

Übertragbarkeit empirischer statistischer Waldwachstumsmodelle: Prüf- und Anpassungsverfahren anhand des Beispiels BWinPro für Baden-Württemberg

(Mit 3 Abbildungen und 4 Tabellen)

AXEL ALBRECHT¹), ULRICH KOHNLE¹) und JÜRGEN NAGEL²)

(Angenommen März 2011)

SCHLAGWÖRTER – KEY WORDS

Waldwachstumssimulatoren; Modellansatz; Übertragbarkeit; Parametrisierung; Evaluierung; Modell-Region; BWinPro; Baden-Württemberg; Jahrzehnt-Bias.

Forest growth simulators; modeling approach; transferability; parameterization; evaluation; model region; BWinPro; Baden-Wurttemberg; decennial bias.

1. EINLEITUNG

Naturwissenschaftliche Untersuchungen auf quantitativer Basis verwenden häufig statistische Verfahren zur Datenauswertung empirischer Daten. Solche Auswertungen münden meistens in der Entwicklung von Modellen, welche die Ergebnisse als aus den Daten abgeleitete und zusammengefasste Gesetzmäßigkeiten ausdrücken. Sowohl in der Wissenschaft als auch für den Transfer der Erkenntnisse für praktische Anwendungen ist es im Anschluss an diese Auswertungen wichtig, die Allgemeingültigkeit und Übertragbarkeit solcher Modelle beurteilen zu können (PETERSON et al., 2007; RANDIN et al., 2006). Anhand des Beispiels eines empirischen, statistischen Waldwachstumsmodells wird im vorliegenden Beitrag erläutert, welche Verfahrensschritte und Prüfungen erforderlich sind, um die Übertragbarkeit eines solchen für eine bestimmte Region abgeleiteten statistischen Modells in eine andere Region zu prüfen.

Statistische Waldwachstumsmodelle abstrahieren empirische Zusammenhänge zwischen dem Wachstum von Bäumen oder Waldbeständen und Zustandsgrößen von Wäldern und Umwelt. Sie stellen eine modellhafte Verallgemeinerung dieser beobachteten Zusammenhänge auf und fassen sie zu den wichtigsten, typischen Gesetzmäßigkeiten des Waldwachstums zusammen (PRETZSCH, 2001). Zu beachten ist, dass solche Gesetzmäßigkeiten im Einklang mit Theorien des Waldwachstums stehen müssen, nicht jedoch die physiologischen Wachstumsprozesse als solche erklären sollen. Im Gegensatz zu empirischen statistischen Modellen zielen die so genannten Prozessmodelle auf die Erklärung des kausalen Zusammenhangs zwischen Wachstum und den zugrunde liegenden ökophysiologischen Prozessen.

Neben der Bezeichnung Prozessmodell sind für diesen Modelltypus auch die Ausdrücke mechanistisches oder konzeptionelles Modell gebräuchlich (GUAN et al., 1997).

Die Unterscheidung zwischen empirischen und Prozessmodellen ist insofern wichtig, als Prozessmodelle grundlegende funktionale Mechanismen abbilden, die folglich aufgrund der kausalen Zusammenhänge direkt in andere Wuchsregionen übertragbar sind (PARYSOW und GERTNER, 1997). Da die Entwicklung empirischer statistischer Waldwachstumsmodelle jedoch anhand von ortsgebundenen Messdaten erfolgt, ist der Gültigkeitsbereich zunächst auf den durch diese Daten repräsentierten Bezugsraum begrenzt, also beispielsweise auf das repräsentierte Spektrum von Standorten, Baumarten, Baumdimensionen, Waldstrukturen und waldbaulichen Behandlungen, sowie auf die Bezugsperiode (DVFFA, 2000; PORTÉ und BARTELINK, 2002). Es ist daher von zentraler Bedeutung, diese zeitlichen, räumlichen und naturalen Gültigkeitsrestriktionen in Wissenschaft und Praxis beim Einsatz, der Weiterentwicklung und der Übertragung bzw. Verallgemeinerung von empirischen Modellen grundsätzlich immer zu berücksichtigen.

Für die Überprüfung der Modellgültigkeit eines Waldwachstumsmodells unterscheidet man zwischen qualitativen und quantitativen Prüfungen (SCHMID et al., 2006; VANCLAY und SKOVSGAARD, 1997). Bei den qualitativen Prüfungen wird betrachtet, ob die hinter den beschriebenen Zusammenhängen stehenden Hypothesen allgemein logisch und biologisch plausibel sind (PRETZSCH, 2001). Bei der quantitativen Überprüfung wird beziffert, wie genau die Anpassung oder die Vorhersage des Modells ausfällt (VANCLAY und SKOVSGAARD, 1997). Im Englischen wird für die qualitative und quantitative Überprüfung von Waldwachstumsmodellen häufig der Begriff ‚evaluation‘ verwendet. Der vorliegende Beitrag folgt dieser Bezeichnung mit dem Begriff „Evaluierung“, der als Synonym für den Begriff der ‚Hypothesenprüfung‘ aufgefasst wird.

Für die Beurteilung der Eignung eines Modells im Zuge der quantitativen Prüfung müssen Genauigkeitsanforderungen definiert werden. Diese Anforderungen sind in Abhängigkeit des anvisierten Einsatzgebietes des fraglichen Modells festzulegen. Häufig werden für diese Entscheidung prozentuale Abweichungen während eines bestimmten Zeitraums gewählt (SCHMID et al., 2006).

Die Überprüfung von Waldwachstumsmodellen ist zu verschiedenen Zeitpunkten nötig: (1) während der

¹) Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, Abteilung Waldwachstum, Postfach 708, D-79007 Freiburg.

Kontakt: AXEL ALBRECHT. Email: axel.albrecht@forst.bwl.de

²) Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt, Abt. A Waldwachstum, Grätzelstraße 2, D-37075 Göttingen.

Modellentwicklung liefern die Ergebnisse solcher Prüfungen wertvolle Hinweise bezüglich der Güte des biometrischen Modells, wobei der Entwicklungs- und Prüfungsprozess dann rückkoppelnd und ineinander greifend erfolgt (VANCLAY und SKOVSGAARD, 1997). (2) Eine Überprüfung sollte auch dann erfolgen, wenn Grund zur Annahme besteht, dass sich bezüglich der genannten Gültigkeitsrestriktionen Änderungen ergeben haben. Im gleichen Bezugsraum können solche Änderungen also die zeitlichen oder naturalen Restriktionen wie z.B. andere Bezugsperiode oder veränderte Baumartenzusammensetzung betreffen. Hier genügt meist eine quantitative Prüfung gegebenenfalls ergänzt um die Aktualisierung der Modellanpassung, also eine Neu-Parametrisierung. (3) Beim geplanten Einsatz eines Modells in einer anderen Bezugsregion müssen sowohl die Überprüfung der generellen Übertragbarkeit des Modells (qualitative Prüfung) als auch die Genauigkeitsprüfung (quantitative Prüfung) durchgeführt werden. Häufig ergibt sich dann aus einer solchen Modellprüfung Anpassungsbedarf, der durch eine Neu-Parametrisierung oder sogar eine Modifikation der Modellfunktionen erfolgen kann (z. B. DÖBBELER et al., 2007; SCHRÖDER et al., 2007).

In Baden-Württemberg ist derzeit kein Waldwachstumssimulator (WWS) in der forstlichen Planungspraxis im Einsatz. Da WWS jedoch für Anwendungen im Forstbetrieb, aber beispielsweise auch in der Forschung (Forstökonomie) ein vielseitig einsetzbares, wirkungsvolles Arbeitswerkzeug darstellen könnten, wird angestrebt, einen für die waldbaulichen und naturalen Ge-

benheiten des Landes Baden-Württemberg speziell angepassten WWS verfügbar zu haben. Anhand des vorwiegend anhand von Daten aus Nordwestdeutschland entwickelten WWS BWinPro (NAGEL et al., 2002; NAGEL, 2005) soll deshalb demonstriert werden, wie die Schritte zur Prüfung der Modell-Übertragbarkeit in eine andere Bezugsregion anzuwenden sind und welche Möglichkeiten der Modellanpassung bestehen.

2. MATERIAL UND METHODEN

Das Arbeitspaket weist eine Untergliederung in drei Schritte auf. Zunächst wurde im Rahmen einer Evaluierung der für nordwestdeutsche Verhältnisse entwickelte WWS BWinPro für die Bezugsregion Baden-Württemberg getestet. Im zweiten Schritt wurde exemplarisch das Grundflächenzuwachsmo- dell angepasst. Diese Anpassung beinhaltete die Teilschritte Neu-Parametrisierung und Erstellen einer neuen Wachstumsgleichung auf der Basis von Daten aus der neuen Bezugsregion. Im dritten Schritt erfolgte schließlich die Quantifizierung der Verbesserungen, die sich durch die Anpassung (Schritt 2) ergaben. In *Abbildung 1* ist dieses Vorgehen schematisch zusammengefasst.

