

Forschungsbericht KLIMOPASS

**Umweltveränderungen im Spiegel des
Wachstums der Hauptbaumarten:
Extraktion und Analyse des
umweltbedingten Wachstumssignals aus
Messzeitreihen**

von Kohnle, U. & Yue, C.

Gefördert mit Mitteln des Ministeriums für Umwelt, Klima und
Energiewirtschaft Baden-Württemberg (UM)

März 2012

HERAUSGEBER	LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg Postfach 100163, 76231 Karlsruhe
KONTAKT	Dr. Kai Höpker, Referat Medienübergreifende Umweltbeobachtung, Klimawandel; Tel.:0721/56001465, Kai.Hoepker@lubw.bwl.de ;
AUFTRAGGEBER	Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg - Forschungsprogramm Klimawandel und modellhafte Anpassung in Baden- Württemberg (KLIMOPASS)
BEARBEITUNG	Prof. Dr. Ulrich Kohnle Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg Wonnhaldestraße 4 79100 Freiburg
BEZUG	http://www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/91063/ ID Umweltbeobachtung U82-W03-N12
STAND	März 2012, Internetausgabe Mai 2013

Nachdruck für kommerzielle Zwecke - auch auszugsweise - ist nur mit Zustimmung der LUBW unter Quellenangabe und Überlassung von Belegexemplaren gestattet.

1	ZUSAMMENFASSUNG	4
2	PROBLEMSTELLUNG	5
3	METHODEN-ENTWICKLUNG	7
3.1	Extraktion aus Jahrringserien	7
3.2	Extraktion aus Bestandesmessungen	14
4	ERGEBNISSE	22
4.1	Langfristige Zuwachstrends	22
4.2	Vergleich: Durchmesserzuwachstrends (Baum) – Grundflächenzuwachstrends (Bestand)	22
4.3	Hauptbaumarten im Vergleich	24
4.4	Regionale Differenzierung (Fichte)	26
5	ZUWACHS UND UMWELTVERÄNDERUNG: ERSTER AUSBLICK	28
6	QUELLEN	30

1 Zusammenfassung

Zur Extraktion der umweltbedingten Komponente im gemessenen Zuwachssignal von Bäumen wurde ein multiplikativer Ansatz entwickelt, der es erlaubt zuwachsrelevante Einflüsse nicht-umweltbedingte Komponente auf der Basis konkreter Einzelfaktoren (Alter, Bonität, Konkurrenz, Durchforstung etc.) zu modellieren. Unter Vernachlässigung des Einflusses möglicher Umweltveränderungen werden entsprechende multiplikative Dekompositionsmodelle für den Zuwachs auf der Basis der zu analysierenden Zuwachsmessdaten parametrisiert. Diese Modelle spiegeln daher die während des Untersuchungszeitraumes herrschenden „durchschnittlichen“ Einflüsse umweltbedingter Zuwachsfaktoren wider. Aus dem Quotienten einer konkreten Zuwachsmessung und dem für die Verhältnisse des Messzeitpunktes modellierten durchschnittlich erwarteten Zuwachses ergeben sich Hinweise auf Zuwachstrends, die durch Veränderungen zuwachsrelevanter Umweltfaktoren ausgelöst wurden.

Multiplikative Dekompositionsansätze wurden für zwei unterschiedliche Datentypen entwickelt: Durchmesserzuwächse von Einzelbäumen (ermittelt aus jährlich aufgelösten Zuwachsdaten aus Jahrringanalysen herrschender Probebäume) und Grundflächenzuwächse ganzer Bestände (ermittelt aus in mehrjährigen Intervallen periodisch gemessener Bestände langfristiger Versuche). Die an der FVA verfügbare Datenbasis erlaubte die Analyse folgender Baumarten: Fichte, Tanne, Douglasie, Kiefer, Buche und Eiche.

Die aus der extrahierten umweltbedingten Zuwachskomponente abgeleiteten Trendanalysen zeigen bei allen Baumarten etwa von den 1950er bis in die 1970er Jahre steigende Zuwachstrends, ein +/- konstantes Niveau bis in die 1990er Jahre und eine Trendumkehr in den 1990er Jahren. Eine gewisse Ausnahme bildet die Tanne mit einer charakteristischen Depressionsphase in den 1970er Jahren. Auffällig ist, dass die Trendumkehr bei allen Baumarten deutlich vor dem Trockenjahr 2003 einsetzte.

2 Problemstellung

Antragsgemäß lag der Schwerpunkt im Rahmen des geförderten Projektes auf der Entwicklung adäquater Techniken zur Extraktion der umweltbedingten Komponente aus an Bäumen bzw. Beständen gemessenen Zuwachssignalen. Diese Arbeiten erschienen zwingend erforderlich, da die etablierten Techniken im Wesentlichen für dendrochronologische Fragestellungen entwickelt wurden und für Zwecke von Wachstumsanalysen insbesondere vor dem Hintergrund längerfristiger Veränderungstrends zuwachsrelevanter Umweltfaktoren (z.B. Klima, Stoffeinträge) nur eingeschränkt geeignet sind. Die Problematik stellt sich wie folgt dar:

Wachstumsmuster von Bäumen oder Beständen lassen sich als phänotypischer Ausdruck der Wirkung wachstumsrelevanter Umweltfaktoren interpretieren. Insbesondere Jahrringserien bieten für retrospektive Wachstumsanalysen eine hilfreiche Informationsquelle E.R. Cook & Kairiukstis (1990; Fritts (1976), da sie in jährlicher Auflösung „gespeicherte“ Wachstumsinformation beinhalten, die prinzipiell auch die Umwelteinflüsse widerspiegelt, denen ein Baum im Laufe seiner Entwicklung ausgesetzt war.

Zu berücksichtigen ist dabei allerdings, dass ein Jahresring als integrierende Summengröße die Wirkung *aller* wachstumsrelevanten Faktoren widerspiegelt, die im betreffenden Jahr wirksam waren als auch in der unmittelbar vorhergehenden Vergangenheit. Für Untersuchungen, die die Aufdeckung möglicher umweltbedingter Wachstumstrends beabsichtigen ist es daher unabdingbar, dass die nicht-umweltbedingten wachstumsrelevanten Faktoren, wie z.B. Bestandesdichte, Konkurrenz oder Alter, aus dem Jahrringsignal herausgefiltert werden.

Häufig wird auch bei Untersuchungen zu Beziehungen zwischen Klimafaktoren und Wachstum auf Methoden der Dendrochronologie zur Filterung des umweltbedingten Wachstumssignals zurück gegriffen E.R. Cook & Kairiukstis (1990). Allerdings birgt die direkte Anwendung dendrochronologischer Methoden bei Wachstumstrendanalysen in bewirtschafteten Wäldern verschiedene prinzipielle Probleme.

Um die klimabedingte Komponente im Wachstumssignal zu verstärken, versuchen dendrochronologische Ansätze üblicherweise den möglichen Einfluss variierender Baumkonkurrenz dadurch auszuschalten, dass nur vorherrschende Bäume zur Analyse ausgewählt werden Fritts (1976; Schweingruber (1983), in der Annahme, dass der Status dieser Bäume als vorherrschend auch in der Vergangenheit gegeben war. Vor allem in bewirtschafteten Beständen, in denen wiederholte Durchforstungen abrupte Veränderungen bezüglich Bestandesdichte und Konkurrenz bewirken können, kann diese Annahme für die weiter zurückliegende Vergangenheit durchaus fragwürdig erscheinen.

Ein zweiter Aspekt ist, dass Schwankungsmuster längerer Frequenz in dendrochronologischen Methoden oft als Äquivalent von alters- und größenspezifischen Trends behandelt werden, die dann herausgefiltert werden, um so das „Klimasignal“ zu verstärken E.R. Cook & Kairiukstis (1990). Üblicherweise handelt es sich bei den zur Detrendierung verwendeten Ansätzen um deterministische Modelle. Dazu gehören beispielsweise modifizierte negative Exponentialfunktionen oder digitale Filter und Glättungs-Splines E. R. Cook & Peters

(1981). Kritisch bei dieser Herangehensweise ist, dass Schwankungsmuster niedriger Frequenz sehr wohl auch durch mittel- bis langfristige Trends bei wachstumsrelevanten Umweltfaktoren verursacht werden können wie beispielsweise Klima Melvin & Briffa (2008) oder Emissionen. Es ist daher von großer Bedeutung sicherzustellen, dass die zur Entfernung unerwünschter nicht-umweltbedingter mittel- bis langfristiger Trends (z.B. Alter, Veränderungen der Bestandesdichte) angewendeten statistischen Methoden nicht gleichzeitig Teile von Wachstumstrends ausfiltern, die durch wachstumsrelevante Umweltfaktoren verursacht werden.

Ein weiterer Aspekt ist, dass Baumwachstum durch Einflüsse externer Faktoren, interner Prozesse oder Interaktionen beider Elemente gesteuert wird. Während ein Teil dieser Faktoren jährlich stark schwankende Einflüsse auf den Durchmesserzuwachs ausüben, wirken andere (z.B. Speicher- oder Puffereffekte) dämpfend auf die Variationsbreite der Jahrringbreiten; vergleichbares gilt für Perioden relativ konstanter Umweltbedingungen. Das letztgenannte Phänomen wird auch häufig als zeitabhängige Effekte bezeichnet. In einem Zeitreihenmodell scheint dieses Phänomen in Form von Autokorrelation auf. In der Dendrochronologie wird diese Autokorrelation üblicherweise aus Jahrringserien entfernt, um das jährliche (z.B. klimatische) Signal zu verstärken E.R. Cook & Kairiukstis (1990). Allerdings deckten bereits Yue et al. (2002) einen Zusammenhang auf zwischen einem linearen Trend und der sich daraus ergebenden seriellen Korrelation. Daraus folgt, dass beim für dendrochronologische Ansätze typischen *pre-whitening* („Vorglätten“) von Jahrringserien die Gefahr besteht, potentiell Teile eines im Hintergrund bestehenden langfristigen Wachstumstrends mit entfernt wird – sofern ein solcher vorliegt.

Für die Darstellung der ausschließlich durch Umweltfaktoren bedingten Wachstumskomponente von Bäumen bestehen zwar weit entwickelte methodische Ansätze. Allerdings sind diese statistischen Ansätze nicht in der Lage, gezielt umweltbedingte Trendkomponenten von Einflüssen der Bestandesdichte abzutrennen. Dies ist wichtig, denn: *“ignoring stand dynamics is to risk misinterpreting its effects, while insisting that stand dynamics explains everything risks overlooking other signals”* Van Deusen (1990). Als Folgerung aus dieser grundlegenden Erkenntnis verwendete van Deusen (1992) eine Kovarianzanalyse um die Wirkung dichtebedingte Effekte auf das Wachstum zu eliminieren. Das grundlegende Modell dazu beruhte auf einer linearen Regressionsgleichung, die Durchmesser, Alter und Bestandesgrundfläche einschloss. Allerdings ist eine solche einfache Regression nicht imstande, die Effekte der Dichtedynamik auf Bestandesebene zu erklären.

Unter Berücksichtigung dieser potentiellen Einschränkungen der üblichen Methoden diente die methodischen Entwicklungsarbeiten im Projekt der Untersuchung der Möglichkeiten eines neuen Ansatzes zur Extraktion der umweltrelevanten Komponente aus dem hoch integrierenden Zuwachssignal. Im Prinzip wird bei diesem neuen Ansatz wird die Wirkung bekannter nicht-umweltbedingten Wachstumsfaktoren dadurch entfernt, dass sie einzeln und gezielt über Faktor-spezifische und biologisch basierte Ursache-Wirkungs-Beziehungen gekennzeichnet und entfernt werden. Im Prinzip handelt es sich damit also um multiplikative Dekompositionsmodelle.

Die erfolgreich entwickelten Methoden wurden dann in einem zweiten Schritt auf vorhandenen Zuwachs-Datenbasen wichtiger Baumarten in Baden-Württemberg angewandt. Anschließend wurden die aus dem

Zuwachssignal extrahierten umweltbedingten Komponenten als Grundlage für die Untersuchung solcher mittel- bis langfristiger Trends im Zuwachs (Zuwachstrendanalyse) herangezogen, die ausschließlich aus umweltbedingten Wachstumsveränderungen resultieren.

3 Methoden-Entwicklung

Die methodischen Entwicklungsarbeiten für multiple Dekompositionsmodelle erfolgten für zwei unterschiedliche Datenbasen von Zuwachsmessungen: Jahrringserien (Durchmesserzuwachs von Einzelbäumen; iD) bzw. periodische Wiederholungsaufnahmen (Grundflächenzuwachs ganzer Bestände; iG). Im Folgenden werden die im Rahmen des Projektes realisierten methodischen Neuentwicklungen beschrieben. Die Methoden wurden in zwei im Rahmen des Projektes abgeschlossenen Fachpublikationen veröffentlicht.

3.1 EXTRAKTION AUS JAHRINGSERIEN¹

Bei diesen Arbeiten ging es im Wesentlichen darum, einen konzeptionellen Rahmen dafür zu entwickeln, um die durch Umweltveränderungen bedingte Komponente in Durchmesser-Zuwachsserien aufzudecken. Hierfür war ein multiplikatives Dekompositionsmodell zu entwickeln, das dazu dienen soll, die Effekte von Alter, Bonität, Konkurrenzstatus, Bestandesdichte sowie plötzlicher Veränderungen der Bestandesdichte (Durchforstung) zu berücksichtigen.

Die methodische Entwicklung erfolgte für die Baumart Fichte, für die in bereits existierenden Datenbanken umfangreiche Zuwachsdaten verfügbar sind. Die verwendeten Daten stammen von insgesamt 86 verschiedenen Versuchsfeldern, die sich in einer für Versuchsfelder typischen Klumpung von Feldern auf zahlreiche Versuchsorte über Baden-Württemberg verteilen (Abb. 1). Die Felder decken dabei eine große Bandbreite hinsichtlich der natürlichen Umweltfaktoren (Bonität, Höhenlage, Niederschlag, Temperatur etc.) und Behandlungsregimes ab.

¹ Yue, C., Kohnle, U., Hanewinkel, M. und Klädtke, J. (2011): Extracting environmentally driven growth trends from diameter increment series based on a multiplicative decomposition model. *Can. J. For. Res.* 41, 1577-1589.

Yue, C., Kohnle, U., Kahle, H.-P. und Klädtke, J. (2012): Exploiting irregular measurement intervals for the analysis of growth trends of stand basal area increments: a composite model approach. *For. Ecol. Manage.* 263, 216-228

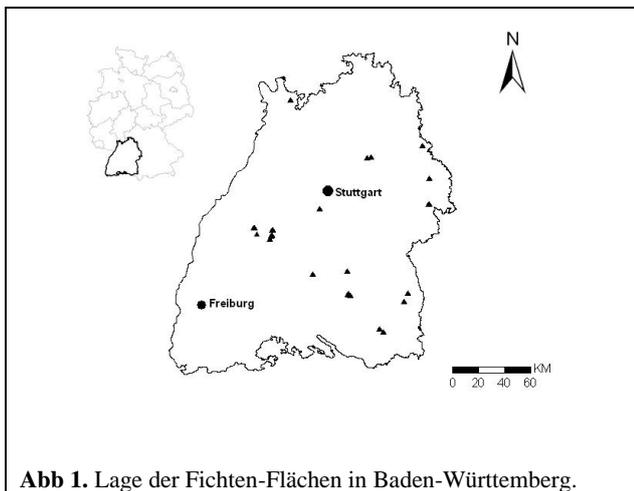


Abb 1. Lage der Fichten-Flächen in Baden-Württemberg.

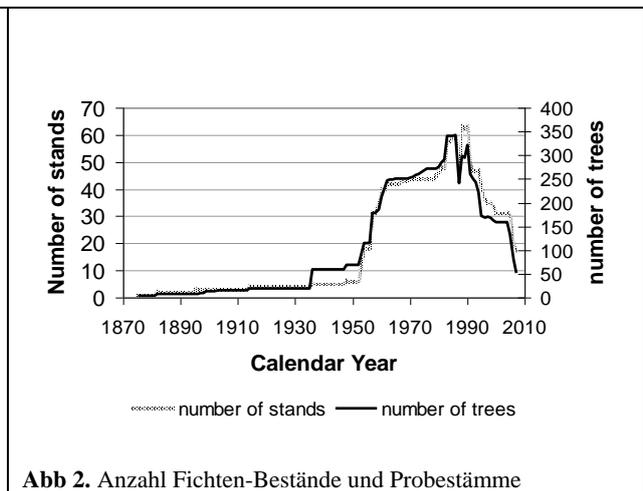


Abb 2. Anzahl Fichten-Bestände und Probestämme

Während der Beobachtungsdauer dieser Versuchsfelder liegen aus den periodisch wiederholten Vollaufnahmen dokumentierte Angaben zu Durchmesser-Entwicklung und Jahr des Ausscheidens der individuell nummerierten Bäume vor. Die Bestandesaufnahmen des ältesten Feldes reichen von 1874 bis 198; die Periodenlänge der Aufnahmen aller Felder reicht von 2 bis 17 Jahren (im Mittel 8,8 Jahre). Diese für alle Bäume erhobenen Messdaten bilden die Grundlage für die Kalkulation der Bestandeskennwerte, die in der Studie in die Untersuchung einbezogen wurden (Alter, Bestandeshöhe, Dichte, Durchforstungen, Höhenbonität und Grundflächenzuwachs des Bestandes).

