

Beziehungen zwischen Klima und Zuwachs, dargestellt am Beispiel von Fichte, Kiefer und Buche in Sachsen

(Mit 11 Abbildungen und 5 Tabellen)

H. RÖHLE^{a),c)}, D. GEROLD^{a),c)} und R. GEMBALLA^{b),c)}

(Angenommen September 2009)

SCHLAGWÖRTER – KEY WORDS

Klima; Zuwachs; Fichte; Kiefer; Buche.

Climate; increment; Norway spruce; Scots pine; beech.

0. VORBEMERKUNG

Bereits in den 1970er Jahren initiierte Prof. WENK Untersuchungen zum Einfluss von Temperatur und Niederschlag auf den Radialzuwachs der Fichte in den ostdeutschen Mittelgebirgen (WENK und FIEDLER, 1973 a, b, 1979; FIEDLER und WENK, 1977; WENK und VOGEL, 1992; VOGEL, 1992; WENK et al., 1995). Aufbauend auf den dabei gewonnenen Erkenntnissen wurden Mitte der 1990er Jahre hochauflösende Dendrometer entwickelt (VOGEL, 1994; VOGEL und ANDERS, 1995), mit deren Hilfe sich erste kausale Zusammenhänge zwischen Wachstum und Umwelt ableiten ließen (VOGEL et al., 1996). Durch die von SPIECKER et al. (1996) angestoßene Debatte über veränderte Wachstumstrends in europäischen Wäldern wurden auch nach dem Ausscheiden von Prof. WENK die Untersuchungen zu diesem Themenfeld am Tharandter Institut weitergeführt, wobei die Analyse der Beziehungen zwischen Witterungseinflüssen und der Radial- und Höhenzuwachsentwicklung der Fichte in den sächsischen Mittelgebirgen im Vordergrund stand (NEUMANN und RÖHLE, 2001, 2002; MÄKINEN et al., 2002, 2003).

1. EINLEITUNG UND ZIELSTELLUNG

Verbreitungsgebiete, aber auch Wuchskraft und Konkurrenzstärke von Baumarten sind eng verknüpft mit den Standorteigenschaften. Diese wiederum resultieren aus den wesentlichen pedogenen und klimatologischen Charakteristika. Szenariorechnungen zufolge könnten sich die klimatischen Rahmenbedingungen in Sachsen bis 2100 regional höchst unterschiedlich entwickeln (SÄCHSISCHES

STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT UND LANDWIRTSCHAFT, 2007), was die Forstwirtschaft vor erhebliche Herausforderungen stellen würde. Forstbetriebliche Konzepte und hier vor allem die Baumartenwahl sind i.d.R. auf Dekaden bzw. sogar Jahrhunderte ausgerichtet und müssen deshalb heutige wie auch künftige Wuchsbedingungen bei der Maßnahmenplanung berücksichtigen.

Im Bundesland Sachsen orientieren sich Bestandeszieltypen und Waldentwicklungstypen der Forstwirtschaft an Leitwaldgesellschaften, die durch bestimmte Hauptbaumarten geprägt werden (EISENHÄUER, 2008; GEMBALLA und SCHLUTOW, 2007; SCHLUTOW und GEMBALLA, 2008). Von besonderem Interesse ist es deshalb, die Kenntnisse über Sensitivität und Leistungsfähigkeit der in Sachsen gegenwärtig wichtigen forstlichen Baumarten Fichte, Kiefer und Buche in Abhängigkeit vom Klima zu erweitern¹⁾. Als Weiserwert für die Wuchskraft der untersuchten Baumarten wurde dabei der Radialzuwachs von weitgehend konkurrenzarm erwachsenen Bäumen aus der herrschenden Schicht herangezogen. Dazu wurden waldwachstumskundliche Daten bereits bestehender Versuchsflächen in Fichten-, Kiefern- und Buchenbeständen herangezogen und für diese die Abhängigkeit des Radialzuwachses von klimatischen Parametern unter Berücksichtigung der konkreten Standortverhältnisse (Klima, Bodenwasserhaushalt) analysiert.²⁾

¹⁾ Neben den drei genannten Baumarten kommt auch der Eiche in Sachsen eine bedeutende Rolle zu. Im Rahmen des vorliegenden Beitrages wird diese Baumart aufgrund der nur sehr beschränkten Datenbasis allerdings nicht näher betrachtet.

²⁾ Der vorliegende Beitrag behandelt den ertragskundlichen Teil einer vom Staatsbetrieb Sachsenforst in Auftrag gegebenen Studie zum Thema „Dynamik von Standortparametern und Leitwaldgesellschaften im Klimawandel – Teilvorhaben: Referenzdatenerweiterung, Leitwaldgesellschaften und Quantifizierung von Vitalität und Leistungsfähigkeit der Hauptbaumarten“. Diese Studie wurde in Zusammenarbeit mit Dr. JÖRG SCHERZER, Firma UDATA – Umweltschutz und Datenanalyse, und RAINER GEMBALLA, Staatsbetrieb Sachsenforst durchgeführt. Die Finanzierung erfolgte durch die Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft, Dresden.

Zur Analyse der klimatischen Bedingungen an den Untersuchungsstandorten lagen umfangreiche Messwertreihen aus verschiedenen Quellen in abweichender zeitlicher und räumlicher Auflösung vor. Für den Prognosezeitraum bis zum Jahr 2100 standen aktuelle Klimaszenarien für 170 Klimastationen in Sachsen auf Basis des dynamisch fortentwickelten globalen Klimamodells des Deutschen Klimarechenzentrums in Hamburg zur Verfügung. Im Rahmen dieser Studie erfolgten alle Analysen und Szenariorechnungen zum Komplex Klima-Bodenwasserhaushalt einschließlich der Homogenisierung und Regionalisierung der Witterungsdaten durch die Firma UDATA und werden in diesem Beitrag nicht näher behandelt.

^{a)} Prof. Dr. habil. HEINZ RÖHLE, Dr. habil. DOROTHEA GEROLD. Lehrstuhl für Waldwachstum und Holzmesskunde, Fachrichtung Forstwissenschaften, Technische Universität Dresden, Piener Straße 8, D-01737 Tharandt. Tel.: 03 5203/3 83 16 15. E-Mail: roehle@forst.tu-dresden.de

^{b)} Dipl.-Ing. RAINER GEMBALLA. Ref. 43 Bodenmonitoring/Standortserkundung/Labor, Kompetenzzentrum Wald und Forstwirtschaft, Staatsbetrieb Sachsenforst, Bonnewitzer Straße 34, D-01796 Pirna.

^{c)} Prof. Dr. HEINZ RÖHLE ist Inhaber des Lehrstuhls für Waldwachstum und Holzmesskunde an der Fachrichtung Forstwissenschaften der Technischen Universität Dresden.

Dr. DOROTHEA GEROLD ist als wiss. Mitarbeiterin am Lehrstuhl beschäftigt.

Dipl.-Ing. RAINER GEMBALLA ist als Referent für Standortserkundung beim Staatsbetrieb Sachsenforst tätig.

Zentrales Ziel der Studie war es, der Forstverwaltung erste orientierende Entscheidungsgrundlagen zur künftigen Baumartenwahl im Zuge des Waldumbaus bei sich verändernden klimatischen Bedingungen zur Verfügung zu stellen. Im Einzelnen wurden nachstehende Teilziele verfolgt:

- Versuchsflächenweise Aufbereitung der vorliegenden Radialzuwachsreihen und Herleitung standardisierter Radial-Zuwachschronologien,
- Analyse der Beziehungen zwischen den Radial-Zuwachschronologien und den Standortvariablen (Witterungsdaten und Bodenwasserhaushaltswerte) und darauf aufbauende regressionsanalytische Modellierung des stochastischen linearen Zusammenhangs von Zuwachs- und Standortvariablen und
- Prognose der künftigen Wachstumstrends für die Baumarten Fichte, Kiefer und Buche bis zum Jahr 2100 mit Hilfe der Regressionsmodelle im Anhalt an die im IPCC-Szenario B1 unterstellte Klimaentwicklung.

Unter der Annahme, dass die derzeit herrschenden Beziehungen zwischen Zuwachs und Standortfaktoren auch künftig gelten, stand bei der Modellierung eine möglichst hohe Anpassungsgüte im Vordergrund, d.h. die Verwendung von Regressionsmodellen mit einem hohen Bestimmtheitsmaß (R^2).

2. EINFLUSS VON STANDORTFAKTOREN AUF DEN RADIALZUWACHS

Die Methodik zur Untersuchung der Beziehungen zwischen Standortfaktoren und Zuwachsverläufen von Bäumen und Beständen umfasst sowohl die Bestimmung geeigneter statistischer Modelle als auch die Auswahl und Aufbereitung der abhängigen Variablen (Zuwachsdaten) und der unabhängigen Variablen (Erklärungsgrößen, im vorliegenden Fall Daten zu Witterung und Bodenwasserhaushalt). Datenauswahl und Datenaufbereitung stehen dabei in wechselseitigem Zusammenhang mit der statistischen Modellierung oder können auch selbst als deren Bestandteil angesehen werden: Einerseits bestimmt die Datengrundlage die Möglichkeiten der Modellierung, andererseits ergeben sich die Anforderungen an die Datengrundlage aus den Notwendigkeiten der statistischen Modellbildung.

Die in der Dendroklimatologie eingesetzten statistischen Methoden sind sehr vielfältig. Sie schließen je nach Fragestellung folgende Verfahren ein:

- Zeitreihenanalyse (Autokorrelationsfunktion zur Beschreibung zeitlicher Abhängigkeiten und Spektralanalyse zur Beschreibung von Periodizitäten in Zuwachsverläufen)
- Cluster- und Diskriminanzanalyse (Unterscheidung und Zuordnung von Zuwachsverlaufstypen), der Varianzanalyse (Nachweis bestimmter Einflussgrößen)
- Korrelations- und Regressionsanalyse (Nachweis und Quantifizierung von stochastischen Zusammenhängen und deren funktionale Beschreibung)
- Hauptkomponentenanalyse (Suche nach gemeinsamen Ursachekomplexen von untereinander abhängigen zufälligen Erscheinungen und Dimensionsreduktion, d.h. Reduzierung der Anzahl der erklärenden Variablen).

Dementsprechend umfangreich fällt die Literatur zu den statistischen Methoden der Dendroklimatologie aus. Standardwerke sind u.a. FRITTS (1976) und COOK und KAIRIUKSTIS (1990), daneben gibt es zahllose Arbeiten zu speziellen methodischen Konzepten. Eine einschlägige Literaturübersicht ist bei der International Tree-Ring Data Bank (GRISSINO-MAYER und FRITTS, 1997) oder bei SCHWEINGRUBER (1996) zu finden.

Im Folgenden werden die im Rahmen der vorliegenden Untersuchung relevanten Methoden skizziert. Dabei wird sowohl die

Auswahl und Aufbereitung der Zuwachsdaten einschließlich der Ableitung von Zuwachsindizes und die Chronologiebildung als auch die Kopplung der Zuwachs- und Standortdaten durch geeignete Modelle abgehandelt.

2.1 Zuwachstrend und Trendschätzung

Der Zuwachstrend charakterisiert nach SPIECKER (1996) das mittlere Niveau einer Zuwachsänderung in einer Zeitspanne von mindestens 30 Jahren Dauer. Oft wird als Trend aber auch die langfristig ausgeglichene Zuwachsentwicklung selbst bezeichnet. Je nach Methode und Zeitspanne für den Ausgleich kann der Trend einer bestimmten Zuwachsreihe sehr unterschiedlich ausfallen. Der Trendbegriff kann sich auf den altersabhängigen Zuwachsverlauf oder auf eine umweltbedingte Drift der Wuchsdynamik beziehen. Die zu untersuchenden Zuwachsreihen können dabei die Zuwachsentwicklung über den Zeitraum einer Baumgeneration oder auch die eines kürzeren oder längeren Intervalls beschreiben.

Allgemeiner kann man einen „glatten“ oder langwelligen Anteil einer Zeitreihe, d.h. die lang- oder mittelfristigen Änderungen, als Trend bezeichnen. Die Methoden zur Trendbestimmung können nach COOK et al. (1990) in deterministische und stochastische Methoden unterteilt werden. Im deterministischen Fall ist die allgemeine Gestalt der Ausgleichskurve durch parametrische Trendfunktionen (Ausgleichsfunktionen) vorgegeben. Als Trendfunktionen kommen z.B. lineare, polynomiale, negativ exponentielle, hyperbolische Funktionen, die Hugershoffsche Funktion, die Weibull-Dichtefunktion und Potenzfunktionen in Frage. Sie können an die gesamte Zeitreihe oder nur an einen Teilbereich angepasst werden. Die parametrischen Trendfunktionen beziehen sich meist auf den reinen Alterstrend.

