

KfK-PEF 117

April 1994

**Projekt Europäisches
Forschungszentrum für
Maßnahmen zur Luftreinhaltung
(PEF)**

**10. Statuskolloquium des PEF
vom 15. bis 17. März 1994 im
Kernforschungszentrum
Karlsruhe**

zusammengestellt von
F. Horsch, W. G. Filby, N. Fund,
S. Gross, G. Kändler

Kernforschungszentrum Karlsruhe

Witterungsverlauf und Wachstum von Fichten, Tannen und Buchen in Südwestdeutschland unter besonderer Berücksichtigung des Standorts und des Standraums

H.-P. Kahle, D. Hahn und H. Spiecker*

Institut für Waldwachstum der Forstwissenschaftlichen Fakultät
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Zusammenfassung

Schwerpunkte der Arbeiten im Jahr 1993 lagen im Bereich der Aufbereitung der Witterungsdaten, bei der Analyse intraindividuelle Radialzuwachsvariationen sowie bei der Anwendung weiterentwickelter dendroökologischer Analysemethoden. Für die Buche wurde neues Datenmaterial in die Untersuchungen einbezogen.

Aus einem dichten meteorologischen Beobachtungsnetz wurden Übertragungsfunktionen entwickelt, mit denen Punktschätzungen für die meteorologischen Zustandsgrößen an den Untersuchungsstandorten räumlich interpoliert wurden. Ein beträchtlicher Anteil intraindividuelle Zuwachsvariationen konnte anhand dokumentierter Sturmholzanfälle auf Reaktionsholzbildungen zurückgeführt werden. Faktorenanalytische Befunde belegen, daß die Radialzuwachsreaktionen der untersuchten Fichten von einem gemeinsamen Witterungssignal dominiert werden. Demgegenüber treten Einflüsse standortswasserhaushaltsspezifischer Unterschiede fast vollständig zurück. Das auf der potentiellen Evapotranspiration der Monate April bis Juni und der klimatischen Wasserbilanz in den Monaten Juli und August basierende Klima-Zuwachs-Modell (Kalibrierungszeitraum 1900 bis 1990) erklärt einen Großteil der Radialzuwachsreaktionen der untersuchten Fichten. Bei den untersuchten Buchen konnten Reaktionsunterschiede im Durchmesserzuwachs zwischen Kollektiven verschiedener numerischer Baumklasse während wachstumsungünstiger Zeiten nachgewiesen werden.

Summary

H.-P. Kahle, D. Hahn und H. Spiecker

Climatic variation and growth of Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst.), Silver fir (*Abies alba* Mill.) and European beech (*Fagus sylvatica* L.) in Southwestern Germany

In this research project, effects of climate variation on the growth of trees and stands and interactions with site conditions and stand structure are quantified. This report describes the spatial interpolation of climate data, the investigation of intraindividual variations in ring width as well as results of the analysis of European beech data.

Intraindividual ring width variations in Norway spruce were highly correlated with mortality caused by storms and were therefore found to be quantitative indicators for storm stresses of trees. Principal components analysis revealed high loadings on the first amplitude, which therefore is related to a strong common climatic signal. Only small amounts of variances were explainable by site specific factors of available soil water capacity. Low potential evapotranspiration during April to June and surplus in the water balances during July and August of the 5 preceding years stimulates growth of Norway spruce in high elevations of the Black Forest. The analysis of diameter growth of European beech indicates that trees of different status within the stand show different growth reactions during a period of low precipitation and high temperature.

* Es wirkten mit bei der statistischen Auswertung: Dr. P. C. Van Deusen
bei der Auswahl und Charakterisierung der Standorte:
Dr. E. Aldinger, Dr. S. Raspe, L. Sprich und M. Wiebel

1. EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG

In dem Vorhaben werden Auswirkungen der Variation von Klima und Witterung auf das Wachstum von Fichten, Tannen und Buchen unter Berücksichtigung von Standort und Bestandesstruktur quantifiziert.

In den bisher vorgelegten Berichten wurden witterungsbedingte Radial- und Volumenzuwachsreaktionen von Fichten aus dem Nördlichen und Mittleren Schwarzwald und von Plenterwald-Fichten und -Tannen aus dem Südschwarzwald (SPIECKER, 1991 und 1992), sowie Durchmesserzuwachsreaktionen von Buchen auf der Schwäbischen Alb (KAHLE et al., 1993) untersucht. Datengrundlage sind dendrometrische Meßreihen aus dem Versuchsflächennetz der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (FVA Ba.-Wü.). Im Jahre 1991 wurden im Rahmen dieses Projekts Fichten und Tannen in montanen und submontanen Lagen des Südschwarzwalde unter besonderer Berücksichtigung der Wasserspeicherkapazität des Bodensubstrats ausgewählt. Erste Ergebnisse der Auswertung dieses Datenmaterials wurden von SPIECKER (1992) und KAHLE et al. (1993) vorgestellt.

In den vorgelegten Arbeiten konnten enge Zusammenhänge zwischen den Zuwachsreaktionen der untersuchten Fichten und Tannen und den Niederschlagssummen und Lufttemperaturen, bzw. des Evapotranspirationsindex (ETP-Index) nach THORNTHWAIT & MATHER (1957) in der Vegetationszeit der vorangegangenen 5 Jahre gefunden werden. Hervorzuheben ist der Einfluß der Witterung in den Monaten Juli und August, deren Schlüsselrolle bei der witterungsbedingten Zuwachssteuerung von Fichten, Tannen und Buchen herausgearbeitet wurde.

Unterschiede in der Wasserspeicherkapazität des Bodensubstrats wirkten sich nur wenig auf die Radialzuwachsreaktionen der untersuchten Fichten und Tannen von montanen und submontanen Lagen des Südschwarzwalde aus (SPIECKER, 1992; KAHLE et al., 1993).

Neben multivariaten Methoden der Zeitreihenanalyse wurden auch zeitvariable Parameter Modelle (Kalman Filter) zur Quantifizierung der Klima-Zuwachs Kopplung angewendet (SPIECKER, 1992; KAHLE, 1993). Die Anwendung komplexerer statistischer Analysemethoden stellte höhere Anforderungen an die Aufbereitung der verwendeten Witterungsdaten (z.B. Konsistenz- und Homogenitätsprüfung) und Zuwachsdaten (z.B. Standardisierung). Im vorliegenden Bericht wird die Frage der Repräsentanzprüfung der Witterungsdaten aufgegriffen und am Beispiel der Fichte werden objektive Verfahren zur Trendbereinigung der Zuwachsreihen sowie zur Variablenselektion vorgestellt und angewendet.

2. MATERIAL UND METHODEN

2.1 Witterungsdaten

Die vom Deutschen Wetterdienst zur Verfügung gestellten Meßreihen der meteorologischen Faktoren Niederschlag und Lufttemperatur spiegeln standortsspezifische Verhältnisse wieder, die insbesondere im reliefreichen Mittelgebirgsraum wie dem Südschwarzwald nicht direkt auf die entfernteren Waldgebiete übertragbar sind (KÖNIG & MAYER, 1990; GIESECKE & MEYER, 1984). Aus diesem Grund wurden aus den homogenisierten und auf einheitliche Periode reduzierten Beobachtungsreihen von 27 Niederschlags- und 18 Klimastationen die in einem Umkreis von ≤ 50 km um den Schwerpunkt der Untersuchungsbestände im Südschwarzwald liegen und einen Höhenbereich von 255 m üNN (Station Freiburg i. Br.) bis 1486 m üNN (Station Feldberg) repräsentieren räumlich interpolierte Punktschätzungen abgeleitet (vgl. BLASING et al., 1981). Da die horizontalen und vertikalen Klimagradien zeitlich variieren (vgl. SCHÖNWIESE & MALCHER, 1990), wurden separate Übertragungsfunktionen für jeden Monat in jedem Jahr des Zeitraumes 1881 (Niederschläge) bzw. 1900 (Lufttemperatur) bis 1992 als polynomiale Regressionen 2. Grades über den Gauß'schen Lagekoordinaten und den Meereshöhen berechnet. Die Lufttemperatur erweist sich als der meteorologische Faktor mit der deutlich größeren räumlichen Repräsentanz.