Im ersten Schritt (*Abb. 1*, Ziffer 1) erfolgte eine qualitative und quantitative Evaluierung von BWinPro. Bei der qualitativen Evaluierung wurden beispielhaft vier grundlegende Modellgleichungen erörternd auf allgemeine Logik und biologische Plausibilität überprüft. Bei der quantitativen Evaluierung wurde BWinPro auf einen Test-Datensatz in Baden-Württemberg angewendet. Für

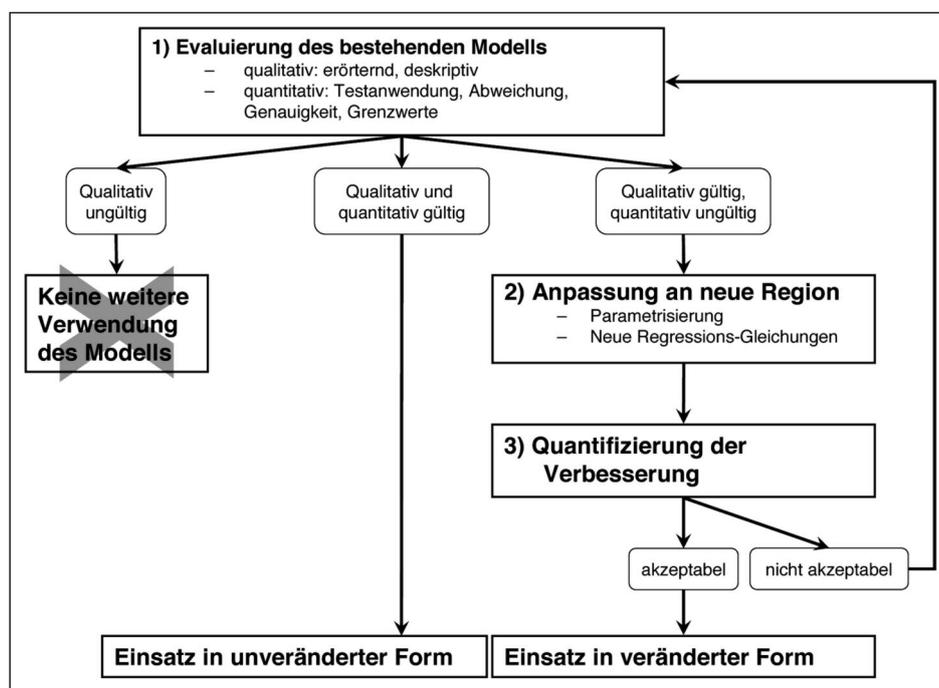


Abb. 1

Vorgehen zur Prüfung von Übertragbarkeit empirischer Wachstumsmodelle und deren Anpassung an neue Regionen.

Procedure for testing the transferability and adaptation of empirical growth models to new regions.

diesen Test-Datensatz (Evaluierungsdatensatz) erfolgte eine Wachstumsprognose für 10 Jahre mit anschließender Prüfung, wie gut die prognostizierten Ergebnisse mit den real beobachteten Wachstumsverläufen übereinstimmen.

Der verwendete Evaluierungsdatensatz enthält 375.699 Baumbeobachtungen, die sich zu ca. 50% auf Fichte (*Picea abies* [L.] Karst), 15% auf Douglasie (*Pseudotsuga menziesii* [Mirbel] Franco), sowie je 10% auf Kiefer (*Pinus sylvestris* [L.]), Buche (*Fagus sylvatica* [L.]) und Weisstanne (*Abies alba* [Mill., im Folgenden Tanne) sowie geringe Anteile von Eiche und sonstigen Baumarten verteilen. Ergebnisse werden im Folgenden nur für die Baumarten Buche, Fichte, Tanne und Douglasie dargestellt.

Die Abweichung zwischen realen und simulierten Werten wird auch als Bias bezeichnet (PRETZSCH et al., 2002; VANCLAY und SKOVSGAARD, 1997; WINDHAGER, 1999). Es existiert zwar methodische Kritik an diesem Kennwert (FROESE und ROBINSON, 2007), dennoch wird er weithin für Evaluierungszwecke eingesetzt (HÄRKÖNEN et al., 2010; SCHMID et al., 2006). Neben anderen Evaluierungskenngrößen wie Präzision und Treffgenauigkeit ist der Bias die wichtigste Kenngröße für die Beurteilung der Vorhersagegüte. Der Bias zeigt systematische, durchschnittliche Abweichungen auf, wohingegen Präzision und Treffgenauigkeit die Streuung der Abweichungen charakterisieren. Für die vorliegende Arbeit wurde der Bias (\bar{e}) ausgewählt und nach [1] berechnet.

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

mit

x_i : fortgeschriebener Wert

X_i : realer Wert

Der 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 gut für Vergleichszwecke, wenn z. B. mit anderen Untersuchungen oder zwischen verschiedenen Einzelbaum- oder Bestandeswerten verglichen werden soll (ALBRECHT et al., 2009; HÄRKÖNEN et al., 2010). Absolute Bias-Werte sind hingegen besonders für praktische Fragestellungen relevant, bei denen z. B. die Abweichungen der Durchmesser oder der Durchmesserzuwächse pro Forsteinrichtungsjahrzehnt von Interesse sind. Um die Vergleichbarkeit mit anderen Untersuchungen herzustellen, wurde der Bias als Jahrzehnt-Bias berechnet, also bezogen auf die einheitliche Beobachtungsdauer von 10 Jahren.

Im vorliegenden Fall wurde ein Grenzwert für den maximal zulässigen relativen Jahrzehnt-Bias von 5% gewählt. Die Wahl dieses Wertes geht auf die Ergebnisse anderer Arbeiten (HÄRKÖNEN et al., 2010; SCHMID et al., 2006) sowie eigene Überlegungen bezüglich Genauigkeitsansprüchen zurück.

Im zweiten Schritt (Abb. 1, Ziffer 2) wurden die vier grundlegenden Modellgleichungen an Daten von baden-württembergischen Versuchsflächen angepasst. Diese Parametrisierung lieferte für Baden-Württemberg gül-

tige Modellkoeffizienten. In der vorliegenden Arbeit werden exemplarisch die Ergebnisse für die Anpassung der Grundflächenzuwachs-gleichung wiedergegeben. Im Anschluss erfolgte zusätzlich der Test zweier neuer Regressionsgleichungen für die Schätzung des Grundflächenzuwachses. Für alle Anpassungsschritte fand der Parametrisierungsdatensatz Anwendung, der aus 692.659 Baumbeobachtungen besteht. Die Anteile der Baumarten in diesem Datensatz sind gleich wie die im Evaluierungsdatensatz.

Um das Maß der Verbesserung durch die Anpassungsmaßnahmen von Schritt 2 zu quantifizieren wurde in Schritt 3 (Abb. 1, Ziffer 3) dann eine Testanwendung durchgeführt. Bei dieser Testanwendung wurde für den Evaluierungsdatensatz eine waldwachstumkundliche Simulation vorgenommen und abschließend die Abweichungen quantifiziert.

Folgende Fragestellungen wurden im Zuge der qualitativen Evaluierung bearbeitet:

- Existieren innerhalb der einzelnen waldwachstumkundlichen Funktionsgleichungen von BWinPro sowie im Zusammenspiel der Funktionsgleichungen Elemente, die die Übertragbarkeit des Modells auf die Region Baden-Württemberg verhindern?

- Existieren waldwachstumkundliche Erkenntnisse in Baden-Württemberg, die den grundlegenden Modelltheorien von BWinPro widersprechen?

Im Zuge der quantitativen Evaluierung wurde untersucht:

- Wie hoch ist der relative Jahrzehnt-Bias von Dg (Durchmesser des Grundflächenmittelstamms), D100 (Durchmesser des Grundflächenmittelstamms der 100 stärksten Bäume je Hektar), Hg (Höhe des Grundflächenmittelstamms), H100 (Höhe des Grundflächenmittelstamms der 100 stärksten Bäume je Hektar; syn. Spitzenhöhe), G (Grundfläche je Hektar) und V (Derbholzvorrat je Hektar) bei der Testanwendung von BWinPro auf baden-württembergische Versuchsflächen?

- Weicht der relative Jahrzehnt-Bias des Dg-Mittelstamms von dem des D100-Mittelstamms ab?

Im Zuge der Anpassung von BWinPro wurden folgende Fragen untersucht:

- Ist das Bestimmtheitsmaß der Anpassung der Grundflächenzuwachs-funktion an baden-württembergische Versuchsflächen ähnlich wie das der nordwestdeutschen Modellversion?

- Lässt sich die erklärte Varianz erhöhen, wenn andere Gleichungen zur Schätzung des Grundflächenzuwachses verwendet werden?

Bei der Quantifizierung der Verbesserung wurde Folgendes untersucht:

- Liegt der relative Bias von Dg, D100, Hg, H100, G und V nach der Neu-Parametrisierung unter 5%?

- Wie stark verändert sich der relative Jahrzehnt-Bias von Dg, D100, Hg, H100, G und V durch die Neu-Parametrisierung der Kronenbreiten-, Kronenansatzhöhen-, Grundflächenzuwachs- und Höhenzuwachs-funktion von BWinPro an baden-württembergische Versuchsflächen-daten im Vergleich zur Schätzung mit nordwestdeutschen Modellkoeffizienten?

3. EVALUIERUNG GRUNDLEGENDER FUNKTIONEN

Als grundlegende Funktionen des WWS BWinPro wurden für die Überprüfung die vier Gleichungen zur Schätzung der Kronenansatzhöhe, der Kronenbreite, des Grundflächenzuwachses sowie des Höhenwachstums ausgewählt. Für diese vier Gleichungen erfolgte zunächst eine qualitative, dann eine quantitative Prüfung.

3.1. Qualitative Evaluierung

Das Modell zur Berechnung der Kronenansatzhöhe (KrA) [2] berücksichtigt als Prädiktoren Höhe (h) und Brusthöhendurchmesser (d) des Einzelbaumes sowie die H100 des Bestandes.

$$KrA = h * (1 - \exp(-abs(p0 + p1 * (\frac{h}{d}) + p2 * d + p3 * \ln(H100)))) \quad [2]$$

Die Abhängigkeit der Kronenansatzhöhe von der Baumhöhe ist naheliegend, da die Höhe des Kronenansatzes immer kleiner als die Baumhöhe sein muss. Im zweiten Modellterm, der diese Baumhöhe um einen gewissen Faktor reduziert ($1 - \exp(\dots)$), erscheint zunächst der h/d-Wert des Einzelbaums. Im h/d-Wert kommt mittelbar auch der Einfluss der Bestandesdichte zum Ausdruck, da in dichteren Beständen höhere h/d-Werte anzutreffen sind, und dichtere Bestände gleichzeitig höher liegende Kronenansätze erwarten lassen. Die Abhängigkeit der Kronenansatzhöhe vom Durchmesser des Einzelbaums (d) ist ebenfalls plausibel, da der Durchmesser bei gegebener H100 als Vitalitätsindikator aufgefasst werden kann und relativ vitalere Bäume niedrigere Kronenansätze aufweisen. Der Einfluss der H100 ist biologisch erklärbar, da sie bei gegebenem Alter als Weiser der Standortsgüte und der Bestandesentwicklung gilt. Die Abhängigkeit der Geschwindigkeit der Astreinigung von der standortsbedingten Geschwindigkeit der Höhenentwicklung ist grundsätzlich plausibel und auch für Baden-Württemberg nachgewiesen (HEIN, 2004; SPIECKER, 1991).

