

## Zur Elastizität des Radialzuwachses in Abhängigkeit von Baumart, Baumalter und Standort

Hans-Peter Kahle  
Institut für Waldwachstum, Albert-Ludwigs Universität Freiburg

### Abstract:

#### Elasticity of radial growth in relation to tree species, tree age, and site conditions

In biological systems elasticity is defined as the rate at which a system returns to a reference state following perturbation. Systems with low elasticity may never recover to their original state and are readily converted to a new state. Systems that maintain their properties despite disturbance and that return rapidly to their original state exhibit more stable and predictable ecosystem properties. Knowledge on these properties allows us to assess the sensitivity of tree growth processes to change.

Elasticity of tree radial growth is assessed by applying the method of superimposed epoch analysis (SEA) to tree-ring data. SEA has been applied to detrended radial increment indices. For standardization of the annual radial increment series smoothing cubic splines have been used, with their stiffness defined in the frequency domain. Elasticity of radial growth is compared among Norway spruce (*Picea abies*), silver fir (*Abies alba*), and common beech (*Fagus sylvatica*), for Norway spruce trees of different age, and for Norway spruce trees from different growth regions in south-western Germany.

### 1. Problemstellung

Bereits in früheren Zuwachsuntersuchungen konnte gezeigt werden, dass nach einer störungsbedingten negativen Auslenkung des Dickenwachstums von Fichten mehrere Jahre vergehen können, bis die ausgelöste Reaktion vollständig abgeklungen ist und sich die Radialzuwächse wieder auf einem Referenzniveau eingependelt haben (SPIECKER 1986, 1991, KAHLE und SPIECKER 1996a, 1996b). Diese über mehrere Jahre nachweisbare Wirkung kann als zeitverzögerter Effekt, Nachwirkungseffekt oder auch als Ausdruck einer sukzessiven modifikativen Anpassung des Dickenwachstums der Bäume an sich kontinuierlich verändernde Umweltbedingungen interpretiert werden (KAHLE *et al.* 1996a, 2004).

In der hier vorgestellten Studie wird das üblicherweise auf der Ebene von Ökosystemen angewendete Verhaltenskonzept der Elastizität auf den Prozess des Dickenwachstums von Waldbäumen übertragen. Es wird versucht anhand der Radialzuwachszeitreihen von Fichten, Tannen und Buchen von ausgewählten Standorten in Südwestdeutschland die Elastizitätseigenschaften herauszuarbeiten, und darauf aufbauend die Sensitivität und Anpassungsfähigkeit der jeweiligen Kollektive gegenüber Umweltveränderungen einzuschätzen.

Elastizität wird in der Ökologie definiert als die Rate mit welcher ein biologisches System nach einer störungsbedingten Auslenkung zu einem Referenzzustand zurückkehrt (z.B. SCHULZE *et al.* 2002). Systeme mit geringer Elastizität kehren unter bestimmten Bedingungen nicht zu ihrem Ausgangszustand zurück, sondern zeigen eine Verlagerung hin zu einem neuen Systemzustand. Systeme welche ihre Eigenschaften trotz Störeinflüssen aufrechterhalten, also resistent gegenüber Änderungen sind, und die rasch zu ihrem Ausgangszustand zurückkehren, also elastisch reagieren, weisen stabilere und prognostizierbare Systemzustände auf (CHAPIN *et al.* 2002).

Unter der Voraussetzung, dass sich für ein biologisches System ein typischer Referenzzustand definieren lässt, ist es folglich möglich, aufgrund dieser Verhaltenseigenschaften die Sensitivität von Wachstumsprozessen gegenüber Umweltveränderungen einzuschätzen (vgl. CHAPIN *et al.* 2002). Dabei ist zu berücksichtigen, dass der jeweilige Systemzustand und die ihn bestimmenden Prozesse in komplexen Systemen über mehrere zeitliche Skalenebenen hinweg sowohl von den aktuellen Umweltbedingungen als auch von vergangenen Umwelteinflüssen abhängig sind (O'NEILL 1988, PATTEN *et al.* 2002). Im Gegensatz zu physikalischen Systemen sind darüber hinaus folgende Eigenschaften charakteristisch für das Reaktionsverhalten von biologischen Systemen: Zeitabhängigkeit, Reparaturmechanismen und Anpassungsleistungen (HOLLAND 1992, SCHULZE *et al.* 2002).

In der vorgelegten Studie soll untersucht werden, ob sich der zeitliche Verlauf des Radialzuwachses von Waldbäumen nach einer störungsbedingten negativen Auslenkung als eine elastische Wachstumsreaktion darstellen lässt. Ein geeigneter methodischer Ansatz zur Untersuchung dieser Fragestellung wird in der *Superposed Epoch Analysis* gesehen (vgl. LOUGH und FRITTS 1987, ORWIG und ABRAMS 1997). Da in der Untersuchung weder quantitative noch qualitative Informationen über typische exogene Störungen des Baumwachstums wie z.B. Trockenheit, Frost, und Schädlingsbefall verwendet werden und damit auch keine Information über die Impulsintensität vorliegt, wird vereinfachend angenommen, dass eine direkte Proportionalität zwischen Reaktions- und Belastungsintensität besteht.

Darauf aufbauend werden im Einzelnen die folgenden Hypothesen geprüft:

- innerhalb eines bestimmten Reaktionsbereichs des Dickenwachstums (Elastizitätsbereich) besteht eine lineare und direkte Proportionalität zwischen Belastungs- bzw. Reaktionsintensität und Reaktionsdauer (Erholzeit) des Baumes;
- bei Überschreitung der Elastizitätsgrenze verändert sich die lineare Proportionalität zwischen Reaktionsintensität und Reaktionsdauer (plastischer Reaktionsbereich);
- die Elastizitätseigenschaften des Dickenwachstums sind artspezifisch;
- die Elastizitätseigenschaften des Dickenwachstums sind zwischen Baumaltersgruppen und zwischen Standorten bzw. Wuchsgebieten verschieden.

## 2. Begriffe

Einige Begriffe die in diesem Beitrag verwendet werden sind in der Literatur nicht, oder nicht einheitlich definiert, weshalb im Folgenden eine Begriffsbestimmung erfolgt:

Elastische Reaktion: Elastizität bezeichnet die Rate mit welcher ein biologisches System nach einer störungsbedingten Auslenkung zu einem Referenzzustand zurückkehrt (engl.: *resilience*) (CHAPIN *et al.* 2002).

Plastische Reaktion: Überschreitet eine Belastung die Elastizitätsgrenze kehrt das System nicht mehr zu dem (ursprünglichen) Referenzzustand zurück, sondern organisiert sich zu einem neuen Systemzustand.

Sensitivität: Sensitivität bezeichnet die Reizschwelle eines biologischen Systems gegenüber Umwelteinwirkungen. Überschreitet die Impulsmenge (bestimmt durch Intensität, Andauer, Wiederkehr) den Schwellenwert, wird eine Systemauslenkung/-reaktion ausgelöst.