In Bezug auf den pflanzenphysiologisch relevanten Wasserhaushalt enthalten die meteorologischen Faktoren Niederschlag und Lufttemperatur redundante Information, da sie für die untersuchten Lagen stark invers korreliert sind. Die monatliche potentielle klimatische Wasserbilanz (WBP) als Differenz

zwischen der potentiellen Evapotranspiration (ETP) und dem Niederschlagsangebot komprimiert diese beiden Faktoren zu einer Näherungsgröße, die für die untersuchten Standorte in einem direkten Zusammenhang zu den herrschenden Feuchtigkeitsbedingungen steht. Die WBP stellt eine näherungsweise Einschätzung des pflanzenverfügbaren Wasserangebots dar, während die ETP den atmosphärischen Verdunstungsanstoß charakterisiert. Eingangsgrößen zur Berechnung der ETP nach THORNTHWAITE & MATHER (1957) sind die Monatsmittel der Lufttemperatur, die langjährigen Durchschnitte der Monatsmitteltemperatur und die geographische Breite des betreffenden Standorts (vgl. SCHRÖDTER, 1985). Da die Berechnungsformel von mittleren Wasservolumina in der Wurzelschicht ausgeht, bleiben standortsspezifische Unterschiede in der nutzbaren Wasserspeicherung bei der Herleitung der WBP jedoch unberücksichtigt.

In Abbildung 1 sind die über den Zeitraum 1900 bis 1992 zentrierten und varianzstandardisierten Verläufe der WBP für die Vegetationszeit (Mai bis September) und den Zeitraum Juni bis August dargestellt. Minimalwerte des Vegetationszeitmittels der potentiellen Wasserbilanz (WBP_i , Mai-September) werden 1947 (absolutes Minimum), 1911, 1949 und 1952 (≤ 1.5 s), des Mittels der Monate Juni bis August 1983 (absolutes Minimum), 1911, 1923, 1947, 1949 und 1952 erreicht. Die geglätteten Werte des Vegetationszeitmittels unterschreiten in den Jahren 1951-1953 und 1975-1977, die des Mittels der Monate Juni bis August 1923, 1953, 1976 sowie 1985-1987 den 1.5 s-Schwellenwert. Während die früheren tiefen Depressionsphasen in den 20er Jahren und Ende der 40er bis Mitte der 50er Jahre durch 10 bis 15 Jahre andauernde Perioden günstigerer Wasserversorgung unterbrochen waren, folgte auf den tiefen Einbruch Mitte der 70er Jahre eine nur kurz andauernde Entspannung der Wasserbilanz, bevor Anfang der 80er Jahre die extremsten Wasserdefizite seit Beginn dieses Jahrhunderts verzeichnet werden.

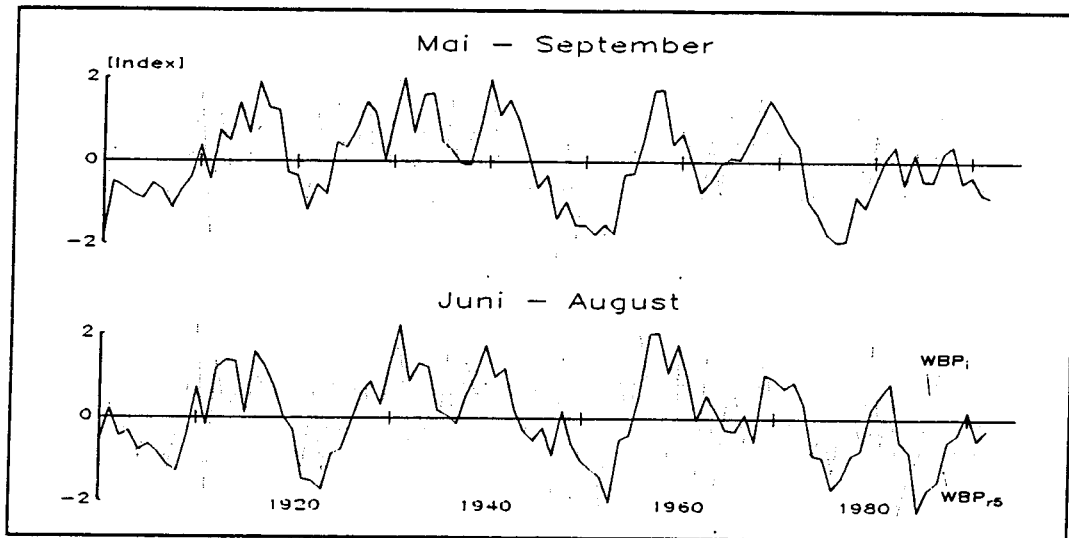


Abb. 1: Verlauf der klimatischen Wasserbilanz (WBP)

Dargestellt sind jährliche und geglättete Werte der klimatischen Wasserbilanz des Vegetationszeitmittels (Mai-September) und des Mittelwertes über die Monate Juni bis August (Glättung mit asymmetrischem 5 jährigen gleitenden Durchschnitt, $WBP_{s,i}$). Während die früheren tiefen Depressionsphasen in den 20er Jahren und Ende der 40er bis Mitte der 50er Jahre durch 10 bis 15 Jahre andauernde Perioden günstigerer Wasserversorgung unterbrochen waren, folgte auf den tiefen Einbruch Mitte der 70er Jahre eine nur kurz andauernde Entspannung der Wasserbilanz, bevor Anfang der 80er Jahre die extremsten Wasserdefizite seit Beginn diese Jahrhunderts verzeichnet werden.

2.2 Zuwachsdaten von Fichte

Die Baum- und Standortdaten wurden bereits an anderer Stelle ausführlicher vorgestellt (KAHLE et al., 1993).

Die analysierten Radialzuwächse wurden mit dem Digitalpositionimeter entlang von 8, nach Himmelsrichtung einheitlich orientierten Radien auf Stammscheiben gemessen. Die Untersuchungsbäume stammen aus montanen und submontanen Lagen des Südschwarzwaldes. Die Auswahl der Untersuchungsbäume erfolgte unter besonderer Berücksichtigung der Wasserspeicherkapazität (WK) des Bodensubstrats. Dazu wurden zwei Standortsgruppen unterschieden:

- a) Standorte mit höherer Wasserspeicherkapazität (hWK, n=40 Untersuchungsbäume)
- b) Standorte mit geringerer Wasserspeicherkapazität (gWK, n=35 Untersuchungsbäume).

Vor der Analyse der Zusammenhänge zwischen Witterung und Radialzuwachs wurde eine einzelbaumweise Trendbereinigung auf der Grundlage des 'Stochastischen Trendmodells' durchgeführt (HARVEY, 1984; HARVEY et al., 1986; VISSER & MOLENAAR, 1990; VAN DEUSEN, 1991). Dieses Verfahren zeichnet sich dadurch aus, daß der lokale Glättungsgrad durch die Varianz der Radialzuwächse des untersuchten Baumkollektivs, und somit durch ein objektives, datenadaptiertes Kriterium gesteuert wird. Dadurch wird es möglich baumindividuelle, altersbezogene und durch Standraum- sowie Standortsveränderungen bedingte niederfrequente Zuwachsschwankungen optimal von den Witterungssignalen zu trennen. Die Quotienten aus den gemessenen (Mittelwert aus 8 Meßradien) und den geschätzten Werten ergeben die Radialzuwachsindices die mit einer geeigneten Mittelwertfunktion zu Chronologien verdichtet werden (Standardchronologie = Mittelwert aus allen Untersuchungsbäumen, Standortchronologie = Mittelwert der Untersuchungsbäume eines bestimmten Standortskollektivs).

Zur Analyse der Korrelationsstruktur innerhalb und zwischen den Standortchronologien wird eine Hauptkomponentenanalyse der transformierten Radialzuwächse (erste Differenzen der Logarithmen, $\Delta^1(\ln ir)$; VAN DEUSEN, 1987) durchgeführt.

