

Untersuchung der Durchmesserzuwächse natürlicher Buchenverjüngungen

(Mit 4 Abbildungen und 11 Tabellen)

Von N. TREMER¹⁾, J. HANSEN²⁾ und K. v. GADOW¹⁾

(Angenommen Dezember 2006)

SCHLAGWORTER – KEY WORDS

Fagus sylvatica; *Buche*; *Naturverjüngung*; *Durchmesser-Wuchsmodell*.

Fagus sylvatica; *Beech*; *natural regeneration*; *diameter growth model*.

1. EINLEITUNG

Ein wesentliches Merkmal der klassischen Forstwirtschaft ist die Vorgabe allgemein verbindlicher waldbaulicher Richtlinien. Zu den oftmals großflächig festgesetzten Vorgaben gehören Waldbausysteme mit eindeutig definierten Eingriffsfolgen. Die Bestandesentwicklung soll für den Zeitraum von der Begründung bis zur Ernte innerhalb vorhersehbarer Grenzen gesteuert werden. Solche relativ eindeutigen Vorgaben lieferten bisher die wesentliche Voraussetzung für eine ordnungsgemäße und nachhaltige Waldnutzung. In der verbindlichen Vorgabe einheitlicher waldbaulicher Zielvorstellungen äußert sich der Ordnungswille des Menschen. Dieses Ordnungsprinzip wird jedoch in Frage gestellt, wenn sich, wie die Erfahrung zeigt, die waldbaulichen Zielsetzungen in Reaktion auf ökonomische und politische Entwicklungen wiederholt ändern. Daher sind die unterschiedlichen Vorstellungen bezüglich einer optimalen Gestaltung der mittel- und langfristigen Waldentwicklung nicht *a priori* als „richtig“ oder „falsch“ einstuftbar. Der auf solchen Überlegungen basierende, von Köstler und Leibundgut geprägte Begriff des „freien Stils“ im Waldbau impliziert das Zulassen vieler Lösungen, d.h. eine Erweiterung des forstlichen Handlungsraumes.

Durch die räumliche Gliederung der Wälder wird sowohl die Zustandserfassung als auch die Vielfachnutzung erheblich erschwert. Da aber forstliche Maßnahmen immer auf der Ebene des Einzelbestandes ansetzen, können nur räumlich definierte Informationen zu deren Optimierung beitragen. Aus dieser Erkenntnis ergibt sich schließlich die Motivation für die vorliegende Untersuchung unter dem Leitthema der bestandesbezogenen Generierung von waldbaulichen Handlungspfaden, als Grundlage für die Bewertung unterschiedlicher Formen der Waldnutzung auf Landschaftsebene. Ganz konkret ergeben sich daher für die Forsteinrichtung aufgrund der sich ständig ändernden Bedingungen von Wirtschaft, Politik und Umwelt neue Aufgaben, welche nur mit Hilfe geeigneter Managementmodelle und einer neuen Planungstheorie gelöst werden können, die bestimmten realen Anforderungen gerecht wird (GADOW, 2005, 2006; HINRICHS, 2006). Strukturreiche Wälder, die durch ungleichaltrige und gemischte Bestände definiert sind, werden immer häufiger zum Ziel der waldbaulichen Planung. Diese beinhaltet unter anderem eine selektive Nutzung einzelner Bäume und die gezielte Verwendung der natürlichen Verjüngung, um homogene Bestandesstrukturen in strukturreiche, naturnahe Wirtschaftswälder zu überführen (NIEDERSÄCHSISCHE LANDESREGIERUNG, 1992; BIERMAYER, 1999; BROSINGER und ROTHE, 2002). Die notwendige Beurteilung alternativer Eingriffsfolgen bzw. „Managementpfade“ muss in vielen Fällen Komponenten zur Verjüngungssimulation beinhalten. Nur so können die Auswirkungen unterschiedlicher Behandlungskonzepte umfassend und langfristig

abgeschätzt werden. In einigen der in Deutschland verwendeten Waldwachstumssimulatoren wurden bereits Verjüngungs- und Einwuchsmodelle implementiert (NAGEL et al., 2006; PRETZSCH et al., 2002; HERLING, 2005). Die Entwicklungsprognose der natürlichen Waldverjüngung ist nicht nur ein sehr wichtiges, sondern auch ein besonders anspruchsvolles Forschungsfeld mit zahlreichen offenen Fragestellungen (HASENAUER et al., 2000).

Die vorliegende Fallstudie befasst sich mit einem Aspekt des Wachstums der natürlichen Buchenverjüngung. Definitionsgemäß liegt die Grenze zwischen Verjüngung und Altbestand in Niedersachsen bei einem Brusthöhendurchmesser (BHD) von 7 cm. Bäume mit einem BHD ≥ 7 cm werden dem Altbestand zugeordnet. Aus diesem Grund erscheint es sinnvoll, statt des üblicherweise untersuchten Höhenzuwachses (HERLING, 2005), den Durchmesserzuwachs der Verjüngungspflanzen zu modellieren, um somit den periodischen Einwuchs in den Altbestand prognostizieren zu können.

Empirische, zumeist regressionsanalytische Ansätze zur Beschreibung von Verjüngungsprozessen wie Ansamung, Keimung, Etablierung, Wachstum (und Einwuchs in den Altbestand) sowie Mortalität basieren auf Daten, die aus großräumigen Verjüngungsinventuren stammen oder aus Versuchsflächen, die für spezielle Fragestellungen angelegt wurden. Beispiele hierfür bieten die Arbeiten von FERGUSON et al. (1986), PUKKALA u. KOLSTRÖM (1992), FERGUSON u. CARLSON (1993), FERGUSON (1996), GOLSER u. HASENAUER (1997), WAGNER (1997), SCHWEIGER u. STERBA (1997), HASENAUER et al. (2000), KINDERMANN et al. (2002), LEDERMANN (2002), HERLING (2005) sowie TREMER et al. (2005).

Statistischen Regressionsmodelle zielen in erster Linie auf eine möglichst genaue Reproduktion der Beobachtungsmuster und weniger auf eine Kausalanalyse der Zusammenhänge ab. Die Abbildung von Erklärungsmustern wird dagegen durch Prozessmodelle, oder im Fall der Beschreibung von Langzeitdynamiken durch Kleinflächen-Modelle, geleistet. Ein wesentlicher Vorteil guter empirischer Modelle gegenüber prozessorientierten Ansätzen liegt in einer hohen Genauigkeit innerhalb des Parametrisierungsbereiches. Außerhalb des durch die Parametrisierungsdaten abgedeckten Bereiches können ökophysiologische Prozessmodelle qualitativ wertvolle Erkenntnisse liefern. Mit Hilfe von Prozessmodellen können ökophysiologische Grundprozesse abgebildet werden, was die Untersuchung sowie das Verständnis von Prozessen und der sie bestimmenden Bedingungen wie beispielsweise die Auswirkungen von bestimmten Strahlungs-, Temperatur- und Wasserhaushaltsbedingungen auf die physiologische Leistung von Pflanzen ermöglicht (BOSSEL, 1996; MÄKELÄ et al., 2000; HAUHS et al., 2001; LANDSBERG et al., 2003). Die hohe Sensitivität gegenüber einer Vielzahl von Eingangsvariablen, die teilweise nur über Annahmen bestimmt werden können, sowie die Komplexität der Systeme erschweren jedoch die quantitativ exakte Reproduktion beobachteter Datenstrukturen und damit den Einsatz in Managementmodellen der Forsteinrichtung.

Die Verwendung von Inventurdaten als Parametrisierungsgrundlage für statistische Ansätze bietet einige Vorteile. Zum einen steht damit eine extrem umfangreiche sich ständig erweiternde Datenbasis zur Verfügung, die zukünftig auch eine lokale Kalibrierung der Modelle zulassen wird. Zusätzlich ergibt sich der Vorteil, dass

¹⁾ Universität Göttingen, Burckhardt-Institut, Abt. Waldinventur und Fernerkundung, ehemals Institut für Waldinventur und Waldwachstum.

²⁾ Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (NW-FVA) Göttingen.

die Datenstrukturen in der Parametrisierungsgrundlage mit denen der Initialisierungsgrundlage von Wachstumssimulatoren übereinstimmen, wenn zum Beispiel waldbauliche Szenarien auf der Basis von Betriebsinventuren berechnet werden.

Vor diesem Hintergrund wurde exemplarisch für die Baumart Buche ein empirisches Modell zur Prognose des mittleren jährlichen Wurzelhalsdurchmesserzuwachses innerhalb einer 5-jährigen Wachstumsperiode hergeleitet. Ausschließlich solche Variablen wurden verwendet, die in der niedersächsischen Betriebsinventur routinemäßig erhoben werden. Dieser Beitrag beschreibt die Ergebnisse der Untersuchung.