Im stochastischen Fall ist der Trend keine parametrische Funktion, sondern wird in stärkerem Maße von der Zufälligkeit der Zuwachsreihe bestimmt. Typische Beispiele sind Spline-Ausgleichsfunktionen (VISSER und MOLENAAR, 1990; VAN DEUSEN und REAMS, 1993) oder gleitende Mittel. Sind die gleitenden Mittel entsprechend der Dichtefunktion der Normalverteilung gewichtet, spricht man von einem Gaußschen Filter.

2.2 Trendbestimmung und Trendeliminierung

Die stochastische Trendbestimmung bzw. Trendeliminierung lässt sich in eleganter Weise mit Mitteln der Zeitreihenanalyse realisieren (z.B. SCHLITGEN und STREITBERG, 1999). Die Trendeigenschaften können hierbei zum einen im Zeitbereich und zum anderen im Frequenzbereich beschrieben werden. Im Zeitbereich wird eine Reihe als Zahlenfolge aufgefasst und auf der Grundlage der Autokovarianzfunktion dargestellt, d.h. der empirischen Kovarianz zwischen der Zeitreihe selbst und der um t Zeitschritte verschobenen Zeitreihe als Funktion von t . Im Frequenzbereich wird eine Zeitreihe als Überlagerung harmonischer Schwingungen verschiedener Frequenzen aufgefasst und durch das Periodogramm charakterisiert, das die Intensität des Auftretens von Schwingungen in Abhängigkeit von ihrer Frequenz angibt und eine Zerlegung der Gesamtvarianz der Zeitreihe für ihre frequenzbezogenen Anteile ermöglicht.

Beide Betrachtungsweisen für Zeitreihen sind äquivalent und über die Fouriertransformation miteinander verbunden. Die Autokovarianzfunktion enthält die gleiche Information wie das Periodogramm. Es kann daher diejenige Betrachtungsweise gewählt werden, die komfortabler ist oder eine bessere Interpretierbarkeit der Ergebnisse erlaubt.

Die stochastische Trendbestimmung kann im Frequenzbereich als Isolierung niedrig-frequenter Zeitreihenanteile, d.h. als Tiefpass-Filterung gesehen werden. So wie die Trendbestimmung eine Tiefpass-Filterung darstellt, ist die Trendeliminierung eine Hochpass-Filterung, d.h. eine Isolierung der hochfrequenten Zeitrei-

henanteile. Wird der Trend explizit bestimmt, erfolgt seine Eliminierung meist durch Division der Originalwerte mit den entsprechenden Trendwerten. Das hat gegenüber der Subtraktion den Vorteil des Ausgleichs der Zuwachsamplituden, die im Mittel dem entsprechenden Trendwert proportional sind, und führt dadurch zu einer weitgehenden Varianzstabilisierung. Die Trendeliminierung kann durch Anwendung eines Hochpass-Filters aber auch direkt erfolgen. Für die Tiefpass- und die Hochpass-Filterung können die gewünschten Filtereigenschaften im Zeit- oder im Frequenzbereich formuliert und die entsprechenden Filter, meist lineare Filter, konstruiert werden (SCHLITZGEN und STREITBERG, 1999).

Ein gängiges Verfahren zur Filterung im Rahmen der Zeitreihenanalyse, das auf Radialzuwachsreihen angewendet wird, sind die linearen Modelle der Zeitreihenanalyse (z.B. COOK et al., 1990; GUIOT, 1986; VISSER und MOLENAAR, 1990). Zu ihnen gehören vor allem die Autoregressiven (AR) Modelle, die Modelle der gleitenden Mittel oder Moving-Average-(MA-)Modelle und die aus diesen beiden zusammengesetzten ARMA-Modelle. Es gibt aber zahlreiche Verallgemeinerungen dieser Grundmodelle, die auch als Box-Jenkins-Modelle (BOX und JENKINS, 1976) bekannt sind. Die Definition der linearen Modelle, die formal den linearen Filtern sehr ähnlich sind, erfolgt über die stochastischen Prozesse, die den Zeitreihen zur theoretischen Beschreibung zugrunde gelegt werden (SCHLITZGEN und STREITBERG, 1999).

Die Methoden zur Trendbestimmung bzw. Trendeliminierung, d.h. zur Standardisierung beruhen, dendroökologisch gesehen, auf der Modellvorstellung, dass sich die Zuwachsreihen der betrachteten Elemente in Komponenten verschiedener Ursachen zerlegen lassen. Das klassische Komponentenmodell dieser Art, das "Conceptual Linear Aggregate Model for Tree Rings" (COOK et al., 1990; GRAYBILL, 1982), betrachtet die Jahrringreihe R_t eines Baumes als die Summe verschiedener unbeobachteter Komponentenreihen:

$$R_t = A_t + C_t + \delta D1_t + \delta D2_t + E_t, \quad t = 1, \dots, n$$

mit dem Alterstrend A , der klimabezogenen Komponente C , der lokalen endogenen Störkomponente $D1$ (z.B. durch Konkurrenzänderung), der bestandesweiten exogenen Störkomponente $D2$ (z.B. durch Feuer, Insekten, Krankheiten) und dem unerklärbaren Rest E , der keiner Einflussgröße zugeordnet werden kann. Der binäre Indikator δ zeigt das Auftreten ($\delta=1$) oder das Fehlen ($\delta=0$) des entsprechenden Störterms zu einer bestimmten Zeit t an. Für die Fehlergrößen E werden sowohl zeitliche (innerhalb einer Zuwachsreihe) als auch räumliche (zwischen den Reihen verschiedener Bäume) Unkorreliertheit vorausgesetzt.

Die Komponenten C und $D2$ lassen sich zu einem allgemeinen bestandesbezogenen zufälligen Zuwachsanteil und die Komponenten $D1$ und E zu einem baumbezogenen zufälligen Anteil zusammenfassen. Einzelbaumbezogen können aber auch die Komponenten A , $D1$ und $D2$ als Wachstumstrend

$$G_t = f(A_t, \delta D1_t, \delta D2_t), \quad t = 1, \dots, n$$

zusammengefasst werden, der, abgesehen vom Fehlerterm E , nur von der Klimakomponente C überlagert wird. Ausgehend von dem Wachstumstrend G kann die Trendeliminierung wieder durch Subtraktion oder Division erfolgen.

2.3 Chronologiebildung

Die Trendeliminierung bzw. Standardisierung nach FRITTS (1976) und COOK et al. (1990) wird in der Literatur auch häufig als Indizierung bezeichnet, die trendbereinigten Zuwachswerte werden folglich (Zuwachs-) Indizes genannt.

Die Zuwachs-Chronologie selbst, welche die Basis aller weiterführenden Analysen zur Untersuchung der Standort-Zuwachsbezie-

hungen bildet, entsteht aus den Einzelbaumzuwachsreihen einer Stichprobe durch jahresweise Mittelwertbildung und Indizierung. Sie kann sich räumlich auf einen Bestand oder ein Gebiet und zeitlich auf eine Baumgeneration oder im Fall aufeinanderfolgender, sich zeitlich überlappender Indexreihen auf einen größeren Zeitraum von bis zu mehreren Tausend Jahren beziehen. Da die Methode der Trendbestimmung und damit auch der Chronologiebildung vom Untersuchungsziel abhängt, ist die Chronologie selbst auch immer als zielbezogen zu verstehen. Eine stichprobenbezogene Chronologie kann als Schätzung der theoretischen Chronologie der Grundgesamtheit von Bäumen, die durch die Stichprobe repräsentiert wird, aufgefasst werden. Die Genauigkeit, mit der die theoretische Chronologie durch die Stichproben-Chronologie wiedergegeben wird, hängt neben dem Stichprobenumfang von der Größe der allgemeinen, d.h. der einzelbaumunabhängigen Zuwachsanteile der Stichprobenbäume ab, also davon, wie gut die Indexreihen der Stichprobenbäume das Zuwachsverhalten der Grundgesamtheit widerspiegeln.

3. DATENMATERIAL

Als Datengrundlage³⁾ dienen Klima- und Bodenwasserhaushaltsparameter sowie Radialzuwachsreihen von insgesamt 24 Probestandorten. Wie *Tabelle 1* zeigt, umfasst das Datenmaterial bei Fichte sowohl bezüglich der Wuchskraft (Bonität) als auch hinsichtlich der Standortmerkmale ein breites Spektrum und repräsentiert damit das Verbreitungsgebiet in Sachsen. Die Kiefern- und Buchenversuchsflächen dagegen decken nur Ausschnitte der Areale dieser beiden Baumarten in Sachsen ab.

In Ergänzung zu bereits vorliegenden Radialzuwachsreihen (zehn Fichten-, sechs Kiefern- und drei Buchenversuchsflächen) wurden fünf Probestandorte in Fichtenbeständen ausgewählt, die auf einem Höhengradienten vom Osterzgebirge zur Dresdner Heide liegen. In diesen fünf Beständen erfolgte an jeweils sieben Bäumen aus dem Oberhöhenkollektiv eine Bohrkernentnahme zur Analyse des Radialzuwachses. Auf den Flächen aus dem Projekt "Recognition" lagen Zuwachsdattierungen auf der Grundlage von Stammscheibenanalysen bis einschließlich 1999 vor, auf den Level-II-Flächen reichte der Zeitraum bis einschließlich 2006 (Bohrkerne) und auf den zusätzlich beprobten Messflächen bis einschließlich 2007 (Stammscheiben/Bohrkerne).

Die Radialzuwachs-Bestandesmittelkurven der drei untersuchten Baumarten weisen unterschiedliche Charakteristiken auf: Während bei den Buchenflächen (*Abb. 1 oben*) ein leichter altersbedingter Rückgang des Zuwachses zu beobachten ist, verlaufen die Mittelkurven der Kiefernflächen ziemlich uneinheitlich. Bei den Fichtenflächen (*Abb. 1 unten*) dagegen ist ein Anfang der 1970er Jahre einsetzender und bis Ende der 1980er Jahre anhaltender Zuwachseinbruch festzustellen, auf den eine bis zum Jahr 2000 anhaltende Phase steigender Zuwächse folgt. Eine ähnliche, wenn gleich zeitlich früher einsetzende Zuwachserholung wurde für Fichte auch in anderen Regionen Deutschlands nachgewiesen (RÖHLE, 1997). Nach dem Jahr 2000 ist auf dem überwiegenden

³⁾ Dankenswerterweise konnten die im Staatsbetrieb Sachsenforst gewonnenen Radialzuwachsreihen aus den Projekten Recognition: EU-FAIR CT98-4124 und Level-II: FOREST FOCUS 2003/2004: No 07030101/2005/408679/FF/B3 genutzt werden. Die Modellierung der Klima- und Bodenwasserhaushaltsparameter im Rahmen dieses Projektes wurde von UDATA – Umweltschutz und Datenanalyse vorgenommen. Bei der Simulation des Klimageschehens bis zum Jahr 2100 fand das IPCC-Szenario B1 Verwendung. Zur Simulation des Bodenwasserhaushalts diente das Programm COUPMODEL (SCHERZER und SCHULTZE, 2006). Dieses Programm verfügt über Module für alle relevanten Teilprozesse wie Interzeption, Transpiration, Wurzelwasseraufnahme, Evaporation und ein Bodenwassermodell, das sich auf die Beziehungen zwischen Wassergehalt und Saugspannung (pF-Kurven) sowie die hydraulische Leitfähigkeitsfunktion stützt. Eine ausführlichere Beschreibung der gesamten Modellstruktur findet sich unter <http://amov.ce.kth.se/coup.htm>.

Tab. 1

Übersicht zu Versuchsstandorten und Baumarten.
Overview of research plots and tree species.

Baumart	Waldort	letztes Zuwachsjahr	Alter (Jahre)	Bonität (hg ₁₀₀)	Höhenlage m ü. NN	Temp. °C	NS mm	nFK mm	Projekt
Buche	Hirschsprung 5	1999	160	27	600	6,6	955	123	Recognition
Buche	Jonsdorf 81	1999	166	23	690	6,5	940	191	Recognition
Buche	Niederoderwitz 284	1999	120	33	390	7,7	790	213	Recognition
Fichte	Eibenstock 81 II	1999	73	31	840	5,6	1136	126	Recognition
Fichte	Muldenberg 135	1999	146	28	730	6,3	1075	159	Recognition
Fichte	Rechenberg 46	1999	109	22	750	6	1024	188	Recognition
Fichte	Sosa 54	1999	79	30	820	5,7	1108	209	Recognition
Fichte	Taubenbach 93	1999	114	31	390	7,6	836	186	Recognition
Fichte	Zöblitz 39 I	1999	99	31	570	6,9	946	269	Recognition
Kiefer	Deschka 81	1999	72	29	181	8,7	691	149	Recognition
Kiefer	Großnaundorf 507	1999	117	20	375	7,9	812	150	Recognition
Kiefer	Sproitz 22	1999	76	24	185	8,7	694	202	Recognition
Kiefer	Straßgräbchen 33	1999	86	24	170	8,7	699	216	Recognition
Kiefer	Waldschänke 187	1999	74	24	187	8,9	692	180	Recognition
Fichte	Bautzen	2006	91	28	440	7,5	822	241	Level-II
Fichte	Cunnersdorf	2006	102	27	440	7,3	853	240	Level-II
Fichte	Klingenthal	2006	87	29	840	5,6	1161	191	Level-II
Fichte	Olbernhau	2006	115	24	720	5,9	1018	217	Level-II
Kiefer	Laußnitz	2006	98	24	170	8,7	699	192	Level-II
Fichte	Dönschten	2007	96	25	600	6,9	928	93	erg. Messfläche
Fichte	Langebrück	2007	121	25	260	8,4	752	167	erg. Messfläche
Fichte	Oberbärenburg	2007	111	18	745	5,7	1032	236	erg. Messfläche
Fichte	Rotherdbach	2007	101	23	725	5,9	1015	200	erg. Messfläche
Fichte	S-Berg	2007	111	26	420	7,6	853	245	erg. Messfläche

Für Temperatur, Niederschlag (NS) und nutzbare Feldkapazität (nFK) ist der Mittelwert der Periode 1961 bis 2006 angegeben. Die Altersangaben beziehen sich auf das Stockalter (Level-II-Flächen und ergänzende Messflächen) bzw. das BHD-Alter (Recognition-Flächen), die Bonität (hg₁₀₀) gibt die Mittelhöhe im Alter von 100 Jahren nach den Ertragstabellen von WENK, RÖMISCH/GEROLD 1984 für Fichte, LEMBCKE/DITTMAR/KNAPP 1975 für Kiefer und DITTMAR/KNAPP/LEMBCKE 1983 für Buche an.

