

*Aus dem Lehrstuhl für Waldwachstumskunde der Universität München/Freising*

## **Perspektiven einer modellorientierten Waldwachstumsforschung\***

### **Prospects of a Model Orientated Forest Yield Science**

Von H. PRETZSCH

Schlagwörter: Mischbestand; Einzelbaummodell; Wuchsgesetzmaßigkeiten; Strukturgenerator; quasisikale Zuwachsprognose

#### **Zusammenfassung**

Der Übergang von einer massenleistungsorientierten Ertragskunde, die Zuwachsprozesse in strukturarmen Reinbeständen dendrometrisch verfolgt, zu einer systemorientierten Waldwachstumsforschung, die biologische Erklärungsmuster und ökologische Steuerungsprogramme für das Wachstum strukturreicher Rein- und Mischbestände anstrebt, erfordert eine Neuorientierung der Wachstumsmodellforschung. Wie künftige Wachstumsmodelle aussehen könnten, wird anhand des einzelbaumorientierten Wachstums-simulators SILVA vorgestellt, der die Entwicklung der Einzelbäume eines Bestandes in Abhängigkeit von ihren Standortbedingungen und räumlichen Wuchskonstellationen modellhaft nachbildet und als Planungsinstrument für ein breites Spektrum von Baumarten, Mischungsformen, Mischungsstrukturen und Behandlungsvarianten eingesetzt werden kann. Durch Vorschaltung des Strukturgenerators STRUGEN, der aus verbalen Befunden wirklichkeitsnahe Anfangsstrukturen für Prognoselaufe erzeugt, werden die praktische Einsatzmöglichkeit des Simulators SILVA und seine Brauchbarkeit als Forschungswerkzeug verbessert. Zur Konsolidierung dieses Modellansatzes werden künftig Arbeitsschwerpunkte auf die Erweiterung und Organisation der für die Modellparametrisierung und -validierung erforderlichen waldwachstumskundlichen Datenbasis von Rein- und Mischbeständen, auf die Erforschung der Wuchsgesetzmaßigkeit von Einzelbäumen und die Erweiterung des waldwachstumskundlichen Aussagespektrums um Angaben zur Stamm- und Kronenmorphologie, Güte-, Sorten- und Wertleistung und Bestandesstruktur gelegt. Die zugrundegelegte Modellidee fordert die Organisation waldwachstumskundlichen Wissens, die Synthese von Einzelaspekten des Waldwachstums zu einer Vorstellung vom Gesamtsystem und trägt zur Identifikation von Wissenslücken bei.

Key words: mixed stand; single tree growth model; growth laws; stand structure generator; quasi-causal growth prognosis

#### **Summary**

The transition from a volume increment-orientated yield science which follows dendrometrically the increment processes in pure stands without pronounced structure, to a system-orientated science of forest growth whose aims are biologically explanative patterns and ecological management programmes for the growth of richly structured pure and mixed stands, demands a new orientation of growth model research. What future growth models could be like is presented by means of the single-stem orientated growth simulator SILVA that reproduces the development of the single stems of a stand in dependence of locational conditions and spatial growth constellations. The simulator can be used as a planning instrument for a wide range of tree species, mixture forms, mixture structures, and treatment measures. In combination with the stand structure generator STRUGEN which – from verbal findings – generates realistic initial structures for prognostic runs, the practicability of the simulator SILVA and its usefulness as a research instrument are improved. In order to consolidate this model approach, emphasis will in future be on the investigation of the growth laws of single trees, the expansion and organization of the data basis (necessary for model parameterization and model validation) for pure and mixed stands as well as on the extension of statements by the following details of forest growth research: stem and crown morphology, quality of wood, assortment yield, financial yield and stand structure. The underlying model concept supports the organization of forest growth know-how, the synthesis of single aspects of forest growth into a concept of the entire system, and helps to identify gaps in our knowledge about forest growth research.

\* Vortrag anlässlich der Forstlichen Hochschulwoche vom 26.–28. 10. 1994 in München.

## 1 Neuorientierung der Modellforschung in der Waldwachstumskunde

Wenn wir gegenwärtig die Modellforschung intensivieren und den Übergang von statischen Ertragstafeln für Reinbestände zu neuen dynamischen Wachstumsmodellen für Rein- und Mischbestände anstreben, so ist das die Konsequenz aus einer grundlegenden Neuorientierung der Waldwachstumsforschung, die in fünf Punkten charakterisiert werden kann (Abb. 1):

Erstens konstatieren wir eine Schwerpunktverlagerung von der Forschung in gleichaltrigen Reinbeständen zur Untersuchung strukturreicher Rein- und Mischbestände. Mit der Intensivierung der Forschung in strukturreichen Rein- und Mischbeständen reagiert die Waldwachstumskunde auf die zunehmende Bedeutung solcher Wälder. Nach den Ergebnissen der Bundeswaldinventur sind mehr als 40 Prozent der gesamten Waldfläche mit Mischbeständen – mit einer Beimischung > 10 Prozent bestehend aus ein oder zwei Mischbaumarten – bestockt (SMALTSCHINSKI 1990). Es dominieren die Mischungen Fichte/Buche, Fichte/Kiefer und Eiche/Buche. Ein Blick in die Waldbauplanung der Länder zeigt, daß die Mischbestandsfläche in Zukunft weiter zunehmen wird.

Zweitens zeichnet sich ein Paradigmenwechsel vom Bestandesdenken zum Einzelbaumansatz ab. Dieser Übergang ist zum einen eine Reaktion auf neue Behandlungsprogramme – wie z. B. die Auslese- und Strukturdurchforstung –, bei denen Aussagen über Einzelbaumentwicklungen viel wichtiger sind als Bestandesmittelwerte. Zum anderen verspricht eine einzelbaumweise Betrachtung einen bestmöglichen Zugang zum Verständnis und zur Modellierung von Mischbeständen (ASSMANN 1953/54; MONSERUD 1975; PRETZSCH 1992; STERBA 1989 und 1994).

Drittens scheint das Erkenntnispotential des bisherigen dendrometrisch-beschreibenden Zugangs zum Waldwachstum zunächst einmal ausgeschöpft zu sein. Die zunehmende Überprägung des Waldwachstums durch zuwachssteigernde und zuwachsmindernde Störgrößen – wie z. B. den Anstieg des CO<sub>2</sub>-Gehalts in der Luft, den Stickstoffeintrag oder die in den kommenden Jahrzehnten zu erwartenden Klimaänderungen – erfordert den Übergang zu einer kausalen, biologisch-erklärenden Denkweise. Die Waldwachstumsforschung sollte bei einem solchen Übergang auf den großflächig vorhandenen Aufzeichnungen zum Standort-Leistungs-Bezug aufbauen und auf die Erzeugung von Informationen ausgerichtet bleiben, die für forstwirtschaftliche Planungs-, Vollzugs- und Kontrollmaßnahmen notwendig sind (KAHN 1993; KIMMINS 1993; MOOSMAYER u. SCHOPFER 1972).

Viertens wird die Auffassung des Bestandes als Produktions- und Zuwachsträger mehr und mehr ersetzt durch eine Betrachtung des Bestandes als bewirtschaftetes Ökosystem. Waren in der Vergangenheit Volumenzuwachs und Massenertrag von primärem Interesse, so sind heute Aussagen über Wert, Stabilität, Struktur, Biodiversität oder Naturnähe mindestens ebenso wichtig wie Zuwachs- und Ertragswerte (OTTO 1994; THOMASUS 1992).

Fünftens steht der Waldwachstumsforschung eine fundamentale Änderung ihrer Daten- und Erkenntnisquellen bevor: Stützen wir uns bisher vorwiegend auf das Informationspotential ertragskundlicher Dauerbeobachtungsflächen, so stehen uns künftig neue Informationsquellen der Forstwirtschaft und Forstwissenschaft zur Verfügung, beispielsweise die Ergebnisse von Ökosystemstudien, die Resultate ökophysiologischer Studien über Schadreaktionen des Waldes, aber auch die Ergebnisse der Betriebsinventuren der Forsteinrichtung und der Standortkartierung, die von der Waldwachstumsforschung bisher nicht annähernd ausgeschöpft wurden (FRANZ 1987; WYKOFF, CROOKSTON u. STAGE 1982).

Zusammenfassend läßt sich die Neuorientierung als Übergang von einer massenleistungsorientierten Ertragskunde, die Zuwachsprozesse dendrometrisch verfolgt, zu einer systemorientierten Waldwachstumsforschung, die biologische Erklärungsmuster und ökologische Steuerungsprogramme für das Waldwachstum anstrebt, bezeichnen.

