

## **Parametrisierung und Evaluierung von BWinPro für Baden-Württemberg anhand von waldwachstumskundlichen Versuchsflächendaten**

Axel Albrecht <sup>1)</sup>, Ulrich Kohnle <sup>1)</sup>, Jürgen Nagel <sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, Postfach 708, 79007 Freiburg  
Email: axel.albrecht@forst.bwl.de

<sup>2)</sup> Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt, Abt. A Waldwachstum, Grätzelstr. 2, 37075 Göttingen

### **Zusammenfassung**

Im vorliegenden Beitrag wird über ein kurz vor der Fertigstellung befindliches Projekt berichtet, dessen Ziel die Parametrisierung von vier Modellgleichungen des Waldwachstumssimulators BWinPro sowie die Evaluierung dieser Parametrisierung ist. Mit der Parametrisierung sollen die Wachstumsverhältnisse von Baden-Württemberg in BWinPro besser darstellbar werden. Als Datengrundlage wurden die langfristigen waldwachstumskundlichen Versuchsflächen von Baden-Württemberg verwendet, von denen 70% für die Parametrisierung und 30% für die Evaluierung reserviert wurden. In dieser Datengrundlage enthalten sind die Baumarten Buche, Eiche, Douglasie, Fichte, Tanne, Europäische und Japanische Lärche sowie Kiefer und Schwarzkiefer. Für diese Baumarten wurden die Modellgleichungen zur Prognose des Kronenansatzes und des Durchmesserwachstums angepasst. Aufgrund eingeschränkter Datenverfügbarkeit wurden die Modellgleichungen zur Schätzung von Kronenbreite und Höhenzuwachs nur für einige dieser Baumarten durchgeführt.

Die Parametrisierung zeigte insgesamt befriedigende Ergebnisse. Die Modellkoeffizienten zeigten überwiegend signifikante Unterschiede zu den nordwestdeutschen Werten an. Die Funktion zur Schätzung des Durchmesserwachstums (logarithmierter Grundflächenzuwachs) ließ jedoch erkennen, dass weitere Anpassungsschritte nötig sind. Die Bearbeitung der Evaluierung ist gegenwärtig noch nicht abgeschlossen, so dass die Verbesserung der Vorhersagen auf der Grundlage der neu ermittelten baden-württembergischen Koeffizienten im Vergleich zur nordwestdeutschen Version noch nicht quantifiziert werden kann. Es zeichnet sich bisher jedoch beispielhaft ab, dass die Anpassung der Höhenwachstumsfunktion eine klare Verbesserung herbeiführt.

### **Einleitung**

Der Einsatz von Waldwachstumssimulatoren (WWS'en) ist in Deutschland unterschiedlich stark ausgeprägt. Während in Bayern Silva z. B. in die Forsteinrichtung Eingang gefunden hat, und in Niedersachsen BWinPro und WaldPlaner im öffentlichen und Privatwald zum Einsatz kommen, ist in Baden-Württemberg derzeit kein WWS großflächig im Einsatz. Dies beruht auf den Prognose-Unsicherheiten, die allgemein immer noch mit WWS'en verknüpft sind. Vermutlich ist jedoch für viele praktische waldwachstumskundliche Fragestellungen im Forstbetrieb die aktualisierte Zuwachsschätzhilfe für Baden-Württemberg (Bösch 2001) ausreichend. Da WWS'en jedoch für Anwendungen im Forstbetrieb, aber beispielsweise auch in der Forschung (Forstökonomie) ein umfangreiches Arbeitswerkzeug darstellen könnten, wird angestrebt, einen für die waldbaulichen und naturalen Gegebenheiten des Landes Baden-Württemberg speziell angepassten WWS zu entwickeln. In diese Bestrebungen sind auch bisherige Arbeiten einzuordnen, die sich mit den Prototypen WaSi, W+ (Yue et al. 2008), PEP aber auch mit dem bestehenden WWS Silva (Albrecht 2007, Mette et al. 2009) beschäftigen.

BWinPro ist wie Silva ein Einzelbaum-WWS, da mit Hilfe der Wachstumsfunktionen das Wachstum von Einzelbäumen berechnet wird. Ein wesentlicher Unterschied zwischen Silva und BWinPro liegt darin, dass Silva zur Berücksichtigung der Konkurrenzverhältnisse die tatsächlichen Baumpositionen und Baumnachbarschaftsverhältnisse verwendet (Index Kronenkonkurrenz um Licht, kurz KKL, als positionsabhängiges Konkurrenzmaß), während der c66-Index in BWinPro standardmäßig ein positionsunabhängiges Konkurrenzmaß darstellt. Silva wurde anhand eines baden-württembergischen Datensatzes bereits evaluiert. Feinkalibrierung von Silva für die regionaltypischen Wachstumsbedingungen ist allerdings nur für das Höhenwachstum, nicht für das Durchmesserwachstum möglich, da der Programmcode nicht allgemein zugänglich ist. Das open-source-Konzept von BWinPro ermöglicht hingegen eine solche Anpassung an regionale Verhältnisse. Nicht nur die Parametrisierung vorhandener Modellgleichungen kann im Zuge einer solchen Anpassung durchgeführt werden, sondern es können vom Software-Benutzer auch andere, ev. auf das beabsichtigte neue Gültigkeitsgebiet besser abgestimmte Modellgleichungen verwendet werden.

Für die Anpassung von BWinPro an baden-württembergische Wachstumsverhältnisse wurden vier zentrale Modellgleichungen anhand von waldwachstumskundlichen Versuchsflächendaten kalibriert. Zunächst wurden die Modellkoeffizienten zur Schätzung von Kronenansatz und Kronenbreite angepasst, und in einem zweiten Schritt wurden die Modelle für den logarithmierten Grundflächenzuwachs und den Höhenzuwachs angepasst.

Nach diesen Modellanpassungen wurde auf der Grundlage zweier Datensätze, die nicht für die Anpassungen verwendet wurden, evaluiert, wie sich die Vorhersagegüte durch die Modellparametrisierung verändert. Für den ersten Datensatz wurden ca. 30 % vom gesamten Datensatz für Evaluierungszwecke zufällig abgetrennt, 70% wurden für die Modellanpassung belassen. Ein zweiter, deutlich kleinerer Evaluierungsdatsatz besteht aus Versuchsflächen, auf denen die Baumpositionen größtenteils bekannt sind. Dieser Datensatz wurde bereits für die Evaluierung von Silva verwendet, so dass ein direkter Vergleich der beiden Simulatoren möglich wurde.

Folgende Fragestellungen wurden bearbeitet:

- Sind die Koeffizienten für die Modelle der Kronenansatzhöhe, der Kronenbreite und des Durchmesserwachstums signifikant verschieden von denen der nordwestdeutschen Parametrisierung (Nagel 2005)?
- Um wie viel Prozent verringert sich der relative Jahrzehnt-Bias von Dg, D100, Hg und H100 durch die Anpassung von BWinPro an baden-württembergische Versuchsflächendaten im Vergleich zur Schätzung mit nordwestdeutschen Modellkoeffizienten?
- Weicht der relative Jahrzehnt-Bias des Dg-Kollektivs von dem des D100-Kollektivs signifikant ab?

## Material und Methoden

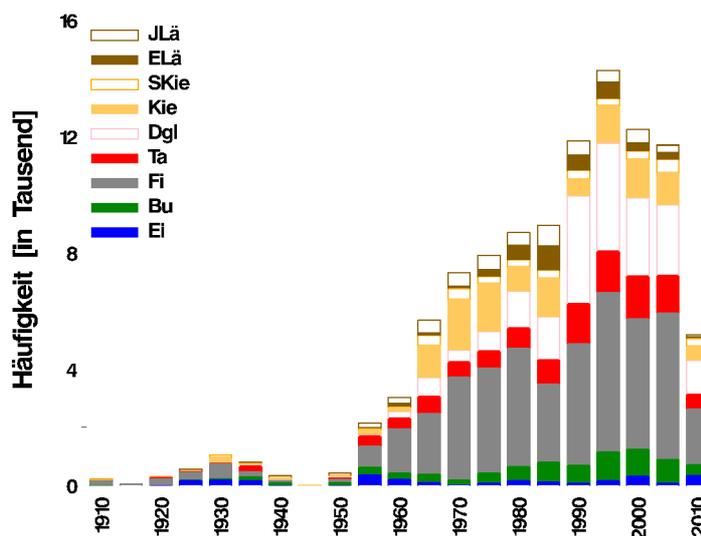
### Parametrisierungsdatensatz

Je nach Datenverfügbarkeit wurden für die in der Einleitung genannten vier Modellgleichungen verschiedene Baumarten berücksichtigt. In Tabelle 1 ist markiert, welche Gleichung für welche Baumart angepasst wurde. Für Schwarzkiefer und die beiden Lärchenarten lagen nicht genügend Daten für die Parametrisierung der Kronenbreiten- und der Höhenzuwachsfunction vor.

**Tabelle 1:** Übersicht über die Modellfunktionen und die ausgewählten Baumarten.

	<i>Baumart</i>	Eiche	Buche	Fichte	Tanne	Dgl	Kiefer	Schw. kiefer	Eur. Lä	Jap. Lä
	<i>BA-Code Nds.</i>	110	211	511	521	611	711	712	811	812
<b>Kronenansatz</b>		•	•	•	•	•	•	•	•	•
<b>Kronenbreite</b>		•	•	•	•	•	•			
<b>log(Grundflächenzuwachs)</b>		•	•	•	•	•	•	•	•	•
<b>Höhenzuwachs</b>		•	•	•	•	•	•			

Abbildung 1 stellt als Häufigkeitsdiagramm dar, dass das Parametrisierungsdatenmaterial vorwiegend die zweite Hälfte des 20. Jahrhunderts abdeckt. Insbesondere sind die Zuwachsperioden seit den 1970er Jahren stark repräsentiert. Weiterhin zeigt sich, dass die Buche (*Fagus sylvatica* [L.]) in den Versuchsflächendaten im Vergleich zu ihrer allgemein großen Bedeutung als Laubbaumart in Baden-Württemberg unterrepräsentiert ist. Bemerkenswert sind außerdem die hohen Anteile der Douglasie (*Pseudotsuga menziesii* [Mirbel] Franco) ab ca. 1980.