For temperature, precipitation (NS) and available field capacity (nFK) the average of the period 1961 to 2006 is given. The stand ages were derived at stump (Level-II-plots and additional plots) and at breast heights (recognition plots). The site index (hg₁₀₀) is defined by the basal area mean height of the yield tables by WENK/RÖMISCH/GEROLD 1984 for Norway spruce; LEMBCKE/DITTMAR/KNAPP 1975 was used for Scots pine and DITTMAR/KNAPP/LEMBCKE 1983 for beech.

Teil der Fichtenflächen ein tendenzieller Rückgang der Radialzuwächse zu verzeichnen, der bis 2006 anhält und in Ostsachsen (Flächen Bautzen und Cunnersdorf) ausgeprägter in Erscheinung tritt als in Westsachsen (Flächen Olbernhau und Klingenthal). Auf den ergänzend beprobten Fichtenstandorten im Osterzgebirge dagegen stabilisieren sich die Zuwächse, mit Ausnahme der in der Dresdner Heide gelegenen Fläche Langebrück, nach dem Trockenjahr 2003 wieder auf mittlerem Niveau.

Zur Modellierung der Klima-Zuwachsbeziehungen wurde eine Vielzahl von Erklärungsvariablen herangezogen, die für unterschiedliche Bodentiefen (bei Bodenwasserhaushaltsparametern) bzw. Zeitperioden (bei Klimakenngrößen) vorlagen. Als Zielgröße fungierten die baumarten- und, soweit auf Basis des Datenmaterials darstellbar, regionalspezifischen Radial-Zuwachschronologien, die mit Hilfe der Bodenwasserhaushalts- und Klimakenngrößen geschätzt werden sollten. Folgende Variablen standen für die Modellierung der Klima-Zuwachsbeziehungen als Monats- (M) oder Jahreswert (JR), als Wert für die Vegetationsperiode (Ve) oder für die Periode April bis Juni (4-6) zur Verfügung: potentielle FAO Referenzverdunstung (ET_o), Luftfeuchte (F), Globalstrahlung (GS), Niederschlag (NS), Temperatur (T), Tension von x-y cm Bodentiefe (Ten), Maximal- und Minimaltemperatur (T_{max}, T_{min}), klimatische Wasserbilanz (WB), Wassergehalt von x-y cm Bodentiefe (WG), Windstärke (WS) und Wasservorrat von x-y cm Bodentiefe (WV).

4. STANDARDISIERUNG DER ZUWACHSREIHEN

Die Standardisierung der Zuwachsreihen verfolgt das Ziel, langfristige Trends zu eliminieren und eine Radial-Zuwachschronologie

zu generieren, deren Vorhandensein eine unerlässliche Voraussetzung zur Analyse von Witterungs-Zuwachsbeziehungen darstellt (NEUMANN, 2001). Im Folgenden soll das Vorgehen bei der Aufbereitung der Zuwachsdaten, d.h. die Herleitung der standardisierten Radial-Zuwachschronologie, am Beispiel der Buchen-Versuchsfläche Hirschsprung aus dem Recognition-Programm näher erläutert werden.

Bei der Standardisierung werden in einem ersten Schritt (Abb. 2) die synchron verlaufenden Radialzuwachskurven der Probestämme des Bestandes durch arithmetische Mittelwertbildung zu einer Radialzuwachs-Bestandesmittelkurve verdichtet. Durch die Anwendung eines Tiefpass-Filters als Trendfunktion (Moving-Average-Modell mit 3-jährigem Mittel) erfolgt im zweiten Schritt (Abb. 3) die Eliminierung mittel- und langperiodischer Schwankungen. Nach dieser Filterung, bei der die Radialzuwachs-Bestandesmittelkurve einzeljahresweise durch den entsprechenden Wert der Trendfunktion dividiert wird, verbleiben nur die kurzfristigen, durch die jährlich wechselnden Witterungsbedingungen und Bodenwasserhaushaltssituationen bewirkten hochfrequenten Reihen als dimensionsloser Hochpassanteil⁴⁾. In einem dritten Schritt (Abb. 4) wird der Hochpassanteil zentriert um den Mittelwert = 0 und normiert auf die Standardabweichung = 1 (N(0,1)). Diese standardisierten hochfrequenten Reihen besitzen in der Regel einen Trend

⁴⁾ Bei Verwendung von Verfahren, die bei der Mittelwertbildung einen längeren Zeitraum (z.B. 7 Jahre) berücksichtigen, würde die Trendfunktion auch mittelfristige Schwankungen (z.B. hervorgerufen durch Behandlungsmaßnahmen oder Änderungen der Umweltbedingungen) abbilden und damit die im Rahmen der vorliegenden Untersuchung angestrebte Analyse der Klima-Zuwachsbeziehungen verfälschen.

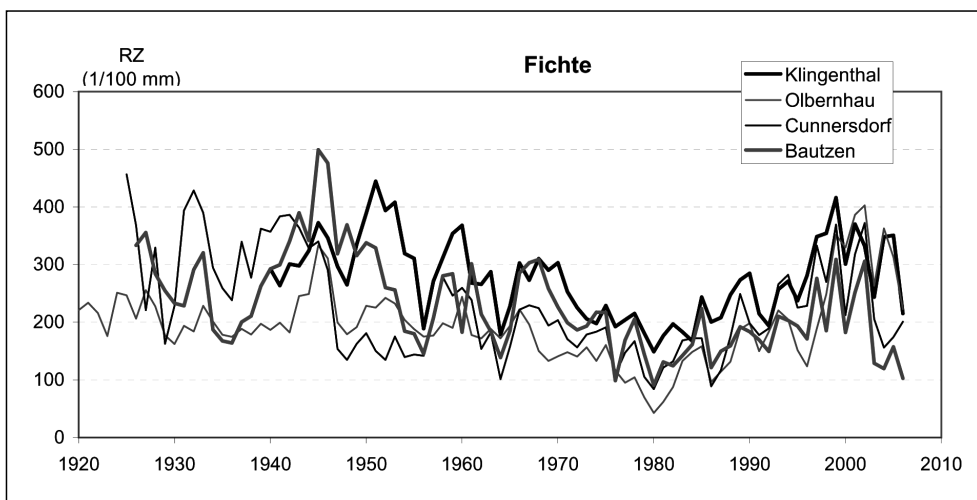
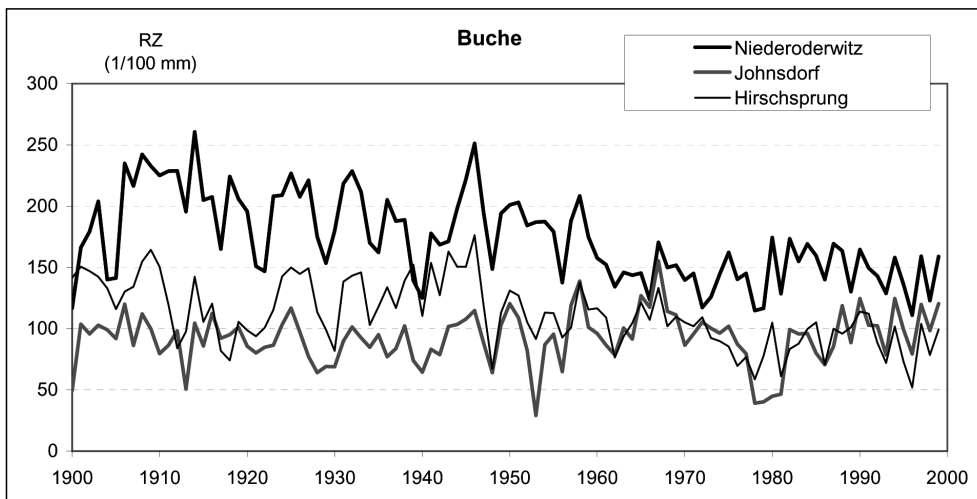


Abb. 1

Darstellung der Radialzuwachs-Bestandesmittelkurven für die Baumarten Buche (obere Grafik) und Fichte (untere Grafik).

Mean radial increment of beech (upper figure) and Norway spruce (lower figure).

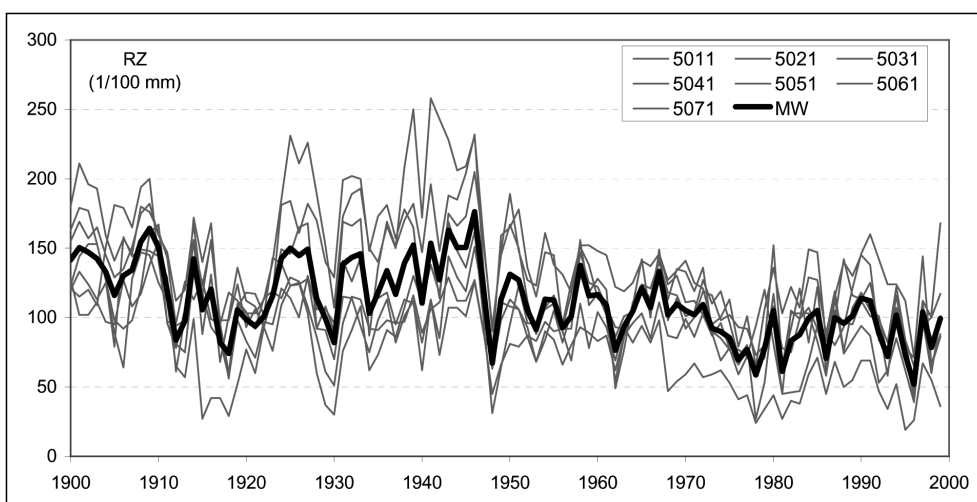


Abb. 2

Radialzuwachskurven der Probebäume (dünne graue Darstellung) und Bestandesmittelkurve (MW, fette schwarze Darstellung).

Radial increment of single trees (grey, thin lines) and mean radial increment of a stand (MW, bold and black).

zu einer mit dem Alter der Bäume ansteigenden Varianz (Instationarität) verursacht durch die altersbedingte Abnahme des jährlichen Zuwachses. Die Instationarität der Zeitreihen wirkt sich bei der statistischen Modellierung störend aus und wird deshalb durch eine weitere Transformation aufgehoben (Schritt 4). Dazu werden die zentrierten und normierten Reihen durch den linearen Trend ihrer Absolutwerte dividiert (Abb. 5). Diese fünfte und letzte Transformation erzeugt die Indexreihe der standardisierten Radial-Zuwachschronologie (Abb. 6), die bei den weiteren statistischen Analysen Verwendung findet.

5. METHODIK ZUR ANALYSE DER BEZIEHUNGEN ZWISCHEN STANDORTFAKTOREN UND RADIAL-ZUWACHS

Zur statistischen Analyse der Beziehungen zwischen Standortfaktoren und Radial-Zuwachschronologien werden die Verfahren der Korrelationsanalyse (zum Nachweis und zur Quantifizierung

von stochastischen Zusammenhängen) und der Regressionsanalyse (zur funktionalen Beschreibung dieser stochastischen Beziehungen) genutzt.