Welche Perspektiven ergeben sich aus dieser Neuorientierung für die waldwachstumskundliche Modellforschung? Künftige Wachstumsmodelle müssen für Rein- und Mischbestände

geeignet sein und Aussagen über das Wachstum von Einzelbäumen und Teilkollektiven eines Bestandes mit einschließen. Sie sollten sich auf kausale oder quasikausale Erklärungsmuster stützen, ökologisch bedeutsame Aussagewerte mit abdecken und so aufgebaut sein, daß neue Informationsquellen über das Waldwachstum ohne großen Aufwand eingebunden werden können. Unsere bisherigen Wuchsmodelle – Bestandeswuchsmodelle wie verteilungsgestützte Modelle – entstammen durchweg dem Reinbestandsdenken. Sie können zwar provisorisch auf Mischbestände und auf veränderte Wuchsbedingungen übertragen werden und so vorübergehend über unseren Informationsmangel hinweghelfen. An ein Weiterkommen

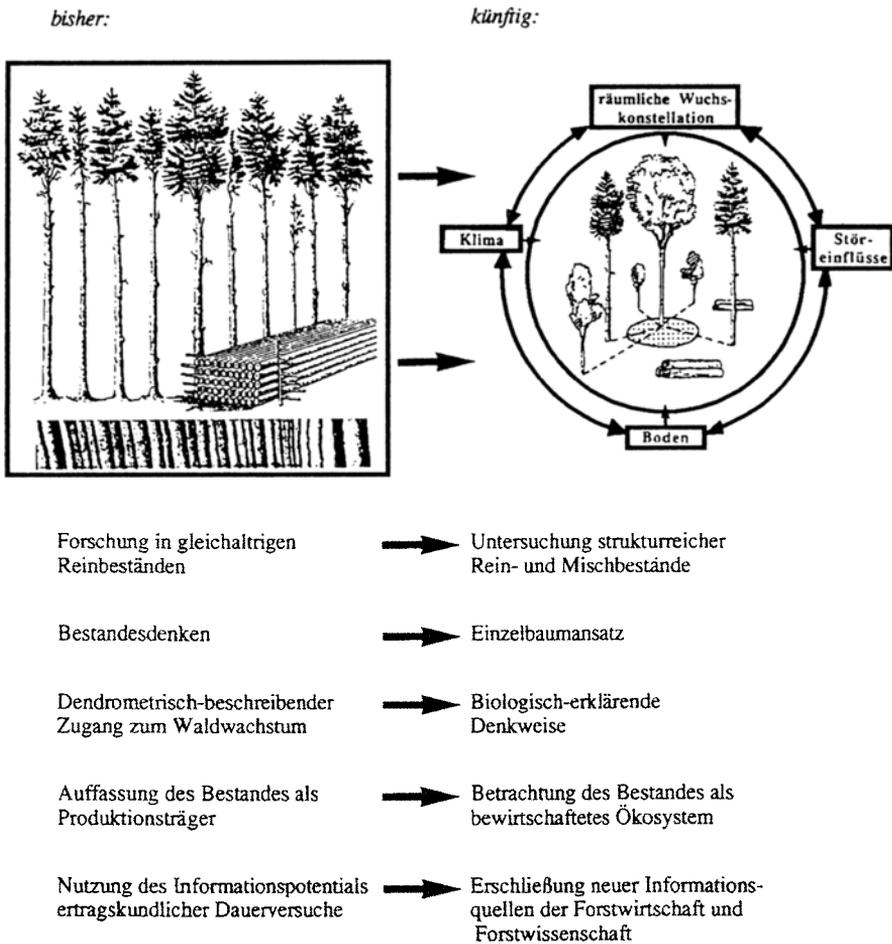


Abb. 1. Übergang von einer massenleistungsorientierten Ertragskunde, die Bestandesentwicklungen dendrometrisch verfolgt, zu einer einzelbaumorientierten Waldwachstumsforschung, die den Wald als räumlich-zeitliches System versteht, biologische Erklärungsmuster und ökologische Steuerungsprogramme anstrebt

Fig. 1. Transition from a volume growth-orientated yield science to a yield science with the emphasis on single stems. Hereby, forests are considered as space-time systems; the aims are explanations on biological grounds and ecological management programmes

ist aber nur zu denken, wenn die Waldwachstumsforschung das Gedankengebäude der Reinbestands-Modellforschung verläßt und eine neue Generation flexibler Wachstumsmodelle für Rein- und Mischbestände aufbaut, die den zentralen Baustein für ein beweglicheres ertragskundliches Informationssystem bildet. Als ertragskundliches Informationssystem wird in diesem Zusammenhang der Informationsstrang bezeichnet, der von Daten aus forstwissenschaftlichen und forstwirtschaftlichen Quellen über die Datenauswertung zur Wachstumsmodellbildung und in Gestalt von Wachstumsmodellen und Pflegerichtlinien zurück zur forstlichen Wissenschaft und Praxis führt. Forstwissenschaft und Forstwirtschaft versorgen dieses Informationssystem mit ertragskundlichen Basisdaten, die Daten werden gesammelt, ausgewertet und in möglichst aktuellen, wirklichkeits- und praxisnahen Wachstumsmodellen verdichtet (Abb. 2). Die Wachstumsmodelle dienen der Forstwissenschaft als Forschungsinstrument und der Forstlichen Praxis als Arbeitsgrundlage für Planung, Vollzug und Kontrolle.

Wie künftige Wachstumsmodelle aussehen könnten, wird im folgenden anhand des Modell-Prototyps SILVA vorgestellt, der gegenwärtig am Lehrstuhl für Waldwachstumskunde in München/Freising für bayerische Fichten-Buchen-Mischbestände ausgearbeitet wird. Bisher auf einige Standorteinheiten begrenzt, soll das Modell künftig auf die Fläche gebracht, auf andere bedeutsame Mischungen übertragen und bis zur Praxisreife weiterentwickelt werden. Dem Bayerischen Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten sei an dieser Stelle für die wirkungsvolle Unterstützung dieser Forschungslinie des Lehrstuhls gedankt.

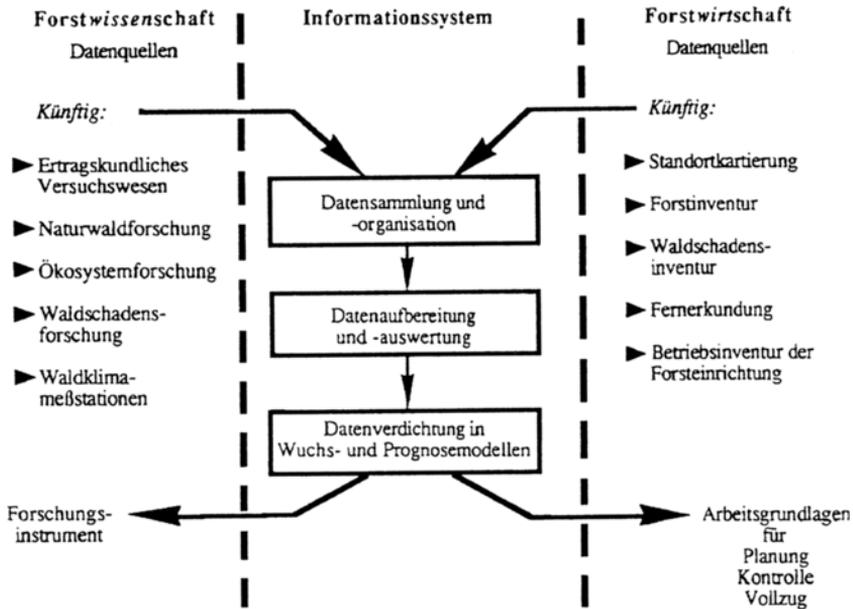


Abb. 2. Als ertragskundliches Informationssystem wird der Informationsstrang bezeichnet, der von Daten aus forstwissenschaftlichen und forstwirtschaftlichen Quellen, über die Datenauswertung, zur Wachstumsmodellbildung und in Gestalt von Wachstumsmodellen und Pflegerichtlinien zurück zur forstlichen Wissenschaft und Praxis führt

Fig. 2. Information system of yield science: The information material which – starting from basic data of forest science, and switching to the data evaluation and to the formation of growth models – goes back to practical forest science

## 2 Prototyp eines positionsabhängigen Einzelbaummodells

### 2.1 Modellansatz

Die eigentliche Neuerung des Modells SILVA besteht darin, daß es das Bestandeswachstum nicht mehr – wie unsere Ertragstabellen – anhand von Bestandessummen- oder Bestandesmittelwerten beschreibt. Sondern es löst den Bestand in sein Mosaik von Einzelbäumen auf und bildet deren Miteinander als dynamisches, räumlich-zeitliches System nach. Nach Vorgabe einer Startsituation zum Zeitpunkt  $t = 0$  wird die Bestandesstruktur einzelbaumweise in Abhängigkeit von den vorherrschenden Standortbedingungen, der Wuchskonstellation und dem definierten Durchforstungsregime fortgeschrieben. Von den bisherigen starren Bestandeswachstumsmodellen gehen wir also zu einem flexibleren Einzelbaumwachstumssimulator über. Abbildung 3 zeigt den verbleibenden Bestand (oben) und ausscheidenden Bestand (unten) von mäßig hochdurchforsteten Fichten-Buchen-Mischbeständen im Forstamt Zwiesel nach den Ergebnissen eines Simulationslaufes, von dem hier ein 40jähriger Ausschnitt abgebildet ist.