Mit Hilfe der Kreuzkorrelationsanalyse wird die Auswahl signifikanter Einflußvariablen objektiviert, sowie deren zeitgleiche und zeitverzögerte Wirkungsweisen analysiert (Transfer-Funktions-Analyse). Da serielle Abhängigkeiten die korrelativen Zusammenhänge zwischen den Variablen beeinträchtigen, ist die Autokorrelation in den multivariaten Zeitreihen angemessen zu berücksichtigen. Zur Variablenselektion wurden die Zeitreihen deshalb mit ARMA-Prozessen gefiltert (prewhitened; BOX & JENKINS, 1970; GUIOT, 1986; YUE, 1993; GAUSSTM, 1994).

Die Modellierung der Zusammenhänge zwischen Witterung und Radialzuwachs erfolgt im zeitvariablen Parameter Modell mit Kalman Filter Schätzung (VAN DEUSEN, 1987 und 1993; VISSER, 1986; HARVEY, 1989).

2.3 Zuwachsdaten von Buche

Datengrundlage zur Untersuchung der Wachstumsreaktionen von Buchen sind periodische Meßreihen der Schaftdurchmesser in 1.3 m Höhe ($d_{1.3}$) des Durchforstungsversuches der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg im Forstbezirk Münsingen, Wuchsgebiet Schwäbische Alb¹. Der Untersuchungsbestand stockt auf Kalkverwitterungslehm über verkarstem Untergrund. Das geologische Ausgangsmaterial für die Bodenbildung ist die Formation des Weißen Jura ϵ , die ausgewiesene Standortseinheit Buchenwald auf mäßig frischem Kalkverwitterungslehm.

Seit Versuchsbeginn wurden die Felder der insgesamt 1 ha großen Versuchsanlage mehrfach mit unterschiedlichen Eingriffsstärken durchforstet. Die baumweise Erfassung der Schaftdurchmesser in 1.3 m Höhe beginnt im Jahre 1904 im mittleren Bestandesalter von 70 Jahren. Sie wurden bis zum Jahre 1964 insgesamt zehnmal aufgenommen. Für die dargestellten Auswertungen werden nur die bis zum Ende des Beobachtungszeitraums auf der Versuchsanlage verbliebenen Bäume herangezogen, um Einflüsse der rechnerischen Verschiebung durch Zu- und Abgänge von Bäumen auszuschalten. Zum Vergleich der Zuwachsreaktionen werden diese Untersuchungsbäume nach ihrer relativen Stellung im Gesamtkollektiv zur Zeit der letzten Aufnahme zusammengefaßt und der altersabhängige Zuwachs dieser Kollektive über den gruppenspezifischen Median berechnet. Die relative Stellung der Untersuchungsbäume wird aus der Relation zwischen baumweisem Schaftdurchmesser (d_i) und mittlerem Schaftdurchmesser der 100 stärksten Bäume (d_{100}) bestimmt. Je größer der Wert dieser Relation, desto stärker ist der betrachtete Untersuchungsbaum im Gesamtkollektiv. Der Wertebereich wird in vier Stufen ($1.1 = > 1.00$; $0.9 = 0.80-0.99$; $0.7 = 0.60-0.79$; $0.5 = < 0.60$) aufgegliedert.

¹ Herrn Prof. Dr. G. KENK, Leiter der Abt. Waldwachstum, sei an dieser Stelle für die Überlassung der periodischen Meßreihen gedankt.

Diese Einteilung der Untersuchungsbäume wird im folgenden als numerische Baumklasseneinteilung bezeichnet, die im Gegensatz zur sozialen Baumklasseneinteilung eine objektive Klassierung ist. In gleichaltrigen Reinbeständen ist eine weitgehende Parallelität von Baumklasse, Kronenausbildung, Standraum und Zuwachsfähigkeit anzunehmen.

Die folgenden Betrachtungen beziehen sich auf jährlich periodische Schaftdurchmesserzuwächse in 1.3 m Höhe, die dargestellten Zusammenhänge gelten jedoch in gleicher Weise für die jährlich periodischen Grundflächenzuwächse in 1.3 m Höhe.

3. ERGEBNISSE UND DISKUSSION

3.1 Die Radialzuwachschronologien der untersuchten Fichten

Abbildung 2 enthält das Ergebnis der Hauptkomponentenanalyse und zeigt die Faktorenladungen (l_i) auf den ersten drei Hauptkomponenten (PC 1-3) der für die beiden Standortskollektive getrennt analysierten jährlichen Radialzuwächse der Meßradien 1 bis 8 (1=N, 2=S, 3=NO, 4=SW, 5=O, 6=W, 7=SO, 8=NW) bezogen auf den Zeitraum 1843 bis 1990. Variable 1 bis 8 repräsentieren das Kollektiv 'Fi gWK', Variable 9 bis 16 das Kollektiv 'Fi hWK'. Die erste Hauptkomponente (Eigenwert 12.989) weist auf allen Variablen hohe Ladungen auf. Sie repräsentiert 81.2% der Gesamtvarianz und wird als das gemeinsame, jährliche Witterungssignal interpretiert. Die Hauptkomponenten 2 und 3 trennen die Standortskollektive (standortswasserhaushaltsspezifisches Signal, Eigenwert PC2: 1.858, % Varianz: 11.6) bzw. die durch Reaktionsholzbildung charakterisierten Meßradien 1, 3 und 5 von den leeseitigen Radien (Eigenwert PC3: 0.294, % Varianz: 1.8). Die Eigenwerte sind auf dem 0.01-Niveau signifikant (BARTLETT-Test).

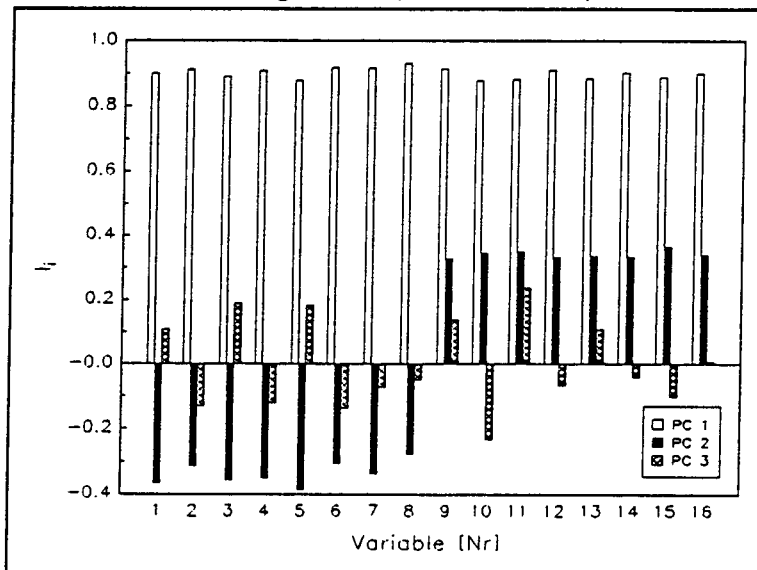


Abb. 2: Hauptkomponenten-Analyse der Radialzuwächse in Abhängigkeit vom Meßradius und von der Wasserspeicherkapazität des Standorts

Die Untersuchungsbäume wurden nach der Wasserspeicherkapazität des Standorts in zwei Straten geteilt. Variable 1 bis 8 repräsentieren die Radialzuwächse entlang der 8 Meßradien des Kollektivs gWK, Variable 9 bis 16 das Kollektiv hWK. Die erste Hauptkomponente erklärt 81.2% der Gesamtvarianz und wird als das gemeinsame, jährliche Witterungssignal interpretiert. Die Hauptkomponenten 2 und 3 sind polar ausgeprägt und trennen die Standortskollektive bzw. die durch Reaktionsholzbildung charakterisierten Meßradien 1, 3 und 5 von den leeseitigen Radien.

Werden in die Hauptkomponentenanalyse nicht die Mittelwerte der einzelnen Meßradien sondern die Standortskronologien einbezogen, erhöht sich der durch die erste Hauptkomponente erklärte Varianzanteil auf 92.21%. Eine Signalstärke von über 90% der Varianz auf der ersten Hauptkomponenten ist als außerordentlich hoch einzustufen (vgl. LAMARCHE, 1974; PETERS et al. 1981), für Unterschiede zwischen den Standortskollektiven verbleibt deshalb nur ein sehr geringer Anteil erklärter Varianz.