5.1 Korrelationsanalyse

Potentiell stehen mehr als 100 Standortvariable (Daten und daraus hervorgegangene aggregierte oder transformierte Variable) zur Erklärung der Zuwachschronologien zur Verfügung. Die Verwendung der Gesamtheit dieser Variablen in einem Schätzmodell ist aus zwei Gründen nicht realisierbar bzw. nicht sinnvoll:

1) Die Zuwachschronologien umfassen Zeitperioden zwischen minimal ca. 35 und maximal ca. 90 Jahren. In einem Regressionsmodell darf die Anzahl erklärender Variabler (Regressoren) keinesfalls größer sein als die Anzahl der Merkmalsausprägungen der abhängigen Variablen (hier Anzahl der Werte, d.h. Anzahl der Jahre, die eine Radial-Zuwachschronologie beinhaltet), andernfalls wäre die Regression überbestimmt und würde zu nicht interpretier-

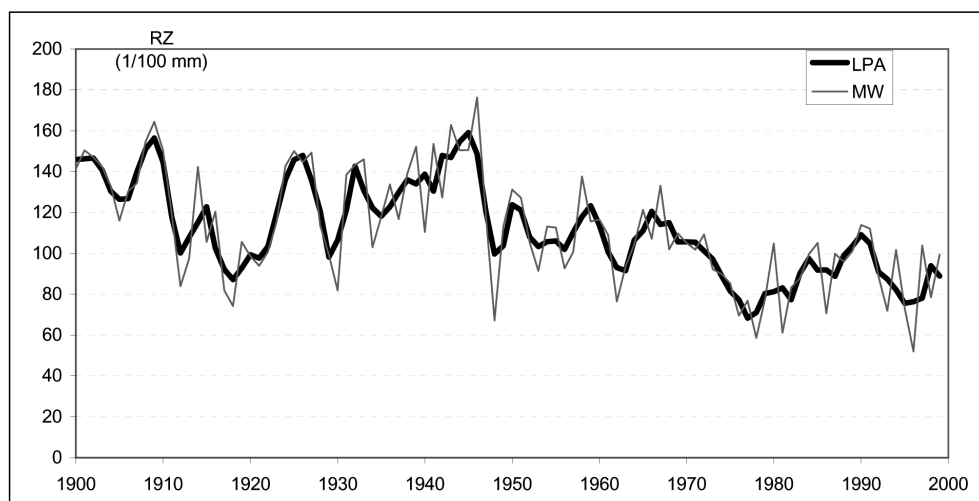


Abb. 3

Bestandesmittelkurve des Radialzuwachses (MW, dünne graue Darstellung) und Tiefpass-Anteil (LPA, fette schwarze Darstellung).

Mean radial increment (MW, grey, thin lines) and low-pass part (LPA, bold and black).

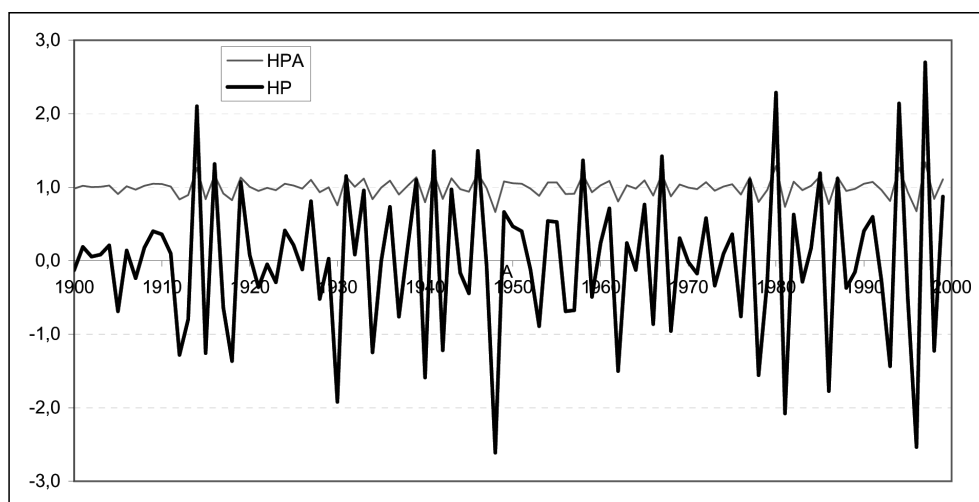


Abb. 4

Hochpass-Anteil nach Tiefpassfilterung (HPA, dünne graue Darstellung) und zentrierter und normierter Hochpass-Anteil (HP, fette schwarze Darstellung).

High-pass part after low-pass filtering (HPA, thin and grey) centred and standardized high-pass part.

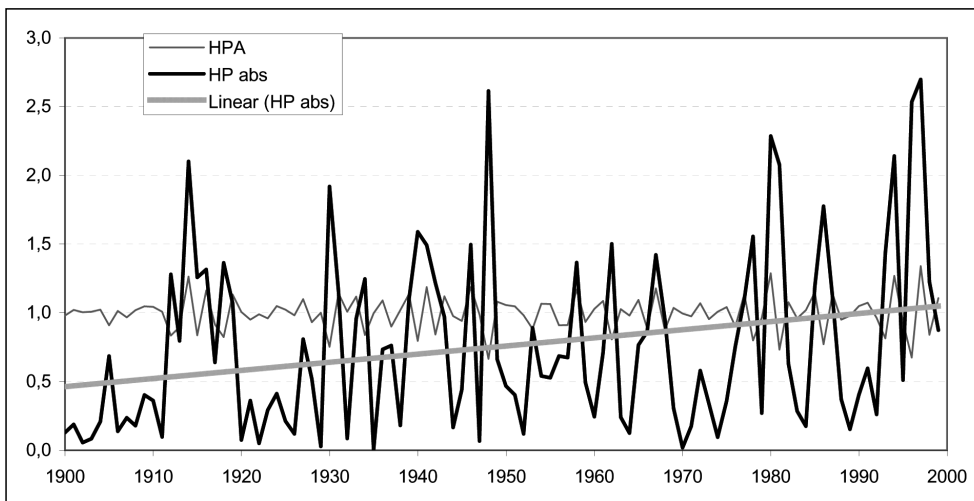


Abb. 5

Hochpass-Anteil (HPA, dünne graue Darstellung), Absolutwerte des zentrierten und normierten Hochpass-Anteils (HP abs, fette schwarze Darstellung) und linearer Trend von HP abs (Linear HP abs, fette graue Darstellung).

High-pass part (HPA, thin and grey), absolute values of the centred and standardized high-pass part (HP abs, bold and black) and the corresponding linear trend (Linear HP abs, bold and grey).

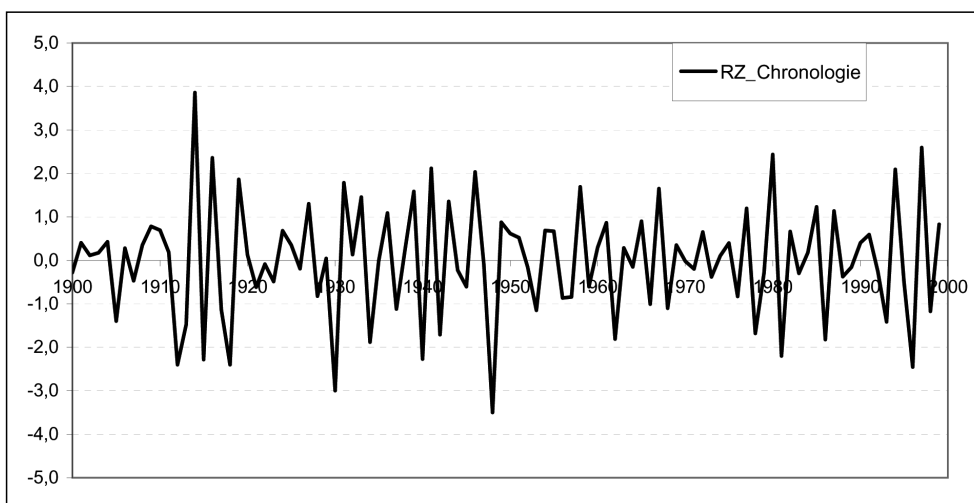


Abb. 6

Standardisierte Radial-Zuwachschronologie (RZ_Chronologie).

Standardized radial increment chronology.

baren Bestimmtheitsmaßen von $R^2 = 1$ führen. Einschränkend muss jedoch erwähnt werden, dass lediglich für den Zeitraum von 1951 bis 2006 vollständige Datensätze zum Witterungsgeschehen vorlagen und deshalb bei der Modellierung des Klima-Zuwachskomplexes auch nur dieser Zeitraum Berücksichtigung fand.

2) Selbst eine Anzahl an Regressoren, die deutlich geringer ist als die Anzahl der Merkmalsausprägungen der abhängigen Variablen, lässt oft keine klare Interpretation der stochastischen Beziehungen zu, da bei z. B. 15 Erklärungsgrößen der konkrete Beitrag jeder einzelnen Variablen zur Erklärung der Varianz der Zielgröße nur schwer abgeschätzt werden kann.

Mit Hilfe der Korrelationsanalyse wird deshalb der Zusammenhang zwischen der abhängigen Variablen und allen unabhängigen Variablen analysiert und zur Entscheidung über die generelle Verwendung von Erklärungsgrößen in einem Regressionsmodell her-

angezogen. Darüber hinaus erlaubt die Analyse partieller Korrelationen die Aufdeckung von Scheinzusammenhängen zwischen zwei Variablen, die sich durch die gemeinsame Abhängigkeit von einer dritten Variablen ergeben.

5.2 Regressionsanalyse

Mittels multipler Regressionsanalysen wird der stochastische lineare Zusammenhang von Zuwachs- und Standortvariablen im Umfang des Bestimmtheitsmaßes funktional beschrieben. Im multiplen Regressionsmodell bilden die Radial-Zuwachschronologien die Zielvariablen und die Standortvariablen (Witterungsdaten und Bodenwasserhaushaltswerte) die erklärenden Variablen (Regressoren). Bei der Aufstellung von Regressionsanschätzern werden dazu aus der Menge der durch die Korrelationsanalyse herausgefilterten, grundsätzlich geeigneten Erklärungsgrößen mit Hilfe der schrittweisen Regressionsanalyse die optimalen Variablenkombinationen

ausgewählt (bei den statistischen Analysen fand das Programm-paket SPSS Verwendung).

Bei kürzeren Chronologien kann die Einbeziehung einer größeren Zahl von Regressoren, von denen jeder für sich gesehen einen signifikanten Beitrag zur Erhöhung des Bestimmtheitsmaßes R^2 liefert, zu einem Zielkonflikt führen: Zwar steigt das Bestimmtheitsmaß R^2 durch die Aufnahme weiterer Regressoren an, gleichzeitig sinkt jedoch das adjustierte Bestimmtheitsmaß (adjusted R^2), welches das Verhältnis der Anzahl an Regressoren zu der Anzahl an Beobachtungswerten (z.B. 45 Radialzuwachsweite einer Bestandschronologie) berücksichtigt. Bei hoher Regressorenzahl und wenigen Beobachtungswerten verschlechtern sich die Schätzeigenschaften des Modells dramatisch, was insbesondere bei Chronologien wie denen der Level-II-Flächen, die nur eine kürzere Zeitspanne umfassen, zwangsläufig Beschränkungen bei der Modellformulierung mit sich bringt und eine Reduktion auf wenige erklärende Variable nahe legt. Generell gilt, dass Schätzungen der Standort/Klima-Zuwachsbeziehungen umso aussagefähiger sind (d.h. statistisch besser abgesichert werden können), je mehr Jahre die zur Verfügung stehende Zeitreihe umfasst.

6. ERGEBNISSE DER KLIMA-ZUWACHSANALYSEN

Die statistischen Analysen der Beziehungen zwischen Standortfaktoren und Radialzuwachs wurden für alle drei Baumarten durchgeführt. Die geografische Repräsentanz ist jedoch nur für die Baumart Fichte, nicht jedoch für Kiefer und Buche gegeben (vgl. Abschnitt 3).

6.1 Beziehungen zwischen den Erklärungsgrößen

Aus statistischen Gründen berücksichtigen multiple lineare Regressionsmodelle als Regressoren generell keine Variablen, die

straff miteinander korreliert sind, da zur Erklärung der Varianz der Zielgröße nur eine der interkorrelierten Variablen einen signifikanten Beitrag leisten kann. Wie die Analyse der Fülle der zur Verfügung stehenden möglichen Erklärungsvariablen zeigt, bestehen sowohl zwischen den Klimavariablen als auch zwischen den Bodenvariablen z.T. sehr straffe Korrelationen, weshalb aus den vorgenannten Gründen die Verwendung einer erheblichen Anzahl von Variablen in einem multiplen linearen Regressionsmodell von vornherein nicht infrage kommt. Verdeutlicht sei dies am Beispiel des Standorts Langebrück für diejenigen Klimavariablen, die eine gewisse Beziehung zur Radial-Zuwachschronologie erkennen ließen (Tab. 2). Die Beziehungen zwischen den Klimavariablen sind je nach betrachteter Variablenkombination entweder positiver oder negativer Natur und weisen mit Korrelationskoeffizienten von unter 0.1 bis über 0.9 auf kaum ausgeprägte bis sehr straffe Zusammenhänge hin. Erwartungsgemäß hoch sind z.B. die negativen Beziehungen zwischen Temperaturen und Niederschlägen (hier insbesondere für den Monat Juni) bzw. die positiven Beziehungen zwischen Niederschlägen und Luftfeuchte oder Wasserbilanz (auch hier insbesondere für den Monat Juni).