Stark vereinfacht dargestellt, wird ein solcher Prognoselauf in den folgenden Schritten abgewickelt (Abb. 4): Zu Beginn ist eine Eingabe der Steuer- und Startwerte vorgesehen. Es werden die betreffenden Wuchsbedingungen spezifiziert, das durchzuspielende Durchfor-

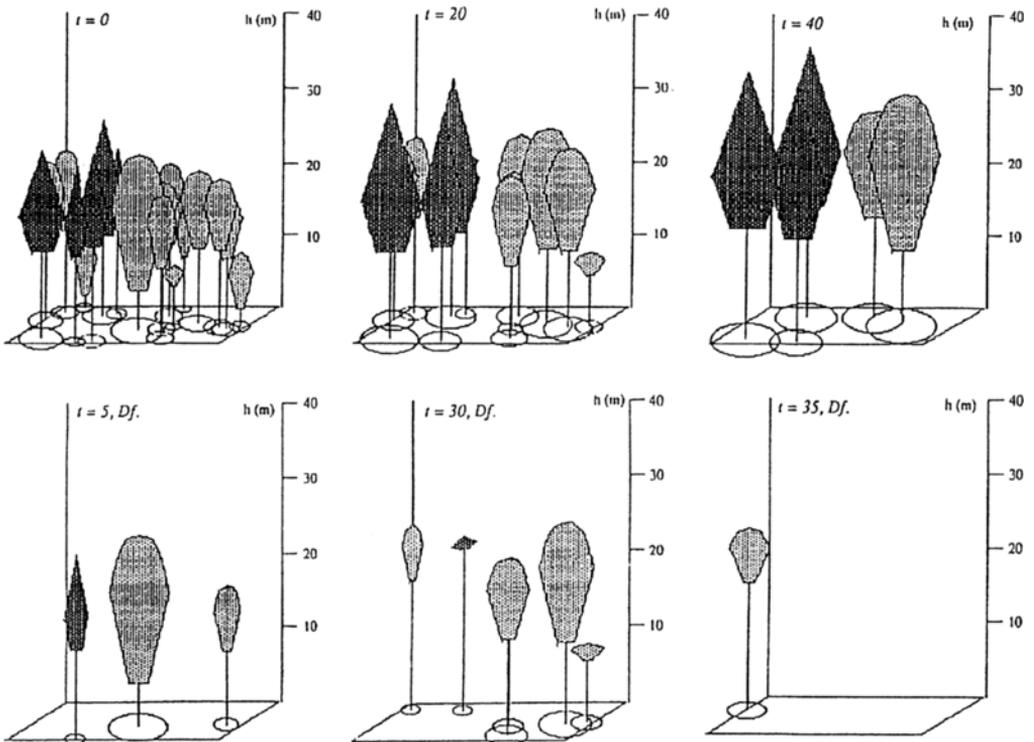
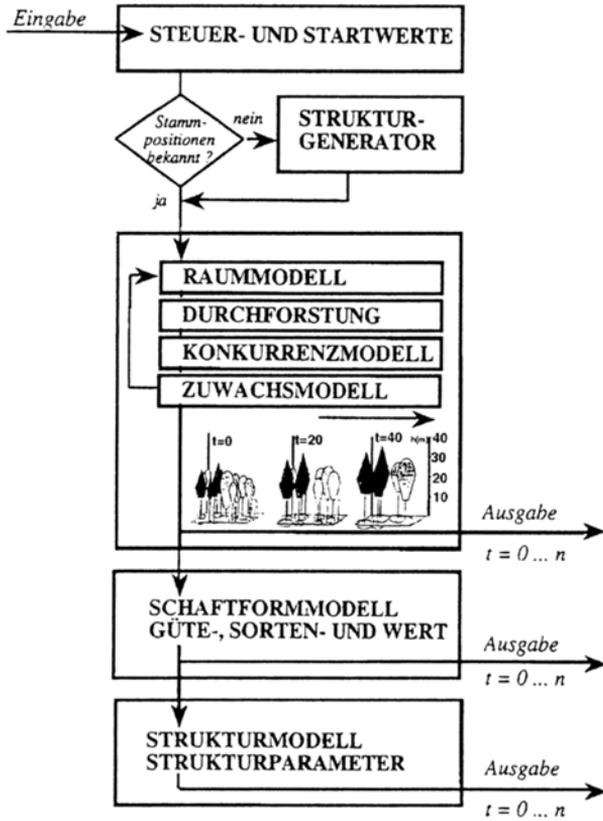


Abb. 3. Modellierung der Bestandesentwicklung als räumlich-zeitliches System. Verbleibender Bestand (oben) und ausscheidender Bestand (unten) von Fichten-Buchen-Mischbeständen im Forstamt Zwiesel nach den Ergebnissen eines Simulationslaufes über 40 Jahre (Alter von Fichte und Buche zum Zeitpunkt  $t = 0$  betrug 60 bzw. 80 Jahre)

Fig. 3. The stand development is represented as a space-time system. Main crop (above) and trees removed by thinnings (below) of mixed stands of spruce and beech in the forest of Zwiesel according to the results of a 40-year simulation (the age of spruce/beech at the beginning  $t = 0$  being 60/80 years)

Abb. 4. Flußdiagramm mit den wichtigsten Rechenschritten in einem Simulationsprozeß mit dem Modell-Prototyp SILVA

Fig. 4. Diagram considering the most important steps in a simulation process with the model prototype



stungsprogramm festlegt und die Baumliste mit den Ausgangsdimensionen des Bestandes eingesehen. Fehlen in der Baumliste die Stammpositionen und Kronendimensionen des fortzuschreibenden Bestandes, so werden diese vom Strukturgenerator STRUGEN in einem zweiten, zwischengeschalteten Schritt wirklichkeitsnah ergänzt (vgl. Abschn. 2.3). Im dritten und vierten Schritt wird die Struktur des Bestandes vor bzw. nach der Durchforstung dreidimensional nachgebildet und grafisch dargestellt. Aus diesem dreidimensionalen Bestandesmodell läßt sich im fünften Schritt für jeden Baum dessen individuelle Wuchskonstellation in Form von Konkurrenzindizes für vertikale Übershattung und horizontale Kroneneinengung abgreifen. Diese Konkurrenzindizes werden im sechsten Schritt zur Schätzung der Einzelbaumentwicklung in der folgenden 5jährigen Zuwachsperiode eingesetzt. Die aktualisierten Zustandsgrößen der Einzelbäume am Ende der ersten 5jährigen Zuwachsperiode, wie Durchmesser, Höhe, Kronenansatzhöhe, Kronenbreite und Überlebensstatus, bilden die Startwerte für die zweite 5jährige Zuwachsperiode. Die Schritte 3 bis 6 werden so oft wiederholt, bis der gesamte Prognosezeitraum in Zuwachsperioden von jeweils 5 Jahren durchlaufen ist und der Prognosezyklus mit der Ausgabe der Ergebnisse abschließt. Wie das zeigt, determiniert die anfängliche Wuchskonstellation der Einzelbäume ihren Zuwachs in der ersten Fünfjahresperiode. Durch den Zuwachs der Einzelbäume verändert sich die Struktur von Baum und Bestand, die Strukturveränderungen stellen die Wuchskonstellation der Einzelbäume neu ein, und die neue Wuchskonstellation steuert wiederum den Zuwachs in der zweiten Fünfjahresperiode usw. Dieser fünfjährige Schrittzyklus repräsentiert einen Regelkreis, der das Kernstück des Wachstumsmodells darstellt. Die Konkurrenzindizes sind Maßzahlen für die räumliche Wuchskonstellation der Einzelbäume und Regelgrößen in diesem Zyklus.

## 2.2 Einsatz als Prognoseinstrument

Die Ergebnisse eines Simulationslaufes (Abb. 5) umfassen detaillierte Informationen über das Einzelbaumwachstum, wie Durchmesser-, Höhen- und Kronenentwicklung sowie Überlebensstatus aller Bestandesglieder über der Zeit. Durch summarische Betrachtung aller Einzelbaumveränderungen gelangt man außerdem zu den klassischen bestandesbezogenen Summen- und Mittelwerten. Abbildung 5a zeigt beispielhaft die Sägezahnkurve der Vorratsentwicklung in Vorratsfestmetern Derbholz pro ha für Fichte, Buche und Gesamtbestand nach den Ergebnissen des auf Abbildung 3 ausschnittsweise dargestellten Prognoselaufes. Die Ergebnisse des Simulationslaufes werden schließlich in Standort-Leistungstabellen zusammengefaßt, die den bekannten Aufbau von Ertragstabellen haben (Abb. 5b).

## 2.3 Strukturgenerator zur Erzeugung wirklichkeitsnaher Startwerte

Indem positionsabhängige Einzelbaummodelle den Bestand als Raum-Zeit-System nachbilden, benötigen sie als Startwerte für einen Prognoselauf die Stammfußkoordinaten und Kronendimension aller Einzelbäume. Trotz ihres äußerst flexiblen Abbildungsverhaltens waren solche Einzelbaummodelle in ihrer praktischen Anwendbarkeit bisher eher begrenzt. Denn die von ihnen als Anfangswerte benötigten Stammverteilungspläne und Kronenkarten liegen uns bestenfalls von langfristigen Versuchsfeldern oder permanenten Probefeldern vor. Mit dem Strukturgenerator STRUGEN wird gegenwärtig ein erster pragmatischer Lösungsweg dafür vorgezeichnet, wie auch dann, wenn keine Stammverteilungskarten, sondern nur verbale Strukturbefunde, wie „Einzelmischung, Truppmischung, Gruppenmischung, Horstmischung“ vorliegen, räumliche Bestandesstrukturen als Startwerte erzeugt werden können, die in ihren dynamikprägenden Strukturmerkmalen mit den wirklichen Beständen gut übereinstimmen (PRETZSCH 1993).