Ergänzend dazu standen für die Untersuchungen Jahrringserien von 450 Fichten zur Verfügung, die auf diesen Feldern wuchsen (Abb. 2). Üblicherweise begannen die Bestandesaufnahmen nicht bereits beim Erreichen der Brusthöhe sondern wurden erst in späteren Stadien der Bestandesentwicklung begonnen. Daher reichen die Jahrringserien der Probebäume grundsätzlich weiter zurück als die Bestandesmessdaten der Versuchsfelder. In die Untersuchung einbezogen wurden jedoch nur diejenigen Zeitabschnitte der Jahrringserien für die auch korrespondierende Bestandesaufnahmen zur Verfügung standen. Der älteste in die Untersuchung einbezogene Jahrring datiert daher auf das Jahr 1874; die folgenden Grafiken beginnen der Einfachheit halber jedoch mit dem Jahr 1875. Die letzten einbezogenen Jahrringe stammen aus dem Jahr 2007; der Schwerpunkt der Jahrringdaten entfällt auf die Zeit zwischen 1950 und 2007 (Abb. 2). Für die Zwecke dieser Untersuchung wurden die Radialzuwächse in Durchmesserzuwächse (ohne Rinde) transformiert, da in Wachstumsanalysen Durchmesser-Zuwachs gebräuchlicher als Radialzuwachs ist.

Baumwachstum basiert auf dem Zusammenwirken biologischer Prozesse, die mit externen Faktoren interagieren (z.B. Bestandesdichtedynamik, Umweltveränderungen). Um einen konzeptionellen Rahmen für die Untersuchung umweltbedingter Trends bei Durchmesser-Zuwächsen zu bieten, wird ein multiplikatives Dekompositionsmodell in der folgenden Form verwendet:

$$[1] \quad \Delta d = \Psi(A) \cdot \Psi(S) \cdot \Psi(C) \cdot \Psi(X) \cdot \Psi(U) + \varepsilon$$

dabei ist Δd der Durchmesserzuwachs, $\Psi(A)$ der altersspezifische Trend (A), $\Psi(S)$ die bonitätsspezifische Wachstumskomponente (*site index*; S), $\Psi(C)$ die auf dem Konkurrenzstatus eines Baumes beruhende Wachstumskomponente (*competition*; C), $\Psi(X)$ Durchforstungsbedingte Einflüsse (*extraction*; X), $\Psi(U)$ die

von Umweltfaktoren und anderen Faktoren verursachte Komponente (U) und ε der zufällige Effekt mit $\varepsilon \sim N(0, \sigma^2)$.

Effekt von Alter (A) und Bonität (S)

Der altersbedingte Wachstumstrend entspricht einer biologischen Wachstumskurve die durch eine langsame Startphase, eine allmählichen Beschleunigungsphase und einem Maximum gefolgt von einer Abnahme charakterisiert ist Assmann (1961). Die Modellierung altersabhängiger Effekte entspricht damit der Bestimmung der Wachstumskurve. Häufig wird dabei zur Modellierung des Wachstums von Bäumen die Chapman-Richards Funktion herabgezogen Zeide (1993)

$$[2] \quad d = \alpha_0 (1 - e^{-\alpha_1 A})^{\alpha_2}$$

dabei repräsentiert d den Durchmesser, A das Baumalter und $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$ die Parameter.

Die Durchmesser-Zuwachsfunktion lässt sich aus der Durchmesser-Wachstumsfunktion [2] ableiten und in abgewandelter Form folgendermaßen geschrieben werden:

$$[3] \quad \Psi(A) \propto e^{-\alpha_1 A} d^{\frac{\alpha_2-1}{\alpha_2}}$$

Ein weiterer zu berücksichtigender Aspekt ist, dass das Baumwachstum ganz eindeutig nicht nur vom Baumalter abhängt sondern gleichermaßen von der Wuchskraft des Standortes. Das standortsspezifische Wuchspotential beeinflusst unmittelbar das Wachstum und wird häufig durch die Bonität charakterisiert. In dieser Untersuchung wurde daher die bonitätsspezifische Wachstumsreaktion modelliert als:

$$[4] \quad \Psi(S) \propto S^{\alpha_3}$$

dabei ist S die Oberhöhen-Bonität (nach Assmann & Franz (1965) und α_3 der Parameter.

Die Entwicklung des Durchmesserwachstums unter verschiedenen Bonitätsbedingungen lässt sich durch Kombination der Gleichungen (2) und (4) darstellen:

$$[5] \quad d \propto S^{\alpha_3} (1 - e^{-\alpha_1 A})^{\alpha_2}$$

Daraus ergibt sich der Durchmesser-Zuwachs unter verschiedenen Bonitätsbedingungen unter Annahme konstanter Durchforstungsregimes als:

$$[6] \quad \Psi(S, A) = \Psi(S) \cdot \Psi(A) \propto S^{\alpha_3} e^{-\alpha_1 A} d^{\frac{\alpha_2-1}{\alpha_2}}$$

Tatsächlich beeinflussen jedoch auch die Dynamik der Bestandesdichte sowie Veränderungen von Umweltbedingungen das Baumwachstum. Ohne Kenntnis der Bestandesdichtedynamik ist es daher unmöglich, die „wahre potentiell altersbedingte“ Trendkomponente vom Gesamtwachstum abzutrennen. In diesem Zusammenhang besteht für die wachstumskundliche Analyse das Problem, dass es keine Methoden gibt, die die exakte Quantifizierung des potentiellen Wachstumstrends individueller Bäume erlauben.

Ertragstafeln geben durchschnittliche altersbedingte Trends auf Standorten verschiedener Bonitäten für bestimmte Durchforstungsregimes wieder – unter der Annahme konstanter wachstumsrelevanter Umweltbedingungen. Solche Tafeln werden daher häufiger als Referenzen für Wachstumsveränderungen herangezogen Zingg (1996). Die Fichten-Ertragstafel nach ASSMANN & FRANZ (1965) basiert zu wesentlichen Teilen auf Beständen aus Süddeutschland (Bayern, Baden-Württemberg) und wird in dieser Region recht häufig angewendet Pretzsch *et al.* (2007). Sie wurde daher als Quelle für Input-Werte genutzt auf deren Basis Wachstumsreaktionen auf Bonität und Alter modelliert wurden.

Allerdings erscheint dabei eine direkte Anwendung der Tafelwerte aufgrund verschiedener Probleme nicht sinnvoll. Beispielsweise weicht das Wachstum der Einzelbäume mehr oder weniger stark von den gemittelten Tafelwerten ab. Die Gründe dafür können in Effekten der Genetik, der sozialen Stellung oder anderen kleinstandörtlichen Faktoren liegen. Außerdem können das situativ wirksame Durchforstungsregime oder die relevanten Umweltfaktoren in ihrer Ausprägung recht erheblich von den Wachstumsdaten abweichen, die der Ertragstafel zugrunde liegen.

Aufgrund dieser Einschränkungen wurden in unserer Untersuchung die Tafelwerte nicht unmittelbar als Referenzwerte herangezogen sondern dienten lediglich als eine Eingangsvariable bei der Modellierung des Alterstrends unter unterschiedlichen Bonitätsbedingungen. D.h., das gemessene Baumwachstum wurde dabei als eine Funktion des mittleren Durchmesserwachstums der Ertragstafel betrachtet:

$$[7] \quad \Psi(S, A) = f(y) \propto y^{\alpha}$$

dabei repräsentieren y das Durchmesserwachstum im Alter A unter Verhältnissen der Oberhöhenbonität S der Ertragstafel; in anderer Schreibweise:

$$y = f(S, A) = \alpha_0 S^{\alpha_4} e^{-\alpha_5 A} d^{\frac{\alpha_6-1}{\alpha_6}}$$

Konkurrenzeffekte (C)

Für die Quantifizierung der Konkurrenzeffekte ($\Psi(C)$) für jeden Baum wurden zwei Parameter verwendet. Der erste erfasst die relative Durchmesserposition $\Psi(C_1)$ eines Baums im Bestand, der zweite die Bestandesdichte ($\Psi(C_2)$):

$$\Psi(C) = \Psi(C_1) \cup \Psi(C_2)$$

Für $\Psi(C_1)$ wurde das Modell gewählt:

$$[8] \quad \Psi(C_1) \propto e^{\kappa_1 \tilde{d}_x}$$

wobei κ_1 der Parameter ist, \tilde{d}_x die relative kumulative Durchmesser-Verteilung in Bezug zur Durchmesserklasse x , die die Aspekte Größe und Konkurrenzstatus des Baumes widerspiegelt. Der Wert wurde wie bei Lemm (1991) definiert als:

$$[9] \quad \tilde{d}_x = \frac{\sum_{k=0}^x n_k}{\sum_{k=0}^{x_{\max}} n_k}$$

wobei n_k der Anzahl der Bäume in Durchmesserklasse k entspricht und x_{\max} der stärksten Durchmesserklasse; die Werte für \tilde{d}_x variieren zwischen 0 und 1.

Die Bestandesdichte wurde modelliert als:

$$[10] \quad \Psi(C_2) \propto e^{\kappa_2 B}$$

mit $\Psi(C_2)$ als der von der Bestandesdichte bedingten Wachstumskomponente, B ist die Bestandesgrundfläche (m²/ha) und κ_2 der Parameter.

Durchforstungseffekte (X)

Obwohl Jahrringserien als verlässliche Datenbasis für die Untersuchung umweltbedingter Effekte gelten, ist zu beachten, dass das Radialwachstum sehr sensitiv auf Konkurrenz zwischen den Bäumen und auf Veränderungen in der Bestandesdichte reagiert. Eine logische Konsequenz aus dieser Feststellung ist, dass umweltbedingte Wachstumstrends nicht sicher identifiziert werden können, wenn Einflüsse von Konkurrenz und Bestandesdichte nicht sauber abgetrennt werden van Deusen (1992).

Nach der Durchforstung profitiert das Wachstum der verbleibenden Bäume durch die Zunahme verfügbarer Ressourcen. Normalerweise führen schwache Durchforstungen nur zu geringen Wachstumsänderungen. Mit zunehmender Durchforstungsintensität nimmt der Durchmesserzuwachs zu, erreicht schließlich ein Maximum und bleibt dann auch bei weiterer Standraumerweiterung annähernd konstant. Auch im zeitlichen Verlauf nimmt der Zuwachs nach der Durchforstung zunächst zu, bis er schließlich ein Maximum erreicht. Anschließend sinkt dann mit dem Wiederanstieg der Konkurrenz der Zuwachs wieder etwa auf das Niveau vor der Durchforstung Assmann (1961; Juodvalkis *et al.* (2005). Die größte Herausforderung bei der Erfassung der Durchforstungseffekte ist dabei die Quantifizierung des Durchforstungsregimes hinsichtlich z.B. Intensität, Turnus, Durchforstungsart und Ausgangsdichte Assmann (1961).

In der forstlichen Praxis erfolgt die Durchforstung im Regelfall in einer Folge wiederholter Eingriffe und Interaktionen zwischen aufeinanderfolgenden Eingriffen. Üblicherweise folgend diese Interaktionen nicht-linearen Zusammenhängen zwischen Durchforstungseffekten und Wachstumsreaktion. Bei der Erfassung von Durchforstungseffekten handelt es sich also nicht nur um Effekte der Durchforstungsintensität sondern muss sowohl auch die Zeitspanne berücksichtigen die seit dem Eingriff verstrichen ist als auch kumulative Effekte vorhergehender Durchforstungen. Auf der Basis dieser Überlegungen lassen sich die Durchforstungseffekte $\Psi(X)$ durch folgende zwei Komponenten klassifizieren:

$$\Psi(X) = \Psi(X_1) \cup \Psi(X_2)$$

wobei $\Psi(X_1)$ die Wachstumsreaktion auf die Durchforstungseffekte darstellt und $\Psi(X_2)$ den Effekt der Zeitspanne seit der Durchforstung.

In diesem Zusammenhang ist es auch wichtig zu berücksichtigen, dass eine Reihe aufeinanderfolgender Durchforstungen zu kumulativen Effekten auf den Zuwachs führen, die dazu führen, dass aktuelle Baum- und Bestandesparameter alleine nicht ausreichen, um den Zuwachs von Bäumen zu erklären Püttmann *et al.* (2009). Es erschien daher nötig einen kumulativen Durchforstungsindex einzuführen, der nicht nur die Wirkung der letzten Durchforstung erfasst sondern die Geschichte der vorhergehenden Eingriffe mit berücksichtigt.

Nach dem Vergleich verschiedener Funktionen wurde die Funktion von GOMPertz (1825) gewählt, um die Wachstumsreaktion auf Durchforstungseffekte abzubilden, da diese Funktion ausreichend flexibel für die Modellierung von Wachstum ist Zeide (1993).

$$[11] \quad \Psi(X_1) \propto e^{-\gamma_1 \cdot H(k)}$$

mit γ_1 als Parameter und $H(k)$ als kumulativem Durchforstungsindex (*accumulated thinning index*; ATI) für die Durchforstung k , definiert als Summe der Intensität der aktuellen Durchforstung und dem für die vorhergehende Durchforstung ermittelten Durchforstungsindex:

$$[12] \quad H(k) \equiv \frac{\Delta B_k}{B_k} + \frac{H(k-1)}{\sqrt{m_{k-1}}}$$

mit m_{k-1} als Länge des Intervalls seit der letzten Messung ($k-1$), ΔB_k der entnommenen Grundfläche bei Messung k und B_k als der Bestandesgrundfläche vor der Durchforstung zum Messzeitpunkt k .

Ergänzend musste der ATI ($H(k)$) als dynamischer Index konzipiert werden, damit das Baumwachstum mit steigendem ATI bis zum Erreichen seines Maximums ansteigt. Für die Abbildung des Effektes des seit der Durchforstung verstrichenen Zeitintervalls eignete sich bestens die Funktion von HOERL (1954), die abhängt von der Länge des Zeitintervalls (P) nach der Durchforstung Zeide (2001).

$$[13] \quad \Psi(X_2) \propto p^{\gamma_2} e^{-\gamma_3 P}$$

wobei gilt

$$P \equiv A_t - A_0,$$

mit A_0 als Baumalter zum Zeitpunkt der Durchforstung und γ_2 und γ_3 als Parametern.

