

**Zeitschrift:** Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen = Swiss forestry journal = Journal forestier suisse  
**Herausgeber:** Schweizerischer Forstverein  
**Band:** 156 (2005)  
**Heft:** 5

**Artikel:** Validierung des Waldwachstumsmodells MOSES für Schweizer Wälder  
**Autor:** Hallenbarter, Dionys / Hasenauer, Hubert / Zingg, Andreas  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-1098042>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 02.05.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Validierung des Waldwachstumsmodells MOSES für Schweizer Wälder *(reviewed paper)*

DIONYS HALLENBARTER, HUBERT HASENAUER UND ANDREAS ZINGG

**Keywords:** Forest growth model; validation; growth; silviculture.

FDK 56 : UDK 519 : (494)

**Abstract:** This work presents the results of a validation study using the forest growth simulation model MOSES 3.0 for Swiss forest conditions. During the latest parameterization of the model a large data set from Austria as well as Switzerland was used. The goal of this work was to validate the diameter and height increment functions using a large and independent data set (not used for model calibration) recorded on permanent sample plots in Switzerland. Tree growth was simulated over several growth periods and analyzed for a possible bias. The main results of this study suggest that no systematic discrepancies exist between the predicted and the observed diameter and height increment.

**Abstract:** Vorgestellt werden die Ergebnisse der Validierung des Waldwachstumssimulators MOSES 3.0 für Schweizer Verhältnisse. Nachdem im Zuge der Neuparametrisierung des Modells sowohl Daten aus der Schweiz als auch aus Österreich verfügbar waren, war das Ziel dieser Arbeit die Validierung der Zuwachsfunktionen mittels eines unabhängigen Datensatzes. Das Wachstum wurde nach den Gesichtspunkten Baumart, Bestandestyp und Höhenlage über mehrere Wachstumsperioden simuliert und mit den beobachteten Daten verglichen. Systematischen Abweichungen in den Durchmesser- und Höhenzuwachsschätzungen waren keine feststellbar.

## 1. Einleitung

Bis heute sind in der Schweiz die wichtigsten Wachstumsmodelle die Ertragstafeln von BADOUX (1983). Die Daten dazu stammten aus hoch durchforsteten Fichten-, Tannen-, Lärchen- und Buchen-Reinbeständen und sind laut ZINGG (2001) als eher knapp einzustufen. Diese traditionelle Abschätzung der zukünftigen Waldentwicklung beschreibt das Wachstum gleichaltriger Reinbestände über Mittelwerte (Mitteldurchmesser, Mittelhöhe) und flächenbezogene Summen (Grundfläche, Volumen und Stammzahl je Hektar).

Auf Grund der Änderung in der Waldbewirtschaftung – weg vom klassischen Altersklassenwald und hin zu einer kleinflächigen, plenterartigen Bewirtschaftung – sind alternative Prognoseinstrumente für eine nachhaltige Waldbewirtschaftung notwendig. Wünschenswert wären Wachstumsmodelle, die jede beliebige Alters- und Bestandesstruktur nachbilden können, um damit dem Waldbauer die Möglichkeit zu geben, jede Bewirtschaftungsart hinsichtlich ihrer Wirkung auf die gewünschte Nachhaltigkeit bewerten zu können (HASENAUER 2004).

Diesem Ansatz folgt die Idee der Baummodelle, die im Gegensatz zur Ertragstafel nicht die mittlere Bestandesentwicklung erfasst, sondern das Wachstum jedes Baumes im Bestand. Zur eigentlichen Informationseinheit wird der jeweilige Baum mit seiner spezifischen Stellung im Bestand. Dieser Übergang der Wachstumsmodelle vom Konzept einer auf Mittelwerten und Summen aufgebauten Ertragstafel hin zur baumweisen Abschätzung von Veränderungen bedeutet einen grundlegenden Paradigmenwechsel in der Waldwachstumsprognose (HASENAUER *et al.* 2000). Im Gegensatz zur Ertragstafel, welche die Entwicklung eines ganz bestimmten gleichaltrigen Reinbestandes prognostiziert, steht beim baumorientierten Ansatz das Wachstum jedes einzelnen Baumes im Bestand im Mittelpunkt der Betrachtung. Erst die Summe dieser Veränderungen ergibt dann, ähnlich wie in der Ertragstafel, die üblichen Mittelwerte und Summen je Flächeneinheit. Auf diese Weise ist jede erdenkliche Kombination von Baumarten und Altersgruppen vorstellbar.

Wissend um die praktische Notwendigkeit der Adaptierung von Prognosesystemen, begann man in Mitteleuropa mit Beginn der 1990er Jahre Modelle zu entwickeln, welche das Wachstum jedes einzelnen Baumes im Bestand beschreiben.

Beispiele dafür sind die Arbeiten von PRETZSCH (1992, 2001), HASENAUER (1994, 2000), NAGEL (1995), NAGEL *et al.* (2002) und STERBA *et al.* (1995), die die grundlegenden Algorithmen für die Erstellung von Einzelbaummodellen für mitteleuropäische Wachstumsbedingungen veröffentlichten. Frühere Arbeiten von FILLA (1981) und STERBA (1983) bildeten dafür eine wichtige Grundlage. Im Wesentlichen wurden dabei Ansätze, wie diese in Nordamerika schon seit längerem in Verwendung waren (siehe NEWNHAM 1964, STAGE 1973, MONSERUD 1975 und WYKOFF *et al.* 1982) für europäische Wälder adaptiert bzw. weiterentwickelt.

In Schweizer Wäldern werden Daten systematisch seit über hundert Jahren aufgenommen. Die ältesten waldwachstumskundlichen Versuchsflächen bestehen bereits seit 1888. Trotzdem verfügen wir heute über keine Datenreihe, die die gesamte Umtriebszeit eines Bestandes in tieferen Lagen abdeckt, schon gar nicht für Bestände in höheren Lagen (ZINGG 2001). Das Wissen, wie sich die Wälder in der Vergangenheit entwickelt haben, ist notwendig, um zuverlässige Prognosen für die Zukunft zu ermöglichen.

Ziel dieser Arbeit ist die Validierung des Wachstumssimulators MOSES 3.0 für die Schweiz. Im Zuge der Neuparametrisierung von MOSES im Laufe der letzten Jahre (KINDERMANN 2004, STEINMETZ 2004, HASENAUER 2005) wurden neben Daten aus Österreich auch Daten von Dauerversuchsflächen aus der Schweiz verwendet. Basierend auf insgesamt etwa 80 000 fünfjährigen Wachstumsperioden wurde das Modell für alle wichtigen Baumarten für die Schweiz und Österreich neu parametrisiert. In dieser Arbeit soll nun mit einem Datensatz aus der Schweiz, der nicht für die Parametrisierung der Wachstumsfunktionen verwendet wurde, die Anwendbarkeit von MOSES 3.0 getestet und validiert werden um damit auch ein Baummodell als alternatives Prognoseinstrument für Schweizer Verhältnisse verfügbar zu haben.

## 2. Das Waldwachstumsmodell MOSES

Das Baumwachstumsmodell MOSES (MOdeling Stand rESponse) wurde am Institut für Waldwachstumsforschung der Universität für Bodenkultur in Wien entwickelt (siehe HASENAUER 1994, 2000). MOSES besteht aus einer Durchmesser- und Höhenzuwachsbeziehung, einer Mortalitätsgleichung sowie Algorithmen zur Abschätzung des Einwuchses bzw. des Ankom-

**Tabelle 1:** Übersicht über die insgesamt 71 595 fünfjährigen Wachstumsperioden, die für die Validierung verfügbar waren.

Für einen Vergleich der Höhenzuwächse standen insgesamt 4978 Periodenwerte mit wiederholt gemessenen Baumhöhen zur Verfügung.