Um die Abhängigkeit der Kronenansatzhöhe von der Bestandesdichte zum Ausdruck zu bringen, ist eventuell die Verwendung eines bestandesweisen h/d-Wertes sinnvoller als ein einzelbaumbezogener h/d-Wert, da der baumbezogene Wert nicht nur von der Bestandesdichte alleine sondern zusätzlich auch von der sozialen Stellung des Einzelbaums bestimmt wird. Grundsätzlich problematisch bei der Verwendung des h/d-Wertes ist seine natürliche Schwankung über dem Alter bzw. der Spitzenhöhe, da das Höhenwachstum früher nachlässt als das Durchmesserwachstum (KRAMER und AKÇA, 1995; PRETZSCH, 2002). Für die Berücksichtigung der Dichteeffekte erscheint es deshalb sinnvoll, ein altersunabhängiges Dichtemaß zu testen. In Frage kommt hierfür z.B. der Bestockungsgrad oder ein relativer bestandesweiser h/d-Wert, der beispielsweise den realen h/d-Wert eines Bestandes in Relation zum durchschnittlichen h/d-Wert einer geeigneten Ertragstafel setzt.

Die soziale Stellung des Einzelbaums ist prinzipiell in dieser Gleichung berücksichtigt, da sowohl die Einzel-

baumhöhe als auch die Bestandesspitzenhöhe als Prädiktor verwendet werden und somit das Verhältnis zwischen diesen beiden Größen einget. Andere Ansätze, die zusätzlich konkurrenz-basierte Prädiktoren auf Einzelbaumebene berücksichtigen (z.B. HASENAUER und MONSERUD, 1996), erscheinen aussichtsreich. HASENAUER und MONSERUD konnten außerdem Abhängigkeiten der relativen Kronenlänge von der Himmelsrichtung zeigen, die eventuell auch für das topographisch bewegte Gelände Baden-Württembergs überprüft werden sollten.

Das Modell zur Berechnung der Kronenbreite (KrBr) [3] berücksichtigt als einzigen Prädiktor den Brusthöhendurchmesser eines Baumes.

$$KrBr = (p0 + p1 * d)(1 - \exp(-(\frac{d}{p3})^{p2})) \quad [3]$$

Die Kronenbreite von Bäumen ist neben dem Durchmesser auch abhängig von der Konkurrenzsituation im Bestand. Allerdings geht die Logik von [3] darauf zurück, dass die Konkurrenzsituation Ausdruck im Durchmesser findet, so dass unterständige Individuen geringere Durchmesser und damit auch geringere Kronenbreiten als vorherrschende aufweisen. Eine funktionale Proportionalität besteht also gleichzeitig für die absolute Baumdimension und die Konkurrenzsituation.

Der Durchmesserzuwachs wird in BWinPro als logarithmierter Grundflächenzuwachs des Einzelbaums [$\ln(ig)$] in m^2 berechnet, der daraufhin programmintern umgerechnet wird in den Durchmesserzuwachs [4]. Als Prädiktoren liegen der Modellschätzung das logarithmierte Alter, die logarithmierte Kronenmantelfläche (km), der c66-Wert sowie die eingriffsbedingte Veränderung des c66-Wertes (c66c) zugrunde. Der c66-Wert ist das in BWinPro verwendete Konkurrenzmaß, das für einen Referenzbaum unabhängig von den Baumpositionen ausdrückt, wie stark er durch die Kronen der anderen Bäume in diesem Bestand bedrängt wird. Der c66c-Wert bringt zum Ausdruck, wie groß der Freistellungseffekt einer Durchforstungsmaßnahme für einen Referenzbaum ausfällt (NAGEL, 2003; S. 32, 2005, S. 10). Mit dem logarithmierten Alter werden Alterungseffekte abgebildet, die sich reduzierend auf das Durchmesserwachstum auswirken. Die Kronenmantelfläche wird als Näherungswert für die produzierende bzw. assimilierende Blattmasse verwendet, stellt also das Dimensionsmaß in dieser Modellgleichung dar.

$$\ln(ig) = p0 + p1 * \ln(km) + p2 * \ln(Alter) + p3 * C66 + p4 * C66c + p5 * \ln(adiff) + \epsilon \quad [4]$$

Der Modellterm $p5 * \ln(adiff)$ bezieht sich auf die Periodenlänge (adiff=Anzahl Jahre zwischen vorhergehender und aktueller Aufnahme), für die der jeweilig beobachtete Grundflächenzuwachs vorliegt. Da die Prognoseschritte in BWinPro fünf Jahre betragen, kann dieser Term wegfallen, sofern die beobachteten Zuwächse ebenso fünfjährige Intervalle beschreiben.

Für die Berechnung der Baumhöhen bei Bäumen, deren Höhe nicht gemessen wurde, wird in BWinPro eine Gleichung verwendet, die den relativen Höhenzuwachs schätzt (NAGEL, 2003). Als Prädiktoren werden der potentielle relative Höhenzuwachs ($ih_{pot}/H100$) sowie

das Verhältnis zwischen Bestandesspitzenhöhe und Höhe des Einzelbaums ($H100/h$) verwendet [5].

$$ih_{rel} = \frac{ih_{pot}}{H100} + p1 * \left(\frac{H100}{h}\right)^{p2} + \varepsilon \quad [5]$$

Zur Bestimmung des potentiellen relativen Höhenzuwachses wird für die meisten Baumarten das Wolf'sche Richtungsfeld herangezogen (WOLF, 1957). Diese Richtungsfelder ($i\bar{h}$) enthalten für jede Baumart durchschnittliche Einzelbaum-Höhenzuwächse gruppiert nach Alters- und Höhenstufen. Sie werden nach [6] berechnet als

$$\bar{ih}_{pot\ Ba,A,H} = \frac{\sum ih_{Ba,A,H}}{n_{Ba,A,H}} \quad [6]$$

mit

Ba : Baumart

A : Altersstufe (10 Jahre)

H : Höhenstufe (2 m)

Der Höhenzuwachs eines Einzelbaums ist somit zum einen abhängig von der durchschnittlichen Höhen-Alters-Beziehung der Höhen- und Altersstufe, zu der dieser Baum gehört. Zum anderen wird der Höhenzuwachs durch die Zugehörigkeit des Baums zu einer Höhenstufe bestimmt, wodurch ein Alterungseffekt bzw. ein Nachlassen des Höhenwachstums mit fortschreitender Höhenstufe abgebildet wird. Das Höhenwachstum ist durch diese Funktionsgleichung also abhängig von der Bonität bzw. Wuchsleistung eines Standorts und der Höhenstufe.

Um neben der Plausibilität der Einzelfunktionen nun auch das gesamte Zusammenspiel dieser Funktionen im Modellierungssystem BWinPro qualitativ beurteilen zu können, folgt eine qualitative Betrachtung dieses Systems im Ganzen.

In *Abbildung 2* ist das Zusammenspiel der einzelnen Module von BWinPro dargestellt. Der Pfad beginnt dabei bei der Datenergänzung, die durchgeführt wird, falls der Datensatz unvollständig ist. Zu den fehlenden Daten zählen häufig einige Einzelbaumhöhen, da Höhen in vielen Beständen nur als Stichprobe erhoben werden. Solche fehlenden Daten werden nun also basierend auf Regressionsgleichungen für die Beobachtungen mit fehlenden Werten ergänzt. Anschließend erfolgt die Generierung virtueller Baumpositionen innerhalb eines Bestandes. Da die Berücksichtigung der Konkurrenz zwischen Baumnachbarn in BWinPro standardmäßig positionsunabhängig verläuft, sind Baumpositionen hierfür zunächst nicht erforderlich. Die Generierung von Positionen ist ausschließlich für Visualisierungszwecke erforderlich. Hierbei gibt es allerdings eine Ausnahme: wenn die Verwendung des positionsabhängigen Konkurrenzindex $c66xy$ beabsichtigt ist, was prinzipiell möglich ist, werden explizite Baumpositionen auch für die Quantifizierung der Abhängigkeit des Grundflächenzuwachses von den konkreten Nachbarschaftsbeziehungen der Einzelbäume herangezogen. Für die vorliegende Arbeit war dies jedoch nicht relevant, da für Baden-Württemberg die Verwendung des positionsabhängigen $c66xy$ -Index nicht ins Auge gefasst wurde.

Mit dem komplettierten Datensatz werden als nächste Schritte die Bestandesbehandlung und anschließend die

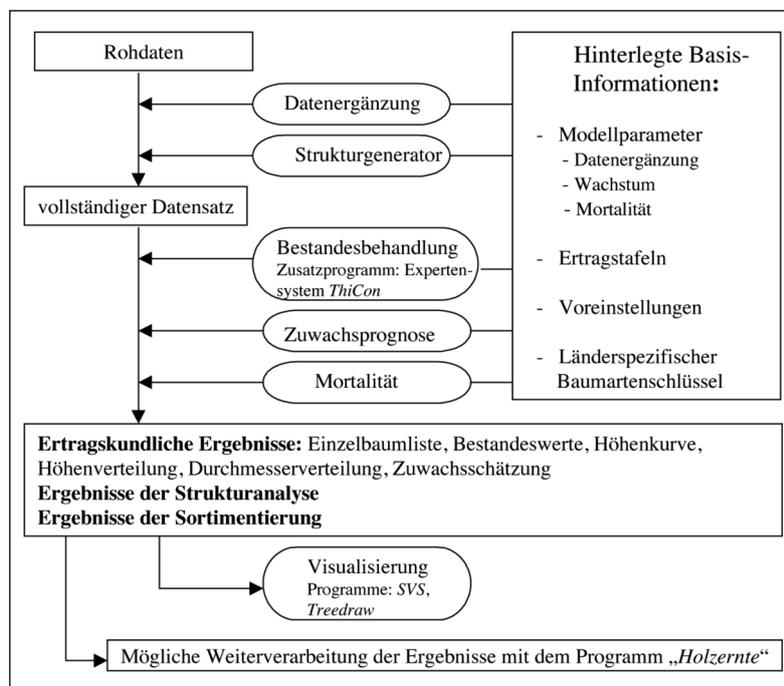


Abb. 2

Die wichtigsten Elemente der Programmstruktur von BWinPro 6.1 nach DÖBBELER et al. (2001).

