

# Zur Evaluierung von Wuchsmodellen<sup>1</sup>

Hans Pretzsch

## Zusammenfassung

Gegenstand der Evaluierung sind Einzelbaummodelle für Rein- und Mischbestände aller Alterszusammensetzungen, die vor allem für kurzfristige Prognosen im Rahmen der Nutzungsplanung der Forsteinrichtung, für langfristige Szenariorechnungen bei der Entwicklung waldbaulicher Pflegeprogramme und für die Aus- und Weiterbildung eingesetzt werden. Es werden zunächst die Begriffe Evaluierung, Validierung und Verifizierung eingeführt. Die Evaluierung von Einzelbaummodellen sollte sich zunächst auf den Modellansatz richten. Wichtige Fragen hierbei sind, inwieweit das zu beurteilende Modell in den Informationsfluß der Forstwirtschaft integrierbar ist, ob es die aktuelle Datenbasis und den Wissensstand über waldwachstumskundliche Prozesse ausschöpft und ob sein Komplexitätsgrad dem gesetzten Modellzweck entspricht. Die Validierung des biometrischen Modells durch Vergleich seiner Prognoseergebnisse mit der Wirklichkeit stützt sich auf die Präzision der Prognoserechnung (Streurahmen), die Verzerrung (Bias) und die Treffgenauigkeit des Modells. An Beispielen erfolgt der Vergleich Prognose versus Wirklichkeit auf Bestandes- und Einzelbaumebene. Modelle können weiter aufgrund ihrer Übereinstimmung mit Gesetzmäßigkeiten und Erfahrungswissen geprüft werden. Beispielhaft wird das Modell SILVA 2.2 auf seine Übereinstimmung mit der Stand Density Rule von REINEKE (1933) und mit dem Gesetz der optimalen und kritischen Grundflächenhaltung von ASSMANN (1961) überprüft. Evaluierungskriterien für die Modell-Software sind u. a. Benutzerfreundlichkeit, Rechnersystem-Unabhängigkeit, Programmanwendbarkeit im interaktiven Einsatz oder im Batch-Betrieb und eine umfangreiche Modelldokumentation u. a. in Form eines Handbuches. Die Modellevaluierung stellt einen iterativen Prozeß dar, in den immer wieder neue Daten, neu ergründete Wuchsgesetzmäßigkeiten, Erfahrungswissen der Praxis, technische Neuerungen und Veränderungen des Informationsbedarfes einfließen.

## 1 Einleitung

Die folgenden Überlegungen zur Evaluierung von Wuchsmodellen beziehen sich im wesentlichen auf Einzelbaummodelle für Rein- und Mischbestände aller Alterszusammensetzungen, die folgenden drei Zwecken dienen: (1.) kurzfristigen Prognosen für die Nutzungsplanung, (2.) langfristigen Szenariorechnungen für die Entwicklung von

---

<sup>1</sup> Vortrag anlässlich der Jahrestagung 1999 der Sektion Ertragskunde im Deutschen Verband Forstlicher Forschungsanstalten, Tagungsbericht, S. 1 - 23.

Behandlungsstrategien und (3.) Vermittlung von Wachstumsreaktionen auf Behandlungseingriffe und Störungen im Rahmen der Aus- und Weiterbildung. Beispiele für Einzelbaummodelle dieses Typs sind im deutschsprachigen Raum die Modelle BWIN, PROGNAUS, MOSES und SILVA (NAGEL, 1996; STERBA et al., 1995; HASENAUER, 1994; PRETZSCH, 1992; KAHN und PRETZSCH, 1998).

Die Modellevaluierung muß sich an den Zielen und Zwecken des Modells orientieren. Eine Beurteilung von Modellen sollte sich auf die Eignung des gewählten Modellansatzes, die Validität oder Gültigkeit des entwickelten biometrischen Modells und die Eignung der Software, in welches das biometrische Modell umgesetzt wird, beziehen. Es geht also bei der Beurteilung nicht allein um eine Überprüfung der Genauigkeit des biometrischen Modells (VANCLAY und SKOVSGAARD, 1997).

Zunächst seien die Begriffe Evaluierung, Validierung und Verifizierung geklärt: Unter Evaluierung verstehen wir die „[...] Analyse und Bewertung eines Sachverhalts, v. a. als Begleitforschung einer Innovation. In diesem Fall ist Evaluierung Effizienz- und Erfolgskontrolle zum Zweck der Überprüfung der Eignung eines in Erprobung befindlichen Modells. [...]“ (BROCKHAUS, 1997, Bd. 6, S. 716). Ein Aspekt der Evaluierung ist die Validierung (BROCKHAUS, 1994, Bd. 23, S. 42): „[...] Die Validierung gibt den Grad der Genauigkeit an, mit dem ein Verfahren das mißt, was es zu messen vorgibt [...]. [...] Die Feststellung der Validität (Validierung) geschieht 1) aufgrund der Übereinstimmung des Testergebnisses mit einem Kriterium, das außerhalb von Testwerten [...] gewonnen wird (Kriteriums-V.), 2) aufgrund des Zutreffens einer Vorhersage (Vorhersage-V., engl. Predictive validity), 3) aufgrund logisch-inhaltlicher Plausibilität (inhaltliche V., Content validity) oder 4) aufgrund von im Kontext belegbaren Theorien und Verfahrensweisen (Konstrukt-V.). [...]“. Die Begriffe Validierung und Verifizierung werden häufig fälschlicherweise synonym gebraucht. Ein Wachstumsmodell kann letztlich nie verifiziert werden, denn mit Verifizierung oder Verifikation erfolgt „[...] Allgemein der Erweis der Wahrheit von Aussagen. [...]. [...] Nach der Theorie des „kritischen Rationalismus“ (bes. K. R. POPPER) ist bei allgemeinen empirischen Aussagen (Hypothesen, Gesetzen) keine endgültige Verifizierung, wohl aber eine endgültige Falsifikation möglich. [...]“ (BROCKHAUS, 1994, Bd. 23, S. 213; POPPER, 1984).

## 2 Eignung des Modellansatzes

### 2.1 Integration des Modells in den Informationsfluß der Forstwirtschaft

Die Eignung eines Modellansatzes hängt ganz wesentlich davon ab, inwieweit er in den Informationsfluß der Forstwirtschaft integrierbar ist. Dabei stehen im wesentlichen zwei Fragen im Vordergrund: (1.) Schöpft der Modellansatz die vorhandene Informationsbasis der

forstwirtschaftlichen Praxis aus? (2.) Wird der Modellansatz dem Informationsbedarf der forstwirtschaftlichen Praxis gerecht?

(1.) Die Ertragstafel war beispielsweise gut an den Informationsstand der forstwirtschaftlichen Praxis angepaßt, indem sie für Vorhersagen nur die in ihrer Entstehungszeit verfügbaren Informationen Baumart, Alter, Höhe und Bestockungsgrad voraussetzte. Diese Größen genügten für die Einbindung der Ertragstafel in den Informationsprozeß. Heute würde mit einem solchen Ansatz die Informationsbasis über Waldzustand, Wuchsbedingungen und Waldwachstum nicht annähernd ausgeschöpft. Denn es stehen uns aus Rasterstichprobenerhebungen, Standortkartierung usw. Ausgangsvariablen wie Ausgangsstrukturen, Standortvariablen, Störfaktoren und Risikobelastungen zur Verfügung, die als Eingangsgrößen für Wachstumsmodelle benutzt werden können. Heute würde eine Beschränkung auf die Eingangsgrößen der Ertragstafeln die verbesserte Informationsbasis der Forstverwaltungen geradezu ignorieren. Die Methoden und Modelle der Waldwachstumsforschung sollten so angelegt sein, daß sie die vorhandene Datenbasis der praktischen Forstwirtschaft bestmöglich ausschöpfen und für Planung, Vollzug und Kontrolle nutzbar machen. Die klassische deduktive Vorgehensweise muß deshalb mit zunehmendem Informationsgrad über den Waldzustand durch induktive Elemente ergänzt werden. Modellansätze sollten die lokal verfügbare Datenbasis ausschöpfen, denn in ihnen steckt die halbe Prognose. Unter einem deduktiven Vorgehen verstehen wir in diesem Zusammenhang den Einsatz von Informationsgrundlagen, wie etwa den Einsatz der Ertragstafel, die aus dem ertragskundlichen Versuchswesen entwickelt und dann großflächig benutzt wurde. Die Planungsdaten für den Einzelfall werden dabei aus Tabellenwerken abgeleitet, deduziert. Wird dagegen eine solche Deduktion soweit wie möglich durch Rückgriff auf lokale Datenquellen, etwa durch Erschließung der Rasterstichprobendaten vermieden, so sprechen wir von einem induktiven Vorgehen.

(2.) Während sich die Ergebnisvariablen der Ertragstafeln auf Bestandessummen- und Bestandesmittelwerte des Holzertrages beschränken, bieten Einzelbaumsimulatoren Baum- und Bestandesvariablen zum Holzertrag, zur Geldwertleistung und zum strukturellen Aufbau des Waldbestandes. Ökophysiologische Prozeßmodelle würden in ihren Ausgabegrößen u. a. auch Nährelementbilanzen und Streßempfindlichkeiten abbilden, wie sie für ein nachhaltiges Waldökosystemmanagement im umfassenden Sinne erforderlich wären.