*Table 1: Overview of the total of 71 595 five-year growing periods employed for validation purposes.**A total of 4978 period values were available to compare height increment with repeated measurements of tree height.*

Baumart	Periode	BHD [cm]			H [m]			CI					
		n	Mittel	Min.	Max.	n	Mittel	Min.	Max.	n	Mittel	Min.	Max.
Fichte	1	3 927	19,6	3,0	81,3	107	17,6	4,6	42,0	3 927	12,2	0	171,8
	2	3 421	21,5	3,0	82,9	145	18,3	4,6	43,4	3 421	11,9	0	184,3
	3	3 191	22,5	3,2	84,3	141	19,7	4,7	43,4	3 191	12,2	0	202,2
Tanne	1	2 017	23,2	3,5	120,4	111	28,9	5,2	44,2	2 017	23,3	0	223,7
	2	1 849	24,9	4,6	123,9	126	29,2	5,4	47,2	1 849	21,5	0	183,6
	3	1 595	24,6	4,7	127,0	60	24,2	5,6	47,2	1 595	20,7	0	155,0
Lärche	1	4 809	14,4	1,9	69,0	1 466	12,1	3,6	28,0	4 809	3,7	0	255,9
	2	3 505	17,9	3,1	72,6	928	16,3	8,9	29,6	3 505	4,7	0	544,2
	3	2 560	21,9	4,4	76,2	540	21,0	11,47	31,5	2 560	5,9	0	860,0
Arve	1	874	25,2	5,5	57,9	39	12,9	7,7	15,4	874	12,9	0,5	92,4
	2	834	25,9	5,9	56,2	73	16,1	7,3	25,3	834	11,4	1,1	51,7
	3	788	26,8	6,0	57,4	62	17,1	7,6	25,5	788	11,9	1,9	36,4
Buche	1	14 252	7,9	2,0	68,6	80	15,2	7,7	31,2	14 252	13,1	0	269,8
	2	10 210	9,9	2,0	71,8	79	17,3	8,2	34,6	10 210	15,9	0	204,2
	3	8 408	11,4	2,2	73,8	171	17,5	6,8	35,0	8 408	19,8	0	164,9
Eiche	1	4 478	10,3	3,7	33,7	403	13,3	7,6	23,8	4 478	15,3	0,5	137,3
	2	2 636	13,1	4,1	36,5	237	16,1	10,2	25,7	2 636	20,3	0,7	168,6
	3	1 548	16,7	4,2	40,4	206	18,3	11,3	28,4	1 548	27,2	0,9	226,1
Ahorn	1	292	8,0	1,9	31,1	1	14,3	14,3	14,3	292	12,5	0,3	79,4
	2	228	9,9	2,3	32,4	1	16,7	16,7	16,7	228	11,9	0,7	53,4
	3	173	11,6	3,8	33,7	2	13,8	12,0	15,6	173	13,9	1,0	58,2

n = Anzahl Bäume pro Periode; BHD = Brusthöhendurchmesser; H = Baumhöhe; CI = Konkurrenzindex.

mens und Wachstums von Verjüngung. Zusätzlich sind Submodule für die Beschreibung der Konkurrenz eines Baumes im Bestand notwendig. Der Prognosezeitraum ist üblicherweise eine Fünfjahresperiode, die beliebig oft wiederholt werden kann.

Das Modell beruht auf folgenden Überlegungen: 1. Bestimmung der Zuwachspotenziale, 2. Berechnung der Konkurrenzindizes und 3. Schätzung der Koeffizienten für die baumartenspezifischen Verjüngungs-, Wachstums- und Mortalitätsfunktionen (HASENAUER 2000).

1) Zuwachspotenzial: In MOSES basieren die periodischen Zuwachsschätzungen (Durchmesser- bzw. Höhenzuwachs) auf der Überlegung, dass das Wachstum jedes einzelnen Baumes im Bestand von einem vorher zu definierenden baumarten- und standortspezifischen Potenzial (= maximaler Durchmesser- bzw. Höhenzuwachs) abhängt (siehe NEWNHAM 1964). Der tatsächliche Zuwachs ergibt sich dann mit Hilfe von Reduktionsfaktoren, die sich aus der auf den Baum einwirkenden Konkurrenz herleiten lassen. Der potenzielle bzw. maximale Durchmesserzuwachs wird aus Solitärbäumen hergeleitet (HASENAUER 1997). Die Abschätzung des baumarten- und standortspezifischen potenziellen Höhenzuwachses wird nach einem Vorschlag von MONSERUD (1975) aus dem bonitätsabhängigen Verlauf von Oberhöhenkurven abgeleitet.

2) Konkurrenzindizes: Das Wachstum jedes einzelnen Baumes im Bestand wird durch Masszahlen der Konkurrenz unter der ein Baum bisher erwachsen ist und der aktuellen Konkurrenzsituation abgeschätzt. Während die Konkurrenz in der Vergangenheit über das Kronenprozent eines Baumes definiert ist, wird die aktuelle Konkurrenz auf Grund von Mortalität oder Durchforstungen mit Hilfe des abstandsabhängigen Konkurrenzindex nach EK & MONSERUD (1974) berechnet. Dieser Index beschreibt die Konkurrenzsituation im Bestand indem die Überlappungszonen der potenziellen Kronenflächen mit der Baumhöhe gewichtet wer-

den. Zusätzlich dazu wird auch noch die Veränderung der Konkurrenz berücksichtigt, um auf diese Weise mögliche Wuchsbeschleunigungen oder Wuchsverzögerungen auf Grund von Freistellungen integrieren zu können (HASENAUER 1994, 2000). MOSES ist somit ein abstandsabhängiges Modell. Mögliche Variationen in der Verteilung der Bäume auf der Fläche werden im Konkurrenzindex erfasst und sind auf diese Weise dann auch in den Zuwachsgleichungen berücksichtigt.

3) Koeffizientenschätzungen: Für die Schätzung der Koeffizienten ist die Bandbreite der verfügbaren Daten von Bedeutung. Für die Parametrisierung der Wachstums- und Mortalitätsfunktionen wurden Daten von permanenten Versuchsflächen verschiedenster Baumartenzusammensetzung, Alterstruktur, Behandlung usw. verwendet, womit man davon ausgehen kann, dass alle derzeit üblichen waldbaulichen Varianten berücksichtigt sind.

Managementmodelle wie beispielsweise MOSES bilden heute die Grundlage für die Prognose von Baumdimensionen und der damit verbundenen Massen- und Wertleistung von Beständen. Die Idee der Entwicklung war bzw. ist es, eine möglichst genaue Vorhersage des Holzzuwachses und somit die Ermittlung eines nachhaltig genutzten Hiebsatzes für die nächsten zehn bis dreissig Jahre, unabhängig vom Bestandesalter, der Bestandesbehandlung und der Baumartenzusammensetzung. Weitere Anwendungsgebiete von MOSES sind die Simulation von Durchforstungsvarianten und Freistellungen in gleichaltrigen sowie ungleichaltrigen und gemischten Wäldern (z.B. HALLENBARTER & HASENAUER 2003), die Abschätzung von zukünftigen Waldstrukturen je nach Behandlung, die Abschätzung der Verjüngungsdynamik (KINDERMANN *et al.* 2002, HASENAUER & KINDERMANN 2002) und der Wertentwicklung von Waldbeständen.

Bisher basierte das Modell (MOSES 2.0) auf den Baumarten Fichte, Kiefer und Buche. Kalibriert wurde das Modell damals

**Tabelle 2:** Mittlere Differenz zwischen geschätzten und gemessenen Durchmesserzuwachsen je Baumart und Periode.

N ist die Anzahl der BHD-Klassen, wobei eine Klasse jeweils einer Fünzentimeterstufe entspricht. Das Konfidenzintervall (CI,  $\alpha = 0,05$ ) gibt den mittleren Unterschied zwischen gemessenen Werten und Simulation an. Das Schätzintervall (PI,  $\alpha = 0,05$ ) ist die Variationsbreite der einzelnen Differenzen zwischen den gemessenen Werten und der Simulation. Das Toleranzintervall (TI,  $\gamma = 0,95$  und  $\alpha = 0,05$ ) gibt an, mit welchem Fehlerrahmen bei wiederholter Anwendung der Gleichung zu rechnen ist (REYNOLDS 1984).

Table 2: Mean difference between estimated and measured diameter increment according to species and period.