**Abbildung 1:** Baumartendifferenziertes Häufigkeitsdiagramm der Baumbeobachtungen, die für die Parametrisierung des Durchmesserzuwachses verwendet wurden. JLä: Japanische Lärche (*Larix kaempferi* [Lamb.] Carrière), ELä: Europäische Lärche (*Larix decidua* [Mill.]), SKie: Schwarzkiefer (*Pinus nigra* [J.F.Arnold]), Kie: Waldkiefer (*Pinus sylvestris* [L.]), Dgl: Douglasie (*Pseudotsuga menziesii* [Mirbel] Franco), Ta: Weisstanne (*Abies alba* [Mill.]), Fichte (*Picea abies* [L.] Karst.), Bu: Buche (*Fagus sylvatica* [L.]), Ei: Stiel- (*Quercus robur* [L.]) und Traubeneiche (*Quercus petraea* [Mattuschka] Liebl.).

Bei der Auswahl der Versuchsflächendaten für die Parametrisierung und Evaluierung wurden einige grundlegende Filterkriterien angewendet, um die Gültigkeit der erarbeiteten Modellkoeffizienten für Baden-Württemberg sicherzustellen.

- Von den Douglasienversuchsflächen wurden die Provenienzen BC Interior (alle Salmon-Arm, 31, 310) nicht verwendet.
- Bei Schwarzkiefer-Versuchsflächen wurde die Provenienz Korsika nicht verwendet (Šeho et al. 2010).
- Versuchsflächen, die kleiner als 0,15ha sind und eine Spitzhöhe (H100) von 25m überschreiten, wurden nicht verwendet, da die Flächengröße ab diesem Entwicklungszustand nicht mehr ausreichend für die bestandesweise Betrachtung der Konkurrenzverhältnisse ist (c66).
- Ungleichaltrige und strukturreiche Bestände wurden für die Parametrisierung des Höhenzuwachses nicht verwendet, da die Eigenschaft ‚Alter‘ in den Versuchsflächen nur bestandesweise erhoben wird. Bestände mit variierendem Einzelbaumalter innerhalb eines Bestandes konnten deshalb nicht berücksichtigt werden.

Übersicht über die parametrisierten Funktionen

Es wurden im ersten Schritt die Modelle zur Schätzung der Kronenansatzhöhe sowie der Kronenbreite parametrisiert. Diese Kronenfunktionen mussten zuerst parametrisiert werden, da diese geschätzten statischen Kronendimensionen Eingangsgrößen für die Berechnung des Konkurrenzmaßes in BWinPro (c66) sind, welches wiederum als Prädiktor in das Modell zur Schätzung des Durchmesserwachstums eingeht. Die mit Hilfe der Regressionsanalysen ermittelten Koeffizienten für die Kronenfunktionen wurden an BWinPro übergeben. Die in BWinPro hinterlegten Modellgleichungen wurden hierbei nicht verändert, lediglich die Koeffizienten wurden neu berechnet. Anschließend wurden die Versuchsflächen des Parametrisierungsdatensatzes in BWinPro eingelesen (Datenbank ‚localdata.mdb‘, Tabellen ‚Baum‘, ‚Parz‘ und ‚Auf‘). Als Ergebnis dieses Einlesens stand daraufhin für den Ist-Zustand ergänzend der c66-Wert jedes Einzelbaums zur Verfügung.

Das Modell zur Berechnung der Kronenansatzhöhe (KrA) [1] berücksichtigt als Prädiktoren Höhe (h) und Brusthöhdendurchmesser (d) des Einzelbaums und die Spitzhöhe (H100), also die Höhe der 100 dicksten Bäume je ha.

$$KrA = h * (1 - \exp(-abs(p0 + p1 * (\frac{h}{d}) + p2 * d + p3 * \ln(H100)))) \quad [1]$$

Für die Parametrisierung wurden ausschließlich Baumbeobachtungen verwendet, bei denen sowohl der Kronenansatz als auch die Baumhöhe gemessen wurden. Insgesamt standen 148.408 gemessene Kronenansatzhöhen zur Verfügung.

Das Modell zur Berechnung der Kronenbreite (KrBr) [2] berücksichtigt als einzigen Prädiktor den Brusthöhdendurchmesser eines Baumes (d). Es wurden Daten von insgesamt 4610 Bäumen verwendet.

$$KrBr = (p0 + p1 * d) (1 - \exp(-(\frac{d}{p3})^{p2})) \quad [2]$$

Der Durchmesserzuwachs wird in BWinPro als logarithmierter Grundflächenzuwachs des Einzelbaums in m<sup>2</sup> [ln(ig)] berechnet, der daraufhin programmintern umgerechnet wird in den Durchmesserzuwachs [3]. Als Prädiktoren liegen der Modellschätzung das logarithmierte Alter, die logarithmierte Kronenmantelfläche, der c66-Wert sowie die eingriffsbedingte Veränderung des c66-Wertes (c66c) zugrunde.

$$\ln(ig) = p0 + p1 * \ln(km) + p2 * \ln(Alter) + p3 * C66 + p4 * C66c + p5 * \ln(adiff) + \varepsilon \quad [3]$$

Der Modellterm p5\*ln(adiff) bezieht sich auf die Periodenlänge (adiff=Anzahl Jahre zwischen aktueller und Voraufnahme), für die der jeweilig beobachtete Grundflächenzuwachs vorliegt. Da die Prognoseschritte in BWinPro fünf Jahre betragen, kann dieser Term wegfallen, sofern die beobachteten Zuwächse bereits fünfjährige Intervalle beschreiben. Für die Grundflächenzuwachsfunction lagen 102.746 Beobachtungen vor.

Für die Modellierung der Baumhöhen bei Bäumen, für die keine Messhöhe vorliegt, wurden zunächst empirische Richtungsfelder (Wolf'sche Richtungsfelder) berechnet. Diese Richtungsfelder sind durchschnittliche Einzelbaum-Höhenzuwächse gruppiert nach Alters- und Höhenstufen und wurden berechnet als

$$\overline{ih}_{Ba,A,H} = \frac{\sum ih_{Ba,A,H}}{n_{Ba,A,H}} \quad [4]$$

mit

Ba: Baumart

A: Altersstufe (10 Jahre)

H: Höhenstufe (2 m)

Für die Berechnung dieser durchschnittlichen Höhenzuwächse wurden insgesamt 45.739 gemessene Einzelbaum-Höhenzuwächse verwendet. An diese Durchschnittswerte wurde dann die Sloboda-Funktion [5] angepasst (OLS in SAS 9.1 mit Prozedur NLin).

$$\overline{ih}_{Ba,A,H} = p1 * \frac{H}{A^{p0}} * \frac{\log(65^{p2})}{H} \quad [5]$$

mit

Ba: Baumart

A: Altersstufe (10 Jahre)

H: Höhenstufe (2 m)

Für den Vergleich der baden-württembergischen Anpassung dieser vier Modellgleichungen mit der nordwestdeutschen Modellversion wurden die Konfidenzintervalle der baden-württembergischen Koeffizientenschätzungen mit den nordwestdeutschen Koeffizienten verglichen. Lagen die nordwestdeutschen Schätzwerte dabei innerhalb des baden-württembergischen Konfidenzintervalls, so wurde die jeweilige Koeffizientenschätzung als nicht signifikant verschieden von der nordwestdeutschen Schätzung interpretiert. Für alle Signifikanztests wurde das Fehlerniveau  $\alpha=0,05$  verwendet.

Da mit Ausnahme des Grundflächenzuwachsmo­dells alle Modellschätzungen mit nicht-linearen Verfahren durchgeführt wurden, wurde als zusätzliche Interpretationshilfe die Korrelationsmatrix der Koeffizientenschätzung erstellt. Dabei wird beurteilt, wie hoch das Maß an Korrelation zwischen den Koeffizienten ist. Je höher diese Korrelation, umso weniger eindeutig ist die Schätzung eines Koeffizienten. Das bedeutet, wenn eine hohe Korrelation vorliegt, dann können auch andere Schätzwerte der korrelierten Koeffizienten zum gleichen Ergebnis der Modellschätzung führen. Da solche Korrelationen unerwünscht sind, gilt ein Wert von 0,95 als maximaler Grenzwert.

Aufgrund der anzunehmenden Korrelationen zwischen den Prädiktoren wurde der Varianzinflationsfaktor (VIF) berechnet, der als Maß für die Kollinearität gelten kann. Sein Wert sagt aus, wie viel der Varianz der Koeffizientenschätzung eines bestimmten Prädiktors sich aufgrund von Kollinearität mit den anderen Prädiktoren erhöht. Der Varianzinflationsfaktor wurde für jeden Prädiktor  $i$  berechnet nach [6]

$$VIF_i = \frac{1}{1 - R^2} \quad [5]$$

wobei  $R^2$  das Bestimmtheitsmaß des linearen Regressionsmodells ist, in dem der Prädiktor  $i$  als Antwortvariable durch alle anderen Prädiktoren geschätzt wird. Werte von 10 werden als starke Kollinearität bezeichnet (Fahrmeir et al. 2007). Der VIF kann auch interpretiert werden als  $\sqrt{VIF}$ -faches des unkorrelierten Standardfehlers (Mayer et al. 2005).

#### Evaluierungsdatensatz

Im Evaluierungsdatensatz 1 sind 375.699 Bäume enthalten, die sich ähnlich wie der Parametrisierungsdatensatz zu ca. 50% auf Fichte, ca. 15% auf Douglasie, je ca. 10% auf Kiefer, Buche und Tanne verteilen. Nur in geringen Anteilen sind Eiche, Schwarzkiefer, Europäische und Japanische Lärche vertreten.

Der Evaluierungsdatensatz 2 besteht aus insgesamt ca. 19.000 Bäumen, die sich etwa hälftig auf Buchen und Fichten verteilen. Eine nähere Beschreibung dieses Datensatzes ist in Albrecht et al. (2009) zu finden.

#### Evaluierungsmethoden

Die Fortschreibung der Evaluierungsdatensätze erfolgte für 2 Wachstumsperioden, also insgesamt 10 Jahre. Für die am Ende verbliebenen Bäume wurden bestandesweise Kennwerte errechnet (Simulationsdaten). Da die Datenaufnahme auf den Versuchsflächen nicht immer genau in 5-Jahres-Abständen erfolgte, wurden die gemessenen Daten (Realdaten) linear interpoliert. Für diese Interpolation wurde die jeweilige Datenaufnahme ausgewählt, die am nächsten an dem Bezugszeitraum von 10 Jahren erfolgt war (8-12 Jahre). Diese interpolierten Realdaten wurden dann mit den prognostizierten verglichen, um Abweichungen zu quantifizieren.

