of Common Beech (*Fagus sylvatica* L.) in mixed mountain forests of the Northern Alps (South Bavaria). In: *Dendrochronologia* 25 (2007), S. 37–56
- [37] DITTMAR, C. ; MORAVCIK, P. ; PODRAZSKY, V. ; ZECH, W.: Diameter growth of healthy and declining beech (*Fagus sylvatica* L.) in North Bohemian mountains. In: *Lesnictvi-Forestry* 43,6 (1997), S. 259–268
- [38] DITTMAR, C. ; ZECH, W. ; ELLING, W.: Growth variation of Common beech (*Fagus sylvatica* L.) under different climatic and environmental conditions in Europe - a dendroecological study. In: *Forest Ecology and Management* 173 (2003), S. 63–78
- [39] DOBBERTIN, M. ; GIUGGIOLA, A.: Baumwachstum und erhöhte Temperaturen. In: *Forum für Wissen, Wald und Klimawandel* (2006), S. 35–45
- [40] DYCKMANS, J.: Einfluss erhöhter atmosphärischer CO₂-Konzentration auf die Aufnahme und Speicherdynamik von Stickstoff in Buche und Robinie. In: *Forstarchiv* 77 (2006), S. 86–92
- [41] ECKSTEIN, D. ; BAUCH, J.: Beitrag zur Rationalisierung eines dendrochronologischen Verfahrens und zur Analyse seiner Aussagesicherheit. In: *Forstw. Cbl.* 88 (1969), S. 230–250
- [42] ECKSTEIN, D. ; KRAUSE, C.: Dendroecological studies on spruce tress to monitor environmental changes around Hamburg. In: *IAWA Bulletin* 10 (2) (1989), S. 175–182
- [43] ECKSTEIN, D. ; RICHTER, K. ; ANIOL, W. ; QUIEHL, F.: Dendroklimatologische Untersuchungen zum Buchensterben im südwestlichen Vogelsberg. In: *Forstw. Cbl.* 103 (1984), S. 274–290
- [44] EILMANN, B. ; WEBER, P. ; RIGLING, A. ; ECKSTEIN, D.: Growth reactions of *Pinus sylvestris* L. and *Quercus pubescens* Willd. to drought years at a xeric site in Valais, Switzerland. In: *Dendrochronologia* 23 (2006), S. 121–132
- [45] Kap. Studies on Growth trends of forests in Sweden and Norway In: ELFVING, B.

- ; TEGNHAMMAR, L. ; TVEITE, B.: *Growth trends in European forests*. Springer, Berlin, Heidelberg, 1996, S. 61–70
- [46] ELLENBERG, H.: *Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen*. Eugen Ulmer, Stuttgart, 1996
- [47] ELLING, W.: Eine Methode zur Erfassung von Verlauf und Grad der Schädigung von Nadelbaumbeständen. In: *European Journal of Forest Pathology* 7 (1987), S. 426–440
- [48] ELLING, W. ; BAUER, E. ; KLEMM, G. ; KOCH, H.: Nationalpark Bayerischer Wald: Klima und Böden - Waldstandorte. In: *Schriftenreihe des Bayerischen Staatsministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Heft 1*, 1987
- [49] ELLING, W. ; DITTMAR, C.: Neuartige Zuwachsdepressionen bei Buchen. In: *AFZ* 1 (2003), S. 42–45
- [50] Kap. Long-term changes in site index in growth and yield experiments with Norway spruce In: ERIKSSON, H. ; KARLSSON, K.: *Growth trends in European forests*. Springer, Berlin, Heidelberg, 1996, S. 79–88
- [51] FELBERMEIER, B.: Arealveränderungen der Buche infolge von Klimaänderungen. In: *AFZ/Der Wald* 5 (1994), S. 222–224
- [52] FISCHER, H. ; ROMMEL, W.-D.: Jahrringbreiten und Höhentriebblängen von Buchen mit unterschiedlicher Belaubungsdichte in Baden-Württemberg. In: *Allg. Forstzeitschrift* 44 (1989), S. 264–265
- [53] FRITTS, H.C.: Computer programs for Tree-Ring Research. In: *Tree-Ring Bulletin* 25 (3-4) (1963), S. 2–7
- [54] FRITTS, H.C.: *Tree-rings and climate*. Academic press, London, New York, San Francisco, 1976
- [55] FRITTS, H.C. ; SMITH, D.G. ; BUDELSKY, C.A. ; CARDIS, J.W.: The variation of ring characteristics within trees as shown by a reanalysis of four Ponderosa pine. In: *Tree-Ring Bull.* 27 (1-2) (1965), S. 3–18
- [56] FRITTS, H.C. ; SWETNAM, T.W.: Dendroecology: A tool for evaluating variations in past and present forest environments. In: *Advances in Ecological Research* 19 (1989), S. 111–188
- [57] GEMBALLA, R. ; SCHLUTOW, A.: Klimawandel und Forstwirtschaft - Überarbeitung der Forstlichen Klimagliederung Sachsens. In: *AFZ/Der Wald* 62 (2007), S. 822–826