Kernstück dieses Strukturgenerators ist ein homogener POISSON-Prozeß. Angenommen, er soll eingesetzt werden, um die Stammzahldurchmesserverteilung einer Zwei-Arten-Mischung auf eine Testfläche auszubringen, dann werden zunächst alle Bäume der Durchmesser- und Verteilung von Baumart 1 mit zufälligen, uniform verteilten  $x$ - und  $y$ -Koordinaten versehen, die als „Punkteregen“ auf die Fläche fallen (Abb. 6, links). Zur Erzeugung bestimmter Verteilungsmuster werden diese Punkte nun mit verschiedenen Wahrscheinlichkeiten als Stammfußpunkte akzeptiert. Diese verschiedenen Wahrscheinlichkeiten werden über die Funktion  $Z_C(x, y)$  gesteuert, d. h. die Punkte müssen einen ersten Filter passieren, der die Makrostruktur des Bestandes herstellt, wie z. B. Femelstruktur, Rottenstruktur, Ausprägung von Gassen und Säumen oder Einzel-, Trupp-, Gruppen- oder Horstmischung. Die Funktion  $Z_C(x, y)$ , die den homogenen POISSON-Prozeß in einen inhomogenen umbildet, wird aus den Verbalansprachen der Bestandesstruktur regelbasiert so aufgebaut, daß sie die betreffenden Strukturen wirklichkeitsnah erzeugen kann. Von den durch den ersten Filter gelangten Punkten werden nun nur die als Stammfüße akzeptiert, die bestimmte Mindestabstände zu bereits akzeptierten Nachbarbäumen haben, d. h. bevor ein Punkt endgültig als Stammfußpunkt etabliert wird, muß er durch einen zweiten Filter, der die arttypische Individualdistanz zwischen benachbarten Bäumen sicherstellt. Dieser Punktprozeß wird so lange wiederholt, bis die gesamte Durchmesser- und Verteilung abgearbeitet ist.

Soll, wie in dem auf Abbildung 6 dargestellten Beispiel, eine Zwei-Arten-Mischung erzeugt werden, so schließt ein zweiter POISSON-Prozeß an. Baumart 2 wird nach demselben Prinzip wie Baumart 1, aber unter Berücksichtigung der auf der Fläche bereits etablierten Bäume eingebracht (Abb. 6, rechts). Die Funktion  $Z_D(x, y)$  steuert dabei die Durchmischung beider Arten. Auch der Punktprozeß zur Etablierung der zweiten Baumart wird so lange wiederholt, bis alle Bäume ihrer Stammzahl-Durchmesserverteilung abgearbeitet sind. Individualdistanzen, Kronendimensionen und Baumhöhen werden über art- und standortspezifische Funktionen gesteuert. Sind alle Bestandesglieder auf der Fläche untergebracht,

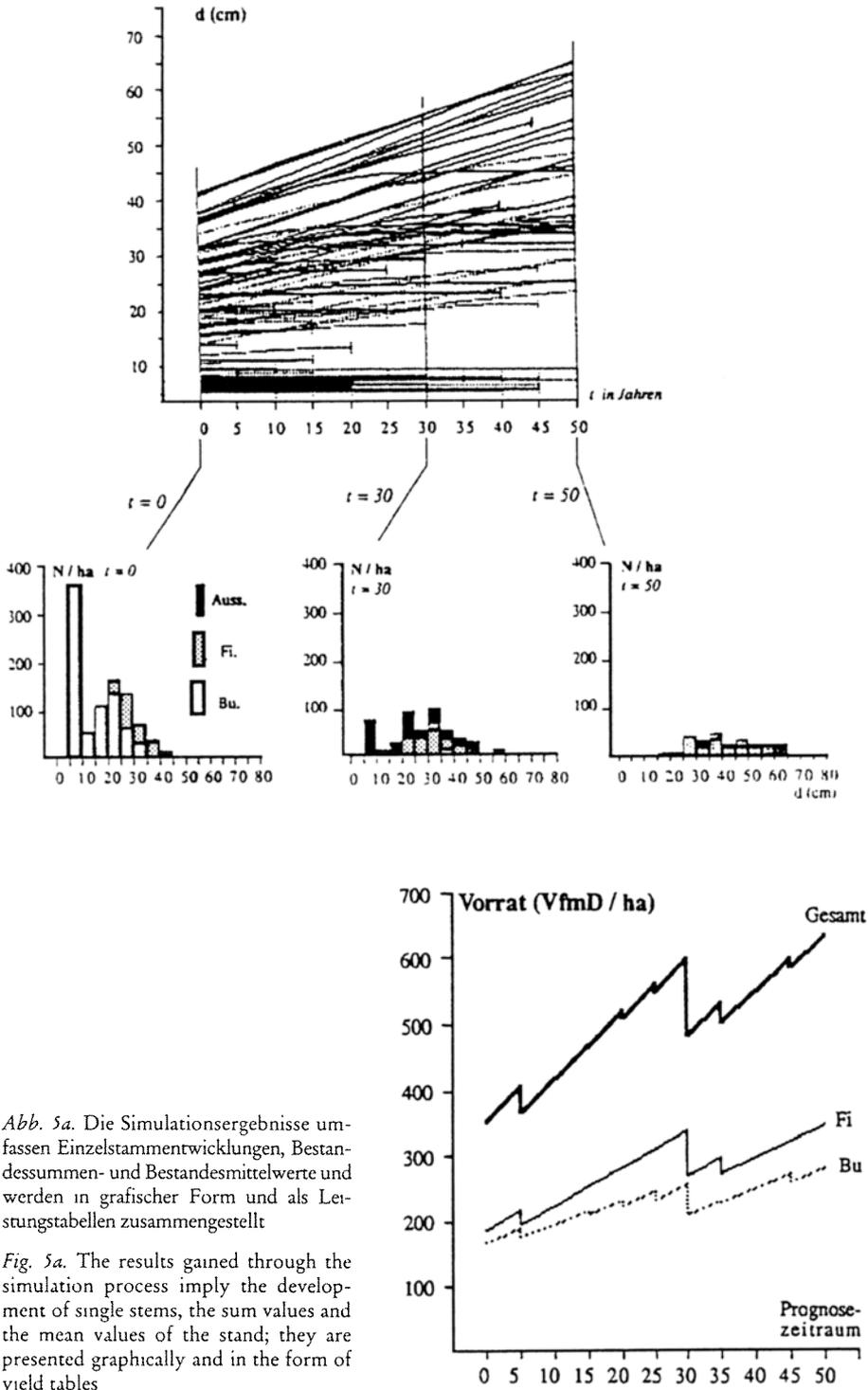


Abb. 5a. Die Simulationsergebnisse umfassen Einzelstammentwicklungen, Bestandessummen- und Bestandesmittelwerte und werden in grafischer Form und als Leistungstabellen zusammengestellt

Fig. 5a. The results gained through the simulation process imply the development of single stems, the sum values and the mean values of the stand; they are presented graphically and in the form of yield tables

dann steht die erzeugte Baumverteilungskarte als Ausgangssituation für Prognoseläufe zur Verfügung.

Wenn von einem fortzuschreibenden Bestand alle Strukturinformationen, also auch die Stammfußkoordinaten für den Zeitpunkt  $t = 0$  bekannt sind, so nutzt das Modell selbstverständlich die Originalwerte. Fehlen dagegen Baumverteilungs- und Kronenkarten und liegt nur eine verbale Charakterisierung der Mischungsform vor, dann fungiert STRUGEN als

Baumart	verbleibender Bestand						ausscheidender Bestand						Gesamtbestand				Alter	Baumart
	biologische Oberhöhe	Mittelhöhe	Stammzahl	Mittlerer Durchmesser	Grundfläche	Derholzvorrat	Derholzformzahl	Mittelhöhe	Stammzahl	Mittlerer Durchmesser	Grundfläche	Derholzvorrat	Derholzvorrat	lfd. jährl. Grundflächenzuwachs	lfd. jährl. Derbholzzuwachs	A		
BA	h <sub>b</sub>	h <sub>m</sub>	N	d <sub>m</sub>	G	V <sub>D</sub>	f <sub>1,3</sub>	h <sub>m</sub>	N	d <sub>m</sub>	G	V <sub>D</sub>	V <sub>D</sub>	Lz G	Lz VD	A	BA	
FI	29.4	25.7	200	31.1	15.2	187	480	0.0	0	0.0	0.0	0	0	0.33	6.2	60	FI	
BU	24.7	20.8	768	16.6	16.6	169	490	0.0	0	0.0	0.0	0	0	0.21	4.3	80	BU	
SU			968		31.8	356			0		0.0	0	0	0.55	10.4		SU	
FI	31.3	27.2	176	33.1	15.1	196	476	26.6	24	30.2	1.7	22	0.32	5.9	65	FI		
BU	26.0	21.9	688	17.3	16.3	176	494	21.0	80	14.9	1.4	14	0.21	4.2	85	BU		
SU			864		31.4	372			104		3.1	36	0.52	10.1		SU		
FI	32.9	28.5	176	34.8	16.7	225	473	0.0	0	0.0	0.0	0	0	0.32	6.1	70	FI	
BU	27.2	23.1	632	18.5	17.0	195	498	14.2	56	8.8	0.3	2	0.21	4.4	90	BU		
SU			808		33.7	420			56		0.3	2	0.53	10.5		SU		
FI	39.2	36.4	104	49.7	20.2	326	443	0.0	0	0.0	0.0	0	0	0.25	4.9	105	FI	
BU	33.8	32.0	160	35.5	15.9	264	522	26.8	16	25.4	0.8	11	0.17	4.4	125	BU		
SU			264		36.0	590			16		0.8	11	0.42	9.3		SU		
FI	39.5	37.2	104	51.2	21.4	350	440	0.0	0	0.0	0.0	0	0	0.00	0.0	110	FI	
BU	34.6	32.9	152	36.8	16.1	278	523	28.3	8	30.5	0.6	9	0.00	0.0	130	BU		
SU			256		37.5	628			8		0.6	9				SU		

Abb. 5b. Die Simulationsergebnisse umfassen Einzelstammentwicklungen, Bestandessummen- und Bestandesmittelwerte als Leistungstabellen zusammengestellt

Fig. 5b. The results gained through the simulation process imply the development of single stems, the sum values and the mean values of the stand, they are presented in the form of yield tables

Datengenerator (Abb. 4). Er erzeugt wirklichkeitsnahe Werte, die das Modell als Startwerte für Prognoseläufe einsetzt. Indem er gutachtlich erhobene Strukturbefunde, wie z. B. Truppmischung, Gruppenmischung oder Horstmischung, in Anfangs-Baumverteilungen für hochauflösende Wuchsmodelle umsetzt, ebnet der Strukturgenerator den Weg dazu, abstandsabhängige Einzelbaummodelle für Rein- und Mischbestände großflächig einzusetzen.