## 2.2 Ausschöpfung von Wissensstand und Datenbasis

Für einen gegebenen Modellzweck sollten die vorhandene Datenbasis und der Stand des biologischen Wissens bestmöglich ausgeschöpft werden. Während zuvor Bestandesmittelwerte und Bestandessummenwerte im Vordergrund standen, rücken seit den 60er Jahren bei Aufnahmen auf langfristigen Versuchsflächen und Waldinventuren zunehmend Einzelbaumdimensionen in den Mittelpunkt. So hat sich in den letzten Jahrzehnten ein

beträchtlicher Fundus an Informationen über die Dimension, Umgebungsstruktur und das Zuwachsverhalten einzelner Bestandesglieder angesammelt. Gleichzeitig hat sich die Informationsbasis über die Standort- und Störfaktoren auf verfeinert aufgenommenen Versuchs- und Inventurflächen verbessert. So erscheint ein standortsensitiver Einzelbaumansatz die verbesserte Datenlage über das Waldwachstum bestmöglich auszuschöpfen. Die Einmessung von Stammfußpunkten, Kronenradienablotungen, Stammanalysen, Triebblängenrückmessungen, Astvermessungen und Qualitätsansprachen an stehenden und liegenden Bäumen gehören heute fast zum Standardrepertoire ertragskundlicher Aufnahmen. Ebenso werden Zwischenstand, Unterstand und Verjüngung einzelbaumweise oder über Zählquadrate erfaßt, so daß die Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Baumarten und Bestandesschichten analysiert werden können. Auf der Grundlage solcher verfeinerter Versuchsflächenaufnahmen wurde in den zurückliegenden Jahren eine Reihe von Gesetzmäßigkeiten auf Einzelbaumebene entwickelt, etwa über den Zusammenhang zwischen Zuwachs und Wuchskonstellation, über die Kronenform in Abhängigkeit von der sozialen Stellung oder über die Zuwachsanlagerung entlang des Schaftes in Abhängigkeit von der Konkurrenz. Diese und weitere Gesetzmäßigkeiten können erst durch Einzelbaummodelle für Planungs- und Kontrollmaßnahmen auf Bestandes- und Betriebsebene nutzbar gemacht werden.

## 2.3 Komplexitätsgrad

Der Komplexitätsgrad von Modellen sollte dem Modellzweck entsprechen. Waren Ertragstafeln oder verteilungsgestützte Wachstumsmodelle durchaus geeignet für die Prognose der Bestandesentwicklung von gleichaltrigen Reinbeständen, so stoßen solche Modellansätze in Reinbeständen, in denen sich die Pflege auf bestimmte Teilkollektive der Population konzentriert (z. B. Auslese-Durchforstung, Z-Baum-Durchforstung, solitärartige Behandlung) und in strukturreichen Mischbeständen auf Grenzen. Zur Vorhersage von Rein- und Mischbeständen aller Alterszusammensetzungen muß eine höhere Modellkomplexität gewählt werden. Positionsabhängige Einzelbaummodelle haben gegenüber Ertragstafeln und Verteilungsmodellen, aber auch gegenüber ökophysiologischen Prozeßmodellen den großen Vorteil, daß bei ihnen die Informationseinheit im Modell und das Objekt der biologischen Anschauung identisch sind. Während in Ertragstafeln und Verteilungsmodellen die Bestandesentwicklung über Mittelwerte, Summenwerte oder Verteilungsfunktionen abstrahiert wurde, bilden Einzelbaummodelle die Veränderung der Baumdimensionen nach, wie sie auch durch Anschauung wahrgenommen werden kann. Dieser Übergang zu positionsabhängigen Einzelbaummodellen hat den Vorzug, daß zuvor rein zum Zwecke der Visualisierung erfaßte und dargestellte Bestandesmuster nun in ihrem Informationsgehalt für die Modellierung genutzt werden können. Die Identität von Informationseinheit des Modells und Objekt biologischer

Anschauung ermöglicht eine wirklichkeitsnahe Darstellung der Simulationsergebnisse, die der besonderen Fähigkeit des Menschen zur Mustererkennung Rechnung trägt.

### 3 Validierung des biometrischen Modells

#### 3.1 Vergleich mit der Wirklichkeit: Streurahmen, Verzerrung, Treffgenauigkeit

Die sicher wichtigste Validierung von Wuchsmodellen besteht im Vergleich zwischen Modellprognose und wirklichem Wuchsverhalten. Eine erste unabhängige Datenbasis bieten hier die Inventurbefunde der Forsteinrichtung aus der Erhebung permanenter Probeflächen. Steuern wir ein Wuchsmodell mit den Standortparametern eines ausgewählten Wuchsbezirkes und den dort üblichen Pflegeprogrammen ein, so gewinnen wir einen ersten Eindruck davon, inwieweit Beobachtungsdaten und Modell übereinstimmen. Beispielhaft zeigt Abbildung 1 eine Reihe von Prognoserechnungen für Fichtenbestände im Wuchsbezirk 13.4 „Vorallgäu“ und gleichzeitig die entsprechenden Inventurbefunde. Wir sehen, daß die Kurvenverläufe der Szenariorechnungen gut mit dem Wertebereich der Inventurbefunde übereinstimmen. Inventurdaten wie diese erbringen aber immer nur unechte Altersreihen, entbehren länger zurückreichender Informationen über die Bestandesgeschichte und sind daher für eine Modellvalidierung nur begrenzt geeignet.

Aussagekräftiger erscheint der Vergleich zwischen Modellprognose und Befunden auf langfristigen Versuchsflächen, wobei der Vergleich Prognose versus Wirklichkeit auf Bestandes- oder Einzelbaumbene erfolgen kann. Solche Vergleiche sollten mit Daten ausgeführt werden, die nicht in die Modellparametrisierung eingeflossen sind.

Der numerische Vergleich zwischen Prognose und Wirklichkeit stützt sich auf drei Maße, die zunächst in Erinnerung gerufen und grafisch veranschaulicht werden (AKÇA, 1997):

Verzerrung oder Bias: Vergleichen wir den Mittelwert von n Prognoserechnungen  $x_i$ ,  $i = 1 \dots n$  mit der wirklichen Entwicklung von Beständen  $X_i$ , so ergeben sich die Differenzen  $e_i = x_i - X_i$ . Die mittlere Differenz zwischen Prognose und Wirklichkeit

$$\bar{e} = \frac{\sum_{i=1}^n e_i}{n} \quad (\text{Formel 1})$$

entspricht dem Bias oder der Verzerrung. Abgesicherte Aussagen über die Verzerrung sind erst möglich, wenn prognostizierte und wirkliche Entwicklungen in größerer Anzahl miteinander

verglichen werden. Auf der schematischen Abbildung 2 (Mitte) sind Prognose und Wirklichkeit stark auseinandergezogen, so daß der in diesem Fall beträchtliche Bias in Erscheinung tritt. Die Verzerrung kann auch in Relation zum mittleren Beobachtungswert ausgedrückt werden

$$\bar{e}\% = \frac{\bar{e} \cdot 100}{\bar{X}}. \quad (\text{Formel 2})$$

Präzision oder Prognosestreuung: Die Präzision quantifiziert die Stärke der Anhäufung einer Reihe von Prognosewerten um ihr arithmetisches Mittel. Da in verschiedenen Komponenten des Modells SILVA 2.2 die Reststreuung durch Zufallsvariablen eingebracht wird, z. B. bei der Strukturgenerierung, dem Grundflächenzuwachsmmodell, Höhenzuwachsmmodell oder Mortalitätsmodell, erbringen Prognosen auch unter ceteris paribus-Bedingungen immer etwas unterschiedliche Ergebnisse (Abb. 3). Die Präzision ist um so größer, je plausibler die zugrundeliegenden Modellgleichungen und je solider die verfügbare Datenbasis ist. Abbildung 4 zeigt beispielhaft für zwei langfristige Szenariorechnungen den Streurahmen des Modells SILVA 2.2 bei 25 Wiederholungen.

Die Präzision wird entweder in Form der Standardabweichung der Prognosewerte um das Prognosemittel

$$s_e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n e_i^2}{n-1}} \quad (\text{Formel 3})$$

oder als Variationskoeffizient

$$s_e\% = \frac{s_e \cdot 100}{\bar{X}} \quad (\text{Formel 4})$$

angegeben werden.

Treffgenauigkeit: Möchten wir ein Modell einer breiteren Genauigkeitsprüfung unterziehen, so werden für eine ganze Reihe von Beständen Prognoserechnungen ausgeführt, so daß die Streuung der Prognoseergebnisse und die Streuung der wirklichen Verläufe bekannt ist. Die Verteilung der Differenzen zwischen Prognose und Wirklichkeit erbringt Aussagen über die Treffgenauigkeit des Modells. Die Treffgenauigkeit setzt sich demnach aus der Präzision und dem Bias zusammen

$$m_x = \sqrt{s_e^2 + \bar{e}^2}. \quad (\text{Formel 5})$$

Die Treffgenauigkeit für wiederholte Prognosen beträgt

$$m_{\bar{x}} = \frac{m_x}{\sqrt{n}}. \quad (\text{Formel 6})$$

Unter der Treffgenauigkeit verstehen wir also den Grad der Annäherung der Schätzung an die Wirklichkeit. Die Genauigkeit kann dadurch mangelhaft sein, daß eine Verzerrung auftritt, also ein Bias  $\bar{e}$  vorliegt. Zum anderen kann ein Mangel an Genauigkeit durch eine geringe Präzision der Schätzung  $s_e$  zustande kommen.

### 3.2 Vergleich mit der Wirklichkeit. Beispiele.

Validierung auf Bestandesebene: Abbildung 5 zeigt beispielhaft die Verteilung der prozentischen Differenzen zwischen wirklichem und geschätztem Volumenzuwachs in Fichtenbeständen. Der Zuwachs wurde jeweils für fünfjährige Zuwachspanoden berechnet und dem wirklichen Volumenzuwachs auf Versuchsflächen gegenübergestellt

$$iv\% = \frac{iv_{\text{real}} - iv_{\text{prog}}}{iv_{\text{real}}} \cdot 100. \quad (\text{Formel 7})$$

Datenbasis bilden insgesamt 220 Beobachtungsperioden. Die Verteilung weist auf eine Verzerrung der Zuwachsschätzung von minus 1.9% hin und läßt einen mittleren Schätzfehler des Volumenzuwachses von 19.84 % erkennen. Das Ergebnis ist gleichbedeutend damit, daß 68% der Zuwachsschätzungen nicht mehr als  $\pm 19.84\%$  vom wirklichen Volumenzuwachs abweichen.