Zur Untersuchung der Klima-Zuwachsbeziehungen wurden mit Hilfe der Korrelationsanalyse aus der Gesamtheit der Bodenwasserhaushalts- und Klimakenngrößen diejenigen erklärenden Variablen (Regressoren) vorselektiert, deren Korrelationskoeffizienten auf einen Zusammenhang zur Radial-Zuwachschronologie hinwiesen. Anschließend wurde die Beziehung zwischen den vorselektierten Klimakennwerten und der Radial-Zuwachschronologie regressionsanalytisch überprüft. Dabei wurden mit Hilfe des schrittweisen Verfahrens nur jene Regressoren in das Schätzmodell zur Beschreibung der Klima-Zuwachsbeziehungen integriert, die eine statistisch signifikante Erhöhung des Bestimmtheitsmaßes

Tab. 2

Korrelation zwischen ausgewählten Klimagrößen Beispiel Kiefer Langebrück.
Correlations between selected climate variables, example Scots pine Langebrück.

	F_M6	F_M7	F_M9	G_M6	WB_4-6	WB_JR	N_M2	N_M6	N_JR	T_M6	Tmax_M11	Tmax_M3	Tmax_M6	Tmin_M6	WB_2	WB_6
F_M7	0,36	1														
F_M9	0,04	0,09	1													
G_M6	-0,85	-0,32	-0,11	1												
WB_4-6	0,72	0,35	0,14	-0,58	1											
WB_JR	0,51	0,63	0,02	-0,43	0,61	1										
N_M2	0,29	0,22	0,13	-0,22	0,17	0,16	1									
N_M6	0,78	0,25	0,15	-0,69	0,66	0,33	0,25	1								
N_JR	0,43	0,51	-0,01	-0,34	0,51	0,95	0,14	0,30	1							
T_M6	-0,65	-0,15	-0,11	0,72	-0,60	-0,27	-0,08	-0,45	-0,13	1						
Tmax_M11	0,06	-0,09	-0,28	-0,02	-0,07	-0,13	0,09	-0,01	-0,13	-0,16	1					
Tmax_M3	-0,05	0,08	-0,22	-0,01	0,01	0,11	-0,20	0,05	0,28	0,05	-0,05	1				
Tmax_M6	-0,71	-0,20	-0,17	0,80	-0,59	-0,36	-0,10	-0,46	-0,21	0,98	-0,11	0,08	1			
Tmin_M6	-0,31	-0,02	-0,21	0,34	-0,27	-0,06	-0,07	-0,05	0,04	0,80	-0,26	0,04	0,72	1		
WB_2	0,29	0,22	0,13	-0,22	0,20	0,16	0,98	0,24	0,12	-0,15	0,13	-0,27	-0,12	-0,08	1	
WB_6	0,87	0,28	0,15	-0,82	0,71	0,39	0,26	0,98	0,32	-0,58	0,02	0,03	-0,65	-0,21	0,25	1
WS_M5	0,23	0,33	-0,05	-0,03	0,28	0,25	0,25	0,20	0,22	0,00	0,03	-0,17	0,12	-0,04	0,27	0,17

F_M7; F_M9	Luftfeuchte Juli; September
G_M6	Globalstrahlung Juni
N_M2; N_M6; N_JR	Niederschlag Februar; Juni; Jahr
T_M6	Temperatur Juni
Tmax_M3; Tmax_M6; Tmax_M11	Maximaltemperatur März; Juni; November
Tmin_M6	Minimaltemperatur Juni
WB_2; WB_6; WB_4-6; WB_JR	klimatische Wasserbilanz Februar; Juni; April-Juni; Jahr
WS_M5	Windstärke Mai

bewirkten⁵⁾. Ein besonderes Anliegen war es dabei, für alle drei Baumarten Modelle mit ähnlichen Einflussgrößen zu generieren.

6.2 Modelle zur Beschreibung der Klima-Zuwachsbeziehungen

Bei der Aufstellung von Modellen zur Beschreibung der Klima-Zuwachsbeziehungen und der Prognose der künftigen Wachstumstrends bis zum Jahr 2100 wurden die drei untersuchten Baumarten

Tab. 3

Schätzmodell für die Fichte:
Ergebnis der schrittweisen Regressionsanalyse.
Result of stepwise regression for Norway spruce.

Modell	Einheit	nicht standardisierte Koeffizienten		Signifikanz
		B	Standardfehler	
(Konstante)		11,48671	2,2350	0,000
T_Ve	°C	-0,74519	0,0830	0,000
T_Ve_VJ	°C	-0,54132	0,0706	0,000
T_M9_VJ	°C	-0,26430	0,0439	0,000
F_M6	%	-0,21069	0,0188	0,000
ETo_M6	mm	-0,16593	0,0099	0,000
T_M8	°C	-0,10838	0,0382	0,005
T_M1	°C	-0,08441	0,0181	0,000
ETo_M10	mm	-0,07143	0,0101	0,000
F_M2	%	-0,02472	0,0114	0,031
ETo_Ve_VJ	mm	-0,01220	0,0011	0,000
NS_M9	mm	-0,00482	0,0014	0,000
NS_M7	mm	-0,00266	0,0007	0,000
Ten_90-125_M5	hPa	-0,00228	0,0007	0,001
Ten_0-30_M7	hPa	-0,00011	0,0000	0,005
Ten_0-30_M4	hPa	0,00003	0,0000	0,012
NS_M4	mm	0,00257	0,0013	0,056
WB_2	mm	0,01107	0,0013	0,000
Eto_4-6_VJ	mm	0,02360	0,0028	0,000
Eto_M12_VJ	mm	0,03279	0,0149	0,028
F_M9	%	0,03522	0,0142	0,013
ETo_M9_VJ	mm	0,04763	0,0080	0,000
GS_Ve	W/m ²	0,04811	0,0045	0,000
F_M5	%	0,07973	0,0110	0,000
T_M7	°C	0,15787	0,0278	0,000
T_M3	°C	0,20042	0,0186	0,000
T_M5	°C	0,22194	0,0302	0,000
T_M9	°C	0,22942	0,0312	0,000
T_M10_VJ	°C	0,23536	0,0294	0,000
WS_4-6	m/s	0,24738	0,0894	0,006
T_M8_VJ	°C	0,31837	0,0470	0,000
T_M6	°C	0,73334	0,0593	0,000

ETo_M6; ETo_M10:
potentielle FAO-Referenzverdunstung Juni; Oktober
Eto_Ve_VJ; Eto_4-6VJ:
potentielle FAO-Referenzverdunstung Vorjahr Vegetationszeit;
April-Juni
Eto_M9_VJ; Eto_M12_VJ:
potentielle FAO-Referenzverdunstung Vorjahr September; Dezember
F_M2; F_M5; F_M6; F_M9:
Luftfeuchte Februar; Mai; Juni; September
GS_Ve: Globalstrahlung Vegetationszeit
NS_M4; NS_M7; NS_M9: Niederschlag April; Juli; September
T_M1; T_M3; T_M5; T_M6; T_M7; T_M8; T_M9:
Temperatur Januar; März; Mai; Juni; Juli; August; September
T_Ve; T_Ve_VJ: Temperatur Vegetationszeit, Vorjahr Vegetationszeit
T_M8_VJ; T_M9_VJ; T_M10_VJ:
Temperatur Vorjahr August; September; Oktober
Ten_0-30_M4; Ten_0-30_M7: Tension von 0–30 cm April; Juli
Ten_90-125_M5: Tension von 90–125 cm Mai
WB_2: Wasserbilanz Februar
WS_4-6: Windstärke April–Juni

Fichte, Kiefer und Buche separat betrachtet. Die Ergebnisse der schrittweisen Regressionsanalysen werden für jede Baumart in einer eigenen Tabelle (Tab. 3 bis 5) präsentiert. Diese Tabellen informieren über die statistischen Kennwerte der Regressionsanalysen und enthalten darüber hinaus die in das Regressionsmodell aufgenommenen Erklärungsvariablen sowie die zugehörigen Koeffizienten, Standardfehler und Angaben zur Signifikanz.

• Fichte

Da die Fichten-Versuchsflächen ein weites Standortspektrum abdecken und das Klima in Sachsen von West nach Ost zunehmend kontinentalere Ausprägung zeigt, wurden in einem ersten Schritt Gebiete ausgeschieden, die unterschiedliche klimatische Rahmenbedingungen repräsentieren und für jedes Gebiet ein regional-spezifisches Schätzmodell aufgestellt. Dazu wurden die Radial-Zuwachschronologien der in dem jeweiligen Gebiet gelegenen Versuchsflächen verwendet und regressionsanalytisch mit den zugehörigen Bodenwasserhaushalts- und Klimakenngrößen verknüpft. Im Einzelnen handelt es sich dabei um folgende Gebiete:

Westerzgebirge: regionales Schätzmodell hergeleitet aus den Radial-Zuwachschronologien der sechs Versuchsflächen Klingenthal, Eibenstock, Muldenberg, Sosa, Zöblitz, Olbernhau.

Tab. 4

Schätzmodell für die Kiefer:
Ergebnis der schrittweisen Regressionsanalyse.
Result of stepwise regression for Scots pine.

Modell	Einheit	nicht standardisierte Koeffizienten		Signifikanz
		B	Standardfehler	
(Konstante)		-14,79322	4,1839	0,000
T_M2	°C	0,08832	0,0190	0,000
NS_Ve	mm	0,00486	0,0008	0,000
ETo_M9	mm	0,02463	0,0095	0,010
Eto_4-6_VJ	mm	-0,01840	0,0030	0,000
T_M3	°C	0,27281	0,0479	0,000
T_M11_VJ	°C	0,17995	0,0362	0,000
ETo_M6	mm	-0,02116	0,0052	0,000
WS_4-6	m/s	0,41477	0,2333	0,077
T_Ve_VJ	°C	-0,15003	0,0860	0,082
ETo_JR	mm	0,01439	0,0026	0,000
F_Ve	%	0,14951	0,0388	0,000
ETo_M3	mm	-0,05599	0,0187	0,003
Ten_0-125-M8_VJ	hPa	0,00006	0,0000	0,000
Ten_30-60_VE	hPa	-0,00005	0,0000	0,018

Eto_M3; Eto_M6; Eto_M9; Eto_JR; Eto_4-6_VJ:
potentielle FAO-Referenzverdunstung März; Juni; September; Jahr;
Vorjahr April–Juni
F_Ve: Luftfeuchte Vegetationszeit
NS_Ve: Niederschlag Vegetationszeit
T_M2; T_M3: Temperatur Februar; März
T_Ve_VJ; T_M11_VJ: Temperatur Vorjahr Vegetationszeit; November
Ten_30-60_Ve: Tension von 30–60 cm Vegetationszeit
Ten_0-125_M8_VJ: Tension von 0–125 cm Vorjahr August
WS_4-6: Windstärke April-Juni

⁵⁾ Ergänzend wurde eine Hauptkomponentenanalyse durchgeführt mit dem Ziel der Dimensionsreduktion. Die Hauptkomponenten erbrachten jedoch für die untersuchten Baumarten und Regionen hinsichtlich der Interpretierbarkeit (Suche nach gemeinsamen Ursachenkomplexen von untereinander abhängigen zufälligen Erscheinungen) kein plausibles Ergebnis. Die Aufstellung von Regressionsmodellen mit den Hauptkomponenten (mit Eigenwert > 1) führte im Vergleich zu den Schätzmodellen nach dem schrittweisen Regressionsverfahren zu deutlich geringeren Bestimmtheitsmaßen. Auf eine Darstellung der Ergebnisse wird deshalb verzichtet.

Tab. 5

Schätzmodell für die Buche:
Ergebnis der schrittweisen Regressionsanalyse.
Result of stepwise regression for beech.

Buche				
n_{gesamt}	141	adjustiertes R^2	0,573	
$n_{\text{Regression}}$	13	Signifikanz	0,000	
		Standardfehler des Schätzers	0,786	

Modell	Einheit	nicht standardisierte Koeffizienten		Signifikanz
		B	Standardfehler	
(Konstante)		-0,07136	1,6983	0,967
WS_4-6	m/s	-0,63370	0,1644	0,000
T_4-6	°C	-0,43065	0,0976	0,000
T_Ve_VJ	°C	-0,39788	0,1171	0,001
T_M4	°C	-0,13943	0,0579	0,017
T_M1	°C	-0,10297	0,0300	0,001
WVS_0-30	mm	-0,01430	0,0035	0,000
Eto_Ve_VJ	mm	-0,00607	0,0019	0,002
WB_4-6_VJ	mm	-0,00543	0,0012	0,000
T_M2	°C	0,10584	0,0234	0,000
T_M7	°C	0,17874	0,0476	0,000
T_M8	°C	0,42264	0,0713	0,000
T_4-6_VJ	°C	0,63602	0,1088	0,000
Ten_0-125_M5	hPa	0,00065	0,0001	0,000

Eto_Ve_VJ:

potentielle FAO-Referenzverdunstung Vegetationszeit Vorjahr
T_M1; T_M2; T_M4; T_M7; T_M8; T_4-6:

Temperatur Januar; Februar; April; Juli; August; April–Juni
T_Ve_VJ; T_4-6_VJ: Temperatur Vorjahr Vegetationszeit; April–Juni
Ten_0-125_M5: Tension von 0–125 cm im Mai

WB_4-6_VJ: klimatische Wasserbilanz Vorjahr April–Juni

WS_4-6: Windstärke April–Juni

WVS_0-30: Wasservorrat von 0–30 cm Bodentiefe im Jahr

Osterzgebirge: regionales Schätzmodell hergeleitet aus den Radial-Zuwachschronologien der fünf Versuchsfelder Rechenberg, S-Berg, Dönschten, Rotherdbach, Oberbärenburg.