- [58] GRISSINO-MAYER, H.D.: Evaluating Crossdating Accuracy: A Manual and Tutorial for the Computer Program COFECHA. In: *Tree Ring Research* 57 (2) (2001), S. 205–221
- [59] GRUNDMANN, B.M. ; BONN, S. ; ROLOFF, A.: Cross-dating of highly sensitive Common beech (*Fagus sylvatica* L.) tree-ring series with numerous missing rings. In: *Dendrochronologia* 26 (2008), S. 109–113
- [60] GUTIÉRREZ, E.: Dendroecological study of *Fagus sylvatica* L. in the Montseny mountains (Spain). In: *Acta Oecologica* 9/3 (1988), S. 301–309
- [61] HARTIG, R.: Das Aussetzen der Jahresringe bei unterdrückten Stämmen. In: *Zeitschr. Forst- und Jagdwesen* I/4 (1869), S. 471–476
- [62] HARTIG, R.: *Lehrbuch der Anatomie und Physiologie der Pflanzen*. Springer, Berlin, 1891
- [63] HEINIGER, U.: Das Risiko eingeschleppter Krankheiten für die Waldbäume. In: *Schweiz. Z. Forstwes.* 154 (2003), S. 410–414
- [64] HEINIGER, U. ; GRAF, R. ; RIGLING, D.: Der Kastanienrindenkrebs auf der Alpennordseite. In: *Wald und Holz* 5 (2007), S. 50–53
- [65] HILKER, N. ; RIGLING, A. ; DOBBERTIN, M.: Mehr Misteln wegen der Klimaerwärmung? In: *Wald und Holz* 3 (2005), S. 39–42
- [66] HIRSCHBERG, M.-M. ; KENNEL, M. ; MENZEL, A. ; RASPE, S.: Klimaänderung unter forstlichem Aspekt - was ändert sich für den Wald? In: *LWF aktuell* 37 (2003), S. 8–13
- [67] HOLLSTEIN, E.: *Mitteleuropäische Eichenchronologie*. Trierer Grabungen und Forschungen 11, 1980
- [68] HOLMES, M.J. ; REED, D.D.: Competition indices for mixed species northern hardwoods. In: *Forest Science* 37 (5) (1991), S. 1338–1349
- [69] HOLMES, R.L.: Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. In: *Tree-Ring Bulletin* 43 (1983), S. 69–78
- [70] HOLMES, R.L. ; ADAMS, R.K. ; FRITTS, H.C.: *Tree-ring chronologies of western North America: California, eastern Oregon and northern Great Basin with procedures used in the chronology development work including users manuals for computer programs COFECHA and ARSTAN, Chronology Series VI*. Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona, Tuscon, Arizona, 1986