Validierung auf Einzelbaumebene: Ein ähnliches Prinzip der Validierung ist auch auf Basis von Einzelbaumzuwächsen möglich. Abbildung 6 zeigt für die Versuchsflächen Weißenburg 613/2 und Fürstenfeldbruck 612/12 den Vergleich zwischen wirklichen und prognostizierten Durchmesserzuwächsen in 5jährigen Zeitabschnitten (1987-1996 bzw. 1992-1996). Im ersten Fall stimmen wirkliche und prognostizierte Durchmesserzuwächse gut überein und es ergibt sich eine Verzerrung von lediglich - 0.13 cm pro 5jähriger Zuwachspanode. Die Genauigkeit in Form des Variationskoeffizienten beträgt  $\pm 27\%$ . Das ist gleichbedeutend damit, daß 68 % der Prognoseläufe Durchmesserzuwächse erbringen, die nicht mehr als  $\pm 27\%$  von der Wirklichkeit abweichen. Anders liegen die Verhältnisse auf der Versuchsfläche bei Fürstenfeldbruck. Hier werden die Durchmesserzuwächse im Mittel um 1.09 cm überschätzt und der

Variationskoeffizient der Abweichungen liegt bei  $\pm 48\%$  vom wirklichen Durchmesserzuwachs. Im Fall der Versuchsfläche Fürstefeldbruck wurde eine kurze und klimatisch wenig repräsentative Wachstumsperiode für die Validierung herangezogen. Mit der Überlagerung des Wachstumsgangs auf Versuchsflächen durch Klima, Witterung, Stoffeinträge usw. ergibt sich ein grundsätzliches Problem beim Vergleich zwischen Prognose und Wirklichkeit. Ändern sich nämlich die Wuchsbedingungen innerhalb des Zuwachszeitraumes, der für die Modellvalidierung betrachtet wird, und ist diese Veränderung der Wuchsbedingungen nicht im Modell berücksichtigt, so ergibt sich eine Verzerrung, die nicht mit Mängeln des Modells gleichzusetzen ist.

Berücksichtigung von Standortveränderungen: Die Problematik kann an 4 Szenariorechnungen zur Nachbildung des langfristigen Altershöhenverlaufes auf der Versuchsfläche Denklingen 05 (A-Grad) verdeutlicht werden. Dem wirklichen Oberhöhenverlauf des Versuchsbestandes Denklingen 05 (A-Grad) in der Zeit von 1882 bis 1998 sind auf Abbildung 7 vier verschiedene, mit dem Wuchsmodell SILVA 2.2 prognostizierte Wachstumsverläufe gegenübergestellt. Der wirkliche Oberhöhenverlauf ist als 100 % - Linie eingezeichnet, bei den Szenarien 1-4 handelt es sich um simulierte Oberhöhenverläufe für unterschiedliche Standortbedingungen. Die vier Simulationsläufe beginnen mit der wirklichen Bestandessituation im Jahre 1882, bilden die auf der Versuchsfläche ausgeführten und aufgezeichneten Behandlungseingriffe genau nach und unterscheiden sich nur in den zugrundegelegten Standortbedingungen. Bei Szenario 1 (Abb. 7, oben) werden für den gesamten Wachstumszeitraum konstante Wuchsbedingungen unterstellt, von denen wir am Ende des vergangenen Jahrhunderts ausgehen müssen. Bei dieser Einsteuerung vermag das Wuchsmodell SILVA 2.2 die wirkliche Höhenwachstumskurve bis zum Alter 110 mit bemerkenswerter Genauigkeit abzubilden, ab diesem Alter bzw. seit den 60er Jahren weichen prognostizierte und wirkliche Oberhöhenentwicklung dann aber deutlich voneinander ab. Seit Mitte des Jahrhunderts steigt das wirkliche Oberhöhenwachstum gegenüber dem bei konstanten Wuchsbedingungen zu erwartenden stetig an und übertrifft dieses in der Gegenwart um mehrere Prozentpunkte.

Unterstellen wir bei Szenario 2 für den gesamten Wachstumszeitraum Wuchsbedingungen, wie sie in den 80er und 90er Jahren dieses Jahrhunderts gegeben waren (Erhöhung der Temperatur und Verbesserung der Nährstoffversorgung gegenüber der Ausgangssituation im Jahre 1882), so ergibt sich für den gesamten Wachstumszeitraum eine Überschätzung der Oberhöhenentwicklung. Erst im Alter nähern sich prognostizierte und wirkliche Oberhöhen wieder an. Diese und weitere Szenariorechnungen lassen erkennen, daß der wirkliche Oberhöhenverlauf nur dann nachgebildet werden kann, wenn für das letzte Drittel des hier betrachteten Wachstumszeitraumes eine Standortänderung eingesteuert wird. Während die Variation von Temperatur und Niederschlag keine Annäherung an den wirklichen Oberhöhenverlauf erbringt, führt eine Erhöhung der Nährstoffversorgung zu dem gewünschten Ergebnis. Abbildung 7 (unten) stellt die Szenarien 3 und 4 dar, in denen ab dem Alter 110 eine Verbesserung der Nährstoffversorgung um drei bzw. eine Skalenstufe eingesteuert wird. Die

Nährstoffversorgung wird relativ auf einer Skala von 0 bis 1 quantifiziert, und ist bis zum Alter 110 auf 0.2 eingestellt. Für die Folgezeit unterstellt das Szenario 3 eine Nährstoffversorgung von 0.5 und das Szenario 4 eine Nährstoffversorgung von 0.3. Erst die Einsteuerung einer Veränderung in der Nährstoffversorgung während des Prognosezeitraumes erbringt eine Annäherung zwischen wirklichem und prognostiziertem Wachstumsverlauf.

Dem Problem der Veränderung von Wuchsbedingungen während einer Wachstumsperiode, die für die Modellvalidierung eingesetzt wird, kann folgendermaßen entgegengewirkt werden: Es sollten längere Zeitperioden mit mittleren Witterungsbedingungen ausgewählt werden, so daß kurzfristige Witterungsereignisse in den Hintergrund treten. Bei langfristigen Validierungsläufen sollten bekannte Veränderungen von Klima oder Wuchsbedingungen in standortsensitiven Modellen mit eingesteuert werden. Ist weder die erste noch die zweite Maßnahme möglich, so muß der durch die Veränderung der Wuchsbedingungen entstehende Bias akzeptiert werden und sich der Vergleich zwischen Prognose und Wirklichkeit auf tendenzielle Zusammenhänge beschränken.

### 3.3 Vergleich mit Gesetzmäßigkeiten und Erfahrungswissen

Die Nutzbarmachung von bekannten Gesetzmäßigkeiten des Waldwachstums für die Modellvalidierung soll an zwei Beispielen veranschaulicht werden. In beiden Fällen handelt es sich um Gesetzmäßigkeiten auf Bestandesebene:

Die Stand Density Rule von REINEKE (1933): Sie beschreibt die gesetzmäßige Abnahme der Stammzahl mit Zunahme des Mitteldurchmessers Bestandes bei maximaler Dichte

$$\ln N = \ln a + b \cdot \ln dg. \quad (\text{Formel 8})$$

Nach REINEKE folgt diese Abnahme im doppelt-logarithmischen Netz einer Geraden mit der Steigung  $b = -1.605$ . Abbildung 8 (oben) zeigt für süddeutsche Versuchsflächen die Entwicklung der Stammzahl pro ha über dem Mitteldurchmesser im doppelt-logarithmischen Koordinatensystem. Die 120 Fichten-Versuchsparzellen im Alter von 11 bis 166 Jahren mit Grundflächen bis zu 90 qm/ha liegen in den Regionen Bayerische Alpen, Voralpenland, Schwaben und Frankenalb. Die eingezeichnete Gerade mit der Steigung  $b = -1.605$  bezeichnet die nach der Stand density rule von REINEKE (1933) erwartete Stammzahlabnahme. Die Graphik verdeutlicht, daß sich Fichtenbestände - unabhängig von ihrer Ausgangsdichte - einer oberen Grenzbeziehung zwischen Stammzahl pro ha und Mitteldurchmesser nähern, um dann - der Regel von REINEKE folgend - in der Stammzahl abzunehmen.

Es kann nun geprüft werden, ob diese Gesetzmäßigkeit auch vom einzelbaumorientierten Funktionensystem des Simulators SILVA 2.2 erbracht wird. Hierfür wird der

Entwicklungsgang einer größeren Anzahl von Fichten-Reinbeständen auf gutem Standort im südbayerischen Raum simuliert. Abbildung 8 (unten) zeigt, daß sich die  $\ln(N)/\ln(dg)$ -Entwicklungen zunächst parallel zur x-Achse einer oberen Grenzlinie nähern, um dann - einer Gerade mit der Steigung von etwa  $b = -1.746$  folgend - abzunehmen. Eine solche tendenzielle Übereinstimmung des Modellverhaltens mit bekannten Gesetzmäßigkeiten spricht in diesem Fall für das in dem Simulator implementierte Mortalitätsmodell von DURSKY (1997). Die Übereinstimmung ist insofern bemerkenswert, als die Modellierung der Mortalität nicht auf Bestandesniveau, sondern auf Einzelbaumebene erfolgt. Dabei wird die Überlebenswahrscheinlichkeit von Einzelbäumen in Abhängigkeit von Durchmesser, Grundflächenzuwachs, Höhe und Oberhöhenbonität nachgebildet und geschätzt.

Das Gesetz der optimalen und kritischen Grundflächenhaltung von ASSMANN (1961): Es beschreibt den Zusammenhang zwischen der Bestandesgrundfläche und dem Volumenzuwachs als Optimumbeziehung. Maximaler Zuwachs wird bei mittlerer Dichte gebildet. Die Ausprägung des Optimums ist besonders deutlich in jungen Beständen und auf armen Standorten. Eine geringerer Ausprägung des Optimums ist in Altbeständen und auf guten Standorten gegeben. Darüber hinaus ist die Beziehung baumartenspezifisch.