Mittlere Wiederkehrzeit (engl.: *mean return interval*, mRI): Kehrwert der Auftretenshäufigkeit. Z.B. entspricht bei einer 100 Jahre langen Zeitreihe der Auftretenshäufigkeit von 5 % eine mittlere Wiederkehrzeit von 20 Jahren.

## 3. Untersuchungsmaterial

Die Bearbeitung der eingangs formulierten Fragstellungen stellt an das Untersuchungsmaterial folgende Anforderungen:

- um für die Auswertung eine ausreichende Anzahl von Fällen (hier extreme negative Auslenkungen) auswählen zu können, sollten die Zeitreihen möglichst lang sein;
- für den Baumartenvergleich sollen Zuwachsdaten von Bäumen verschiedener Arten verwendet werden, die unter denselben Umweltbedingungen erwachsen sind (gleicher Standort, gleicher Bestand);
- für den Altersvergleich sollen Zuwachsdaten verschieden alter Baumkollektive die unter sonst gleichen Umweltbedingungen erwachsen sind verwendet werden;
- für den Standorts- bzw. Wuchsgebietsvergleich sollen Zuwachsdaten von Baumkollektiven aus verschiedenen Wuchsgebieten aber gleichen Alters, und die unter sonst gleichen Umweltbedingungen erwachsen sind, verwendet werden.

Bei dem verwendeten Material handelt es sich um Daten von Untersuchungsbäumen die in verschiedenen Forschungsprojekten in Baden-Württemberg erhoben wurden.

Die Zuwachsdaten aus den Immissionsökologischen Waldzustandserhebungen (IWE) der Jahre 1983 und 1988 wurden von der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg zur Verfügung gestellt. Die IWE-Untersuchungsbäume wurden auf der Grundlage eines systematischen, das ganze Bundesland abdeckende 4 km x 4 km Stichprobenetz gewonnen (vgl. EVERS und SCHÖPFER 1988, HILDEBRAND *et al.* 1993, SCHÖPFER *et al.* 1994).

Die anderen verwendeten Zuwachsdaten entstammen Fallstudien, (i) einer abgeschlossenen Untersuchung im Rahmen eines EU-Forschungsprojekts (Datensätze: BSTW und BMTW) (MÄKINEN *et al.* 2002, 2003), sowie (ii) einer laufenden Untersuchung am Institut für Waldwachstum zu den Auswirkungen der Hitze und Dürre im Sommer des Jahres 2003 auf das Baumwachstum (Datensatz: I/23, Stadtwald Freiburg, Dist I/Abt. 23) (KAHLE 2005, in Vorbereitung). Kennzeichnend für die Daten der Fallstudien ist, dass die Untersuchungsbäume auf gleichen Standorteinheiten in benachbarten Beständen (bei i) oder aus demselben Bestand (bei ii) in der submontanen Höhenstufe, aus einer Höhenlage von ~700 m üNN am Westabfall des Schwarzwalds ausgewählt wurden.

Bei den Untersuchungsbäumen handelt es sich um vorherrschende bis herrschende Bestandesbäume ohne äußerlich erkennbare Verletzungen oder Schäden. Die Zuwachsdaten wurden retrospektiv über Stammanalysen erhoben. Die ausgewerteten jährlichen Radialzuwächse beziehen sich auf Brusthöhe (Messhöhe: 1.3 m) und stellen jeweils den quadratischen Mittelwert aus der Messung entlang von 8, auf den Stammscheiben einheitlich orientierten Messradien, dar.

#### 4. Untersuchungsmethoden

##### 4.1 Trendbereinigung der Radialzuwachsreihen

Radialzuwachszeitreihen sind in der Regel durch Schwankungen gekennzeichnet die sich über ein breites Frequenzspektrum erstrecken; zwischen hochfrequenten jährlichen Ausschlägen über mittelfristige periodische Oszillationen bis zu niederfrequenten langfristigen Trends. Für die Trendbereinigung werden vor allem mittel- und langfristige Niveauveränderungen in den Radialzuwachsreihen durch geeignete Trendfunktionen approximiert (Abbildung 1). Die Quotienten aus den Beobachtungswerten (Radialzuwachsreihen) und den geschätzten Trendwerten werden als trendbereinigte „Indexwerte“ bezeichnet; diese sind im Idealfall mittelwert- und varianzstationär (COOK 1990). Je nach Fragestellung werden für die Standardisierung von Radialzuwachsreihen mehr flexible oder mehr steife Funktionstypen bevorzugt (BRIFFA *et al.* 1987).

In dieser Studie wurden zur Trendbereinigung kubische Spline-Funktionen mit einer 50%-Frequenzschwelle (engl.: *frequency-cutoff*) von 30 Jahren verwendet (VAN DEUSEN und REAMS 1993). Im Vergleich zu anderen Funktionstypen weisen Splines dieser Formulierung eine mittlere Flexibilität auf. Die Glättungseigenschaft der Trendfunktion wurde so gewählt, dass in den abgeleiteten Indexwerten ein großer Teil der Schwankungskomponenten mittlerer Periodenlänge erhalten bleibt, andererseits aber langfristige Niveauveränderungen so weit eliminiert werden, dass innerhalb von Zeitfenstern deren Länge der charakteristischen Reaktionszeit von Radialzuwachsen entspricht Mittelwertstationarität erreicht wird.

Anhand der Periodogrammdarstellungen zum Beispieldatensatz I/23 (Abbildung 2) wird deutlich, dass das gewählte Trendbereinigungsverfahren zu einer starken Dämpfung der sehr niederfrequenten langfristigen Schwankungskomponenten im Frequenzbereich  $f < 0.04$  1/Jahr (entsprechend einer Periodenlänge  $T$  ( $T = 1/f$ ) von  $> 25$  Jahren) führt. Mittel- ( $3 \text{ Jahre} \leq T < \sim 10 \text{ Jahre}$ ) und hochfrequente ( $1 \text{ Jahr} \leq T \leq 2 \text{ Jahre}$ ) Schwankungen bleiben dagegen erhalten und werden tendenziell sogar verstärkt.