N is the number of dbh classes, whereby each class represents five centimetres. The confidence interval (CI,  $\alpha = 0,05$ ) represents the mean difference between measured values and simulated values. The estimation interval (PI,  $\alpha = 0,05$ ) is the range of variation of individual differences between measured values and simulated values. The tolerance interval (TI,  $\gamma = 0,95$  and  $\alpha = 0,05$ ) provides the probable error margin after repeated applications (REYNOLDS 1984).

Baumart	Periode	N	$\bar{id}_{\text{gesch.}}$ [cm]	$\bar{D}_i$ [cm]	$S_D$ [cm]	t-Wert	CI [cm]	PI [cm]	TI [cm]
Fichte	1	12	0,23	-0,0149	0,0745	2,18	-0,063 bis 0,032	-0,186 bis 0,156	-0,228 bis 0,198
	2	12	0,24	0,0048	0,0667	2,18	-0,038 bis 0,047	-0,148 bis 0,158	-0,186 bis 0,196
	3	12	0,23	0,0046	0,0831	2,18	-0,048 bis 0,057	-0,186 bis 0,195	-0,233 bis 0,242
Tanne	1	10	0,36	-0,0985	0,1622	2,22	-0,215 bis 0,018	-0,483 bis 0,286	-0,588 bis 0,391
	2	10	0,35	-0,0298	0,1751	2,22	-0,155 bis 0,095	-0,445 bis 0,386	-0,559 bis 0,499
	3	10	0,29	-0,1152	0,1834	2,22	-0,246 bis 0,016	-0,550 bis 0,320	-0,669 bis 0,439
Lärche	1	13	0,66	-0,0824	0,2821	2,16	-0,253 bis 0,088	-0,720 bis 0,556	-0,889 bis 0,724
	2	13	0,57	-0,095	0,3038	2,16	-0,279 bis 0,089	-0,782 bis 0,592	-0,964 bis 0,774
	3	13	0,53	-0,1479	0,2805	2,16	-0,317 bis 0,022	-0,782 bis 0,486	-0,950 bis 0,654
Arve	1	11	0,17	-0,0044	0,054	2,2	-0,041 bis 0,032	-0,130 bis 0,121	-0,168 bis 0,159
	2	11	0,15	-0,0187	0,0668	2,2	-0,064 bis 0,026	-0,174 bis 0,137	-0,221 bis 0,183
	3	11	0,16	-0,0081	0,0837	2,2	-0,064 bis 0,048	-0,203 bis 0,187	-0,261 bis 0,245
Buche	1	13	0,21	-0,1507	0,0842	2,16	-0,202 bis -0,099	-0,341 bis 0,040	-0,391 bis 0,090
	2	13	0,24	-0,0272	0,0881	2,16	-0,081 bis 0,026	-0,226 bis 0,172	-0,279 bis 0,225
	3	13	0,25	0,0157	0,0502	2,16	-0,015 bis 0,046	-0,098 bis 0,129	-0,128 bis 0,159
Eiche	1	7	0,35	0,06	0,1063	2,36	-0,038 bis 0,158	-0,218 bis 0,338	-0,307 bis 0,427
	2	7	0,12	-0,1998	0,1198	2,36	-0,311 bis -0,089	-0,513 bis 0,114	-0,613 bis 0,214
	3	7	0,39	0,0491	0,1419	2,36	-0,082 bis 0,181	-0,322 bis 0,420	-0,440 bis 0,539
Ahorn	1	6	0,27	-0,1296	0,2097	2,45	-0,349 bis 0,091	-0,712 bis 0,453	-0,910 bis 0,650
	2	6	0,26	-0,0945	0,1849	2,45	-0,289 bis 0,099	-0,608 bis 0,419	-0,782 bis 0,593
	3	6	0,51	-0,0433	0,1613	2,45	-0,213 bis 0,126	-0,491 bis 0,405	-0,643 bis 0,557
N	Anzahl der BHD-Klassen (5-cm-Stufen pro Klasse)						CI	Konfidenzintervall ( $\alpha = 0,05$ )	
$\bar{id}_{\text{gesch.}}$	mittlerer geschätzter jährlicher Durchmesserzuwachs						PI	Schätzintervall ( $\alpha = 0,05$ )	
$\bar{D}_i$	Mittlere Differenz						TI	Toleranzintervall ( $\gamma = 0,95$ und $\alpha = 0,05$ )	
$S_D$	Standardabweichung								

für Mischbestände bestehend aus Fichte und Kiefer sowie Fichte und Buche. Das Gleichungssystem beinhaltet ein Durchmesser-, Höhenzuwachs-, Kronenansatz- und Mortalitätsmodell. Damit liessen sich Funktionen wie Zielstärkennutzung, Pflanzen von Bäumen, Durchforstungen und Freistellungen, automatisierte Z-Stammsuche und die grafische Darstellung der Bestände berechnen.

Die neueste Version des Modells (MOSES 3.0) besteht im Wesentlichen aus denselben Gleichungssystemen. Neu hinzugekommen ist ein Verjüngungsmodul (KINDERMANN 2004) und ein Koordinatengenerierungsmodul (KITTENBERGER 2003). Weitere Neuerungen sind (1) die wesentlich erweiterte Datengrundlage (für die Kalibrierung standen 77 903 fünfjährige Beobachtungsperioden aus der Schweiz und Österreich zur Verfügung), (2) die Baumarten Tanne, Lärche, Arve und Eiche, sowie (3) technische Erleichterungen, die das Arbeiten von MOSES auf dem Betriebssystem Windows ermöglichen. Details können den Arbeiten von KITTENBERGER (2003), KINDERMANN (2004), STEINMETZ (2004) sowie HASENAUER (2005) entnommen werden. Die Koeffizienten für die jeweiligen Wachstumsfunktionen bzw. die Wachstumsfunktionen werden auf Anfrage zur Verfügung gestellt oder können der Demo-Software von MOSES 3.0 (HASENAUER 2005) entnommen werden.

### 3. Daten

Zur Validierung der Wachstumsfunktionen von MOSES 3.0 für Schweizer Verhältnisse standen insgesamt 71 595 Wachstumsperioden auf 56 Versuchsflächen, die nicht für die Koeffizien-

tenschätzungen verwendet wurden, zur Verfügung (siehe Tabelle 1). Die mittlere Höhe über Meer der Flächen beträgt 639 m und variiert von 385 m bis 1405 m. Das mittlere Alter der verfügbaren Bestände ist 119 Jahre, wobei die jüngsten Bestände 31 und die ältesten 220 Jahre alt sind. An allen Bäumen wurden der Brusthöhendurchmesser (BHD), die Baumhöhen (H) und die Kronenansatzhöhen (KA) wiederholt gemessen. Zusätzlich war von 37% aller Bäume die genaue Position im Bestand verfügbar. Für die Validierung wurden die fünfjährigen Durchmesser- und Höhenzuwächse simuliert und mit den jeweiligen Beobachtungen verglichen. Die Daten stammen aus den langfristigen Versuchen der Abteilung Waldwachstum an der WSL, dem Landesforstinventar sowie von Betriebsinventuren.

#### 3.1 Rekonstruktion fehlender Daten

Auf den Versuchsflächen wurden nicht immer alle Baumhöhen gemessen. Die fehlenden Baumhöhen wurden mittels Regression ergänzt, da für die Berechnung des Konkurrenzindex nach EK & MONSERUD (1974) Baumhöhen notwendig sind. Würden diese fehlenden Höhen nicht hergeleitet, so würde das Modell diese Bäume als «nicht vorhanden» oder als «Lücke» auffassen womit die Konkurrenzverhältnisse im Modell und damit auch die Durchmesser- und Höhenzuwächse systematisch falsch wären. Die fehlenden Höhenmessungen wurden je Baumart und Fläche durch Ausgleichskurven folgender Form ermittelt:

$$H = 1.3 + \exp [a_0 + (a_1/BHD)] \quad (1)$$

**Tabelle 3: Mittlere Differenz zwischen geschätzten und gemessenen Höhenzuwächsen je Baumart und Periode.**

*Table 3: Mean difference between estimated height increment according to species and period.*