- [71] HOLMSGAARD, E.: Influence of weather on growth and reproduction of beech. In: *Communicationes Instituti Forestali Fenniae* 55 (1962), S. 1–5
- [72] HOYER-TOMICZEK, U.: Braunau am Inn: Asiatischer Laubholzbockkäfer weitet sein Befallsgebiet aus. In: *Forstschutz aktuell* 40 (2007), S. 21–23
- [73] HUGHES, M.K.: Dendrochronology in climatology - the state of the art. In: *Dendrochronologia* 20/1-2 (2002), S. 95–116
- [74] INNES, J. L.: The impact of climate extremes on forests: an introduction. In: *The impacts of climate variability on forests*. Beniston, M. and Innes, J.L. (Eds.), Springer, 1998, S. 1–18
- [75] IPCC: Climate Change 2007: Mitigation of climate change. In: *IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), Genf* (2007)
- [76] ISELI, M. ; SCHWEINGRUBER, F.H.: Sichtbarmachen von Jahrringen für Dendrochronologische Untersuchungen. In: *Dendrochronologia* 7 (1989), S. 145–157
- [77] KAHLE, H.-P.: *Modellierung der Zusammenhänge zwischen der Variation von klimatischen Elementen des Wasserhaushalts und dem Radialzuwachs von Fichten (Picea abies (L.) Karst.) aus Hochlagen des Südschwarzwalds*, Universität Freiburg, Forstwiss. Fakultät, Diss., 1994
- [78] KAHLE, H.P. ; GÄRTNER, H. (Hrsg.) ; ESPER, J. (Hrsg.) ; SCHLESER, G. (Hrsg.): *Impact of the drought in 2003 on intra- and inter-annual stem radial growth of beech and spruce along an altitudinal gradient in the Black Forest, Germany*. TRACE-Tree Rings in Archaeology, Climatology and Ecology, vol. 4, 2006
- [79] KAMPF, F. *Dissertation, unveröffentlicht*
- [80] Kap. Comparative productivity of monocultures and mixed-species stands In: KELTY, M.J.: *The ecology and silviculture of mixed-species forests*. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, Boston, London, 1992, S. 125–141
- [81] KENNEL, R.: Untersuchungen über die Leistung von Fichte und Buche im Rein- und Mischbestand. In: *Allg.Forst-u.J.-Ztg.* 136 (7) (1965), S. 149–161
- [82] KENNEL, R.: Untersuchungen über die Leistung von Fichte und Buche im Rein- und Mischbestand. In: *Allg.Forst-u.J.-Ztg.* 136 (8) (1965), S. 173–189
- [83] KERN, Z. ; POPA, I.: Climate-growth relationship of tree species from a mixed stand of Apuseni Mts., Romania. In: *Dendrochronologia* 24 (2007), S. 109–115
- [84] KÖLLING, C. ; WALENTOWSKI, H. ; BORCHERT, H.: Die Buche in Mitteleuropa. In: *AFZ/Der Wald* 13 (2005), S. 696–701

- [85] KÖLLING, C. ; ZIMMERMANN, L. ; WALENTOWSKI, H.: Klimawandel: Was geschieht mit Buche und Fichte? In: *AFZ/Der Wald* 11 (2007), S. 584–588
- [86] KOUTAVAS, A.: Late 20th century growth acceleration in greek firs (*Abies cephalonica*) from Cephalonia Island, Greece: A CO₂ fertilization effect? In: *Dendrochronologia* 26 (2008), S. 13–19
- [87] KRAFT, G.: *Beitrag zur Lehre von den Durchforstungen, Schlagstellungen und Lichtungshieben*. Klindworth, Hannover, 1884
- [88] KRAMER, H.: *Waldwachstumskunde: ökologische und anthropogene Einflüsse auf das Wachstum des Waldes, seine Massen- und Wertleistung und die Bestandessicherheit*. Paul Parey, Hamburg, Berlin, 374 S., 1988
- [89] KRAMER, H. ; KÄTSCH, C.: Zum jahreszeitlichen Ablauf des sekundären Dickenwachstums im Kalkbuchenwald. In: *Forstarchiv* 53 (1982), S. 87–93
- [90] KRAUSE, C.: *Ganzbaumanalyse von Eiche, Buche, Kiefer und Fichte mit dendroökologischen Methoden - unter besonderer Berücksichtigung von Klima-Wachstums-Beziehungen und Weiserjahren*, Universität Hamburg, Fachbereich Biologie, Diss., 1992
- [91] KREHAN, H. ; STEYRER, G.: Klimaänderung - Schadorganismen bedrohen unsere Wälder. In: *BFW-Praxisinformation* 10 (2006), S. 15–17
- [92] KÖRNER, C.: Wald, Biodiversität und CO₂ - Überraschungen sind sicher. In: *Naturwissenschaftliche Rundschau* 58/2 (2005), S. 61–69
- [93] KULLMAN, L.: Rise and demise of cold-climate *Picea abies* forest in Sweden. In: *New-Phytologist* 134/2 (1996), S. 243–256
- [94] LECKEBUSCH, G.C. ; KOFFI, B. ; ULBRICH, U. ; PINTO, J.G. ; SPANGHEHL, T. ; ZACHARIAS, S.: Analysis of frequency and intensity of European winter storm events from a multi-model perspective, at synoptic and regional scales. In: *Climate Research* 31 (1) (2006), S. 59–74
- [95] LECKEBUSCH, G.C. ; ULBRICH, U.: On the relationship between cyclones and extreme windstorm events over Europe under climate change. In: *Global and Planetary Change* 44 (2004), S. 181–193
- [96] LEUSCHNER, Ch. ; BACKES, K. ; HERTEL, D. ; SCHIPKA, F. ; SCHMITT, U. ; TERBORG, O. ; RUNGE, M.: Drought responses at leaf, stem and fine root levels of competitive *Fagus sylvatica* L. and *Quercus petraea* (Matt.) Liebl. trees in dry and wet years. In: *Forest Ecology and Management* 149 (2001), S. 33–46