2. DATENGRUNDLAGE

Als Datengrundlage wird die Erstaufnahme einer im Jahr 1999 im niedersächsischen Forstamt Grünenplan durchgeführten Betriebsinventur verwendet. Das Forstamt Grünenplan ist dem Wuchsbezirk „Unteres Weser-Leine-Bergland“ zugeordnet, welcher im Wuchsgebiet Weserbergland liegt. Die verwendeten Inventurpunkte befinden sich in den Teilwuchsgebieten Ith-Hils-Bergland und Hils-Hochlagen. Es kommen Höhenlagen von 150–480 m vor, wobei die aufgenommenen Untersuchungsflächen im Mittel in einer Höhe etwa 280 m ü. NN liegen. Die klimatischen Kennwerte entsprechen im Wesentlichen denen des Wuchsbezirkes Unteres Weserbergland. Die durchschnittliche mittlere Jahrestemperatur liegt bei 8,2°C. Die mittlere jährliche Niederschlagsmenge liegt bei 800 mm, wovon durchschnittlich 380 mm in der forstlichen Vegetationszeit fallen (NIEDERSÄCHSISCHES FORSTPLANUNGSAMT, 2000). Das Ith-Hils-Gebiet stellt eine typische Schichtrippenlandschaft dar, in der es eine hohe Vielfalt an geologischen Schichtfolgen gibt. Aus diesen vielfältigen Ausgangsgesteinen ergibt sich eine ebenfalls sehr abwechslungsreiche Pedogenese. *Tabelle 1* zeigt die Anteile der nach dem Schätzrahmen der Standortskartierung des niedersächsischen Forstplanungsamtes ausgewiesenen Nährstoffversorgungsklassen in der Datengrundlage (NIEDERSÄCHSISCHES FORSTPLANUNGSAMT, 2004). Die Böden der aufgenommenen Probestellen sind zu 85% als ziemlich gut bis gut nährstoffversorgt angesprochen worden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden 189 der im Jahr 1999 erstmals aufgenommenen Probestellen erneut nach dem Inventurverfahren der Niedersächsischen Landesforstverwaltung aufgenommen (BÖCKMANN et al., 1998). Die Aufnahme auf konzentrischen Kreisen umfasst unter anderem allgemeine Angaben zum Stichprobenpunkt wie Gauß-Krüger-Koordinaten, die Hangneigung, die Seehöhe über NN, den Bestandestyp und Bodenzustand (Nährstoffversorgung, Wasserhaushalt), Einzelbauminformationen auf Altbestandsebene wie Polarkoordinaten der Baumfußpunkte, BHD, Baumart, -alter und -höhe, sowie Verjüngungsinformationen in Form von Anzahlen an Verjüngungspflanzen je vorkommender Art-Höhenklassen-Kombination, mittleres Alter je vorkommender Art-Höhenklassen-Kombination, der Entstehung, Konkurrenz durch Bodenvegetation, sowie dem Verbiss. Bei eventuell vorkommenden unterschiedlichen Altern innerhalb einer Höhenklasse wird das Alter der Verjüngung als nach Anzahl gewogenes Mittel geschätzt (NIEDERSÄCHSISCHES FORSTPLANUNGSAMT, 2001).

Bei der Auswahl der Probestellen erfolgte eine Beschränkung auf Buchen- und Buchenmischbestände (vgl. *Tab. 2*).

Die Beschränkung der Aufnahme auf Buchen- und Buchenmischbestände spiegelt sich auch in der Verteilung der Grundflächenanteile nach Arten im Altbestand wider (*Tab. 3*). Die Buche weist zu den beiden Aufnahmezeitpunkten 1999 und 2004 mit jeweils ca. 90% den größten Grundflächenanteil innerhalb der Datengrundlage auf.

Zur Charakterisierung der Altbestände der aufgenommenen Probestellen wurden die mittleren Grundflächen [m²/ha] und die mittleren Stammanzahlen je Hektar nach Arten getrennt für beide Aufnahmezeitpunkte berechnet (*Tab. 4*). Zusätzlich angegeben sind die dazugehörigen Standardabweichungen. Die Standardabweichung als Streuungsmaß weist aufgrund der hohen Werte auf ein breites Spektrum an unterschiedlichen Bestandessituationen bezüglich der Bestandesdichte hin.

Ergänzend zum Verfahren der niedersächsischen Betriebsinventur wurde bei der Wiederholaufnahme von jeder an einem Stichprobenpunkt vorhandenen Verjüngungsbaumart ein Probebaum, sofern

Tab. 1

Anteile der ausgewiesenen Nährstoffversorgungsklassen.
Nutrient class percentages in the sample plots.

Nährstoffversorgung	sehr gut	gut	ziemlich gut	mäßig	schwach
%	1	30	55	11	3

Tab. 2

Anteile der ausgewiesenen Bestandestypen.
Percentages of the stand types in the sample plots.

Bestandestyp	Bu rein	Bu Edel	Bu Fi	Bu Lä	Bu Ei	Bu Bah	Bu sonst. BA
%	69	6	7	5	4	1	8

Tab. 3

Grundflächenanteile der Arten im Altbestand zum Zeitpunkt der Erstaufnahme im Jahr 1999 und der Wiederholaufnahme im Jahr 2004.

Percentages of old growth basal areas of the different species in 1999 and 2004 in the plots.

Aufnahmezeitpunkt	Grundflächenanteil Baumartengruppe [%]					
	Buche	Edellaub	Eiche	anderes Laubh.	Fichte	anderes Nadelh.
1999	90,2	1,8	2,4	1,8	2,5	1,3
2004	90,4	2,4	2,6	1,3	2,2	1,1

Tab. 4

Mittelwerte \bar{G} und Standardabweichungen s_G der artspezifischen Grundflächen [m²/ha], sowie Mittelwerte \bar{N} und Standardabweichungen s_N der artspezifischen Stammzahlen [N/ha] innerhalb des Altbestandes zu den beiden Aufnahmezeitpunkten 1999 und 2004 (*Edel* = Edellaubholz, *aLh* = anderes Laubholz, *aNh* = anderes Nadelholz).

Means \bar{G} and standard deviations s_G of the species specific basal areas [m²/ha] and means \bar{N} and standard deviations s_N of the species specific stem numbers [N/ha] in the old growth in 1999 and 2004 (*Edel* = Noble Hardwood, *aLh* = other hardwoods, *aNh* = other conifer trees).

	\bar{G}_{99}	$s_{G_{99}}$	\bar{G}_{04}	$s_{G_{04}}$	\bar{N}_{99}	$s_{N_{99}}$	\bar{N}_{04}	$s_{N_{04}}$
Buche	22,13	10,4	22,27	10,2	432	495	441	525
Edel	0,57	1,9	0,73	2,4	17	74	24	104
Fichte	0,97	2,7	1,04	2,9	9	29	8	26
Eiche	0,92	2,6	0,92	2,7	13	44	13	50
aLh	1,11	4,4	0,76	2,8	32	120	22	81
aNh	0,48	1,7	0,44	1,7	5	20	3	12

vorhanden, aus der zweiten und dritten Höhenklasse (50–130 cm bzw. > 130 cm), sowie teilweise auch aus der ersten Höhenklasse der Verjüngungspopulation (< 50 cm) entnommen. Aus dieser Klasse wurden aufgrund der zum Teil sehr kleinen Dimensionen nur in Ausnahmefällen Probestämme entnommen, da eine exakte Durchmesserzuwachsanalyse bei zu kleinen Dimensionen nicht möglich ist.

An den insgesamt 157 entnommenen Probestämmen wurden die Höhe, der Wurzelhalsdurchmesser und sofern der Probestamm eine Höhe größer 130 als cm aufwies der Brusthöhendurchmesser gemessen. Weiterhin sind Stammscheiben aus dem Bereich des Wurzelhalses entnommen worden, an welchen eine Zuwachs- und Altersbestimmung erfolgte. Die Stammscheiben wurden bei allen Probestämmen direkt oberhalb der Humusschicht entnommen. Für die hier beschriebene Entwicklung eines Wachstumsmodells für Buche konnten letztlich 117 Probestämme aus 108 Probestämmen genutzt werden. An den entnommenen Wurzelhalscheiben der Probestämme wurden die Durchmesserzuwächse gemessen und das Alter ermittelt. Die Messung der Durchmesserzuwächse am Wurzelhals erfolgte systematisch an zwei Radien der Stammscheiben. Gemessen wurden die Zuwächse jeweils entlang des maximalen und des minimalen Radius. Die auf diese Weise ermittelten maximalen und minimalen radialen Zuwächse einer Wachstumsperiode wurden anschließend gemittelt, um den mittleren Durchmesserzuwachs der jeweiligen Wachstumsperiode zu erhalten. Um einen möglichen Einfluss einer Schädigung von Wild auf den Zuwachs auszuschließen,

wurden nur solche Bäume als Probestämme ausgewählt, welche keine sichtbaren Wildschäden aufwiesen.

Zur Charakterisierung der Verjüngungssituation innerhalb der aufgenommenen Probestämme wurden die mittleren Stammzahlen getrennt nach Arten, sowie die dazugehörige Standardabweichung [N/ha] zu den zwei Aufnahmezeitpunkten berechnet (Tab. 5). Auffällig im Vergleich zu den Artenanteilen innerhalb des Altbestandes (vgl. Tab. 3) ist der hohe Anteil an Edellaubhölzern in der Verjüngung, welcher innerhalb des Beobachtungsintervalls noch zugenommen hat. Die prozentualen Besetzungen der drei Höhenklassen sind den Spalten HKL 1 bis 3 zu entnehmen.

3. METHODIK

Für die regressionsanalytische Auswertung wurden die innerhalb des Beobachtungsintervalls [1999,2004] beobachteten Durchmesserzuwächse gemittelt. Mit diesen Zuwächsen wurde ein multiples lineares Modell zur Prognose der innerhalb eines 5-Jahresintervalls zu erwartenden mittleren jährlichen Wurzelhalsdurchmesserzuwächse hergeleitet. Eine Bildung von periodischen Zuwachsmittelwerten zur Modellbildung wäre nur dann zulässig, wenn mit dem Modell auch Zuwächse geschätzt werden sollen, die für Perioden entsprechender Länge gelten. Sollen hingegen „echte“ Jahreszuwächse geschätzt werden, würde bei der Mittelung der Zuwächse die Modellanpassungsgüte des daraus resultierenden Modells zu hoch eingeschätzt werden.