Baumart	Periode	N	$\bar{ih}_{\text{gesch.}}$ [cm]	$\bar{D}_i$ [cm]	$S_D$ [cm]	t-Wert	CI [cm]	PI [cm]	TI [cm]
Fichte	1	13	0,29	0,1345	0,3113	2,16	-0,054 bis 0,323	-0,569 bis 0,838	-0,756 bis 1,025
	2	13	0,24	0,0341	0,075	2,16	-0,011 bis 0,079	-0,136 bis 0,204	-0,181 bis 0,249
	3	13	0,28	0,1097	0,0491	2,16	0,080 bis 0,139	-0,001 bis 0,221	-0,031 bis 0,250
Tanne	1	9	0,16	-0,1142	0,193	2,26	-0,231 bis 0,002	-0,551 bis 0,322	-0,666 bis 0,438
	2	9	0,18	-0,0542	0,0909	2,26	-0,109 bis 0,001	-0,260 bis 0,151	-0,314 bis 0,206
	3	9	0,18	-0,014	0,0998	2,26	-0,074 bis 0,046	-0,240 bis 0,212	-0,299 bis 0,271
Lärche	1	9	0,55	0,0205	0,4968	2,26	-0,361 bis 0,402	-1,187 bis 1,228	-1,534 bis 1,575
	2	9	0,84	0,2733	0,1647	2,26	0,147 bis 0,400	-0,127 bis 0,674	-0,242 bis 0,789
	3	9	0,53	0,0009	0,1458	2,26	-0,111 bis 0,113	-0,353 bis 0,355	-0,455 bis 0,457
Arve	1	4	0,14	0,5351	0,6644	2,77	-0,522 bis 1,592	-0,829 bis 2,899	-2,747 bis 3,817
	2	4	0,14	-0,0233	0,0296	2,77	-0,070 bis 0,024	-0,129 bis 0,082	-0,170 bis 0,123
	3	4	0,13	-0,039	0,0636	2,77	-0,140 bis 0,062	-0,265 bis 0,187	-0,353 bis 0,275
Buche	1	8	0,31	-0,2004	0,3529	2,3	-0,496 bis 0,095	-1,086 bis 0,685	-1,351 bis 0,950
	2	8	0,29	-0,0173	0,1164	2,3	-0,115 bis 0,080	-0,309 bis 0,275	-0,397 bis 0,362
	3	8	0,26	0,0148	0,1714	2,3	-0,129 bis 0,158	-0,415 bis 0,445	-0,544 bis 0,574
Eiche	1	4	0,92	0,1653	0,2337	2,77	-1,935 bis 2,266	-3,473 bis 3,803	-6,836 bis 6,435
	2	4	0,44	0,0092	0,0412	2,77	-0,362 bis 0,380	-0,633 bis 0,651	-2,206 bis 2,172
	3	4	0,27	-0,1251	0,0421	2,77	-0,503 bis 0,253	-0,780 bis 0,530	-3,208 bis 3,238
Ahorn	1	-	-	-	-	-	Keine statistischen Analysen durchgeführt		
	2	-	-	-	-	-			
	3	-	-	-	-	-			
N	Anzahl der BHD-Klassen (5-cm-Stufen pro Klasse)						CI	Konfidenzintervall ( $\alpha = 0,05$ )	
$\bar{ih}_{\text{gesch.}}$	mittlerer geschätzter jährlicher Höhenzuwachs						PI	Schätzintervall ( $\alpha = 0,05$ )	
$\bar{D}_i$	Mittlere Differenz						TI	Toleranzintervall ( $\gamma = 0,95$ und $\alpha = 0,05$ )	
$S_D$	Standardabweichung								

wobei H die Baumhöhe (m), und BHD der Brusthöhendurchmesser (cm) ist.

Für die Gegenüberstellung der simulierten und beobachteten Höhenzuwächse wurden aber nur jene Bäume verwendet, von denen gemessene Baumhöhen verfügbar waren (siehe *Tabelle 1*). Damit wird sichergestellt, dass mögliche Verzerrungen auf Grund einer heuristischen Herleitung fehlender Baumhöhen (siehe HASENAUER & MONSERUD 1997) keinen Einfluss auf die Validierungsergebnisse haben.

### 3.2 Koordinatengenerierung

Ein konzeptueller Unterschied heute üblicher Baummodelle besteht in der Verwendung eines abstandsabhängigen oder eines abstandsunabhängigen Konkurrenzindex. Bei abstandsunabhängigen Waldwachstumsmodellen wird für jede zu simulierende Fünfjahresperiode ein mittlerer Konkurrenzindex für alle Bäume berechnet (siehe Crown Competition Factor – CCF von KRAJICEK *et al.* 1961) unabhängig von der tatsächlichen Verteilung der Bäume auf der Fläche.

Im Gegensatz dazu werden bei abstandsabhängigen Baummodellen am Beginn einer Simulation die Baumpositionen definiert. Diese einmal definierten Baumpositionen bleiben dann im gesamten Simulationslauf unverändert. Damit ergibt sich für jeden Baum ein eigener Konkurrenzindex. Die Baumpositionen zum Zeitpunkt der Initialisierung stammen entweder aus Koordinatenmessungen oder können mittels Koordinatengenerierungsprogrammen ermittelt werden.

Bei abstandsabhängigen Wachstumsmodellen wie MOSES muss die Position aller Bäume durch die Angabe der Koordinaten festgelegt sein. Auf einigen der Schweizer Versuchsfelder fehlen die Koordinaten der Bäume. Solche fehlenden Daten können aus einfach zu bestimmenden Strukturdaten mit einem Bestandesgenerator erzeugt werden. Beispiele solcher Programme sind der Strukturgenerator STRUGEN

(PRETZSCH 1993, POMMERENING 2000), ein Gibbs-Prozess-Modell von DEGENHARDT (1998) sowie ein auf positionsabhängigen Strukturindizes beruhendes heuristisches Verfahren von LEWANDOWSKI & GADOW (1997).

Am Institut für Waldwachstumsforschung der Universität für Bodenkultur in Wien wurde für MOSES der Bestandesgenerator STANDGEN entwickelt (KITTENBERGER 2003). STANDGEN basiert auf Daten aus Österreich und der Schweiz und lässt sich auf beliebig viele Baumarten anwenden. Zudem können je nach Bestand oder Waldtyp drei verschiedene Methoden der Generierung von Bestandesmuster gewählt werden: (1) rein zufällig mittels Random-Verfahren (Poisson-Prozess), (2) das Layout-Verfahren, besonders geeignet für diverse Pflanzraster und (3) das Strukturverfahren, das auch Nachbarschaftsbeziehungen, wie diese insbesondere in Mischbeständen von Interesse sind, mitberücksichtigt (siehe KINDERMANN 2004). Zusätzlich lassen sich beliebige Lücken oder baumlose Zonen definieren, womit spezielle Waldbilder nachgebildet werden können. Auf den verfügbaren Versuchsfeldern wurden insgesamt rund 63% der Koordinaten mit dem Bestandesgenerator STANDGEN berechnet.

## 4. Ergebnisse

Grundsätzliche Idee der Entwicklung von Einzelbaummodellen ist die Berechnung des Wachstums jedes einzelnen Baumes im Bestand. Nur wenn dies gelingt, ist die gewünschte waldbauliche Flexibilität im Modell nachbildbar und damit ein Variantenstudium bzw. eine Analyse von bereits durchgeführten Waldbehandlungen möglich und sinnvoll. Basierend auf diesen Überlegungen werden im Folgenden die mittleren jährlichen Differenzen zwischen simulierten und gemessenen fünfjährigen Durchmesser- und Höhenzuwächsen in Abhängigkeit vom Brusthöhendurchmesser bzw. von der Baumhöhe analysiert. Es wird untersucht, ob bestimmte Trends bzw. systematische Fehler bei der Verwendung des Modells MOSES 3.0

für typische Schweizer Wuchsbedingungen zu erwarten sind.