The most important elements of the software structure of BWinPro 6.1 following DÖBBELER et al. (2001).

Zuwachs- und Mortalitätsprognosen durchgeführt. Die Prognose verläuft dabei immer in Fünfjahresschritten und beginnt nachdem die aufgrund von Durchforstung ausscheidenden Bäume entnommen werden. Die Durchforstung verändert dabei Bestandesdichte und Konkurrenz, und diese Veränderung wird durch den Prädiktor c66c als Freistellungseffekt abgebildet (siehe [4]). Die Reihenfolge der einzelnen Schritte der Zuwachsprognose ist nicht von Belang, da ausschließlich die Startwerte zu Beginn der Periode in die Zuwachsschätzung einfließen. Abschließend stehen die Prognoseergebnisse in Form von Einzelbaumtabellen sowie als aus diesen Einzelbaumtabellen abgeleitete Analysewerte zur Verfügung. Nach der gleichen Funktionsweise können danach weitere Prognoseschritte für weitere Perioden erfolgen.

3.2. Quantitative Evaluierung

In *Tabelle 1* sind die Werte des relativen Jahrzehnt-Bias je Baumart und Bestandeskenngröße aufgelistet. Für die meisten Kenngrößen ergeben sich signifikante Abweichungen zwischen simulierten und empirischen Werten. Bei der Anwendung von BWinPro in der nordwestdeutschen Modellversion auf Versuchsflächendaten aus Baden-Württemberg kommt es bei den meisten Baumarten zu Unterschätzungen von Durchmesser-, Höhen- und Dichtekennwerten. Eine Ausnahme bildet die Buche, bei der Durchmesser- und Dichtewerte deutlich überschätzt werden.

Am stärksten von systematischen Abweichungen betroffen sind der Dg sowie der Hektarvorrat. Dabei überschreitet der Betrag des Bias beim Vorrat im Mittel aller Baumarten sogar die 5%-Schwelle. Beim Dg betrifft diese Überschreitung nur die Douglasie. Da als Grenzwert für den maximal tolerablen Bias eine Schwelle von 5% festgelegt worden war, machte dieser Befund eine Modellüberarbeitung bzw. -anpassung für die Schätzung dieser Kenngrößen notwendig. Bemerkenswert erscheint, dass der Bias für Dg im Schnitt höher ausfällt als für den D100. Daraus lässt sich folgern, dass das Zuwachsmo­dell offenbar den Grundflächenzuwachs überproportional bei den vorherrschenden und herrschenden Bäumen alloziert.

4. ANPASSUNG VON MODELLEN AN DATEN ANDERER REGIONEN

Wenn es bei einer Testanwendung des zu prüfenden Modells für einen neuen Gültigkeitsraum zu Abweichungen kommt, die einen akzeptablen Grenzwert überschreiten, müssen Modellanpassungen vorgenommen werden. Die Anpassungen können entweder darin bestehen, die existierenden Regressionsgleichungen neu zu parametrisieren, oder neue Gleichungen zu entwickeln, die die Wachstumsgesetzmäßigkeiten der neuen Region besser repräsentieren.

Aufgrund der Überschreitung des Grenzwertes von 5% für den relativen Jahrzehnt-Bias bei mehreren Kenngrößen wurden beide der vorgenannten Möglichkeiten für die Anpassung getestet. Als Beispiel für die erste Anpassungsmöglichkeit wird in dieser Arbeit die Parametrisierung der Grundflächenzuwachs­funktion [4] herangezogen. Hierbei erfolgte eine rechnerische Anpassung der in BWinPro implementierten Funktionsgleichung an baden-württembergische Daten, so dass als Ergebnis regional gültige Koeffizienten der Wachstumsfunktion zur Verfügung stehen. Die zweite Möglichkeit der Anpassung wird am Beispiel einer neuen Funktionsgleichung für den Grundflächenzuwachs dargestellt.

4.1. Neu-Parametrisierung bestehender Gleichungen

Vor der Anpassung linearer Regressionsmodelle muss der Datensatz zunächst auf Multikollinearität geprüft werden. Multikollinearität ist der Ausdruck für den unerwünschten Effekt, dass zwei oder mehr Prädiktoren miteinander korreliert sind. Solche Korrelationen führen dazu, dass Schätzverfahren für Regressionskoeffizienten instabil und ungenau werden und keine eindeutige Modellinterpretation mehr möglich ist. Multikollinearität muss insbesondere überprüft werden, wenn Verdacht auf solche Korrelationen besteht. Als Maß für die Multikollinearität gilt der Varianzinflationsfaktor (VIF). Sein Wert sagt aus, um wie viel sich die Varianz der Koeffizientenschätzung eines bestimmten Prädiktors aufgrund von Kollinearität mit den anderen Prädiktoren

Tab. 1

Ergebnisse der bestandesweisen Evaluierung.
Grundlage: BWinPro in nordwestdeutscher Modellversion angewendet
auf Versuchsflächendaten in Baden-Württemberg. Relativer Jahrzehnt-Bias
für ausgewählte Bestandeskenngrößen. Fettdruck zeigt signifikant
von Null verschiedene Bias-Werte an (alpha-Niveau 0,05).

Results of the stand-level evaluation.
Basis is the Northwest German model version of BWinPro applied
to permanent experimental plots in Southwest Germany.
Relative decennial bias for selected stand-level characteristics.
Bold values mark bias values significantly different from zero (alpha-level 0.05).

	D100	Dg	H100	Hg	G	V	Anzahl Bestände
Buche	4.2%	3.2%	-1.0%	-1.7%	8.3%	8.0%	20
Douglasie	-4.2%	-5.0%	-3.0%	-3.5%	-4.4%	-6.4%	82
Fichte	-0.7%	-2.1%	-2.9%	-4.1%	0.1%	-3.4%	301
Tanne	-2.3%	-3.3%	-1.9%	-2.3%	-4.7%	-6.4%	48
gewichtetes Mittel	-3.1%	-4.0%	-2.7%	-3.2%	-3.4%	-5.4%	

Tab. 2

**Ergebnisse der Koeffizientenschätzung und Anpassung
der Grundflächenzuwachsfunction an Daten von
baden-württembergischen Versuchsflächen.**

Alle Parameter sind signifikant auf dem 0,05-Niveau.

VIF: Varianzinflationsfaktor, R²: Bestimmtheitsmaß.

Fit and coefficients of the function for estimating basal area increment. All coefficients are significant at the 0.05-level.

VIF: Variance Inflation Factor, R²: coefficient of determination.

Baumart	Kenngroße	p0	p1	p2	p3	R ²
Buche	Koeffizient	-7.839	1.192	-0.507	-1.093	0.54
	VIF	0.000	1.144	1.147	1.018	
Fichte	Koeffizient	-7.735	1.502	-0.917	-0.487	0.46
	VIF	0.000	1.254	1.314	1.198	
Tanne	Koeffizient	-8.163	1.064	-0.109	-1.485	0.47
	VIF	0.000	1.042	1.041	1.066	
Douglasie	Koeffizient	-8.302	2.150	-1.678	-0.378	0.62
	VIF	0.000	2.256	2.152	1.079	

erhöht. Der Varianzinflationsfaktor wurde für jeden Prädiktor i berechnet nach [7]

$$VIF_i = \frac{1}{1 - R^2} \quad [7]$$

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

Alle Koeffizienten der vier Parameter der Grundflächenzuwachsfunction sind signifikant (Tabelle 2). Da die Modellanpassung als multiple lineare Regression durchgeführt wurde, sind auch die Vorzeichen und die Beträge der Koeffizienten interpretierbar. Insbesondere fallen die positiven Werte der Koeffizienten des Parameters Kronenmantelfläche (p1) auf. Dies zeigt an, dass der Grundflächenzuwachs mit zunehmender Kronenmantelfläche ansteigt. 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 Fichte besonders stark von der Kronenmantelfläche getrieben wird (2,15 und 1,502).

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 $-0,51$). Alle Baumarten reagieren im Modell auf erhöhte Konkurrenz mit einer Zuwachsreduktion. 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 $-1,09$).

Die Werte des Varianzinflationsfaktors (VIF) liegen fast ausschließlich unterhalb von 5 und belegen damit, dass die Prädiktoren insgesamt kaum multikollinear miteinander verbunden sind. Die Werte können somit als unkritisch gelten (FAHRMEIR et al., 2007; S. 172 f.).

Die Bestimmtheitsmaße (R^2) liegen für Fichte und Tanne knapp unterhalb von 0,5. Der Wert für Fichte liegt damit geringfügig unter dem mit der nordwestdeutschen Parametrisierungsversion erzielten Wert. Auch bei Buche liegt das Bestimmtheitsmaß mit 0,54 leicht unter dem Wert für Nordwestdeutschland. Für Douglasie fällt dagegen der Anteil erklärter Varianz nach der Neu-Parametrisierung höher als für Nordwestdeutschland aus (NAGEL, 2005). Für die Tanne gibt es keine vergleichbaren Werte in Nordwestdeutschland.

Das Bestimmtheitsmaß gibt in diesem Zusammenhang an, wie groß der Anteil der Varianz ist, den man mit Hilfe der Regressionsgleichungen erklären kann. Es ist also ein Maß für die Anpassungsgüte. Für den direkten Vergleich zwischen der Vorhersagegüte der neu-parametrisierten Version und der nordwestdeutschen Version ist dieser Wert allerdings nicht geeignet. Welche Modellversion die besseren Vorhersageeigenschaften aufweist, lässt sich erst durch eine Testanwendung und Evaluierung quantifizieren.