Tab. 5

Mittelwerte \bar{N} und Standardabweichungen s_N der artspezifischen Stammzahlen [N/ha] innerhalb der Verjüngung zu den beiden Aufnahmezeitpunkten 1999 und 2004 (*Edel* = Edellaubholz, *aLh* = anderes Laubholz, *aNh* = anderes Nadelholz). Die Spalten *HKL 1* bis *3* geben die Aufteilung der Individuen auf die drei Höhenklassen zum Zeitpunkt 2004 an. In Klammern ist der Wert zum Zeitpunkt 1999 angegeben.

Arithmetic means \bar{N} and standard deviations s_N of the species specific stem numbers [N/ha] in regeneration in 1999 and 2004 (*Edel* = Noble Hardwood, *aLh* = other hardwoods, *aNh* = other conifer trees).

The relative frequencies of trees into the three height classes in 2004 are shown in columns *HKL 1* to *3*. In parentheses the percentages in 1999 are given.

	\bar{N}_{99}	$s_{N_{99}}$	\bar{N}_{04}	$s_{N_{04}}$	HKL 1 [%]	HKL 2 [%]	HKL 3 [%]
Buche	7810	6616	7885	7742	31 (51)	32 (23)	37 (26)
Edel	2454	5194	2830	6705	42 (53)	33 (22)	25 (25)
Fichte	440	1347	457	1377	54 (80)	36 (16)	9 (3)
Eiche	52	338	19	125	80 (50)	0 (14)	20 (36)
aLh	739	2704	1119	4644	53 (50)	31 (27)	16 (23)
aNh	2	26	4	36	0 (0)	50 (0)	50 (100)

Die Auswahl der unabhängigen Variablen des Zuwachsmodells erfolgte teilautomatisiert. Zunächst wurde mittels der Statistiksoftware SAS (SAS INSTITUTE, 2000) eine automatisierte schrittweise vorwärtsgerichtete Variablenauswahl getroffen. *Tabelle 6* zeigt die getesteten unabhängigen Variablen, welche sich in die Teilbereiche *Initialisierungszustand der jeweiligen Verjüngungspflanze*, *Verjüngungsdichte*, *Altbestandsgrößen* und *Standortsfaktoren* unterteilen lassen. Weiterhin angegeben sind in *Tabelle 6* die zusätzlich vorgenommenen Transformationen der Variablen. *I_WHD*, *I_Höhe* und *I_Alter* bezeichnen den Initialzustand der jeweiligen Verjüngungsbuche in Form des Ausgangswurzelhalsdurchmessers, der Ausgangshöhe und des Ausgangsalters. Als Variablen zur Beschreibung der Verjüngungssituation stehen die artspezifischen Verjüngungspflanzenanzahlen (*VJ_Dichte_spez*), sowie die Gesamtanzahl an Verjüngungspflanzen (*VJ_Dichte*) zur Auswahl in der Variablenliste. Als Altbestandsgrößen wurden die Grundflächen, die Kronenschirmflächen und die Stammanzahlen jeweils über alle Arten (*G_Altb*, *KSF_Altb*, *N_Altb*), sowie getrennt nach Artengruppen (*G_Altb_spez*, *KSF_Altb_spez*, *N_Altb_spez*) berechnet. Zusätzlich wurden die Kronenschirmflächen mit einem Lichttransmissionskoeffizienten gewichtet (*KSFLTK_Altb*, *KSFLTK_Altb_spez*). Der Lichttransmissionskoeffizient beträgt hierbei in Anlehnung an ELLENBERG (1986) für Buche 1, für Fichte 0,8, für Eiche 0,5 und für Kiefer 0,2.

Die Funktion (Gl.1) zur Berechnung von Kronendurchmessern und die zugehörigen baumartenspezifischen Parameter, welche zur Berechnung der idealisierten Kronenschirmfläche dienen, wurden aus dem Wachstumssimulator BWINPro (NAGEL et al., 2006) übernommen.

$$KB = (p_0 + p_1 \cdot BHD) \cdot \left(1 - e^{-\left(\frac{BHD}{p_3}\right)^{p_4}} \right) \quad (1)$$

wobei *KB* = Kronenbreite in m, *BHD* = Brusthöhendurchmesser in cm, *p₀* bis *p₄* baumartenspezifische Parameter.

Die Grundflächen-, Stammanzahl- und Kronenschirmflächenvariablen sollen in erster Linie die Dichte des Altbestandes charakterisieren. Um Dichteveränderungen innerhalb des 5-Jahresintervalls berücksichtigen zu können, wurden des Weiteren die Veränderungen der Grundflächen, der Kronenschirmflächen, sowie der Stammanzahlen innerhalb des Beobachtungsintervalls [1999, 2004] ermittelt ($\Delta G_Alt_{T_0,T_1}$, $\Delta KSF_Alt_{T_0,T_1}$, $\Delta KSF_{LTK_Alt_{T_0,T_1}}$, $\Delta N_Alt_{T_0,T_1}$).

Die Variablen *Bestandesalter*, *max_BHD*, *max_BHD_spez* und *Altersklasse* sollen den Entwicklungszustand ausdrücken, in dem sich der Bestand befindet. Bis auf die klassifizierte Variable *Altersklasse* wurden dem Modell im Rahmen der automatisierten Variablenauswahl die genannten Variablen auch logarithmisch-, quadratwurzel-, quadratisch-, sowie kubisch- transformiert angeboten (vgl. *Tab. 6*). Im Rahmen der niedersächsischen Betriebsinventur werden neun Altersklassen mit einer Klassenbreite von 20 Jahren ausgewiesen.

Als Standortsfaktoren wurden dem Modell die Variablen *Nährstoffversorgung* (vgl. *Tab. 1*), *Wasserversorgung*, Boden kalkhaltig ja/nein (*Kalk*), Konkurrenz durch Bodenvegetation ja/nein (*Konkurrenz_BoVeg*) und Seehöhe (*Höhe_NN*) angeboten. Die Variable *Höhe_NN* wurde zusätzlich transformiert in die Auswahlliste aufgenommen.

Nach der automatisierten Variablenvorauswahl erfolgte eine manuelle Auswahl der zunächst in das Modell aufgenommenen Variablen. Die manuelle Auswahl richtete sich insbesondere nach folgenden Aspekten:

1) *Korrelationen zwischen unabhängigen Variablen*: Bestehen signifikante Korrelationen zwischen den automatisiert ausgewählten Variablen, so dass etwaige Einflussgrößen mehrfach im Modell enthalten sind, was das Modell unnötig komplexer macht und zu ungenauen Parameterschätzungen führen kann? Zur Beurteilung einer möglichen Multikollinearität wurden im Rahmen der Parametrisierung des linearen Modells mit SAS (SAS INSTITUTE, 2000),

Tab. 6

Getestete unabhängige Variablen. Mit x gekennzeichnete Variablen wurden zusätzlich transformiert (ln x, $\sqrt[2]{x}$, x^2 , x^3) auf ihren Einfluss hin geprüft.
Observed and transformed (marked x) variables which were tested.

unabhängige Variablen	transformiert	unabhängige Variablen	transformiert
Altbestandsgrößen		Initialzustand VJ-Pflanze	
G_Altb_spez [m ² /ha]	x	I_WHD [cm]	x
G_Altb [m ² /ha]	x	I_Höhe [m]	x
$\Delta G_Alt_{T_0,T_1}$ [m ² /ha]	x	I_Alter [Jahre]	x
N_Altb_spez [N/ha]	x	Verjüngungsdichte	
N_Altb [N/ha]	x	VJ_Dichte_spez [N/ha]	x
$\Delta N_Alt_{T_0,T_1}$ [N/ha]	x	VJ_Dichte [N/ha]	x
KSF_Altb_spez [m ² /ha]	x	Standortsfaktoren	
KSF_Altb [m ² /ha]	x	Nährstoffversorgung	
$\Delta KSF_Alt_{T_0,T_1}$ [m ² /ha]	x	Wasserversorgung	
KSF _{LTK} _Altb_spez [m ² /ha]	x	Kalk [ja/nein]	
KSF _{LTK} _Altb [m ² /ha]	x	Konkurrenz_BoVeg [ja/nein]	
$\Delta KSF_{LTK_Alt_{T_0,T_1}}$ [m ² /ha]	x	Höhe_NN [m]	x
Altersklasse [1-9]			
Bestandesalter [Jahre]	x		
max_BHD_spez [cm]	x		
max_BHD [cm]	x		

der *variance inflation factor* (VIF) bzw. die *tolerance* (TOL) herangezogen. Der TOL-Wert einer Erklärungsvariablen gibt an, wie hoch der Varianzanteil dieser Variablen ist, der durch die anderen unabhängigen Variablen in der Gleichung nicht erklärt wird. Der *variance inflation factor* ist der Kehrwert der *tolerance*. Eine Variable mit kleinem TOL-Wert (und damit hohem VIF-Wert) trägt wenig zur Vorhersage der abhängigen Variable bei. Mit abnehmender *tolerance* (d. h. zunehmendem VIF-Wert) steigt auch die Varianz des Regressionskoeffizienten, wodurch er zu einer instabilen Schätzung wird. VIF-Werte größer 10, bzw. TOL-Werte kleiner 0,1 lassen darauf schließen, dass sich der Prädiktor als eine lineare Kombination aus den anderen Prädiktoren ausdrücken lässt.

2) *Wirkungsrichtungen der unabhängigen Variablen*: Stimmt der Einfluss der im Modell enthaltenen Variablen mit den zu erwartenden Wirkungsrichtungen (positiv oder negativ) überein und kann als plausibel angesehen werden?