Für den Vergleich von berechneten und gemessenen Zuwächsen werden nur jene fünfjährigen Perioden verwendet, von denen wiederholte Brusthöhendurchmesser- bzw. Höhenmessungen verfügbar waren. Die Perioden 1 bis 3 sind die letzten drei Aufnahmezeitpunkte auf den Versuchsflächen, wobei Periode 1 jeweils der ersten Aufnahme entspricht (siehe *Tabelle 1*). Die mittleren jährlichen Differenzen zwischen geschätzten und beobachteten Werten gemittelt für alle drei Perioden ergaben je Baumart folgende Ergebnisse:

- Differenz mittlerer jährlicher Durchmesserzuwächse: Fichte 0,031 cm/Jahr (Anzahl der Perioden  $n = 10\,539$ ); Tanne  $-0,034$  cm/Jahr ( $n = 5461$ ); Lärche 0,010 cm/Jahr ( $n = 10\,874$ ); Arve  $-0,003$  cm/Jahr ( $n = 2496$ ); Buche 0,014 cm ( $n = 32\,870$ ); Eiche 0,019 cm/Jahr ( $n = 8662$ ); Ahorn 0,096 cm/Jahr ( $n = 693$ );
- Differenz mittlerer jährlicher Höhenzuwächse: Fichte 0,088 m/Jahr ( $n = 393$ ); Tanne  $-0,068$  m/Jahr ( $n = 297$ ); Lärche 0,097 m/Jahr ( $n = 2934$ ); Arve 0,096 m/Jahr ( $n = 174$ ); Buche  $-0,045$  m ( $n = 330$ ); Eiche 0,050 m/Jahr ( $n = 846$ ); für Ahorn war die Anzahl der Beobachtungen mit nur vier Werten zu gering.

Als Nächstes war die Frage nach dem zu erwartenden Fehlerbereich und den Genauigkeitsangaben der Modellvorhersagen von Interesse. Zu diesem Zweck wurde das Konfidenz-, Vorhersage- und Toleranzintervall nach REYNOLDS (1984) je Baumart und Aufnahmeperiode ermittelt. Das Konfidenzintervall CI gibt die mittlere Variationsbreite der zu erwartenden Fehler der Modellsimulation an. Diese hängt von der gewünschten Sicherheit der Schätzung, dem Stichprobenumfang sowie der Standardabweichung ab und lässt sich wie folgt berechnen:

$$CI = \bar{D} \pm \frac{S_D}{\sqrt{n}} \cdot t_{1-\frac{\alpha}{2}, n-1} \quad (2)$$

wobei  $\bar{D}$  der Mittelwert der Differenzen ist,  $S_D$  die Standardabweichung,  $n$  die Anzahl der unabhängigen Beobachtungen und  $t_{1-\frac{\alpha}{2}, (n-1)}$  das  $1-\alpha/2$  Quantile der t-Verteilung mit  $n-1$  Freiheitsgraden.

Das Schätz- oder Vorhersageintervall PI kann als die Variationsbreite der Differenzen  $D_i$  von simulierten und gemessenen Durchmesser- und Höhenzuwächsen verstanden werden; es gibt mit einer bestimmten Sicherheit (z.B. 95% oder  $1-\alpha$ ) den Fehlerrahmen zukünftiger Schätzungen an.

$$PI = \bar{D} \pm S_D \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{n}} \cdot t_{1-\frac{\alpha}{2}, n-1} \quad (3)$$

Das Toleranzintervall TI beschreibt den Fehlerrahmen, innerhalb welchem bei wiederholten Modellsimulationen ein festgelegter Prozentsatz ( $1-\gamma$ ) der Fehler mit der Wahrscheinlichkeit von  $1-\alpha$  zu erwarten ist.

$$TI = \bar{D} \pm S_D \cdot g_{1-\gamma, N, 1-\alpha} \quad (4)$$

Sowohl t-Wert als auch der Toleranzfaktor  $g$  können statistischen Tabellen entnommen werden (KOKOSKA & NEVISIN 1989).

Für den Vergleich der Durchmesserzuwächse standen insgesamt 71 595 Periodenwerte zur Verfügung (*Tabelle 1*). Auf Grund der hohen Anzahl je Periode und Baumart wurde der gesamte Datensatz zunächst in BHD-Klassen zu je 5 cm Breite ( $< 5$  cm, 5 bis 10 cm, 10 bis 15 cm usw.) eingeteilt. Nach Berechnung der jeweiligen mittleren jährlichen Differenzen von geschätzten und beobachteten Zuwächsen wurden diese je

**Tabelle 4: Mittlerer BHD in cm zwischen 1950 und 2004 (Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung).**

Über alle Perioden waren keine signifikanten Unterschiede feststellbar.

*Table 4: Mean dbh in cm between 1950 and 2004 (mean  $\pm$  standard deviation).*

*No significant differences were ascertained for any period.*

Periode	Durchforstung		Plenterwald	
	gemessen	simuliert	gemessen	simuliert
0	6,1 ( $\pm 1,8$ )	6,1 ( $\pm 1,8$ )	16,9 ( $\pm 10,6$ )	16,9 ( $\pm 10,6$ )
1	7,3 ( $\pm 1,9$ )	7,6 ( $\pm 2,2$ )	18,6 ( $\pm 10,8$ )	19,5 ( $\pm 11,8$ )
2	9,2 ( $\pm 2,2$ )	9,3 ( $\pm 2,4$ )	20,0 ( $\pm 11,9$ )	21,0 ( $\pm 12,2$ )
3	10,7 ( $\pm 2,5$ )	10,5 ( $\pm 2,5$ )	21,3 ( $\pm 12,0$ )	22,3 ( $\pm 12,5$ )
4	12,3 ( $\pm 2,9$ )	11,7 ( $\pm 3,0$ )	22,2 ( $\pm 12,4$ )	23,4 ( $\pm 12,6$ )
5	14,0 ( $\pm 3,2$ )	13,3 ( $\pm 3,0$ )	23,8 ( $\pm 13,0$ )	25,1 ( $\pm 13,1$ )
6	15,6 ( $\pm 3,6$ )	14,4 ( $\pm 3,1$ )	25,1 ( $\pm 13,4$ )	26,6 ( $\pm 13,3$ )
7	17,3 ( $\pm 4,0$ )	16,1 ( $\pm 3,6$ )	25,6 ( $\pm 13,6$ )	27,5 ( $\pm 13,1$ )
8	18,9 ( $\pm 4,1$ )	17,1 ( $\pm 3,9$ )	27,4 ( $\pm 13,5$ )	29,5 ( $\pm 13,1$ )
9	20,3 ( $\pm 4,2$ )	18,8 ( $\pm 4,2$ )	29,7 ( $\pm 14,1$ )	31,6 ( $\pm 13,4$ )
10	21,7 ( $\pm 4,2$ )	20,3 ( $\pm 4,3$ )	31,2 ( $\pm 14,5$ )	33,1 ( $\pm 13,6$ )

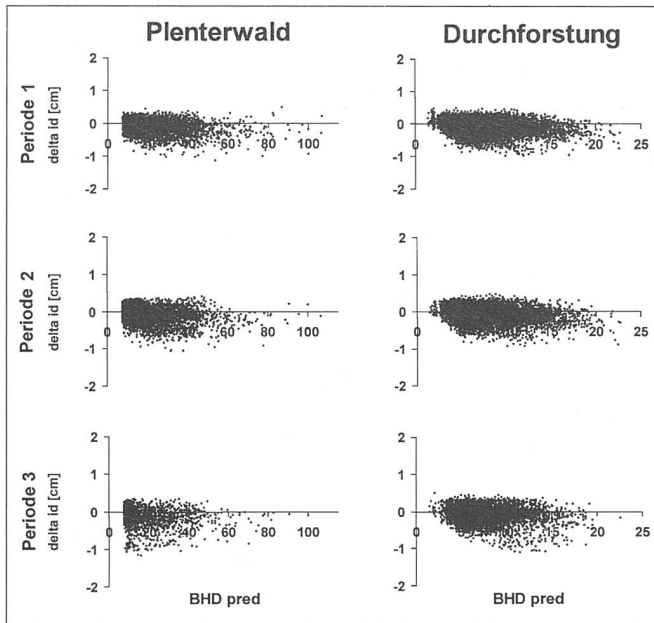
Baumart und Periode gemittelt und auf mögliche systematische Trends bzw. signifikante Abweichungen in den mittleren jährlichen Höhen- und Durchmesserzuwächsschätzungen getestet.