Die Validierung von Wuchsmodellen aufgrund des Gesetzes der optimalen und kritischen Grundflächenhaltung von ASSMANN (1961) erfordert eine Reihe von Simulationsläufen für Bestände mit definiertem Alter und definierten Standortbedingungen. Für solche Bestände wird der Volumenzuwachs bei maximaler Grundfläche und dann in 10%-Stufen abnehmender Grundfläche berechnet. Die sich ergebenden Wertepaare Volumenzuwachs/Grundflächenhaltung bilden dann den im Modell unterstellten Zusammenhang zwischen Bestandesdichte und Volumenzuwachs ab. Wiederholen wir nun solche Prognoserechnungen für Bestände mit unterschiedlichem Alter und unterschiedlicher Standortbonität, so wird erkennbar, ob der ZV/G-Zusammenhang den von ASSMANN (1961) gefundenen Gesetzmäßigkeiten entspricht. Auf Abbildung 9 ist beispielsweise erkennbar, daß der Volumenzuwachs - der Gesetzmäßigkeit entsprechend - bei abnehmender Bestandesdichte zunächst langsam zurückgeht, um dann bei Überschreiten einer Grundfläche von 50 bis 60 % deutlich abzufallen. Dieser Rückgang des Volumenzuwachses mit abnehmender Bestandesdichte ist - wiederum der Gesetzmäßigkeit entsprechend - im Alter 40 weniger stark ausgeprägt als im Alter 80. Ähnlich gesetzeskonform verhält sich der Zuwachsrückgang, wenn wir ihn für unterschiedliche Standortbonitäten berechnen. Auf besseren Standorten führen bereits geringe Grundflächenabsenkungen zu Zuwachsrückgängen. Demgegenüber zeigt der ZV/G-Zusammenhang auf mäßigen Standorten ein Optimum bei einem Grundflächenwert von etwa 80%. Die Befunde unterstreichen die Brauchbarkeit des Grundflächenzuwachs-, Höhenzuwachs- und Kronenmodells im Simulator SILVA 2.2.

Nutzung von Erfahrungswissen: Eine weitere Validierungsmöglichkeit besteht darin, die Ergebnisse von Szenariorechnungen auf ihre Übereinstimmung mit Erfahrungswissen zu

prüfen. Ein Beispiel hierfür bildet die Simulation von Fichten-Buchen-Mischbeständen mit unterschiedlicher Ausgangsstruktur unter *ceteris paribus*-Bedingungen (Abb. 10). Aus den Untersuchungen von KENNEL (1965), MAGIN (1959) und MITSCHERLICH (1970) ist bekannt, daß die in Mischbeständen unterlegene Baumart in den Altersverläufen ihrer Bestandesparameter mit einer Verzögerung der Zuwachskulmination (Rhythmusverschiebung) und Verringerung des absoluten Niveaus (Amplitudendämpfung) reagiert.

Zur Plausibilitätsprüfung des Simulators SILVA 2.2 wird die zu erwartende Bestandesentwicklung bei mittlerer Wasser- und Nährstoffversorgung im Wuchsbezirk 12.7 „Mittelschwäbisches Schotterriedel- und Hügelland“, für welche eine Wachstumsüberlegenheit der Fichte gegenüber der Buche gegeben ist, nachgebildet. Die im Alter 30 dargestellten Bestände A und B haben die gleichen Bestandessummen- und Bestandesmittelwerte und gleiche Häufigkeitsfrequenzen von Einzelbaumdimensionen; unterschiedlich ist lediglich die Mischungsstruktur. In Bestand A sind Fichte und Buche in Einzelmischung, in Bestand B sind sie gruppen- und horstweise vergesellschaftet. Unter *ceteris paribus*-Bedingungen haben allein diese anfänglichen Strukturunterschiede beträchtliche Konsequenzen für die Bestandesentwicklung bis zum Alter 150: Die zu Beginn vorhandene Höhenüberlegenheit der Fichte von 4.1m wird bei Einzelmischung in den Folgejahren weiter verstärkt, so daß der Mischungsanteil der Buche von anfänglich 36% auf 25% im Alter 150 absinkt. Die Unterlegenheit der Buche führt bei Einzelmischung dazu, daß die Fichte auf ganzer Fläche mehr oder weniger stark dominiert und ihren Zuwachs auf Kosten der Buche steigern kann. Demgegenüber wird die langsam wüchsiger Buche bei horstweiser Mischung von der Fichte weniger konkurrenziert, so daß sie auf Kosten der Fichte Vorteile erzielt, im Mischungsanteil auf 48% im Alter 150 ansteigt und zum dGZ des Gesamtbestandes im Alter 150 etwa 50% beizutragen vermag.

Die dargestellten Entwicklungen von dGZ und  $\Delta$ dGZ lassen erkennen, daß die Wahl der Einzelmischung gegenüber der gruppen- und horstweisen Mischung einen rascheren Anstieg des dGZ, ein höheres absolutes Niveau des dGZ und einen rückläufigen Beitrag der Buche zum dGZ erbringt. Im Alter 150 betragen die Grundflächen 44.4 bis 48.4m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>, die Vorräte 857 bis 956 VfmD ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> und die Stammzahlen 147 bis 159 N ha<sup>-1</sup>. Die Ergebnisse des Prognoselaufes stimmen mit dem u. a. von KENNEL (1965), MAGIN (1959) und MITSCHERLICH (1970) niedergelegten Erfahrungswissen gut überein. In dem Fichten-Buchen-Mischbestand kann sich die Buche bei Einzelmischung wesentlich schlechter gegenüber der Fichte behaupten, so daß ihr Wachstumsverlauf verlangsamt und ihr Beitrag am Gesamtzuwachs verringert wird. Werden Fichte und Buche segregiert begründet, so leistet die Buche einen höheren Anteil am Bestandeszuwachs und wird weniger stark von der Fichte in der Entwicklung gedämpft.

## 4 Beurteilung der Software

### 4.1 Benutzerfreundlichkeit

Die Beschaffenheit der Software, in welche das biometrische Wachstumsmodell umgesetzt wird, ist von entscheidender Bedeutung für die Akzeptanz des Modells. Das gilt gleichermaßen für seinen Einsatz im Rahmen kurzfristiger Prognosen, Szenariorechnungen und im Rahmen von Aus- und Weiterbildung. Ein ganz wesentlicher Aspekt ist die Benutzerfreundlichkeit des Programmes, die am ehesten dann gewährleistet ist, wenn sich die Programmoberfläche an den Kriterien von Standardsoftware wie Word oder Excel orientiert. Derart aufgebaute Programme sind überwiegend selbsterklärend und haben eine geringe Übungsschwelle.

### 4.2 Schnittstellen

Das eigentliche biometrische Modell, d. h. der Modellkern, sollte in einer Sprache programmiert sein, die möglichst plattformunabhängig ist. Zu diesem Zweck wird das zunächst in FORTRAN, dann in PASCAL sowie in DELPHI ausgeführte Programm SILVA 2.2 nun in die Programmiersprache C++ übertragen, um universell einsetzbar zu sein. Die Entwicklung der Benutzeroberfläche muß sich dann an der jeweiligen Rechnerplattform orientieren. Wesentlich erscheint ein modularer Aufbau des Programmkerns, so daß einzelne Rechenroutinen zwischen verschiedenen Arbeitsgruppen ausgetauscht werden können. Beispielhaft seien hier der in mehrere andere Modelle integrierte Strukturgenerator STRUGEN, das Sortierprogramm BDAT oder Module zur Berechnung der Geldwertleistung genannt.

Ganz wesentlich für den praktischen Einsatz sind definierte Schnittstellen zu den Eingabedaten der Anwender aber auch definierte Datenformate für die Ausgabe der Ergebnisse. Für die Aus- und Weiterbildung und waldbauliche Szenariorechnungen zur Entwicklung von Pflegeprogrammen kommt in erster Linie eine interaktive Modellbedienung infrage. Dagegen wird das Wachstumsmodell für Zuwachsprognosen auf Betriebsebene, die beispielsweise die Nutzungsplanung unterstützen können, im Batch-Betrieb laufen. In diesem Falle werden also in großer Zeit viele einzelne Bestände fortgeschrieben, ohne daß der Benutzer eingreift. Zu diesem Zweck muß die Programmsteuerung über externe Steuerdateien erfolgen, in denen u. a. die Art der Pflegeeingriffe, Verjüngungsmaßnahmen und Erntezeitpunkte festgelegt sind.

### 4.3 Dokumentation

Zu einem Wachstumsmodell, das den Einsatz in Lehre, Forschung und Praxis anstrebt, gehört schließlich ein Handbuch, aus dem die Modellphilosophie, die Modellbedienung, Beispiele für Modellrechnungen sowie Möglichkeiten und Grenzen des Wachstumsmodells hervorgehen (SEIFERT et al., 1999). Im Literaturverzeichnis eines solchen Handbuches sollten die

wichtigsten Quellen verzeichnet sein, aus denen die Datenbasis für die Modellparametrisierung, Modellparameter und Modellfunktionen, Modellevaluierungen und die technischen Voraussetzungen für die Modellinstallation hervorgehen.

## 5 Modellevaluierung als iterativer Prozeß

Die Überprüfung des Modellansatzes, die Validierung des biometrischen Modells und die Beurteilung der Software sind nun keine Evaluierungsschritte, die einmalig ausgeführt werden, um dann in einem bewährten Modell zu münden. Vielmehr begleiten sie die Modellentwicklung und folgen ihr, so daß aus der Modellentwicklung ein iterativer Prozeß wird. Besonders vorteilhaft ist eine möglichst frühzeitige Einbindung potentieller Modellanwender in die Modellentwicklung. Hinweise für die Weiterentwicklung von SILVA 2.2 ergaben sich vor allem bei der Erprobung im Rahmen der Ausbildung, bei dem praktischen Einsatz für die Nutzungsplanung der Forsteinrichtung und bei Szenariorechnungen zur Entwicklung waldbaulicher Pflegeprogramme.

## 6 Literatur

AKÇA, A., 1997: Waldinventur, Cuvillier Verlag Göttingen, 140 S.

ASSMANN, E., 1961: Waldertragskunde. Organische Produktion, Struktur, Zuwachs und Ertrag von Waldbeständen, BLV Verlagsgesellschaft, München, Bonn, Wien, 490 S.

BROCKHAUS, 1997: Die Enzyklopädie: in 24 Bänden. - 20., überarb. und aktualisierte Aufl.- Leipzig; Mannheim: Brockhaus.

DURSKY, J., 1997: Modellierung der Absterbeprozesse in Rein- und Mischbeständen aus Fichte und Buche, AFJZ, 168. Jg., H. 6/7, S. 131-134

GERTNER, G., und GUAN B. T., 1992: Using in error budget to evaluate the importance of component models within a large-scale simulation model, in: FRANKE, J. und Röder, A.: Mathematical Modelling of Forest Ecosystems, Proceedings of a workshop organized by Forstliche Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz and Zentrum für Praktische Mathematik, J. D. Sauerländer's Verlag, Frankfurt/Main, 174 S., S. 62-74

HASENAUER, H., 1994: Ein Einzelbaumwachstumssimulator für ungleichaltrige Kiefern- und Buchen-Fichtenmischbestände, Forstliche Schriftenreihe Universität für Bodenkultur, Wien, 152 S.