Diese Funktion ist flexibel und zeigt ein Maximum der Reaktion ab dem Zeitpunkt der Durchforstung von:

$$\frac{\gamma_2}{\gamma_3}$$

Effekt Umweltfaktoren (U)

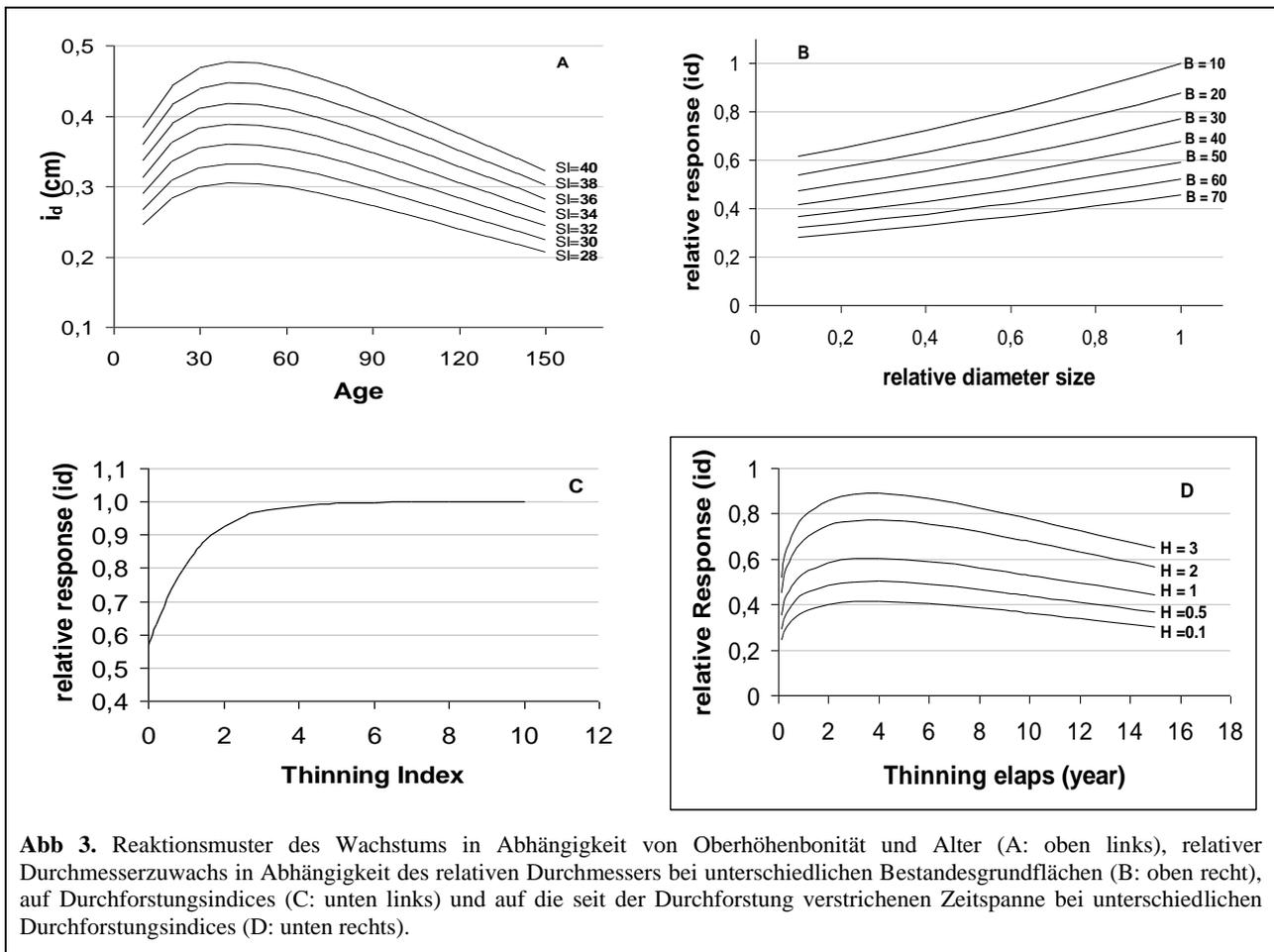
Neben den genannten Faktoren wirken sich auch Umweltfaktoren und deren Veränderung (z.B. Lokalklima, Kohlendioxid, Stickstoff-Emissionen) auf das Wachstum aus. Da sich Größenordnung und die Zusammensetzung dieses Komplexes an Umweltfaktoren zeitlich hoch variabel zeigt, ist der Effekt der Auswirkung der Umweltfaktoren auf Wachstumstrends kein konstanter Prozess. Wachstumsreaktionen auf Umwelteffekte zeigen im Zeitverlauf Muster stark variierender und nicht-linearer Trends. Um den zusammen wirkenden Gesamteffekt der wachstumsrelevanten Umweltfaktoren zu Untersuchung wurde die umweltbedingte Komponente der Wachstumsreaktion $\Psi(U)$ modelliert, um so zeitbedingte Trends $f(T)$ identifizieren zu können:

$$[14] \quad \Psi(U) \equiv f(T)$$

Durchmesser-Zuwachsmo- dell

Für die Details der Modellierung des grundlegenden Durchmesser-Zuwachsmo-
dells wird auf die einschlägige Publikation von Yue et al. (2011) verwiesen. Im Folgenden werden nur die wesentlichen Charakteristika dieses Modells kurz beschrieben. Abb. 3 stellt die Reaktionsmuster auf folgende Einflussfaktoren dar:

- Abb. 3A zeigt die nach Bonitäten differenzierte altersabhängige Entwicklung des absoluten Durchmesser-Zuwachses (iD, cm) bei unterschiedlichen Bonitätsverhältnissen (I: Oberhöhenbonität).
- Mit steigendem bestandesinternen Konkurrenzstatus eines Baumes (relativer Durchmesser; relative diameter) nimmt der relative Durchmesser-Zuwachs (relative iD response) zu, während er bei steigender Bestandesdichte (Bestandesgrundfläche; B in m²/ha) abnimmt (Abb. 3B).
- Mit steigenden Werten des Durchforstungsindex (thinning index) nimmt der relative Durchmesser-Zuwachs zunächst zu und bleibt danach auf einem konstanten Niveau (Abb. 3C).
- Bezüglich der nach einem Durchforstungseingriff verstrichenen Zeitspanne (thinning elapse) zeigt sich der stärkste Einfluss auf den relativen Durchmesser-Zuwachs etwa 3-4 Jahre nach dem Eingriff (Abb. 3D).



Extraktion der umweltbedingten Komponente im Durchmesser-Zuwachssignal

Prinzipiell geht es bei der Untersuchung möglicher Wachstumstrends, die durch Umweltveränderungen hervorgerufen werden darum, zunächst alle Komponenten im gemessenen Wachstumssignal zu eliminieren, die durch Veränderungen des Alter und durch Veränderungen in Bestandesdichte und -struktur verursacht werden. Die Erwartung ist, dass der Zuwachsquotient (ζ) aus tatsächlich gemessenem und erwartetem Durchmesserzuwachs außer umweltbedingten Komponenten keine anderen Einflussfaktoren auf den Zuwachs mehr enthält und unter unveränderten Umweltbedingungen konstant ist. Tatsächlich treten jedoch im Zeitverlauf Umweltveränderungen auf, die den Zuwachs beeinflussen. Daraus folgt, dass die Aufdeckung von Trendänderungen im Zuwachs mit der Aufgabe korrespondiert, die Veränderungsdynamik der Wachstumsquotienten über dem Kalenderjahr ($f(T)$) zu identifizieren.

$$[18] \quad \zeta = E\left(\frac{id}{E(\eta)} \mid U\right) \equiv \Psi(U) = f(T)$$

Ein deterministisches parametrisches Modell erwies sich dabei als völlig untauglich, arbiträre Formen solcher Trends zu beschreiben. Dagegen bieten GAMs (generalized additive models; Hastie & Tibshirani (1990)) gute Möglichkeiten nicht-lineare Beziehungen abzubilden indem beispielsweise Glättungs-Splines oder lowess-Glättungen (locally weighted scatterplot smoothing; Cleveland (1979)) an die Daten angepasst werden. Abb. 4 zeigt die Entwicklung des Zuwachsquotienten (gemessener/beobachteter Zuwachs) ermittelt auf der Basis eines GNLS (Gleichung 18).

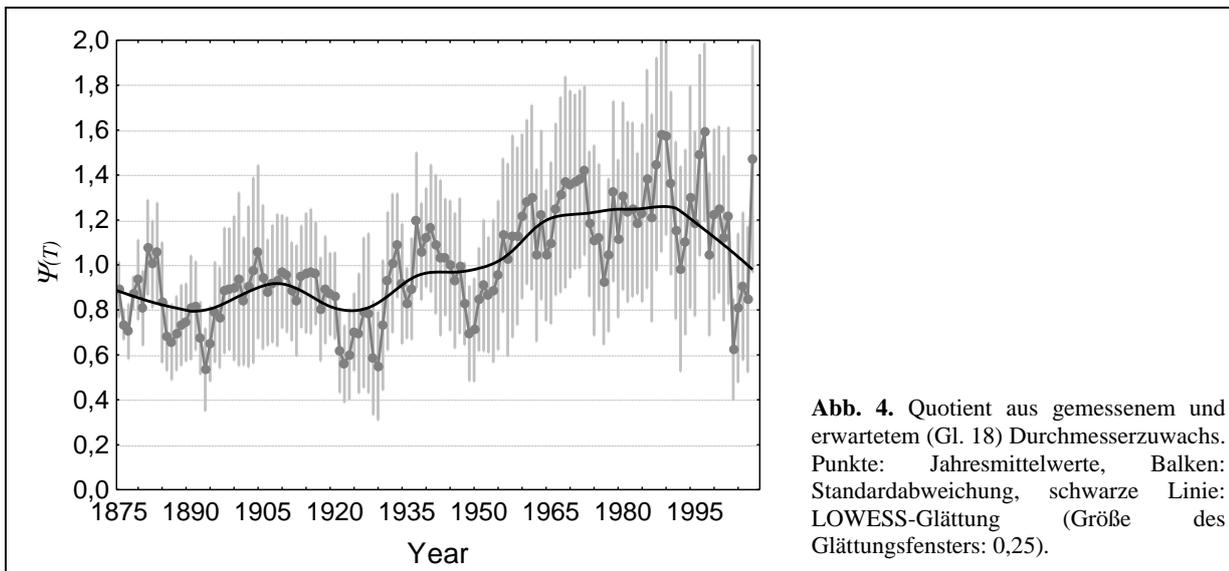


Abb. 4. Quotient aus gemessenem und erwartetem (Gl. 18) Durchmesserzuwachs. Punkte: Jahresmittelwerte, Balken: Standardabweichung, schwarze Linie: LOWESS-Glättung (Größe des Glättungsfensters: 0,25).

Wirksamkeit der multiplikativen Dekompositionsmethode

Ziel der Arbeit war die Entwicklung eines methodischen Rahmens, der eine zutreffend quantifizierte retrospektive Analyse des Teils von Wachstumstrends ermöglicht, dessen Ursache in Umweltveränderungen bedingt ist. Innerhalb des methodischen Rahmens ermöglicht die Kombination zweier unterschiedlicher Datensätze (jährlich aufgelöste Jahrringserien einzelner Probestämme & periodisch aufgelöste Bestandesaufnahmen) eine vollständige Erfassung derjenigen Komponenten im Durchmesser-Zuwachssignal der Probestämme, die von baumspezifischen Einflüssen (z.B. Alter) bzw. bestandsspezifischen Einflüssen (z.B. Bestockungsdichte, Durchforstung) geprägt werden.

Es kann davon ausgegangen werden, dass sich die Auswirkungen von Umweltveränderungen (z.B. Klima) im Baumwachstum widerspiegeln, dass als dynamischer Prozess interpretiert werden kann. Um die von Umweltveränderungen verursachten Trendkomponenten aufdecken zu können, werden häufig verschiedene Methoden wie beispielsweise Spline-Funktionen E. R. Cook & Peters (1981) oder Filter E.R. Cook & Kairiukstis (1990) dazu eingesetzt, um beispielsweise Effekte von Baumalter oder Bestandesdynamik auf das Wachstum zu eliminieren.

Dabei gilt es jedoch zu beachten, dass solchen Methoden inhärent mit dem Risiko behaftet sind, zumindest Teile langfristiger Trends mit zu entfernen, die durch langfristige Umweltveränderungen bedingt sind und eigentlich im Fokus der wachstumskundlichen Untersuchung stehen. Abb. 5 zeigt exemplarisch, dass sich bei Anwendung eines solchen Detrendierungs-Ansatzes Mäkinen *et al.* (2002) auf den hier untersuchten Datensatz zu Trends führt, die deutlich von dem mit dem multiplikativen Dekompositionsmodell aufgedeckten Trends abweichen. für die Anwendung eines). Erkennbar ist, dass insbesondere mittelfristige, mutmaßlich umweltbedingte Trends offenbar (ungewollt) mit gefiltert werden und es im Ergebnis lediglich zu einer Oszillation um die Waagerechte kommt. Also nicht zu langfristigen Trends, wie sie die multiplikative Dekomposition ausweist (Abb. 4).

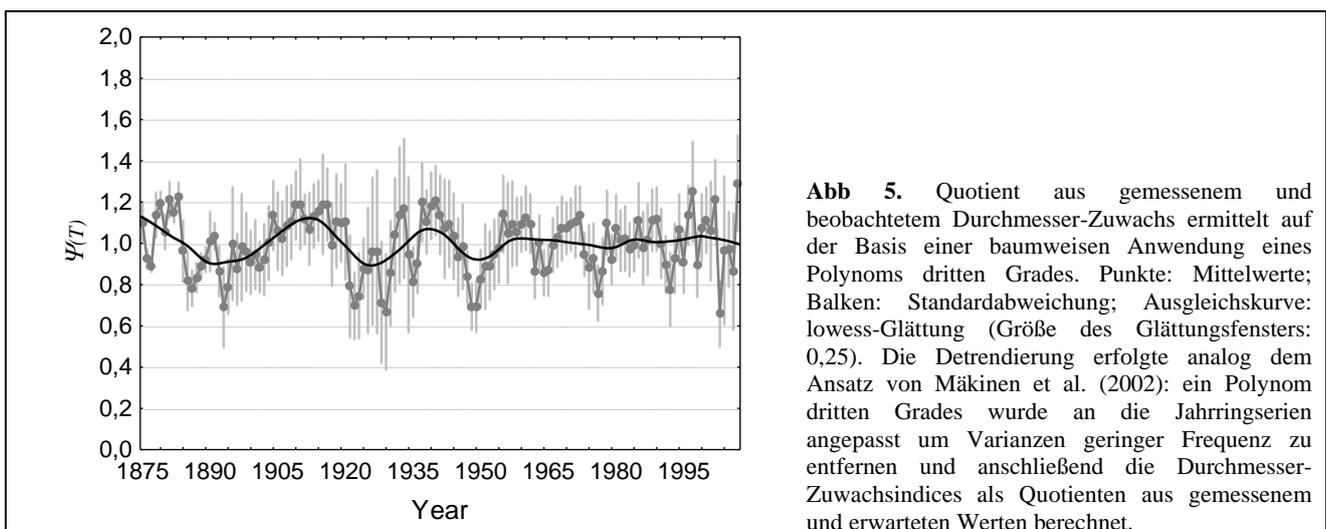


Abb 5. Quotient aus gemessenem und beobachtetem Durchmesser-Zuwachs ermittelt auf der Basis einer baumweisen Anwendung eines Polynoms dritten Grades. Punkte: Mittelwerte; Balken: Standardabweichung; Ausgleichskurve: lowess-Glättung (Größe des Glättungsfensters: 0,25). Die Detrendierung erfolgte analog dem Ansatz von Mäkinen *et al.* (2002): ein Polynom dritten Grades wurde an die Jahrringserien angepasst um Varianzen geringer Frequenz zu entfernen und anschließend die Durchmesser-Zuwachssindizes als Quotienten aus gemessenem und erwarteten Werten berechnet.

Üblicherweise erfolgt das Wachstumsmonitoring langfristiger waldwachstumskundlicher Versuchsflächen durch Durchmesser- und Höhenmessungen, die im Regelfall in etwa fünfjährigen Intervallen wiederholt werden. In diesen Beständen werden darüber hinaus auch Durchforstungseingriffe und Schäden in quantifizierter Form dokumentiert. Neben der exakten Berechnung bestandesspezifischer Charakteristika (z.B. Grundfläche, Holzvorrat, Zuwachs, Bonität) ermöglicht diese Dokumentation auch eine exakte retrospektive Identifikation der Bestandesdynamik (z.B. im Zusammenhang mit Durchforstungs-/Konkurrenzeffekten). Daher eignen sich Zuwachsdaten langfristiger waldwachstumskundlicher Versuchsflächen grundsätzlich auch für Wachstumstrenduntersuchungen und sich verändernden Umweltbedingungen.

Aus diesen Gründen waren entsprechende Daten bereits in der Vergangenheit wiederholt Gegenstand von Wachstumstrendanalysen Mielikainen & Timonen (1996; Prietzel *et al.* (2008). Nicht befriedigend gelöst ist jedoch bislang das Problem, wie der erwartete Zuwachs auf Bestandesebene (der Referenz-Zuwachs) zu modellieren ist, da Bestandesgrundflächen- sowie Volumen-Zuwachs von einer Vielzahl an Faktoren beeinflusst werden. Dazu gehören beispielsweise Alter, Bestandesdichte, Durchforstungsregime, Standortsbonität oder Witterungsbedingungen. Als Zuwachsreferenz wurden in der Vergangenheit häufig Ertragstafeln herangezogen Pretzsch & Kahn (1996; Zingg (1996). Dabei gilt es jedoch zu berücksichtigen, dass es sich bei Ertragstafeln um Wachstumsmodelle handelt, die speziell an bestimmte Standortsbedingungen und Durchforstungsregimes angepasst sind und wenig Flexibilität für die Anpassung an abweichenden Voraussetzungen bieten.