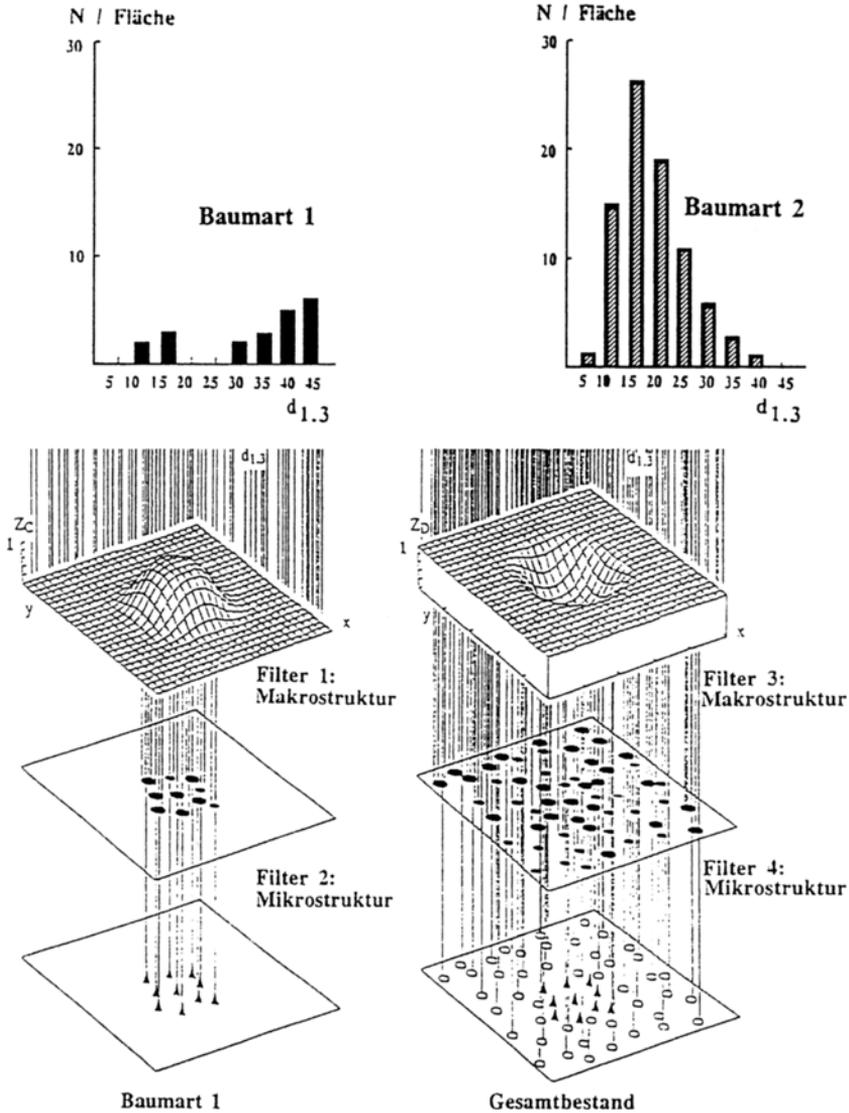


Abb. 6. Durch Kombination eines inhomogenen POISSON-Prozesses, der die Mischungscluster erzeugt, und eines hard core-Prozesses, der die Mindestabstände zwischen Nachbarn sicherstellt, entsteht ein Strukturgenerator, mit dem wirklichkeitsnahe Strukturen von Rein- und Mischbeständen erzeugt werden können

Fig. 6. By combining the inhomogeneous POISSON-process that generates the mixture clusters and a hard-core process that guarantees the minimum distance between neighbour trees, a stand structure generator is created which is able to generate realistic structures of pure and mixed forest stands

#### 2.4 Verbund von Strukturgenerator und Wuchsmodell als Forschungswerkzeug

Mit dem Verbund von Zuwachsmodell und Strukturgenerator lassen sich Simulationsstudien zum Zusammenhang zwischen Struktur und Zuwachs durchführen. Zu diesem Zweck werden mit STRUGEN gezielt Bestandesstrukturen generiert, die sich dann vom angekopplten Wuchsmodell auf ihren Zuwachs durchrechnen lassen. Diese Einsatzmöglichkeit des Prognosemodells gewinnt erhebliche Bedeutung bei der Wachstumsprognose in strukturreichen Waldbeständen und soll an einem Beispiel verdeutlicht werden. Abbildung 7 zeigt verschiedene Baumverteilungsmuster eines Fichten-Tannen-Buchen-Mischbestandes: Regelmäßige Verteilungen, wie sie bei künstlichen Bestandesbegründungen, zufällige Verteilungen, die im Plenterwald und geklumpfte, die beispielsweise im Bergmischwald entstehen (oben). Ferner sind Gassen mit verschiedenen Breiten und Richtungen (Mitte) und Saum-

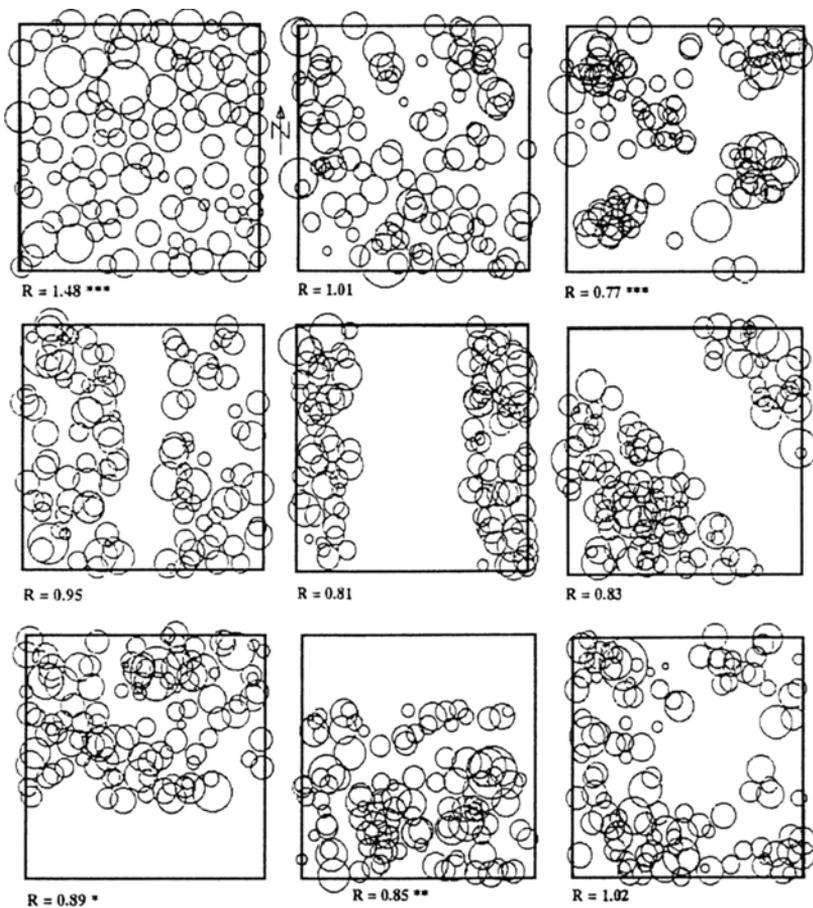


Abb. 7. Mit dem Strukturgenerator erzeugte Baumverteilungsmuster, die sich durch das Modell SILVA in ihrer Wirkung auf den Bestandesgrundflächenzuwachs untersuchen lassen. Regelmäßige, zufällige und geklumpfte Verteilung (oben), Gassen mit verschiedenen Breiten und Richtungen (Mitte) und Saum- und Femelstrukturen (unten)

Fig. 7. Spatial patterns generated by the stand structure generator. They can be examined by the model SILVA in their effect on the basal area increment of the stand. Regular, random, and clustered distribution (above), log trails of different width and direction (middle), and border and femel structure (below)

und Femelstrukturen (unten) dargestellt, wobei alle Strukturen mit dem Strukturgenerator erzeugt wurden. Durch Verbund von Strukturgenerator und Zuwachsmodell kann nun gezielt der Frage nachgegangen werden, wie sich das Zuwachsverhalten eines Bestandes beispielsweise beim Übergang von regelmäßiger Verteilung zu zufälliger und geklumpter Verteilung verändert (Abb. 7, oben, von links nach rechts).