- [97] LEUZINGER, S. ; ZOTZ, G. ; ASSHOFF, R. ; KOERNER, C.: Responses of deciduous forest trees to severe drought in Central Europe. In: *Tree Physiology* 25 (2005), S. 641–650
- [98] LEXER, M.J. ; SEIDL, R. ; RAMMER, W. ; JÄGER, D.: Waldbaukonzepte im Klimawandel - ein simulationsgestützter Vergleich. In: *BFW-Praxisinformation* 10 (2006), S. 25–27
- [99] LINDGREN, K. ; EKBERG, I. ; ERIKSSON, G.: *External factors influencing female flowering in Picea abies*. Bd. 142. Studia Forestalia Suecica, 142, 53 S., 1977
- [100] LINDNER, M.: Stand der Forschung - Klimaeinflüsse auf Wachstum und Verbreitung von Waldbäumen. In: *AFZ/Der Wald* 11 (1999), S. 561–564
- [101] LINDQUIST, B.: Den skandinaviska bokskogens biologi. In: *Svenska Skogsvårdsföreningens Tidskrift* 29 (1931), S. 179–532
- [102] LINDQUIST, B.: Forest vegetation belts in Southern Scandinavia. In: *Acta Horti Gotoburgensis* 22 (1959), S. 111–144
- [103] LORIMER, C.G. ; DAHIR, S.E. ; SINGER, M.T.: Frequency of partial and missing rings in *Acer saccharum* in relation to canopy position and growth rate. In: *Plant Ecology* 143 (1999), S. 189–202
- [104] MATYSSEK, R.: Ozon - ein Risikofaktor für Bäume und Wälder? In: *Biologie in unserer Zeit* 28/6 (1998), S. 348–361
- [105] MATYSSEK, R.: Wie verhalten sich Buche und Fichte bei Umweltveränderungen: Kosten und Nutzen von Raumbesetzung und -ausbeutung. In: *AFZ/Der Wald* 17 (2003), S. 862–863
- [106] MATYSSEK, R. ; INNES, J.R.: Ozone - a risk factor for trees and forests in Europe? In: *Water, Air, and Soil Pollution* 116 (1999), S. 199–226
- [107] MATYSSEK, R. ; LE THIEC, D. ; LÖW, M. ; DIZENGREMEL, P. ; NUNN, A.J. ; HÄBERLE, K.-H.: Interactions between drought and O₃ Stress in forest trees. In: *Plant Biol.* 8 (2006), S. 11–17
- [108] MEYER, P. ; UNKRIG, W. ; GRIESE, F.: Dynamik der Buche (*Fagus sylvatica* L.) in nordwestdeutschen Naturwäldern. In: *Forst und Holz* 55 / 15 (2000), S. 470–477
- [109] MÄKINEN, H. ; NÖJD, P. ; KAHLE, H.-P. ; NEUMANN, U. ; TVEITE, B. ; MIELIKÄINEN, K. ; RÖHLE, H. ; SPIECKER, H.: Radial growth variation of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) across latitudinal and altitudinal gradients in central and northern Europe. In: *Forest Ecology and Management* 171 (2002), S. 243–259