Diese Vorgangsweise hat den Vorteil, dass mögliche Trends im Verlauf des Baumwachstums besser überprüft werden können. Eine BHD-Klasse je Baumart beinhaltet jeweils alle Bäume einer 5-cm-Stufe. Mögliche Unterschiede auf Grund des Bestandesalters, der Dichte oder der Waldbehandlung sollten in den Modellschätzungen richtig nachgebildet sein. Ist dies nicht der Fall, kann es zu systematischen Schätzfehlern kommen. Die Ergebnisse der Konfidenz-, Vorhersage- und Toleranzintervalle für die mittleren jährlichen Durchmesserzuwächse je BHD-Stufe sind für die drei Perioden und analysierten Baumarten in *Tabelle 2* dargestellt.

Die gleiche Vorgangsweise, allerdings nur mit jenen Daten, für die wiederholte Höhenmessungen für einen Vergleich verfügbar waren (*Tabelle 1*), wurde auch für die Analyse der Höhenzuwächse durchgeführt. Die Ergebnisse sind aus *Tabelle 3* ersichtlich.

Die Angaben für die Baumart Fichte in der ersten Periode können für die Durchmesserzuwächse (*Tabelle 2*) wie folgt interpretiert werden: Mit 95% Wahrscheinlichkeit besteht keine systematische Abweichung in den Durchmesserzuwächsschätzungen, weil der Mittelwert der Schätzfehler zwischen  $-0,063$  cm und  $0,032$  cm liegt (siehe CI). Ebenfalls mit 95% Wahrscheinlichkeit liegen die Fehler zukünftiger Durchmesserzuwächsschätzungen zwischen  $-0,186$  cm und  $0,156$  cm (siehe PI), und bei wiederholter Anwendung der Gleichung liegen 95% der Fehler der Durchmesserzuwächsschätzungen in der ersten Periode zwischen  $-0,228$  cm und  $0,198$  cm (siehe TI).

Eine typische Anwendung von MOSES ist die Simulation unterschiedlich behandelte Bestände. Zu diesem Zweck wurden beispielhaft fünf Plenter- und fünfzehn übliche Durchforstungsbestände herangezogen. Die Plenterbestände bestehen aus den Baumarten Tanne, Fichte und Buche. Die durchforsteten Bestände sind in etwa gleichaltrige Mischbestände bestehend aus Fichte, Tanne, Buche, mit etwas Lärche und Kiefer, auf denen verschiedene Behandlungsstrategien durchgeführt wurden. Während bei den Plenterbeständen auch grosse Baumdimensionen vorkommen, beträgt der maximale BHD in den Durchforstungsbeständen 40 cm. Es handelt sich somit um jüngere Bestände. In der *Abbildung 1* werden die Differenzen der jährlichen Durchmesserzuwächse in Abhängigkeit von verschiedenen Behandlungsarten dargestellt.



**Abbildung 1: Vergleich von Plenter- und Durchforstungsbeständen.** Dargestellt ist die Differenz der Durchmesserzuwächse (id geschätzt mit MOSES minus id gemessen) in Abhängigkeit vom BHD für die Perioden 1 bis 3 (1 Periode = 5 Jahre).

**Figure 1: Comparison of a selection forest and thinned stands.** Illustration of the difference of diameter increment (id estimated with MOSES minus measured id) in dependence of dbh for periods 1 to 3 (1 period = 5 years).

Um mögliche Trends in Abhängigkeit von der Höhe über Meer analysieren zu können, wurde das Datenmaterial in verschiedene Höhenstufen eingeteilt, wobei die Gruppe «Tieflagen» alle Bestände bis 600 m ü.M., die «mittleren Lagen» alle Bestände zwischen 600 und 1400 m ü.M. sowie die «Hochlagen» alle Bestände über 1400 m ü.M. umfasst. Bei den Hochlagen standen insgesamt nur sieben Bestände zur Verfügung. Eine Trendanalyse der Differenzen (simuliert minus gemessener Zuwächse) in Abhängigkeit vom BHD ergab in allen Höhenstufen über Meer und für alle Perioden ein  $R^2 < 0,02$ . Einzige Ausnahmen bildeten die Perioden 2 und 3 in der Gruppe der Tieflagen, wo mit zunehmenden BHD eine Unterschätzung der BHD zu erwarten ist ( $R^2 = 0,04$  bzw.  $0,05$ ).

Abschliessend werden Langzeitsimulationen von zwei Versuchsflächen für die letzten zehn Wachstumsperioden (50 Jahre) dargestellt. Bei der ersten Fläche handelt es sich um einen 116-jährigen Durchforstungsbestand aus der Gemeinde Bowil (19 852 m<sup>2</sup>) mit den Baumarten Fichte, Buche und Esche (Höhenlage 570 m ü.M.). Der zweite Bestand ist ein Plenterbestand aus Biel (20 000 m<sup>2</sup>) mit den Baumarten Fichte, Tanne und Buche (Höhenlage 861 m ü.M.).

Bei beiden Beständen wurde jede einzelne Entnahme von Bäumen (Durchforstung oder Mortalität) über 50 Jahre (zehn Perioden) simuliert. Die Bestände wurden jeweils im Jahre 1950 in MOSES eingelesen. Die Periode Null entspricht somit der Aufnahme 1950. Anschliessend wurden die Bestände mit den tatsächlichen Werten verglichen (Abbildung 2). Statistische Analysen dieser Zeitreihen oder Langzeitsimulationen wurden mit einer Repeated Measurement ANOVA durchgeführt. Dabei werden die Unterschiede zwischen den gemessenen und den simulierten Werten innerhalb den zehn Wachstumsperioden untersucht. Der Vorteil dieser Vorgangsweise ist, dass Fehler, die in einer der vorangegangenen Wachstumsperioden aufgetreten sind, für die Simulation der nächsten Periode wirksam werden. Dies entspricht der typischen Anwendung des Modells für konkrete Vorhersagen. Signifikante Unterschiede konnten für die zehn Wachstumsperioden

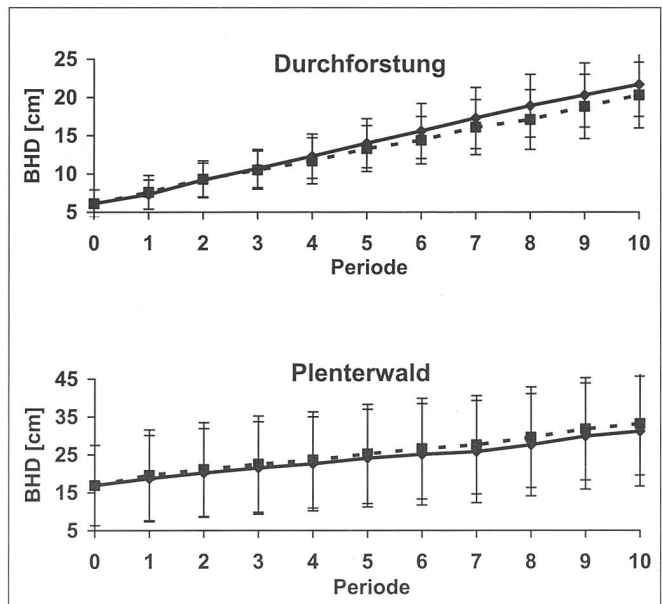
nicht festgestellt werden. Zum genauen Wachstumsvergleich sind in der *Tabelle 4* die mittleren BHD über alle Wachstumsperioden dargestellt.

## 5. Diskussion und Schlussfolgerungen

Die Validierung von MOSES 3.0 hat gezeigt, dass das Modell das Wachstum verschiedenster Waldbestände in der Schweiz hinreichend genau nachbilden kann. In den *Tabellen 2* und *3* bzw. den *Abbildungen 1* und *2* wurde das Wachstum der Bestände nach den Gesichtspunkten Baumart, Bestandestyp und Höhenlage über mehrere Wachstumsperioden analysiert bzw. mit den beobachteten Werten verglichen. Die Differenz zwischen den simulierten und gemessenen jährlichen Durchmesserzuwächsen schwankt je nach Baumart zwischen  $-0,045$  cm/Jahr (Buche) und  $0,050$  cm/Jahr (Eiche) und beträgt im Durchschnitt für alle 71 595 Periodenwerte  $-0,05$  cm ( $\pm 0,14$ ) für die Durchmesserzuwächse. Für die insgesamt 4978 untersuchten Höhenzuwächse mit wiederholten Höhenmessungen beträgt die mittlere jährliche Differenz  $0,04$  m ( $\pm 0,2$ ). Für die je 5-cm-BHD-Stufe eingeteilten Werte ergaben sich keine signifikanten Unterschiede (siehe *Tabelle 2* und *3*). Nur für die erste Periode der Buche und die zweite Periode der Eiche waren signifikante ( $\alpha = 0,05$ ) Unterschätzungen feststellbar.