Ostsachsen: regionales Schätzmodell hergeleitet aus den Radial-Zuwachschronologien der vier Versuchsfelder Langebrück, Taubenbach, Cunnersdorf, Bautzen.

Die drei regionalen Modelle⁶⁾ erklären unterschiedliche Varianzanteile der Radial-Zuwachschronologien: Während im Westerzgebirge mit 21 Regressoren lediglich ein adjustiertes Bestimmtheitsmaß von 0,442 erreicht werden konnte, erklären im Osterzgebirge 23 Regressoren immerhin knapp 58% der Varianz der Radial-Zuwachschronologien (adjustiertes Bestimmtheitsmaß 0,579). In Ostsachsen, wo nur vier Versuchsfelder zur Verfügung standen, lag der Erklärungsgrad mit nur 16 Regressoren bei über 60% (adjustiertes Bestimmtheitsmaß 0,604) und somit im Vergleich der drei Regionen am höchsten.

Dieses Ergebnis deutet darauf hin, dass in Sachsen von West nach Ost die Klimaverhältnisse für die Baumart Fichte „einheitlicher“ (und damit möglicherweise auch kritischer) werden, da mit weniger Regressoren ein höherer Anteil der Varianz der Radial-Zuwachschronologien beschrieben werden kann. Allerdings fällt insbesondere bei dem regionalspezifischen Modell für Ostsachsen auf, dass nur sehr wenige Variable mit Bezug zu Wasserhaushalt bzw. Niederschlagsgeschehen in der schrittweisen Regressionsanalyse als signifikante Erklärungsgrößen aufgenommen werden. Im Ost- und Westerzgebirge dagegen eignen sich sowohl Klima- als auch Bodenwasserhaushaltsparameter: Im Osterzgebirge sind beispielsweise die Temperaturen in bestimmten Abschnitten der Vegetationsperiode (Monate Mai, Juni und September des laufenden Jahres sowie August des Vorjahres) und darüber hinaus die klimatischen Wasserbilanzen der Monate April bis Juni und des Monats Februar sowie die Luftfeuchte in der gesamten Vegetationsperiode positiv mit den Radial-Zuwachschronologien korreliert. Negativ korreliert sind potentielle FAO-Referenzverdunstung und Temperatur im Hochsommer sowie die Temperatur der vorangegangenen Vegetationsperiode.

Ergänzend zu den regionalspezifischen Modellen zur Beschreibung der Klima-Zuwachsbeziehungen wurde für die Baumart Fichte in Sachsen ein allgemeines Modell (im Folgenden „Modell Fichte Sachsen“ genannt) unter Berücksichtigung aller Flächen aufgestellt. Wie *Tabelle 3* verdeutlicht, wurden insgesamt 31

⁶⁾ Auf eine tabellarische Darstellung der statistischen Kennwerte der Regionalmodelle wird verzichtet, da auf diese Modelle im Folgenden nicht mehr Bezug genommen wird. Die statistischen Kennwerte des allgemeinen Modells für Fichte, auf dem auch die im Text erläuterten Prognoserechnungen basieren, sind in *Tab. 3* enthalten.

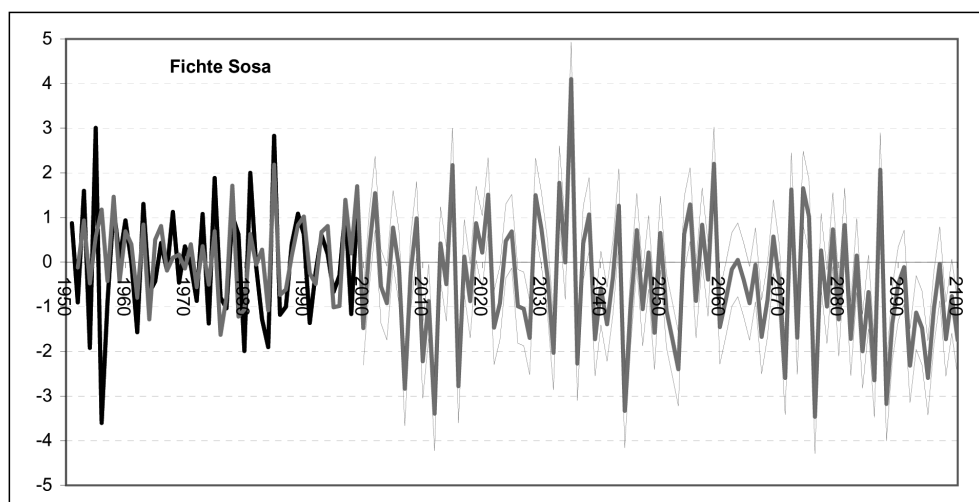


Abb. 7

Radial-Zuwachschronologie (schwarz) und prognostizierte Chronologie (grau) incl. Standardfehler für den Prognosebereich 2000 bis 2100 (grau), Fichte Sosa Region Westerzgebirge.

Observed radial increment chronology (black) and predicted chronology including standard error of the period 2000 to 2100 (grey), Norway spruce Sosa, Western Ore Mountains.

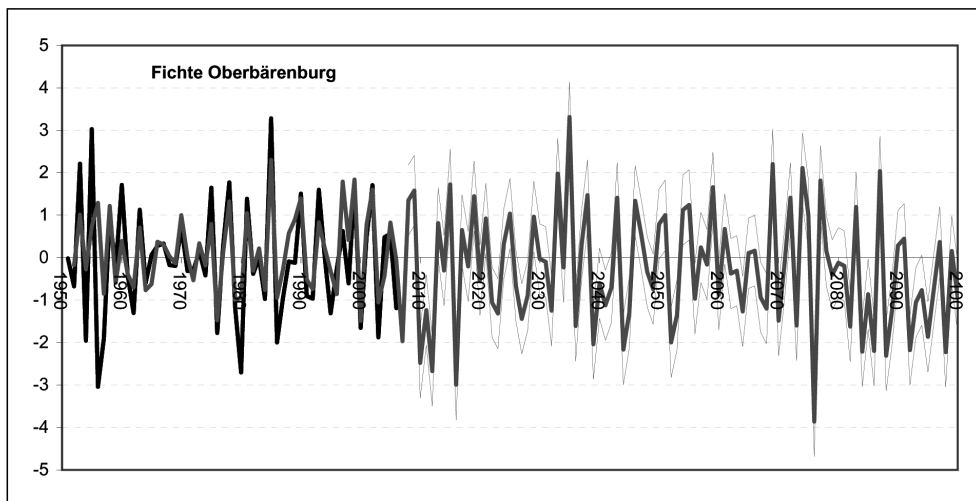


Abb. 8

Radial-Zuwachschronologie (schwarz) und prognostizierte Chronologie (grau) incl. Standardfehler für den Prognosebereich 2008 bis 2100 (grau), Fichte Oberbärenburg Region Osterzgebirge.

Observed radial increment chronology (black) and predicted chronology including standard error of the period 2008 to 2100 (grey), Norway spruce Oberbärenburg, Eastern Ore Mountains.

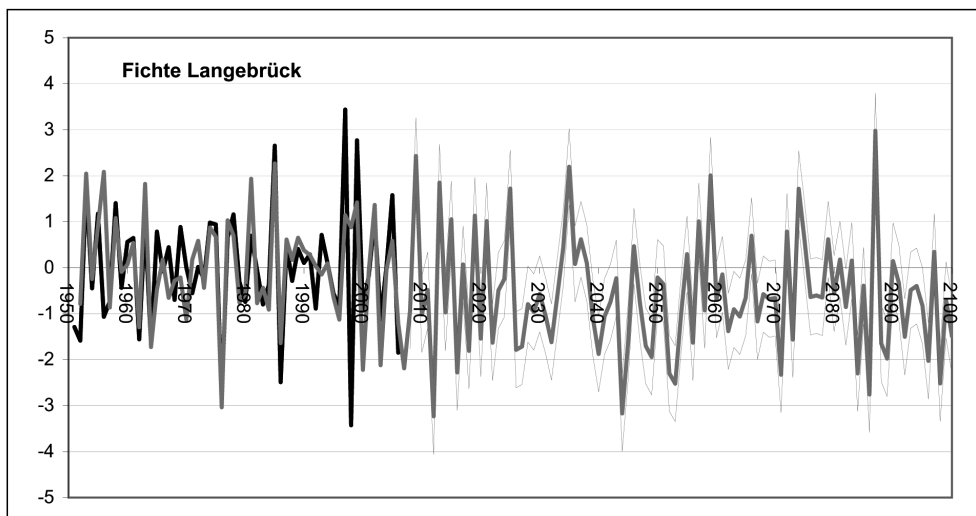


Abb. 9

Radial-Zuwachschronologie (schwarz) und prognostizierte Chronologie (grau) incl. Standardfehler für den Prognosebereich 2008 bis 2100, Fichte Langebrück Region Ostsachsen.

Observed radial increment chronology (black) and predicted chronology including standard error of the period 2008 to 2100 (grey), Norway spruce Langebrück, Eastern Saxony.

Regressoren herausgefiltert, mit deren Hilfe ein adjustiertes Bestimmtheitsmaß von 0.541 erreicht werden konnte. Dieses Modell ist hochsignifikant, erklärt immerhin mehr als die Hälfte der Streuung der Radial-Zuwachschronologien und liefert somit für das Verbreitungsgebiet der Fichte in Sachsen eine Schätzung mit einem einheitlichen Satz an Erklärungsvariablen.

Die Anpassung des Modells an den tatsächlichen Verlauf der Zuwachschronologien zeigt befriedigende Resultate, außerdem ergeben die Prognoserechnungen bis zum Jahr 2100 ein einheitliches und damit besser interpretierbares Reaktionsmuster für die Regionen West- und Osterzgebirge sowie Ostsachsen als bei Verwendung der regionalspezifischen Modelle, wie die *Abbildungen 7 bis 9* am Beispiel von je einem Untersuchungsstandort aus den drei Regionen belegen. Die Prognoserechnungen verdeutlichen aller-

dings auch, dass die Wuchsbedingungen für die Fichte im Prognosezeitraum zunehmend problematischer werden: So weisen die Radial-Zuwachschronologien der untersuchten Standorte in allen drei Regionen einen klar negativen Trend bis zum Jahr 2100 auf. Darüber hinaus steigt die Häufigkeit des Auftretens negativer Ausschläge der Radial-Zuwachschronologien im Prognosezeitraum z. T. drastisch an. Hinzu kommt, dass diese negativen Ausschläge nicht gleichmäßig über den Prognosezeitraum verteilt vorkommen (wäre dies so, könnten die Bestände nach jedem Ereignis eine Erholungsphase durchlaufen). Vielmehr treten diese Ereignisse meist in engem zeitlichen Zusammenhang in Erscheinung, was eine Erholung der Bestände wesentlich erschweren dürfte und insbesondere auf schlechter wasserversorgten Standorten als zusätzlicher Stressfaktor gewertet werden muss. Es ist deshalb nicht auszu-

schließen, dass in den betroffenen Regionen Individuen aus dem mitherrschenden oder zwischenständigen Bereich ausfallen und somit eine langsam voranschreitende, schleichende Auflichtung bzw. Auflösung der Bestände einsetzt.

• *Kiefer*

Das Schätzmodell für die Kiefer ist ebenfalls hochsignifikant, erreicht mit 14 Regressoren einen Erklärungsgrad von gut 50% der Varianzanteile der Radial-Zuwachschronologien (adjustiertes Bestimmtheitsmaß von 0.504, vgl. *Tab. 4*). Die Anpassung an den tatsächlichen Verlauf der Radial-Zuwachschronologien befriedigt, wie *Abbildung 10* am Beispiel der Level-II-Fläche Laußnitz belegt. Allerdings spiegelt dieses Modell nur die Verhältnisse in einem begrenzten Raum des sächsischen Kiefernareals wider, da keinerlei

Untersuchungsstandorte westlich der Landeshauptstadt Dresden liegen.

Förderlich für den Radialzuwachs wirken Niederschläge und Luftfeuchtigkeit in der Vegetationsperiode und die Windgeschwindigkeit im Zeitraum April bis Juni. Negativ korreliert mit der Radial-Zuwachschronologie sind vor allem die potentielle FAO-Referenzverdunstung sowie die Temperatur in der Vegetationsperiode des Vorjahres.