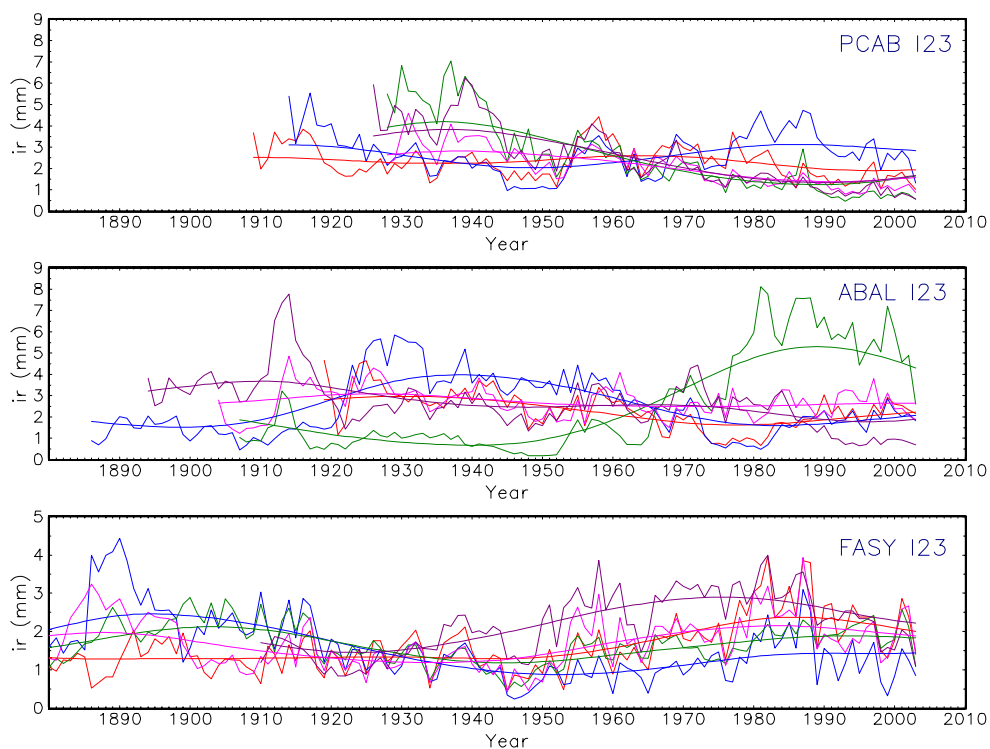


Abbildung 1: Einzelbaumweise Radialzuwachsreihen (zackige Kurven) und dazugehörige Trendkurven (gestreckte Kurven, kubische Spline-Funktionen mit 50%-Frequency-Cutoff von 30 Jahren) dargestellt am Beispiel von Fichten (PCAB, oben), Tannen (ABAL, Mitte) und Buchen (FASY, unten) aus dem Stadtwald Freiburg (Dist. I/Abt. 23) (jeweils 5 Untersuchungsbäume). Alle Untersuchungsbäume stammen aus demselben Mischbestand.

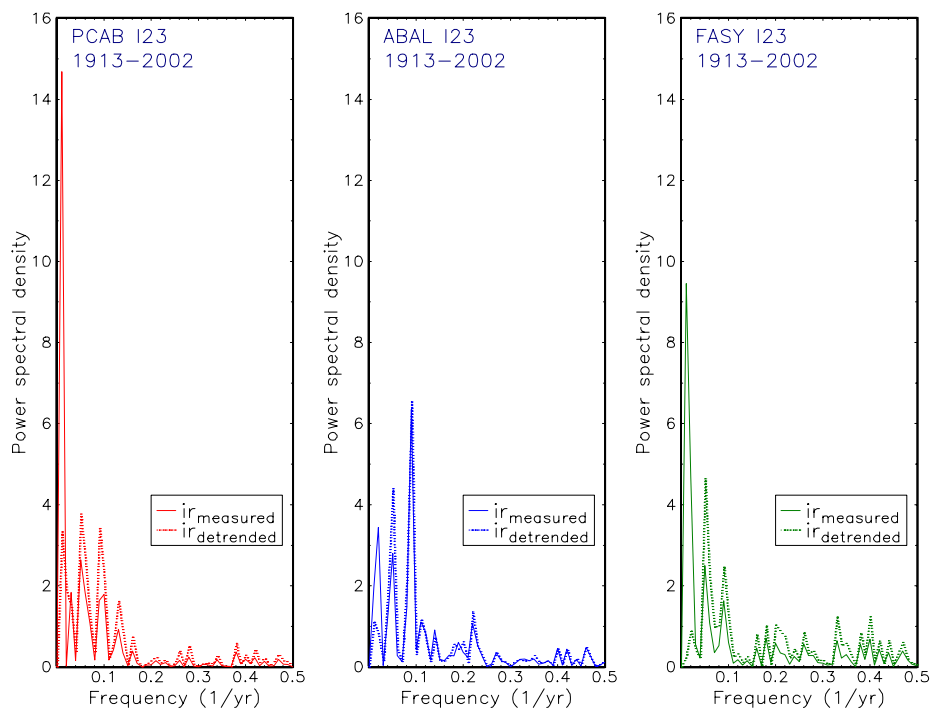


Abbildung 2: Vergleich der Frequenzeigenschaften von Radialzuwachsreihen ( $ir_{measureds}$  durchgezogen) und der entsprechenden trendbereinigten Indexreihen ( $ir_{detrendeds}$  gepunktet) anhand der Periodogramme der beispielhaft ausgewählten Fichten (PCAB, links), Tannen (ABAL, Mitte) und Buchen (FASY, rechts) aus dem Stadtwald Freiburg (Dist. I/Abt. 23). Grundlage für die Periodogrammanalyse ist jeweils die aus 5 Untersuchungsbäumen gemittelte Zeitreihe.

## 4.2 Normierung der Radialzuwachs- und Indexreihen

In Abbildung 3 sind am Beispiel des Datensatzes I/23 die relativen Häufigkeitsverteilungen der Radialzuwachsreihen und der (trendbereinigten) Indexreihen vergleichend gegenübergestellt. Aus Gründen der Vergleichbarkeit wurden beide Variablen vor der Histogrammberechnung auf einen Mittelwert von 0 und eine Standardabweichung (SD) von 1 normiert. Für die gezeigten Beispiele sind die Häufigkeitsverteilungen der (trendbereinigten) Indexwerte weniger rechtsschief als die der Radialzuwachsreihen und nähern sich stärker einer symmetrischen Verteilung an.