Die Ausbildung der jährlichen Radialzuwächse entlang der 8 Meßradien zeigt eine ausgeprägte Richtungsabhängigkeit: Im Zeitraum 1922 bis 1990 wurden 75% der maximalen jährlichen Radialzuwächse (ir_{max}) auf dem Nordost-, 23% auf dem Ost- und 1% auf dem Nordradius ausgebildet. Abbildung 3 zeigt, daß große Unterschiede zwischen mittlerem und maximalem Radialzuwachs in einem bestimmten Jahr eng mit dem Auftreten und der Intensität von Sturmereignissen verbunden sind.

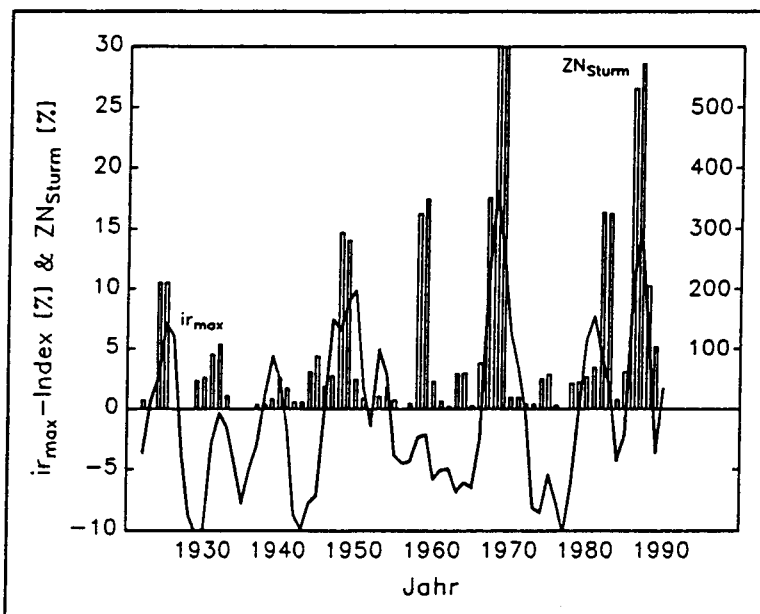


Abb. 3: Maximaler jährlicher Radialzuwachs und Sturmholzanfall

Die trendbereinigten ir_{max} -Werte (ir_{max} -Index) sind mit den Sturmholzanfällen in den betreffenden Beständen mit $r=0.6369$ ($p > |t| = 0.0000$) signifikant korreliert, und können somit als Indikatoren für die Sturmbelastung der Untersuchungsbaume betrachtet werden. Diskrepanzen zwischen den ZN_{Sturm} - und ir_{max} -Werten Ende der 50er-Jahre sind möglicherweise auf Unschärfen bei der Schadholzverbuchung zurückzuführen, denn für die Jahre 1957/58 und 1958/59 sind in der Nachbarschaft Schneebruchschäden größeren Ausmaßes nachgewiesen (EISENKOLB, 1963; VOLK, 1968).

Die mit linearer Einfachregression trendbereinigten ir_{max} -Werte (über alle 75 Untersuchungsbaume gemittelt) sind mit den mittleren Sturmholzanfällen in den betreffenden Beständen (ZN_{Sturm} in % des 1922-1990 Mittelwertes) signifikant korreliert und können als Indikatoren für die Sturmbelastung der Untersuchungsbaume betrachtet werden (auswertbare Forsteinrichtungsdokumentationen über sturmbedingte zufällige Nutzungen in den betreffenden Beständen liegen erst ab 1922 vor).

Beim Vergleich der ir_{max} - und ir_{min} -Werte zeigt sich, daß die Unterschiede mit der Dimension des Baumes linear zunehmen und beide Größen im Mittel mit $r=-0.5769$ invers korreliert sind. Dendroökologische Analysen auf der Grundlage nur einzelner Radialmessungen können deshalb mit systematischen Fehlern behaftet sein.

Der Einfluß der Exposition auf die jährlichen Radialzuwächse wird in Abbildung 4 verdeutlicht. Die Korrelationskoeffizienten von 30 Untersuchungsbaumen aus Hanglagen sind, bezogen auf den konstant belegten Zeitraum 1936 bis 1990, über den Expositionsdifferenzen zwischen den Standorten aufgetragen.

Den transformierten Korrelationskoeffizienten wurde eine Kosinus-Funktion der Expositionsdifferenzen angepaßt.

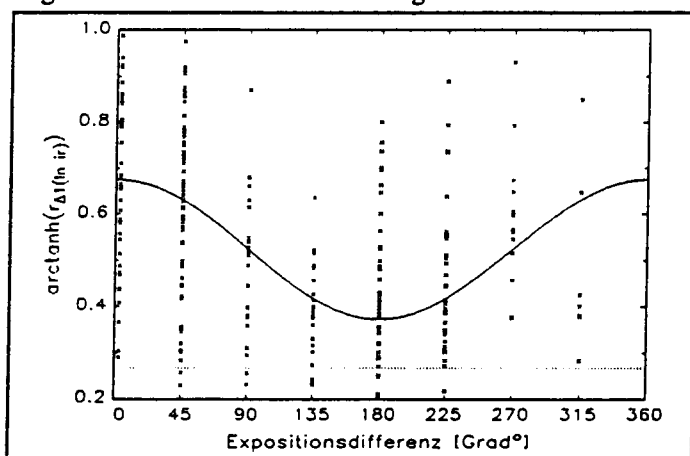


Abb. 4: Korrelation der Radialzuwachsreihen in Abhängigkeit von der Expositionsdifferenz zwischen den Untersuchungsbaumstandorten. Die obere 0.05-Signifikanzgrenze der Korrelationskoeffizienten ist gepunktet eingetragen.

3.2 Radialzuwachs und Witterung bei den untersuchten Fichten

3.2.1 Auswahl signifikanter Klimavariablen

Abbildung 5 zeigt die Ergebnisse der Kreuzkorrelationsanalyse für die beiden Standortschronologien. Dargestellt sind die Kreuzkorrelationskoeffizienten für Zeitverschiebungen (Lags) k von 0 bis 4 Jahren zwischen der WBP und ETP (jeweils gemittelt über die Monate April/Mai, Mai/Juni, Juni/Juli, Juli/August und August/September) und den Standortschronologien bezogen jeweils auf den Zeitraum $1900+k$ bis 1990. Die WBP und die ETP der Monate Juli bis September des Vorjahres und bei einer Zeitverschiebung von 3 Jahren sind signifikant mit den Radialzuwächsen korreliert. Bis auf Unterschiede bei den zeitgleichen Zusammenhängen (Lag 0) sind die Ergebnisse konsistent für beide Standortskollektive. Damit ist eine Grundlage für die objektive Auswahl signifikanter Einflußvariablen gegeben.

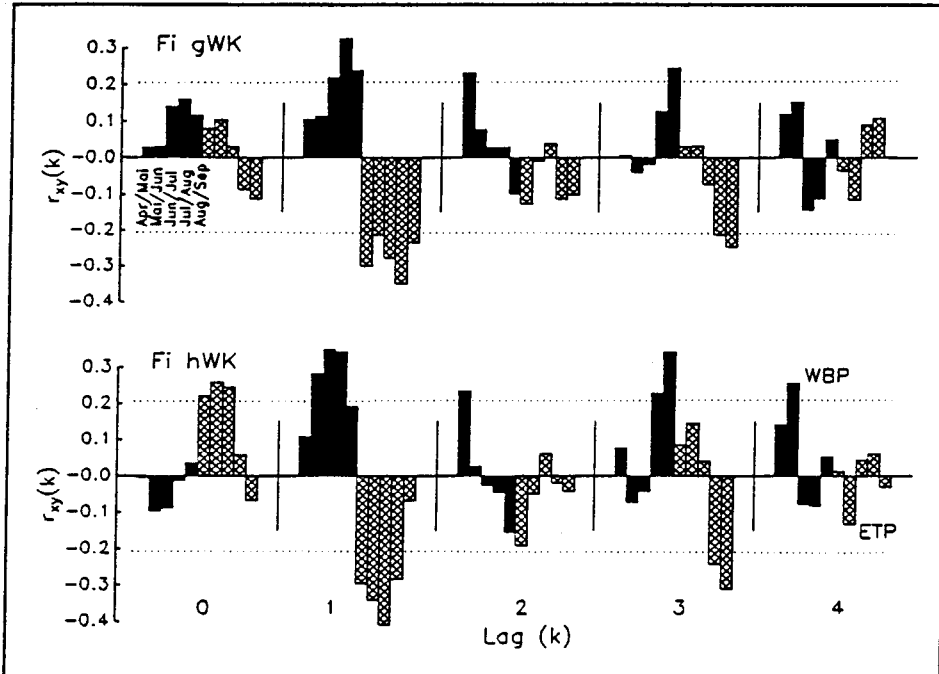


Abb. 5: Kreuzkorrelation zwischen der klimatischen Wasserbilanz (WBP) und potentiellen Evapotranspiration (ETP) und den Standortschronologien

Die WBP und ETP der Monate Juli bis September des Vorjahres und bei einer Zeitverschiebung von 3 Jahren sind signifikant mit den Radialzuwächsen korreliert. Gepunktete Linie: 0.05-Signifikanzniveau. Alle analysierten Variablen wurden in "Weißes Rauschen" transformiert (prewhitened).