Aus der Gegenüberstellung der beobachteten und modellierten Werte des logarithmierten Grundflächenzuwachses (Abbildung 3) wird ersichtlich, dass es bei allen Baumarten zu einer guten allgemeinen Übereinstimmung kommt. Allerdings fällt auf, dass es bei der für Baden-Württemberg neu parametrisierten Version im unteren Wertebereich zu einer systematischen Überschätzung der Zuwächse kommt (Werte oberhalb der Winkelhalbierenden).

Die am Beispiel des Grundflächenzuwachses exemplarisch dargestellte Neu-Parametrisierung lässt sich in der beschriebenen Vorgehensweise prinzipiell auch für andere Funktionsgleichungen in BWinPro durchführen und prüfen. Besonders aussichtsreich für die Verbesserung der Vorhersagegüte erscheint dabei vor allem die Neu-Parametrisierung derjenigen Funktionsgleichun-

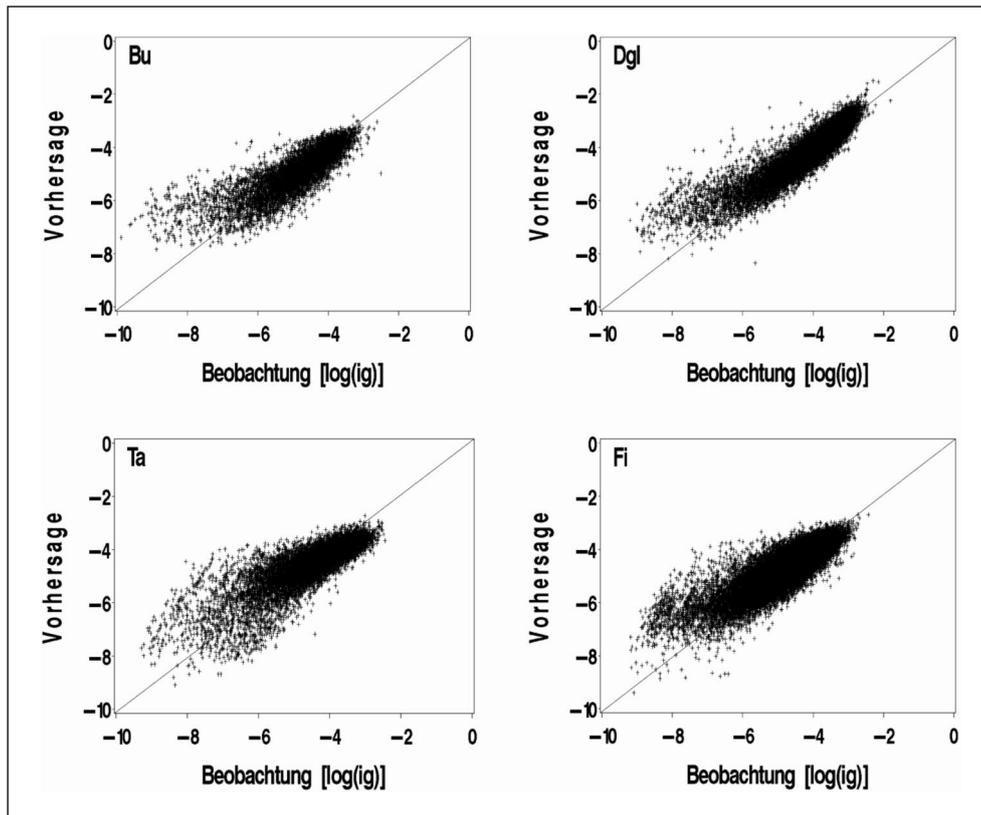


Abb. 3

Ergebnisse der Grundflächenzuwachsmodellierung.
Geschätzter logarithmierter Grundflächenzuwachs (Vorhersage, y-Achse) über dem gemessenen Wert (Beobachtung [log(ig)], x-Achse) für die vier untersuchten Baumarten.

Results of the model for estimating the basal area increment.
Estimated logarithmic basal area increment (Vorhersage, y-axis) over the measured value (Beobachtung [log(ig)], x-axis) for the four analyzed tree species.

gen, bei denen die Evaluierung die größten Abweichungen aufzeigt.

4.2. Erstellen neuer Gleichungen

Die zweite Möglichkeit, um zu transferierende Modelle oder Modellierungssysteme an neue Begebenheiten anzupassen, besteht in der Entwicklung neuer Wachstumsgleichungen. Diese Möglichkeit erscheint insbesondere dann angezeigt, wenn für eine Gleichung zwar ein positives qualitatives Prüfungsergebnis vorliegt, die quantitative Prüfung jedoch negativ ausfällt und sich durch Neu-Parametrisierung der originären Funktionsgleichung keine akzeptable Verbesserung erreichen lässt.

Als Beispiel für das Erstellen neuer Gleichungen wurden zwei alternative Modelle zur Schätzung des Grundflächenzuwachses getestet und mit den Ergebnissen der mit der in BWinPro implementierten, für Baden-Württemberg neu parametrisierten Gleichung verglichen.

Das erste Alternativmodell wurde nach [8] angepasst.

$$ig = \exp(p_0) * km^{p_1} * Alter^{p_2} * \exp(p_3 * C66) * \exp(p_4 * C66c) + \varepsilon \quad [8]$$

Dieses Modell enthält die gleichen Prädiktoren wie das ursprüngliche Modell [4] und ist deshalb prinzipiell

identisch. Allerdings wurde es im Gegensatz zur originären Funktionsgleichung als nicht-lineares Modell angepasst.

Das zweite Alternativmodell greift das von YUE et al. (2008) entwickelte relative Durchmesser-Zuwachsmodell auf, das ohne Einbeziehung von Kronenparametern einzelbaumspezifische Zuwachsschätzungen ermöglicht. In diesem Modell werden die Prädiktoren Alter, Grundfläche (G) und relativer BHD-Rang ($bhdrang_{rel}$) verwendet, und das Modell wurde als nicht-lineares Modell angepasst [9].

$$id_{rel} = p_0 * Alter^{p_1} * G^{p_2} * bhdrang_{rel}^{(p_3 + p_4 * (G / \sqrt{Alter}))} + \varepsilon \quad [9]$$

Beide Formen der Anpassung verbessern die Bestimmtheitsmaße im Vergleich zu den mit dem Referenzmodell ($\ln(ig)$ [4]) erzielten Werten (Tabelle 3). Beim erstgenannten Alternativmodell beruht die Verbesserung ausschließlich auf der Verwendung eines nicht-linearen Anpassungsverfahrens und beträgt je Baumart zwischen 4 und 12 Prozentpunkten gegenüber dem Referenzmodell. Beim zweiten Alternativmodell bewirkt die Anwendung der im Vergleich zum Referenzmodell grundsätzlich anderen Gleichungsstruktur eine noch stärkere Verbesserung des Bestimmtheitsmaßes um 14 bis 34 Prozentpunkte.

Tab. 3

Nicht-lineare Bestimmtheitsmaße der drei verglichenen Grundflächenzuwachsmodelle. Zahlen in eckigen Klammern verweisen auf die jeweilige Modellgleichung.

Non-linear coefficient of determination of the three tested basal area increment models. Numbers in squared brackets refer to the respective modeling equations.

	ln(ig) [4]	ig [8]	ig _{rel} [9]
Buche	0.53	0.58	0.67
Douglasie	0.52	0.64	0.78
Fichte	0.42	0.46	0.65
Tanne	0.29	0.37	0.63

Zu beachten ist, dass die für die Anpassungen dargestellten Ergebnisse ausschließlich die Güte der Modellanpassung beschreiben. Sie liefern damit zwar erste Hinweise auf die Eignung der Modellspezifizierung. Um jedoch die Auswirkung auf mögliche Verbesserungen der Prognosequalität beurteilen zu können, wären beispielsweise Testanwendungen und Evaluierungen mit externen Datensätzen erforderlich.

Neben der Anpassung der Grundflächenzuwachsfunction wurden auch die Funktionen für den Höhenzuwachs, die Kronenbreite und die Kronenansatzhöhe angepasst. Da die Ergebnisse dieser Anpassungen jedoch nicht für die Demonstration der Anpassungsverfahren notwendig sind, wird aus Platzgründen auf entsprechende Darstellung verzichtet.

5. QUANTIFIZIERUNG DER VERBESSERUNG DURCH ANPASSUNG

Anschließend erfolgte nun die Quantifizierung der Verbesserung, die sich aus der Anpassung von Modellen an Daten anderer Regionen ergab. Neben dieser Quantifizierung wurde gleichzeitig geprüft, ob die nach der Anpassung noch verbleibenden Abweichungen den gewählten Schwellenwert für akzeptable Abweichungen unterschreiten.

Als Beispiel für diesen Schritt wurde eine Testanwendung von BWinPro-BW (BWinPro für Baden-Württemberg) durchgeführt. Dabei kamen die für Baden-Württemberg neu ermittelten Koeffizienten der Modelle für Kronenansatz, Kronenbreite, Höhen- sowie Grundflächenzuwachs zum Einsatz. Die Fortschreibung auf dieser Grundlage erfolgte für 10 Jahre, und die Ergebnisse wurden anschließend einer quantitativen Evaluierung unterzogen.

Die Ergebnisse der Evaluierung sind in *Tabelle 4* für jede Baumart (Zeilen) und getrennt nach den Evaluierungskenngrößen (Spalten: D100, Dg etc.) wiedergegeben. Signifikant von Null abweichende Werte der Prüfgröße ‚relativer Jahrzehnt-Bias‘ wurden in der Tabelle im Fettdruck markiert. Grundlage dieser Signifikanzprüfung war im Falle normalverteilter Daten der t-Test, bei nicht normalverteilten Werten dagegen der Vorzeichen-Rang-Test. Werte der Prüfgröße, relative Bias-Verbesserung‘ wurden kursiv dargestellt, wenn sie den Betrag von -1% unterschritten. Negative Werte dieser Prüfgröße zeigen eine Verschlechterung der Bias-Werte durch die Neu-Parametrisierung für Baden-Württemberg an.