3) *Welche Erklärungsfaktoren sind im Modell enthalten und welche sollten enthalten sein?* Sind die zu erwartenden Einflussfaktoren als Prädiktor im Modell enthalten? Hierzu ist ein Vergleich mit vorhandenen Wuchsmodellen ratsam, welche i.d.R. folgende Faktoren beinhalten: *Ausgangszustand, konkurrenzbeschreibende Variablen* (insb. Konkurrenz um Licht), *zu erwartende Änderung der Konkurrenz* innerhalb eines Prognoseintervalls, *standortsbeschreibende Größen*.

Zur Bewertung der Modellgüte des parametrisierten multiplen linearen Modells wurden die im Folgenden kurz erläuterten Gütemaße herangezogen.

Das adjustierte Bestimmtheitsmaß (R^2_{adj}):

Das adjustierte Bestimmtheitsmaß gibt wie das Bestimmtheitsmaß R^2 den Anteil der durch die unabhängigen Variablen erklärten Varianz der abhängigen Variablen y an. Es berücksichtigt jedoch im Gegensatz zum Bestimmtheitsmaß R^2 die Anzahl der unabhängigen Variablen p .

Wurzel aus dem mittleren quadratischen Fehler (RMSE):

Der Root Mean Squared Error liefert die Information, inwieweit die vorhergesagten Werte im Durchschnitt den beobachteten Werten entsprechen, ohne dass sich dabei positive und negative Abweichungen gegenseitig ausgleichen können. Größere Abweichungen werden stärker gewichtet als kleinere Abweichungen (WEBER, 1998).

Varianz- und Kovarianz-Anteil (VAR, KOV):

Diese zwei Gütemaße zerlegen den *RMSE* (bzw. *MSE*) in *systematische* und *unsystematische Fehleranteile*. Weicht der Varianz-Anteil von Null ab, so können die Schwankungen der Beobach-

tungswerte um ihren mittleren Wert zwar durch die Prognosen erfasst werden, das Ausmaß dieser Erfassung ist jedoch zu stark bzw. zu schwach (systematische Abweichungs-Fehlprognosen). Der unsystematische Abweichungsfehler erfasst den Kovarianz-Anteil. Varianz- und Kovarianz-Anteil sind beschränkt (normiert) auf den Wertebereich zwischen Null und Eins. Je kleiner der Varianz-Anteil und je näher der Kovarianz-Anteil bei Eins liegt, desto besser ist die Prognose (WEBER, 1998).

4. ERGEBNISSE

Auf Basis der beschriebenen Regressionsanalysen konnte ein multiples lineares Modell zur Prognose des logarithmierten mittleren jährlichen Wurzelhalsdurchmesserzuwachses einer Buchenverjüngungspflanze i ($\ln \Delta WHD_i$) innerhalb einer 5-jährigen Zuwachsperiode parametrisiert werden (Gl. 2).

$$\ln \Delta WHD_i = \beta_0 + \beta_1 \cdot VJ_Dichte + \beta_2 \cdot \ln N_Altb + \beta_3 \cdot I_Alter + \beta_4 \cdot I_WHD_i + \beta_5 \cdot \ln I_WHD_i + \beta_6 \cdot \Delta G_Altb_{T0,T1} \quad (2)$$

Als unabhängige Variablen sind im Modell die Dichte der Verjüngung zu Beginn der 5-jährigen Zuwachsperiode (*VJ_Dichte*) in Form der Stammanzahl pro ha innerhalb der Verjüngungspopulation, die Dichte des Altbestands in Form der logarithmisch transformierten Anzahl Bäume pro ha zu Beginn der Zuwachsperiode ($\ln N_Altb$), das Ausgangsalter der Verjüngungsbuche i (I_Alter_i), der Ausgangswurzelhalsdurchmesser der Verjüngungsbuche i (I_WHD_i), der logarithmierte Ausgangswurzelhalsdurchmesser der Verjüngungsbuche i ($\ln I_WHD_i$), sowie die kubisch transformierte Grundflächenveränderung je ha innerhalb des Altbestandes im 5-jährigen Zuwachsintervall ($\Delta G_Altb_{[T0,T1]}^3$) enthalten. Die Regressionskoeffizienten (β_0 bis β_6) sind der *Tabelle 7* zu entnehmen.

Tab. 8

**Gütemaße des Buchenwuchsmodells.
Goodness of fit of the Beech growth model.**

R^2_{adj}	=	0,45
RMSE	=	0,42
Var	=	0,18
Kov	=	0,82

Tab. 7

**Unabhängige Variablen und Koeffizienten des Wurzelhalsdurchmesserzuwachsmo-
dells für Buche. Des Weiteren angegeben sind die Standardfehler der Regressionskoeffizienten, sowie der
variance inflation factor (VIF) und die tolerance (TOL).**

**Independent variables and coefficients of the Beech growth model.
Standard errors, variance inflation factors (VIF) and the tolerances
(TOL) of the regression coefficients are also given.**

Variable	Koeffizient β	Std. Fehler	VIF	TOL
Interzept (β_0)	6,84601	0,2967	0	.
<i>VJ_Dichte</i>	-0,00001189	0,00000551	1,32	0,76
$\ln N_Altb$	-0,2461	0,0494	1,59	0,66
<i>I_Alter</i>	-0,04566	0,01	3,63	0,28
<i>I_WHD</i>	0,10373	0,0467	7,13	0,14
$\ln I_WHD$	0,41532	0,1043	6,9	0,14
$\Delta G_Altb_{[T0,T1]}^3$	-0,00003019	0,00001498	1,12	0,89

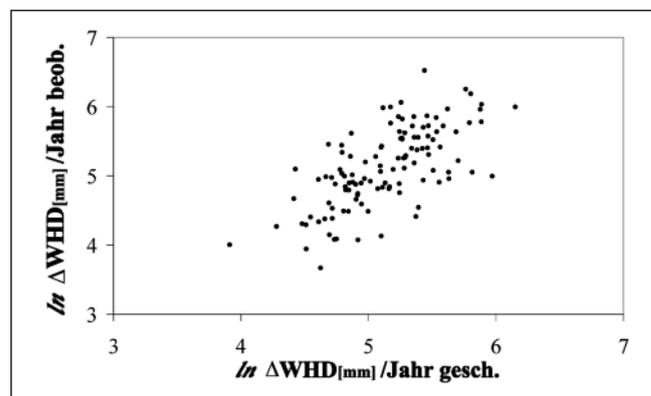


Abb. 1

Darstellung der geschätzten logarithmierten mittleren Durchmesserzuwächse einer 5-jährigen Wuchsperiode ($\ln \Delta WHD[mm]/Jahr gesch.$) gegen die beobachteten Zuwächse ($\ln \Delta WHD[mm]/Jahr beob.$).

Estimated logarithmic mean diameter increment in the 5-year growth period ($\ln \Delta WHD[mm]/Jahr gesch.$) versus observed growth ($\ln \Delta WHD[mm]/Jahr beob.$).

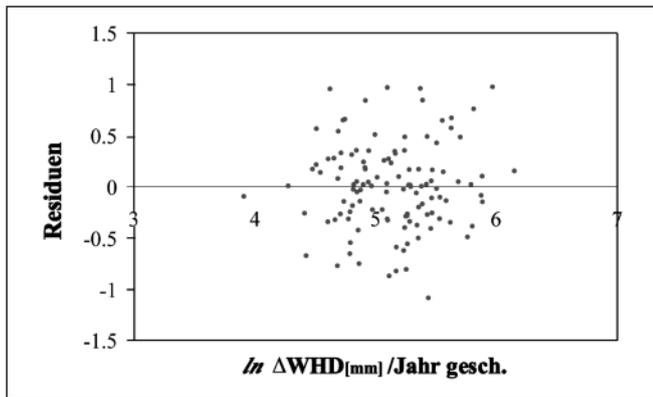


Abb. 2

Streuung der Residuen über dem vorhergesagten Wertebereich.
Distribution of residuals over the estimated range of predictions.

Das adjustierte Bestimmtheitsmaß (R^2_{adj}) liegt bei 0,45 (Tab. 8). Die mittlere absolute Abweichung der prognostizierten Zuwächse von den gemessenen Zuwächsen liegt wie der RMSE zeigt, bei 0,42. Der Korrelationskoeffizient zwischen den gemessenen Zuwächsen und den geschätzten Zuwächsen liegt bei 0,67 (Abb. 1). Der Varianz-Anteil des MSE (Var) beträgt 0,18. Der restliche Fehleranteil des MSE von 0,82 entfällt somit auf unsystematische Abweichungsfehler (Kov). Durch die Modellprognosen entstehen also hauptsächlich unsystematische Abweichungsfehler, was positiv zu bewerten ist.

Die Streuung der Residuen über den Bereich der prognostizierten Werte ist gleichförmig, so dass Homoskedastizität der Residuen angenommen werden kann (Abb. 2). Der Shapiro-Wilk-Test der Residuen auf Normalverteilung ergibt einen P-Wert von 0,5, so dass die Residuen bei einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ als normalverteilt angenommen werden können. Somit können beide Voraussetzungen zur Zulässigkeit der Regression – Normalverteilung und Varianzhomogenität der Residuen – als erfüllt angesehen werden.

Im Gegensatz zum Ausgangsalter, welches in den Inventurdaten enthalten ist, ist der Ausgangswurzelhalsdurchmesser einer Verjüngungspflanze in der Regel unbekannt. Aus diesem Grund musste ein weiteres Modell hergeleitet werden, welches den Ausgangsdurchmesser einer Pflanze auf Basis vorhandener Inventurinformationen schätzt. Die Vorgehensweise bei der Herleitung dieses Modells entspricht hierbei der in Abschnitt 3 beschriebenen Methodik der Herleitung des Zuwachsmodells. Folgendes Modell

Tab. 9

Unabhängige Variablen und Koeffizienten Modells zur Schätzung des Ausgangswurzelhalsdurchmessers. Des Weiteren angegeben sind die Standardfehler der Regressionskoeffizienten, sowie der variance inflation factor (VIF) und die tolerance (TOL).