3.2.2 Unterschiede zwischen den Standortschronologien

Mit der Hauptkomponentenanalyse ließen sich die Standortskollektive anhand ihrer Radialzuwachsreaktionen trennen (Punkt 3.1, Abb. 2). Um zu überprüfen auf welche zeitgleichen und zeitverzögerten klimatischen Inputs diese Unterschiede zurückzuführen sind wurde mit den Faktorenwerten der beiden Hauptkomponenten PC1 und PC2 der Standortschronologien ebenfalls eine Kreuzkorrelationsanalyse durchgeführt (Abbildung 6).

Die Kreuzkorrelationsstruktur für die erste Hauptkomponente entspricht den in Abbildung 5 dargestellten Ergebnissen. Die Faktorenwerte der zweiten Hauptkomponenten repräsentieren jedoch primär die zeitgleichen Zusammenhänge zwischen der Wasserbilanz (positiv für die Monate Mai bis August) und der Evapotranspiration (negativ für die Monate April bis August) und bringen somit die Bestimmung der Radialzuwächse durch die laufenden Witterungsbedingungen, zum Ausdruck. Es ist zu berücksichtigen, daß aufgrund der polaren Faktorenladungen der Standortschronologien auf der zweiten Hauptkomponenten die dargestellten Kreuzkorrelationen die Verhältnisse für das Kollektiv gWK direkt, für das Kollektiv hWK jedoch invers widerspiegeln. Somit zeigen die Fichten der

Standorte mit geringerer WK zusätzlich zu den durch PC1 reflektierten grundlegenden, zeitverzögerten Zusammenhangsstrukturen eine gleichsinnige Korrelation mit den laufenden Witterungsbedingungen. Bei den Fichten der Standorte mit günstigerer WK ist jedoch ein Vorzeichenwechsel festzustellen: Die positive Korrelation zwischen den atmosphärischen Verdunstungsanforderungen in den Monaten April bis August der laufenden Wachstumsperiode und den Radialzuwächsen kehrt sich im Folgejahr (Lag 1) um. Der Gesamtimpakt (Summe der signifikanten zeitgleichen und zeitverzögerten Korrelationen) hoher ETP-Werte ist aber auch bei diesem Kollektiv negativ.

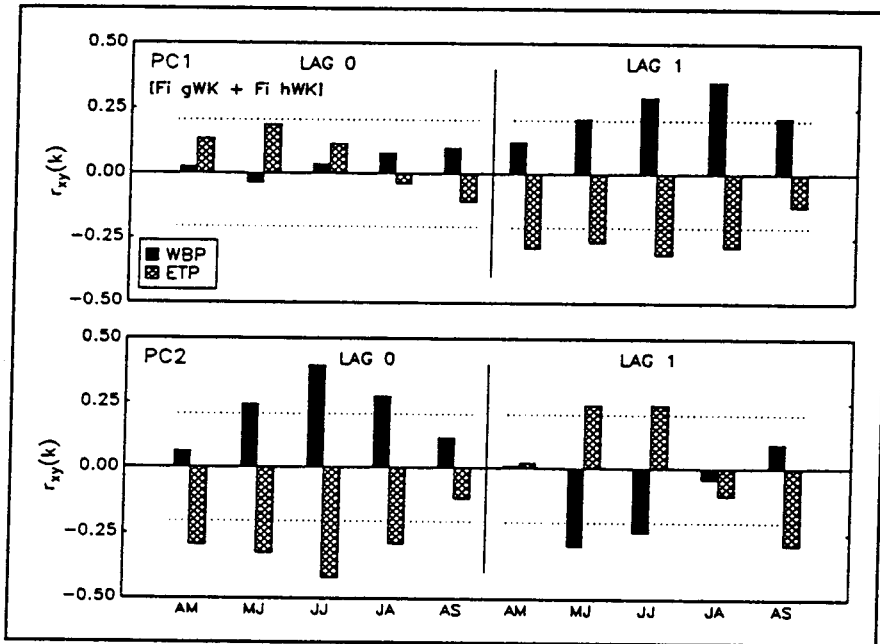


Abb. 6: Kreuzkorrelation zwischen der klimatischen Wasserbilanz (WBP) und potentiellen Evapotranspiration (ETP) und den Faktorenwerten der Standortschronologien

Die erste Hauptkomponente erklärt 92.21% der gemeinsamen Varianz. Die zweite Hauptkomponente ist polar ausgebildet und erklärt 7.79% der Varianz (positiv auf gWK, negativ auf hWK). Die Kreuzkorrelationsstruktur für die erste Hauptkomponente entspricht den in Abbildung 5 dargestellten Ergebnissen. Die Faktorenwerte der zweiten Hauptkomponenten repräsentieren primär die zeitgleichen Zusammenhänge zwischen der Wasserbilanz (positiv für die Monate Mai bis August) und der Evapotranspiration (negativ für die Monate April bis August) und bringen somit die Bestimmung der Radialzuwächse durch die laufenden Witterungsbedingungen zum Ausdruck. Gepunktete Linie: 0.05-Signifikanzniveau.

3.2.3 Klima-Zuwachs Modell

Die bei der Kreuzkorrelationsanalyse der in "Weißes Rauschen" transformierten Variablen selektierten signifikanten Klimavariablen wurden als Grundlage für die Formulierung des Klima-Zuwachs Modells verwendet. Die Tatsache, daß interpretierbare signifikante Übertragungseffekte mit einer Zeitverzögerung von bis zu vier Jahren festgestellt wurden, läßt darauf schließen, daß diese Klimavariablen auch einen signifikanten Beitrag zur Autokorrelation der indextierten Radialzuwächse (unwithened) leisten.

Der Verlauf der zeitlich verzögerten Effekte der Variablen - die Impuls-Antwort Funktion - läßt sich mit einer Funktion vom Typ der 'Verteilten Verzögerungen' (Distributed Lag) objektiv bestimmen. Die Gewichte der auf diese Weise parametrisierten Impuls-Antwort Funktionen stellen die zeitlich verzögerten Wirkungen der Klimaimpulse auf die Radialzuwächse dar. Dabei klingen die Effekte des Klimaimpulses mit zunehmender zeitlicher Verzögerung (Lag) kontinuierlich ab, so daß bei einer 5 jährigen Lagverteilung der Gesamtimpuls erst nach 5 Jahren vollständig auf die Radialzuwächse übertragen ist.

Das in Abbildung 7 vorgestellte Klima-Zuwachs Modell basiert auf folgenden zwei Eingangsvariablen, die jeweils nach dem o.g. Verfahren formuliert wurden:

- Potentielle Evapotranspiration gemittelt über die Monate April bis Juni (ETP46)
- Klimatische Wasserbilanz gemittelt über die Monate Juli und August (WBP78)

Da sich die Variablen zeitlich nicht überlagern ist der Einfluß der Kollinearität minimiert. Die Aufnahme der ETP-Variablen wird damit begründet, daß in den untersuchten Lagen die Bodenwasserreserven zu Beginn der Wachstumsperiode aus den Winterniederschlägen i.a.R. aufgefüllt sind und daß die Fichte nicht nur auf Wassermangel, sondern auch auf die Höhe des Wasserdampfdruckdefizits mit reduzierter Assimilation reagiert (GROSS & PHAM-NGUYEN, 1987).