- [110] MÄKINEN, H. ; NÖJD, P. ; MIELIKÄINEN, K.: Climatic signal in annual growth variation in damaged and healthy stands of Norway spruce [*Picea abies* (L.) Karst.] in southern Finland. In: *Trees* 15 (2001), S. 177–185
- [111] NAGEL, J. ; ATHARI, S.: Stammanalyse und ihre Durchführung. In: *Allg.Forst-u.J.-Ztg.* 153 (1982), S. 179–182
- [112] NEUMANN, M.: Wie reagieren die Bäume auf Temperatur und Niederschlag? In: *BFW-Praxisinformation* 10 (2006), S. 21–24
- [113] NEUMANN, U.: *Relationships between weather and increment courses of spruce stands in eastern Erzgebirge Mountains*. Contributions to Forest Sciences Tharandt 11, 193 pp., 2001
- [114] NFVA: *Waldkundliche Dauerbeobachtung von Naturwaldkernflächen in den Niedersächsischen Landesforsten*. Niedersächsische Forstliche Versuchsanstalt Abt. Waldwachstum, Aufnahmeanweisung, 1-46, 1999
- [115] NÄGELI, W.: Aussetzende und auskeilende Jahrringe. In: *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* 86 (1935), S. 209–215
- [116] NIKLASSON, M.: En undersökning av trädåldrar i halländska skogsreservat. In: *Information från Länsstyrelsen Halland* 28 (2002), S. 1–59
- [117] NIKLASSON, M. ; LINDBLADH, M. ; BJÖRKMAN, L.: A long-term record of *Quercus* decline, logging and fires in a southern Swedish *Fagus-Picea* forest. In: *Journal of Vegetation Science* 13 (2002), S. 765–774
- [118] NOGLER, P.: Auskeilende und fehlende Jahrringe in absterbenden Tannen (*Abies alba* Mill.). In: *AFZ* 28 (1981), S. 709–711
- [119] OTTO, H.-J.: Standörtliche Voraussetzungen, Ziele und Waldbautechnik in Fichten-Buchen-Mischbeständen des Harzes. In: *Allg.Forst-u.J.-Ztg.* 157 (10) (1985), S. 188–196 und 214–222
- [120] OTTO, H.-J.: *Waldökologie*. UTB, Ulmer Verlag, Stuttgart, 1-391, 1994
- [121] PEDERSON, N. ; COOK, E.R. ; JACOBY, G.C. ; PETEET, D.M. ; GRIFFIN, K.L.: The influence of winter temperatures on the annual radial growth of six northern range margin tree species. In: *Dendrochronologia* 22 (2004), S. 7–29
- [122] PERNY, B.: Verstärktes Auftreten saugender Schädlinge im Wald und Stadtgebiet. In: *Forstschutz aktuell* 40 (2007), S. 14–16
- [123] PIOVESAN, G. ; BERNABEI, M. ; DI FILIPPO, A. ; ROMAGNOLI, M. ; SCHIRONE,

- B.: A long-term tree ring beech chronology from a high-elevation old-growth forest of Central Italy. In: *Dendrochronologia* 21/1 (2003), S. 13–22
- [124] POLLANSCHÜTZ, J.: Jahrringmessung und Referenzprüfung. Ein Beitrag zur Frage der Zuverlässigkeit bestimmter Verfahren der Zuwachsermittlung. In: *Mitt. Forstl. Bundesversuchsanstalt Wien* 130 (1980), S. 263–285
- [125] PRETZSCH, H.: Modellierung der Kronenkonkurrenz von Fichte und Buche in Rein- und Mischbeständen. In: *Allg.Forst-u.J.-Ztg.* 163, 11/12 (1992), S. 203–213
- [126] PRETZSCH, H.: Zum Einfluß des Baumverteilungsmusters auf den Bestandeszuwachs. In: *Allg.Forst-u.J.-Ztg.* 166 (1995), S. 190–201
- [127] Kap. Growth trends of forests in southern Germany In: PRETZSCH, H.: *Growth trends in European forests*. Springer, Berlin, Heidelberg, 1996, S. 107–131
- [128] PRETZSCH, H.: *Grundlagen der Waldwachstumsforschung*. Berlin, Blackwell, 1-414, 2002
- [129] PRETZSCH, H.: Diversität und Produktivität von Wäldern. In: *Allg.Forst-u.J.-Ztg.* 174 (5-6) (2003), S. 88–98
- [130] PRETZSCH, H.: The elasticity of growth in pure and mixed stands of Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst.) and Common beech (*Fagus sylvatica* L.). In: *Journal of Forest Science* 49 (11) (2003), S. 491–501
- [131] PROFFT, I. ; SEILER, M. ; ARENHÖVEL, W.: The future of Norway spruce in Thuringia in view of climate change. In: *Forst und Holz* 62/2 (2007), S. 19–25
- [132] RAHMSTORF, S. ; SCHELLNHUBER, H.J.: *Der Klimawandel*. C.H. Beck Wissen, 2006
- [133] REITER, I.M. ; HÄBERLE, K.-H. ; NUNN, A.J. ; HEERDT, C. ; RETMAYER, H. ; GROTE, R. ; MATYSSEK, R.: Competitive strategies in adult beech and spruce: space-related foliar carbon investment versus carbon gain. In: *Oecologia* 146 (2005), S. 337–349
- [134] RENNENBERG, H. ; SEILER, W. ; MATYSSEK, R. ; GESSLER, A. ; KREUZWIESER, J.: Die Buche (*Fagus sylvatica* L.) - ein Waldbaum ohne Zukunft im südlichen Mitteleuropa? In: *Allg.Forst-u.J.-Ztg.* 175/10-11 (2004), S. 210–224
- [135] RÖHLE, H.: Zur Zuwachskinetik der Fichte in verschiedenen Schadgebieten Bayerns. In: *GSF-Bericht* 10 (1987), S. 144–155
- [136] RÖHLE, H.: *Zum Wachstum der Fichte auf Hochleistungsstandorten in Südbayern*. Mitt. aus der Staatsforstverw. Bayerns, 48, 272 S., 1995