Tab. 4

Ergebnisse der bestandesweisen Evaluierung nach Anpassung. Jahrzehnt-Bias und Jahrzehnt-Bias-Verbesserung als relative Prüfgrößen, dargestellt für die untersuchten Baumarten. Die ‚Verbesserung‘ bezieht sich auf die Veränderung des Bias beim Vergleich der Modellversionen Baden-Württemberg zu Nordwestdeutschland. Fettdruck zeigt signifikant von Null verschiedene Bias-Werte an (alpha-Niveau 0,05), kursive Werte zeigen an, dass die baden-württembergische Modellversion um mehr als 1% schlechter als die nordwestdeutsche ist.

Results of the stand-level evaluation after adaptation. Decennial bias and decennial bias improvement as relative values for the analyzed tree species. The ‘improvement’ characterizes the change in relative bias when comparing the model versions Baden-Wuerttemberg and north-western Germany. Bold values mark bias values significantly different from zero (alpha-level 0.05), values in italics indicate that the Baden-Wuerttemberg model version has more than 1% higher bias than the Northwest German version.

Baumart	N	Prüfgröße	D100	Dg	H100	Hg	G	V
Bu	20	rel. Jahrzehnt-BIAS	-0.8%	-2.0%	1.5%	0.8%	-2.5%	-0.7%
		rel. BIAS-Verbesserung	3.4%	1.2%	-0.6%	1.0%	5.9%	7.3%
Dgl	82	rel. Jahrzehnt-BIAS	-3.5%	-6.2%	0.5%	0.8%	-6.5%	-4.9%
		rel. BIAS-Verbesserung	0.7%	-1.1%	2.5%	2.7%	-2.2%	1.5%
Fi	301	rel. Jahrzehnt-BIAS	-2.3%	-4.4%	1.0%	-0.6%	-4.5%	-3.4%
		rel. BIAS-Verbesserung	-1.6%	-2.3%	1.9%	3.5%	-4.4%	0.0%
Ta	48	rel. Jahrzehnt-BIAS	-1.2%	-2.1%	2.3%	1.6%	-3.5%	-1.3%
		rel. BIAS-Verbesserung	1.1%	1.3%	-0.4%	0.7%	1.2%	5.1%
gewichtetes Mittel	451	rel. Jahrzehnt-BIAS	-2.3%	-4.4%	1.1%	0.0%	-4.7%	-3.4%
		rel. BIAS-Verbesserung	-0.7%	-1.6%	1.7%	2.9%	-2.9%	1.1%

Besonders hohe negative Abweichungen (relativer Jahrzehnt-Bias $< -5\%$) traten für den Dg bei Douglasie auf. Über alle Baumarten hinweg mittelte sich die Unterschätzung des Dg zu $-4,4\%$. Betrachtet man dagegen den D100, liegt die durchschnittliche Unterschätzung über alle Baumarten bei nur $-2,3\%$. Bei keiner Baumart wurden für diesen Kennwert Werte kleiner als -5% beobachtet.

Die prognostizierten Höhenkennwerte wiesen nach der Neu-Parametrisierung überwiegend nur geringen Bias auf. Im Mittel besteht ein schwacher Trend zur Überschätzung der H100 ($1,1\%$). Werte über 2% traten nur bei Tanne für die H100 auf.

Bei der Prognose der Bestandesgrundflächen traten teilweise recht hohe Unterschätzungen von mehr als -6% auf. Im Mittel betrug diese Unterschätzung der Grundfläche $-4,7\%$. Douglasie fiel hier mit hohen Werten auf, wohingegen die Werte für Buche, Fichte und Tanne unter 5% lagen. Im generellen Trend zur Unterschätzung ähnlich, aber mit geringeren Werten, wurde der Holzvorrat prognostiziert. Im Mittel kam es zu einer Unterschätzung um $-3,4\%$. Analog zu den Bias-Werten von Dg und D100 besteht damit eine leichte Tendenz zur Unterschätzung von Grundfläche und Vorrat.

6. DISKUSSION

6.1. Diskussion methodischer Aspekte

Die Anpassung des ursprünglich für den Raum Nordwestdeutschland parametrisierten WWS BWinPro an baden-württembergische Daten führte nicht für alle waldwachstumskundlichen Größen zu einer Verbesserung des Bias. Tatsächlich wurden der Dg und die Grundfläche nach der Anpassung sogar etwas schlechter vorhergesagt. Ein Erklärungsansatz für diesen widersprüchlichen Befund liegt darin, dass die exemplarische Durchführung dieser Anpassungsschritte gleichzeitig für vier Modellfunktionen erfolgte und sich deren Auswirkungen auf die Ergebnisse folglich überlagerten. So wurden – neben der Modellierung des Höhenzuwachses – beide Kronenmodelle sowie das zum Teil auf mit diesen Modellen generierten Prädiktoren aufbauende Grundflächenzuwachsmo-
dell neu parametrisiert. Dieses Vorgehen ist zwar pragmatisch, aus methodischer Sicht jedoch nicht ganz korrekt, da sich dadurch die insgesamt durch die Anpassungen erzielten Veränderungen des Bias nicht den als Komponenten verwendeten Einzelmodellen konkret zuordnen lassen. Tatsächlich wäre es bei aus verschiedenen Teilkomponenten bestehenden komplexeren Modellierungssystemen eigentlich erforderlich, die durchgeführten Modellanpassungen schrittweise zu beurteilen (*Abbildung 1*). Aufgrund des hohen Rechenaufwands konnten jedoch in der vorliegenden Untersuchung solche schrittweisen Beurteilungen nicht erfolgen.

Ein weiterer Erklärungsansatz für eine ausgebliebene bzw. nur mangelhaft ausgeprägte Verbesserung nach Anpassung liegt möglicherweise in der Qualität der für die Neuparametrisierung verfügbaren Daten zu Kronenbreiten. Die der nordwestdeutschen Parametrisierungs-
version zugrunde liegende Datenbasis ist in dieser

Hinsicht wesentlich umfangreicher und deckt einen deutlich größeren Wertebereich der Durchmesser ab, als dies bei den für Baden-Württemberg verfügbaren Daten der Fall ist. Als ausreichend kann in dieser Beziehung für Baden-Württemberg lediglich die Datenbasis für die Baumarten Buche, Fichte und Tanne gelten. Bei allen anderen Baumarten sollte aufgrund der geringen baden-württembergischen Datenbasis beim Modell für die Kronenbreite vorsichtshalber auf die in der nordwestdeutschen Parametrisierungsversion enthaltenen Modellkoeffizienten zurückgegriffen werden.

Mit der Neu-Parametrisierung der in BWinPro implementierten logarithmierten Grundflächenzuwachs-
funktion ging eine Überschätzung im unteren Wertebereich einher (*Abbildung 2*). Um mögliche Erklärungen für diesen Befund zu untersuchen, wurde die gleiche Grafik in rücktransformierter, also entlogarithmierter Skalierung dargestellt. Hierbei zeigte sich, dass die Logarithmierung die Streuung im oberen Wertebereich reduzierte, gleichzeitig jedoch die im unteren Wertebereich erhöhte. Solche Transformationseffekte (Unterschiede zwischen ursprünglicher und logarithmierter Skalierungsform) sind insbesondere bei gleichzeitiger Transformation von Antwort- und erklärenden Variablen nicht ungewöhnlich und stellen kein grundlegendes Problem dar (PRETZSCH, 2002). Um solche unerwünschten Transformationseffekte zu beheben, kommt die Verwendung eines verallgemeinerten linearen Modells mit log-link oder einer nichtlinearen Regressionsgleichung in Betracht (KINDERMANN, 2010; MILLER, 1984). In der vorliegenden Arbeit wurde exemplarisch als Verbesserungsoption die nichtlineare Regression ausgewählt. Die damit erzielten Ergebnisse bestätigten, dass dieses Anpassungsverfahren geeignet sein kann, die unerwünschten Transformationseffekte befriedigend zu beheben.

Tatsächlich scheint jedoch der in BWinPro implementierte Funktionstyp für das Grundflächenzuwachsmo-
dell selbst bei nicht-linearer Anpassung das Potential statistischer Durchmesser-Zuwachsmo-
delle nicht optimal auszunutzen. So führte die Verwendung des ebenfalls nicht-linear angepassten Funktionstyps nach YUE et al. (2008) zu einer deutlich weitergehenden Verbesserung.

Trotz dieses deutlichen Verbesserungspotentials konnte der Funktionstyp für die Modellierung des Durchmesserzuwachses nach YUE et al. (2008) im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter untersucht werden. Der Grund hierfür liegt darin, dass für die Implementierung dieses Funktionstyps mit dem relativen Durchmessererrang ein Prädiktor erforderlich ist, der in der vorliegenden Version von BWinPro programmiertechnisch nicht zur Verfügung steht. Um die erforderlichen Tests durchführen zu können, hätte daher die Programmstruktur erheblich verändert werden müssen, was im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht erfolgen konnte. Die orientierenden Ergebnisse legen jedoch nahe, dass es für weitere Untersuchungen durchaus sinnvoll sein dürfte auch nicht-kronenbasierte Konkurrenzmaße, wie sie der Ansatz von YUE et al. (2008) verwendet, in die vorhandene Programmstruktur zu implementieren (z.B. relativer Durchmessererrang oder die Grundfläche stärkerer Bäume; syn. basal area of larger trees, BAL).