Dargestellt sind die Radialzuwächse der Standardchronologie (Mittelwert aus allen 75 Untersuchungsbäumen) und das Klima-Zuwachs Modell aus der Kalman Filter Schätzung ($psR^2=0.7813$; psR^2 ist das 'pseudo'-Bestimmtheitsmaß, ein dem Bestimmtheitsmaß entsprechendes Kriterium, das zur Quantifizierung zeitvariabler Zusammenhänge dient).

Im unteren Teil der Abbildung ist der Verlauf des Regressionskoeffizienten der Variablen WBP78 über der Zeit dargestellt. Ein kontinuierlicher Anstieg der Regressionsgewichte seit Beginn der 50er Jahre deutet sich an (vgl. auch SPIECKER, 1992).

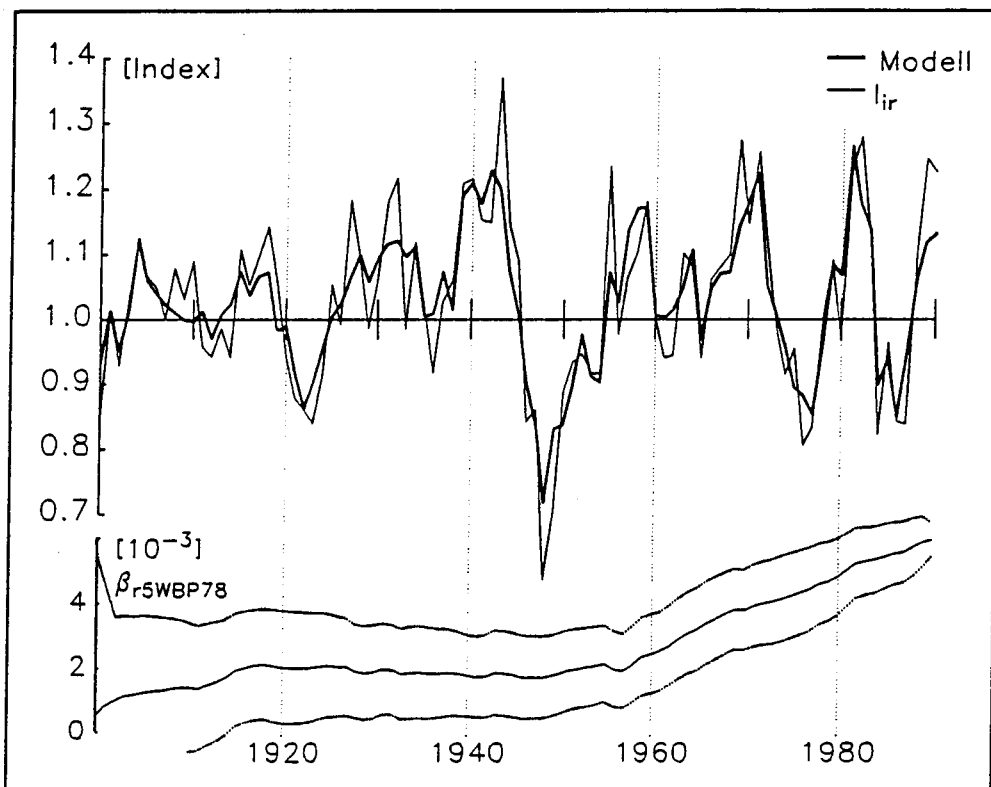


Abb. 7: Standardchronologie und Klima-Zuwachs Modell

Dargestellt sind die Radialzuwachsindices der Standardchronologie (I_{ir} , dünne Linie) und das Klima-Zuwachs Modell. Als Eingangsvariablen für das Schätzmodell wurde die potentielle Evapotranspiration im Zeitraum April bis Juni sowie die klimatische Wasserbilanz im Zeitraum Juli bis August verwendet (jeweils als gewichtete 5 jährige gleitende Durchschnitte formuliert). Unten ist der zeitvariable Regressionskoeffizient der Variable WBP78 mit 90%-Vertrauensbereich dargestellt. Ein kontinuierlicher Anstieg der Regressionsgewichte seit Beginn der 50er Jahre deutet sich an.

3.2.4 Diskussion der Ergebnisse

Die Selektion signifikanter Klimavariablen für das vorgestellte Klima-Zuwachs Modell erfolgte auf der Grundlage der Kreuzkorrelationsanalyse zwischen den in "Weißes Rauschen" transformierten Klima- und Radialzuwachsvariablen. Dabei wurden signifikante zeitliche Übertragungseffekte bis zu einem Lag von 4 Jahren gefunden (Abb. 5). Dies ist erstaunlich, denn die Ausschaltung der Autokorrelation in den untersuchten Zeitreihen entspricht der Darstellung der Impuls-Reaktions Zusammenhänge unter der Annahme statischer Beziehungen. Die Annahme zeitlicher Veränderungen in der Struktur des betrachteten Systems scheint aber insbesondere aus folgenden Gründen angebracht:

- Bäume sind anpassungsfähige Organismen.

- Die maßgeblichen Umweltfaktoren unterliegen einzeln und in Bezug auf ihre zuwachsrelevanten Wechselwirkungen ebenfalls einer zeitlichen Variabilität.

Dynamische Aspekte wurden deshalb bei der Modellentwicklung in zwei Schritten eingeführt:

- Die Klimavariablen wurden auf der Grundlage der ermittelten Impuls-Antwort Funktion (Transfer-Funktions-Analyse) formuliert, wobei die zeitlichen Übertragungseffekte in Form von verteilten Verzögerungen beschrieben werden (Distributed Lag Modell).
- Die Parametrisierung des zeitvariablen Parameter Modells ermöglichte die quantitative Darstellung von mittel- bis langfristigen strukturellen Veränderungen im modellierten System.

Die Gefahr der Auswahl von Scheinvariablen bei der Anwendung zeitvariabler Modelle ist groß (vgl. z.B. INNES & COOK, 1989). Das liegt daran, daß eine diagnostische Überprüfung zur Trennung von Zeitabhängigkeit verursacht durch scheinbare Beziehungen, und Zeitabhängigkeit verursacht durch die oben beschriebenen Prozesse extrem schwierig, und ohne interpretierendes a priori Wissen kaum möglich ist. Bei der gewählten Vorgehensweise wird die Gefahr der Inklusion von Scheinvariablen jedoch dadurch minimiert, daß die Variablenselektion zeitinvariant, vor der Parametrisierung des Modells erfolgt und sich die Auswahl der Variablen bewußt auf die wesentlichen Determinanten des untersuchten Systems beschränkt.

Bei der Interpretation der Ursachen für den Anstieg der Regressionsgewichte der Variablen WBP78 seit Beginn der 50er Jahre (Abb. 7) ist zu berücksichtigen, daß angezeigte strukturelle Veränderungen durch verschiedene, konvergente Effekte erzeugt werden können:

- Generelle oder partielle Fehlspezifikation des modellierten Prozesses:
Hierunter wären das Auftreten neuer, im Modell nicht eingeschlossener externer Einflußfaktoren, sowie das Auftreten nichtlinearer, fälschlich linear spezifizierter Zusammenhänge zu subsumieren.
- Die ausgewählten Inputvektoren (Klimavariablen) sind einzeln oder in ihren zuwachsrelevanten Wechselwirkungen durch strukturelle Veränderungen gekennzeichnet:
Hier wären das Auftreten von Extremereignissen oder extremen Häufungen seltener Ereignisse (z.B. rasche Aufeinanderfolge extrem warmer und strenger Trockenzeiten) zu nennen.
- Der betrachtete Systemoutput (Radialzuwachs) kann veränderte Reaktionsweisen auf die Inputvariablen zeigen:
Veränderte Zuwachsreaktionen wären z.B. bei Schädigungen infolge des Überschreitens von elastischen Reaktionsschwellen zu erwarten.

Die Validierung des entwickelten Modells an regional breiter gestreutem Material kann neben der Überprüfung der räumlichen Konsistenz auch zur Klärung der Frage nach den Ursachen der beschriebenen strukturellen Veränderung beitragen.