Für die Baumart Kiefer deuten die Prognosen auf keine grundlegenden Änderungen des Wuchsverhaltens hin: So werden auch in Zukunft zuwachsstarke und zuwachsschwache Jahre im Wechsel in Erscheinung treten, und zu Ende des Prognosezeitraums (ab dem Jahr 2090) wird sogar ein tendenzieller Anstieg der Wuchsleistung

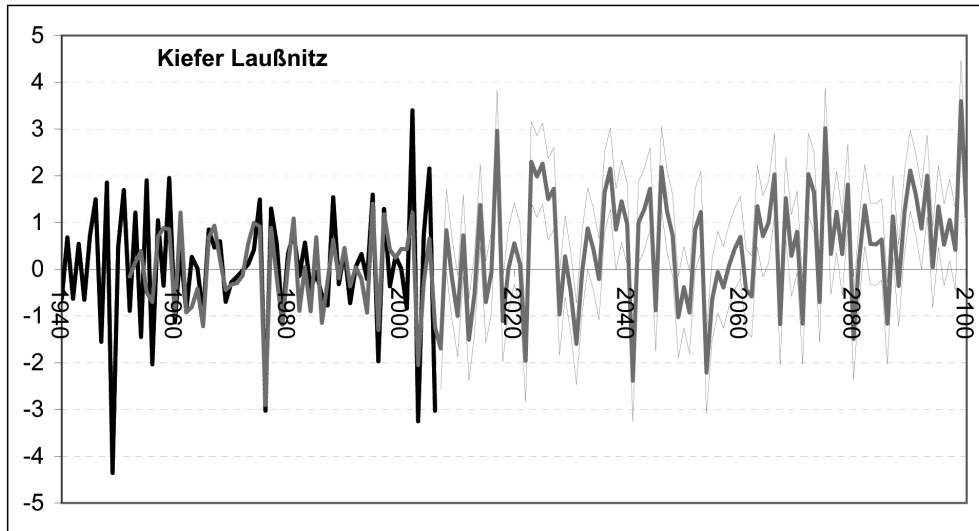


Abb. 10

Radial-Zuwachschronologie (schwarz) und prognostizierte Chronologie (grau) incl. Standardfehler für den Prognosebereich 2007 bis 2100 (grau), Kiefer Laußnitz

Observed radial increment chronology (black) and predicted chronology including standard error of the period 2007 to 2100 (grey), Scots pine Laußnitz.

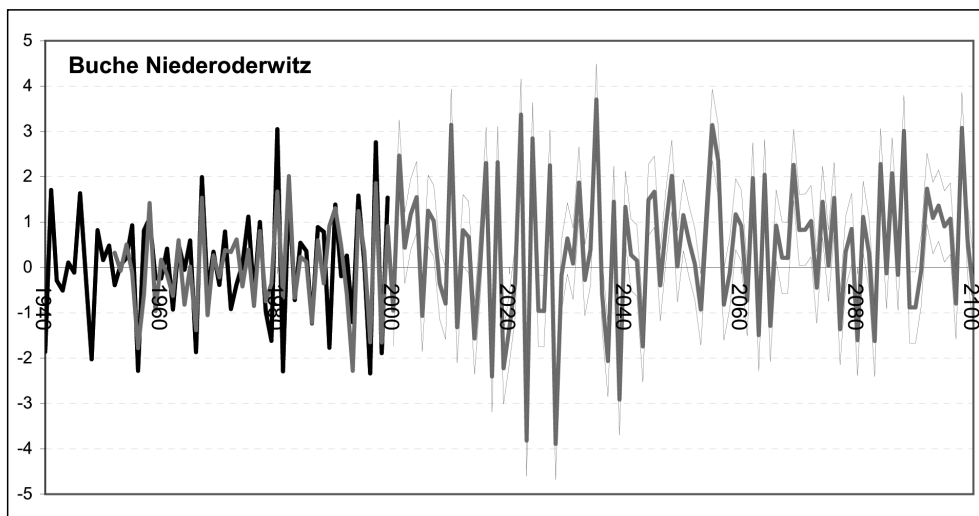


Abb. 11

Radial-Zuwachschronologie (schwarz) und prognostizierte Chronologie (grau) incl. Standardfehler für den Prognosebereich 2000 bis 2100 (grau), Buche, Niederoderwitz

Observed radial increment chronology (black) and predicted chronology including standard error of the period 2000 to 2100 (grey), beech Niederoderwitz.

gen erwartet (*Abbildung 10*, Beispiel Level-II-Fläche Laußnitz). Allerdings muss die Güte dieses Modells kritisch bewertet werden, da nur für einen der insgesamt 6 Kiefernstandorte, nämlich die Level-II-Fläche Laußnitz, ein Datensatz zur Verfügung stand, der den Zeitraum bis zum Jahr 2006 abdeckte.

• *Buche*

Das Schätzmodell für Buche ist ebenfalls hochsignifikant, es erklärt gut 57% der Varianzanteile der Radial-Zuwachschronologien (adjustiertes Bestimmtheitsmaß von 0.573, vgl. *Tab. 5*) mit nur 13 Regressoren, die Modellanpassung an den tatsächlichen Verlauf der Radial-Zuwachschronologien gelingt, wie *Abbildung 11* für die Recognition-Fläche Niederoderwitz zeigt. Im Modell selbst finden sich Temperaturvariable sowohl positiv als auch negativ mit den Radial-Zuwachschronologien korreliert wieder, ein Befund, der keine klare Interpretation zulässt.

Die Aussagekraft dieses Modells für die Baumart Buche in Sachsen insgesamt ist jedoch beschränkt, da nur drei Versuchsfelder auf sehr ähnlichen Standorten aus dem ostsächsischen Raum zur Verfügung standen und somit wesentliche Teile des Buchenareals im stärker atlantisch getönten Westsachsen keine Berücksichtigung fanden. Außerdem decken die Chronologien nur den Zeitraum bis 1999 ab, für die Jahre ab 2000 und damit auch für den außergewöhnlich warmen und niederschlagsarmen Sommer 2003 lagen keine Zuwachsdattierungen vor. Darüber hinaus kam es vor allem in den 1990er Jahren mehrfach zu Fruktifikationen (Masten), was sich mit großer Wahrscheinlichkeit dämpfend auf das Zuwachsgeschehen ausgewirkt haben dürfte: Dass bei Buche Fruktifikationen zu einem Absinken des Zuwachses führen, ist durch eine Reihe von Arbeiten belegt (PELLINEN, 1986; GRUBER, 2003 a,b; JOCHHEIM et al., 2007).

Die Prognose der Wuchsdynamik für Buche weist, ähnlich den Ergebnissen für Kiefer, ebenfalls auf keine grundlegenden Änderungen des Wuchsverhaltens hin: Auch bei Buche werden in Zukunft zuwachsstarke und zuwachsschwache Jahre im Wechsel in Erscheinung treten. Allerdings ist insbesondere in der Periode zwischen 2010 und 2050 mit dem gehäuften Auftreten besonders starker Zuwachsvariationen zu rechnen (*Abbildung 11*, Beispiel Recognition-Fläche Niederoderwitz).

7. FAZIT UND AUSBLICK

Lediglich für die Fichte decken die vorhandenen Versuchsfelder das Verbreitungsgebiet einigermaßen repräsentativ ab, bei Kiefer und Buche dagegen werden nur Ausschnitte der Areale in Sachsen erfasst. Aus diesem Grunde zeigen die Ergebnisse der Standort-Zuwachsmoellierung für die zwei letztgenannten Baumarten nur regionalspezifische Trends auf, lassen aber keine sachsenweit repräsentativen Aussagen zu. Außerdem gestatten die an Oberhöhenbäumen gewonnenen Bohrspäne zwar Einblicke in die standorttypische Dynamik des Zuwachsgeschehens, da Individuen aus dem Kollektiv der vorherrschenden Bäume das standortspezifische Wuchspotential am besten widerspiegeln, erlauben jedoch keine detaillierte Beurteilung des Bestandeswachstums. Um Informationen zum Wuchsverhalten des Gesamtbestandes und insbesondere zum Mortalitätsgeschehen zu erhalten, wäre das Vorhandensein von kontinuierlichen Messreihen langfristiger Versuchsfelder aller relevanten Baumarten aus ganz Sachsen erforderlich gewesen. Hingewiesen sei darüber hinaus auch auf die teilweise relativ kurzen Radialzuwachs-Zeitreihen auf den einzelnen Untersuchungsstandorten: So lagen lediglich für die sechs Flächen aus dem Level-II-Programm und für die im Rahmen unseres Projektes zusätzlich beprobten Flächen Datensätze vor, die den Zeitraum bis zum Jahr 2006 abdecken. Auf gut der Hälfte (56%) der zur Verfügung stehenden Flächen dagegen fand die letzte Probenahme bereits im Jahr 1999 statt, weshalb insbesondere das ausgeprägte Trockenjahr

2003 nicht im erforderlichen Umfang Eingang in die Modellbildung fand.

Mit Hilfe des gewählten Verfahrens und auf Basis der zur Verfügung gestellten Daten lassen sich die Standort-Zuwachsbeziehungen im akzeptablen Rahmen beschreiben, wie Bestimmtheitsmaße um die 0.5 für die Schätzmodelle von Fichte, Kiefer und Buche unterstreichen. Dabei darf jedoch nicht vergessen werden, dass für die Versuchsfelder keine realen Messdaten der meteorologischen und bodenhydraulischen Kenngrößen vorlagen, sondern ersatzweise auf modellierte Werte zurückgegriffen werden musste. Aus diesem Grund bestehen zwischen den Klima- und den Bodenkennwerten häufig straffe Korrelationen, weshalb die Einbeziehung einer erheblichen Anzahl von Variablen in einem multiplen linearen Regressionsmodell von vornherein ausgeschlossen ist. Die Verwendung modellierter Werte kann im Einzelfall durchaus zu Abweichungen (deren Größenordnung allerdings nicht abschätzbar ist) zwischen tatsächlichem und modelliertem Geschehen führen, was wiederum Verzerrungen bei der Analyse der Standort-Zuwachsbeziehungen nach sich ziehen muss.

Bei der Interpretation der herausgearbeiteten Klima-Zuwachsbeziehungen ist zu berücksichtigen, dass durch die Anwendung eines Tiefpass-Filters als Trendfunktion (im vorliegenden Fall Moving-Average-Modell mit 3-jährigem Mittel) bei der Standardisierung zur Chronologiebildung Zuwachsänderungen über große Zeiträume ausgeblendet werden. Es bestehen aber bezüglich dieser lang- und mittelfristigen Schwankungen große Ähnlichkeiten zwischen den Zuwachsreihen der einzelnen Flächen. Diese Ähnlichkeiten führen zu dem Schluss, dass auch die lang- und mittelfristigen Zuwachsvariationen zum großen Teil auf externen Einflüssen beruhen, für die wegen der Zeitdauer der Schwankungen in erster Linie Klimafaktoren in Frage kommen. Eine ergänzend durchgeführte Glättung mit einem gleitenden 7-jährigen Mittel mit anschließender erneuter Modellbildung analog zu der in Abschnitt 6.2 dargestellten Methode führte aber zu keiner Verbesserung der Schätzgenauigkeit bei diesem Ansatz.

8. DANKSAGUNG

Die Autoren danken zwei anonymen Gutachtern für ihre konstruktiven Vorschläge. PD Dr. ARNE POMMERENING war so freundlich, die englische Zusammenfassung anzufertigen sowie die englischen Untertitel zu überprüfen.

9. ZUSAMMENFASSUNG

Am Institut für Waldwachstum und Forstliche Informatik der TU Dresden wurden die Beziehungen zwischen Klima und Zuwachs der Baumarten Fichte, Kiefer und Buche in Sachsen untersucht. Als Datengrundlage der Modellierung dienten standardisierte Radialzuwachschronologien von insgesamt 24 Probestandorten sowie regionalisierte und homogenisierte Klima- und Bodenwasserhaushaltsdaten (Zeitraum 1951 bis 2006). Für die Simulation des Klimageschehens bis zum Jahr 2100 fand das IPCC-Szenario B1 Verwendung. Zur Simulation des Bodenwasserhaushalts diente das Programm COUPMODEL (SCHERZER und SCHULTZE, 2006).

Den Korrelationsanalysen zufolge bestehen zwischen den Klimavariablen und den Bodenvariablen z.T. sehr straffe Beziehungen, was die Anzahl von Variablen in einem multiplen linearen Regressionsmodell reduziert, da interkorrelierte Variable nicht gleichzeitig in einem Regressionsmodell akzeptiert werden.

Mit Hilfe schrittweiser Regressionsanalysen gelang für die Baumarten Fichte, Kiefer und Buche die Aufstellung von Modellen zur Beschreibung der Standort-Zuwachsbeziehung. Dies belegen Bestimmtheitsmaße, die für die drei genannten Baumarten über 0.5 liegen, mithin also mehr als 50% der Streuung der Radial-Zuwachs-

chronologien durch Klima- und Bodenwasserhaushaltsvariable erklären.