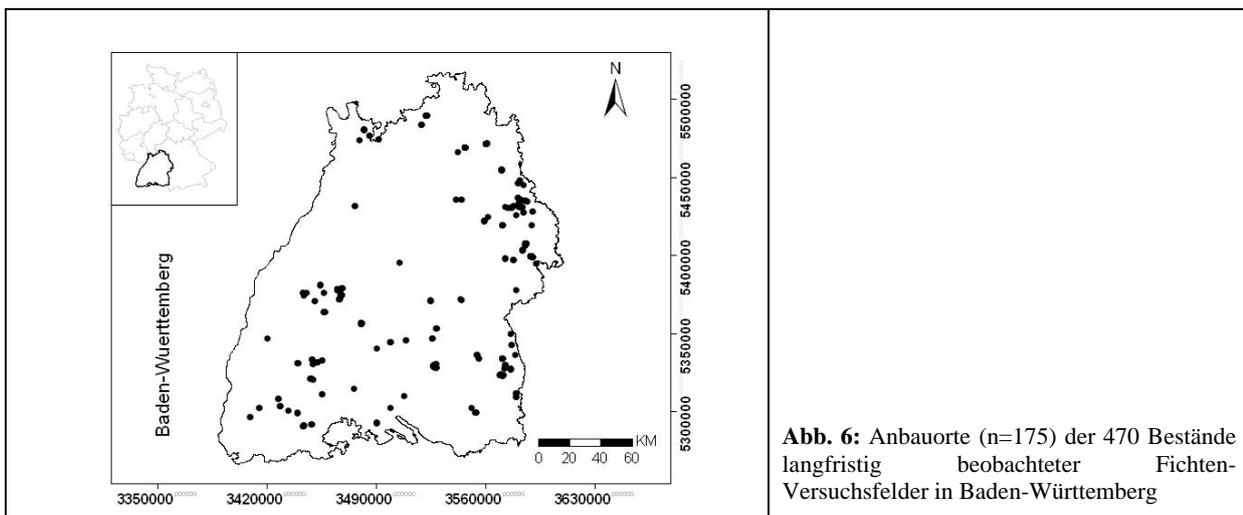
Mielikainen und Timonen (1996) zeigten das Potential flexiblere Wachstumsmodelle für die Entwicklung von Vorstellungen zu Referenzzuwächsen. Und auch Solberg *et al.* (2009) arbeiteten mit einem Wachstumsmodell, das Bonität, Alter und Bestandesdichte als variable Eingangsgrößen nutzte. Dabei blieb allerdings unklar, ob die auf der Basis solcher empirischer Wachstumsmodelle abgeleiteten Referenz-Zuwachswerte tatsächlich sowohl die spezifischen Bestandes- und Standortssituation sowie das sich dynamisch verändernde Durchforstungsregime in einer ganz konkreten Periode repräsentieren.

Das Problem verschärft sich weiters dadurch, dass sich zuwachsrelevante Faktoren wie Alter, Bestandesdichte oder Bonität im Verbund auf das Wachstum von Bäumen und Beständen auswirken und bei der Extraktion der umweltbedingten Komponente aus dem Zuwachssignal ebenfalls zu berücksichtigen sind. Eine weitere Einschränkung ergibt sich daraus, dass die für die Referenz-Zuwachsschätzung herangezogenen Wachstumsmodelle Zuwachsschätzungen häufig auf fixen Wachstums-Zeitschritten aufbauen (z.B. in 5- oder 10-Jahres-Perioden) oder auf durchschnittlichen Zuwachswerten, die für Perioden unterschiedlicher Länge aus langfristigen Versuchsflächen gemittelt werden. Da bei Versuchsflächen in den gemäßigten und borealen Breiten die Messintervall typischerweise unregelmäßige Längen aufweisen, müssen die

² Yue, C., Kohnle, U., Kahle, H.-P. und Klädtke, J. (2012): Exploiting irregular measurement intervals for the analysis of growth trends of stand basal area increments: a composite model approach. *For. Ecol. Manage.* 263, 216-228

Abweichungen zwischen tatsächlicher Länge der Beobachtungsperiode und der für die Modellierung gewünschten Länge berücksichtigt werden. Ansonsten ist mit zunehmenden Verzerrungen mit zunehmender Abweichung zwischen tatsächlicher und gewünschter Länge der Messperioden zu rechnen.

Trotz dieser Probleme besteht jedoch großes Interesse das prinzipielle Potential der in großem Umfang aus periodischen Wiederholungsaufnahmen langfristiger waldwachstumskundlicher Versuchsflächen verfügbaren Zuwachsdaten für die Analyse umweltbedingter Veränderungen im Zuwachssignal nutzen zu können. Daher wurden auf der Basis des Prinzips eines multiplikativen Dekompositionsansatzes die Entwicklungsarbeiten durchgeführt, mit dem Ziel, eine konsistente statistische Methode bereit zu stellen, die Extraktion der umweltbedingten Komponente aus dem aus Perioden unterschiedlicher Dauer wiederholten Grundflächen-Aufnahmen ganzer Bestände abgeleiteten Grundflächen-Zuwachssignals ermöglicht.



Auch in diesem Fall wurde für die methodischen Entwicklungsarbeiten auf den bei der Baumart Fichte vorhandenen außerordentlich umfangreichen Messdatensatz von langfristigen waldwachstumskundlichen Versuchsflächen zurückgegriffen. Diese Datenbasis besteht aus Wiederholungsaufnahmen von 470 Fichten-Versuchsflächen an 175 verschiedenen Orten in Baden-Württemberg (Abb. 6). Aufgrund ihrer Eigenschaft als waldwachstumskundliche Versuchsflächen liegen häufig an einem Anbauort geklumpt mehrere Bestände auf. Die ältesten Messdaten stammen vom Beginn des 20. Jahrhunderts. Für diese frühe Phase sind allerdings nur verhältnismäßig wenige Bestände verfügbar. Die meisten Bestandesmessungen stammen aus den 1990er Jahren. Die letzten in diese Untersuchung eingeschlossenen Aufnahmen erfolgten im Winter 2007/2008 nach Abschluss der Wachstumsphase des Jahres 2007.

In den einbezogenen Beständen waren alle Bäume nummeriert und in Brusthöhe (1,30 m) mit einer Messmarke versehen. Periodisch wurden die Brusthöhendurchmesser (BHD) aller Bäume gemessen. Ergänzend erfolgten stichprobenhafte Messungen der Baumhöhe. Im Mittel liegen für jeden Bestand knapp 8,8 Messungen vor mit einer mittleren Periodenlänge von 4,9 Jahren zwischen den einzelnen Aufnahmen.

Diese Messungen dienten als Basis für die Berechnung der Bestandescharakteristika: Bestandeshöhenkurven, Bestandesspitzenhöhe (h100), Grundfläche, Grundflächenzuwachs, Bonität und ausscheidenden Beständen (Durchforstungen). Die Analysen wurden auf Grundfläche bzw. Grundflächenzuwachs beschränkt da diese

Parameter im Gegensatz zum Volumen direkt aus den vollständig gemessenen BHD abgeleitet werden können und nicht den Unsicherheiten bei der Volumenberechnung (Baumhöhen-Messung, Schaftformigkeit etc.) unterworfen sind.

Wachstumsmodelle zur Herleitung von Referenz-Grundflächenzuwachsen

Der traditionelle Ansatz bei der Entwicklung empirischer Wachstumsmodelle besteht in der Entwicklung und Bewertung unterschiedlicher Modellierungsansätze bzw. Modellierungsvarianten, aus deren Vielzahl schlussendlich das Modell ausgewählt wird, das „am besten“ an die Daten angepasst ist. Dieses Auswahlkriterium lässt allerdings Aspekte der Modellunsicherheiten bei Prognosen weitgehend unberücksichtigt Chatfield (1995; Draper (1995). Das schlussendlich ausgewählte Modell bildet nicht immer alle grundlegenden Prozesse adäquat und unverzerrt über die gesamte bandbreite der Prädiktor-Variablen ab. Folglich ist dann das aus einer Vielzahl möglicher Wachstumsmodelle ausgewählte „beste“ Modell notwendigerweise mit zum Teil nicht unerheblichen Modell-Unsicherheiten verbunden. Deutliches Verbesserungspotential bietet es in dieser Hinsicht, wenn die Auswahl nicht auf ein „bestes“ Modell beschränkt wird, sondern wenn sich Vorhersagen auf die Kombination verschiedener Modelle stützen Yue et al. C Yue *et al.* (2008).

Um die Unsicherheiten bezüglich der Modellstruktur zu minimieren, wird die Extraktion der umweltbedingten Komponente aus dem Grundflächen-Zuwachssignal der Messbestände analog der Vorgehensweise bei Jahrringserien ausgewählter Probestämme C Yue *et al.* (2011) auf einen multiplikativen Dekompositions-Ansatz aufgebaut. Als Besonderheit werden bei der Adaption dieses Ansatzes für periodische Grundflächenmessungen ganzer Bestände für die Ableitung situationsspezifischer Referenzzuwachswerte Wachstumsmodelle auf Baum- und Bestandesebene in Kombination verwendet. Als Basis für der bei dieser Entwicklung angepassten Wachstumsmodelle dienen die von Yue et al. (2008) vorgestellten Modell zum relativen Durchmesser-Zuwachssmodell auf Baumebene bzw. zum Grundflächenzuwachs auf Bestandesebene.

Die Anpassung dieser Wachstumsmodelle für die Zwecke des multiplikativen Dekompositionsansatz ist im Folgenden dargestellt:

Relatives Durchmesser-Zuwachssmodell (Einzelbaum-Ebene)

$$\gamma = f(A, B, R, d, H_{100}, BAL; \theta^\gamma) = \alpha_1 A^{\alpha_2} B^{\alpha_3} R^{(\alpha_4 + \alpha_5 \frac{B}{\sqrt{A}})} e^{\alpha_6 (\frac{BAL}{d})} e^{\alpha_7 (\frac{H_{100}}{d})} + \varepsilon_\gamma \quad (19)$$

mit λ als relativer Durchmesserzuwachs-Rate:

$$\gamma \equiv \frac{1}{d} \frac{\Delta d}{\Delta t} \quad (20)$$

A ist das Alter (Jahre), B die Bestandesgrundfläche ($m^2 ha^{-1}$), H_{100} die Spitzenhöhe (m), d der BHD, BAL die Grundfläche der Bäume, die stärker als der Referenzbaum sind (*basal area of trees larger than the target tree*; $m^2 ha^{-1}$), und R die relative kumulative BHD-Verteilung, die die Aspekte von Größe und Konkurrenzstatus der Bäume im Bestandeskontext widerspiegelt. Die relative kumulative BHD-Verteilung R wird definiert entsprechend Lemm (1991) as:

$$R_i \equiv \frac{\sum_{k=0}^i n_k}{\sum_{k=0}^{i, \max} n_k} \quad (21)$$

wobei n_k die Anzahl der Bäume in der BHD-Klasse k darstellt, x_{\max} die stärkste BHD-Klasse, R_x den relativen kumulativen Durchmesser in der BHD-Klasse x (Wertebereich 0 bis 1; mit einem nach zunehmendem BHD sortierten Durchmesser-Datensatz).

$$\theta^\gamma = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6, \alpha_7) \text{ sind Modellparameter und } \varepsilon_\gamma \sim N(0, \sigma_\gamma^2).$$

Im Modell (19) sind A, BA und H_{100} Variablen auf Bestandesebene und d, R und BAL Variablen auf Baumebene. Der Quotient BAL/d wird als Näherungswert (Proxy) genutzt, für die kombinierte Wirkung der Effekte von Baumgröße und Konkurrenzstatus auf den Zuwachs. Der Quotient H_{100}/d ist ein Indikator für die Standortsbonität bei einem vorgegebenen BHD. Das relative

Durchmesserzuwachs-Modell berücksichtigt die Interaktionseffekte $R^{(\alpha_4 + \alpha_5 \frac{B}{\sqrt{A}})}$ des relativen kumulativen Durchmessers eines spezifischen Baumes mit der Bestandesdichte und dem Alter.

Den jährlichen Durchmesserzuwachs erhält man aus der Gleichung:

$$\Delta d_{i,t+1} = \gamma_{i,t+1} \cdot d_{i,t} \quad (22)$$

$\Delta d_{i,t+1}$ beschreibt den jährlichen Durchmesserzuwachs des Baumes i zum Zeitpunkt $t+1$; $\gamma_{i,t+1}$ ist die relative Durchmesserzuwachs-Rate und $d_{i,t}$ der BHD des Baumes i zum Zeitpunkt t .

Aus dem Durchmesserzuwachs-Modell auf Einzelbaumebene (19) errechnet sich der Bestandes-Grundflächenzuwachs wie folgt:

$$\hat{\Delta B}_{t+1}^T = \sum_{i=1}^n \hat{\Delta b}_{i,t+1} = \sum_{i=1}^n \kappa \cdot \Delta d_{i,t+1} \cdot (2d_{i,t} + \Delta d_{i,t+1}) = \sum_{i=1}^n \kappa \cdot d_{i,t}^2 \cdot (2\gamma_{i,t+1} + \gamma_{i,t+1}^2) \quad (23)$$

$\hat{\Delta B}_{t+1}^T$ fasst den aus den Einzelbaumzuwächsen kumulierten Bestandes-Grundflächenzuwachs zum Zeitpunkt $t+1$ zusammen;

dabei ist $\hat{\Delta b}_{i,t+1}$ der für Baum i zum Zeitpunkt $t+1$ geschätzte Grundflächenzuwachs und κ ist der Umrechnungsfaktor für die Grundfläche (3,14159/40000).

Die Varianz der Bestandes-Grundflächenzuwachs-Schätzung aus dem Einzelbaum-Zuwachsmodell wird definiert als:

$$\sigma_T^2 = \frac{1}{n} \cdot \frac{1}{m_i} \frac{1}{p_j} \sum_i^n \sum_j^{m_i} (\Delta B_{i,j,t+p_j} - \hat{\Delta B}_{i,j,t+p_j}^T)^2 \quad (24)$$

wobei $\Delta B_{i,j,t+p_j}$ den tatsächlich gemessenen Grundflächezuwachs bei der Messung j mit der Periodenlänge p_j im Bestand i darstellt.

In der für die Modellentwicklung herangezogenen Datenbasis entwickelte sich die Mehrzahl der in der jüngeren Vergangenheit gemessenen Versuchsbestände unter dem Einfluss eines Z-Baum-Durchforstungsregimes (Hochdurchforstung zugunsten fest ausgewählter Zukunfts-Bäume). Bei dieser Art von Durchforstungen wird das Wachstum der Z-Bäume durch gezielte Freistellung von benachbarten Konkurrenten speziell gefördert Abetz & Klädtke (2002; Hein *et al.* (2008). Als Folge dieser gezielten Freistellung weicht die Zuwachsdynamik von Z-Bäumen von der gleich starker Bäume im selben Bestand zum Teil deutlich voneinander ab. Um dies zu berücksichtigen, wurde zwischen den beide Gruppen von Bäumen im Modell unterschieden. Eine effektive Methode für eine solche Parameterschätzung ist die Schätzung in einem simultanen Gleichungsmodell Burkhart & Sprinz (1984; Huang & Titus (1999; Reed *et al.* (1986).

Das relative Durchmesserzuwachs-Modell für einen Nicht-Z-Baum ist:

$$\gamma^F = f(A, BA, H_{100}, R^F, d^F, BAL; \theta_F^\gamma) + \varepsilon_\gamma^F \quad (25)$$

Und das relative Durchmesserzuwachs-Modell für einen Z-Baum ist:

$$\gamma^Z = f(A, BA, H_{100}, R^Z, d^Z, BAL; \theta_Z^\gamma) + \varepsilon_\gamma^Z \quad (26)$$

mit A als Bestandesalter, BA als Bestandesgrundfläche, H_{100} als Spitzenhöhe, d^Z und d^F als BHD des jeweiligen Z-Baums bzw. Nicht-Z-Baumes, R^Z und R^F als relativer kumulativer BHD der Z-Bäume bzw. Nicht-Z-Bäume, BAL als Grundflächensumme der Bäume, die stärker als der jeweilige betrachtete Baum sind und θ_Z^γ sowie θ_F^γ als Modellparameter für Z-Bäume bzw. Nicht-Z-Bäume.

Daraus folgt das Gesamtmodell für Z-Bäume und Nicht-Z-Bäume als:

$$\gamma = \lambda \cdot \gamma^Z + (1 - \lambda) \cdot \gamma^F \quad (27)$$

wobei λ eine Dummy-Variable ist mit dem Wert "1" für Z-Bäume und "0" für Nicht-Z-Bäume.

Multiplikatives Dekompositionsmodell für die Bestandesebene

Für den Grundflächenzuwachs auf Bestandesebene wurde folgendes multiplikative Dekompositionsmodell definiert:

$$E(\Delta B | A, S, B, U; \theta^{\Delta B}) = f(A) \cdot f(S) \cdot f(B) \cdot f(U) \quad (28)$$

wobei ΔB der Bestandesgrundflächen-Zuwachs ist, $f(A)$ die Zuwachsreaktion im Alter (A), $f(S)$ die Zuwachsreaktion auf die Bonität (S), $f(B)$ die Zuwachsreaktion auf Bestandesdichte und Durchforstungsregime (B) und $f(U)$ die Zuwachsreaktion auf Umwelteinflüsse (U).

Da der Fokus dieser Methode auf der Identifikation von Wachstumstrends liegt, die durch Veränderungen wachstumsrelevanter Umweltfaktoren zurückgehen, entspricht das erwartete Bestandeswachstum dem Bestandesgrundflächen-Zuwachs unter konstanten Umweltbedingungen, der wie folgt formuliert werden kann:

$$\hat{\Delta B} = E(\Delta B | A, S, B) = f(A, S, B; \theta^{\Delta B}) \quad (29)$$

In diesem Model variiert der Parametervektor $\theta^{\Delta B}$ zeitunabhängig und verändert sich nicht im Lauf der Zeit.