Zur Prüfung dieser Frage wurden in einer Fallstudie für Bergmischwälder aus Fichte, Tanne und Buche mit STRUGEN Baumverteilungen erzeugt, die von streng regelmäßiger Verteilung bis hin zur stark geklumpten Verteilung reichen. Die Verteilungsmuster lassen sich mit dem Aggregationsindex  $R$  von CLARK und EVANS (1954) charakterisieren, der das Verhältnis zwischen dem beobachteten mittleren Abstand  $\bar{r}$  beobachtet zum nächsten Nachbarn auf einer Fläche und dem erwarteten mittleren Abstand  $\bar{r}_{\text{erwartet}}$  erwartet zum nächsten Nachbarn bei zufälliger Baumverteilung beschreibt.

$$R = \frac{\bar{r}_{\text{beobachtet}}}{\bar{r}_{\text{erwartet}}}, \text{ wobei}$$

$$\bar{r}_{\text{erwartet}} = \frac{1}{2\sqrt{\frac{N}{A}}},$$

$r_i$  die Abstände der  $i = 1 \dots N$  Bäume auf einer Testfläche zu ihren nächsten Nachbarn,  $N$  die Gesamtzahl der Bäume auf einer Testfläche und  $A$  die Größe einer Testfläche in  $\text{qm}$  bezeichnet. Der Aggregationsindex  $R$  liegt zwischen 0 (stärkste Klumpung) und 2,1491 (streng regelmäßige Verteilung). Werte kleiner als 1,0 zeigen eine Tendenz zur Klumpung, Werte um 1,0 eine zufällige Verteilung und Werte über 1,0 eine Tendenz zur regelmäßigen Verteilung an. Beispielsweise liegen die Aggregationswerte der neun auf Abbildung 7, oben dargestellten Bestandesausschnitte zwischen  $R = 0,77$  (starke Klumpung) und  $R = 1,48$  (regelmäßige Verteilung).

Für die Fallstudie wurde auf 0,25 ha großen Bestandesausschnitten durch verschiedene Einstellungen der Filterfunktionen 1 bis 4 ein breites Spektrum verschiedener Baumverteilungsmuster erzeugt, das von streng regelmäßiger Verteilung ( $R = 1,5$ ) bis zu stark geklumpter Verteilung ( $R = 0,2$ ) reicht. Für jedes dieser Baumverteilungsmuster wurde mit dem Zuwachsmodell der Bestandesgrundflächenzuwachs ( $\text{qm/ha}$  und Jahr) bestimmt. Auf diese Weise gelangen wir zu dem auf Abbildung 8 dargestellten Zusammenhang zwischen Aggregationsindex  $R$  und Grundflächenzuwachs  $ZG_{\text{rel}}$ . Als Ergebnis aus 10.000 Simulationsläufen ergibt sich eine Punktwolke, die einen klaren Zusammenhang zwischen Aggregationsindex und relativem Grundflächenzuwachs erkennen läßt. Der maximale Bestandesgrundflächenzuwachs ( $ZG_{\text{rel}} = 1,0$ ) wird bei regelmäßiger Verteilung der Bestandesglieder erzielt, bei zufälliger Baumverteilung ( $R = 1,0$ ) werden ca. 95% des maximalen Zuwachses erreicht. Ab Aggregationsindizes von  $R = 0,9$  sinkt der Grundflächenzuwachs nahezu linear ab.

Wie beispielhaft am Zusammenhang zwischen Struktur und Zuwachs verdeutlicht, können, sofern wir über geeignet Stützstellen im Datenfeld verfügen, mit dem Simulator auch die Zusammenhänge zwischen Standort und Zuwachs und Behandlung und Zuwachs simulativ erschlossen werden, die sich ansonsten nur mit ganz erheblichem Versuchsaufwand quantifizieren ließen.

### 3 Forschungsschwerpunkte zur Konsolidierung des Modellansatzes

#### 3.1 Verbesserung der Datenbasis

In den vergangenen Jahren haben wir erste Erfahrungen mit der Anwendung des positionsabhängigen Einzelbaumsimulators SILVA in Mischbeständen aus Fichte, Tanne und Buche gesammelt. Wenn wir den so skizzierten Modellansatz nun weiter mit Leben füllen, d. h. auf die Fläche bringen, auf andere Baumarten übertragen und bis zur Praxisreife weiterent-

wickeln wollen, dann erhebt sich natürlich sofort die Frage nach der dafür verfügbaren Datengrundlage.

Ein unverzichtbares Informationspotential bilden hier auch weiterhin die gut abgesicherten Daten aus intensiver Dauerbeobachtung des Versuchswesens, insbesondere mehrfaktorielle Versuche, mit denen z. B. die Kombinationswirkung verschiedener Überschildungsdichten und Pflanzverbände auf das Verjüngungswachstum unter Schirm analysiert wird. Die vorhandenen langfristigen Versuchsflächen decken die wirtschaftlich bedeutsamen Mischungsformen aber leider nur äußerst lückenhaft ab, sie sind punktuell auf wenige Standorteinheiten begrenzt, konzentrieren sich zumeist auf mittleres und starkes Baumholz, und die ersten zwei Altersklassen sind in unserem Versuchsflächennetz bisher völlig unterrepräsentiert. Und hieraus ergibt sich ein erster Arbeitsschwerpunkt: Um die Datenbasis für bayerische Mischbestände zu verbessern, richtet der Münchener Lehrstuhl für Waldwachs-

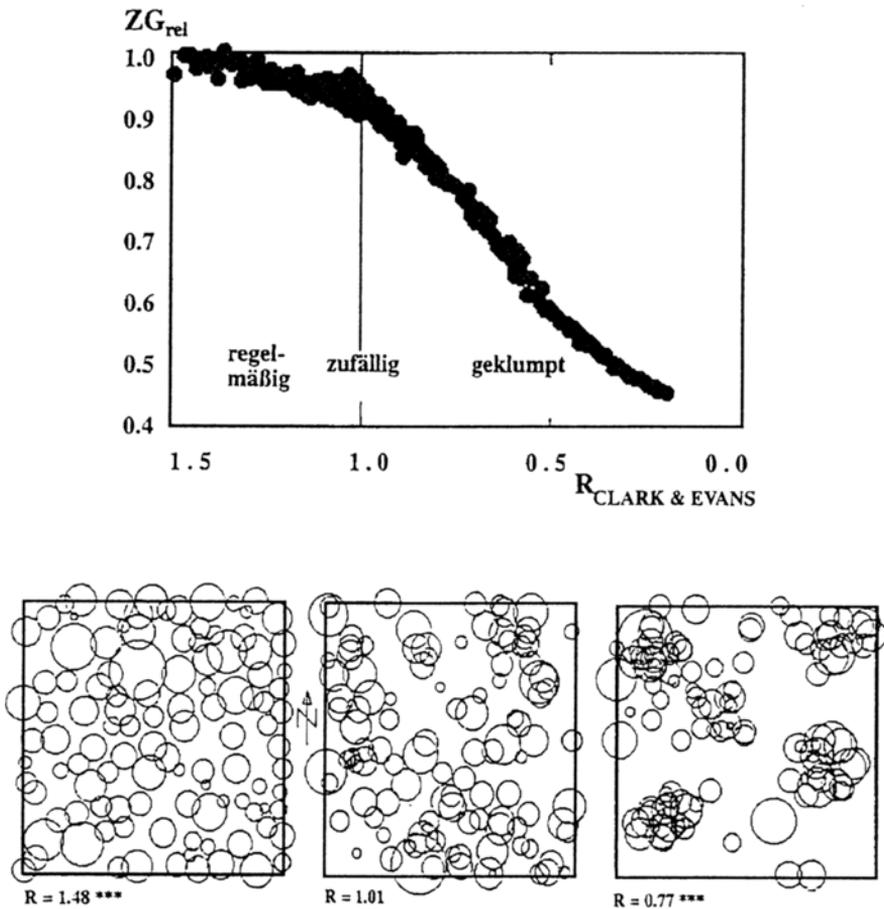


Abb. 8. Zusammenhang zwischen Aggregationsindex R und dem relativen Bestandesgrundflächenzuwachs  $ZG_{\text{rel}}$  ( $ZG_{\text{rel}} = 1,0$ , d. h. maximaler Grundflächenzuwachs) nach den Ergebnissen von 10.000 Simulationenläufen mit verschiedenen, von regelmäßiger bis stark geklumpter Struktur reichenden Baumverteilungsmustern

Fig. 8. Relationship between the aggregation index R and the relative basal area increment of the stand  $ZG_{\text{rel}}$  according to the results of 10.000 simulation runs considering different spatial patterns – from regular to highly clustered structure

tumskunde mit Unterstützung der Bayerischen Staatsforstverwaltung gegenwärtig ein landesweites Netz von Wuchsreihen ein, das sich in der ersten Phase auf Mischbestände aus Fichte, Kiefer, Tanne, Buche und Eiche beschränkt (PRETZSCH 1994). Die Baumartenmischungen Fichte/Buche, Kiefer/Buche, Eiche/Buche, und Fichte/Tanne/Buche sollen darin mit mindestens 4 Wuchsreihen auf guten, mittleren und schlechten Standorten abgedeckt werden. Die Baumartenmischung Kiefer/Buche ist beispielsweise mit einer Wuchsreihe auf leistungsstarken Standorten bei Altötting, zwei leistungsschwächeren Wuchsreihen im Oberpfälzer Becken und Nürnberger Raum und einer vierten Wuchsreihe mittlerer Leistung in Oberfranken vorgesehen (Abb. 9, Versuchsreihen 831 bis 834).