HAUHS, M., KASTNER-MARESCH, A., ROST-SIEBERT, K., 1995: A model relating forest growth to ecosystem-scale budgets of energy and nutrients, Ecological Modelling, 83. Jg., S. 229-243

KAHN, M. und PRETZSCH, H., 1998: Parametrisierung und Validierung des Wachstumsmodells SILVA 2.2 für Rein- und Mischbestände aus Fichte, Tanne, Kiefer, Buche, Eiche und Erle, Bericht von der Jahrestagung der Sektion Ertragskunde im Deutschen Verband Forstlicher Forschungsanstalten 1998 in Kevelaer, S. 18-34

KENNEL, R., 1965: Untersuchungen über die Leistung von Fichte und Buche im Rein- und Mischbestand, AFJZ, 136. Jg., H. 7, S. 149-161 und H. 8, S. 173-189

MAGIN, R., 1959: Struktur und Leistung mehrschichtiger Mischwälder in den bayerischen Alpen, Mitteilungen aus der Staatsforstverwaltung Bayerns, H. 30, 161 S.

MITSCHERLICH, G., 1970: Wald, Wachstum und Umwelt, Bd. 1, Form und Wachstum von Baum und Bestand, J. D. Sauerländer's Verlag, Frankfurt a. M., 142 S.

NAGEL, J., 1996: Anwendungsprogramm zur Bestandesbewertung und zur Prognose der Bestandesentwicklung, Forst und Holz, 51. Jg., H. 3, S. 76-78

POPPER, K. R., 1984: Logik der Forschung, Verlag J. C. B. Mohr (Paul Siebeck), Tübingen, 477 S.

PRETZSCH, H., 1992: Konzeption und Konstruktion von Wachstumsmodellen für Rein- und Mischbestände, Forstliche Forschungsberichte München, Band 115, 358 S.

REINEKE, L.H., 1933: Perfecting a stand density index for even-aged forests, Journal Agric. Res., Vol. 46, S. 627-638

SEIFERT, E., SEIFERT, Th., BIBER, P., POMMERENING, A., DURSKY, J. und PRETZSCH, H., 1999: SILVA 2.2 Benutzerhandbuch, 119 S.

STERBA, H., MOSER, M und MONSERUD, R., 1995: Prognaus - Ein Waldwachstumssimulator für Rein- und Mischbestände, Österreichische Forstzeitung, H. 5, S. 19-20

VANCLAY, J. K. und SKOVSGAARD, J. P., 1997: Evaluating forest growth models, Ecological Modelling, Vol. 98, S. 1-12

Prof. Dr. Hans Pretzsch, Lehrstuhl für Waldwachstumskunde der Ludwig-Maximilians-Universität München, Am Hochanger 13, D-85354 Freising, Deutschland, Tel.: ++49-8161-714710, Fax: ++49-8161-714721, E-Mail: H. Pretzsch@lrz.uni-muenchen.de, WWW: <http://www.wwk.forst.uni-muenchen.de/wwk/>

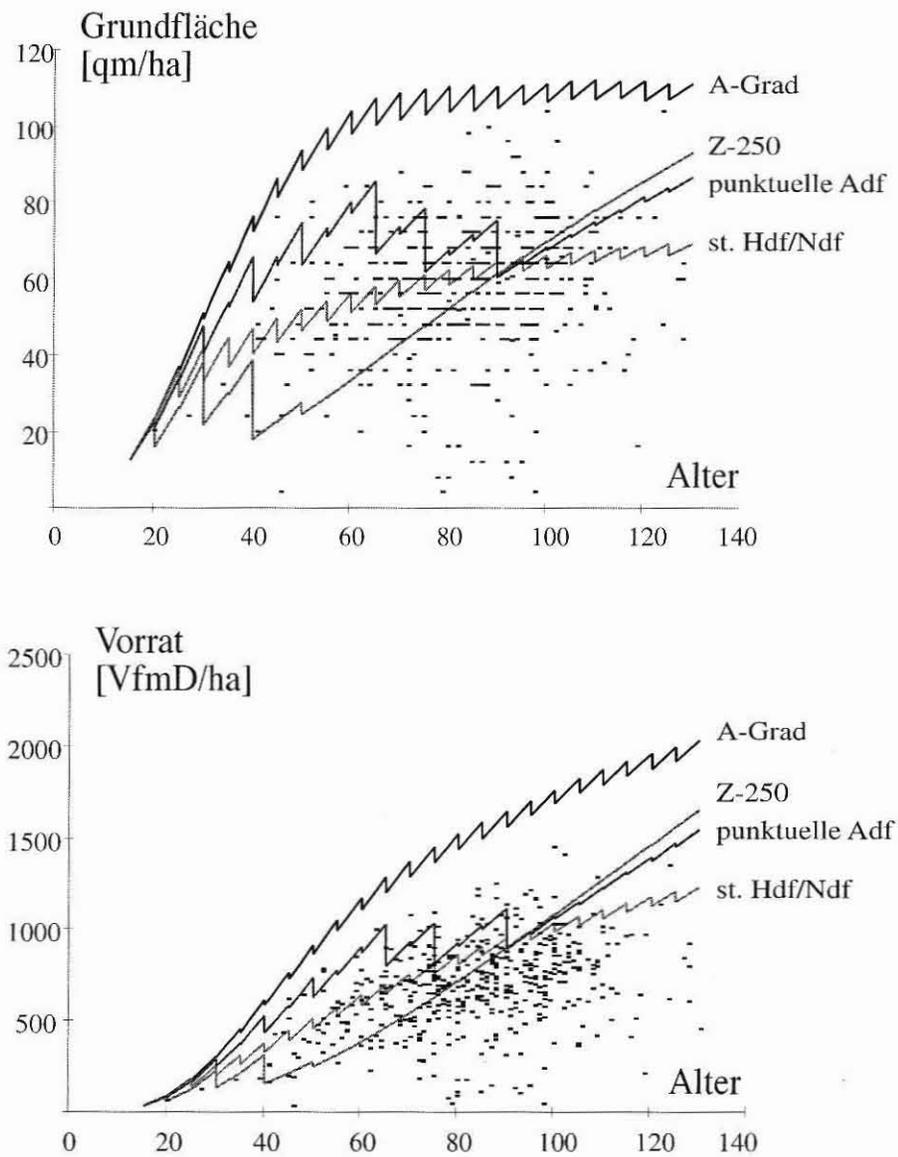
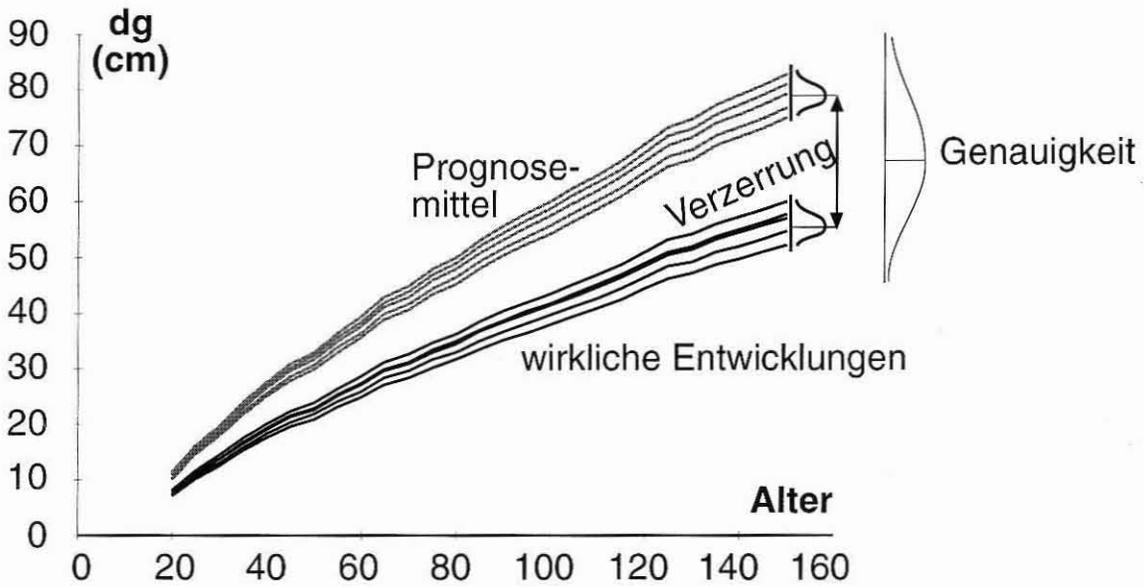
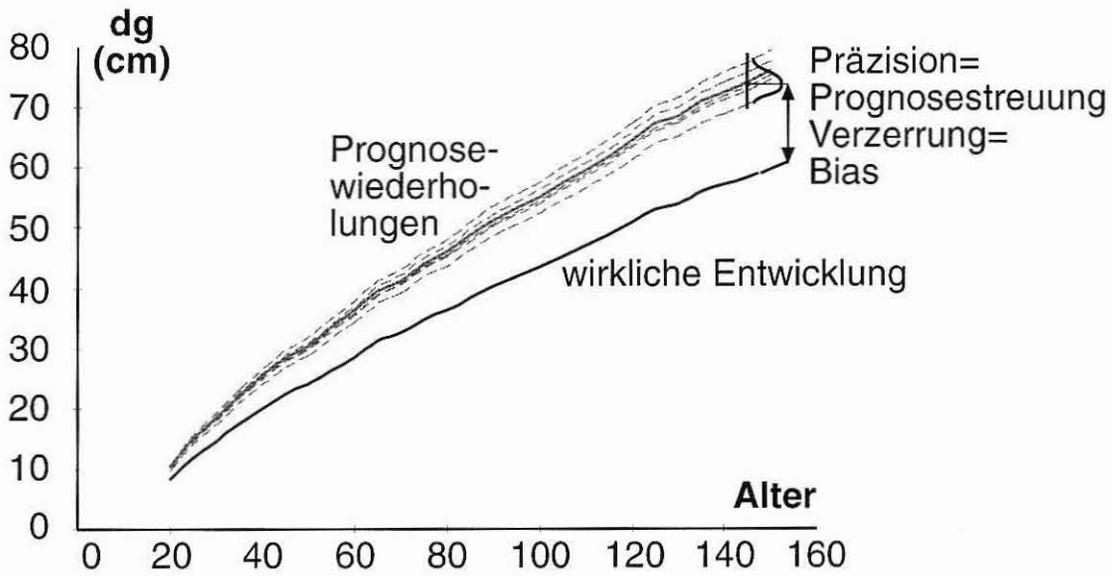


Abb. 1: Der Vergleich von Modellrechnungen mit den standortspezifischen Forsteinrichtungsbefunden zeigt, ob Modell und Wirklichkeit hinsichtlich der Bestandesmittel- und Bestandessummenwerte in demselben Wertebereich liegen. Szenariorechnungen zur Behandlung und Wachstum der Fichte im Wuchsbezirk 13. 4 (A-Grad, starke gestaffelte Hoch-/Niederdurchforstung, Z 250-Behandlung und starke Auslesedurchforstung).