Für Vergleichszwecke wurde die Simulation nicht nur mit den neu ermittelten Koeffizienten für Baden-Württemberg berechnet, sondern zusätzlich auch mit den nordwestdeutschen.

Die Abweichung zwischen realen und mit Hilfe des WWS fortgeschriebenen Werten wird auch als BIAS bezeichnet (Pretzsch et al. 2002, Vanclay und Skovsgaard 1997, Windhager 1999). Neben anderen

Evaluierungskenngrößen wie Präzision und Treffgenauigkeit ist der BIAS die zentrale Kenngröße für die Beurteilung der Modellqualität. Für die vorliegende Arbeit wurde deshalb der BIAS ( $\bar{e}$ ) ausgewählt und nach [6] berechnet.

[6]

$$\bar{e} = \sum_{i=1}^n (x_i - X_i) / n$$

mit

 $x_i$ : fortgeschriebener Wert $X_i$ : realer Wert

Der Modell-BIAS kann nicht nur als absoluter, sondern auch als relativer Wert ausgedrückt werden, wenn man ihn durch den Mittelwert der realen Werte ( $\bar{X}$ ) teilt. Relative Werte eignen sich besonders für Vergleichszwecke, wenn z. B. mit anderen Untersuchungen oder zwischen verschiedenen Einzelbaum- oder Bestandeswerten verglichen werden soll. Absolute BIAS-Werte sind hingegen besonders für praktische Fragestellungen relevant, wenn z. B. die Abweichungen der Durchmesser oder der Durchmesserzuwächse pro Forsteinrichtungsjahrzehnt von Interesse sind. Ebenso um die Vergleichbarkeit mit anderen Untersuchungen herzustellen, wurde der BIAS als Jahrzehnt-BIAS berechnet, also bezogen auf die einheitliche Beobachtungsdauer von 10 Jahren.

Als Evaluierungskenngrößen wurden die Grundfläche (G), das Derbholzvolumen (V), die Höhe des Grundflächenmittelstamms (Hg), die Spitzhöhe (H100), der Durchmesser des Grundflächenmittelstamms (Dg) und der Durchmesser der 100 stärksten Bäume (D100) ausgewählt.

Die Quantifizierung einzelbaumweiser Abweichungen ist im Rahmen der vorliegenden Arbeit bislang nicht erfolgt, wird jedoch in noch folgenden Auswertungen berücksichtigt werden.

## Ergebnisse

Parametrisierung – Koeffizienten, Anpassungsstatistiken und Residuenanalysen

Kronenansatz

Die Ergebnisse für die Anpassung der Kronenansatzfunktion [1] sind in Tabelle 2 dargestellt. Nicht signifikante Parameter sind in der Tabelle kursiv gedruckt, und Schätzwerte, die sich nicht signifikant von den nordwestdeutschen Werten unterscheiden, sind grau eingefärbt. Bei den Schätzwerten für Buche ist auffällig, dass drei der vier Parameter nicht signifikant verschieden von den nordwestdeutschen Schätzwerten sind (p0-p2). Außerdem ist der Term p1 insgesamt nicht signifikant. Die Modellkoeffizienten für Douglasie und Kiefer unterscheiden sich von den nordwestdeutschen und sind signifikant. Bei Europäischer Lärche zeigt sich, ähnlich wie bei Buche, der Term p1 als nicht signifikant. Zusätzlich ist auch der Parameter p3 nicht signifikant und nicht von dem nordwestdeutschen Wert signifikant verschieden. Die Koeffizientenschätzungen für Eiche sind den nordwestdeutschen ähnlich, da sich die Parameter p2 und p3 nicht signifikant von den nordwestdeutschen unterscheiden. Bei Fichte ist ersichtlich, dass der Parameter p2 nicht signifikant ist. Der absolute Wert für die Koeffizientenschätzung liegt unter 0,000 und zeigt damit einen insgesamt sehr geringen Beitrag an. Im Modell für die Japanische Lärche ist ausschließlich der Koeffizient für p1 signifikant. Da folglich die drei anderen Werte nicht signifikant sind, ist das Kronenansatzmodell für diese Baumart fraglich. Im Modell für Schwarzkiefer ist der Term p1 nicht signifikant, in dem für Tanne hingegen der Term p2. Alle Koeffizienten der beiden letztgenannten Baumarten unterscheiden sich signifikant von denen in Nordwestdeutschland.

In Spalte ‚Correlp0‘ sind die Korrelationen zwischen Parametern aufgelistet. Es ist ersichtlich, dass keine der Parameter mit Werten über 0,95 mit dem Parameter p0 korrelieren. Es zeigt sich jedoch, dass die Werte für Parameter p3 höher als für die anderen Parameter liegen. Für die Baumarten Douglasie, Europäische und Japanische Lärche, Fichte, Schwarzkiefer und Kiefer unterschreiten die Werte sogar -0,8, was systematische negative Zusammenhänge andeutet. Die Beträge der restlichen Korrelationen p1-p2, p1-p3 sowie p2-p3 lagen durchwegs unter 0,95. Die meisten dieser Werte lagen jedoch zwischen 0,8 und 0,95, was leichte Zusammenhänge andeutet (Werte nicht in Tab. 2 enthalten).

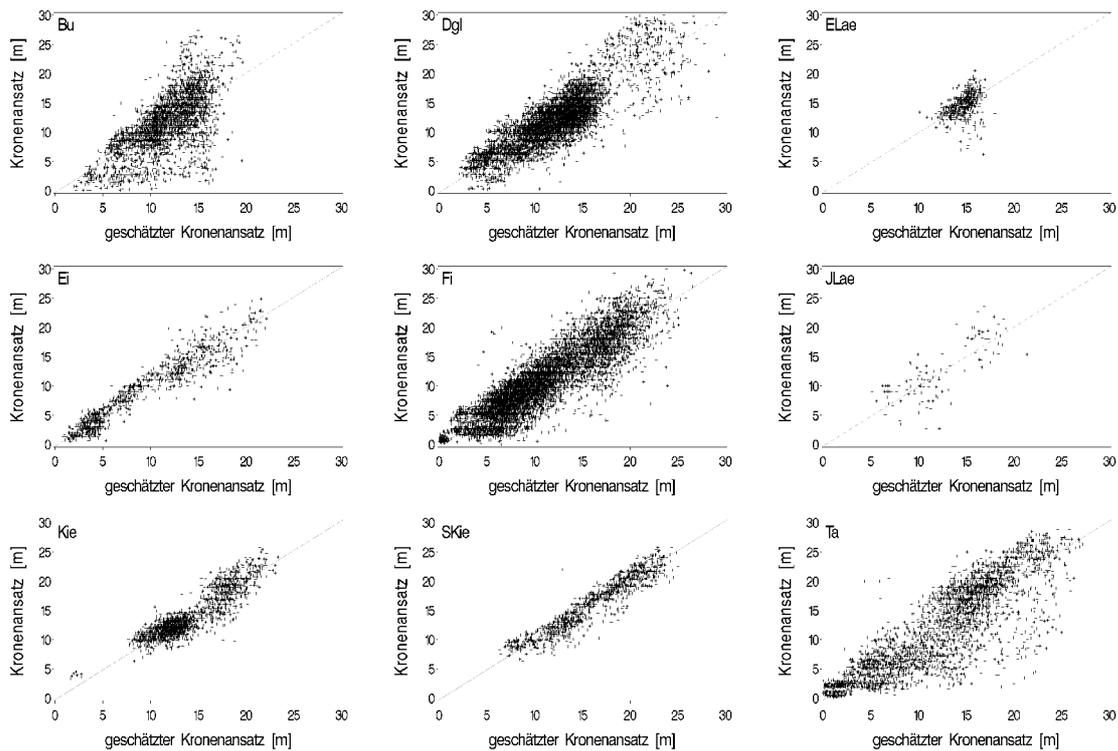
**Tabelle 2:** Koeffizientenschätzung der Kronenansatzfunktion. Nicht signifikante Parameter sind kursiv gedruckt; Schätzwerte, die sich nicht signifikant von den nordwestdeutschen Werten unterscheiden, sind grau eingefärbt. Die Werte der Spalte CorrelP0 bezeichnen das Maß der Korrelation (Korrelationsmatrix) zwischen dem jeweiligen Koeffizientenschätzwert mit dem des Koeffizienten p0.

Baumart	Parameter	Estimate	StdErr	LowerCL	UpperCL	Probt	CorrelP0
Bu	p0	0.365	0.080	0.209	0.522	0.00	
	p1	<i>0.052</i>	<i>0.043</i>	<i>-0.032</i>	<i>0.137</i>	<i>0.23</i>	<i>-0.13</i>
	p2	-0.002	0.001	-0.003	0.000	0.04	0.20
	p3	0.067	0.030	0.008	0.127	0.03	-0.78
Dgl	p0	-1.329	0.036	-1.399	-1.259	0.00	
	p1	0.502	0.024	0.456	0.548	0.00	0.43
	p2	-0.002	0.000	-0.002	-0.001	0.00	0.62
	p3	0.470	0.017	0.437	0.503	0.00	-0.89
ELae	p0	1.826	0.325	1.187	2.465	0.00	
	p1	<i>-0.034</i>	<i>0.138</i>	<i>-0.305</i>	<i>0.236</i>	<i>0.80</i>	<i>0.27</i>
	p2	-0.009	0.002	-0.014	-0.004	0.00	0.41
	p3	<i>-0.187</i>	<i>0.130</i>	<i>-0.442</i>	<i>0.067</i>	<i>0.15</i>	<i>-0.91</i>
Ei	p0	-1.040	0.071	-1.180	-0.900	0.00	
	p1	0.513	0.051	0.413	0.613	0.00	-0.39
	p2	-0.003	0.001	-0.005	-0.001	0.00	0.12
	p3	0.497	0.029	0.440	0.553	0.00	-0.67
Fi	p0	-1.531	0.027	-1.584	-1.478	0.00	
	p1	0.661	0.025	0.613	0.710	0.00	0.42
	p2	<i>0.000</i>	<i>0.000</i>	<i>-0.001</i>	<i>0.001</i>	<i>0.62</i>	<i>0.57</i>
	p3	0.488	0.015	0.458	0.518	0.00	-0.85
JLae	p0	<i>0.313</i>	<i>0.569</i>	<i>-0.812</i>	<i>1.437</i>	<i>0.58</i>	
	p1	1.260	0.334	0.600	1.920	0.00	0.46
	p2	<i>-0.001</i>	<i>0.007</i>	<i>-0.014</i>	<i>0.013</i>	<i>0.91</i>	<i>0.46</i>
	p3	<i>-0.194</i>	<i>0.274</i>	<i>-0.736</i>	<i>0.348</i>	<i>0.48</i>	<i>-0.88</i>
Kie	p0	-1.985	0.088	-2.157	-1.813	0.00	
	p1	0.406	0.070	0.268	0.545	0.00	0.41
	p2	-0.010	0.001	-0.013	-0.008	0.00	0.59
	p3	0.937	0.049	0.841	1.034	0.00	-0.86
SKie	p0	-2.002	0.127	-2.251	-1.754	0.00	
	p1	<i>0.143</i>	<i>0.106</i>	<i>-0.065</i>	<i>0.352</i>	<i>0.18</i>	<i>0.47</i>
	p2	-0.011	0.002	-0.015	-0.007	0.00	0.62
	p3	1.114	0.075	0.966	1.262	0.00	-0.87
Ta	p0	-3.114	0.068	-3.247	-2.981	0.00	
	p1	0.905	0.063	0.781	1.029	0.00	0.08
	p2	<i>0.001</i>	<i>0.001</i>	<i>0.000</i>	<i>0.002</i>	<i>0.11</i>	<i>0.29</i>
	p3	0.965	0.031	0.903	1.026	0.00	-0.77