Aufbauend auf dem Bestandesgrundflächenzuwachs-Modell von Yue et al. (2008) wurde zusätzlich eine Interaktion zwischen Bestandesgrundfläche, Alter und Bonität integriert:

$$\Delta B_{t+1}^S = f(A_t, S_t, B_t; \theta^{\Delta B}) = \alpha_1 S_t^{\alpha_2} A_t^{\alpha_3} e^{\alpha_4 B_t} B_t^{(\alpha_5 + \alpha_6 \frac{A_t}{S_t})} + \epsilon_{\Delta B} \quad (30)$$

in dem ΔB_{t+1}^S den Bestandesgrundflächenzuwachs darstellt, der sich auf der Basis des für die Bestandesebene spezifizierten Zuwachsmodells ergibt. $\theta^{\Delta B} = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6)$ sind Funktionsparameter, A_t das Bestandesalter zum Zeitpunkt t , S_t die Bonität des Bestandes zum Zeitpunkt t , B_t die Bestandesgrundfläche zum Zeitpunkt t und $\epsilon_{\Delta B} \sim N(0, \sigma_{\Delta B}^2)$.

Im Modell wird B_t ausgedrückt durch eine Proxy-Variable der Bestandesdichte insgesamt und der Bestandesbonität S_t (Bonität: erwartete H_{100} im Alter von 100 Jahren; in m). Auf diese Weise beinhaltet das Bestandesgrundflächenzuwachs-Modell nicht nur Alter, Bestandesdichte und Bonität, sondern auch Interaktionen zwischen diesen Variablen.

Aus den Komponenten dieses Modells (Gleichung 28), läßt sich der bei einer gegebenen Bestandesdichte maximal mögliche Grundflächenzuwachs eines Bestandes wie folgt ableiten:

$$\Delta B_{\max} \leftarrow B = \frac{\alpha_5 S + \alpha_6 A}{-\alpha_4 S} \quad (31)$$

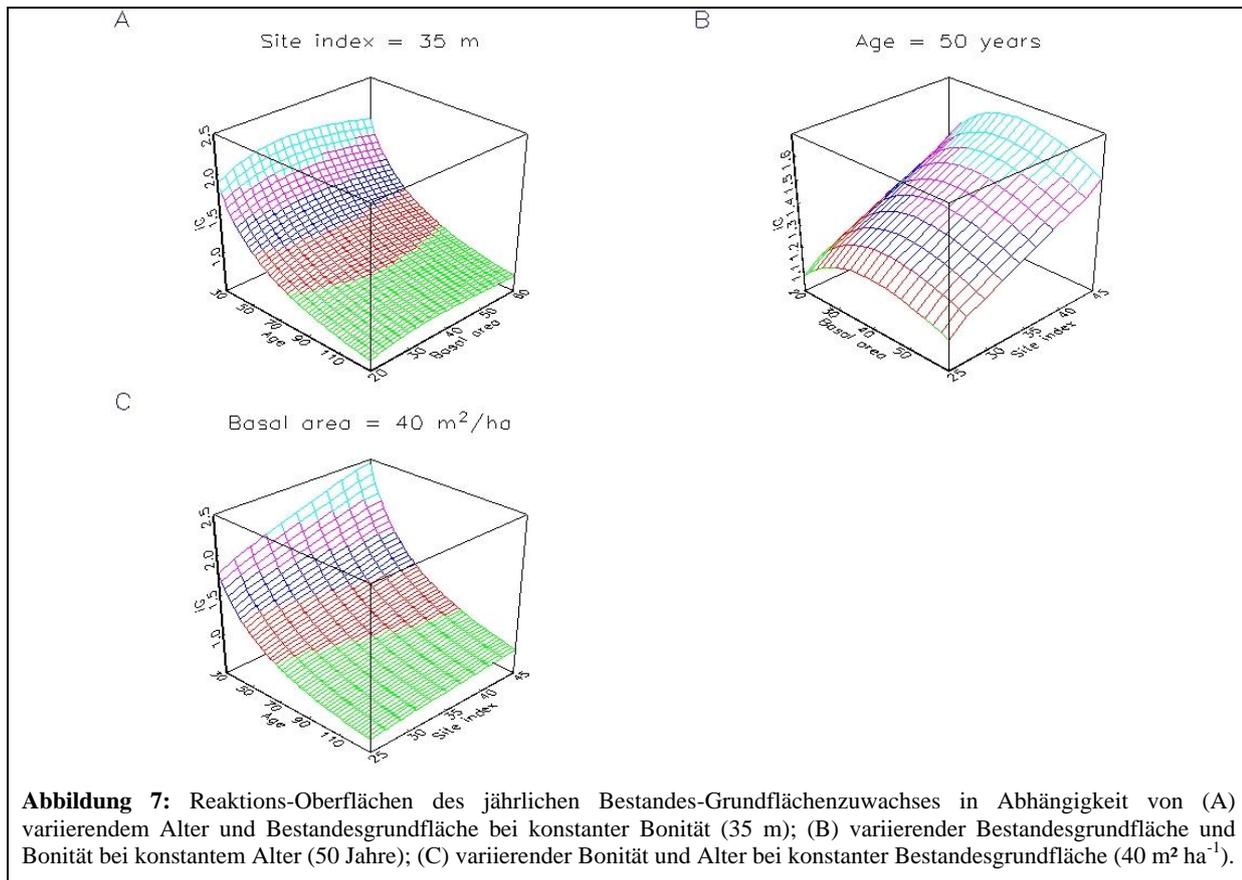
Gleichung 31 zeigt dabei, dass sowohl die Bestandesbonität als auch das Bestandesalter Einfluss auf den maximal möglichen Grundflächenzuwachs haben (Abb. 7A&B).

Kombination der Baum- und Bestandes-Zuwachsmodelle

Um sowohl die Modellschätzung zu optimieren als auch die Prognoseunsicherheit zu minimieren wurden die Grundflächenzuwachs-Schätzungen auf Basis des Einzelbaum-basierten Modells und des Bestandes-basierten Modells in einem kombinierter Schätzer zusammengeführt Granger & Ramanathan (1984)

$$E(\Delta B_{i,j,t+p_j}) = \hat{\Delta B}_{i,j,t+p_j}^C = \alpha + \beta_1 \sum_{t=1}^{p_j} \hat{\Delta B}_{i,j,t}^T + \beta_2 \sum_{t=1}^{p_j} \hat{\Delta B}_{i,j,t}^S \quad (32)$$

in dem $\hat{\Delta B}_{i,j,t}^T$ den aus den kumulierten Einzelbaum-Schätzungen abgeleiteten Grundflächenzuwachs zum Zeitpunkt t bei der Messung j des Bestandes i , darstellt. $\hat{\Delta B}_{i,p_j}^C$ ist der kombinierte Schätzer für den Grundflächenzuwachs gültig für die gesamte Dauer einer spezifischen Messperiode p_j (entspricht dem erwarteten Bestandesgrundflächenzuwachs $E(\Delta B_{i,p_j})$) und α, β_1, β_2 sind Modellparameter.



Die Varianz des kombinierten Schätzers definiert sich als:

$$\sigma_c^2 = \frac{1}{n} \cdot \frac{1}{m_i} \frac{1}{p_j} \sum_i^n \sum_j^{m_i} (\Delta B_{i,j,t+p_j} - \hat{\Delta B}_{i,j,t+p_j}^c)^2 \quad (33)$$

mit n als Anzahl der Bestände und m_i als der Anzahl von Messungen im Bestand i .

Üblicherweise steigt mit zunehmender Diskrepanz der Schätzterme aus Einzelbaum- bzw. Bestandes-basierten Modellen der Gewinn für die Zuwachsschätzung, der durch ihre Kombination entsteht.

Ein anderes Problem ergibt sich aus der Tatsache, dass die Überschneidung zwischen den beiden Schätztermen möglicherweise Multikollinearität in multiplen Regressionen verursachen kann. Um dieses Problem zu minimieren werden bei dieser Modellierung Ridge-Regressionen A.E. Hoerl & Kennard (1970) bei der Kombination der Baum- und Bestandes-basierten Zuwachsmodele angewandt.

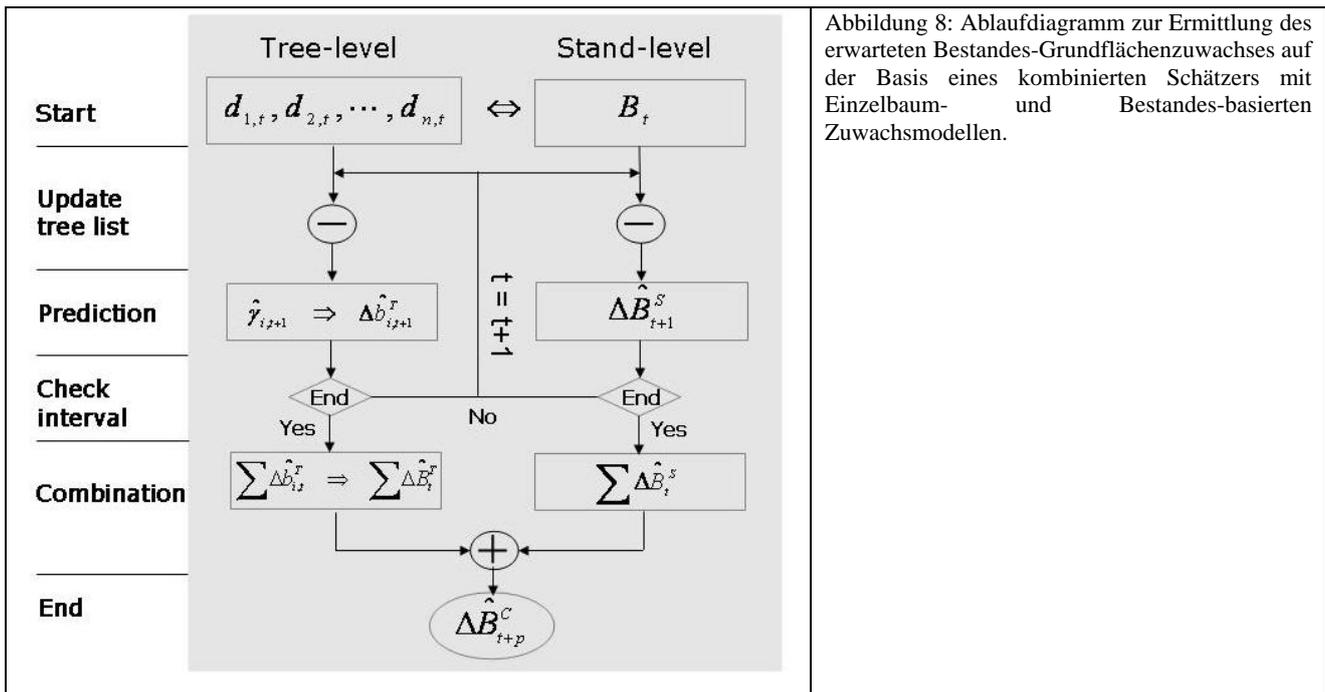
Das jahrespezifische Residuum zwischen gemessenem und erwarteten Bestandesgrundflächenzuwachs in einer Messperiode der Länge P ist definiert als:

$$\varepsilon_{t+p} = \frac{\Delta B_{t+p} - \hat{\Delta B}_{t+p}^c}{p} \quad (34)$$

Aufbauend auf der Kombination des Einzelbaum-basierten Modells (Gleichung 27) 9) und des Bestandes-basierten Modells (Gleichung 30) erfolgt die Herleitung des Bestandesgrundflächenzuwachses in folgenden Schritten (Abb. 8):

1. Baumliste prüfen und Ausschluss von Bäumen, die als tot oder entnommen gekennzeichnet sind; anschließend Berechnung der Bestandesgrundfläche.
2. Einzelbaumweise Schätzung der relativen Durchmesser-Zuwachsrates entsprechend Gleichung 27; Berechnung des Grundflächenzuwachses der einzelnen Bäume und Aggregation zum Grundflächenzuwachs des Bestandes $\Delta \hat{B}_t^e$ (Gleichung 23). Schätzung des Bestandesgrundflächenzuwachses $\Delta \hat{B}_t^s$ mithilfe des Bestandes-basierten Modell entsprechend Gleichung 30.
3. Prüfung, ob das Ende der Messperiode (p) erreicht wurde. Falls ja, Ende der Prozedur, ansonsten fortfahren mit Schritt 1 für das nächste Jahr.
4. Die aus den Einzelbaumschätzungen akkumulierte Schätzung des Bestandesgrundflächenzuwachses (Gleichung 27) und die Bestandes-basierte Zuwachsschätzung (Gleichung 30) werden im kombinierten Schätzer $\Delta \hat{B}_{t,p}^c$ (Gleichung 32) zusammengeführt, der den erwarteten periodischen Bestandesgrundflächenzuwachs ergibt.

Mit dieser schrittweisen Vorgehensweise wurden die erwarteten Bestandesgrundflächenzuwächse für jeden Versuchsbestand und für jede Aufnahmeperiode ermittelt. Die so ermittelten Erwartungswerte konnten dann als Referenzgrößen in der Wachstumstrendanalyse weiter verwendet werden.



Ableitung annualisierter Modellparameter aus Messperioden unterschiedlicher Länge

In den meisten Ertragstafeln oder empirischen Bestandeswachstumsmodellen werden Zuwachsprognosen in festen Zeitschritten von im Regelfall 5 oder 10 Jahren erstellt. Die Anpassung solcher Modell baut üblicherweise auf periodisch gemittelten Messwerten auf unter der Annahme, das jährliches Baum- bzw. Bestandeswachstum während der gesamten Messperiode konstante jährliche raten aufweist. Faktisch führt diese Annahme konstanter Wachstumsraten jedoch zu verzerrten Schätzungen jährlicher Zuwachsgrößen McDill & Amateis (1993). Ausserdem erfassen in fixen, mehrjährigen Zeitschritten arbeitende Zuwachsmodelle nicht in ausreichendem die kurzfristigen Auswirkungen von Veränderungen der Bestandesdichte bzw. von Witterungsschwankungen auf das Wachstum Henning & Burk (2004; Weiskittel *et al.* (2007).

Cao (2000) führte eine iterative Methode ein, die Durchmesserzuwachs der Einzelbäume ebenso wie Bestandescharakteristika in jährlicher Auflösung aus Messperioden unterschiedlicher Periodenlänge schätzt. Die Methode lässt die Zuwachsraten jährlich variieren in Abhängig der Veränderungen der Bestandes- und Bauparameter während der Messperiode. Die Überlegenheit solcher quasi-annualisiert aufgelösten Zuwachsmodelle gegenüber schlichten Periodenmittelwerten wird sowohl aus Sicht der statistischen Performance deutlich als auch aus der Sicht der zugrundeliegenden biologischen Abläufe Cao (2000; Cao *et al.* (2002).

Nord-Larson (2006) und Yue *et al.* (2008) wendeten die Methode mit gutem Erfolg an bei der Entwicklung annualisierter Zuwachsmodelle auf der Basis von Messperioden mit sehr unterschiedlichen Periodenlängen.

Im Zusammenhang mit der vorliegenden Arbeit basiert die Modellparametrisierung auf einer „overall squared error loss“ Funktion. Für eine nicht-lineare Optimierung wurde dabei die entsprechende Funktion von Yue *et al.* C Yue *et al.* (2008) wie folgt modifiziert. Für annualisierte Schätzungen im relativen Durchmesserzuwachs-Modell auf Einzelbaumebene (Gleichung 26) lautet die Funktion.

$$L(\theta^Z, \theta^F) = \sum_i^n (\delta_i^Z + \delta_i^F) \tag{35}$$

wobei δ_i^Z is die “squared error loss” Funktion für Z-Bäume im Bestand i darstellt und δ_i^F die entsprechende Funktion für die anderen Bäume (Nicht-Z-Bäume) im Bestand i , n ist die Anzahl der Bestände in der zugrundeliegenden Datenbasis.

Für annualisierte Schätzungen im Bestandes-basierten Zuwachsmodell (Gleichung 30) wurde die ursprüngliche „squared error loss“ Funktion angewendet C Yue *et al.* (2008).

Analog ermittelt wurden die Parameter für die jährlichen Bestandesgrundflächen-Zuwachsprojektionen auf der Basis des Bestandes-basierten Modells (Gleichung 30). In diesem fall wurden jedoch lediglich der Bestandesgrundflächenzuwachs (ΔB), das Bestandesalter (A) und die Bestandesgrundfläche (BA) projiziert und jährlich aktualisiert (entsprechend Gleichung 30). Dabei wurde unterstellt, dass sich während der einzelnen Messperioden die Bestandesbonität nicht veränderte.

Die iterative Bestimmung der Parameter für das annualisierte Modell relativer Durchmesser-Zuwachsraten erfolgte in folgenden Schritten:

1. Die Konstanten $\theta_i^r = (\theta_i^y, \theta_i^r)$ werden für Z-Bäume (Gleichung 26) und andere Bäume (Gleichung 25) getrennt ermittelt und dienen als initiale Parameterschätzung für den Beginn der iterativen Prozedur.