Independent variables and model coefficients for estimating the initial root collar diameter. Standard errors, variance inflation factors (VIF) and the tolerances (TOL) of the regression coefficients are also presented.

Variable	Koeffizient β	Std. Fehler	VIF	TOL
Interzept (β_0)	-0,84640	0,785000	0,00	
$\ln I_Alter$	0,99180	0,114600	1,84	0,54
$\ln KSF_Alt$	-0,23300	0,093000	2,00	0,50
$\ln N_Alt$	0,21660	0,049500	2,54	0,39
Bu_HKL_1	-0,00004	0,000010	1,77	0,57
Bu_HKL_2	-0,00003	0,000010	1,92	0,52
Bu_HKL_3	0,00001	0,000008	1,27	0,78

zur Schätzung des logarithmierten Ausgangswurzelhalsdurchmessers einer Buche i ($\ln I_WHD_i$ [cm]) konnte parametrisiert werden:

$$\ln I_WHD_i = \beta_0 + \beta_1 \cdot \ln I_Alter + \beta_2 \cdot \ln KSF_Alt + \beta_3 \cdot \ln N_Alt + \beta_4 \cdot Bu_HKL_1 + \beta_5 \cdot Bu_HKL_2 + \beta_6 \cdot Bu_HKL_3 \quad (3)$$

Tabelle 9 zeigt die geschätzten Regressionskoeffizienten (β_0 bis β_6) des Modells. Der Ausgangswurzelhalsdurchmesser ist eine Funktion des Ausgangsalters ($\ln I_Alter$), der Bestandesdichte in Form der logarithmierten Kronenschirmfläche je Hektar ($\ln KSF_Alt$) und der logarithmierten Stammanzahl im Altbestand je Hektar ($\ln N_Alt$), sowie der Ausgangsverjüngungsstruktur der Buche in Form der Baumanzahlen in den drei Höhenklassen je Hektar ($Bu_HKL_1, 2$ und 3).

Das adjustierte Bestimmtheitsmaß (R^2_{adj}) liegt bei 0,78 (Tab. 10). Die mittlere absolute Abweichung beträgt 0,35 (RMSE). Der Korrelationskoeffizient zwischen den gemessenen und den geschätzten Durchmessern liegt bei 0,89 (vgl. Abb. 3). Der Varianz-Anteil des MSE (Var) beträgt 0,07. Der restliche Fehleranteil des MSE von 0,93 entfällt somit auf unsystematische Abweichungsfehler (Kov).

Die Streuung der Residuen über den Bereich der prognostizierten Werte ist auch in diesem Fall gleichförmig, so dass Homoskedastizität auch hier angenommen werden kann (Abb. 4). Der Shapiro-Wilk-Test der Residuen auf Normalverteilung ergibt einen P-Wert von 0,48, so dass die Residuen bei einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ als normalverteilt angenommen werden können. Somit können auch im Fall des Modells zur Schätzung des Ausgangsdurchmessers die beiden Voraussetzungen zur Zulässigkeit der Regression – Normalverteilung und Varianzhomogenität der Residuen – als erfüllt angesehen werden.

Wie beschrieben ist die Grenze zwischen Verjüngung und Altbestand in Niedersachsen über den Brusthöhendurchmesser definiert.

Tab. 10

Gütemaße des Modells zur Schätzung des Ausgangswurzelhalsdurchmessers.

Goodness of fit of the initial root collar diameter model.

R^2_{adj}	=	0,78
RMSE	=	0,3539
Var	=	0,07
Kov	=	0,93

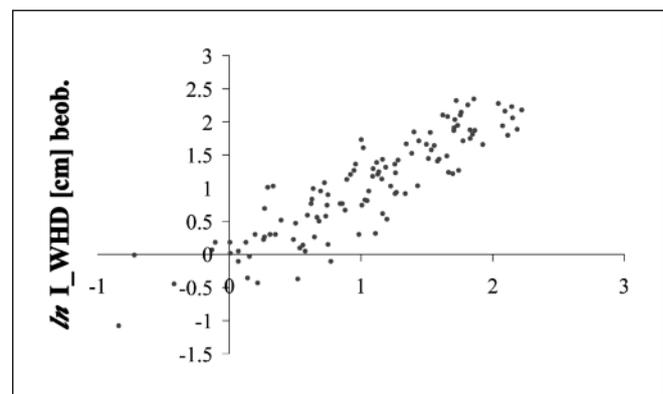


Abb. 3

Darstellung der geschätzten logarithmierten Ausgangswurzelhalsdurchmesser ($\ln I_WHD$ [cm] gesch.) gegen die beobachteten Initialdurchmesser ($\ln I_WHD$ [cm] beob.).

Estimated logarithmic initial root collar diameter ($\ln I_WHD$ [cm] gesch.) versus the observed initial diameter ($\ln I_WHD$ [cm] beob.).

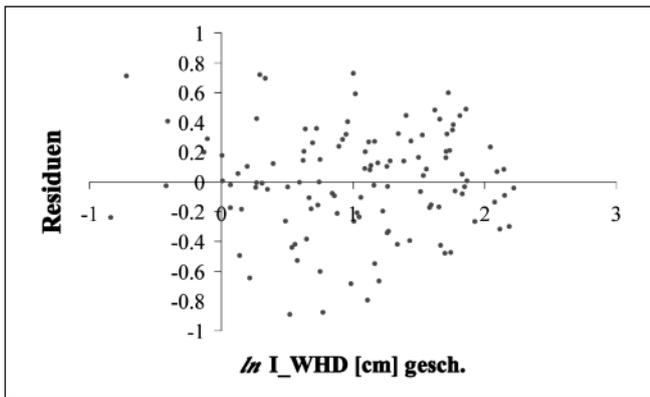


Abb. 4

Streuung der Residuen über den vorhergesagten Wertebereich.
Distribution of residuals over the estimated range of predictions.

Um prüfen zu können, ob eine Verjüngungsbuche innerhalb der 5-jährigen Wuchsperiode den Schwellenwert von 7 cm BHD erreicht oder überschritten hat, ist es notwendig, den prognostizierten Wurzelhalsdurchmesserzuwachs auf den Ausgangswurzelhalsdurchmesser zu addieren und den neuen Wurzelhalsdurchmesser in einen Brusthöhendurchmesser zu transformieren. Hierfür wurde ein weiteres lineares Modell parametrisiert (Gl. 4). Der Brusthöhendurchmesser (BHD [cm]) einer Buche i ist hierbei eine lineare Funktion des Wurzelhalsdurchmessers (WHD_i [cm]) dieser Buche.

$$BHD_i = -0,9581 + 0,86092 \cdot WHD_i \quad (4)$$

Das Bestimmtheitsmaß dieses Modells liegt bei 0,97. Der RMSE beträgt 0,36. Die Residuen können bei einem Shapiro-Wilk P-Wert von 0,63 zum Signifikanzniveau $\alpha = 0,05$ als normalverteilt angenommen werden und streuen gleichförmig um die vorhergesagten Werte. Der Pearson'sche Korrelationskoeffizient r zwischen den gemessenen und den geschätzten Durchmessern liegt bei 0,99.

5. DISKUSSION

Das zur Prognose der mittleren jährlichen Durchmesserzuwächse innerhalb einer 5-jährigen Wuchsperiode parametrisierte Modell für Verjüngungsbuchen ist bezüglich der enthaltenen Variablen vergleichbar mit Durchmesserzuwachsmoellen für Altbäume. Das in der Software BWINPro7 (NAGEL et al., 2006) verwendete Durchmesserzuwachsmoell berücksichtigt den *Initialzustand* eines Bestandes (Kronenmantelfläche und Ausgangsalter), die *aktuelle Konkurrenzsituation* (C66), sowie die *Änderung der Konkurrenz*

innerhalb des Prognoseintervalls (C66c). Das im Rahmen dieser Arbeit hergeleitete Modell für Verjüngungsbuchen berücksichtigt die gleichen Faktoren. *Tabelle 11* zeigt einen Vergleich des Zuwachsmoells für die Verjüngungsbuchen, mit dem in Anlehnung an das Modell von WYKOFF et al. (1982) in BWINPro implementierten Durchmesserzuwachsmoell für Altbäume.

Die wichtigsten erklärenden Variablen des mittleren jährlichen Zuwachses innerhalb eines 5-jährigen Prognoseintervalls sind das Ausgangsalter und der Ausgangsdurchmesser einer Verjüngungspflanze. Je größer deren Dimension, desto höher ist der potentielle Zuwachs, den die Pflanze leisten kann. Der Ausgangsdurchmesser weist folgerichtig einen positiven Einfluss auf den Zuwachs auf (Tab. 7). Die Kombination des Ausgangsalters und -durchmessers spiegelt, neben der zurückliegenden Konkurrenzsituation, auch die Standortbedingungen (z. B. Boden, Klima, Höhenlage, Exposition, etc.) wider, denen die Pflanze ausgesetzt ist und liefert, da Standortbedingungen in der Regel mittelfristig konstant bleiben, einen hohen Erklärungsanteil auch für das zukünftige Wachstum. Es kann angenommen werden, dass beide Variablen summarische Information über die herrschenden Wuchsbedingungen der abgelaufenen Wachstumsperiode enthalten. Je älter ein Baum i bei gleichem Durchmesser, desto schlechter waren die bis dato herrschenden Wuchsbedingungen und desto niedriger fällt dementsprechend der Durchmesserzuwachs i aus. Anders ausgedrückt: Je besser die bis zum Zeitpunkt t der Erstaufnahme herrschenden Wuchsbedingungen und je größer der Ausgangsdurchmesser des Baumes i bei gleichem Alter, desto höher ist der prognostizierte Durchmesserzuwachs i .