Im Prognosezeitraum bis zum Jahr 2100 entwickeln sich die Zuwachstrends der Baumarten Fichte, Kiefer und Buche höchst unterschiedlich: Während sich für Fichte die Konstellationen im Prognosezeitraum zunehmend problematisch gestalten und die Radial-Zuwachschronologien einen negativen Trend bis zum Jahr 2100 aufweisen, konnten für Kiefer, und mit gewissen Einschränkungen auch für Buche, keine negativen Auswirkungen der modellierten Klima- und Bodenwasserhaushaltswerte auf die Radial-Zuwachschronologien bis zum Jahr 2100 herausgearbeitet werden.

10. Summary

Title of the paper: *Relationships between climate and tree increment, a study focussing on Norway spruce, Scots pine and beech in Saxony.*

At the Institute of Forest Growth and Applied Informatics (TU Dresden) the relationships between climate and increment were investigated for Norway spruce, Scots pine and beech in the German federal state Saxony. The modelling was based on standardised radial increment chronologies of a total of 24 research sites and on regionalised and homogenised climate and soil water balance data from a period between 1951 and 2006. For simulating climate change until 2100 the IPCC scenario B1 was used. The soil water balance was simulated with the program COUPMODEL (SCHERZER und SCHULTZE, 2006).

The results of the correlation analyses often indicated strong relationships between climate and soil variables. As intercorrelated variables are not accepted in regression models, this finding reduced the number of variables in the multiple linear regression model.

Stepwise regression analyses were used to model the site-increment relationships for the tree species Norway spruce, Scots pine and beech. The coefficients of determination for all three species were in excess of 0.5, i. e. 50% of the radial increment chronology data could be explained by climate and soil water balance variables.

In the projection period from 2000 to 2100 the increment trends of Norway spruce, Scots pine and beech show a very different behaviour: For Norway spruce the environmental conditions become increasingly adverse, which resulted in a negative trend. For Scots pine and (with a few exceptions) for beech we could not find negative effects of the modelled climate and soil water balance scenarios on the radial increment until 2100.

11. Résumé

Titre de l'article: *Liaisons entre le climat et la croissance illustrées par les cas de l'épicéa, du pin sylvestre et du hêtre en Saxe.*

A l'Institut «Croissance forestière et Informatique forestière» (TU de Dresde) on a étudié les liaisons entre le climat et la croissance des essences épicéa, pin sylvestre et hêtre en Saxe. Comme données de base pour la modélisation on s'est servi de chronologies de croissance radiale standardisées provenant au total de 24 places d'expérience ainsi que des données sur le climat et les réserves en eau du sol (période de 1960 à 2006). Pour la simulation des événements climatiques jusqu'en 2100 on a utilisé le scénario IPCC-B1. Pour la simulation de la teneur en eau du sol on s'est servi du programme COUPMODEL (SCHERZER et SCHULZE, 2006).

Selon les analyses de corrélation il existe de très strictes liaisons dans certains cas entre les variables climatiques et les variables du sol, ce qui réduit le nombre de variables utilisables dans un modèle de régression linéaire multiple, car des variables intercorrélées ne peuvent être utilisées simultanément dans un modèle de régression.

A l'aide d'analyses de régression pas à pas on a réussi, pour les essences épicéa, pin sylvestre et hêtre, à élaborer des modèles de description de la liaison entre station forestière et croissance. Les coefficients de détermination justifient ces résultats; dépassant 0,5 pour ces trois essences, ils expliquent de ce fait plus de 50% de la variabilité des chronologies de l'accroissement radial par des variables climatiques et de réserve en eau du sol.

Pour ce qui est de la période de prévision jusqu'en 2100, les trois essences, épicéa, pin sylvestre et hêtre, développent des tendances très nettement différentes: alors que pour l'épicéa les constellations dans la période de prévision se révèlent de plus en plus défavorables et les chronologies d'accroissement radial présentent une tendance négative jusqu'en 2100, en revanche dans le cas du pin sylvestre et, avec certaines restrictions, dans celui du hêtre, on n'a pu mettre en évidence, jusqu'en 2100, aucun effet négatif des valeurs modélisées de climat et des réserves en eau du sol sur les chronologies de la croissance radiale. R. K.

12. Literatur

- BOX, G. E. P. und G. M. JENKINS (1976): Time series analysis: Forecasting and control. Holden-Day, San Francisco.
- COOK, E. R. und L. A. KAIRIUKSTIS (eds.) (1990): Methods of Dendrology. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- COOK, E., K. R. BRIFFA, S. SHIATOV und V. MAZEPA (1990): Tree-ring standardization and growth-trends estimation. In: COOK, E. und KAIRIUKSTIS, L. (eds.): Methods of Dendrochronology: applications in the environmental science. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 104–122.
- EISENHAUER, D.-R. (2008): Waldbaukonzept und Klimawandel. AFZ/Der Wald 15: 814–817.
- FIEDLER, F. und G. WENK (1977): Einfluss meteorologischer Elemente auf den Stärkenzuwachs von Fichten – Ergebnisse von Bohrkernauswertungen. Wiss. Zeitschrift TU Dresden 26/2: 503–505.
- FRITTS, H. C. (1976): Tree Rings and Climate. Methods of Dendrochronology. Reprinted by courtesy of Academic press, Warschau, 1987, vol. 2 and vol. 3.
- GRISSINO-MAYER, H. D. und H. C. FRITTS (1997): The International Tree-Ring Data Bank (ITRDB): an enhanced global database serving the global scientific community. Holocene, 7, 2: 235–238.
- GEMBALLA, R. und A. SCHLUTOW (2007): Überarbeitung der Forstlichen Klimagliederung Sachsens. AFZ/Der Wald 15: 822–826.
- GRAYBILL, D. A. (1982): Chronology development and analysis. In: HUGHES, M. K. et al. (eds.) 1982: Climate from tree rings. Cambridge University Press.
- GRÜBER, F. (2003a): Steuerung und Vorhersage der Fruchtbildung bei der Rotbuche (*Fagus sylvatica* (L.) durch die Witterung. Schriften Forstl. Fak. Uni Göttingen und Nieders. Forstl. Vers. 136, 135.
- GRÜBER, F. (2003b): Steuerung und Vorhersage der Fruchtbildung bei der Rotbuche (*Fagus sylvatica* (L.) für den Standort Zierenberg 38A und den Level-II-Flächen von Hessen durch die Witterung. AFJZ, 174/4: 67–79.
- GUIOT, J. (1986): ARMA techniques for modelling tree-ring response to climate and for reconstructing variations of paleo climates. Ecol. Modelling 33: 149–171.
- JOCHHEIM, H., P. EINERT, H.-P. ENDE, R. KALLWEIT, D. LÜTTSCHWAGER und U. SCHINDLER (2007): Wasser- und Stoffhaushalt eines Buchen-Altbestandes im Nordostdeutschen Tiefland. Archiv f. Forstwesen u. Landsch.Ökol. 41/1: 1–14.
- MÄKINEN, H., P. NÖID, H.-P. KAHLE, U. NEUMANN, B. TVEITE, K. MIELIKÄINEN, H. RÖHLE und H. SPIECKER (2002): Radial growth variation of Norway Spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) across latitudinal and altitudinal gradients in central and northern Europe. Forest Ecology and Management 171: 243–259.
- MÄKINEN, H., P. NÖID, H.-P. KAHLE, U. NEUMANN, B. TVEITE, K. MIELIKÄINEN, H. RÖHLE und H. SPIECKER (2003): Large scale climatic variability and radial increment variation of *Picea abies* (L.) Karst. in central and northern Europe. Trees 17: 173–184.
- NEUMANN, U. (2001): Zusammenhang von Witterungsgeschehen und Zuwachsverläufen in Fichtenbeständen des Osterzgebirges. Technische Universität Dresden, Tharandt, Dissertation, Ulmer Stuttgart, 193 S.
- NEUMANN, U. und H. RÖHLE (2001): Der jährliche Radialzuwachs der Fichte (*Picea abies* (L.) Karst.) in den sächsischen Mittelgebirgen in Abhängigkeit von der Witterung. FWcbl, Blackwell Wissenschafts-Verlag Berlin, 120: 277–287.
- NEUMANN, U. und H. RÖHLE (2002): Radial- und Höhenzuwachsentwicklung der Fichte (*Picea abies* (L.) Karst.) in den sächsischen Mittelgebirgen. Forstarchiv 73/5: 171–178.

- PELLINEN, P. (1986): Biomasseuntersuchungen im Kalkbuchenwald. Universität Göttingen, Dissertation.
- RÖHLE, H. (1997): Änderung von Bonität und Ertragsniveau in südbayerischen Fichtenbeständen, *AFJZ* **168** (6/7), S. 110–114.
- SÄCHSISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT UND LANDWIRTSCHAFT (2007): Waldzustandsbericht 2007 – Wald und Klimawandel. Dresden, 48 S.
- SCHERZER, J. und B. SCHULTZE (2006): Wasserhaushaltssimulationen an acht Untersuchungsstandorten des Staatsbetriebes Sachsenforst für den Zeitraum 1997–2006 vom Juli 2007; Arbeitsbericht an den Staatsbetrieb Sachsenforst, Bonnewitzer Straße 34, 01796 Pirna, 146 S.
- SCHLITTGEN, R. und B. H. STREITBERG (1999): Zeitreihenanalyse. (Lehr- und Handbücher der Statistik), Oldenbourg, R, 8. überarbeitete Aufl., 588 S.
- SCHLUTOW, A. und R. GEMBALLA (2008): Sachsens Leitwaldgesellschaften. *AFZ/Der Wald* 28–31.
- SCHWEINGRUBER, F. H. (1996): Tree rings and environment: dendroecology. Paul Haupt AG Bern, 609 S.
- SPIECKER, H. (1996): Introduction. In: SPIECKER, H., MIELIKÄINEN, K., KÖHL, M., SKOVSGAARD, J. P., (eds.): Growth Trends in European Forests – Springer Verlag, 1–6.
- SPIECKER, H., K. MIELIKÄINEN, M. KÖHL und J. P. SKOVSGAARD (eds.): Growth Trends in European Forests – Springer Verlag, 1–6.
- VAN DEUSEN, P. C. und G. A. REAMS (1993): Frequency domain tree-ring standardization. *Forest Science* **39**: 55–65.
- VISSER, H. und J. MOLENAAR (1990): Estimating Trends in Tree-Ring Data. *Forest Science*, **36**: 87–100.
- VOGEL, M. (1989): Ein heuristisches Modell zur Schätzung des Radialzuwachses aus den meteorologischen Elementen Niederschlag und Temperatur. *Beitr. f. d. Forstw.* **23/4**: 178–181.
- VOGEL, M. (1992): Anwendung der automatischen Zuwachsfeinmessung im Ökologischen Messfeld Tharandt und Darstellung erster Ergebnisse. TU Dresden, Fak. f. Bau-, Wasser- u. Forstwesen, Dissertation, 192.
- VOGEL, M. (1994): Automatische Radialzuwachsfeinmessung in einem Fichtenaltbestand und Möglichkeiten der Interpretation kurzfristiger Schwankungen der Zuwachsmesswerte. *AFJZ* **165**: 34–40.
- VOGEL, M. und S. ANDERS (1995): Ableitung von Zuwachstreppenkurven aus Messwerten der automatischen Radialzuwachsfeinmessung. *AFJZ* **166**: 211–215.
- VOGEL, M., G. PESCHKE und A. RÜLICHE (1996): Berechnung und Interpretation von Stammspeicheränderungen für eine ca. 100-jährige Fichte. *AFJZ* **167/8**: 162–167.
- WENK, G. und F. FIEDLER (1973a): Der jahreszeitliche Ablauf des Dickenzuwachses von Fichten und Kiefern und seine Abhängigkeit von meteorologischen Faktoren. *Wiss. Z. TU Dresden* **22/3**: 531–535.
- WENK, G. und F. FIEDLER (1973b): Einfluss der Temperatur und des Niederschlages auf den Holzzuwachs an Waldbäumen im jahreszeitlichen Ablauf. *Soz. Forstwirtschaft. Berlin* **23/2**: 52–54.
- WENK, G. und F. FIEDLER (1979): Interpretation zur Periodizität des Durchmesserwachstums von Waldbäumen als Folge der Einwirkungen meteorologischer Elemente. *Abhandl. d. Akad. d. Wiss. d. DDR: Abt. Mathematik – Naturw. – Technik, Berlin*, 1 N: 467–481.
- WENK, G. und M. VOGEL (1992): Einfluss von Temperatur und Niederschlag auf den Verlauf des Radialzuwachses. *Schriften Forstl. Fak. Uni Göttingen und Nieders. Forstl. Vers.* **106**: 206–215.
- WENK, G., M. VOGEL und B. ANTALIK (1995): Quantifizierung der Jahrringbreitenschwankung durch heuristische Modelle und multiple Regressionen. *Tagungsberichte AG Ökologie Deut. Region der internat. Biom. Gesellschaft*, 7. Herbstkoll. Freiburg, 6.