Die klare Unterscheidung zwischen prozessbasierten und empirisch-statistischen Waldwachstumsmodellen erwies sich für die durchgeführten Prüfungs- und Anpassungsschritte als deutlich unklarer als dies aufgrund der Unterschiedlichkeit der Modelltypen zu erwarten war. Grundsätzlich sind zwar mit der Verwendung statistischer Wachstumsmodelle keine kausalen Hypothesen verknüpft, sondern es werden lediglich Korrelationen zwischen Waldwachstum und potentiellen Einflussgrößen aufgezeigt. Tatsächlich wurden im Zuge der qualitativen Evaluierung hinter den Modellgleichungen von WWS aber sehr wohl auch biologisch-funktionale Hypothesen aufgefunden. Ein Beispiel für die biologisch-funktionalen Hypothesen in empirisch-statistischen WWS ist die Annahme allometrischen Wachstums (Durchmesser-Höhenbeziehung), also die ungleichmäßige Formveränderung zweier Dimensionsmaße bzw. die Andersmaßigkeit (PRETZSCH, 2002; S. 335 ff.).

Trotz der prinzipiell zu erwartenden Gültigkeit prozessbasierter bzw. mechanistischer Modelle in anderen Bezugsregionen, Zeiträumen oder räumlichen Skalierungen weisen Arbeiten, die sich mit der Prüfung dieser Übertragbarkeit auseinandersetzen klar darauf hin, dass auch erfolgreich entwickelte Modelle dieses Modelltyps nicht als universell einsetzbar gelten können (RUNNING und HUNT JR., 1993). Insofern zeigt sich, dass die Unterscheidung hinsichtlich der Übertragbarkeit prozessbasierter und statistischer Modelle zwar theoretisch grundsätzlich gerechtfertigt ist, in der Praxis der Modellentwicklung jedoch die Grenzen bei der Frage nach der Übertragbarkeit zwischen beiden Modelltypen durchaus eher gleitend sind. Vor der Übertragung auf von der Parametrisierungsbasis abweichende Verhältnisse sollten daher bei beiden Modelltypen sowohl qualitative als auch quantitative Prüfschritte vorgeschaltet werden.

Zusätzlich zu den durchgeführten quantitativen Prüfungen lassen sich im Zuge von Modelltests auch virtuelle Experimente durchführen (PARYSOW und GERTNER, 1997), die häufig auch als Sensitivitätsanalysen bezeichnet werden (VANCLAY und SKOVSGAARD, 1997). Bei solchen virtuellen Experimenten wird die Modellplausibilität überprüft indem die Prädiktorenwerte von Modellen schrittweise verändert werden, um die Modellvorhersagen in Abhängigkeit der veränderten Eingangswerte darzustellen. Mit diesem Verfahren erhält der Benutzer Aufschluss über die Sensitivität des Modells gegenüber veränderten Eingangswerten der verschiedenen Prädiktoren. Virtuelle Experimente wurden in der vorliegenden Arbeit nicht durchgeführt, da nicht die Sensitivität sondern die Genauigkeit des Modells die relevante Fragestellung bei der Übertragbarkeit war. Sie können jedoch gute Einblicke in die Modellfunktionalitäten gewähren, wenn ein fremdes Modell getestet werden soll.

6.2. Diskussion der waldwachstumskundlichen Ergebnisse

Als Ergebnis der qualitativen Evaluierung zeigte sich, dass sowohl die Teilfunktionen einzeln als auch das Zusammenspiel dieser Funktionen im gesamten Model-

lierungssystem logisch und biologisch plausibel sind. Dieses Ergebnis war zu erwarten, da der WWS BWinPro bereits seit einiger Zeit ein etablierter WWS ist und ähnliche Prüfungen folglich seit Anbeginn seiner Entwicklung durchgeführt wurden. In letzter Zeit befanden VOSPERNIK et al. (2010) das Modellierungskonzept von Höhen- und Durchmesserzuwachs von BWinPro für logisch und biologisch plausibel und unterstreichen damit unsere Ergebnisse. In der vorliegenden Arbeit erfolgte diese qualitative Evaluierung dennoch, um den Ablauf der Prüf- und Anpassungsschritte zu demonstrieren.

Die Vorhersage der Höhenentwicklung baden-württembergischer Versuchsflächen durch die neu parametrisierte Version von BWinPro ist als sehr gut zu bezeichnen und es wurden keine systematischen Unterschiede zwischen Hg und H100 beobachtet. Insgesamt führte hier die Neu-Parametrisierung zu einer deutlichen Verbesserung des Bias.

Für die Entscheidung zur Übernahme eines Modells in die neue Parametrisierungsversion wurde bei der relativen Prüfgröße ‚Bias-Verbesserung‘ ein Grenzwert von -1% gewählt. Veränderungswerte unter diesem Schwellenwert korrespondieren mit einer merklichen Verschlechterung der Anpassung. Daher wurde in diesen Fällen die neuparametrisierte Version des entsprechenden Teilmodells verworfen und die ursprüngliche Parametrisierungsversion beibehalten. Hiervon betroffen war beispielsweise die Grundflächenzuwachsfunktion bei Fichte.

Der Grenzwert von -1% wurde gutachtlich unter der Annahme festgesetzt, dass ein relativer Bias bis zum Betrag von 1% auch durch rein zufällige Variation zustande kommen kann, ohne dass darin eine signifikante, systematische Verzerrung zu sehen ist. Vergleichbare Grenzwerte in anderen Untersuchungen sind nicht bekannt. Die vorgenommene gutachtliche Beurteilung wird allerdings gestützt durch die Befunde zum relativen Jahrzehnt-Bias, dessen Beträge zwischen 0 und 1% überwiegend als nicht-signifikante Werte eingestuft sind (vgl. Tab. 4).

Für den generell bei allen Baumarten höheren Bias des Dg im Vergleich mit dem des D100 könnte der Transformations-Bias der Grundflächenzuwachsfunktion verantwortlich sein. Weitere Auswertungen auf Basis von Einzelbäumen könnten hier mehr Aufschluss geben.

Einen auffälligen Sonderfall scheinen die grundflächenbasierten Modelle für das Durchmesserwachstum bei Douglasie darzustellen. Erstaunlicherweise verschlechterte sich die Vorhersagequalität (Bias) für den Dg durch die Anpassung an baden-württembergische Daten, wohingegen sich die Vorhersage des D100 verbesserte. Dabei fehlen uns für diesen Befund plausible Erklärungsansätze. Da damit beim Durchmesserwachstum der Douglasie kein einheitlicher Trend zu beobachten war, wurde auch in diesem Fall entschieden, die baden-württembergischen Koeffizienten weiter zu verwenden.

Auffällig ist, dass alle Baumarten mit Ausnahme der Buche bei Anwendung der nordwestdeutschen Parame-

trischerungsversion in Baden-Württemberg einen negativen Bias für den Grundflächenzuwachs aufweisen (NAGEL et al., 2002). Die Neu-Parametrisierung verbesserte zwar den Grad der Unterschätzung etwas, zeigte jedoch trotzdem im Trend immer noch eine Unterschätzung der geprüften Durchmesserwerte. Der Befund, dass bei beiden Parametrisierungsversionen dieser Trend zur Unterschätzung zu beobachten ist, könnte ein Indiz dafür sein, dass eher der verwendete Funktionstyp und nicht die Parametrisierungsdaten Ursache für die Unterschätzung sind. Für die Überprüfung dieser Vermutung wird es in weiteren Untersuchungen nötig sein, zunächst die Abweichungen der beiden Kronenfunktionen zu untersuchen. In einem zweiten Schritt könnten in vertiefenden Residuenanalysen auch Abhängigkeiten der Residuen von zusätzlichen potentiellen Erklärungsvariablen untersucht werden. Als besonders aussichtsreich könnte sich die Verwendung der nichtlinearen Durchmesserzuwachsfunction von YUE et al. (2008) anbieten. Die beiden Grundcharakteristika dieser Funktion sind die Positionsunabhängigkeit sowie die Verwendung eines Konkurrenzindex, der nicht von Kronendimensionsparametern abhängig ist. Sollte sich diese Funktion nicht wie in dieser Untersuchung gezeigt in der Anpassungsgüte, sondern auch in der Evaluierung als besser geeignet bewahrheiten, entstünde ein Widerspruch zu den Ergebnissen von BIGING und DOBBERTIN (1995), die für Funktionen mit Kronenparametern präzisere Schätzeigenschaften vorfanden.

7. ZUSAMMENFASSUNG

Für Wissenschaftler und Praktiker stellt sich immer wieder die Frage nach Gültigkeitsbereich, Übertragbarkeit und Verlässlichkeit statistischer Modelle wie z. B. statistischer Waldwachstumssimulatoren. Aus diesem Grund wurde auf der Basis theoretischer Arbeiten ein Vorgehen zur Prüfung und Anpassung solcher Modelle zusammengestellt, das sich in drei Teilschritte gliedert (Abb. 1). Diese drei Teilschritte wurden beispielhaft auf die Überprüfung und Anpassung des Waldwachstumssimulators BWinPro (Abb. 2) für Baden-Württemberg angewendet.

Im ersten Schritt erfolgte die Evaluierung, deren qualitativer Teil eine Überprüfung der Modellierungslogik beinhaltet. Für BWinPro ergab diese Plausibilisierung erwartungsgemäß ein positives Ergebnis. Im quantitativen Teil der Evaluierung wurden mit Hilfe des Beurteilungsmerkmals des relativen Jahrzehnt-Bias waldwachstumskundliche Kenngrößen identifiziert, deren Vorhersagegenauigkeit den gutachtlich festgelegten Genauigkeitsanspruch von 5% nicht erfüllte. Dies traf beispielsweise bei der Vorhersage des Holzvorrats für Buche und Douglasie zu (Tab. 1).

Aufbauend auf den Ergebnissen der Evaluierung wurden im zweiten Schritt Möglichkeiten der Anpassung demonstriert. Diese können in Form von Neu-Parametrisierung vorhandener Wachstumsgleichungen erfolgen oder in der Erstellung neuer Wachstumsfunktionen bestehen. Für BWinPro wurde für diese Anpassungsschritte exemplarisch die Grundflächenzuwachsfunction ausgewählt. Dabei zeigte sich, dass mit einer neuen

nicht-linearen Wachstumsgleichung deutlich bessere Bestimmtheitsmaße erzielbar sind (Tab. 2, Abb. 3, Tab. 3); im Gegensatz zur in BWinPro implementierten Funktion beinhalten die Prädiktoren für diese Gleichung keine Kronenparameter.