Vergleich der Differenzen  $\bar{d}_{g \text{ real}} - \bar{d}_{g \text{ prog}}$

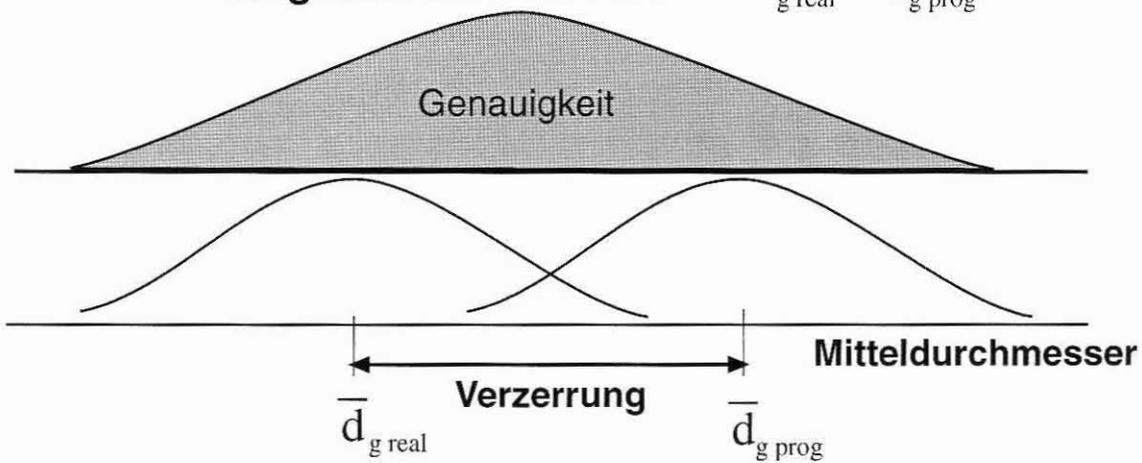
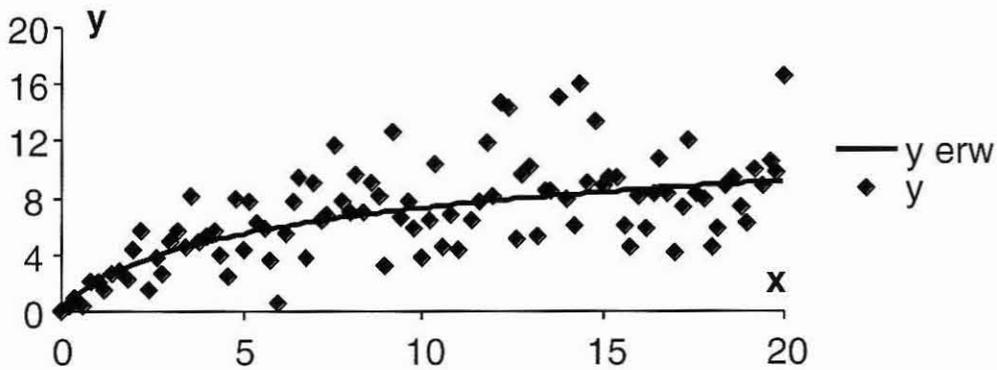
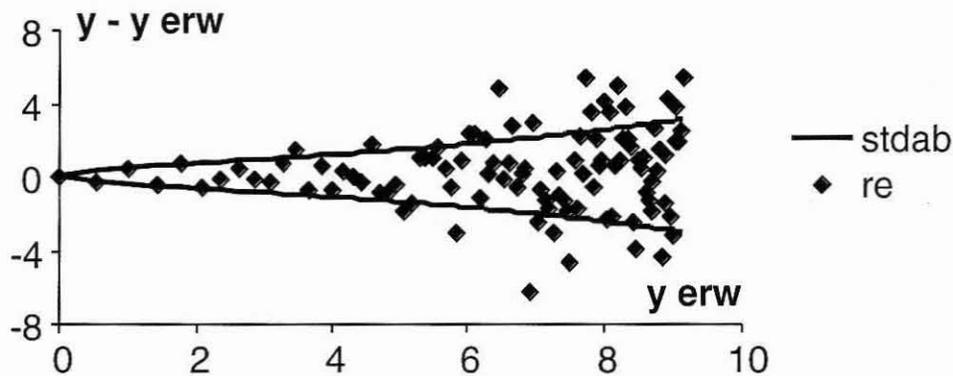


Abb. 2: Prognosestreuung, Verzerrung und Treffgenauigkeit von Wachstumsmodellen.

### 1. Modellanpassung ( $y_{\text{erw}}$ ) an realen Daten ( $y$ )



### 2. Analys der Residuen ( $y - y_{\text{erw}}$ ) Residuen normalverteilt mit $[0, f(y_{\text{erw}})]$



### 3. Prognose mit Zufallseffekten, die der heteroskedastischen Residualverteilung entsprechen

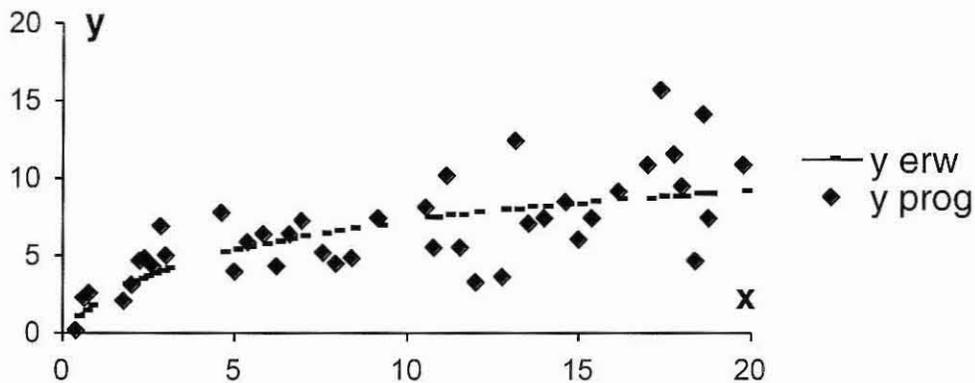


Abb. 3: Berücksichtigung von Zufallseffekten in den Modellgleichungen des Wachstumssimulators SILVA 2.2

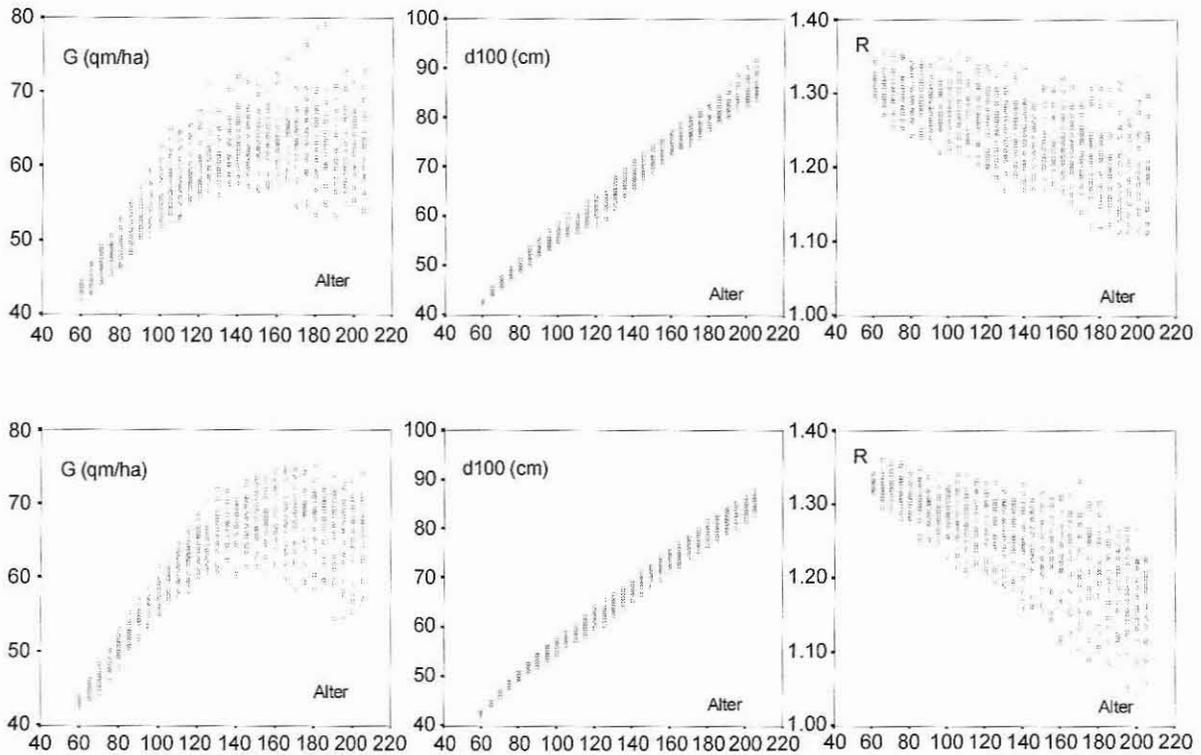


Abb. 4: Effekt der Zufallsvariablen in SILVA 2.2 auf die Vorhersage von Bestandesgrundfläche, Oberdurchmesser und Aggregationsindex R im Fichten-Buchen-Bestand Schongau 814/5 unter Berücksichtigung von Zufallseffekten (oben) und bei Ausschaltung von Zufallskomponenten im Grundflächenzuwachsmodell (unten). Berechnet wurde die Bestandesentwicklung ohne Behandlung mit 25 Prognosewiederholungen.