3.3 Durchmesserzuwachs und Standraum bei Buchen

In der Abbildung 8 ist die Entwicklung des jährlich periodischen Durchmesserzuwachses ($id_{1,3}$) der Buchen getrennt nach numerischer Baumklasse (d_i/d_{100}) zum Zeitpunkt der letzten Aufnahme dargestellt. Der Durchmesserzuwachs ist in Millimeter pro Jahr über der jeweiligen Periodenmitte aufgetragen.

Die Durchmesserzuwachskurven der verschiedenen Baumkollektive verlaufen über den gesamten Beobachtungszeitraum nahezu gleichläufig. Auffällig dabei ist eine lang anhaltende Depression Mitte der 30er bis Mitte der 50er Jahre, die eng mit den extremen Trockenjahren 1934, 1945, 1947 und 1949 zusammenfällt (vgl. KAHLE et al., 1993). Im Vergleich der Kollektive zeigen stärkere Buchen im gesamten Beobachtungszeitraum ein deutlich höheres Zuwachsniveau als geringere Buchen. Außerdem deuten sich im zeitlichen Ablauf der Depression Reaktionsunterschiede zwischen den verschiedenen Baumkollektiven an.

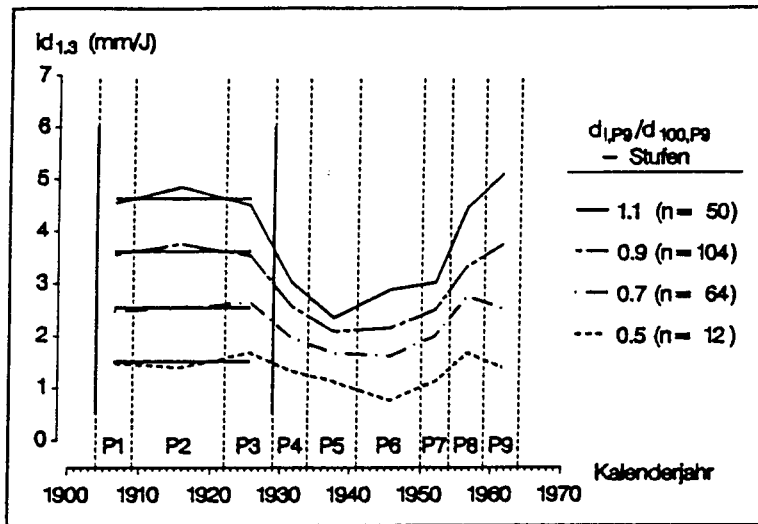


Abb. 8: Numerische Baumklasse, Durchmesserzuwachs und Zuwachsniveau von Buchen

Die Entwicklung des jährlich periodischen Durchmesserzuwachses ($id_{1,3}$) der Buchen ist getrennt nach numerischer Baumklasse (d_i/d_{100}) über den Periodenmitten dargestellt. Außerdem sind die mittleren Zuwachsniveaus der Baumkollektive in der Referenzperiode P1-P3 eingezeichnet. Die Durchmesserzuwachskurven der verschiedenen Baumkollektive verlaufen über den gesamten Beobachtungszeitraum nahezu gleichläufig und zeigen eine lang anhaltende Depression Mitte der 30er bis Mitte der 50er Jahre. Die stärkeren Buchen zeigen im Vergleich ein deutlich höheres Zuwachsniveau als geringere Buchen. Die Bestimmung des gruppenspezifischen relativen Zuwachstrends innerhalb der Depression wird über den durchschnittlichen Zuwachs in der Referenzperiode P1-P3 vor Eintritt der Depression hergeleitet.

In der Abbildung 9 sind die jährlich periodischen Durchmesserzuwächse (Index $id_{1,3}$, mittelwertzentriert und varianzstandardisiert) der Buchen nach numerischer Baumklasse (d_i/d_{100}) getrennt dargestellt, um damit Reaktionsunterschiede zwischen den Baumkollektiven zu verdeutlichen.

Die indextierten Durchmesserzuwächse zeigen über den T-Test gesicherte Reaktionsunterschiede zwischen den verschiedenen Baumkollektiven im Verlaufe der Depression auf. Die stärkeren Buchen reagieren demnach in dieser wachstumsungünstigen Zeit sensibler als geringere Buchen. Sie brechen zu Beginn der Depression im Durchmesserzuwachs stärker als geringere Buchen ein, erholen sich aber wieder deutlich schneller als diese.

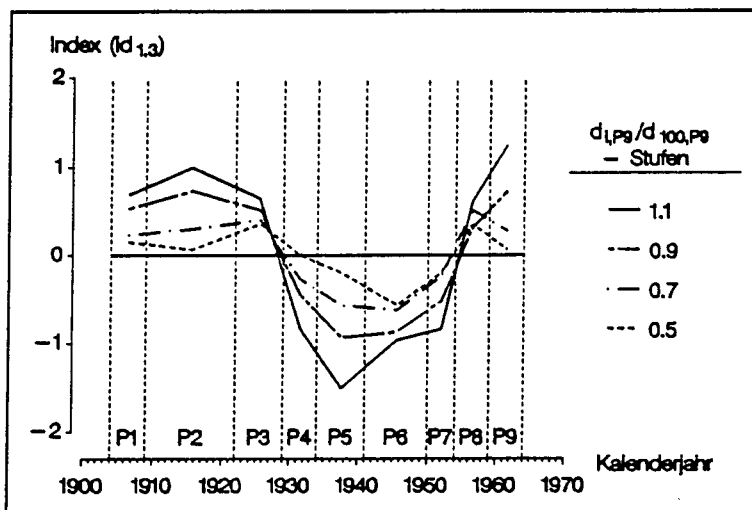


Abb. 9: Numerische Baumklasse und Durchmesserzuwachs von Buchen

Die Entwicklung des jährlich periodischen Durchmesserzuwachses (Index $id_{1,3}$, mittelwertzentriert und varianzstandardisiert) der Buchen ist getrennt nach numerischer Baumklasse (d_i/d_{100}) über den Periodenmitten dargestellt. Die indextierten Durchmesserzuwächse zeigen gesicherte Reaktionsunterschiede zwischen den verschiedenen Baumkollektiven im Verlaufe der Depression auf. Die stärkeren Buchen brechen zu Beginn der Depression im Durchmesserzuwachs stärker als geringere Buchen ein, erholen sich im weiteren Verlauf aber wieder deutlich schneller als diese.

Zur Quantifizierung dieser Zuwachsreaktionen wird der durchschnittliche Durchmesserzuwachs in der Referenzperiode P1-P3 vor Eintritt der Depression bestimmt (Abb. 8). Um die vorhandenen Niveauunterschiede zwischen den Baumkollektiven zu eliminieren, werden die jährlich periodischen Durchmesserzuwächse in Relation zu ihrem gruppenspezifischen Zuwachsniveau in der Referenzperiode gesetzt. Die errechneten prozentualen Abweichungen vom Zuwachsniveau zeigen den relativen Zuwachstrend ($id_{1,3}$ %) der Baumkollektive auf (vgl. VIRO, 1950; ABETZ et al., 1964 und PRETZSCH & UTSCHIG, 1989).

In der Abbildung 10 ist die Entwicklung des relativen Zuwachstrends der Buchen getrennt nach numerischer Baumklasse dargestellt.

Der Vergleich der stärksten mit den schwächsten Buchen des Gesamtkollektives zeigt, daß die stärksten Buchen zu Beginn der Depression im Durchmesserzuwachs mit 50 % nahezu doppelt so stark einbrechen. Im weiteren Verlauf der Depression erholen sich diese dann allerdings deutlich schneller. Im Gegensatz zu den stärksten zeigen die schwächsten Buchen einen länger anhaltenden Zuwachseinbruch, der mit 50 % letztendlich aber gleich stark ausgeprägt ist. Mit Beginn des Zuwachsanstieges beider Baumkollektive sind keine wesentlichen Unterschiede in der Reaktion mehr zu erkennen.