Die Simulation von zehn Wachstumsperioden (50 Jahre) ergab für die beiden untersuchten Bestände keine signifikante Abweichung zwischen simulierten und gemessenen Durchmesserzuwächsen (Abbildung 2). Die statistischen Analysen dieser Simulation wurden mit einer Repeated Measurement ANOVA durchgeführt, damit wurde das Fehlerfortpflanzungsgesetz über alle Wachstumsperioden in die Analyse mit einbezogen.

Bei der Validierung eines Modells ergibt sich das grundsätzliche Problem, dass für Tests über längere Zeitspannen oder ganzen Umtriebszeiten nur selten geeignete Dauerbeobachtungsflächen zur Verfügung stehen. Zudem besteht



**Abbildung 2: Mittlerer BHD in cm zwischen 1950 und 2004 (Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung) für zwei Bestände.**

Die Unterschiede zwischen den gemessenen und den simulierten Werten sind nicht signifikant.

— gemessene Werte, *measured values*  
 - - - - - simulierte Werte, *simulated values*

**Figure 2: Mean dbh in cm between 1950 and 2004 (mean  $\pm$  standard deviation) for two stands.**

Differences between measured values and simulated values are not significant.

auch beim tatsächlichen Wachstum eines Bestandes eine Variation. Könnte man einen Bestand unter gleichen Bedingungen wiederholt wachsen lassen, würde sich dieser zwar ähnlich, aber nicht gleich entwickeln.

Mit dem Datenmaterial das für diese Arbeit zur Verfügung stand, war eine gute Grundlage gegeben, um das Wachstumsmodell MOSES für Schweizer Verhältnisse zu validieren. Der verwendete Datensatz setzte sich aus Beständen mit einer grossen Variationsbreite hinsichtlich Dichte, Alter, Mischung, Waldtyp, Bonität, Behandlungsstrategie und Höhenstufe zusammen. Obwohl die neue Version MOSES 3.0 auf einer breiten und soliden Datenbasis beruht, fehlen Daten von Bäumen, die unter Extrembedingungen gewachsen sind. Im Idealfall sollten die Daten ähnlich einer Matrix für die Modellerstellung alle möglichen Fälle von Baumartenzusammensetzung, Standort usw. abdecken. Auch wenn Extrembedingungen im Durchschnitt nur sehr selten vorkommen und in der praktischen Waldbehandlung wohl als unrealistisch gelten, liegt ihre Bedeutung in der Abgrenzung der möglichen Wachstumsreaktionen und den daraus ableitbaren Verallgemeinerungen (HASENAUER 2004).

Neben einer möglichst grossen Bandbreite an Wachstumsreaktionen sind auch möglichst lange Datenreihen, die im besten Fall die gesamte Umtriebszeit eines Bestandes abdecken, von Interesse. In der Schweiz wurden einige Bestände seit über hundert Jahren regelmässig gemessen. Solch wiederholte Aufnahmen in möglichst regelmässigen Abständen sind für eine Parametrisierung notwendig (KLEISTER 1972, KLEISTER & TIDWELL 1973). Nur wenn häufigere Wiederholungsmessungen am gleichen Bestand vorliegen, lassen sich kurzfristige externe Einflüsse ausgleichen bzw. als Erklärungswert für mögliche Modelleinflüsse heranziehen. Ebenso sollten die Aufnahmeperioden der verschiedenen Bestände aus versetzten Aufnahmezyklen stammen, um somit einen geringeren Einfluss von möglichen Extremwerten (Trockenjahre, Frost usw.) auf das Datenmaterial zu erzielen.

Auf den Schweizer Flächen wurden die Koordinaten der einzelnen Bäume nur teilweise bestimmt. Während bei der Validierung die fehlenden Koordinaten mit dem Bestandesgenerator STANDGEN (KITTENBERGER 2003) berechnet worden sind, wurden bei der Parametrisierung der Wachstumsfunktionen nur Flächen verwendet, auf denen die Koordinaten erhoben wurden. Somit konnte auch getestet werden, wie exakt der Baumgenerator STANDGEN die Realität nachbilden kann, da mögliche systematische Fehler in der Koordinatengenerierung zu fehlerhaften Konkurrenzindizes führen und in weiterer Folge auch zu systematischen Fehlern in den Zuwachsschätzungen. Da in der Praxis die Baumkoordinaten üblicherweise fehlen, ist eine möglichst realistische Nachbildung von Bestandesmustern wichtig, wie sie für eine richtige Abschätzung der konkurrenzabhängigen Zuwachsschätzung notwendig ist. Nachdem keine systematischen Fehlschätzungen auftraten, hat STANDGEN die Bestandessituationen hinreichend genau rekonstruiert.

## Zusammenfassung

Nach der Neuparametrisierung des Waldwachstumsmodells MOSES 3.0 (MOdeling Stand rESponse) mit Daten aus Österreich und der Schweiz wurde das Modell mit einem unabhängigen Datensatz, der nicht für die Parametrisierung verwendet wurde, validiert. Allgemeines Ziel der Studie war es, die Anwendung dieses abstandsabhängigen Wachstumsmodells am Beispiel von 71 595 fünfjährigen Zuwächsen aus Schweizer Wäldern zu überprüfen, um eine mögliche Alternative zu her-

kömmlichen Ertragstafeln anbieten zu können. Die Ergebnisse kurz zusammengefasst: Das Modell kann das Baumwachstum verschiedenster Waldbestände in der Schweiz hinreichend genau nachbilden. Einzig bei den Durchmesserzuwachsmustern der Buche in der ersten Periode bzw. bei Eiche in der zweiten Periode traten Unterschätzungen gegenüber den Beobachtungen auf. Ein Vergleich von simulierten mit beobachteten Werten am Beispiel ausgewählter Bestände ergab für einen Zeitraum von 50 Jahren keine Abweichungen.

## Résumé

### Validation du modèle de croissance MOSES pour les forêts suisses

Le reparamétrage du simulateur de croissance MOSES 3.0 (MOdeling Stand rESponse) avec des données provenant d'Autriche et de Suisse a nécessité la validation du modèle à l'aide de données neutres. L'objectif général de l'étude consistait à vérifier l'application du modèle de croissance sur 71 595 périodes quinquennales d'accroissement provenant de forêts suisses, afin de trouver une solution de rechange aux tables de production traditionnelles. En voici brièvement les résultats: le modèle permet de reproduire avec une précision suffisante la croissance des arbres de n'importe quel peuplement forestier de Suisse. Des sous-estimations par rapport aux observations n'ont été constatées que pour les modèles d'accroissement en diamètre concernant le hêtre au cours de la première période et le chêne au cours de la deuxième période. Une comparaison entre les valeurs simulées et les valeurs observées dans une série de peuplements sélectionnés n'a pas donné de différences significatives sur une durée de cinquante ans.

Traduction: CLAUDE GASSMANN

## Summary

### Validating the tree growth model MOSES for Swiss Forests

The purpose of this study was to validate the newly parameterized tree growth model MOSES 3.0 (Modeling Stand rESponse) using 71 595 five-year growth periods from Swiss forests, not used for model calibration. We were specifically interested in testing the applicability of MOSES for a wide variety of Swiss forests in order to provide a potential alternative to the commonly used yield tables. The main results of the study can be summarized as follows. The model is suitable to predict tree growth for various stands and/or silvicultural management conditions. The only exceptions that did not match up to observations are the diameter increment models for beech and oak, where results underestimated the first period for the former and the second period for the latter. A 50-year simulation run for selected forests revealed no significant differences between predicted and observed diameter increment rates.