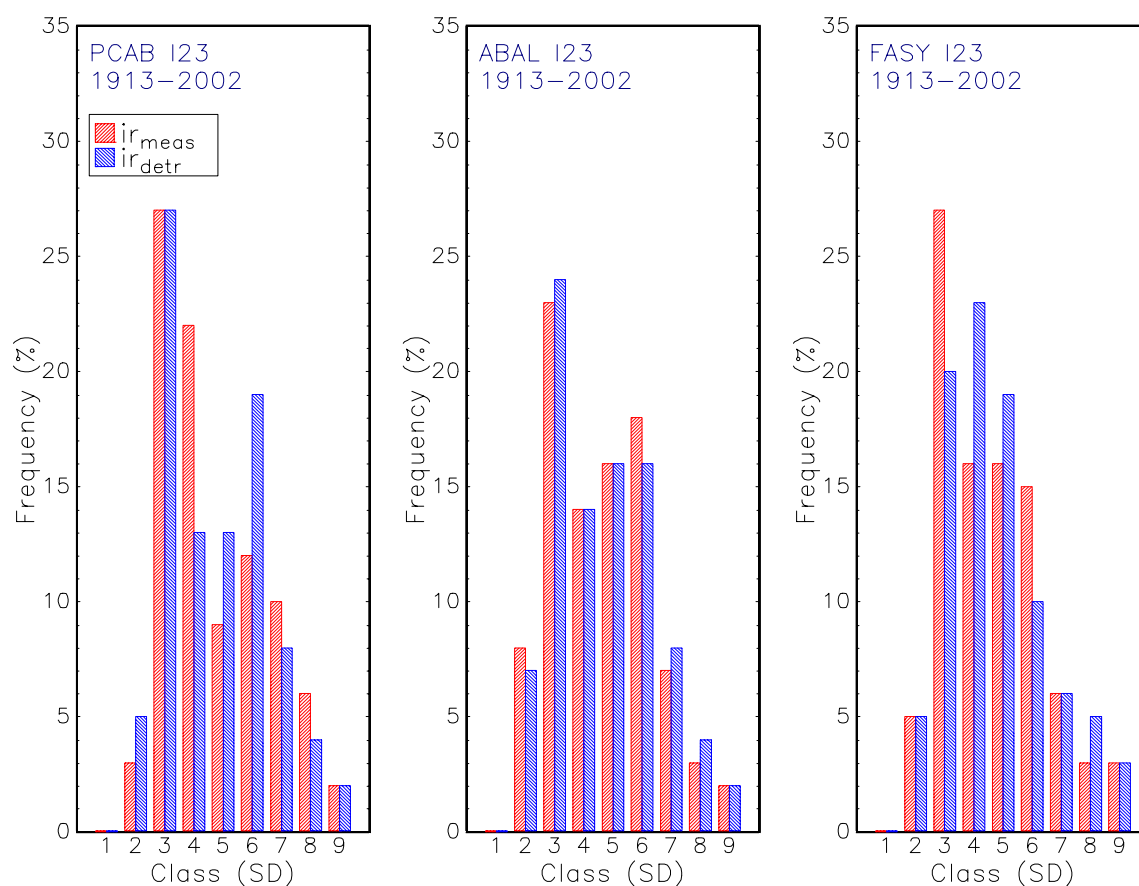


Abbildung 3: Vergleich der relativen Häufigkeitsverteilungen der Radialzuwachsreihen ( $ir_{meas}$ ) und der dazugehörigen trendbereinigten Indexreihen ( $ir_{detr}$ ) von Fichten (PCAB, links), Tannen (ABAL, Mitte) und Buchen (FASY, rechts) aus dem Stadtwald Freiburg (Dist. I/Abt. 23) (jeweils Mittelwert von 5 Untersuchungsbäumen). Beide Variablen ( $ir_{meas}$  und  $ir_{detr}$ ) wurden normiert, d.h. weisen einen Mittelwert von 0 und eine Standardabweichung (SD) von 1 auf. Für die Histogrammberechnung wurden 9 äquidistante Klassen gebildet.

### 4.3 Superposed Epoch Analyse

Das im Folgenden beschriebene Verfahren der Zusammenfassung und Auswertung von nach einem bestimmten Kriterium ausgewählten Zeitreihenausschnitten, ohne Beachtung ihrer absoluten zeitlichen Einordnung, aber unter Berücksichtigung der relativen Lage in Bezug auf ein bestimmtes Ereignis, ist in der Literatur in allgemeiner Form als *Superposed Epoch Analysis* (SEA) beschrieben (z.B. LOUGH und FRITTS 1987, ORWIG und ABRAMS 1997).

Grundüberlegung der SEA-Anwendung in der vorgelegten Studie ist, dass über die Mittelung mehrerer ausgewählter Zeitreihenausschnitte relativ zu dem Ereignis „maximale negative Auslenkung“ jene Eigenschaften welche den in der Folge auftretenden Zuwachsverlauf charakterisieren verstärkt, Rauschen jedoch gedämpft, und Störsignale ausgemittelt und unterdrückt werden.

Die SEA-Auswertungen gehen von den Häufigkeitsverteilungen der normierten Indexreihen aus. Auf der Grundlage der relativen Häufigkeiten wurden in Abhängigkeit von der spezifischen Auswertung und in Abhängigkeit von der jeweiligen Länge der Zeitreihen z.B. die Klassen der 10%-, 20%- oder 30%-geringsten Werte ausgewählt und zu einer Auswertungseinheit zusammengefasst. Diesen Ereignisklassen lässt sich jeweils eine mittlere Wiederkehrzeit (mRI: *mean return interval*) zuordnen. So entspricht z.B. bei einer 100 Jahre langen Zeitreihe der Klasse der 10%-geringsten Werte (Klassenmittelwert = 5 %) eine mittlere Wiederkehrzeit des entsprechenden Ereignisses von 20 Jahren (=  $1/0.05 \cdot \text{Jahr}^{-1}$ ). Da mit der Länge der Zeitreihe die absolute Anzahl der Fälle in einer relativen Häufigkeitsklasse zunimmt, ist es bei langen Zeitreihen möglich, auch Klassen von selteneren Ereignissen zu definieren die noch mit einer für die anschließende statistische Auswertung ausreichenden Anzahl von Beobachtungen (Wiederholungen) belegt sind. Bei kürzeren Zeitreihen dagegen müssen die Klassen größer gewählt werden, um eine ausreichende Anzahl von Ereignisfällen in den Klassen zu erhalten.

Der Untersuchungshypothese entsprechend soll der Zuwachsverlauf nach der maximalen initialen negativen Auslenkung über eine bestimmte Anzahl von Jahren verfolgt werden, um festzustellen wie lange es dauert, bis der Radialzuwachs wieder auf das Referenzniveau zurückkehrt. Voruntersuchungen haben gezeigt, dass in den meisten Fällen 5- oder 6jährige Zeitfenster geeignet sind, den Reaktionsverlauf von der maximalen Auslenkung bis zum Erreichen des Referenzniveaus darzustellen und mit Regressionsmodellen nachzubilden (vgl. Abschnitt 4.4).

Es wurden nur solche Perioden ausgewählt und ausgewertet, in denen die initiale negative Auslenkung über die gesamte Reaktionsdauer hinweg auch tatsächlich das Minimum darstellt. Kam es also innerhalb des ausgewählten Zeitfensters zu einem Ereignis in dem der initiale Wert unterschritten wurde, wurde dieser Ausschnitt für die betreffende Auswertung verworfen.

### 4.4 Regressions- und Trendoberflächenanalyse

Für die nach dem oben beschriebenen SEA-Verfahren gebildeten Auswertungseinheiten wurde jeweils der mittlere Radialzuwachsverlauf berechnet und dieser mittels polynomialer Regression über der Zeit (bzw. Dauer) beschrieben. Zusätzlich wurde anhand einer multiplen Regressionsanalyse geprüft, ob eine signifikante Wechselwirkung zwischen Reaktionsintensität und Reaktionsdauer besteht. War diese der Fall, so wurde die einfaktorische Regression zu einer Trendoberflächenanalyse (vgl. BOX und DRAPER 1987) mit den zwei unabhängigen Variablen Zeit und Intensität sowie einem Interaktionsterm erweitert. Sämtliche Berechnungen wurden mit der Software GAUSS von Aptech Systems durchgeführt.