2. Für jeden Bestand wurden Interimsalter (A), BHD (*dbh*), H_{100} , relativer kumulativer BHD (R) für Z-Bäume und andere Bäume sowie die Bestandesgrundfläche berechnet und jährlich aktualisiert entsprechend den Gleichungen 25 und 26.
3. Dann wurde geprüft, ob die Länge der projizierten Periode der der Messperiode entsprach. Wenn nicht, wurde Schritt 2 wiederholt bis zum Erreichen der Länge der Messperiode.
4. Nachdem das Wachstum für alle Messungen in allen Beständen projiziert worden war, wurde die loss Funktion (Gleichung 35) berechnet und mithilfe eines Simplex-Algorithmus Nelder & Mead (1965; Press *et al.* (1992) eine iterative nicht-lineare Optimierung durchgeführt. Die Reiteration $\tilde{\theta}_i^\gamma$ (Schritt 2) wurde so lange fortgeführt, bis die Abbruchkriterien erfüllt waren und konvergierten.

Entsprechend erfolgte auch die annualisierte Parameterisierung des Bestandes-basierten Modells für den Grundflächenzuwachs entsprechend Gleichung 30 C Yue *et al.* (2008).

Modellierung von Grundflächen-Zuwachstrends auf der Basis periodischer Zuwachsmessungen.

Die Auswirkungen von Veränderungen wachstumsrelevanter Umweltfaktoren auf die Bäume eines Bestandes können im Lauf der Zeit Veränderungen unterworfen sein, die sich in einem explizit deterministischen Modell nicht befriedigend beschreiben lassen. Für solche Fällen bieten verallgemeinerte additive Modelle (GAM; Hastie & Tibshirani (1990)) eine Kategorie Daten-getriebener Modelle, die die Aufdeckung nicht linearer Effekte ermöglichen. Auch in der vorliegenden Arbeit wurde solch ein GAM-Ansatz verwendet, um diejenige Komponente im gemessenen Zuwachssignal über dem Kalenderjahr zu modellieren, die durch Umweltveränderungen bedingt war:

$$g(\mu) = s(T) + \varepsilon \quad (36)$$

mit $s(T)$ für die nicht-parametrische Glättung; g ist die link-Funktion und ε ein Zufallsfehlerterm. Verwendet wurde eine lokale Regressionsglättung. Zuwachstrends lassen sich damit wie folgt beschreiben:

$$\eta = E\left(\frac{\Delta B}{E(\Delta B)}\right) = f(U) \Rightarrow s(T) \quad (37)$$

Für die Analyse von Zuwachstrends werden die im Zeitverlauf variierenden Effekte von Umwelteinflüssen auf das Wachstum als Funktion des Kalenderjahrs beschrieben.

Da Wiederholungsmessungen in Versuchsbeständen nicht jährlich erfolgen sondern in mehrjährigen Intervallen unregelmäßiger Länge beziehen sich Abweichungen bzw. Quotienten zwischen gemessenem Zuwachs (ΔB) und erwartetem Referenz-Zuwachs ($E(\Delta B)$) jeweils auf die gesamte Länge der Messperiode und werden jedem einzelnen Kalenderjahr zugeordnet, das in die entsprechende Messperiode fällt. Eine Zuordnung zu lediglich einem periodencharakteristischen Kalenderjahr (z.B. zu Beginn / Mitte / Ende der Periode) erscheint wenig zweckmäßig, da die zu Verschiebungen des tatsächlichen Zuwachstrends führen dürfte.

Die Zuwachstrends werden als graduelle Abweichungen zwischen dem tatsächlich gemessenen Zuwachs und dem erwarteten Referenz-Zuwachs über Kalenderjahr ausgedrückt. Es ist daher ein Referenzjahr erforderlich, um die Zuwachsniveaus verschiedener Perioden vergleichen zu können.

Bei Festlegung eines Referenzjahres T_0 ergibt sich das relative Zuwachsniveau $\tilde{s}(T)$ im Kalenderjahr T als:

$$\tilde{\eta} = E\left(\frac{\Delta B}{\Delta B} \mid T_0\right) = f(U \mid T_0) \Rightarrow \tilde{s}(T \mid T_0) = \frac{s(T)}{s(T_0)} \quad (38)$$

Eine orientierende Analyse der Daten deutete eine erhebliche Fluktuation des Bestandesgrundflächenzuwachses etwa ab den 1940er Jahren an. Im Gegensatz dazu erschien das Grundflächen-Zuwachsniveau von der Jahrhundertwende bis in die 1940er Jahre vergleichsweise stabil. Daher wurde das Jahr 1905 als Referenzjahr ausgewählt, da es im Bereich der Jahrhundertwende lag und für dieses Jahr eine als ausreichend erachtete Anzahl an Messungen zur Verfügung standen. Die den jeweiligen Kalenderjahren zugeordneten Quotienten wurden als Prozent-Wert des Quotienten in diesem Referenzjahr ausgedrückt und der Zuwachstrend als GAM charakterisiert. Für die Trendglättung wurde wiederum eine LOWESS-Funktion verwendet.

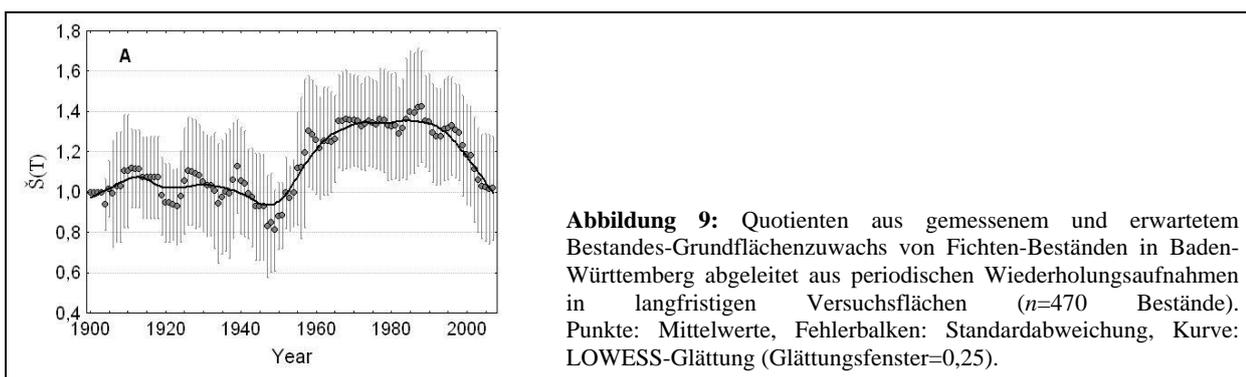


Abbildung 9: Quotienten aus gemessenem und erwartetem Bestandes-Grundflächenzuwachs von Fichten-Beständen in Baden-Württemberg abgeleitet aus periodischen Wiederholungsaufnahmen in langfristigen Versuchsflächen ($n=470$ Bestände). Punkte: Mittelwerte, Fehlerbalken: Standardabweichung, Kurve: LOWESS-Glättung (Glättungsfenster=0,25).

4 Ergebnisse

4.1 LANGFRISTIGE ZUWACHSTRENDS

Die Extraktionsmodelle wurden die Baumarten Fichte, Tanne, Buche (Datenbasis: Jahrringanalysen von Einzelbäumen & periodische Grundflächenaufnahmen ganzer Bestände) sowie Douglasie (Datenbasis: Jahrringanalysen von Einzelbäumen angepasst). Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird hier auf die Auflistung der Modellparameter der angepassten Modelle jedoch verzichtet. Die auf der Basis der angepassten Modelle extrahierten umweltbedingten Komponenten der jeweiligen Zuwachsgrößen sind in einer Datenbank abgelegt. Sie wurden in Form von Zuwachs-Trendquotienten (gemessener Zuwachs / erwarteter Referenz-Zuwachs) im Rahmen des Projektes ausführlichen Trendanalysen unterzogen.

Wie bereits dargelegt, geht es bei der Untersuchung möglicher Wachstumstrends, die durch Umweltveränderungen hervorgerufen werden, prinzipiell darum, zunächst alle Komponenten im gemessenen Wachstumssignal zu eliminieren, die durch Veränderungen des Alter und durch Veränderungen in Bestandesdichte und -struktur verursacht werden. Die Erwartung ist, dass der Zuwachsquotient aus tatsächlich gemessenem und erwartetem Durchmesserzuwachs außer umweltbedingten Komponenten keine anderen Einflussfaktoren auf den Zuwachs mehr enthält, und dass dieser Quotient daher unter unveränderten Umweltbedingungen konstant ist.

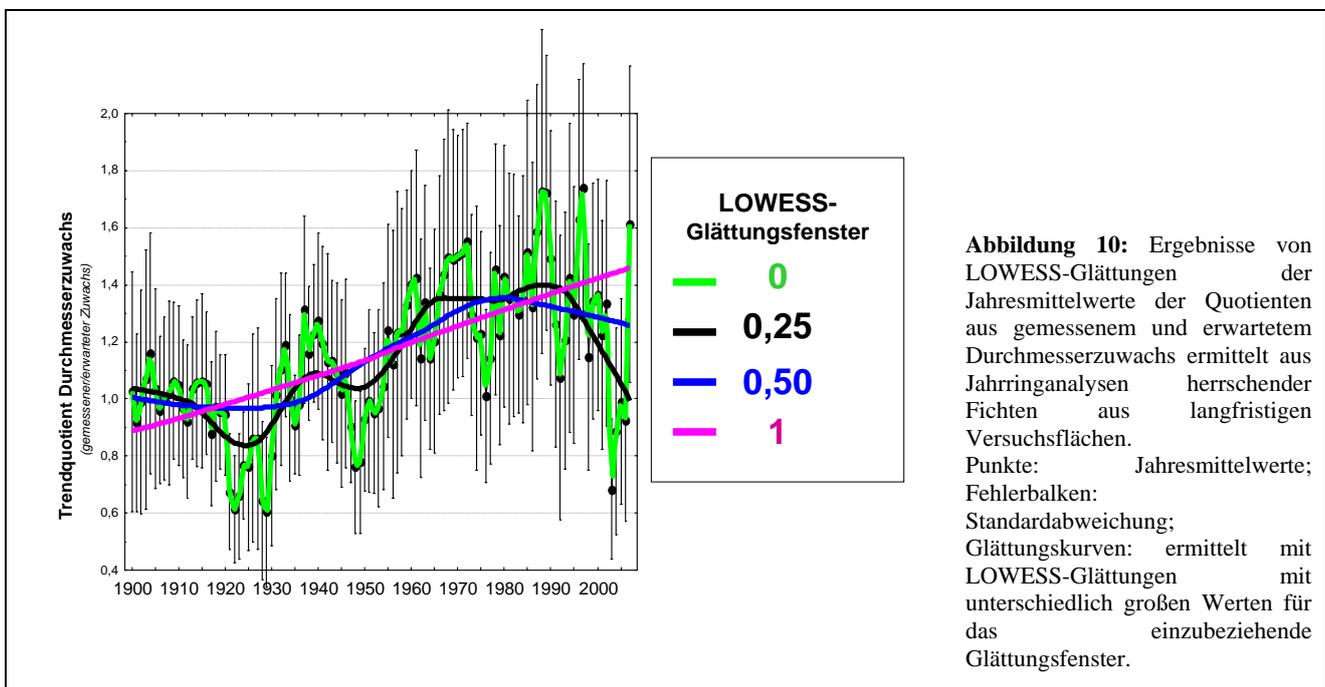
Tatsächlich treten jedoch im Zeitverlauf Umweltveränderungen auf, die den Zuwachs beeinflussen. Daraus folgt, dass die Aufdeckung von Trendänderungen im Zuwachs mit der Aufgabe korrespondiert, die Veränderungsdynamik der Wachstumsquotienten über dem Kalenderjahr zu identifizieren. Abweichungen der tatsächlichen Quotienten im Zeitverlauf vom Wert „1“ lassen sich also als Indikator für Veränderungen im Bereich wachstumsrelevanter Umweltfaktoren heranziehen. Dies gilt insbesondere wenn es sich um mittel- bis längerfristig gerichtete Abweichungstrends handelt.

4.2 VERGLEICH: DURCHMESSERZUWACHSTRENDS (BAUM) – GRUNDFLÄCHENZUWACHSTRENDS (BESTAND)

Solche Trends können prinzipiell arbiträre Formen aufweisen. Deterministische, parametrische Modelle erscheinen jedoch prinzipiell ungeeignet für die Beschreibung arbiträrer Trendformen. Bessere Eignung zur Beschreibung nicht-linearer Beziehungen bieten dagegen Modelle aus der Familie der verallgemeinerten linearen Modelle (GAM: *generalized additive models*; Hastie & Tibshirani (1990)). So wurden in der vorliegenden Arbeit LOWESS-Glättungen (*locally weighted scatterplot smoothing*; Cleveland (1979)) an die Daten-Zeitreihen der Quotienten aus gemessenem und erwartetem Zuwachs angepasst; und zwar sowohl für

die Beschreibung der Durchmesser-Zuwachstrends auf der Basis von Jahrringanalysen ausgewählter Probestämme als auch für Grundflächen-Zuwachstrends ganzer Bestände auf der Basis periodischer Wiederholungsaufnahmen.

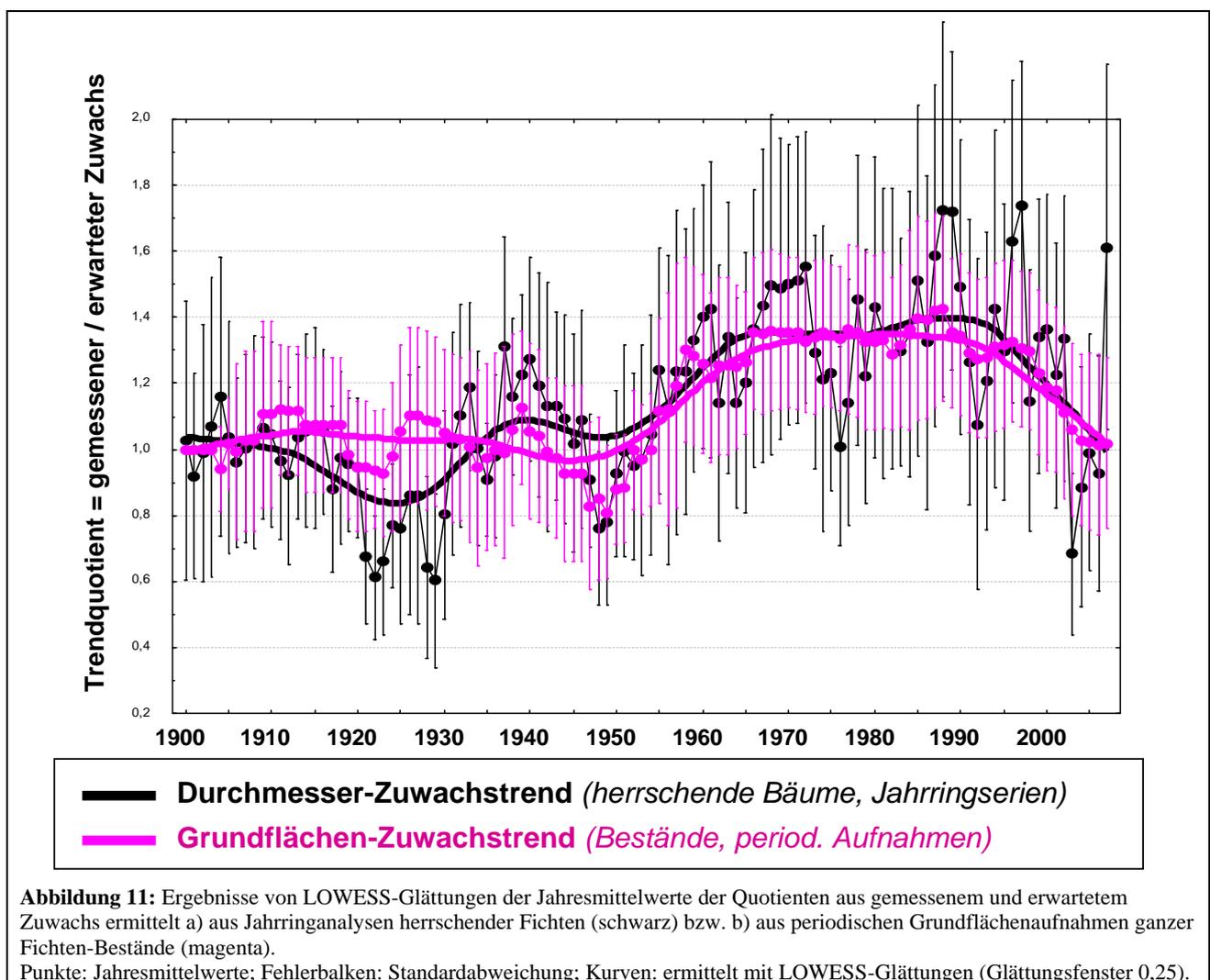
Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass die Auswahl des Glättungsparameters von zentraler Bedeutung ist, und dass es kein einheitlich anwendbarer Indikator existiert, der zur Bewertung eines adäquaten Glättungsgrades herangezogen werden könnte. Der Glättungsgrad sollte dabei allerdings stets vor dem Hintergrund des Zwecks der jeweiligen Analyse gewählt werden. Abbildung 10 zeigt am Beispiel des Durchmesserzuwachstrends herrschender Fichten die Auswirkungen unterschiedlich großer Glättungsfenster auf die resultierende LOWESS-Glättung: je größer das Glättungsfenster gewählt wird um „steifer“ fällt die Glättungskurve aus; bei maximaler Größe des Glättungsfensters (Wert=1; alle Kalenderjahre einbezogen) nähert sie sich einer Geraden an.