- [137] RÖHRIG, E.: *Waldbau auf ökologischer Grundlage. Der Wald als Vegetationstyp und seine Bedeutung für den Menschen*. Hamburg, Berlin, Parey Bd. 1, 1-283, 1980
- [138] RICHTER, D.: *Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Messfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers*. Berichte des Deutschen Wetterdienstes 194, 1995
- [139] RIEMER, T.: *Über die Varianz von Jahrringbreiten. Statistische Methoden für die Auswertung der jährlichen Dickenzuwächse von Bäumen unter sich ändernden Lebensbedingungen*, Univ. Göttingen, Ber. D. Forschungszentrums Waldökosysteme d. Univ. Göttingen, Reihe A 18: 1-375, Diss., 1994
- [140] RIGLING, A. ; DOBBERTIN, M. ; BÜRGI, M. ; FELDMEIER-CHRISTE, E. ; GIMMI, U. ; GINZLER, C. ; GRAF, U. ; MAYER, P. ; ZWEIFEL, R. ; WOHLGEMUTH, T.: Baumartenwechsel in den Walliser Waldföhrenwäldern. In: *Forum für Wissen, Wald und Klimawandel*, 2006
- [141] ROLOFF, A.: *Kronenentwicklung und Vitalitätsbeurteilung ausgewählter Baumarten der gemäßigten Breiten*. Frankfurt, 258 pp, 1989
- [142] ROLOFF, A.: *Baumkronen, Verständnis und praktische Bedeutung eines komplexen Naturphänomens*. Stuttgart, 178 pp, 2001
- [143] ROLOFF, A. ; BÄRTELS, A.: *Flora der Gehölze - Bestimmung, Eigenschaften, Verwendung*. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart, 2008
- [144] ROLOFF, A. ; GRUNDMANN, B.M.: Waldbaumarten und ihre Verwendung im Klimawandel. In: *Archiv f. Forstwesen u. Landschaftsökologie* 42/3 (2008), S. 97–109
- [145] ROLSTAD, J. ; GJERDE, I. ; GUNDERSEN, V.S. ; SAETERSDAL, M.: Use of indicator species to assess forest continuity: a critique. In: *Conservation Biology* 16 (1) (2002), S. 253–257
- [146] SCHÖNWIESE, C.D. ; MALCHER, J.: Nichtstationarität oder Inhomogenität? Ein Beitrag zur statistischen Analyse klimatologischer Zeitreihen. In: *Wetter und Leben* 37 (1985), S. 181–193
- [147] SCHÜTT, P. ; WEISGERBER, H. ; LANG, U.M. ; ROLOFF, A. ; STIMM, B.: *Enzyklopädie der Holzgewächse: Handbuch und Atlas der Dendrologie*. Landberg am Lech: Ecomed, 1994-2008
- [148] SCHÜTZ, J.-P.: Zum Problem der Konkurrenz in Mischbeständen. In: *Schweiz. Z. Forstwes.* 140(12) (1989), S. 1069–1083