Kronenansatzmodelle für Schwarzkiefer und Weisstanne sind in BWinPro bislang nicht integriert. Deshalb konnte kein Vergleich der Parameterschätzungen dieser Baumarten mit den nordwestdeutschen Schätzungen vorgenommen werden.

Die Werte des Varianzinflationsfaktors lagen mit einigen Ausnahmen unter dem kritischen Wert von 10 (d-Werte bei Schwarzkiefer und Japanischer Lärche). Werte zwischen 5 und 10, die erhöhte Abhängigkeiten anzeigen, wurden für mehrere Baumarten bei den Parametern h/d und d gefunden.

In Abbildung 2 sind jeweils die beobachteten Kronenansatzmessungen den modellierten Werten gegenübergestellt. Aus dieser Abbildung wird deutlich, dass die Modelle für Japanische und Europäische Lärche nur von geringen Fallzahlen gestützt sind. Bei der Europäischen Lärche ist zudem der Wertebereich beobachteter Kronenansätze vergleichsweise eng. Weiter fällt auf, dass bei Buche und Tanne nennenswerte Punkte unterhalb der Winkelhalbierenden auftreten. Bei diesen Beobachtungen liefern die Modellschätzungen deutliche Überschätzungen.



**Abbildung 2:** Ergebnisse der Kronenansatzmodellierung. Gemessener Kronenansatz über dem geschätzten Wert für die neun angepassten Baumarten.

#### Kronenbreite

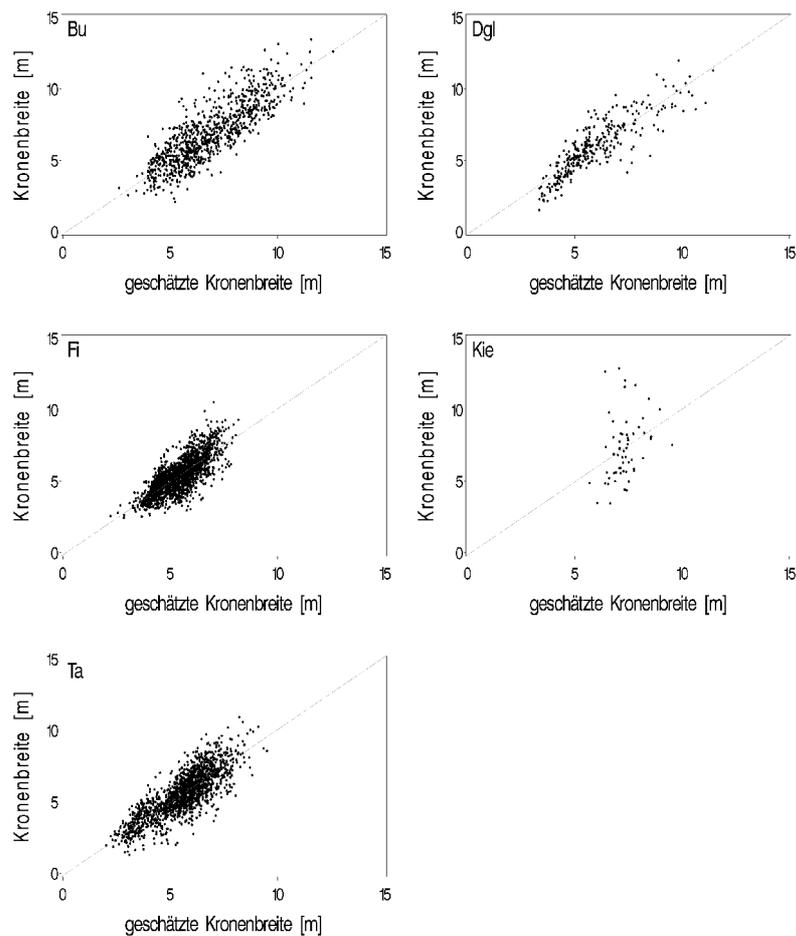
Die Ergebnisse für die Anpassung der Kronenbreitelfunktion [2] sind in Tabelle 3 dargestellt. Bei Buche ist der Parameter  $p_3$  nicht signifikant, und nur der Koeffizient für Parameter  $p_1$  ist signifikant verschieden vom nordwestdeutschen Wert. Bei der Modellanpassung von Douglasie und Kiefer mussten die Koeffizienten der Parameter 2 und 3 jeweils auf Werte von 1,0 bzw. 1,9 fixiert werden. Ohne das Fixieren dieser Werte traten numerische Probleme auf, die ein Konvergieren der Modellanpassungen verhinderten. Folglich wurden nur die Koeffizienten der Parameter 0 und 1 geschätzt. Bei Douglasie zeigte sich hierbei, dass der Koeffizient des Parameters 1 nicht signifikant von dem nordwestdeutschen verschieden ist. Bei Kiefer waren sogar beide Koeffizienten nicht verschieden. Die Koeffizienten des Modells für Tanne weisen keine Besonderheiten auf. Tabelle 3 enthält keine Werte für Eiche, da die geringe Fallzahl zur Verfügung stehender Beobachtungen (28) keine gültige Anpassung dieses Modells gestattete.

Die Korrelationswerte zwischen Parameter  $p_0$  und den anderen Parametern ( $CorrelP_0$ ) deuten an, dass generell ein hohes Maß an Zusammenhang zwischen  $p_1$  und  $p_0$  besteht. In den Modellen für Fichte, Kiefer und Tanne sind diese Parameter sogar mit Werten von 0,95 oder höher korreliert. Die Werte der Korrelation zwischen den Parametern  $p_1$ - $p_2$  und  $p_1$ - $p_3$  liegen jeweils deutlich unter 0,5 und sind damit zu vernachlässigen. Die Korrelationen zwischen  $p_2$  und  $p_3$  hingegen lieferten für alle Baumarten Werte zwischen 0,85 und 0,9 (Werte nicht in Tabelle 3 enthalten).

Da die Kronenbreiten lediglich als von einem Prädiktor (d) abhängig geschätzt wird, ist die Prüfung von Multikollinearität nicht nötig.

**Tabelle 3:** Koeffizientenschätzung der Kronenbreitelfunktion. Nicht signifikante Parameter sind kursiv gedruckt; Schätzwerte, die sich nicht signifikant von den nordwestdeutschen Werten unterscheiden, sind grau eingefärbt. Die Werte der Spalte CorrelP0 bezeichnen das Maß der Korrelation (Korrelationsmatrix) zwischen dem jeweiligen Koeffizientenschätzwert mit dem des Koeffizienten p0. In den Spalten p2fix und p3fix sind diejenigen Werte eingetragen, auf die die Parameter p2 bzw. p3 fixiert wurden, um bei der Modellschätzung das Konvergieren zu ermöglichen.

Baumart	Parameter	Estimate	StdErr	LowerCL	UpperCL	Probt	CorrelP0	p2fix	p3fix
Bu	p0	2.857	0.101	2.659	3.056	0.00			
	p1	0.141	0.003	0.135	0.148	0.00	-0.92		
	p2	5.696	1.275	3.194	8.198	0.00	-0.06		
	p3	4.001	4.747	-5.315	13.317	0.40	-0.20		
Dgl	p0	1.654	0.165	1.328	1.979	0.00		1.000	1.900
	p1	0.090	0.003	0.083	0.097	0.00	-0.94		
Fi	p0	2.796	0.076	2.646	2.946	0.00			
	p1	0.074	0.002	0.070	0.077	0.00	-0.96		
	p2	5.432	1.838	1.827	9.037	0.00	-0.26		
	p3	1.342	0.642	0.082	2.602	0.04	-0.53		
Kie	p0	2.883	1.824	-0.772	6.537	0.12		1.000	1.900
	p1	0.095	0.039	0.018	0.172	0.02	-0.99		
Ta	p0	2.625	0.084	2.460	2.790	0.00			
	p1	0.083	0.002	0.079	0.087	0.00	-0.95		
	p2	4.618	0.933	2.788	6.447	0.00	-0.10		
	p3	1.647	0.711	0.252	3.041	0.02	-0.38		



**Abbildung 3:** Ergebnisse der Kronenbreitenmodellierung. Gemessene Kronenbreite über dem geschätzten Wert für die sechs angepassten Baumarten.

Abbildung 3 verdeutlicht die Zusammenhänge zwischen gemessenen und geschätzten Werten für die Kronenbreite getrennt nach Baumarten. Generell fällt eine zufriedenstellende graphische Übereinstimmung der geschätzten mit den gemessenen Werten auf. Ein leichter Trend zur Unterschätzung ergibt sich bei größeren Werten, die dann oberhalb der Winkelhalbierenden liegen. Diese Unterschätzung ist besonders auffällig bei Buche, Fichte und Tanne. Ein generell sehr schlechter Zusammenhang zwischen geschätzten und gemessenen Werten sowie die insgesamt sehr niedrige Anzahl gemessener Werte fällt bei Kiefer auf.