Da bei der Trendanalyse der umweltbedingten Komponente des Zuwachssignals mittel- bis langfristige Zuwachsveränderungen im Fokus stehen, erachteten wir ein Fenster von 0,25 als Glättungsparameter der LOWESS-Funktion für angemessen. Alle folgenden LOWESS-Glättungen basieren daher auf diesem Glättungsfenster.

Trotz großer Unterschiede hinsichtlich der verwendeten Datenbasis und Methodik zur Extraktion der umweltbedingten Komponente aus dem gemessenen Zuwachssignal ergaben sich sowohl für die Durchmesser-Zuwachstrends aus Jahrringanalysen herrschender Probestämme (vgl. Kap. 2.1) und für die Grundflächen-Zuwachstrends aus periodischen Wiederholungsmessungen ganzer Bestände (vgl. Kap. 2.2) mittel- bis langfristige Trendverläufe aus der LOWESS-Glättung (Glättungsfenster: 0,25) der Jahresmittelwerte der Zuwachstrendquotienten (gemessener / erwarteter Zuwachs). Abbildung 11 zeigt am Beispiel Fichte exemplarisch den Vergleich der aus beiden Methoden abgeleiteten Zuwachstrendverläufe in Baden-Württemberg. Etwa ab den 1940er Jahren verlaufen beide Trendkurven nahezu synchron.

Auffällig ist, dass das Streuband der Jahresmittelwerte der Trendquotienten bei den periodischen Wiederholungsaufnahmen deutlich geringer ausfällt. Wir vermuten, dass hierfür vor allem zwei Faktoren ausschlaggebend sind: Zum einen beruht die jährliche Variation bei der modellierten Quasi-Annualisierung der in mehrjährigen Perioden erhobenen Messungen auf der zeitlichen Veränderung bestandessimmanenter wachstumsrelevanter Faktoren (v.a. Bestandesdichte). Durch Witterungsschwankungen ausgelöste kurzfristige (jährliche) Schwankungen werden dadurch nicht erfasst. Die witterungsbedingten jährlichen Schwankungen werden daher über der jeweiligen Messperiode gemittelt. Die aus mehrjährigen Messperioden abgeleiteten jährlichen Grundflächen-Zuwachsschwankungen weisen daher eine geringere Variationsbreite auf, als die tatsächlich in jährlicher Auflösung gemessenen Durchmesser-Zuwächse. Zum anderen besteht auch die Möglichkeit, dass zumindest ein Teil der auf Baumebene auftretenden Zuwachs-Variation innerhalb des Bestandes kompensiert wird.



4.3 HAUPTBAUMARTEN IM VERGLEICH

Die Ergebnisse der Zuwachstrendanalysen bei den untersuchten sechs Hauptbaumarten sind in Abbildung 12 zusammengefasst. Dargestellten sind die Zuwachstrends auf Landesebene ermittelt aus Jahrringserien

ausgewählter, herrschender Probestämme bzw. aus periodischen Wiederholungsaufnahmen der Grundfläche ganzer Bestände. Aufgrund der Datenabdeckung sind die LOWESS-Glättungen nur bis einschließlich dem Kalenderjahr 2006 berechnet. Deutlich wird, dass sich die auf unterschiedlicher Datengrundlage abgeleiteten Trendverläufe bei innerhalb der Baumart insbesondere ab den 1950er Jahren im Kurvenverlauf im Wesentlichen entsprechen. Damit können die Trendverläufe als gesichert gelten

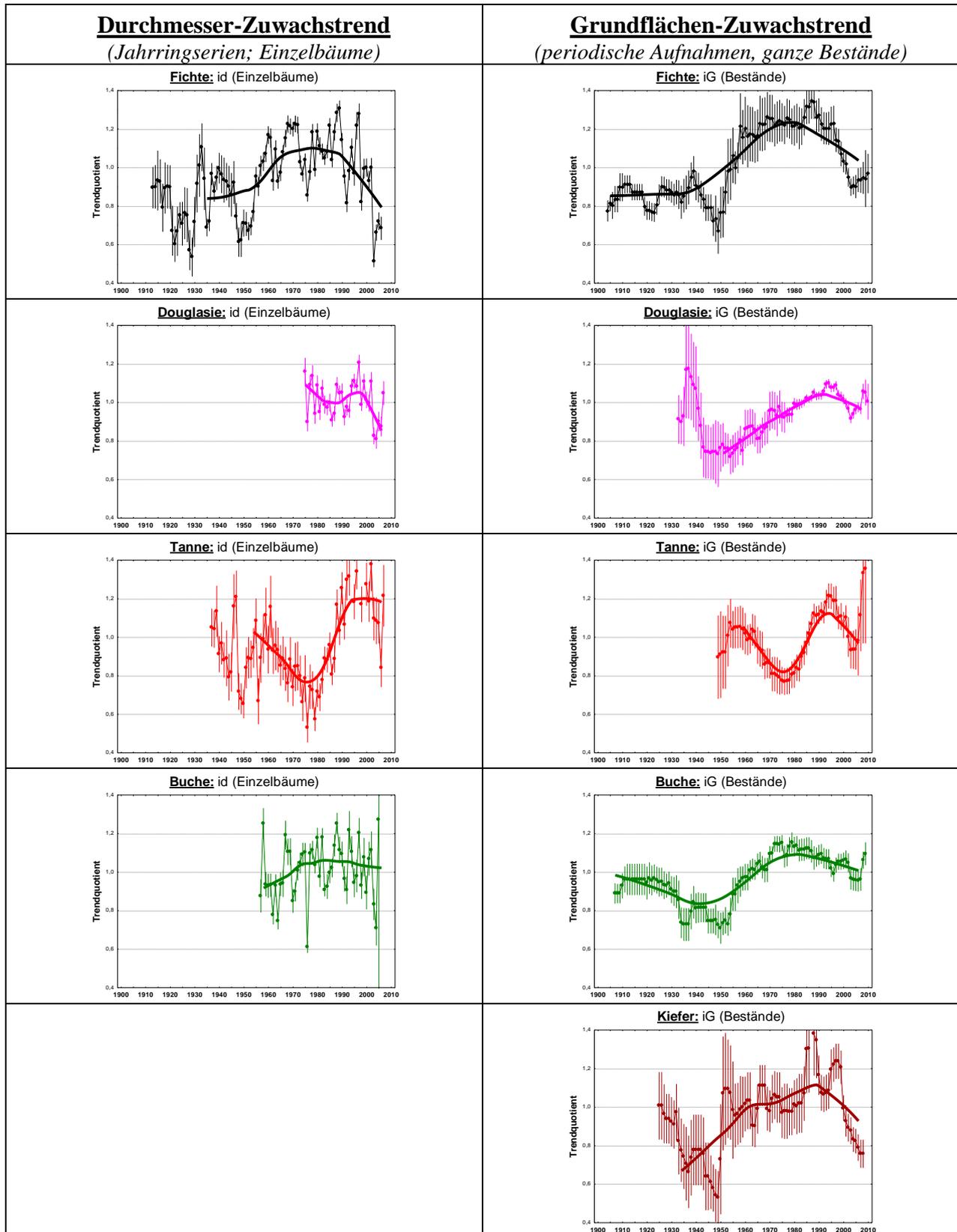
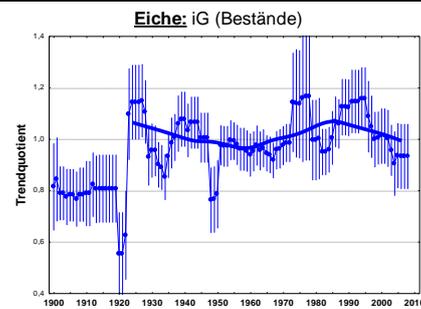


Abbildung 12. Entwicklung der Trendquotienten für Durchmesserzuwachs (id) von Einzelbäumen abgeleitet aus Jahrringanalysen herrschender Probestämme auf Versuchsflächen (linke Spalte) und Grundflächenzuwachs (iG) ganzer Bestände abgeleitet aus periodischen Vollaufnahmen von Versuchsbeständen (rechte Spalte). Die Grafiken enthalten die auf die Jahresmittelwerte der Periode 1961-1970 standardisierten Quotienten (Punkte), die 95% Konfidenzintervalle (senkrechte Balken) sowie eine LOWESS-Glättungen (0,5) für Bereiche mit guter Datenabdeckung.



Soweit Daten vorhanden sind, verläuft der Zuwachstrend bei allen Baumarten in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts auf vergleichsweise niedrigem Niveau. Insbesondere in den 1920er Jahren und den 1940er Jahren scheint der Zuwachstrend zu sinken. Allerdings sind bei allen Baumarten in dieser Zeit die einbezogenen Fallzahlen (Jahrringserien; Wiederholungsaufnahmen) vergleichsweise gering. Dies gilt insbesondere für Tanne und Douglasie. Wünschenswert wäre für die erste Hälfte des 20. Jahrhunderts eine Absicherung der Befunde durch Erweiterung der Datenbasis.

Etwa ab den 1950er Jahren steigt bei den vier Baumarten der Zuwachstrend deutlich an. Bei Fichte, Douglasie, Kiefer, Buche und (mit Einschränkungen) Eiche hält der Anstieg mehr oder weniger kontinuierlich bis in die 1980er Jahre an. Bei Tanne tritt dagegen in den 1970er Jahren eine markante Trenddepression auf. Nach Abklingen dieser Depression steigt jedoch auch bei dieser Baumart der Zuwachstrend dann bis in die 1980er Jahre an.

In den 1980er bis in die 1990er Jahren findet sich allgemein ein Plateau hoher Zuwachsniveaus, bevor dann bei allen vier Baumarten in den 1990er Jahren dann eine grundsätzliche Trendumkehr einsetzt. Bei Fichte und Buche scheint die Trendumkehr etwas früher (anfangs 1990er) einzusetzen als bei Tanne und Douglasie (Ende 1990er). In jedem Fall setzte jedoch die Trendumkehr bereits deutlich vor dem extremen Trockenjahr 2003 an.

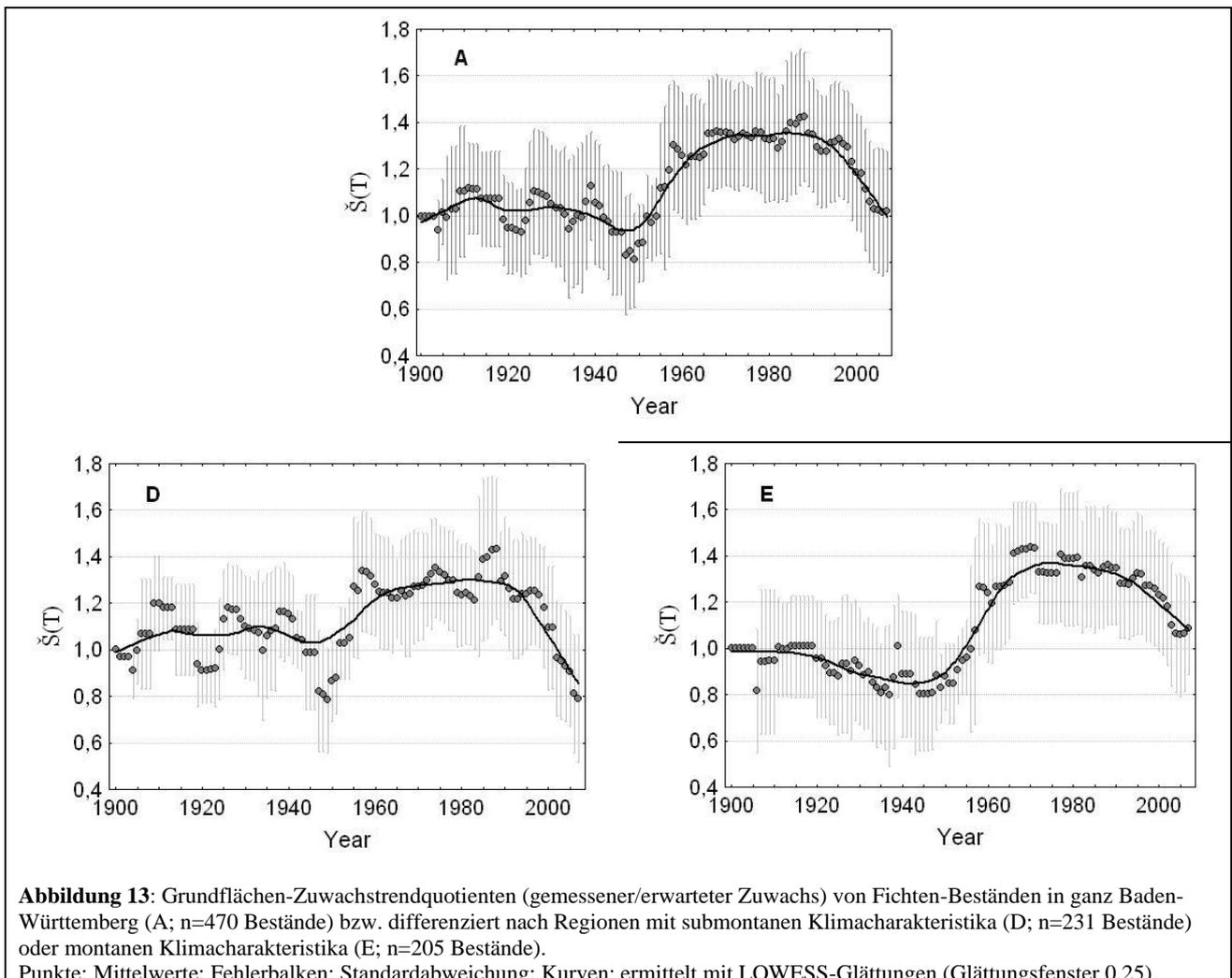
Auf der Basis der in die Auswertung einbezogenen Messzeitreihen weisen die LOWESS-Glättungskurven bis zum Ende der Messzeitreihen (letzte Messwerte: 2007-2009 je nach Baumart und Datenbasis) auf ein grundsätzliches Anhalten des sinkenden Zuwachstrends. Allerdings treten bei den letzten einbezogenen Messwerten zum Teil auch wieder deutlich über der Glättungskurve liegenden Jahresmittelwerte auf. Allerdings muss dabei derzeit noch offen bleiben, ob es sich um Schwankungen innerhalb eines weiter abnehmenden Zuwachstrends handelt, oder ob sich möglicherweise eine erneute Trendumkehr anbahnt.

4.4 REGIONALE DIFFERENZIERUNG (FICHTE)

Die umfangreiche Datenbasis an periodischen Grundflächen-Wiederholungsaufnahmen bei Fichte, ermöglichte bei dieser Baumart die Differenzierung der Grundflächen-Zuwachstrends nach Wuchsregionen mit unterschiedlichen Klimacharakteristika. Hierzu wurden die Fichten-Bestände standortkundlich

entsprechend charakterisierten Regionen Aldinger *et al.* (1998) mit submontanen bzw. montanen Klimacharakteristika zugeordnet. Von den insgesamt 470 einbezogenen Beständen wuchsen 205 in Regionen mit montanen Klimacharakteristika, 231 in Regionen mit submontanen Klimacharakteristika. Diejenigen Bestände, die keiner dieser beiden Klassifizierungen zugeordnet werden konnten (34 Bestände) blieben bei der differenzierten Analyse nicht unberücksichtigt.

Offensichtlich besitzt der für die Exktraktion der umweltrelevanten Komponente im gemessenen Bestandes-Grundflächenzuwachs entwickelte methodische Ansatz (vgl. Kap. 2.2) ausreichend diskriminatorische Leistungsfähigkeit um Zuwachstrends von Fichten-Beständen in Regionen unterschiedlicher Klimacharakteristika zu unterscheiden. Offenbar haben sich die für Fichte wachstumsrelevanten Umweltverhältnisse in submontanen Regionen Baden-Württembergs weniger günstig entwickelt als in Regionen mit montanen Klimacharakteristika (Abbildung 13). Dies würde sich mit der Erwartung decken, dass die gegenwärtig anhaltende Tendenz von Erwärmung und leichtem Rückgang sommerlicher Niederschläge das Wachstum der Fichte in submontan getönten Klimaten stärker beeinträchtigt als in montanen Klimaten. In den submontanen Regionen ist die Fichte klimatisch weiter von ihrem natürlichen Verbreitungsschwerpunkt in alpinen/borealen Klimaten entfernt als in den Regionen mit montaner Klimacharakteristik.