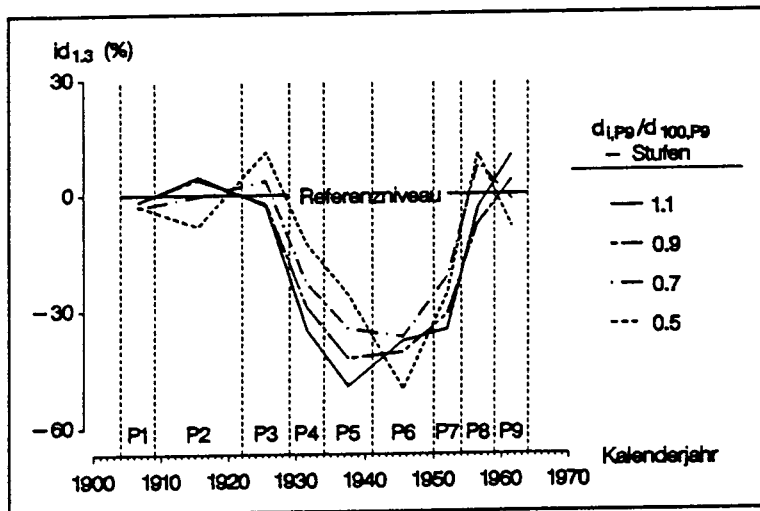


Abb. 10: Numerische Baumklasse, Durchmesserzuwachs und relativer Zuwachstrend von Buchen
Die Entwicklung des relativen Zuwachstrends ($id_{1,3}$ %) der Buchen ist getrennt nach numerischer Baumklasse (d_i/d_{100}) über den Periodenmitteln dargestellt. Die prozentualen Abweichungen vom Zuwachsniveau in der Referenzperiode P1-P3 zeigen deutliche Reaktionsunterschiede zwischen den verschiedenen Baumkollektiven im Verlaufe der Depression auf. Die stärksten Buchen brechen zu Beginn der Depression im Durchmesserzuwachs mit 50 % nahezu doppelt so stark ein als die schwächsten Buchen und erholen sich im weiteren Verlauf zunächst deutlich schneller als diese. Die schwächsten Buchen zeigen einen länger anhaltenden Zuwachseinbruch, der letztendlich mit 50 % aber gleich stark ausgeprägt ist.

4. LITERATUR

- ABETZ P, MERKEL O & SCHAIRER E 1964: Düngungsversuche in Fichtenbeständen Südbadens. AFJZ 135, 247-262.
- BLASING TJ, DUVICK DN & WEST DC 1981: Dendroclimatic calibration and verification using regionally averaged and single station precipitation data. Tree-Ring Bulletin 41, 37-43.
- BOX GEP & JENKINS GM 1970: Time series analysis - forecasting and control. San Francisco: Holden-Day. 553 S.
- EISENKOLB R 1963: Der Staatswald Todtmoos. Schriftenreihe der Landesforstverwaltung Baden-Württemberg 15, 103 S.
- GAUSS™ 1994: GAUSS Applications - Time Series, APTECH Systems, Inc., Maple Valley.
- GIESECKE J & MEYER H 1984: Einfluß der Topographie auf den Gebietsniederschlag. Wasserwirtschaft 74, 8-11.

- GROSS K & PHAM-NGUYEN T 1987: Einfluß von langfristigem konstanten Wassermangelstreß auf die Netto-Photosynthese und das Wachstum junger Fichten (*Picea abies* [L.] Karst) und Douglasien (*Pseudotsuga menziesii* [Mirb.] Franco) im Freiland. FwCbl 106, 7-26.
- GUIOT J 1986: ARMA techniques for modelling tree-ring response to climate and for reconstructing variations of paleoclimates. Ecological Modelling 33, 149-171.
- HARVEY AC 1984: A unified view of statistical forecasting procedures. Journal of Forecasting 3, 245-275.
- HARVEY AC 1989: Forecasting, structural time series models and the Kalman filter. Cambridge: Press Syndicate of the University of Cambridge. 554 S.
- HARVEY AC, HENRY SGB, PETERS S & WREN-LEWIS S 1986: Stochastic trends in dynamic regression models: an application to the employment-output equation. The Economic Journal 96, 975-985.
- INNES JL & COOK ER 1989: Tree-ring analysis as an aid to evaluating the effects of pollution on tree growth. Canadian Journal of Forest Research 19, 1174-1189.
- KAHLE HP 1993: Witterungssignale im Zuwachs von Fichten (*Picea abies* [L.] Karst.) aus montanen Lagen des Schwarzwaldes. In: KREIENBROCK L & KUBLIN E (Internationale Biometrische Gesellschaft, Deutsche Region) (Hrsg): Tagungsberichte der Arbeitsgruppe Biometrie in der Ökologie. 5. Herbstkolloquium über Biometrie und Ökologie in Braunschweig, 4, 127-135.
- KAHLE HP, HAHN D & SPIECKER H 1993: Witterungsverlauf und Wachstum von Fichten, Tannen und Buchen in Südwestdeutschland unter besonderer Berücksichtigung des Standorts und des Standraums. KfK-PEF 104, 241-252.
- KÖNIG C & MAYER H 1990: Probleme bei der waldschadensorientierten Klimastatistik. Bayerisches Landwirtschaftliches Jahrbuch 67, Sonderheft 1, 29-32.
- LaMARCHE VC Jr 1974: Frequency-dependent relationships between tree-ring series along an ecological gradient and some dendroclimatic implications. Tree-Ring Bulletin 34, 1-20.
- PETERS K, JACOBY GC & COOK ER 1981: Principal components analysis of tree-ring sites. Tree-Ring Bulletin 41, 1-19.
- PRETZSCH H & UTSCHIG H 1989: Das "Zuwachstrend-Verfahren" für die Abschätzung krankheitsbedingter Zuwachsverluste auf den Fichten- und Kiefern-Weiserflächen in den bayerischen Schadgebieten. Forstarchiv 60, 188-193.
- SCHÖNWIESE CD & MALCHER J 1990: Globale Statistik langer Temperatur- und Niederschlagsreihen. Ber. Inst. für Meteorologie u. Geophysik Univ. Frankfurt/Main 65, 301 S.; 2., erw. Aufl. Frankfurt/Main: Eigenverlag des Instituts.
- SCHRÖDTER H 1985: Verdunstung - Anwendungsorientierte Meßverfahren und Bestimmungsmethoden. Berlin: Springer-Verlag. 186 S.
- SPIECKER H 1991: Zusammenhänge zwischen Waldwachstum und der Variation von Klima und Witterung auf langfristig beobachteten Versuchsflächen in Baden-Württemberg. KfK-PEF 80, 377-386.
- SPIECKER H 1992: Witterungsverlauf und Wachstum von Fichten und Tannen im Schwarzwald. KfK-PEF 94, 321-330.
- THORNTHWAITE CW & MATHER JR 1957: Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. In: Drexel Institute of Technology - Laboratory of Climatology: Publ. in Climatology 10, No. 3. 308 S. Centerton, New Jersey.
- VAN DEUSEN PC 1987: Some applications of the Kalman filter to tree-ring analysis. In: JACOBY GC & HORNBECK JW (eds): Proceedings of the International Symposium on Ecological Aspects of Tree-Ring Analysis. United States Department of Energy CONF-8608144, 566-578.
- VAN DEUSEN PC 1989: A model-based approach to tree ring analysis. Biometrics 45, 763-779.
- VAN DEUSEN PC 1991: Popular formulations for modeling tree rings from climate: a unifying approach. Journal of Environmental Quality 20, 823-827.
- VAN DEUSEN PC 1993: Users Manual: DYNACLIM Version 3.2. Institute for Quantitative Studies, Southern Forest Experiment Station, USDA Forest Service, New Orleans. 28 S.
- VIRO PJ 1950: Fertilization trials on forest soil. Commun. Inst. For. Fenn. 37, 1-23.
- VISSER H 1986: Analysis of tree-ring data using the Kalman filter technique. IAWA Bulletin 7, 289-297.
- VISSER H & MOLENAAR J 1988: Kalman filter analysis in dendroclimatology. Biometrics 44, 929-940.
- VISSER H & MOLENAAR J 1990: Estimating trends in tree-ring data. Forest Science 36, 87-100.
- VOLK K 1968: Über die Sturmschäden in Südbaden. AFJZ 139, 45-56.
- YUE C 1993: Untersuchung des Baumzuwachses mit Longitudinaldaten-Analyse. Promotionskolloquium, Univ. Freiburg i. Br..