#### Grundflächenzuwachs

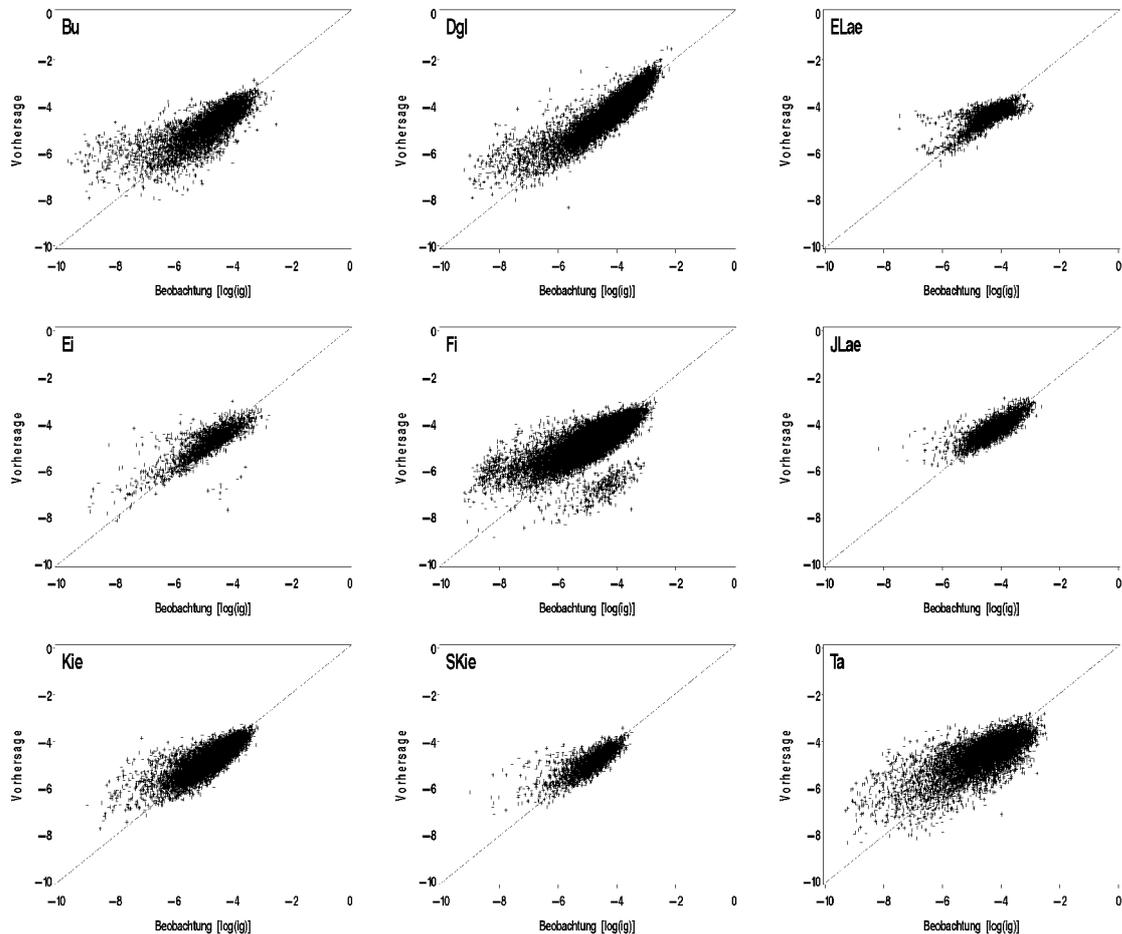
Alle Koeffizienten der vier Parameter der Grundflächenzuwachsfunction sind signifikant (Tabelle 4). Da die Modellanpassung als multiple lineare Regression durchgeführt wurde, sind – im Gegensatz zu den zwei vorgenannten Funktionen – auch die Vorzeichen und die Beträge der Koeffizienten interpretierbar. Insbesondere fallen die positiven Werte der Koeffizienten des Parameters Kronenmantelfläche (p1) auf. Im direkten Vergleich zwischen den Baumarten fallen Buche und Tanne mit besonders niedrigen Werten auf (1,19 und 1,06), wohingegen der logarithmierte Grundflächenzuwachs bei Douglasie und Eiche besonders stark von der Kronenmantelfläche getrieben wird (2,15 und 1,69). Der den Grundflächenzuwachs reduzierende Effekt des Alters wird anhand der negativen Vorzeichen der Koeffizienten von Parameter p2 offensichtlich. Ein besonders starkes Nachlassen des Grundflächenzuwachses mit zunehmendem Alter wird anhand des niedrigen Wertes von -1,68 für die Douglasie ersichtlich. Ein besonders geringes Nachlassen dieses Zuwachses wurde für Tanne und Buche festgestellt (-0,11 und -0,51). Mit Ausnahme der Schwarzkiefer reagieren alle Baumarten mit einer Zuwachsreduktion auf erhöhte Konkurrenz. Dies wird anhand der negativen Vorzeichen der Koeffizienten von Parameter p3 deutlich. Dabei reagieren offensichtlich Tanne und Buche auf erhöhte Konkurrenz mit einer besonders stark ausgeprägten Zuwachsreduktion (-1,48 und -1,09), wohingegen die Japanische und die Europäische Lärche die höchsten Werte aufweisen (je -0,25). Diese Werte entsprechen einer geringeren konkurrenzbedingten Zuwachsreduktion im Vergleich mit den anderen Baumarten. Nur bei Schwarzkiefer scheint sich erhöhte Konkurrenz erhöhend auf den Grundflächenzuwachs auszuwirken.

Die Werte des Varianzinflationsfaktors (‘VarianceInflation’) liegen fast ausschließlich unterhalb von 5 und belegen damit, dass die Prädiktoren insgesamt kaum multikollinear miteinander verbunden sind. Lediglich im Datensatz der Europäischen Lärche ist ein geringes Maß an Multikollinearität jeweils zwischen den Prädiktoren logarithmierte Kronenmantelfläche (p1), logarithmiertes Alter (p2) und den restlichen Prädiktoren vorhanden. Die Werte sind damit aber immer noch unkritisch (Fahrmeir et al. 2007, S. 172 f.).

**Tabelle 4:** Koeffizientenschätzung der Grundflächenzuwachsfunction. Alle Parameter sind signifikant auf dem 0,05-Niveau. VarianceInflation bezeichnet das Maß der linearen Korrelation des jeweiligen Prädiktors mit den anderen Prädiktoren.

Baumart	Kenngroße	p0	p1	p2	p3
Ei	Estimate	-7.456	1.685	-1.188	-0.495
	StdErr	0.094	0.031	0.038	0.041
	VarianceInflation	0.000	4.465	4.123	1.208
Bu	Estimate	-7.839	1.192	-0.507	-1.093
	StdErr	0.114	0.013	0.025	0.023
	VarianceInflation	0.000	1.144	1.147	1.018
Fi	Estimate	-7.735	1.502	-0.917	-0.487
	StdErr	0.040	0.007	0.007	0.008
	VarianceInflation	0.000	1.254	1.314	1.198
Ta	Estimate	-8.163	1.064	-0.109	-1.485
	StdErr	0.113	0.011	0.023	0.024
	VarianceInflation	0.000	1.042	1.041	1.066
Dgl	Estimate	-8.302	2.150	-1.678	-0.378
	StdErr	0.033	0.008	0.010	0.016
	VarianceInflation	0.000	2.256	2.152	1.079
Kie	Estimate	-6.721	1.464	-1.038	-0.475
	StdErr	0.042	0.012	0.013	0.018
	VarianceInflation	0.000	2.011	1.945	1.229
SKie	Estimate	-7.428	1.643	-1.011	0.125
	StdErr	0.098	0.026	0.029	0.034
	VarianceInflation	0.000	1.790	2.016	1.342
ELae	Estimate	-6.538	1.429	-1.088	-0.252
	StdErr	0.048	0.023	0.025	0.066
	VarianceInflation	0.000	5.018	5.559	1.258
JLae	Estimate	-7.561	1.546	-1.006	-0.253
	StdErr	0.073	0.019	0.018	0.029
	VarianceInflation	0.000	2.979	2.681	1.302

Aus der Gegenüberstellung der beobachteten und modellierten Werte des logarithmierten Grundflächenzuwachs (Abbildung 4) wird ersichtlich, dass es bei allen Baumarten zu einer guten allgemeinen Übereinstimmung kommt. Allerdings fällt auf, dass es im unteren Wertebereich zu einer systematischen Überschätzung der Werte kommt (Werte oberhalb der Winkelhalbierenden). Außerdem existiert bei Fichte eine Ausreißer-Punktwolke unterhalb der Winkelhalbierenden, deren reale Werte durch das Modell deutlich unterschätzt werden.



**Abbildung 4:** Ergebnisse der Grundflächenzuwachsmodellierung. Geschätzter logarithmierter Grundflächenzuwachs (Vorhersage) über dem gemessenen Wert (Beobachtung [log(g)]) für die neun untersuchten Baumarten.

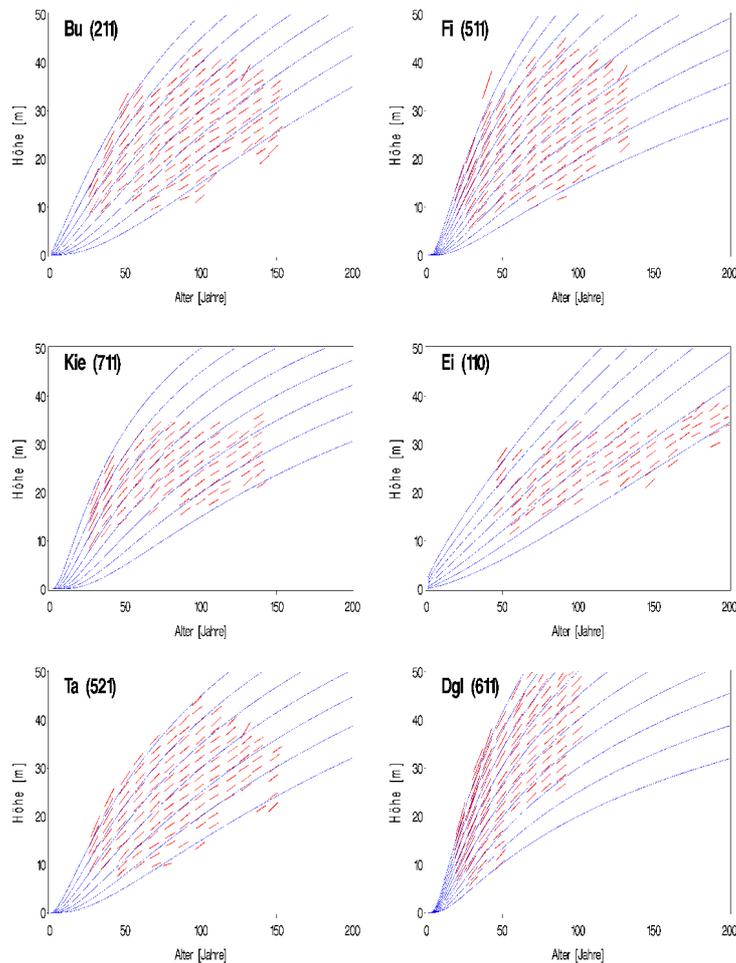
#### Höhenzuwachs

In Tabelle 5 sind die Koeffizienten der Höhenzuwachsfunction wiedergegeben. Alle Koeffizienten aller Baumarten sind signifikant. Da in der nordwestdeutschen Modellversion ein anderes Vorgehen für die Vorhersage des Höhenwachstums gewählt wurde, ist ein direkter Vergleich auf der Basis der Koeffizienten nicht möglich. Dieser Vergleich wird anhand der Evaluierungsergebnisse vorgenommen.