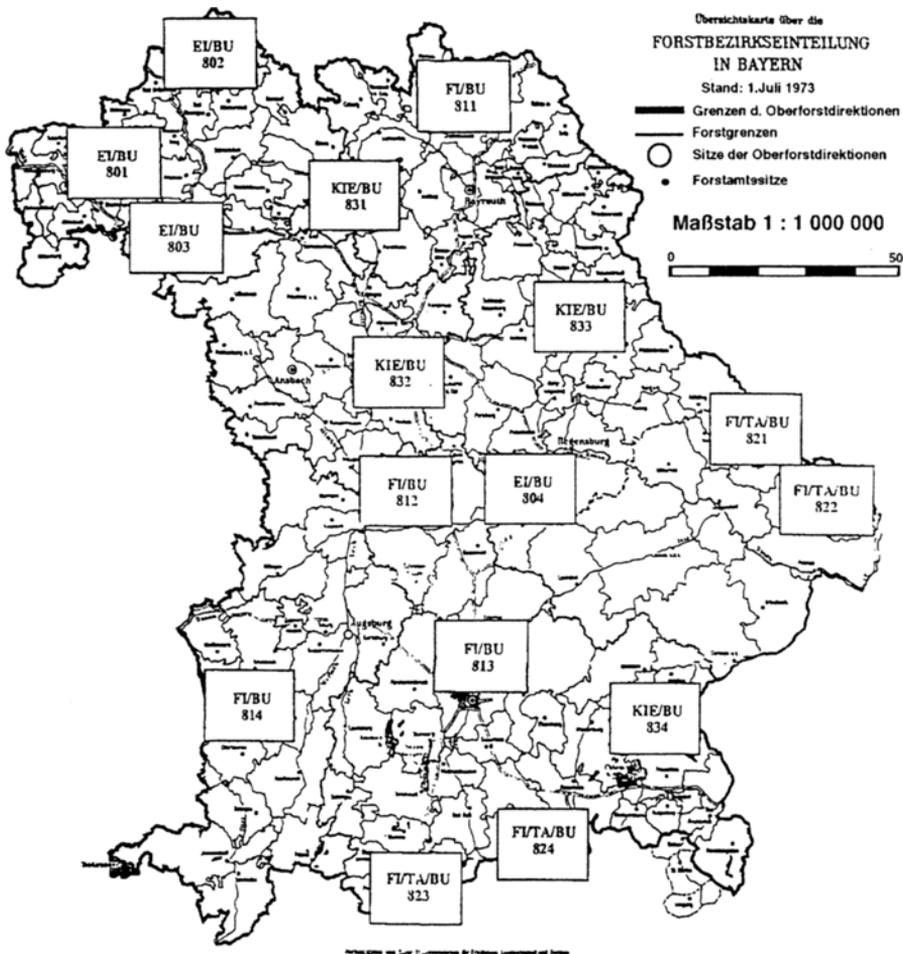


Abb. 9. Verbesserung der waldwachstumskundlichen Datenbasis durch Anlage eines Netzes von Wuchsreihen in bayerischen Mischbeständen aus Fichte/Buche, Kiefer/Buche, Eiche/Buche und Fichte/Tanne/Buche

Fig. 9. The data basis is improved by creating a net of age series of experimental plots in Bavarian mixed stands of spruce/beechn, pine/beechn, oak/beechn and spruce/fir/beechn

Jede Wuchsreihe soll aus 5 bis 15 möglichst standortgleichen Parzellen bestehen, die das gesamte Altersspektrum der Mischung abdecken. Abbildung 10 zeigt beispielhaft einen Ausschnitt aus der Kiefern-Buchen-Wuchsreihe, die auf Tripelstandorten im oberpfälzer Forstamt Amberg angelegt und von NIEWIERRA (1993) in Struktur und Wuchsdynamik erfasst wurde. Dargestellt sind die Bestandesaufrißzeichnungen und die für die zurückliegenden 40

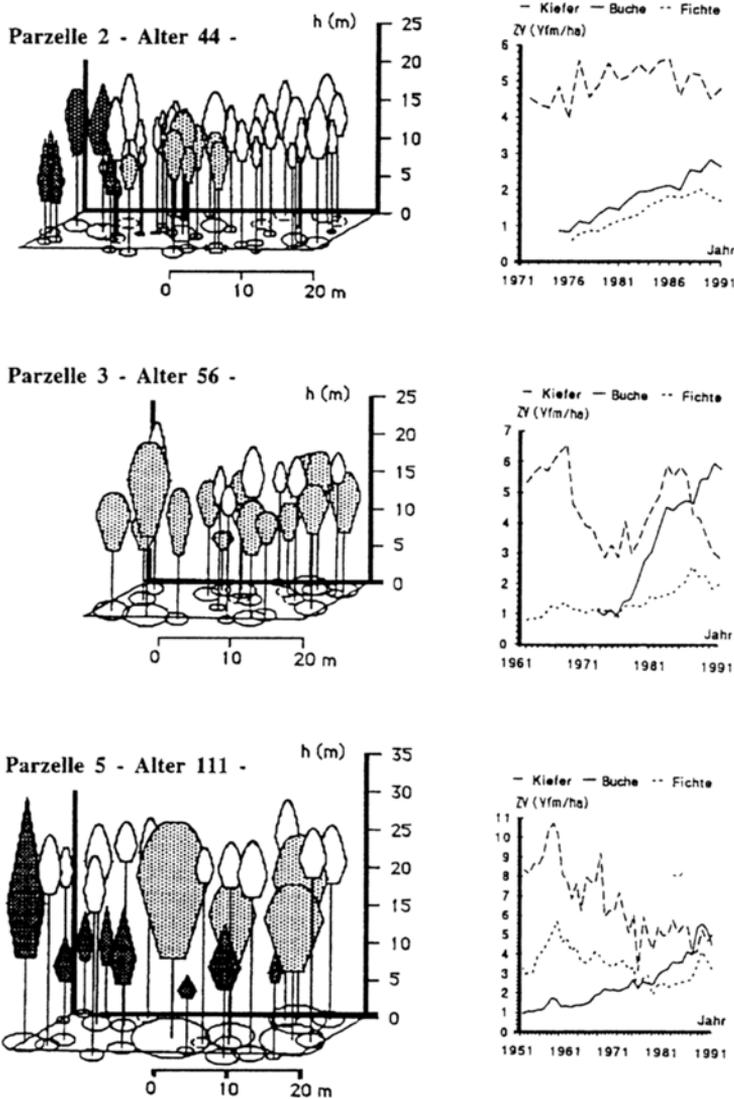


Abb. 10. Ausschnitt aus einer Kiefern-Buchen-Wuchsreihe auf Tripel-Standorten im Forstamt Amberg/Oberpfalz. Links: Aufrißzeichnungen für fünf Meter breite Bestandesstreifen. Rechts: lfd. jährl. Volumenzuwachs in VfmD/ha und Jahr in den letzten 40 Jahren

Fig. 10. Segment of an age series of experimental plots in mixed stands of fir/beech in the forest district of Amberg/Upper Palatinate. Left: elevation drawings for stand strips five metres in width. Right: current annual volume increment in VfmD/ha per annum during the past 40 years

Jahre durch Zuwachsbohrungen ermittelten Volumenzuwachsgänge von drei Kiefern-Buchen-Mischbeständen aus dieser Wuchsreihe im Alter 44, 56 und 111. Neben den angestrebten Basisdaten für die Einzelbaummodellierung liefern die Strukturanalysen und Zuwachserhebungen auf den 0,4 bis 1,0 ha großen Wuchsreihen beispielsweise für Kiefern-Buchen-Mischbestände im Oberpfälzer Raum Informationen zum beachtlich hohen und lang anhaltendem Zuwachs, wie sie uns für diese Mischung und Standorteinheit (Standorteinheit 3, 1, 2 nach dem bayerischen Dezimalsystem zur Kennzeichnung von Standorteinheiten) bisher nicht vorlagen (Abb. 10, rechts).

Aus dem forstwissenschaftlichen Bereich stehen uns für die Modellkonstruktion und -parametrisierung ferner Aufzeichnungen aus Ökosystemstudien, Waldklimameßstationen, Naturwaldreservaten, Untersuchungen an Baumsolitären, Urwaldbeständen usw. zur Verfügung (Abb. 2). Solche Untersuchungen können wirkungsvoll dazu beitragen, Kausalbeziehungen zwischen Wuchsbedingungen und Zuwachsverhalten zu quantifizieren, Minimal- und Maximalwerten für Baumdurchmesser, Baumhöhen und Kronendimensionen abzuleiten und Absterbeprozesse zu verstehen. Neben diesen forstwissenschaftlichen Informationsquellen werden wir künftig verstärkt auf Daten aus dem forstwirtschaftlichen Sektor zurückgreifen müssen, auf den Datenfundus aus der Standortkartierung, der Forstinventur und der Fernerkundung, wobei die Erhebungsdaten auf den permanenten Probestflächen der Betriebsinventuren waldwachstumskundlich besonders ergiebig sein durften (Abb. 2). Hier haben wir es mit weniger gut abgesicherten Daten aus extensiven Erhebungen zu tun, die aber regionale oder gar großregionale Repräsentativaussagen liefern.