## Literatur

- BADOUX, E. 1983: Ertragstafeln für die Fichte in der Schweiz. Eidgenössische Anstalt für das forstliche Versuchswesen (EAFV), Birmensdorf, 3. Auflage (desgleichen für Tanne, Lärche und Buche).
- DEGENHARDT, A. 1998: Simulation von Baumverteilungsmustern in Mischbeständen. Beitr. Forstwirtsch. Landsch.ökol. 32, 3: 130–133.

- EK, A.R.; MONSERUD, R.A. 1974: FOREST. A computer model for simulating the growth and reproduction of mixed species stands. Univ. of Wisconsin, College of Agriculture and Life Science. Res. Rep. R2635. 90 S.
- FILLA, K. 1981: Die Parametrisierung von Einzelstammwuchsmodellen über die bei der Forstinventur erhobenen Daten. Diss. Univ. f. Bodenkultur, Wien. 82 S.
- HALLENBARTER, D.; HASENAUER, H. 2003: Durchforstungen in Fichtenbeständen: Eine Analyse mit Hilfe des Waldwachstumsmodells MOSES. Cent.bl. ges. Forstwes. 120, 3–4: 211–229.
- HASENAUER, H. 1994: Ein Einzelbaumwachstumssimulator für ungleichaltrige Fichten-Kiefern- und Buchen-Fichtenmischbestände. Forstl. Schriftenreihe, Univ. f. Bodenkultur, Wien. Österr. Ges. f. Waldökosystemforschung und experimentelle Baumforschung. Band 8. 152 S.
- HASENAUER, H. 1997: Dimensional relationships of open-grown trees in Austria. For. Ecol. Manage. 96: 197–206.
- HASENAUER, H.; MONSERUD, R.A. 1997: Biased predictions for tree height increment models developed from smoothed data. Ecological Modelling 98: 13–22.
- HASENAUER, H. 2000: Die simultanen Eigenschaften von Waldwachstumsmodellen. Verlag Paul Parey, Berlin. 131 S.
- HASENAUER, H. 2004: Waldwachstumsmodelle als Grundlage einer nachhaltigen Waldwirtschaft. In: Waldwachstumsmodelle für Prognosen in der Forsteinrichtung. Stand der Wissenschaft in Mitteleuropa. Berichte Freiburger Forstliche Forschung 50: 15–31.
- HASENAUER, H.; BURGMANN, M.; LEXER, M.J. 2000: Konzepte der Waldökosystemmodellierung. Cent.bl. gesamt. Forstwes. 117: 137–164.
- HASENAUER, H.; KINDERMANN, G. 2002: Methods for assessing regeneration establishment and height growth in uneven-aged mixed species stands. Journal of Forestry 75, 4: 385–394.
- HASENAUER, H. 2005: Growth Models for Forest Management in Europe. Springer Verlag, Berlin (im Druck).
- KINDERMANN, G. 2004: Wachstumssimulation in Mischbeständen. Diss. Univ. f. Bodenkultur, Wien. 146 S.
- KINDERMANN, G.; HASENAUER, H.; GASCH, J. 2002: Ankommen und Wachstum von Naturverjüngung in Mischbeständen. Cent.bl. gesamt. Forstwes. 119, 2: 159–186.
- KITTENBERGER, A. 2003: Generieren von Baumverteilungsmustern. Diplomarbeit am Institut für Waldwachstumsforschung der Universität für Bodenkultur, Wien. 79 S.
- KLEISTER, T.D. 1972: Predicting individual tree mortality in simulated southern pine plantations. Forest Science 18: 213–217.
- KLEISTER, T.D.; TIDWELL, G.R. 1973: Competition ratio dynamics for improved mortality estimates in simulated growth for forest stands. Forest Science 21: 46–51.
- KOKOSKA, S.; NEVISON, C. 1989: Statistical tables. Springer Verlag, New York. 88 S.
- KRAJICEK, J.E.; BRINKMAN, K.A.; GINGRICH, S.F. 1961: Crown Competition: A measure of density. Forest Science 7: 35–42.
- LEWANDOWSKI, A.; GADOW VON, K. 1997: Ein heuristischer Ansatz zur Reproduktion von Waldbeständen. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung 168: 170–174.
- MONSERUD, R.A. 1975: Methodology for simulating Wisconsin northern hardwood stand dynamics. Ph.D. Thesis, Univ. of Wisconsin, Madison. 156 S.
- NAGEL, J. 1995: BWERT: Programm zur Bestandesbewertung und zur Prognose der Bestandesbehandlung. Deutscher Verband Forstl. Forschungsanstalten – Sektion Ertragskunde. Eberswalde, Berlin: 184–198.
- NAGEL, J.; ALBERT, M.; SCHMIDT, M. 2002: Das waldbauliche Prognose- und Entscheidungsmodell BWINPro 6.1. Forst und Holz 57, 15–16: 486–493.
- NEWHAM, R.M. 1964: The development of a stand model for Douglas-fir. Ph.D. Thesis, Univ. of British Columbia, Vancouver. 201 S.
- POMMERENING, A. 2000: Approaches to quantifying forest structures. Forestry 75, 3: 305–324.
- PRETZSCH, H. 1992: Konzeption und Konstruktion von Wuchsmodellen für Rein- und Mischbestände, Forstliche Forschungsberichte München 115: 358 S.
- PRETZSCH, H. 1993: Analyse und Reproduktion räumlicher Bestandesstrukturen. Versuche mit dem Strukturgenerator STRUGEN. Schriften aus der Forstl. Fakultät der Universität Göttingen 114: 87 S.
- PRETZSCH, H. 2001: Modellierung des Waldwachstums. Paul Parey, Berlin. 357 S.
- REYNOLDS, M.R. 1984: Estimating the error in model predictions. Forest Science 30: 454–469.
- STAGE, A.R. 1973: Prognosis model for stand development. USDA For. Serv. Res. Pap., INT-137: 32 S.
- STEINMETZ, P. 2004: Implementierung des Waldwachstumsmodells MOSES 3.0. Diplomarbeit am Institut für Waldwachstumsforschung der Universität für Bodenkultur, Wien. 76 S.
- STERBA, H. 1983: Single stem models from inventory data with temporary plots. Mitt. d. Forstlichen Bundesversuchsanstalt Wien 147: 87–101.
- STERBA, H.; MOSER, M.; HASENAUER, H.; MONSERUD, R.A. 1995: PROGNAUS ein abstandsunabhängiger Waldwachstumssimulator für ungleichaltrige Mischbestände. Deutscher Verband Forstl. Forschungsanstalten – Sektion Ertragskunde. Eberswalde, Berlin: 173–183.
- WYKOFF, W.R.; CROOKSTON, N.L.; STAGE, A.R. 1982: User's Guide to the Stand Prognosis Model. USDA For. Serv. GTR INT-133. 112 S.
- ZINGG, A. 2001: Waldbewirtschaftung: Umgang mit der Vergangenheit – für die Zukunft. Schweiz. Z. Forstwes. 152, 5: 177–182.

#### Dank

Die Daten aus der Schweiz stellte uns die Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, WSL, Forschungsgruppe Waldentwicklung zur Verfügung. Unser Dank gilt den Mitarbeitern für die jahrelange Betreuung der ertragskundlichen Versuchsflächen, ohne deren Arbeit diese Studie nicht möglich gewesen wäre. Dank gebührt auch dem Schweizerischen Nationalfonds (SNF) und der WSL, welche ein Stipendium für diese Arbeiten an der Universität für Bodenkultur in Wien gewährt haben, sowie dem Institut für Waldwachstumsforschung für die herzliche Aufnahme im Projekt ITM (Implementing Tree Growth Models as Forest Management Tools). Unser besonderer Dank gilt Dr. Georg Kindermann für die Datenaufbereitung.

#### Autoren

Dr. DIONYS HALLENBARTER, dipl. Forsting. ETH, Institut für Waldwachstumsforschung, Universität für Bodenkultur, Peter Jordan Strasse 82, AT-1190 Wien.  
Prof. Dr. HUBERT HASENAUER, Institut für Waldwachstumsforschung, Universität für Bodenkultur, Peter Jordan Strasse 82, AT-1190 Wien.  
ANDREAS ZINGG, dipl. Forsting. ETH, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, CH-8903 Birmensdorf.