Der Erklärungsanteil der Kombination aus Ausgangsalter und -durchmesser ist umso größer, je konstanter neben den Standortbedingungen auch die Bestandesbedingungen z. B. in Form der Dichte des Altbestandes bleiben. Die Bestandesbedingungen ändern sich jedoch ständig, unter anderem durch waldbauliche Maßnahmen, aber auch durch natürliche Mortalität und durch das Wachstum des Altbestandes. Aus diesem Grund wurden in das Modell die konkurrenzbeschreibenden Variablen *Stammzahl im Altbestand*, *Stammzahl innerhalb der Verjüngung*, und *Grundflächenveränderung des Altbestandes* innerhalb eines 5-Jahresintervalls aufgenommen (vgl. Gl. 2, Tab. 7). Diese Größen beschreiben stark vereinfacht die innerhalb des Probekreises herrschende Lichtsituation. Licht kann als der entscheidende wachstumsbeeinflussende Faktor für die Verjüngung angesehen werden (MAYER, 1977; AUSTIN, 1990; WAGNER, 1999). Positionsabhängige Konkurrenzindizes wurden nicht verwendet, damit das Wachstumsmodell auch in positionsunabhängigen Wachstumssimulatoren verwendet werden kann.

Tab. 11

Vergleich des Durchmesserzuwachsmoells für Verjüngungsbuchen (Modell TREMER et al.) mit dem in BWINPro 7 (NAGEL et al., 2006) implimentierten Durchmesserzuwachsmoell für Altbestandsbäume (Modell NAGEL et al.) bezüglich der als Prädiktoren enthaltenen Einflussfaktoren auf den Zuwachs.
Diameter growth model for Beech saplings (Modell TREMER et al.) and diameter growth model for big trees (Modell NAGEL et al.), and respective predictor variables.

Einflussfaktoren	unabhängige Variablen	
	Modell TREMER et al. Durchmesserzuwachs VJ	Modell NAGEL et al. Durchmesserzuwachs Altb.
Initialzustand	Ausgangsdurchmesser	Kronenmantelfläche
	Ausgangsalter	Ausgangsalter
Konkurrenz	Stammzahl in der Verjüngung	C66
	Stammzahl im Altbestand	
Δ Konkurrenz	Grundflächenveränderung[T0,T1]	C66c

Eine zunehmende Stammzahl im Altbestand und in der Verjüngung wirkt sich erwartungsgemäß negativ auf den Durchmesserzuwachs aus. Das beobachtete Modellverhalten bezüglich der Verjüngungsdichte deckt sich mit den Erkenntnissen von HANSEN u. TREMER (2005). Eine zunehmende Stammzahl innerhalb der Verjüngung weist hiernach einen deutlichen Einfluss auf den Zuwachs auf.

Die als Prädiktor im Modell enthaltene *Grundflächenveränderung* nimmt bei einer Abnahme der Grundfläche innerhalb des Altbestandes (z.B. durch Nutzung) negative Werte und bei einer Zunahme entsprechend positive Werte an. Je stärker die Zunahme der Grundfläche, desto kleiner fällt der prognostizierte Durchmesserzuwachs aus. Eine Abnahme der Grundfläche führt zu höheren prognostizierten Zuwächsen je stärker die Abnahme ist. Die Grundflächenveränderung innerhalb eines 5-jährigen Simulationsintervalls kann mit vorhandenen Waldwachstumssimulatoren prognostiziert werden.

Anzumerken ist, dass die Stammzahl im Altbestand die Dichte aufgrund der fehlenden Dimensionsberücksichtigung nur bedingt beschreibt, allerdings weisen keine weiteren dichtebeschreibenden Variablen einen signifikanten Einfluss auf den Zuwachs auf. Weder die Grundfläche noch die Kronenschirmfläche wurden bei der automatisierten Variablen Selektion ausgewählt bzw. konnten manuell in das Modell einbezogen werden. Auch die in *Tabelle 6* aufgeführten Standortgrößen wiesen keinen signifikanten Einfluss auf. Dies ist neben der über die Kombination aus Alter und Ausgangsdimension im Modell enthaltenen Bonität wahrscheinlich auf eine geringe Streuung der Standortparameter (*Tab. 1; Tab. 6*) zurückzuführen.

Zwar ist das Alter der Verjüngungspflanzen in den niedersächsischen Inventurdaten enthalten, allerdings wie in Abschnitt 2 beschrieben nur als Mittelwert je vorkommender Art-Höhenklassen-Kombination. Mit einem Modell auf Basis einer solchen Datengrundlage wird der mittlere Durchmesserzuwachs einer Höhenklasse geschätzt. Ein Einzelbaumansatz kann bei der Simulation des Wachstums aufgrund der im Vergleich zum Altbestand teilweise sehr hohen Pflanzenanzahlen in der Verjüngung hohe Rechenzeiten beanspruchen. Aus diesem Grund erscheint es sinnvoller, auch im Hinblick auf das Oberziel Pfadgenerierung, einen mittleren Zuwachs für Repräsentativbäume der vorkommenden Höhenklassen zu prognostizieren als den Zuwachs für jede einzelne Pflanze zu berechnen.

Das Alter ist in zweifacher Hinsicht relevant, da es sowohl bei der Zuwachsprognose als auch bei der Schätzung des Ausgangsdurchmessers als Prädiktor genutzt wird. Das hierzu parametrisierte log-lineare Modell beinhaltet neben dem logarithmierten Ausgangsalter die logarithmierte Kronenschirmfläche, die logarithmierte Stammzahl im Altbestand, sowie die Anzahlen an Verjüngungsbüchern in den drei Höhenklassen (vgl. Gl.3, *Tab. 9*). Das Alter hat wie zu erwarten einen positiven Einfluss auf den Durchmesser. Mit steigendem Alter einer Verjüngungsbuche steigt auch der Durchmesser dieses Individuums. Dies stimmt jedoch nur bedingt. Waren die Wuchsbedingungen für die Verjüngungsbücher in der Vergangenheit ungünstig, ist der Durchmesser einer solchen Buche kleiner als bei einer Buche gleichem Alters, die in der Vergangenheit günstigeren Wuchsbedingungen ausgesetzt war. Dieser Kausalzusammenhang muss im parametrisierten Modell über die Variablenkombinationen berücksichtigt werden. Zum einen geschieht dies durch die dichtebeschreibenden Variablen Kronenschirmfläche und Stammzahl. Diese Größen lassen allerdings nur bedingt auf die zurückliegenden Bestandesbedingungen schließen, da sie im Grunde keine Aussagekraft besitzen, sofern unmittelbar vor der Aufnahme ein Eingriff stattgefunden hat, der die Konkurrenzsituation (insbesondere die Lichtsituation) grund-

legend verändert hat. Im Fall der aufgenommenen Inventurpunkte war dies jedoch nicht Fall.

Zum anderen liefern die Anzahlen an Verjüngungsbüchern in den drei Höhenklassen wichtige Erkenntnisse zu den in der Vergangenheit herrschenden Wuchsbedingungen. Die Anzahlen können als Ausdruck des physiologischen Alters gesehen werden, in dem sich die Buchenverjüngung befindet. In Kombination mit dem realen Alter können sie als Bonität angesehen werden. Ein geringes physiologisches Alter ist in diesem Fall definiert als eine Verjüngungsstruktur mit einer hohen Anzahl an Bäumen in der ersten Höhenklasse und nur wenigen bzw. keinen Bäumen in der zweiten und dritten Höhenklasse. Ein hohes reales Verjüngungsalter in Kombination mit einem geringen physiologischen Alter ist ein Indikator für eine niedrige Bonität. Bei gleichem realem Alter ist in diesem Fall ein kleinerer Ausgangsdurchmesser zu erwarten als bei höherer Bonität. Diese liegt dann vor, wenn das physiologische Alter bei gleichem realen Alter höher ist (tendenziell mehr Bäume in den oberen Höhenklassen).

Für die standortsbeschreibenden Variablen konnte kein signifikanter Einfluss auf den Ausgangsdurchmesser nachgewiesen werden. Allerdings kommen Standortfaktoren indirekt ebenfalls in der angesprochenen Kombination aus den Stammzahlen in den drei Höhenklassen und dem realen Alter zum Ausdruck.

Leider ist es nicht gelungen, ein von der Modellgüte her vergleichbares Zuwachsmodell ohne den Prädiktor *Ausgangsdurchmesser* zu parametrisieren. Der Ausgangsdurchmesser ist ohnehin eine notwendige Modellgröße, da der prognostizierte Durchmesserzuwachs auf den Ausgangswurzelhalsdurchmesser addiert wird. Nur so kann am Ende einer 5-jährigen Wachstumsperiode geprüft werden, welche Bäume den Durchmesserswellenwert zum Altbestand von 7 cm erreicht bzw. überschritten haben.

Unberücksichtigt bei der Modellierung des Wachstums blieben witterungsbedingte Störungen, welche innerhalb des 5-jährigen Beobachtungsintervalls in Form eines Nässejahres (2002) und eines Trockenjahres (2003) auftraten (vgl. CZAJKOWSKI et al., 2005). Der mögliche Einfluss auf den Zuwachs innerhalb dieses Intervalls konnte nicht nachgewiesen werden.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass das Oberziel dieser Untersuchung, die Schätzung des Einwuchses bei der Generierung von Handlungspfaden, erreicht wurde. Auf der Basis von Stammanalysen wurde ein erstes Modell zur Schätzung des Durchmesserzuwachses von Verjüngungspflanzen vorgestellt. Das Zuwachsmodell liefert plausible Prognosen unter Berücksichtigung von routinemäßig verfügbaren Forsteinrichtungsdaten und ist als ein weiterer Beitrag zur realitätsnahen Prognose der Nutzungsdynamik in ungleichaltrigen Mischwäldern zu werten.