Die Anpassung des Höhenzuwachsmodells wird besser ersichtlich durch graphische Visualisierung. In Abbildung 5 ist die Alters-Höhen-Beziehung für die sechs berücksichtigten Baumarten aufgetragen, und es ist erkennbar, dass für eine vergleichsweise umfangreiche Datengrundlage zur Verfügung stand. Richtungsfelder wurden nur dann berücksichtigt, wenn mindestens fünf Zuwachsbeobachtungen in einer Höhen-Alters-Klasse, also fünf Bestände für einen roten Strich, vorhanden waren. Bei der Douglasie fällt insbesondere das rasche Höhenwachstum auf, das durch die Oberhöhenbonität 65 als oberste blaue Linie repräsentiert wird. Junge Eichenbestände (jünger als 50 Jahre) und Douglasienbestände älter als 100 Jahre waren jedoch nicht in ausreichender Anzahl für die Modellanpassungen vorhanden.

**Tabelle 5:** Koeffizientenschätzung der Höhenzuwachsfunction. Alle Parameter sind signifikant auf dem 0,05-Niveau.

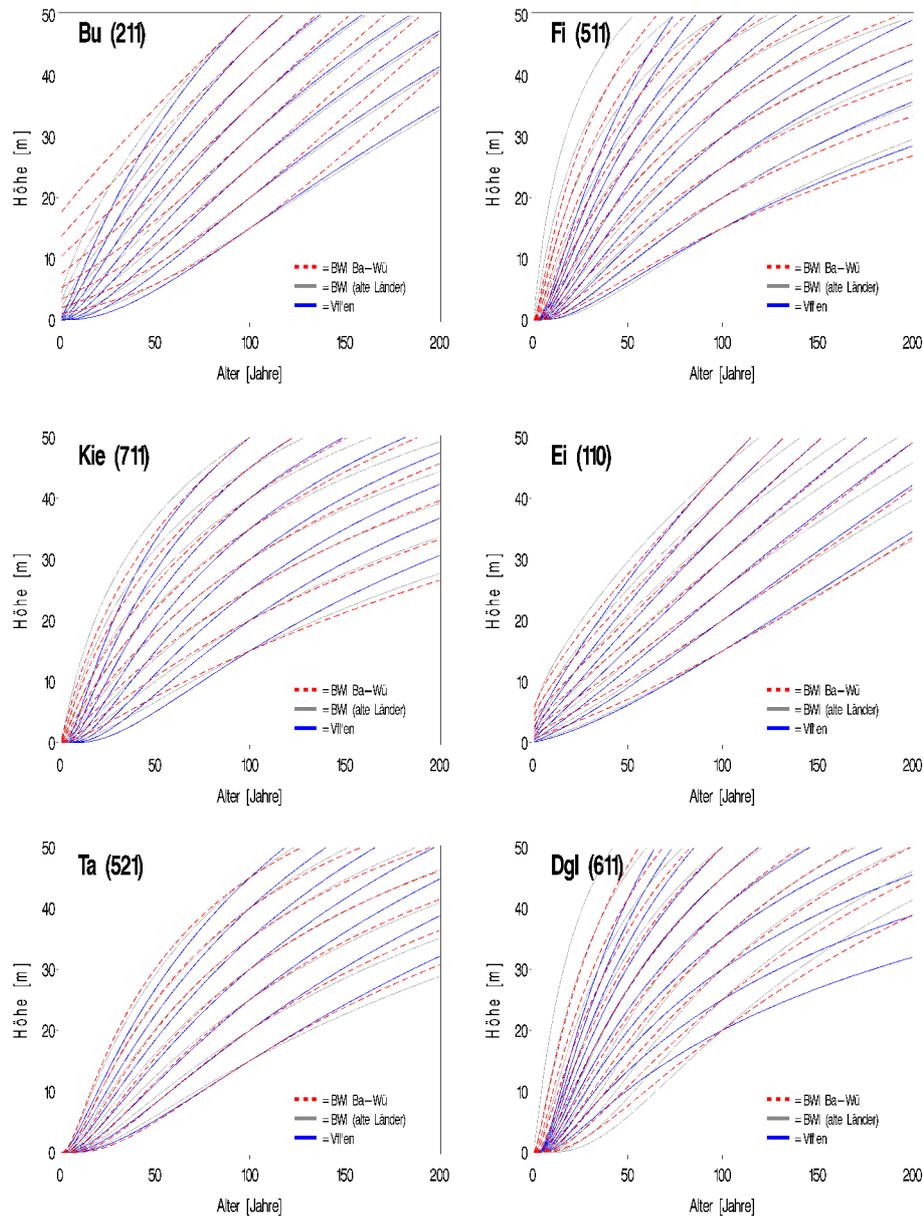
Baumart	Parameter	Estimate	StdErr	LowerCL	UpperCL
Ei	p0	0.638	0.068	0.502	0.773
	p1	0.089	0.022	0.046	0.132
	p2	1.291	0.137	1.018	1.563
Bu	p0	0.743	0.051	0.642	0.844
	p1	0.210	0.039	0.134	0.286
	p2	1.149	0.041	1.068	1.230
Fi	p0	1.115	0.038	1.040	1.190
	p1	0.613	0.069	0.476	0.749
	p2	1.367	0.075	1.218	1.515
Ta	p0	0.883	0.048	0.787	0.979
	p1	0.348	0.055	0.239	0.458
	p2	1.170	0.042	1.087	1.252
Dgl	p0	1.297	0.050	1.198	1.397
	p1	0.884	0.104	0.678	1.089
	p2	1.573	0.130	1.316	1.831
Kie	p0	0.967	0.037	0.893	1.041
	p1	0.566	0.063	0.441	0.691
	p2	1.112	0.035	1.043	1.181



**Abbildung 5:** Ergebnisse der Höhenzuwachsmodellierung. Empirische Richtungsfelder (rote/graue Striche) und darauf aufgebaute Bonitätsfächer (blaue/schwarze Linien) für die sechs untersuchten Baumarten.

Bei der Gegenüberstellung der Bonitätsfächer der Versuchsflächendaten mit den auf Bundeswaldinventurdaten basierenden (Abbildung 6) wird zunächst ersichtlich, dass das Höhenwachstum bis zum Alter 50 durch die Versuchsflächendaten als deutlich verhaltener eingestuft wird, als durch Bundeswaldinventurdaten. Bei Fichte und

Douglasie fällt auf, dass die Bonitätsfächer bis zum Alter 100 deutlich enger beieinander liegen. Erst in höherem Alter ab ca. 100 Jahren unter- und überschreiten die Bonitätskurven diejenigen auf der Basis der Bundeswaldinventurdaten. Bei Buche fällt zusätzlich auf, dass die Koeffizienten der Bundeswaldinventurdaten für Baden-Württemberg teilweise fehlerhaft sind, da die Höhe im Alter 0 nicht systematisch auf 0 geschätzt wird. Das Höhenwachstum in älteren Beständen jenseits von 100 Jahren wird für die Baumarten Fichte, Tanne und Kiefer auf der Grundlage der Versuchsflächendaten deutlich höher eingestuft als durch die Bundeswaldinventurdaten.



**Abbildung 6:** Ergebnisse der Höhenzuwachsmodellierung. Empirische Richtungsfelder (rote/graue Striche) und darauf aufgebaute Bonitätsfächer (blaue/schwarze Linien) für die sechs untersuchten Baumarten.

Einen zusammenfassenden Überblick über die Parametrisierung der vier Modellgleichungen liefert Tabelle 6. Mit besonders hohen Fallzahlen sticht das Kronenansatzmodell hervor (ca. 148.000), mit besonders niedrigen Anzahlen das Modell zur Schätzung der Kronenbreiten (ca. 4.500). Auffällig hohe Bestimmtheitsmaße sind in den Modellen zur Schätzung des Kronenansatzes für die Baumarten Eiche, Kiefer und Schwarzkiefer zu finden (größer als 0,8), besonders geringe Werte liefern die Modelle zur Schätzung des logarithmierten Grundflächenzuwachses für die Baumarten Fichte, Tanne, Schwarzkiefer und Japanische Lärche (kleiner als 0,5). Für die Berechnungen des Höhenzuwachses wurde die Modellanpassung an die Richtungsfelder, also bereits an Mittelwerte, vorgenommen. Der Anteil erklärter Varianz (=Bestimmtheitsmaß) als Maß der Anpassungsgüte ist in diesem Fall nicht sinnvoll. In