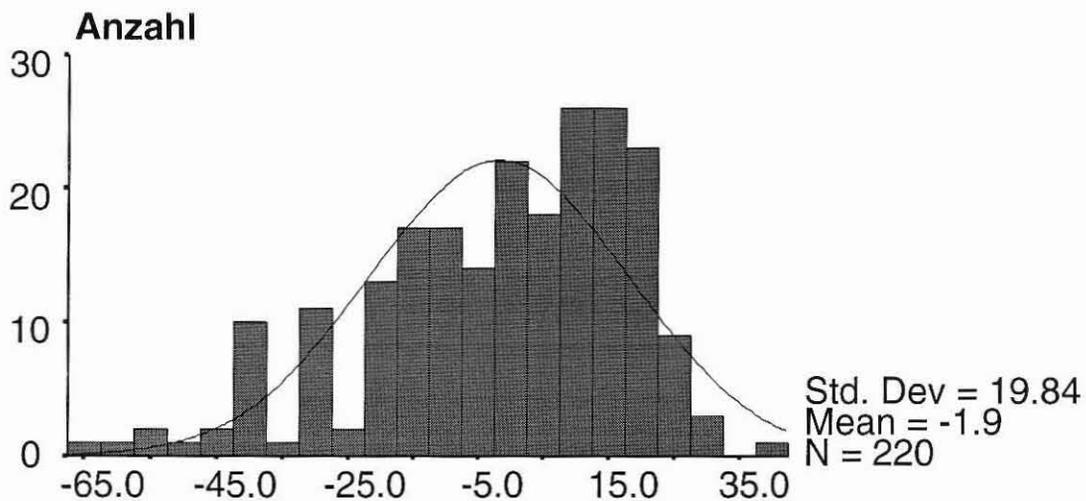
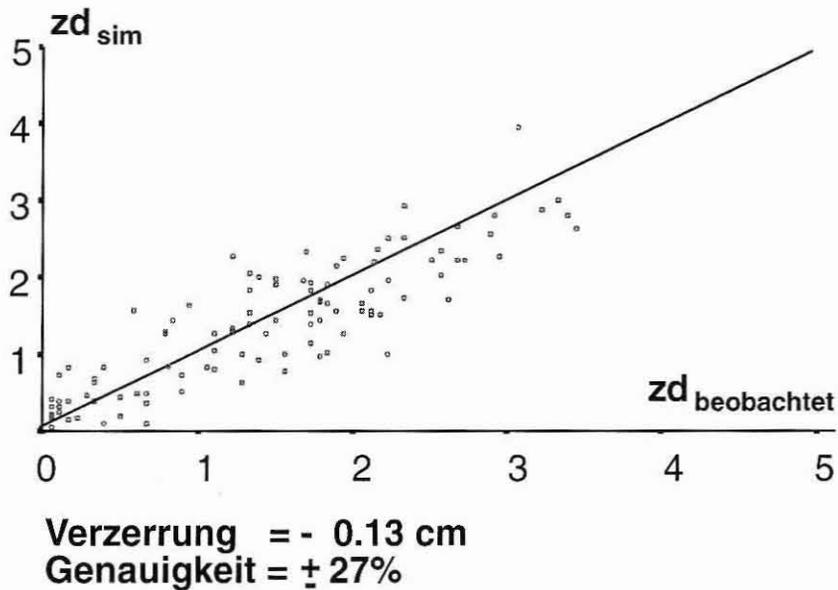


Abb. 5: Treffgenauigkeit der Schätzung des Bestandesvolumenzuwachs für die Baumart Fichte mit dem Waldwachstumssimulator SILVA 2.2.

### Weißenburg 613/2, Zuwachsperiode 1987F - 1996F



### Fürstenfeldbruck 612/12, Zuwachsperiode 1992F - 1996H

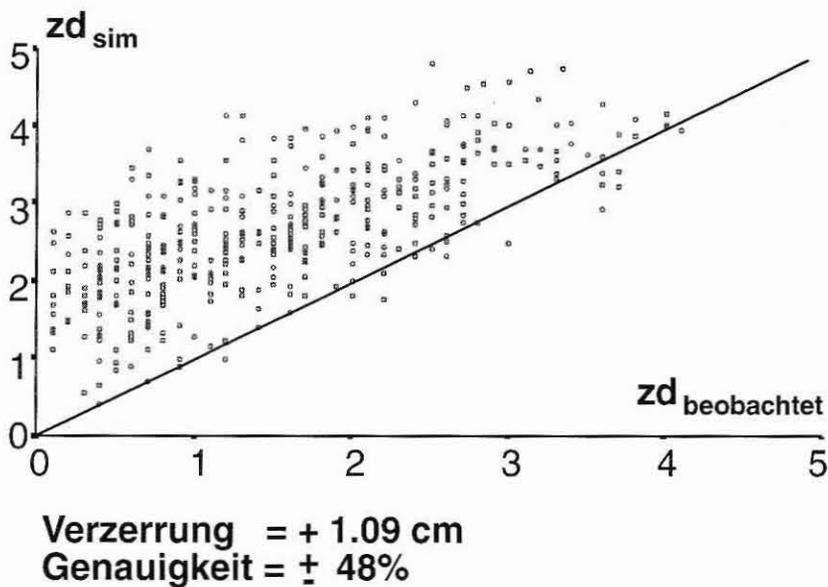


Abb. 6: Modellvalidierung mit den Durchmesserzuwächsen von Einzelbäumen auf den langfristigen Fichten-Versuchsflächen Weißenburg 613 (oben) und Fürstenfeldbruck 612 (unten).

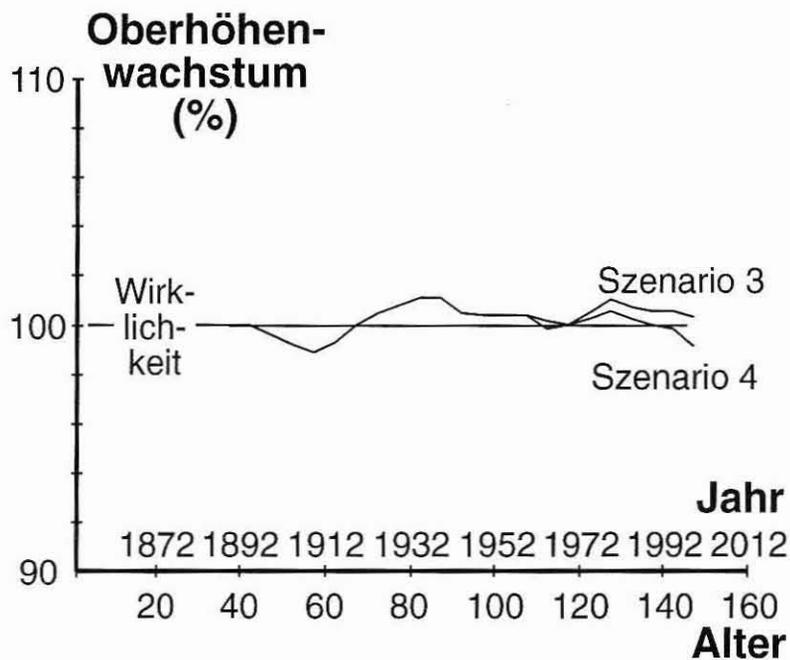
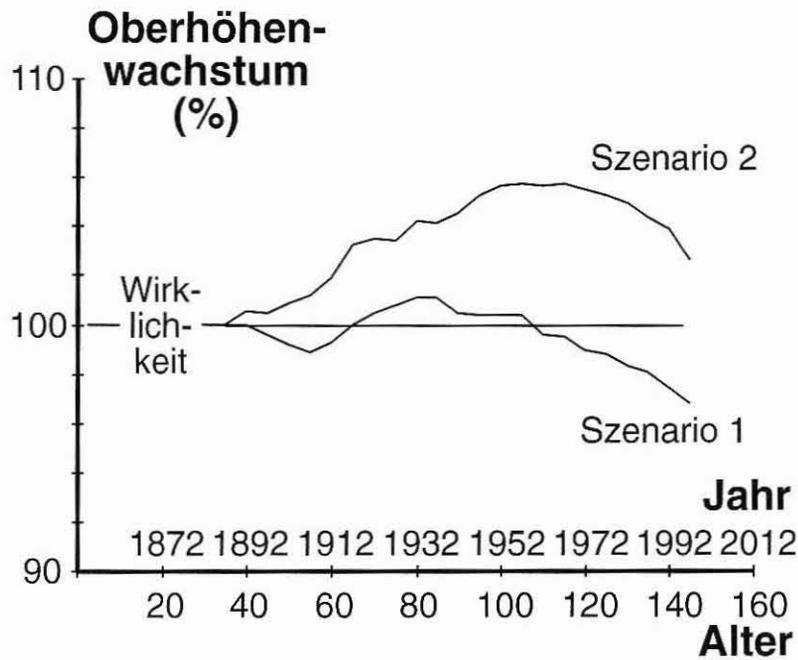


Abb. 7: Prognose des Oberhöhenwachstums auf der Versuchsfläche Denklingen 05 (A-Grad) mit dem Wachstumssimulator SILVA 2.1. Die Szenarien 1 und 2 (oben) unterstellen für den gesamten Wachstumszeitraum konstante Standortbedingungen. Eine treffgenaue Nachbildung des wirklichen Oberhöhenverlaufes kann nur durch eine Veränderung der Nährstoffversorgung abgebildet werden, wie sie bei den Szenarien 3 und 4 (unten) eingesteuert wurde.