## 5. Ergebnisse

### 5.1 Elastizität des Radialzuwachses in Abhängigkeit von der Baumart

In Abbildung 4 ist der Verlauf des Radialzuwachses von Fichten, Tannen, und Buchen aus dem Stadtwald Freiburg in Abhängigkeit von der Reaktionsintensität (initiale negative Auslenkung) über der Zeit nach der initialen Auslenkung dargestellt. Anhand der Regressionsmodelle vergehen nach einer maximalen Auslenkung von minus 2.0 Standardabweichungen (SD) im Zeitraum 1897 bis 1995 bei Fichte im Mittel: 3.2 Jahre (= 100%), bei Tanne: 2.7 Jahre (= 84%) und bei Buche: 4.0 Jahre (= 125%) ehe der Radialzuwachs wieder das Referenzniveau erreicht. Bei einer Auslenkung von minus 1.0 SD verändern sich die Relationen wie folgt: Fichte: 100% (2.0 Jahre), Tanne: 65% (1.3 Jahre) und Buche: 80% (1.6 Jahre). Die Differenzen in der Elastizität des Radialzuwachses zwischen den Baumarten sind in Abbildung 5 dargestellt.

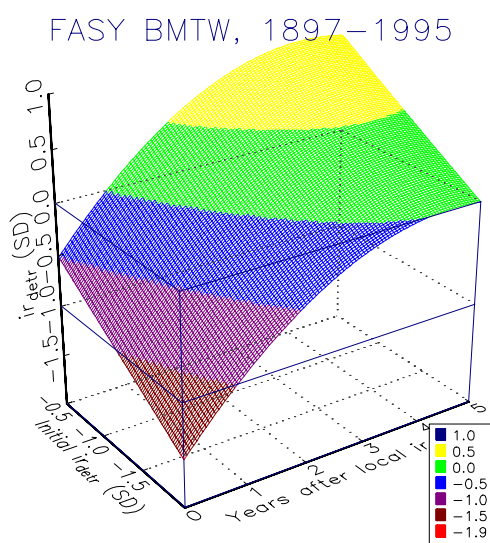
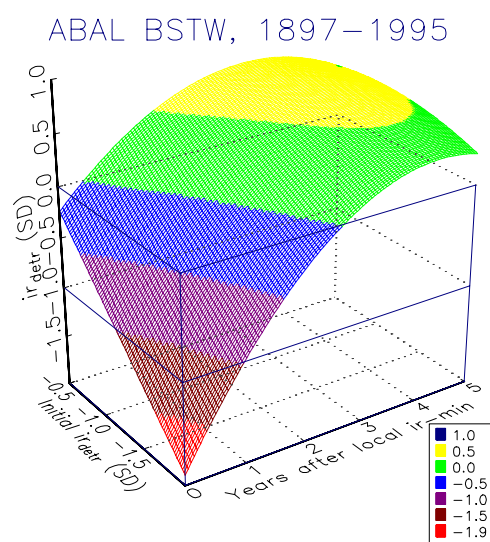
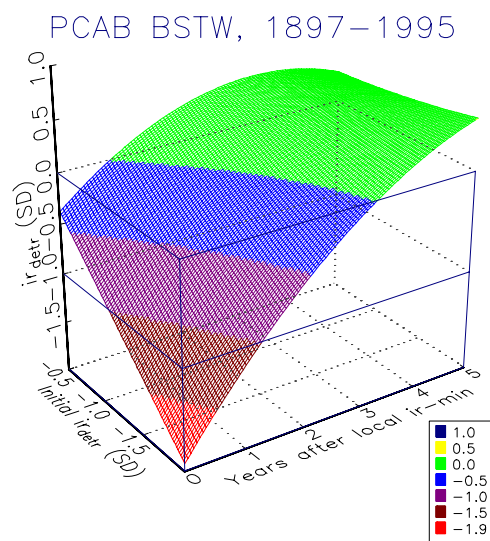


Abbildung 4: Elastizität des Radialzuwachses von Fichten (PCAB, oben), Tannen (ABAL, Mitte), und Buchen (FASY, unten). In den dreidimensionalen Abbildungen ist der zeitliche Verlauf der normierten Radialzuwachsindexwerte ( $ir_{detr}$ , Mittelwert  $x_{quer} = 0$ , Standardabweichung  $SD = 1$ ) in Abhängigkeit von der initialen Auslenkung (initial  $ir_{detr}$ : Auslenkung zum Zeitpunkt  $t_0$ ) dargestellt. Die Auswertungen beziehen sich auf den 99jährigen Zeitraum 1897 bis 1995. Die Trendoberflächen wurden mittels multipler polynomialer Regression berechnet.

In dem gezeigten Beispiel weist Tanne im Vergleich zu den anderen untersuchten Baumarten die größte Radialzuwachs-  
elastizität auf. Buche zeigt bei hoher Reaktionsintensität (z.B.  $-2.0$  SD) eine geringere Elastizität als Fichte, allerdings kehren sich die Verhältnisse bei geringerer Reaktionsintensität (z.B.  $-1.0$  SD) um: hier weist Buche ein elastischeres Verhalten auf.

## 5.2 Elastizität des Radialzuwachses in Abhängigkeit von Baumalter

Am Beispiel von Fichten (IWE-Daten) aus dem Wuchsgebiet Schwarzwald ist in Abbildung 6 der Verlauf des Radialzuwachses für drei Altergruppen und für zwei Reaktionsintensitätsklassen über der Zeit nach der initialen Auslenkung dargestellt.

In dem gezeigten Beispiel kehren bei höherer Reaktionsintensität ( $mRI$ : 15 Jahre) jüngere Fichten (Alter  $\leq 70$  Jahre) schneller zum Referenzniveau zurück als ältere Fichten. Die Dauer bis zum Erreichen des Referenzniveaus kann jedoch nicht direkt anhand der einfaktoriellen Regressionsmodelle abgelesen werden, da sich das mittlere Niveau der initialen negativen Auslenkung zwischen den Altersgruppen unterscheidet (Alter  $\leq 70$  Jahre:  $-1.53$  SD, Alter  $> 70$  Jahre:  $-1.75$  SD). Bei geringerer Reaktionsintensität ( $mRI$ : 5 Jahre) sind keine Unterschiede im Anstieg der Verlaufskurven zwischen den Altersgruppen erkennbar.

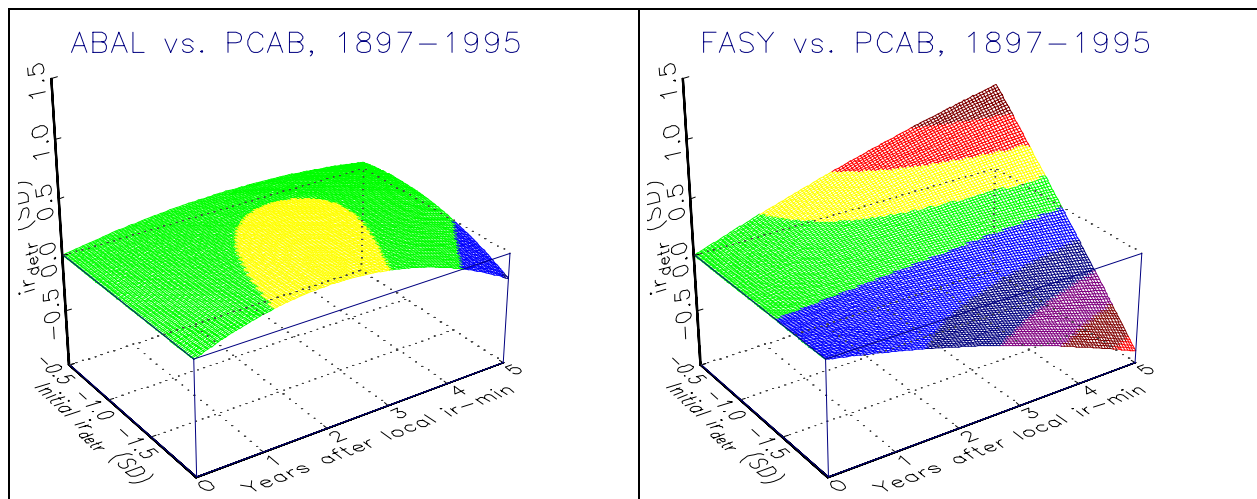


Abbildung 5: Differenzielle Elastizität des Radialzuwachses: Vergleich von Tannen (ABAL) im Vergleich zu Fichten (PCAB, links), und von Buchen (FASY) im Vergleich zu Fichten (rechts). Dargestellt sind die Differenzen der artspezifischen Elastizität (vergleiche Abbildung 4).