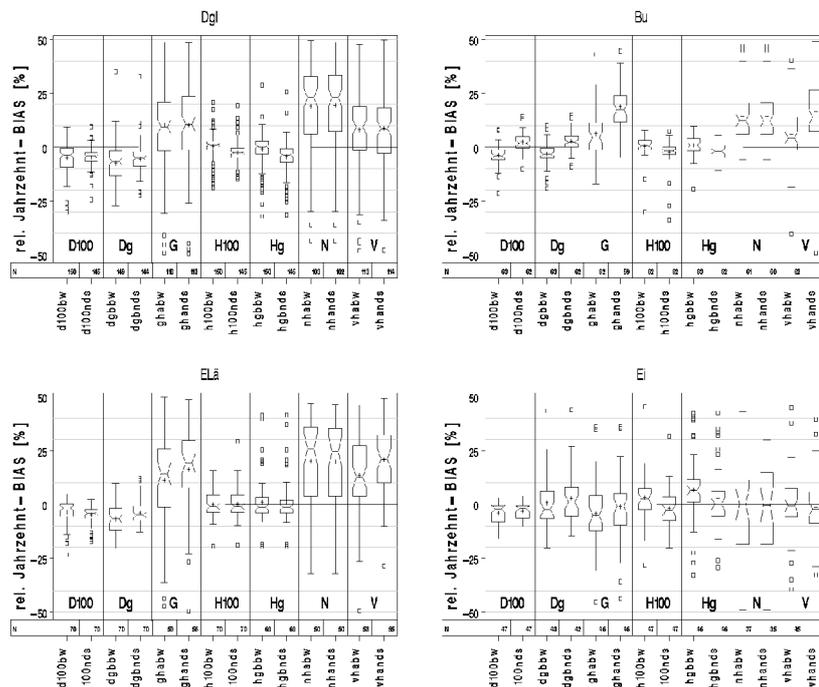
grauer Schattierung wurden diejenigen Baumartenmodelle gekennzeichnet, die zwar zunächst berechnet wurden, deren Werte aber nicht an BWinPro übergeben wurden. Dies beruhte auf nicht signifikanter Verschiedenheit der Koeffizienten (Kronenbreite bei Kiefer) oder nicht ausreichender Datengrundlage (Kronenansatz bei Europäischer und Japanischer Lärche).

**Tabelle 6:** Übersicht über die parametrisierten Modellgleichungen. B: Bestimmtheitsmaß, Bnl: nicht-lineares Bestimmtheitsmaß, N: Anzahl an Beobachtungen, log(ig): logarithmierter Grundflächenzuwachs. Grau dargestellte Baumartenmodelle wurden zunächst parametrisiert, aber nicht in BWinPro integriert.

Baumart		Eiche	Buche	Fichte	Tanne	Douglasie	Kiefer	Schw.- kiefer	Eur. Lä	Jap. Lä	Summe
BA-Code Nds.		110	211	511	521	611	711	712	811	812	
Kronenansatz	N	5644	17272	49564	17956	38000	10716	5768	2832	656	148408
	Bnl	0.89	0.43	0.76	0.70	0.68	0.81	0.89	0.27	0.56	
Kronenbreite	N		904	1823	1503	294	58				4582
	Bnl		0.70	0.58	0.67	0.73	0.10				
log(ig)	N	2851	6610	41028	10063	18499	12349	3092	3571	4683	102746
	B	0.57	0.54	0.46	0.47	0.62	0.52	0.47	0.59	0.42	
Höhenzuwachs		1338	2341	20669	3756	11134	6501				45739

### Evaluierung

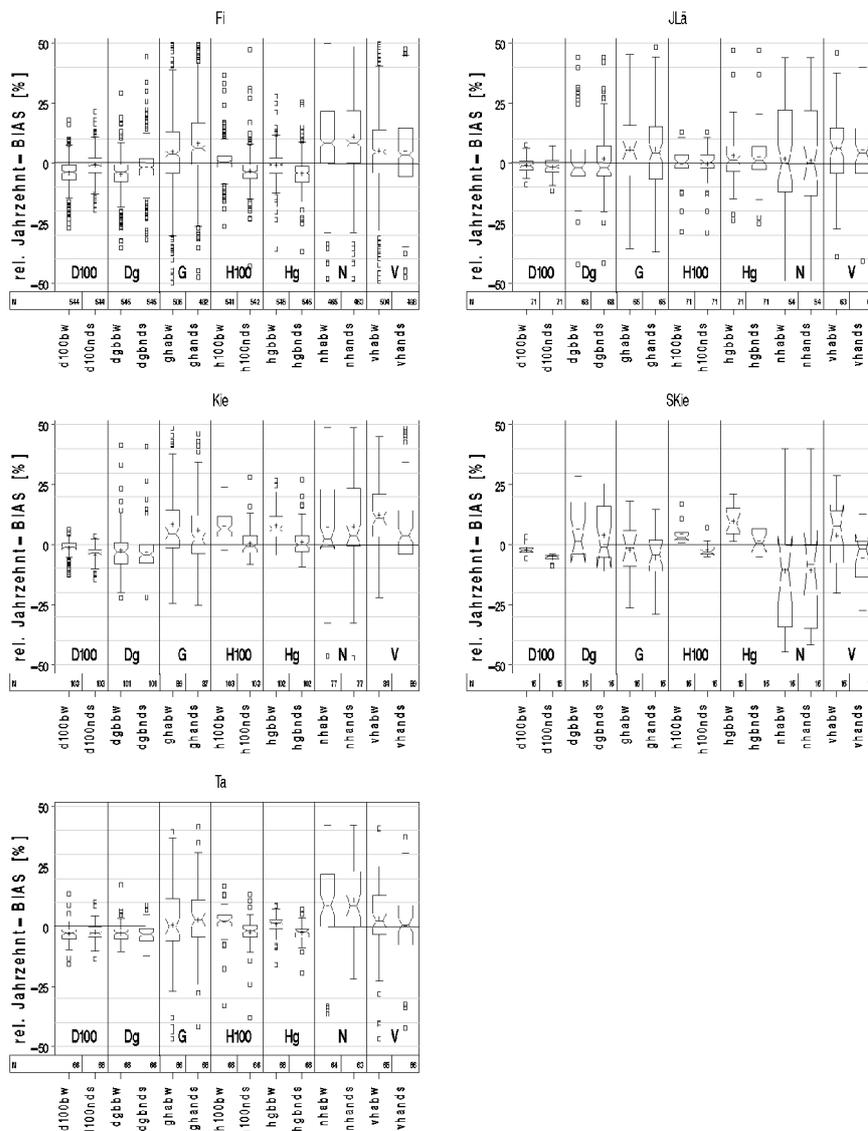
Die Werte des relativen Jahrzehnt-BIAS sind in Abbildung 7 als Boxplots wiedergegeben. Für jede Baumart wurde eine Teilgraphik erstellt, und in jeder Teilgraphik sind die Untersuchungskennwerte Durchmesser der 100 stärksten Bäume (D100), Durchmesser des Grundflächenmittelstamms (Dg), Grundfläche (G), Höhe der 100 stärksten Bäume (Spitzenhöhe, H100), Höhe des Grundflächenmittelstamms (Hg), Stammzahl (N) und Vorrat (V) dargestellt. Für jeden dieser Kennwerte stehen sich zwei Boxplots gegenüber, von denen der linke die mit den neuen baden-württembergischen Koeffizienten (Endbuchstaben ‚bw‘) erzielten Ergebnisse, der rechte die Ergebnisse auf der Grundlage der nordwestdeutschen Modellkoeffizienten (Endbuchstaben ‚nds‘) widerspiegelt.



**Abbildung 7:** Ergebnisse der bestandesweisen Evaluierung. Relativer Jahrzehnt-BIAS für die Baumarten Douglasie, Buche, Europäische Lärche und Eiche (4 Teilgraphiken). In jeder Teilgraphik ist der BIAS je für die Kennwerte Durchmesser der 100 stärksten Bäume (D100), Durchmesser des Grundflächenmittelstamms (Dg), Grundfläche (G), Höhe der 100 stärksten Bäume (Spitzenhöhe, H100), Höhe des Grundflächenmittelstamms (Hg), Stammzahl (N) und Vorrat (V) dargestellt. Für jede dieser Kenngrößen sind im direkten Vergleich die BIAS-Werte der baden-württembergische Parametrisierung (Endbuchstaben ‚bw‘) denen der nordwestdeutschen (Endbuchstaben ‚nds‘) gegenübergestellt.

Bei Douglasie, Buche und Europäischer Lärche fällt auf, dass der BIAS für die Höhenkennwerte H100 und Hg vernachlässigbar klein ist, die Durchmesserkenwerte D100 und Dg im Mittel um bis zu ca. 7% unterschätzt werden, und dass Stammzahl, Grundfläche und Vorrat deutlich überschätzt werden. Bei Buche ist auffällig, dass die Durchmesserprognose mit nordwestdeutschen Kalibrierungswerten zu deutlich höheren Werten führt als die mit baden-württembergischen. Bei Eiche werden die Grundfläche sowie die D100-Werte dagegen im Mittel leicht unterschätzt.

In Abbildung 8 sind in gleicher Weise wie in Abbildung 7 die relativen Jahrzehnt-BIAS-Werte dargestellt, allerdings für die Baumarten Fichte, Japanische Lärche, Kiefer, Schwarzkiefer und Tanne. Bei Fichte, Japanischer Lärche und Tanne weisen die Höhenkennwerte im Mittel vernachlässigbar kleinen BIAS auf. Bei Schwarzkiefer und Kiefer liefert die baden-württembergische Simulation hingegen eine deutliche Überschätzung beider Kennwerte. Hier liegt die nordwestdeutsche Simulation im Mittel deutlich näher an den realen Daten. Bei Fichte und Tanne werden die Durchmesserkenwerte (D100, Dg) leicht unterschätzt, und bei Fichte ergibt die nordwestdeutsche Simulation im Mittel sogar geringeren BIAS. Wie in Abbildung 7 wird auch hier deutlich, dass Stammzahl, Grundfläche und Vorrat teilweise erheblich überschätzt werden. Nur bei Schwarzkiefer wird die Stammzahl unterschätzt, und bei Japanischer Lärche ergibt sich bei der Stammzahl im Mittel kein BIAS.



**Abbildung 8:** Ergebnisse der bestandesweisen Evaluierung. Relativer Jahrzehnt-BIAS für die Baumarten Fichte, Japanische Lärche, Kiefer, Schwarzkiefer und Tanne (5 Teilgraphiken). Erläuterungen wie in Abbildung 7.

## Diskussion

Bei der Parametrisierung der Funktionen zur Schätzung des Kronenansatzes, der Kronenbreite und des logarithmierten Grundflächenzuwachses wurden signifikante Unterschiede zur Modellkalibrierung für Nordwestdeutschland festgestellt. Der Fall, dass alle baden-württembergischen Koeffizienten eines Modells nicht signifikant verschieden von den nordwestdeutschen sind, trat in keinem der parametrisierten Modelle ein. Somit bestehen für die untersuchten Baumarten systematische Unterschiede zwischen diesen beiden Bezugsregionen.