Im dritten Schritt wurde eine abschließende Testanwendung durchgeführt, um die Auswirkungen der durchgeführten Anpassung auf die Simulationsergebnisse im Echtbetrieb eines nicht für die Anpassung verwendeten Datensatzes zu quantifizieren. Dabei zeigte sich, dass für jeden einzelnen Anpassungsschritt die separate Quantifizierung der Verbesserung notwendig ist, dass das generelle Niveau der Abweichungen von BWinPro gering ist (Tab. 4) und, dass durchgeführte Anpassungsschritte generell in ein mit der Evaluierung rückgekoppeltes Vorgehen eingebunden sein sollten.

8. ABSTRACT

Title of the paper: *Transferability of empirical statistical forest growth simulators to other regions: appropriate methods for testing and adaptation with the example BWinPro for Southwest Germany.*

For scientists and forest managers it is not always clear to which geographical areas and natural ranges statistical growth models may be applied, or whether developed models can be transferred to new regions. We therefore compiled a procedure for model testing and adaptation based on other studies in this context. This procedure consists of three recursive steps (figure 1) and we applied it as an illustration to the testing and adaptation of the Northwest German forest growth simulator BWinPro (figure 2) for Southwest Germany.

During the first step we performed an evaluation. Its first part, the qualitative test, evaluated the logical consistency and plausibility of the entire modeling system with all its sub-models. The results were positive, as was expected. In the evaluation's second part, the quantitative test, we used the relative decennial bias in order to identify the dendrometric variables whose predicted values did not meet the threshold criterion of 5%. These poorly predicted values included the growing stock for European beech and Douglas-Fir (table 1).

Based on the results of this evaluation we illustrate the possibilities of adaptation as the second step of the presented procedure for testing and adaptation. These possibilities consist of re-parameterizing the existing model functions or of developing new model functions. For BWinPro we chose the basal area increment model as an example and found that the tested new non-linear function yielded better coefficients of determination than the re-parameterized log-transformed linear function (table 2, figure 3, and table 3). We discuss that the non-linear function's independency of tree crown characteristics may explain its advantage.

In the third step we performed a test application in order to quantify the impact of the second step's adaptation on the simulation results. For this test application we used a data set which had not been used for the adaptation. Results show that it is necessary to quantify the improvement for each step of adaptation separately,

that the general level of bias is rather low for predictions with BWinPro (table 4), and that steps of adaptation should generally be fed back into evaluation.

9. LITERATUR

- ALBRECHT, A., S. HEIN, U. KOHNLE und P. BIBER (2009): Evaluierung des Waldwachstumssimulators Silva 2.2 anhand langfristiger ertragskundlicher Versuchsflächen in Baden-Württemberg. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung **180**(3/4), 55–64.
- BIGING, G. und M. DOBBERTIN (1995): Evaluation of Competition Indices in Individual Tree Growth Models. Forest Science **41**(2), 360–377.
- DÖBBELER, H., M. ALBERT, M. SCHMIDT und J. NAGEL (2001): BWinPro-Handbuch zur Version 6, 93 S., elektronisches Dokument.
- DÖBBELER, H., M. ALBERT, M. SCHMIDT, J. NAGEL und J. Schröder (2007): BWINPro: Programm zur Bestandesanalyse und Prognose, Handbuch zur gemeinsamen Version von BWINPro und BWINPro-S, elektronisches Dokument. <http://www.forst.tu-dresden.de/Waldwachstum/downloads/bwman60.pdf>.
- DVFFA (2000): Empfehlungen zur Einführung und Weiterentwicklung von Waldwachstumssimulatoren. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung **171**, 52–57.
- FAHRMEIR, L., T. KNEIB und S. LANG (2007): Regression. 1. Auflage, Springer, Berlin-Heidelberg, 501 S.
- FROESE, R. E. und A. P. ROBINSON (2007): A validation and evaluation of the Prognosis individual-tree basal area increment model. Canadian Journal of Forest Research **(37)**, 1438–1449.
- GUAN, B., G. Z. GERTNER und P. PARYSOW (1997): A framework for uncertainty assessment of mechanistic forest growth models: A neural network example. Ecological Modeling **(95)**, 47–58.
- HÄRKÖNEN, S., A. MÄKINEN, T. TOKOLA, J. RASINMÄKI und J. ALLIOVIRTA (2010): Evaluation of forest growth simulators with NFI permanent sample plot data from Finland. Forest Ecology and Management **(259)**, 573–582.
- HASENAUER, H. und V. MONSERUD (1996): A crown ratio model for Austrian forests. Forest Ecology and Management **1996**(4), 49–60.
- HEIN, S. (2004): Zur Steuerung von Astreinigung und Dickenwachstum bei Esche (*Fraxinus excelsior* L.) und Ahorn (*Acer pseudoplatanus* L.), Dissertation, Freiburger Forstliche Forschung: Bände, Nr. 25, Universität Freiburg, 263 S.
- KINDERMANN, G. (2010): Eine klimasensitive Weiterentwicklung des Kreisflächenzuwachsmodells aus PrognAus. Centralblatt für das gesamte Forstwesen **127**(3/4), 147–178.
- KRAMER, H. und A. AKÇA (1995): Leitfaden zur Waldmessenlehre. 3. Auflage, J. D. Sauerländer's, Frankfurt a. M., 265 S.
- MAYER, P., P. BRANG, M. DOBBERTIN, D. HALLENBARTER, J.-P. RENAUD, L. WALTHERT und S. ZIMMERMANN (2005): Forest storm damage is more frequent on acidic soils. Annals of Forest Science **62**, 303–311.
- MILLER, D. M. (1984): Reducing Transformation Bias in Curve Fitting. The American Statistician **38**(2), 124 ff.
- NAGEL, J., M. ALBERT und M. SCHMIDT (2002): Das waldbauliche Prognose- und Entscheidungsmodell BWinPro 6.1 - Neuparametrisierungen und Modellerweiterungen. Forst und Holz **57**(15/16), 486–493.
- NAGEL, J. (2003): BWinPro – Programm zur Bestandesbehandlung und Prognose – Handbuch zur Version 6.2, elektronisches Dokument. <http://www.nfv.gwdg.de/A/BwinPro/Download/bwman60.pdf>, 24.03.2006, überarbeitet (Stand 25.05.2010): <http://www.nw-fva.de/index.php?id=194#c524>.
- NAGEL, J. (2005): Modellfunktionen und Koeffizienten des Forest Simulators BWinPro Version 7.0, elektronisches Dokument, 24.03.2006.
- PARYSOW, P. und G. Z. GERTNER (1997): Virtual experimentation: Conceptual models and hypothesis testing of ecological scenarios. Ecological Modelling **95**, 59–71.
- PETERSON, A. T., M. PAPES und M. EATON (2007): Transferability and model evaluation in ecological niche modeling: a comparison of GARP and Maxent. Ecography **30**(4), 550–560, doi:510.1111/j.0906-7590.2007.05102.x
- PORTÉ, A. und H. H. BARTELINK (2002): Modelling Mixed Forest Growth: A Review of Models for Forest Management. Ecological Modelling **150**(1-2), 141–188.
- PRETZSCH, H. (2001): Modellierung des Waldwachstums. 1. Auflage Parey, Berlin, 341 S.
- PRETZSCH, H. (2002): Grundlagen der Waldwachstumsforschung. 1. Auflage, Parey/Blackwell, Berlin, 414 S.
- PRETZSCH, H., P. BIBER, J. DURSKÝ, K. V. GADOW, H. HASENAUER, G. KÄNDLER, G. KENK, E. KUBLIN, J. NAGEL, T. PUKKALA, J. P. SKOVSGAARD, R. SODTKE und H. STERBA (2002): Recommendations for standardized documentation and further development of forest growth simulators. Forstwissenschaftliches Centralblatt **121**, 138–151.
- RANDIN, C. F., T. DIRNBÖCK, S. DULLINGER, N. E. Zimmermann, M. ZAPPA und A. GUISAN (2006): Are niche-based species distribution models transferable in space? Journal of Biogeography **33**(10), 1689–1703, DOI: 1610.1111/j.1365-2699.2006.01466.x.
- RUNNING, S. W. und E. R. HUNT JR. (1993): Generalization of a Forest Ecosystem Process Model for Other Biomes, BIOME-BCG, and an Application for Global-Scale Models. Academic Press Inc., 141–158.
- SCHMID, S., A. ZINGG, P. BIBER und H. BUGMANN (2006): Evaluation of the forest growth model SILVA along an elevational gradient in Switzerland. European Journal of Forest Research **125**(1), 43–55.
- SCHRÖDER, J., H. RÖHLE, D. GEROLD und K. MÜNDE (2007): Modeling individual-tree growth in stands under forest conversion in East Germany. European Journal of Forest Research **126**(3), 459–472.
- SPIECKER, H. (1991): Zur Steuerung des Dickenwachstums und der Astreinigung von Trauben- und Stieleichen (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl. und *Quercus robur* L.). Schriftenreihe der Landesforstverwaltung Baden-Württemberg, Bd. **72**, 150.
- VANCLAY, J. K. und J. P. SKOVSGAARD (1997): Evaluating forest growth models. Ecological Modelling **98**(1), 1–12.
- VOSPERNIK, S., R. A. MONSERUD und H. STERBA (2010): Do individual-tree growth models correctly represent height:diameter ratios of Norway spruce and Scots pine? Forest Ecology and Management **260**(10), 1735–1753.
- WINDHAGER, M. (1999): Evaluierung von vier verschiedenen Waldwachstumssimulatoren, Dissertation, Universität für Bodenkultur, Wien, 217 S.
- WOLF, J. (1957): Zeitberücksichtigendes und zeitloses Richtungsfeld der Entwicklung. Acta Uni. Agric. et Silv., Brno Cisto **1**(32), 12–16.
- YUE, C., U. KOHNLE und S. HEIN (2008): Combining tree- and stand-level growth models: a new approach to growth prediction. Forest Science **54**(5), 553–566.