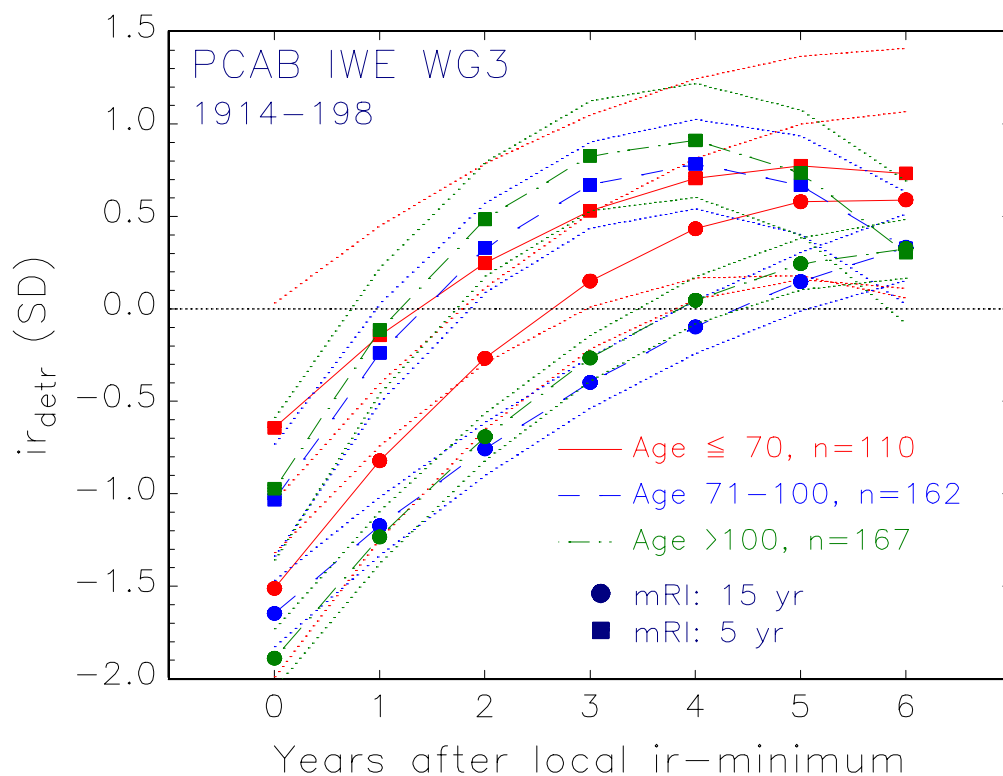


Abbildung 6: Vergleich der Elastizität des Radialzuwachses von Fichten (PCAB, IWE-Daten) aus dem Wuchsgebiet Schwarzwald (WG 3) für drei Altersgruppen anhand von zwei Reaktionsintensitätsklassen (*mRI* 5 yr: geringe Intensität, *mRI* 15 yr: hohe Intensität). Gepunktet: 95%-Vertrauensbereich der Regression. Die Auswertungen beziehen sich für alle drei Altersgruppen einheitlich auf den 75jährigen Zeitraum 1914 bis 1988.



### 5.3 Elastizität des Radialzuwachses in Abhängigkeit vom Standort

In Abbildung 7 ist der Verlauf des Radialzuwachses von Fichten (IWE-Daten) der Altersgruppe 70-100 Jahre aus den Wuchsgebieten Schwarzwald, Neckarland und Südwestdeutsches Alpenvorland für Auslenkungen mit einer mittleren Wiederkehrzeit von 10 Jahren über der Zeit nach der initialen Auslenkung dargestellt. Im Vergleich zwischen den Wuchsgebieten ist das Klima in der submontanen Lage des Schwarzwaldes (400-800 m üNN) eher atlantisch geprägt, in den überwiegend kollinen Lagen des Neckarlandes und den submontanen Hochflächen des Südwestdeutschen Alpenvorlandes dagegen stärker kontinental. Bodenausgangsmaterial ist an den Schwarzwaldhängen vor allem Hangschutt aus überwiegend saurem Gestein, in den anderen Gebieten eher basisches Material (Keuper bzw. Moräne).