- [149] SCHWEINGRUBER, F.H.: *Der Jahrring - Standort, Methodik, Zeit und Klima in der Dendrochronologie*. Verlag Paul Haupt Bern und Stuttgart, 1983
- [150] SCHWEINGRUBER, F.H. ; ALBRECHT, H. ; BECK, M. ; HESSEL, J. ; JOOS, K. ; KELLER, D. ; KONTIC, K. ; NIEDERER, M. ; NIPPEL, C. ; SPANG, S. ; SPINNLER, A. ; STEINER, B. ; WINKLER SEIFERT, A.: Abrupte Zuwachsschwankungen in Jahrringabfolgen als ökologische Indikatoren. In: *Dendrochronologia* 4 (1986), S. 125–183
- [151] SCHWEINGRUBER, F.H. ; ECKSTEIN, D. ; SERRE-BACHET, F. ; BRÄKER, O.U.: Identification, presentation and interpretation of event years and pointer years in dendrochronology. In: *Dendrochronologia* 8 (1990), S. 9–38
- [152] SCHWERDTFEGER, F.: *Die Waldkrankheiten, ein Lehrbuch der Forstpathologie und des Forstschutzes*. Parey, Hamburg, Berlin, 1981
- [153] SIEGL, T. ; SCHÖNBORN, A. v.: *Fruktifikation der Fichte (Picea abies [L.] Karst.)*. Lehrstuhl für Forstpflanzenzüchtung und Immissionsforschung München, 1990
- [154] SJÖRS, H.: Forest regions. In: *Acta Phytogeographica Suecica* 50 (1965), S. 48–63
- [155] SPIECKER, H.: Liming, nitrogen and phosphorus fertilization and the annual increment of Norway spruce stands on long-term permanent plots in southwestern Germany. In: *Fert. Res.* 27 (1991), S. 87–93
- [156] SPIECKER, H.: Growth dynamics in a changing environment - long-term observations. In: *Plant and Soil* 168-169 (1995), S. 555–561
- [157] SPIECKER, H.: Overview of recent growth trends in European forests. In: *Water, Air, and Soil Pollution* 116 (1999), S. 33–46
- [158] SPIECKER, H. ; MIELIKÄINEN, K. ; KÖHL, M. ; SKOVSGAARD, J.P. ; SPIECKER, H. (Hrsg.) ; MIELIKÄINEN, K. (Hrsg.) ; KÖHL, M. (Hrsg.) ; SKOVSGAARD, J.P. (Hrsg.): *Growth trends in European Forests*. Springer Verlag, Heidelberg, 1-372, 1996
- [159] SPÄTH, V.: Hochwassertoleranz von Waldbäumen in der Rheinaue. In: *AFZ/Der Wald* 57 (2002), S. 807–810
- [160] Kap. Forest decline and growth trends in central Europe - a review In: STERBA, H.: *Growth trends in European forests*. Springer, Berlin, Heidelberg, 1996, S. 149–165
- [161] STEYRER, G. ; TOMICZEK, C.: Orkanshäden und Witterung begünstigen Borkenkäfer. In: *Forstschutz aktuell* 40 (2007), S. 3–5

- [162] STRACKEE, J. ; JANSMA, E.: The statistical properties of mean sensitivity - a reappraisal. In: *Dendrochronologia* 10 (1992), S. 121–135
- [163] SWETNAM, T.W. ; ALLEN, C.D. ; BETANCOURT, J.L.: Applied historical ecology: using the past to manage for the future. In: *Ecological Applications* 9 (4) (1999), S. 1189–1206
- [164] TOMÉ, M. ; BURKHART, H. E.: Distance-dependent competition measures for predicting growth of individual trees. In: *Forest Science* 35 (3) (1989), S. 816–831
- [165] TRIEBENBACHER, C. ; IMMLER, T.: Aktuelle Borkenkäfersituation in Bayern. In: *Forstschutz aktuell* 40 (2007), S. 5–7
- [166] UNKRIG, W.: Zur Verjüngung von Buche und Fichte im Naturwald Sonnenkopf. In: *Forst und Holz* 52(18) (1997), S. 538–543
- [167] Kap. Has site productivity changed? A case study in the eastern Swabian Alb, Germany In: UNTHEIM, H.: *Growth trends in European forests*. Springer, Berlin, Heidelberg, 1996, S. 133–147
- [168] WERF, G.W. van d. ; SASS-KLAASSEN, U.G.W. ; MOHREN, G.M.J.: The impact of the 2003 summer drought on the intra-annual growth pattern of beech (*Fagus sylvatica* L.) and oak (*Quercus robur* L.) on a dry site in the Netherlands. In: *Dendrochronologia* 25 (2007), S. 103–112
- [169] WIGLEY, T.M.L. ; BRIFFA, K.R. ; JONES, P.D.: On the average value of correlated time series with applications in Dendroclimatology and Hydrometeorology. In: *Journal of Climate and Applied Meteorology* 23 (1984), S. 201–213
- [170] WILMKING, M. ; D'ARRIGO, R. ; JACOBY, G.C. ; JUDAY, G.P.: Increased temperature sensitivity and divergent growth trends in circumpolar boreal forests. In: *Geophysical Research Letters* 32, L15715. doi:10.1029/2005GLO23331 (2005)
- [171] WILSON, R. ; D'ARRIGO, R. ; BUCKLEY, B. ; BÜNTGEN, U. ; ESPER, J. ; FRANK, D. ; LUCKMAN, B. ; PAYETTE, S. ; VOSE, R. ; YOUNGBLUT, D.: A matter of divergence: Tracking recent warming at hemispheric scales using tree ring data. In: *Journal of Geophysical Research* 112 (2007), S. D17103, doi:10.1029/2006JD008318
- [172] WORBES, M. ; HOFMANN, M. ; ROLOFF, A.: Wuchsdynamik der Baumschicht in einem Seggen-Kalkbuchenwald in Nordwestdeutschland (Huckstein). In: *Dendrochronologia* 10 (1992), S. 87–102
- [173] WROBEL, S. ; ECKSTEIN, D.: Determining time and environment from tree rings. In: *PACT* 36 (1997), S. 33–49