6. DANKSAGUNG

Die Untersuchungen wurden mit Förderung des Ministeriums für Umwelt und Forsten des Landes Rheinland-Pfalz, sowie der Deutschen Forschungsgemeinschaft im Rahmen des geförderten Projektes „Untersuchung der Verjüngungsdynamik von Waldbeständen“ (GA 473/19-1) durchgeführt. Des Weiteren gilt der Dank Herrn Dr. THOMAS BÖCKMANN vom Niedersächsischen Forstplanungsamt für die Bereitstellung von Inventurdaten und Kartenmaterial, sowie der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt für die Bereitstellung der Jahrringmessanlage.

7. ZUSAMMENFASSUNG

Modelle zur Generierung von Handlungspfaden auf der Basis real beobachteter Ausgangszustände müssen die Dynamik der natürlichen Waldverjüngung und insbesondere den Einwuchs berücksichtigen, denn nur so ist eine umfassende Bewertung unter-

schiedlicher waldbaulicher Eingriffsfolgen möglich. Die in dieser Arbeit vorgestellte Fallstudie zeigt eine Möglichkeit, das Durchmesserwachstum natürlich aufgekommener Buchenverjüngung modellhaft zu beschreiben.

Die Grenze zwischen Verjüngung und Altbestand liegt in Niedersachsen definitionsgemäß bei einem Brusthöhendurchmesser von 7 cm. Da diese Grenze als Schwellendurchmesser definiert ist, erscheint es sinnvoll, statt des in anderen Arbeiten untersuchten Höhenzuwachses, den Durchmesserzuwachs von Verjüngungsindividuen zu modellieren und auf diesem Weg den periodischen Einwuchs in den Altbestand zu prognostizieren.

Als Datengrundlage dieser Untersuchung dienen 189 zu jeweils zwei Zeitpunkten aufgenommene Betriebsinventurpunkte des niedersächsischen Forstamtes Grünenplan. Zum Zeitpunkt der Wiederholaufnahme wurden aus der Verjüngungspopulation Probestämme entnommen und hinsichtlich ihrer Durchmesserzuwächse am Wurzelhals mittels Jahrringanalysen ausgewertet. Auf Basis dieser Daten konnte exemplarisch für die Baumart Buche ein multiples log-lineares Modell zur Prognose des mittleren jährlichen Wurzelhalsdurchmesserzuwachses innerhalb einer 5-jährigen Zuwachsperiode hergeleitet werden (Gl. 2, Tab. 7). Das Modell ist von den als Prädiktoren enthaltenen zuwachsbeeinflussenden Faktoren Initialzustand, Konkurrenz und zu erwartende Konkurrenzveränderung vergleichbar mit Zuwachsmodellen für Altbestandsbäume (Tab. 11).

Bei der Entwicklung des Modells wurden aus praktischen Gründen nur solche Variablen als Eingangsgrößen verwendet, welche leicht zu erheben sind, als Inventurinformation bereits vorliegen, oder aus Inventurinformationen abgeleitet werden können. Aus diesem Grund war es notwendig, ein weiteres Modell zu parametrisieren welches den in der Regel nicht als Inventurinformation vorliegenden Initialdurchmesser der jeweiligen Verjüngungsbuche in Abhängigkeit von vorliegenden Inventurinformationen schätzt (Gl. 3, Tab. 9).

Der Ausgangsdurchmesser eine wichtige Eingangsgröße für das Zuwachsmodell. Die Herleitung eines Zuwachsmodells ohne den Prädiktor Ausgangsdurchmesser wurde aufgrund zu geringer Modellgüte und fehlender Plausibilität der Variablenkombination und Wirkungsrichtungen der Prädiktoren verworfen. Diese Größe ist ohnehin unabdingbar, weil der prognostizierte Durchmesserzuwachs einer 5-jährigen Wuchsperiode auf den Ausgangswurzelhalsdurchmesser addiert werden muss, um nach Transformation dieses neuen Durchmessers in einen Brusthöhendurchmesser prüfen zu können, welche Bäume den Durchmesserschwellenwert zum Altbestand von 7 cm erreicht, bzw. überschritten haben. Zur Transformation des Wurzelhalsdurchmessers in einen Brusthöhendurchmesser wurde ein lineares Modell parametrisiert, welches den Brusthöhendurchmesser in Abhängigkeit vom Wurzelhalsdurchmesser schätzt (Gl. 4).

Der in dieser Arbeit vorgestellte Ansatz ist geeignet für die Prognose der Veränderung der Verjüngungsstruktur und des Einwuchses aus der Verjüngung in den Altbestand, auf Basis von Inventurdaten.

8. Summary

Title of the paper: *Analysis of the diameter growth of natural Beech regeneration.*

Forest models which are used to simulate alternative management options require components for estimating regeneration dynamics. Such model components are a pre-requisite for medium- and long-term evaluations of alternative silvicultural treatments, based on real observed initial state variables. The case study pre-

sented in this paper shows the results of a particular approach of modelling the diameter growth of natural Beech regeneration.

In Lower Saxony regeneration saplings are defined as mature trees when they reach a breast height diameter of 7 cm. It seems logical, because of the particular definition of a threshold diameter, to model the diameter growth of regeneration saplings rather than their height growth, and to use the information for estimating periodic ingrowth of saplings into the main stand.

The empirical data base includes 189 plots of the Lower Saxony forest district *Grünenplan*. These plots had been assessed in 1999 and were remeasured in 2004. Sample trees were selected at the time of remeasurement to evaluate the diameter increment at the root collar. Based on these data, a multiple log-linear model could be derived. The model estimates the mean annual root collar diameter increment within a 5-year interval for individual beech saplings (Gl. 2, Tab. 7). The model predictors (*initial diameter, competition, expected change of competition*) are comparable with single tree growth models for mature trees (Tab. 11).

Only such variables were considered in the model which are either easily obtained in the field or already available from routine inventories, or which can be derived from existing inventory data. For this reason it was necessary to parameterise a specific model component for estimating the initial root collar diameter of a Beech sapling (Gl. 3, Tab. 9). The initial root collar diameter is an important input variable for the growth model. The initial diameter was found to be an essential predictor. Knowledge of the initial diameter is indispensable because, when adding the estimated increment of a 5-year growth period, we need to be able to verify which sapling reaches or exceeds the threshold diameter (DBH 7 cm). A linear model was parameterised to estimate the breast height diameter from the root collar diameter (Eq. 4).

The approach presented in this study is suitable for estimating the change of a given regeneration structure and the ingrowth, based in available inventory data.

9. Résumé

Titre de l'article: *Recherche sur les croissances en diamètre de régénérations naturelles de hêtre.*

Des modèles pour générer des itinéraires de traitement sur la base d'états initiaux réellement observés doivent prendre en compte la dynamique de la régénération forestière naturelle et, en particulier, le passage à la futaie car c'est la seule façon possible d'estimer complètement les diverses conséquences des interventions sylvicoles. L'étude de cas présentée dans ce travail montre qu'il est possible de décrire par un modèle la croissance en diamètre d'une régénération naturelle de hêtre. La limite entre régénération et futaie est définie en Basse Saxe par un diamètre à hauteur de poitrine de 7 cm. Du fait que cette limite est définie comme un diamètre seuil il paraît sensé de modéliser la croissance en diamètre des individus de la régénération naturelle, au lieu de la croissance en hauteur comme on le trouve dans d'autres travaux, et de cette façon de prévoir le passage périodique à la futaie.

Les données de base de cette recherche proviennent des mesures sur 189 points d'inventaires dans des parcelles d'exploitation forestière, avec pour chacun deux dates d'observation, du service forestier Grünenplan en Basse Saxe. Au moment des observations de la deuxième campagne de mesures on récolta des arbres échantillons de la population de régénération et on étudia leur croissance en diamètre au collet par analyse de cernes. Sur la base de ces données on a pu construire à titre d'exemple pour l'espèce hêtre un modèle multiple log-linéaire pour la prédiction de l'accroissement annuel moyen du diamètre au collet pour une période de croissance de 5 ans. (2ème partie). Le modèle, contenant comme prédicteurs des

facteurs influençant la croissance tels *l'état initial*, la *concurrence* et la *variation de concurrence à attendre*, est comparable aux modèles de croissance adaptés aux arbres de peuplements adultes.

Lors du développement du modèle on n'a utilisé que de telles variables comme données d'entrée, parce qu'elles sont faciles à obtenir, qu'elles existent déjà comme données d'inventaire, ou qu'elles peuvent être déduite des données d'inventaire. Pour cette raison il était nécessaire de paramétrer un modèle ultérieur, plus large, qui estime le diamètre initial de la régénération de hêtre, information en règle générale non disponible directement dans les inventaires, en fonction des informations d'inventaire disponibles.

Le diamètre initial de la régénération est une grandeur d'entrée importante pour le modèle de croissance. On a renoncé à la production d'un modèle de croissance qui n'utilise pas le prédicteur «diamètre initial» car sa valeur de modèle est trop réduite et sa plausibilité de la combinaison de variables et des directions d'effet des prédicteurs est insuffisante. Cette grandeur est absolument indispensable parce que la croissance en diamètre pronostiquée d'une période de 5 années doit être ajoutée au diamètre au collet initial pour pouvoir vérifier, après transformation de ce nouveau diamètre en un diamètre à hauteur de poitrine, quels arbres ont atteint ou dépassé le diamètre seuil de passage à la futaie (7 cm). Pour la transformation du diamètre au collet en un diamètre à hauteur de poitrine on a paramétré un modèle linéaire qui estime la hauteur à hauteur de poitrine en fonction du diamètre au collet.