5 Zuwachs und Umweltveränderung: erster Ausblick

Die im Rahmen des geförderten Projektes realisierte Extraktion der Umweltkomponente aus dem auf Baum- bzw. Bestandesebene tatsächlich gemessenen Zuwachssignal bildet die unabdingbare Voraussetzung für die Aufdeckung und Untersuchung möglicher Auswirkungen von Umweltveränderungen auf die Wachstumsdynamik. Den ersten Schritt in diesem Zusammenhang bilden die oben dargestellten Zuwachstrendanalysen. Bei allen Baumarten treten gerichtete Trends auf, die als klarer Hinweis darauf interpretiert werden können, dass bei wachstumsrelevanten Umweltfaktoren mittel- bis langfristige Veränderungen in nennenswertem Umfang aufgetreten sind.

Besonders deutlich dürfte die Veränderungsdynamik der wachstumsrelevanten Umweltfaktoren ab der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts gewesen sein. Bei alle Baumarten weist der – mit vorübergehender Ausnahme der Tanne – kontinuierliche Anstieg des Zuwachstrends bis in die 1990er Jahre auf anhaltende Verbesserungen der wachstumsrelevanten Umweltkonstellationen hin. Umgekehrt weist der etwa ab den 1990er Jahren rückläufige Zuwachstrend auf tendenziell ungünstige Entwicklung der wachstumsrelevanten Umweltkonstellationen hin.

Die in den 1970er Jahren auftretende vorübergehende Zuwachdepression bei Tanne ist so markant, dass ebenfalls von gerichteten Umweltveränderungen als Ursache ausgegangen werden kann. Die hohe Baumartenspezifität weist dabei darauf hin, dass hierfür offensichtlich ein Umweltfaktor verantwortlich, auf dessen Veränderung die anderen Baumarten im Wachstum erheblich weniger sensitiv reagieren.

Als mögliche Ursachen für die beobachteten mittel- bis langfristigen Wachstumstrends kommen Veränderungen bei verschiedenen wachstumsrelevanten Umweltfaktoren insbesondere aus den Bereichen atmosphärischer Zusammensetzung, stofflicher Einträge und klimatischer Veränderungen in Betracht. Denkbar wären die Zunahme der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre in Zentraleuropa Fricke & Wallasch (1994), oder atmosphärische Schwefel- oder Stickstoffeinträge in Deutschland Schöpp *et al.* (2003; Wellbrock *et al.* (2005). Bezüglich Stickstoff gibt es Hinweise, dass in Südwestdeutschland der Eintrag dieses Makronährelements ab dem Ende des 19. Jahrhunderts langsam aber stetig bis in die 1950er Jahre angestiegen ist. Danach stiegen die ERintragsraten über etwa drei Dekaden fortwährend in nennenswertem Umfang an, bevor etwa seit Ende der 1980er Jahre ein mehr oder weniger kontinuierlicher Rückgang zu beobachten ist Meining *et al.* (2010).

Außerdem war in Deutschland auch die Ausprägung wachstumsrelevanter klimatischer Faktoren (z.B. Temperatur, Niederschlag) seit Ende des 19. Jahrhunderts erheblichen Veränderungen unterworfen. Beispielsweise war bis in die 1980er Jahre ein langsamer aber stetiger Anstieg der Durchschnittstemperatur zu verzeichnen, der sich in den beiden zurückliegenden Jahrzehnten dann erheblich beschleunigt hat Kahle *et al.* (2008).

So ergeben beispielweise erste gutachtliche Vergleiche des Zuwachstrends bei Fichte und Veränderungskurven verschiedener wachstumsrelevanter Umweltfaktoren keine Hinweise auf eine offenkundige Abhängigkeit des Zuwachstrends von einem einzelnen Faktor (Abbildung 14): weder die Entwicklung von Durchschnittstemperatur oder Jahresniederschlag (beispielhaft dargestellt für die DWD-Station Karlsruhe), noch der kontinuierliche Steigerungstrend der atmosphärischen CO₂-Konzentration (beispielhaft dargestellt für Messstation Mauna Loa/Hawaii) korrespondieren in ihrem Gesamtverlauf mit dem Zuwachstrend der Fichte. Insbesondere die Trendumkehr seit den 1990er Jahren findet keine Entsprechung in der Entwicklung dieser Umweltfaktoren. Diese Trendumkehr scheint noch am ehesten mit der Entwicklung der Stickstoffeinträge zu korrespondieren, die jedoch in anderen Bereichen von der Zuwachstrendkurve der Fichte abweichen.

Im Zusammenhang mit Zuwachstrendanalysen gilt es dabei allerdings zu berücksichtigen, dass diese zwar gut geeignet sind, um Hinweise auf die Existenz von Wachstumsveränderungen durch mittel- bis langfristige Veränderungstrends im Komplex der wachstumsrelevanten Umweltfaktoren zu geben.

Zuwachstrendanalysen klären jedoch weder die Kausalität der tatsächlich verursachenden Umweltfaktoren noch die quantitativen Zusammenhänge zwischen Veränderungsraten konkreter Faktoren und den damit verbundenen Einflüssen auf das Wachstum. Die oben dargestellten gutachtlichen Vergleiche von Zuwachstrendkurven mit der Entwicklung potentiell verantwortlicher wachstumsrelevanter Umweltfaktoren haben daher allenfalls den Charakter (fundierter) Spekulationen oder dienen der Formulierung von Arbeitshypothesen.

Allerdings weisen diese Vergleiche deutlich darauf hin, dass mit hoher Wahrscheinlichkeit davon auszugehen sein dürfte, dass die Wachstumstrends nicht auf Veränderungen eines Hauptfaktors beruhen, sondern auf einem in seiner Zusammensetzung zeitlich und räumlich variierender Komplex an Umweltfaktoren und deren Veränderung beruhen. Die Aufklärung der Wirkungsbeziehungen der einzelnen Faktoren bleibt dabei weiterführenden kausalanalytischen Untersuchungen vorbehalten. Die im Rahmen des Projekts entwickelten Methoden zur präzisen Extraktion der umweltrelevanten Komponente im Zuwachssignal von Bäumen und Beständen bilden für diesen weiteren Schritt eine unabdingbare Voraussetzung.

6 Quellen

- Abetz, P., Klädtke, J. (2002): The target tree management system - Die Z-Baum-Kontrollmethode. Forstw. Cbl. **121**, 73-82.
- Aldinger, E., Hübner, W., Michiels, H.G., Mühlhäusser, G., Schreiner, M., Wiebel, M. (1998): Überarbeitung der standortkundlichen regionalen Gliederung im Südwestdeutschen Standortkundlichen Verfahren. Mitt.Ver.Forstl.Standortskde.u.Forstpflanzenzüchtung **39**, 5-7.
- Assmann, E. (1961): Waldertragskunde. BLV Verlagsgesellschaft, München,
- Assmann, E., Franz, F. (1965): Vorläufige Fichten-Ertragstafel für Bayern. Forstw. Cbl. **84**, 13-43.
- Burkhart, H.E., Sprinz, P.T. (1984): Compatible cubic volume and basal area projection equations for thinned oldfield loblolly pine plantations. For. Sci. **30**, 86-93.
- Cao, Q.V. (2000): Prediction of annual diameter growth and survival for individual trees from periodic measurements. For. Sci. **46**, (1), 127-131.
- Cao, Q.V., Li, S., McDill, M.E. (2002): Developing a system of annual tree growth equations for the loblolly pine-shottleaf pine type in Louisiana. Can. J. For. Res. **32**, 2051-2059.
- Chatfield, C. (1995): Model uncertainty, data mining and statistical inference. J.R.Statist.Soc.A. **158**, (Part 3), 419-466.
- Cleveland, W.S. (1979): Robust locally weighted regression and smoothing scatterplots. J. Amer. Statist. Assoc. **74**, 829-836.
- Cook, E.R., Kairiukstis, L.A. (1990): Method of dendrochronology. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, London,
- Cook, E.R., Peters, K. (1981): The smoothing spline: a new approach to standardizing forest-interior tree-ring width series for dendroclimatic studies. Tree Ring Bull. **41**, 45-53.
- Draper, D. (1995): Assessment and propagation of model uncertainty. J.Royal Stat.Soc. **Ser. B. 57**, 45-70.
- Fricke, W., Wallasch, M. (1994): Atmosphere CO₂ records from sites in the UBA air sampling network. In T.A. Boden, D.P. Kasier, R.J. Sepanski, S. F.W. (Hrsg.): Trends '93: A compendium of data on global change. CDIAC, Oakridge/TN (USA), S. 135-147.
- Fritts, H.C. (1976): Tree rings and climate. Academic Press, London,
- Gompertz, B. (1825): On the nature of the function expressive of the law of human mortality, and on a new model of determining the value of life contingencies. Ohil. Transac. Roy. Soci. London **115**, 513-585.
- Granger, C.W.J., Ramanathan, R. (1984): Improved methods of combining forecasts. Journal of Forecasting **3**, 197-204.
- Hastie, T., Tibshirani, R. (1990): Generalized additive models. Chapman and Hall, London, 352pp.
- Hein, S., Herbstritt, S., Kohnle, U. (2008): Auswirkung der Z-Baum-Auslesedurchforstung auf Wachstum, Sortenertrag und Wertleistung im europäischen Fichten-Stammzahlversuch (*Picea abies* [L.] Karst.) in Südwestdeutschland. Allg. Forst- u. J.-Ztg. **179**, 192-201.
- Henning, J.G., Burk, T.E. (2004): Improving growth and yield estimates with a process model derived growth index. Can. J. For. Res. **34**, 1274-1282.
- Hoerl, A.E. (1954): Fitting curves to data. In J. Perry (Hrsg.): Chemical Business Handbook. S. 20-55.
- Hoerl, A.E., Kennard, R.W. (1970): Ridge regression: Biased estimation for nonorthogonal problems. Technometrics **12**, 55-67.
- Huang, S., Titus, S.J. (1999): Estimating a system of nonlinear simultaneous individual tree models for white spruce in boreal mixed-species stands. Can. J. For. Res. **29**, 1805-1811.
- Juodvalkis, A., Kairiukstis, L., Vasiliauska, R. (2005): Effects of thinning on growth of six tree species in north-temperate forests of Lithuania. Eur. J. Forest Res. **124**, 187-192.
- Kahle, H.P., Karjalainen, T., Schuck, A., Ågren, G.I., Kellomäki, S., Mellert, K., Prietzel, J., Rehfuss, K.-E., Spiecker, H. (2008): Causes and consequences of forest growth trends in Europe. Results of the Recognition project. European Forest Institute Research Reports 21. Brill., Leiden, 272pp.
- Lemm, R. (1991): Ein dynamisches Forstbetriebs-Simulationsmodell. Dissertation Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich.
- Mäkinen, H., Nöjd, P., Kahle, H.-P., Neumann, U., Tveite, B., Mielikäinen, K., Röhle, H., Spiecker, H. (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.
- McDill, M.E., Amateis, R.L. (1993): Fitting discrete-time dynamic models having any time interval. For. Sci. **39**, 499-519.

- Meining, S., v. Wilpert, K., Schröter, J., Schäffer, J., Morgenstern, Y., Zirlewagen, D. (2010): Waldzustandsbericht 2009. Forstl. Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, Freiburg, 65pp.
- Melvin, T.M., Briffa, K.R. (2008): A "signal-free" approach to dendroclimatic standardisation. *Dendrochronologia* **26**, 71-86.
- Mielikainen, K., Timonen, M. (1996): Growth trends of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in unmanaged and regularly managed stands in Southern and Central Finland. In H. Spiecker, K. Mielikäinen, M. Köhl, J.P. Skovsgaard (Hrsg.): Growth trends in European forests. Springer-Verlag, Berlin, S. 41-59.
- Nelder, J.A., Mead, R. (1965): A simplex method for function minimization. *Computer Journal* **7**, 308.
- Nord-Larsen, T. (2006): Modeling individual-tree growth from data with highly irregular measurements intervals. *For. Sci.* **52**, (2), 198-208.
- Press, W.H., Flannery, S.A., Teukolsky, S.A., Vetterling, W.T. (1992): Numerical recipes; the art of scientific computing. Cambridge University Press,
- Pretzsch, H., Grote, R., Reineking, B., Rötzer, T.H., Seifert, S.T. (2007): Models for forest eco-system management: A European perspective. *Annals of Botany* **11**, 1065-1087.
- Pretzsch, H., Kahn, M. (1996): Wuchsmodelle für die Unterstützung der Wirtschaftsplanung im Forstbetrieb. Anwendungsbeispiel: Variantenstudie Fichtenreinbestand versus Fichten/Buchen-Mischbestand. *AFZ* **51**, (25), 1414-1419.
- Prietzl, J., Rehfuess, K.E., Stetter, U., Pretzsch, H. (2008): Changes of soil chemistry, stand nutrition, and stand growth at two Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) sites in Central Europe during 40 years after fertilization, liming, and lupine introduction. *Eur J For Res* **127**, 43-61.
- Püttmann, K., D'Amato, A.W., Kohnle, U., Bauhus, J. (2009): Individual tree growth dynamics of mature *Abies alba* during repeated irregular group shelterwood (Femelschlag) cuttings. *Can. J. For. Res.* **39**, 2437-2449.
- Reed, D.D., Jones, E.A., Bottenfield, T.R., Tretin, C.C. (1986): Compatible cubic volume and basal area equation for red pine plantations. *Can. J. For. Res.* **16**, 416-419.
- Schöpp, W., Posch, M., Mylona, S., Johansson, M. (2003): Long-term development of acidic deposition (1880-2030) in sensitive freshwater regions in Europe. *Hydrology and Earth System Sciences* **7**, (4), 436-446.
- Schweingruber, F.H. (1983): Der Jahrring - Standort, Methodik, Zeit und Klima in der Dendrochronologie. Haupt, Bern, 234pp.
- Solberg, S., Dobbertin, M., Reinds, G.J., Lange, H., Andreassen, K., Fernandez, P.G., Hildingsson, A., de Vries, W. (2009): Analyses of the impact of changes in atmospheric deposition and climate on forest growth in European monitoring plots: A stand growth approach. *For Ecol and Manage* **258**, 1735-1750.
- Van Deusen, P.C. (1990): Stand dynamics and red spruce decline. *Can. J. For. Res.* **20**, 743-749.
- van Deusen, P.C. (1992): Growth trends and stand dynamics in natural loblolly pine in the southeastern United States. *Can. J. For. Res.* **22**, 660-666.
- Weiskittel, A.R., Garber, S.M., Johnson, G.P., Maguire, D.A., Monserud, R.A. (2007): Annualized diameter and height growth equations for Pacific Northwest plantation-grown Douglas-fir, western hemlock, and red alder. *For Ecol and Manage* **250**, (266-278),
- Wellbrock, N., Riek, W., Wolff, B. (2005): Characterisation of and changes in the atmospheric deposition situation in German forest ecosystems using multivariate statistics. *Eur J For Res* **124**, 261-271.
- Yue, C., Kohnle, U., Hanewinkel, M., Klädtke, J. (2011): Extracting environmentally driven growth trends from diameter increment series based on a multiplicative decomposition model. *Can. J. For. Res.* **41**, (8), 1577-1589.
- Yue, C., Kohnle, U., Hein, S. (2008): Combining tree- and stand-level growth models: a new approach to growth prediction. *For.Sci.* **54**, (5), 553-566.
- Yue, C., Kohnle, U., Kahle, H.-P. und Klädtke, J. (2012): Exploiting irregular measurement intervals for the analysis of growth trends of stand basal area increments: a composite model approach. *For. Ecol. Manage.* **263**, 216-228.
- Yue, S., Pilon, P., Phinney, B., Cavadias, G. (2002): The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series. *Hydrological Processes* **16**, 1807-1829.
- Zeide, B. (1993): Analysis of growth equations. *For. Sci.* **39**, 594-616.
- Zeide, B. (2001): Natural thinning and environmental change: An ecological process model. *For Ecol and Manage* **154**, 165-177.
- Zingg, A. (1996): Diameter and basal area increment in permanent growth and yield plots in Switzerland. In H. Spiecker, K. Mielikäinen, M. Köhl, J.P. Skovsgaard (Hrsg.): Growth trends in European forests. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, S. 239-265.

Projekt-Veröffentlichungen

Auf der Basis der Ergebnisse der Projektarbeit wurde ein Manuskript bereits veröffentlicht, ein weiteres befindet sich in Vorbereitung:

Yue, C., Kohnle, U., Kahle, H.-P. und Klädtke, J. (2012): Exploiting irregular measurement intervals for the analysis of growth trends of stand basal area increments: a composite model approach. For. Ecol. Manage. 263, 216-228.

Kohnle, U., Yue, C., Lenk, E., Ohnemus, K., Klädtke, J.: Langfristige Zuwachstrends von sechs Hauptbaumarten in Südwestdeutschland. Allg.Forst-u.Jgd.-Ztg. (in Vorbereitung)