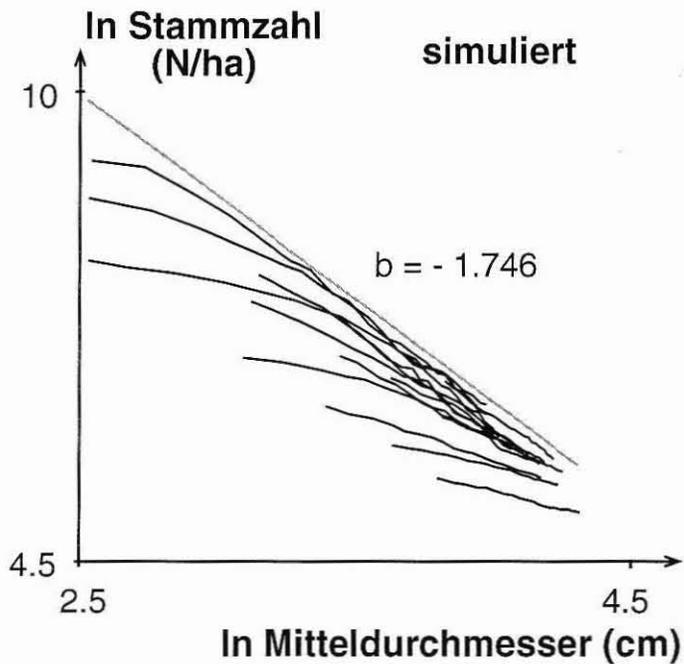
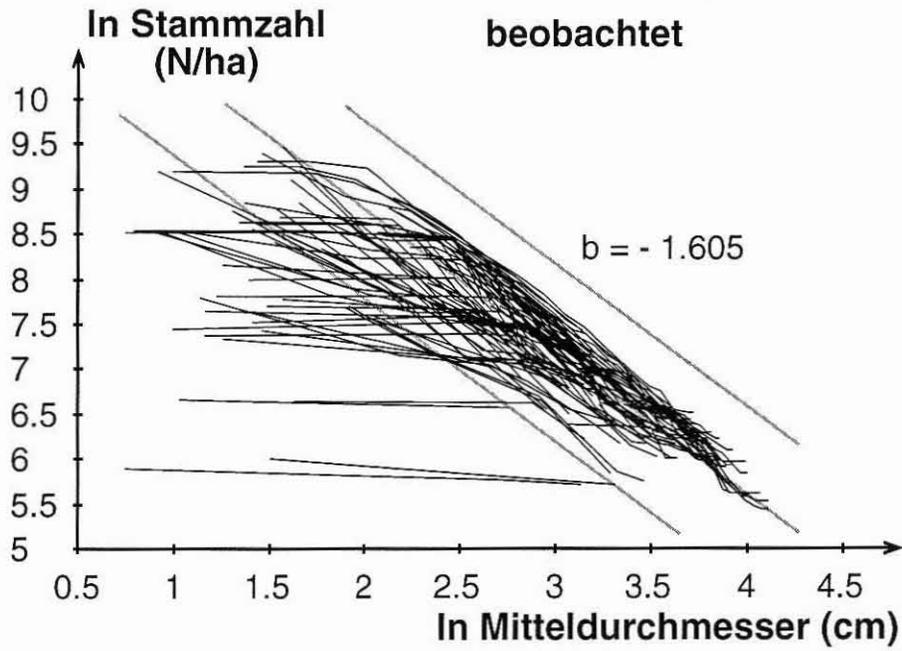
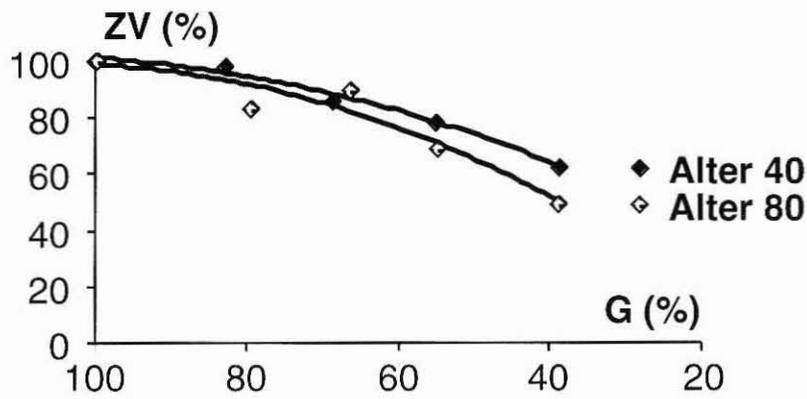


Abb. 8: Beziehung zwischen ln (Stammzahl pro ha) und ln (Bestandes-Mitteldurchmesser) auf langfristigen Fichten-Versuchsflächen (oben) und als Ergebnis von Simulationsläufen zu unbehandelten Fichtenbeständen auf denselben Standorten mit dem Modell SILVA 2.2 (unten).

### Fichte auf gutem Standort



### Fichte im Alter 40

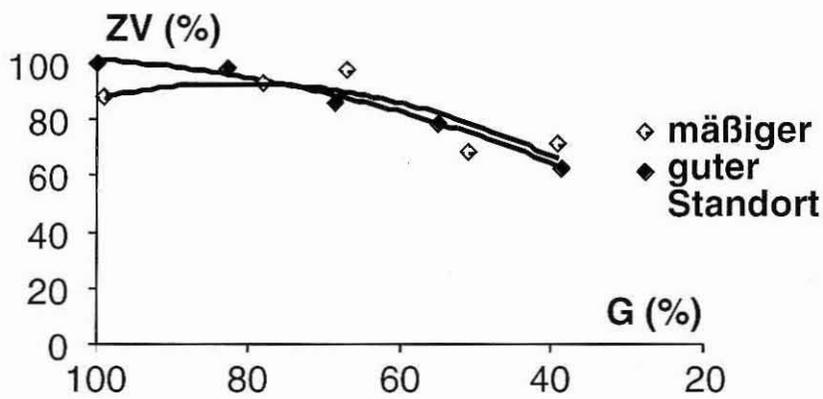


Abb. 9: Validierung von SILVA 2.2 aufgrund des Gesetzes der optimalen und kritischen Grundflächenhaltung von ASSMANN (1961). Prognoseläufe für Fichtenreinbestände im Wuchsbezirk 13.4 „Vorallgäu“.

A: Einzelmischung

B: Gruppenmischung

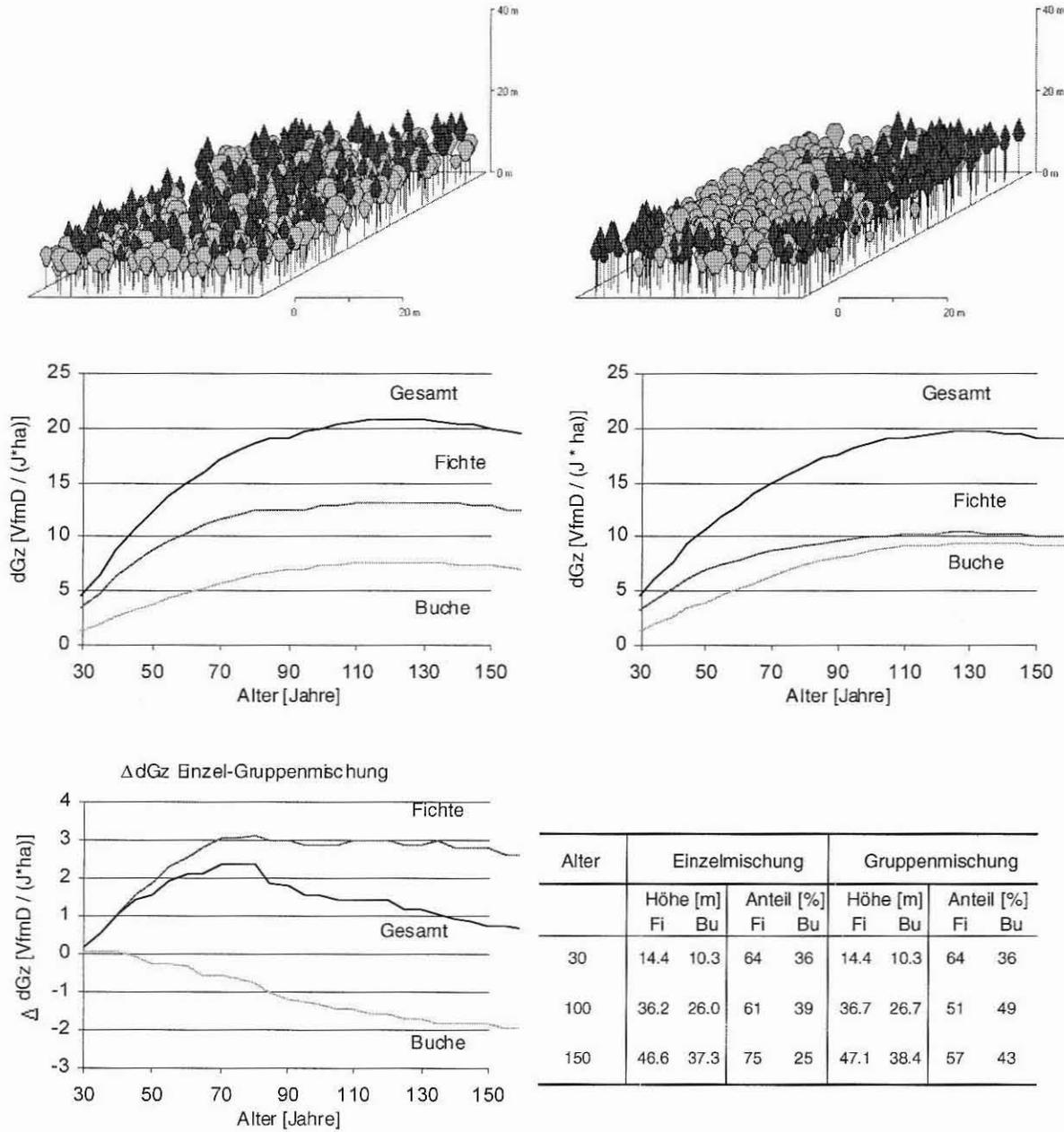


Abb. 10: Effekt verschiedener Ausgangsstrukturen auf die Bestandesentwicklung in Fichten-Buchen-Mischbeständen unter ceteris paribus-Bedingungen.