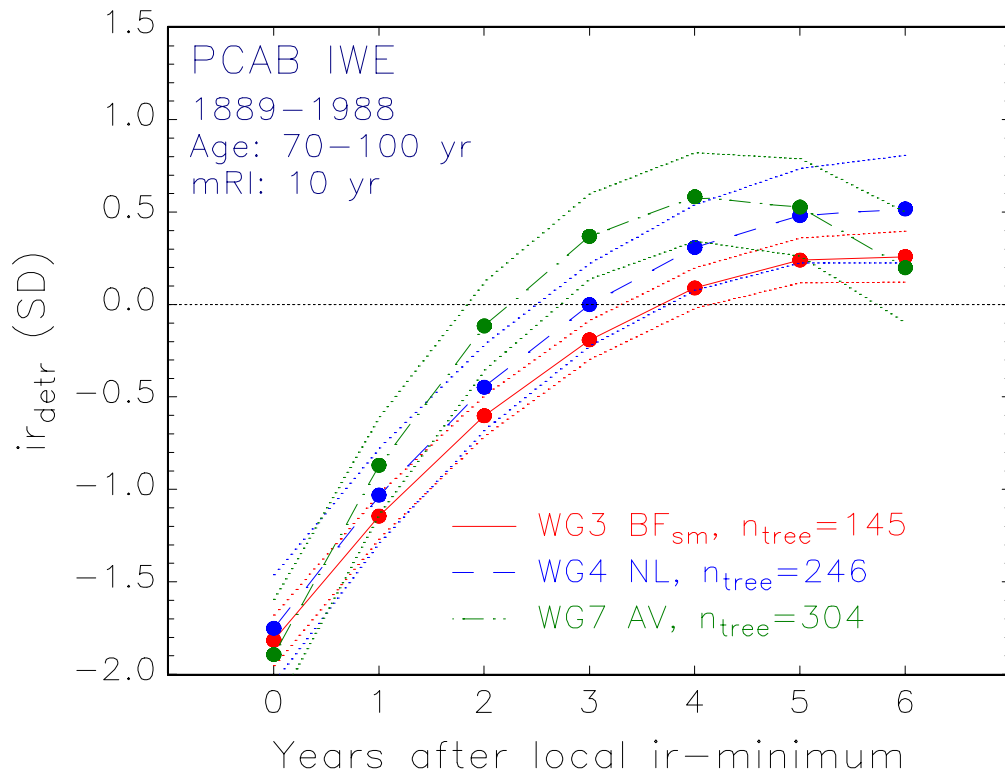


Abbildung 7: Vergleich der Elastizität des Radialzuwachses von Fichten (PCAB, IWE-Daten) der Altersgruppe 70-100 Jahre zwischen den Wuchsgebieten Schwarzwald (WG 3, nur submontane Höhenstufe), Neckarland (WG 4) und Südwestdeutsches Alpenvorland (WG 7). Gepunktet: 95%-Vertrauensbereich der Regression. Die Auswertungen beziehen sich für alle drei Gebiete auf die Reaktionsintensitätsklasse *mRI* von 10 Jahren und einheitlich auf den 100jährigen Zeitraum 1889 bis 1988.

Die zu den drei Wuchsgebieten korrespondierenden Kurven verlaufen in den ersten Jahren deutlich gestaffelt: bei gleicher Reaktionsintensität scheinen Fichten im Wuchsgebiet Südwestdeutsches Alpenvorland elastischer zu reagieren als die Fichten im Schwarzwald. Mit einer Dauer von 3 Jahren bis zum Erreichen des Referenzniveaus liegen die Fichten aus dem Wuchsgebiet Neckarland zwischen den beiden Vergleichsgebieten.

## 6. Diskussion

Kritische Diskussion des Materials:

Das Untersuchungsmaterial für diese Studie stammt sowohl aus systematischen, flächenrepräsentativen Erhebungen (Datensätze: IWE 1983 und 1988) als auch aus Fallstudien (Datensätze: BSTW und BMTW, und I/23). Die Anzahl an Beobachtungen (Untersuchungsbäumen) ist bei den IWE-Daten je nach Gruppierung teilweise um mehr als den Faktor 3 größer als bei den Fallstudien. Die Untersuchungen fanden zu unterschiedlichen Zeiten statt, so dass das Endjahr, und aufgrund der unterschiedlichen Alterszusammensetzung auch das erste Jahr und damit die zeitliche Abdeckung, verschieden sind. In allen Fällen wurden als Untersuchungsbäume jedoch nur vorherrschende bis herrschende Bestandesbäume ohne äußerlich erkennbare Verletzungen oder Schäden aufgenommen und stammanaly-

tisch nach demselben Verfahren vermessen. Trotz der Unterschiede in der Repräsentativität, im Umfang und in der Motivation der Erhebungen ist die Vergleichbarkeit der Daten zum jährlichen Radialzuwachs zwischen den verschiedenen Datensätzen damit weitgehend gewährleistet.

Kritische Diskussion der Methodik:

Für die in diesem Vorhaben formulierten Fragestellungen stellt die *Superposed Epoch Analysis* (SEA) einen geeigneten Auswertungsansatz dar. Das liegt vor allem darin begründet, dass dieses Verfahren gerade und im Besonderen auf autokorrelierte Daten und auf seltene Ereignisse bzw. Extremsituationen angewendet werden kann.

In der hier verwendeten Implementierung wurde jedoch für ein bestimmtes ausgewähltes Zeitfenster die Vorgeschichte nicht berücksichtigt. Das heißt, die Frage wurde nicht geprüft, ob mehrere kurz aufeinander folgende Belastungen multiplikativ oder über Wechselwirkungen zu einem anderen als additiven Systemverhalten führen. Da sich das Untersuchungsmaterial nur aus solchen Bäumen zusammensetzt die Belastungen in der Vergangenheit überlebt haben, sind die Möglichkeiten der Identifikation von Belastungsgrenzen bereits von der Materialeseite her eingeschränkt. Hinzu kommt, dass nur vorherrschende bis herrschende Bäume ausgewählt wurden. Daraus kann geschlossen werden, dass die Befunde vermutlich eine größere Vitalität widerspiegeln, als dies im Durchschnitt der Bestandesbäume zu erwarten wäre.

Die verwendeten Radialzuwachsmessreihen weisen mittelfristige Oszillationen und langfristige Trends auf und sind damit nicht mittelwertstationär (vgl. Abbildung 1). Das SEA-Verfahren impliziert jedoch, dass zumindest in dem untersuchten Zeitfenster ein Gleichgewichtszustand als Referenzzustand definiert werden kann. In dieser Studie wurden an die Radialzuwachsreihen deshalb kubische Spline-Funktionen mit mittlerer Steifigkeit angepasst, und auf diese Weise eine Trendbereinigung durchgeführt. Bei elastischeren Trendkurven als der hier verwendeten wäre der Zeitraum in dem ein Gleichgewichtszustand definiert werden kann kürzer ausgefallen, bei konservativeren Trendkurven wäre ein Ausgleich zur Mittelwertstationarität dagegen erst in einem noch längeren Zeitraum eingetreten. Die entsprechenden Auswirkungen auf die Einschätzung der Elastizität sind wie folgt: bei Trendbereinigung mit flexiblen Trendkurven wird die Elastizität höher eingeschätzt als mit Trendkurven größerer Steifigkeit. Die Gefahr einer starken Verzerrung der Elastizitätseinschätzung wird in der vorgelegten Studie jedoch als relativ gering eingeschätzt, da ein Trendmodell mittlerer Steifigkeit verwendet wurde.

Die Trendbereinigung auf der Grundlage der Quotienten-, und nicht Residuenbildung, entspricht einer logarithmischen Transformation der Zuwachssignale; was ohne weiteres biologisch plausibel erscheint. Andererseits können unter bestimmten Umständen extreme Zuwachsentwicklungen wie z.B. eine asymptotische Annäherung der Radialzuwächse an den Null-Wert durch die Trendausgleichskurve so weit abgefangen und abgepuffert werden, dass zum einen die wahre Belastungsintensität nicht mehr erkennbar wird, und zum anderen eine mögliche kontinuierliche Zuwachsabnahme nach der Trendkurvenanpassung als Gleichgewichtszustand fehlinterpretiert, und als vermeintliches Referenzniveau betrachtet wird. In der vorgelegten Studie wurde dieses Phänomen über grafische Kontrollen der Radialzuwachsreihen und Trendkurven überprüft.

Kritische Diskussion der Ergebnisse:

Die erzielten Ergebnisse haben überwiegend Beispielcharakter. Dies erklärt sich durch die starke methodische Ausrichtung der hier vorgestellten Studie. Zur Überprüfung der Allgemeingültigkeit der Befunde sind zu allen untersuchten Vergleichen weitere systematische Analysen sinnvoll und notwendig. So wäre es zum Beispiel interessant, anhand geeigneter Datensätze zu überprüfen, ob sich die festgestellten Artunterschiede in der Elastizität der Radialzuwächse auch in anderen Beständen bestätigen.