Literaturverzeichnis

- [174] WÄTZIG, H. ; FISCHER, B.: Untersuchungen über den Jahrrinausfall in Fichtenbeständen. In: *Wiss. Z. Techn. Univ. Dresden* 6 (1988), S. 273–275
- [175] YAMAGUCHI, D.K. ; BRUNSTEIN, F.C.: Special sanding films and sandpapers for surfacing narrow-ring increment cores. In: *Tree-Ring Bulletin* 51 (1991), S. 43–46

Danksagung

Diese Arbeit entstand mit der freundlichen Genehmigung und zuvorkommenden Unterstützung von Prof. Dr. A. Roloff. Ich möchte mich sehr für die kritischen und hilfreichen Gespräche bedanken. Das Thema der Arbeit ermöglichte mir, die vielfältigen Methoden der Dendrochronologie kennen zu lernen und mein Interesse zu wecken.

Bei Prof. Dr. H. Röhle möchte ich mich sehr bedanken für seine fachlichen Anregungen und die Beratung bei schwierigen Fragestellungen.

Eine wichtige Unterstützung war mir Prof. Dr. D. Eckstein, der mir mit seiner Erfahrung auf dem Fachgebiet das Verständnis erleichtert hat und mir den Blick auf das Ganze geöffnet hat.

Des Weiteren möchte ich mich sehr bedanken, bei den Mitarbeitern des Instituts für Forstbotanik und Forstzoologie in Tharandt, die bei der Entstehung dieser Arbeit geholfen haben. Insbesondere danke ich Dr. S. Bonn, der mir zu Anfang die Dendrochronologie nahe brachte und durch zahlreiche Diskussionen während der Entstehung der Arbeit wertvolle Hilfestellungen gegeben hat.

Diese Arbeit wurde gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft und war Teil eines Kooperationsprojektes. Ich möchte auch sehr den Mitgliedern des zweiten Projektteils danken. Ich möchte hier Prof. Dr. A. Bolte für seine tatkräftige Unterstützung bei der Feldarbeit zu Beginn des Projekts und den wiederholten Diskussionen zu den fachlichen Fragestellungen danken. Meiner Kollegin F. Kampf danke ich sehr für die gute Zusammenarbeit auf den Untersuchungsflächen und die stete, zuverlässige Hilfe besonders in der Endphase meiner Arbeit. Bei Prof. Dr. J. Brunet von der SLU in Alnarp (Southern Swedish Forest Research Centre) möchte ich mich sehr bedanken für die gute Zusammenarbeit und die Bereitstellung der Untersuchungsflächen in Schweden. Des Weiteren danke ich sehr für die Besorgung der schwedischen Klimadaten und die hilfreichen Informationen zu den Untersuchungsflächen. An dieser Stelle möchte ich mich auch besonders bei meinen Feldarbeitsassistenten bedanken.

Meiner Familie danke ich für die persönliche Unterstützung bei dieser Arbeit.