R. K.

10. Literatur

- AUSTIN, M. P. (1990): Community theory and competition in vegetation. *In*: GRACE, J. B. und TILMAN, D. (Hrsgb.): *Perspectives on plant competition*. San Diego, New York, Berkeley, Boston, London, Sydney, Tokyo, Toronto: Academic Press., 215–238.
- BIERMAYER, G. (1999): Aus der Sicht der Bayerischen Staatsforstverwaltung. Naturschutzgerechte Forsteinrichtung und Waldbewirtschaftung. *Allgemeine Forstzeitung* **54** (4): 162–165.
- BIGING, G. S. und M. DOBBERTIN (1992): A comparison of distance-dependent competition measures for height and basal area growth of individual conifer trees. *Forest Science* **38**: 695–720.
- BÖCKMANN, TH., J. SABOROWSKI, ST. DAHM, J. NAGEL und H. SPELLMANN (1998): Die Weiterentwicklung der Betriebsinventur in Niedersachsen. *Forst u. Holz* **53** (8): 219–226.
- BOSSEL, H. (1992): Modellbildung und Simulation: Konzepte, Verfahren und Modelle zum Verhalten dynamischer Systeme. Vieweg Verlag, Braunschweig, Wiesbaden, 400 S. 1996: TREEDYN3 forest simulation model. *Ecological Modelling* **90**: 187–227.
- BROSINGER, F. und A. ROTHE (2002): Die bayerische Staatsforstverwaltung erneuert ihre Waldbaugrundsätze. *Allgemeine Forstzeitung* **57** (4): 167–169.
- BRUNNER, A. (2004a): Regenerator – a forest regeneration model. Danish Forest and Landscape Research Institute. EU-project Nat-Man “nature-based management of beech in Europe”. Workpackage WP8, Working Report 46, Deliverable 10, 25 and 26. 78 S.. Zu finden unter: www.flec.kvl.dk/natman/html/getfile.asp?vid=463
- BRUNNER, A. (2004b): Scenarios of regeneration and stand production of beech under different silvicultural regimes with Regenerator. Danish Forest and Landscape Research Institute. EU-project Nat-Man “nature-based management of beech in Europe”. Workpackage WP13. Working Report 47. Deliverable 18, 34 and 35. 94 S.. Zu finden unter: www.flec.kvl.dk/natman/html/getfile.asp?vid=474
- CZAJKOWSKI, T., M. KÜHLING und A. BOLTE (2005): Einfluss der Sommer-trockenheit im Jahre 2003 auf das Wachstum von Naturverjüngung der Buche (*Fagus sylvatica* L.) im nordöstliche Mitteleuropa. *Allgemeine Forst und Jagdzeitung* **176** (8): 133–143.
- ELLENBERG, H. (1986): *Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen in ökologischer Sicht*. Verlag Eugen Ulmer. Stuttgart. 4. Aufl.. 989 S.
- FAHRMEIR, L., A. HAMERLE und G. TUTZ (1996): *Multivariate statistische Verfahren*. (2. Ed.) de Gruyter, Berlin.
- FERGUSON, D. E. und C. E. CARLSON (1993): Predicting regeneration establishment with the PROGNOSIS model. USDA For. Ser. INT-467: 54 S.
- FERGUSON, D. E. (1996): Modelling natural regeneration establishment in the Northern Rocky Mountains of the U.S.A. UIFRO Conference on Forest Regeneration and Modelling, J. P. SKOVGAARD and V. K. JOHANNSEN, editors, S. 30–40. Published by the Danish Forest and Landscape Research Institute.
- FERGUSON, D. E., A. R. STAGE und R. J. BOYD (1986): Predicting Regeneration in the Grand Fir-Cedar-Hemlock Ecosystem of the Northern Rocky Mountains. *Forest Sci.* **32**, No.1, Published by Society of American Foresters, Washington, D.C..
- GADOW, K. V. (2005): Das Mehrpfadprinzip der Forsteinrichtung. *AFZ/Der Wald* **9**(2005): 469–471.
- GADOW, K. V. (2006): Prinzipien der adaptiven Forsteinrichtung. *Österr. Forstzeitung*, Nov. 2006: 10–11.
- GOLSER, M. und H. HASENAUER (1997): Predicting juvenile tree height growth in uneven-aged mixed species stands in Austria. *Forest. Ecol. and Management.* **97**: 133–146.
- HANSEN, J. und N. TREMER (2005): Untersuchungen zur Konkurrenz innerhalb gemischter Naturverjüngungssysteme anhand von Stichprobenpunkten der niedersächsischen Betriebsinventur. Projektbericht für die Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft des Landes Rheinland-Pfalz.
- HASENAUER, H., G. KINDERMANN und D. MERKL (2000): Zur Schätzung der Verjüngungssituation in Mischbeständen mit Hilfe Neuraler Netze. *Forstw. Cbl.* **119**: 350–366.
- HAUHS, M., H. LANGE und A. KASTNER-MARESCH (2001): Complexity and Simplicity in Ecosystems: The case of forest management. *InterJournal of Complex Systems manuscript Nr. 415*.
- HERLING, H. (2005): Integration von Verjüngung in Waldwachstumssimulatoren. Dissertation. TU München, Fakultät für Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt, Lehrstuhl für Waldwachstumskunde. Weihenstephan.
- HINRICHS, L. (2006): Automatisierte Generierung von Behandlungspfaden für Mischbestände. *Allgemeine Forst und Jagdzeitung. Allgemeine Forst und Jagdzeitung* **177** (5): 77–85.
- KINDERMANN, G., H. HASENAUER und J. GASCH (2002): Ankommen und Wachstum von Naturverjüngung in Mischbeständen. *Centralblatt für das gesamte Forstwesen*, 119. Jahrgang, Heft 2: 159–186.
- LANDSBERG, J. J., R. H. WARING und N. C. COOPS (2003): Performance of the forest productivity model 3-PG applied to a wide range of forest types. *Forest Ecol. and Management.* **172**: 199–214.
- LEDERMANN, T. (2002): Ein Einwuchmodell aus den Daten der Österreichischen Waldinventur 1981–1996. *Centralblatt für das gesamte Forstwesen*, 119. Jahrgang, Heft 1: 40–76.
- MÄKELÄ, A., J. J. LANDSBERG, A. R. EK, T. E. BURK, M. TER-MIKAEALIAN, G. I. ÅGREN, C. D. OLIVER und P. PUTTONEN (2000): Process-based models for forest ecosystem management: current state of the art and challenges for practical implementation. *Tree Physiology* **20**: 289–298.
- MAYER, H. (1977): *Waldbau*. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, New York.
- NAGEL, J., H. DUDA und J. HANSEN (2006): Forest Simulator BWINPro7. *Forst und Holz*, 10, 61. Jg., 427–429.
- NIEDERSÄCHSISCHES FORSTPLANUNGSAMT (2000): Allgemeiner Teil des Betriebswerkes Niedersächsisches Forstamt Grünenplan. Wolfenbüttel.
- NIEDERSÄCHSISCHES FORSTPLANUNGSAMT (2001): Anweisung zur Betriebsinventur. Wolfenbüttel.
- NIEDERSÄCHSISCHES FORSTPLANUNGSAMT (2004): Forstliche Standortaufnahme – Geländeökologischer Schätzrahmen. Mittelgebirge, Bergland und Hügeland. Wolfenbüttel.
- NIEDERSÄCHSISCHES MINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN (1992): Langfristige ökologische Waldentwicklung in den Landesforsten. 2. Auflage. Hrsgb. Niedersächsische Landesregierung, Hannover.
- PRETZSCH, H. (1995): Zum Einfluss des Baumverteilungsmusters auf den Bestandszuwachs. *Allgemeine Forst und Jagdzeitung* **166** (9/10): 190–201.
- PRETZSCH, H., P. BIBER und J. DURSKEY (2002): The single tree-based stand simulator SILVA: construction, application and evaluation. *For. Ecol. Manage.* **162**: 3–21.
- PUKKALA, T. und T. KOLSTRÖM (1992): A stochastic spatial regeneration model for *Pinus sylvestris*. *Scand. J. For. Res.* **7**: 377–385.
- SAS INSTITUTE, Inc. (2000): *The SAS System for Windows*, Version 8.01. Cary, NC, USA.
- SCHWEIGER, J. und H. STERBA (1997): A model describing natural regeneration recruitment of Norway spruce (*Picea abies* L.) in Austria. *Forest Ecol. and Management.* **97**: 107–118.
- TREMER, N. (2006): Zuwachsuntersuchungen gemischter Naturverjüngungen zur Entwicklung eines Wuchs- und Einwuchmodells. Projektbericht für die Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft des Landes Rheinland-Pfalz.
- TREMER, N., J. HANSEN und M. SCHMIDT (2005): Schätzung der Naturverjüngungsstruktur auf Basis von Betriebsinventuren. *Allgemeine Forst und Jagdzeitung* **176** (1): 1–13.
- WAGNER, S. (1997): Ein Modell zur Fruchtausbreitung der Esche (*Fraxinus excelsior* L.) unter Berücksichtigung von Richtungseffekten. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* **168** (8): 149–155.
- WAGNER, S. (1999): Ökologische Untersuchungen zur Initialphase der Naturverjüngung in Eschen-Buchen-Mischbeständen. *Schriften a. d. Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt*, Bd. 129, J.D. Sauerländer's Verlag, Frankfurt a. Main, 262 S.
- WEBER, R. (1998): Statische und dynamische Evaluation von Prognosen. *In*: *ZA-Information* **43**, 111–123.