Bei der Parametrisierung der Kronenansatzfunktion für Buche zeigten sich drei der vier Koeffizienten als nicht signifikant verschieden von den nordwestdeutschen. Dies lässt die Schlussfolgerung zu, dass die Wirkungsmechanismen zur Kronenlängenausformung bei Buchen in Baden-Württemberg denen in Nordwestdeutschland ähnlich sind. Der einzige Unterschied besteht in Parameter 4, dessen Koeffizient einen etwas anderen Einfluss der Bestandesspitzenhöhe auf den Kronenansatz des Einzelbaums anzeigt. Aufgrund der schlechten Datenlage und Modellanpassung der Kronenansatzfunktion für Europäische und Japanische Lärche wurden die ermittelten Koeffizienten nicht weiter verwendet. Stattdessen wurden die Koeffizienten für Nordwestdeutschland belassen.

Die beobachtete Überschätzung der Kronenansätze bei Tanne und Buche könnten durch Sekundärkronenausbildung verursacht sein. Nach den Vorgaben für die Datenerhebung werden in Baden-Württemberg auch Klebäste und Wasserreiser als primäre Grünäste angesprochen, sobald sie einen Durchmesser von fünf Zentimetern übersteigen. Mit dieser Definition sinkt der tatsächliche Kronenansatz erheblich. Die eventuell hierdurch verursachte Überschätzung könnte also auf diese Definition zurückzuführen sein.

Aufgrund der recht eingeschränkten Datenlage für Kronenbreiten wurden gültige Modelle nur für die Baumarten Buche, Fichte, Tanne und Douglasie erstellt. Bei Eiche und Kiefer lagen zunächst zwar Messdaten vor, jedoch konnten mit den geringen Fallzahlen keine plausiblen Modelle erstellt werden. Für eine tiefgreifende und fundierte Modellanpassung an baden-württembergische Wachstumsverhältnisse erscheinen ergänzende Datenerhebungen nötig. Insbesondere bei den Hauptbaumarten Eiche und Kiefer sollten ergänzende Kronenablotungen angefertigt werden, die eine Modellanpassung ermöglichen. Die Begründung für diese Schlussfolgerung liegt in der Wichtigkeit des Kronenbreitenmodells für die Durchmesserzuwachsschätzung, denn bei der Durchmesserzuwachsschätzung wird der Prädiktor Kronenmantelfläche verwendet, also eine Größe, die von der Kronenbreite abhängig ist.

Generell wurden die für Baden-Württemberg neu ermittelten Koeffizienten für ein Modell dann übernommen, wenn mindestens ein Koeffizient je Baumartenmodell von den nordwestdeutschen Koeffizienten verschieden war. Grund hierfür liegt darin, dass sobald ein Koeffizient verschieden ist, davon auszugehen ist, dass systematische Unterschiede zwischen den Wachstumsverhältnissen der beiden Regionen bestehen.

In einigen nichtlinearen Modellen waren Korrelationen zwischen Koeffizienten zu beobachten. Solche Korrelationen sind insbesondere in allometrischen Grundfunktionen üblich, wenn zwei Koeffizienten gleichzeitig als Faktor und als Exponent für einen Parameter (Prädiktor) verwendet werden. Hohe Korrelationen drücken in solchen Fällen aus, dass auch andere Werte der Koeffizienten als die ermittelten zu gleichen Ergebnissen führen könnten. Sie drücken also Abhängigkeiten und Zusammenhänge aus. Sie besagen nicht, dass die Modellspezifizierung ungültig ist.

Da die in BWInPro für Nordwestdeutschland hinterlegten Modellgleichungen auf umfangreiche grundlegende Arbeiten gestützt sind, wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit generell die Funktionsformen der Modellgleichungen nicht verändert, obwohl dies prinzipiell möglich ist. Als Konsequenz mussten jedoch auch vereinzelt Parameter der baden-württembergischen Parametrisierung verwendet werden, die keinen signifikanten Beitrag zur Regressionsschätzung lieferten (z. B. P2 bei Fichte, Japanische Lärche, Tanne im Kronenansatzmodell, oder P3 bei Buche im Kronenbreitenmodell).

Bei der Parametrisierung der Grundflächenzuwachsfunction wurde eine Überschätzung im unteren Wertebereich beobachtet (Abbildung 4). Zur Überprüfung dieses Befunds wurde die gleiche Grafik in entlogarithmierter, also rücktransformierter Skalierung betrachtet. Hieraus wurde ersichtlich, dass durch das Transformieren die Streuung im oberen Wertebereich reduziert wurde, jedoch die im unteren Wertebereich beobachtete Erhöhung der Streuung hervorgerufen wurde. Solche Unterschiede zwischen ursprünglicher und logarithmierter Skalierung sind als Transformationseffekte, insbesondere bei gleichzeitiger Transformation von Antwort- und erklärenden Variablen, durchaus zu erwarten und stellen keine grundlegenden Probleme dar (Pretzsch 2002, S. 148f.). Alternativ kämen die Verwendung eines verallgemeinerten linearen Modells mit log-link oder die Verwendung nichtlinearer Regressionsgleichungen in Betracht (Miller 1984), die jedoch im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht angewendet wurden. Der beobachtete lineare Trend in den Residuen der angepassten Modellfunktionen legt nahe, dass eine Überarbeitung des Grundflächenzuwachsmo­dells zu Verbesserungen führen könnte.

Die ebenfalls bei der Grundflächenzuwachsfunction festgestellte Ausreisserwolke bei Fichte (Abbildung 4) wurde näher untersucht und geht auf ein Einheiten-Problem zurück. Die Messwerte von Kronenablotungsdaten wurden in Metern übergeben, wohingegen das Eingangsformat Dezimeter erfordert. Dieser Fehler wurde behoben, ist jedoch im vorliegenden Bearbeitungszustand nicht berücksichtigt.

## Evaluierung

Die Vorhersage der Höhenwerte ist im Allgemeinen als sehr gut zu bezeichnen. Auch gab es keine systematischen Unterschiede bezüglich mittlerer Höhe und Spitzhöhe. Insbesondere lieferte die Anpassung an baden-württembergische Daten eine deutliche Verbesserung und Reduzierung des BIAS. Lediglich bei Kiefer und Schwarzkiefer wurden die Höhenwerte zu hoch prognostiziert. Bei diesen Baumarten lagen die Prognosen auf Basis der nordwestdeutschen Modellkoeffizienten deutlich besser.

Alle anderen Evaluierungskenngrößen sind derzeit noch von Fehlern gekennzeichnet, die auf Überschätzungen der Stammzahlen zurückgehen. Es ist bislang nicht gelungen, BWinPro die reale Stammzahlentwicklung korrekt zu übergeben. Die Folge der zu hohen Stammzahlen findet sich zum einen in der systematischen Überschätzung von Grundfläche und Vorrat, zum anderen in den zumeist zu niedrig geschätzten Durchmesserwerten wieder. Erst wenn dieser Fehler in der Evaluierung behoben ist, können weitere Auswertungen und tabellarische Zusammenstellungen des BIAS folgen, die wiederum für die Beurteilung der Verbesserung durch die Parametrisierung dienen können.

## Literatur

- Albrecht, A., 2007. Evaluierung des Waldwachstumssimulators Silva 2.2 anhand langfristiger ertragskundlicher Versuchsflächen in Baden-Württemberg, in: Nagel, J. (Hrsg.): Jahrestagung Deutscher Verband forstlicher Forschungsanstalten, Sektion Ertragskunde
- Albrecht, A., Hein, S., Kohnle, U. und Biber, P., 2009. Evaluierung des Waldwachstumssimulators Silva 2.2 anhand langfristiger ertragskundlicher Versuchsflächen in Baden-Württemberg. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung 180(3/4), S. 55-64
- Bösch, B., 2001. Neue Bonitierungs- und Zuwachshilfen, Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (Hrsg.): Wissenstransfer in Praxis und Gesellschaft
- Šeho, M., Kohnle, U. und Albrecht, A., 2010. Wachstumsanalysen von vier Schwarzkiefer-Provenienzen auf trockenen Standorten in Baden-Württemberg. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung im Druck
- Fahrmeir, L., Kneib, T. und Lang, S., 2007. Regression. 1. Auflage, Springer, Berlin-Heidelberg, 501 S.
- Mayer, P., Brang, P., Dobbertin, M., Hallenbarter, D., Renaud, J.-P., Walthert, L. und Zimmermann, S., 2005. Forest storm damage is more frequent on acidic soils. Annals of Forest Science 62, S. 303-311
- Mette, T., Albrecht, A., Ammer, C., Biber, P., Kohnle, U. und Pretzsch, H., 2009. Evaluation of the forest growth simulator SILVA on dominant trees in mature mixes Silver fir-Norway spruce stands in South-West Germany. Ecological Modelling 220, S. 1670-1680
- Miller, D. M., 1984. Reducing Transformation Bias in Curve Fitting. The American Statistician 38(2), S. 124 ff.
- Nagel, J., 2005. Modellfunktionen und Koeffizienten des Forest Simulators BWinPro Version 7.0, elektronisches Dokument, <http://www.nfv.gwdg.de/A/BwinPro/Download/ForestSimulatorBWINPro7.zip>, 24.03.2006
- Pretzsch, H., 2002. Grundlagen der Waldwachstumsforschung. 1. Auflage, Parey/Blackwell, Berlin, 414 S.
- Pretzsch, H., Biber, P., Durský, J., Gadow, K. v., Hasenauer, H., Kändler, G., Kenk, G., Kublin, E., Nagel, J., Pukkala, T., Skovsgaard, J. P., Sotke, R. und Sterba, H., 2002. Recommendations for standardized documentation and further development of forest growth simulators. Forstwissenschaftliches Centralblatt 121, S. 138-151
- Vanclay, J. K. und Skovsgaard, J. P., 1997. Evaluating forest growth models. Ecological Modelling 98(1), S. 1-12
- Windhager, M., 1999. Evaluierung von vier verschiedenen Waldwachstumssimulatoren, Dissertation, Universität für Bodenkultur, Wien, 217 S.
- Yue, C., Kohnle, U. und Hein, S., 2008. Combining tree- and stand-level growth models: a new approach to growth prediction. Forest Science 54(5), S. 553-566