Die Ergebnisse derartiger Auswertungen eröffnen natürlich zahlreiche Möglichkeiten für weitergehende Analysen, z.B. in Bezug auf die Ursachenanalyse: Welche spezifischen Umweltbedingungen haben das betreffende Ereignis ausgelöst? Und: Ist die Elastizität je nach Schadfaktor unterschiedlich? Verändern sich die Elastizitätseigenschaften unabhängig vom Alter im Laufe der Zeit? Diese Fragen soll in zukünftigen Untersuchungen nachgegangen werden.

## 7. Schlussfolgerungen

Die vorgestellte Methodik zur Analyse von Zuwachsreaktionen ist geeignet zur Darstellung und quantitativen Analyse dynamischer Systemeigenschaften. Ein verbessertes Verständnis dynamischer Systemeigenschaften ist eine wichtige Grundlage für die Verbesserung der Vorhersagegüte von Wachstumsmodellen. Die Methode der *Superposed Epoch Analysis* (SEA) ist speziell dafür entwickelt, Wachstumsreaktion unter extremer Belastung zu untersuchen. SEA ist eine sehr datenintensive Auswertungsstrategie, bei der vor allem die Länge der Zeitreihen eine kritische Größe darstellt. Bei geeigneter Datenlage können jedoch Belastungsgrenzen eingeschätzt, und als Grundlage für die Beurteilung der Stabilität verwendet werden.

## 8. Danksagung

Die im Rahmen der Immissionsökologischen Waldzustandserhebung (IWE) der Jahre 1983 und 1988 erhobenen Zuwachsdaten wurden von der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt des Landes Baden-Württemberg zur Verfügung gestellt. Namentlich gedankt sei dafür den Herren Prof. Dr. Joachim Hradetzky und Dr. Gerald Kändler (beide FVA Baden-Württemberg). Ein besonderer Dank gilt auch dem Städtischen Forstamt Freiburg, namentlich den Herren Dr. Hans Burgbacher und Revierleiter Klaus-Peter Echle, für die Genehmigung im Stadtwald Freiburg (Dist. I/Abt. 23) Stammanalysen durchzuführen, und für die Unterstützung beim Einschlag der Untersuchungs-bäume.

## 9. Literaturverzeichnis

- BOX, G.E.P.; DRAPER, N.R.: Empirical Model-Building and Response-Surfaces. John Wiley and Sons, New York: 669 p., 1987
- BRIFFA, K.R.; WIGLEY, T.M.L.; JONES, P.D.: Towards an objective approach to standardization. In: KAIRIUKSTIS, L.A.; BEDNARZ, Z.; FELIKSIK, E. (Eds.), Methods of Dendrochronology - 1. Proceedings of the Task Force Meeting on Methodology of Dendrochronology, East/West Approaches, 2-6 June 1986, Krakow, Poland: 69-86, 1987
- CHAPIN, F.S.; MATSON, P.A.; MOONEY, H.A.: Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology. Springer-Verlag, New York: 436 p., 2002
- COOK, E.R.: A conceptual linear aggregate model for tree rings. In: COOK, E.R.; KAIRIUKSTIS, L.A. (Eds.), Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht: 98-104, 1990
- EVERS, F.H.; SCHÖPFER, W.: Darstellung der Ernährungs- und Belastungsverhältnisse der Fichte - Ergebnisse der Belastungsinventur Baden-Württemberg 1983. AFJZ 159: 146-154, 1988
- HILDEBRAND, E.E.; SCHÖPFER, W.; HANACK, C.; KUBLIN, E.; TREFZ-MALCHER, G.: Ergebnisse der Belastungsinventur Baden-Württemberg 1988 - Ernährung und Belastung von Fichte und Tanne - Dokumentation. Mitteilungen FVA Baden-Württemberg 172: 64, 1993
- HOLLAND, J.H.: Adaptation in Natural and Artificial Systems. MIT Press, Cambridge: 211 p., 1992
- KAHLE, H.P.; HANSEN, J.; SPIECKER, H.: A moving target: Forest growth in a changing environment - The role of long-term dynamics. European Forest Institute Proceedings 49: 31-40, 2004
- KAHLE, H.P.; SPIECKER, H.: Adaptability of radial growth of Norway spruce to climate variations: results of a site specific dendroecological study in high elevations of the Black Forest (Germany). Radiocarbon: 785-801, 1996a
- KAHLE, H.P.; SPIECKER, H.: Modelling growth-climate relationships of Norway spruces in high elevations of the Black Forest (Germany). European Forest Institute Proceedings 5: 205-220, 1996b
- LOUGH, J.M.; FRITTS, H.C.: An assessment of the possible effects of volcanic eruptions on North American climate using tree-ring data, 1602 to 1900 A.D. Climatic Change 10: 219-239, 1987.
- MÄKINEN, H., NÖJD, P.; KAHLE, H.P.; NEUMANN, U.; TVEITE, B.; MIELIKÄINEN, K.; RÖHLE, H.; SPIECKER, H.: Large-scale climatic variability and radial increment variation of *Picea abies* (L.) Karst. in central and northern Europe. Trees 17: 173-184, 2003
- MÄKINEN, H., NÖJD, P.; KAHLE, H.P.; NEUMANN, U.; TVEITE, B.; MIELIKÄINEN, K.; RÖHLE, H.; SPIECKER, H.: Radial growth variation of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) across latitudinal and altitudinal gradients in central and northern Europe. Forest Ecology and Management 171: 243-259, 2002
- O'NEILL, R.V.: Hierarchy theory and global change. In: ROSSWALL, T.; WOODMANSEE, R.G.; RISSER, P.G. (Eds.), Scales and Global Change: Spatial and Temporal Variability in Biospheric and Geospheric Processes. John Wiley and Sons, Chichester: 29-45, 1988
- ORWIG, D.A.; ABRAMS, M.D.: Variation in radial growth responses to drought among species, site, and canopy strata. Trees - Structure and Function 11: 474-484, 1997
- PATTEN, B.C., *et al.* (16 Co-Autoren): Complex adaptive hierarchical systems. In: COSTANZA, R.; JØRGENSEN, S.E. (Eds.), Understanding and Solving Environmental Problems in the 21st Century - Toward a New, Integrated Hard Problem Science. Elsevier, Oxford: 41-94, 2002
- SCHÖPFER, W.; HRADETZKY, J.; KUBLIN, E.: Wachstumsänderungen der Fichte in Baden-Württemberg. Forst und Holz 49: 633-644, 1994
- SCHULZE, E.D.; BECK, E.; MÜLLER-HOHENSTEIN, K. (Eds.): Pflanzenökologie. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg: 846 p., 2002
- SPIECKER, H.: Das Wachstum der Tannen und Fichten auf Plenterwald-Versuchsflächen des Schwarzwaldes in der Zeit von 1950 bis 1984. AFJZ 157: 152-164, 1986
- SPIECKER, H.: Growth variation and environmental stresses: Long-term observations on permanent research plots in Southwestern Germany. Water, Air, and Soil Pollution 54: 247-256, 1991
- VAN DEUSEN, P.C.; REAMS, G.A.: Frequency domain tree-ring standardization. Forest Science 39: 55-65, 1993