Saubere Daten aus punktuellen Untersuchungen der Forstwissenschaft einerseits, weniger saubere Daten aus forstwirtschaftlichen Repräsentativerhebungen andererseits (Abb. 2): Beide Datenquellen haben ihre Stärken und ihre Schwächen, beide Datenquellen sind für künftige Modellentwicklungen unverzichtbar.

### 3.2 Übergang zu einer quasikausalen Erklärung des Einzelbaumwachstums

Aus dem angestrebten Übergang zu standortsensitiven Einzelbaummodellen ergibt sich ein zweiter Arbeitsschwerpunkt, die Untersuchung der Wuchsgesetzmäßigkeiten des Einzelbaumwachstums, wobei die Wachstumsreaktionen in Abhängigkeit von Wuchskonstellation, Behandlung und Standortbedingungen im Vordergrund stehen. Die Gesetzmäßigkeiten des Einzelbaumwachstums unter natürlichen und durch waldbauliche Steuerungsmaßnahmen eingestellten Konkurrenzbedingungen lassen sich besonders gut aus waldwachstumskundlichen Vollaufnahmen auf langfristigen Versuchsflächen erschließen. Ähnlich wie von ASSMANN (1961) gesetzmäßige Zusammenhänge zwischen Bestockungsdichte und Bestandeszuwachs hergeleitet und in Bestandeswuchsmodellen implementiert wurden (Abb. 11), sind Gesetzmäßigkeiten zwischen Konkurrenz und Zuwachs für Einzelbäume nachweisbar: Aus Wiederholungsaufnahmen in Fichten-Buchen-Mischbeständen lassen sich beispielsweise gesetzmäßige Zusammenhänge zwischen vertikaler und horizontaler Konkurrenz von Einzelbäumen und ihrem Höhenzuwachs ableiten (PRETZSCH 1992), wobei es sich um Grundbeziehungen handelt, die wichtige Bausteine für die Konstruktion von Wuchsmodellen bilden. Am Lehrstuhl für Waldwachstumskunde befassen wir uns gegenwärtig mit der Anpassung vorhandener Konkurrenzindizes, über die BIGING und DOBBERTIN (1992) einen guten Überblick vermitteln, an die vielgestaltigen Konkurrenzsituationen in Mischbeständen und mit der Frage, wie sich Konkurrenzbeziehungen im geeigneten Gelände erfassen und in ihrer Auswirkung auf den Einzelbaumzuwachs quantifizieren lassen – eine für Bayern besonders wichtige Frage (BACHMANN 1994).

Künftige Modelle müssen standortsensitiv sein, denn das eigentliche Charakteristikum strukturreicher Rein- und Mischbestände besteht in dem Miteinander von Arten mit verschiedenen standortspezifischen Wachstumsrhythmen, das sich nur bei einer Kenntnis und modellinternen Nachbildung der Standort-Leistungsbeziehungen wirklichkeitsnah vorher-

sagen läßt. Ebenso wichtig wie die Ableitung von Gesetzmäßigkeiten des Einzelbaumwachstums in Abhängigkeit von der räumlichen Wuchskonstellation ist daher die Ableitung von Zusammenhängen zwischen Standortfaktoren und Wuchsleistung.

Gestützt auf das Datenmaterial niedersächsischer, bayerischer und schweizerischer Dauerversuchsflächen hat KAHN (1994) einen vielversprechenden Ansatz zur standortgestützten Schätzung der Oberhohenenwicklung ( $h_{100}$ ) von Buche, Eiche, Kiefer, Fichte und Douglasie entwickelt, der sich auch für die Modellierung weiterer Dimensionsgrößen des Baumes

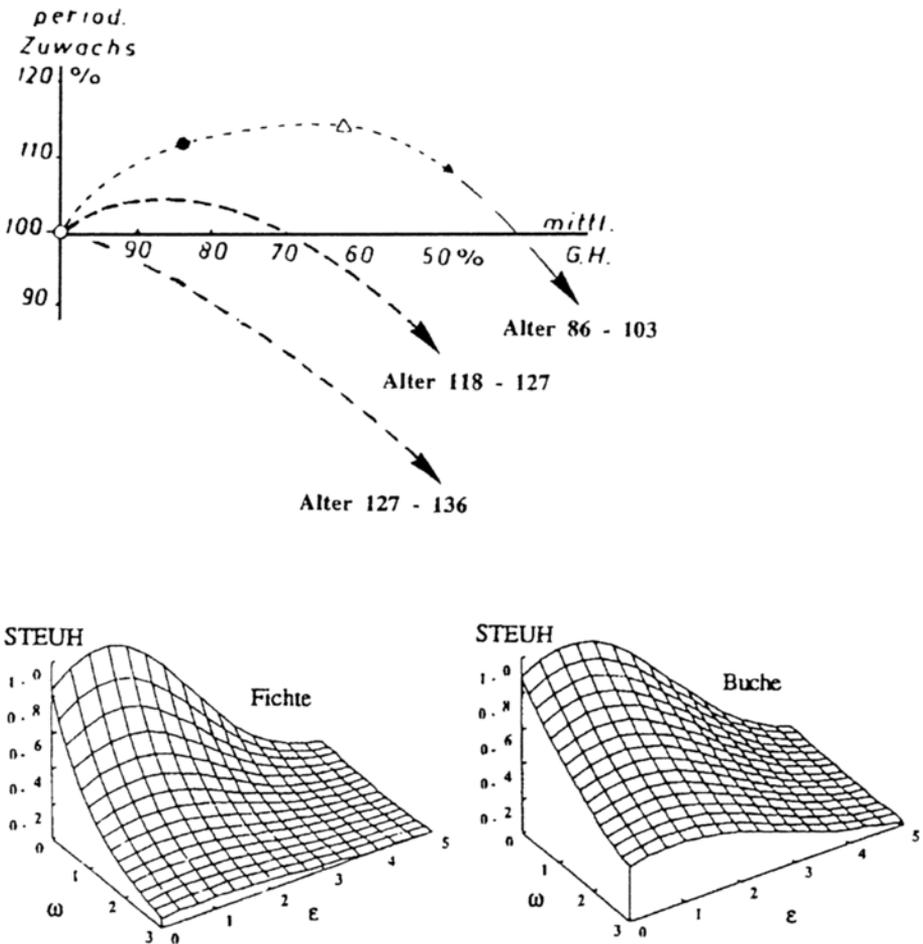


Abb. 11. Erschließung von Gesetzmäßigkeiten des Baum- und Bestandeswachstums. Oben: Mittlere Grundflächenhaltung und Zuwachs der Buchen-Durchforstungsreihe Kupferhütte 25 im Alter 86–103, 118–127 und 127–136 (ASSMANN 1961). Unten: Einfluß von seitlicher Kroneneinengung  $\epsilon$  und Beschattung  $\omega$  auf den relativen Hohenzuwachs von Fichten und Buchen auf Versuchsfläche Zwiesel 111 (PRETZSCH 1992)

Fig. 11. Deducing the laws of tree and stand growth. Above: mean basal area situation and increment of the beech thinning series Kupferhütte 25 at ages of 86–103, 118–127, and 127–136 (ASSMANN 1961). Below: influence of lateral crown restriction  $\epsilon$  and the amount of shade  $\omega$  on the height growth of spruce and beech on the experimental area Zwiesel 111 (PRETZSCH 1992)

eignet und für eine Implementierung in Einzelbaummodellen konzipiert ist. Neu an diesem Ansatz ist, daß die Höhenverläufe nicht wie u. a. von MOOSMAYER und SCHOPFER (1972) unmittelbar regressionsanalytisch aus den Standortfaktoren geschätzt, sondern in einem zweistufigen Verfahren bestimmt werden, wie das auf Abbildung 12 schematisch für Fichte und Buche dargestellt ist. In einem ersten Schritt werden für alle neun im Modell berücksichtigten Standortfaktoren eingipfelige Wirkungsfunktionen festgelegt, die die Wirkung des jeweiligen Standortfaktors auf den relativen Höhenzuwachs durch Werte zwischen  $r = 0$  und  $r = 1$  ausdrücken (Beispiel: geringe Wärme bewirkt suboptimalen Höhenzuwachs, mittlere Wärme maximalen Höhenzuwachs, und hohe Temperaturen führen zu einem wieder abnehmenden Höhenzuwachs). Für jeden der neun Standortfaktoren werden eingipfelige Funktionen für seine Wirkung auf den Höhenzuwachs festgelegt. In einem zweiten Schritt werden diese neun Einzelfaktoren  $r_1$  bis  $r_9$  über die Aggregationsparameter  $\gamma_1 \dots \gamma_5$  miteinander verknüpft und in Beziehung zu den Parametern  $A$  und  $k$  der baumartenspezifischen Höhenwachstumsfunktionen  $h_{100} = A * (1 - e^{-k \cdot t})^3$  gesetzt. In den Verknüpfungsgrößen  $\gamma_1 \dots \gamma_5$ , die regressionsanalytisch bestimmt werden, kommt die Wechselwirkung zwischen den neun Standortfaktoren zum Ausdruck.

Beim ersten Schritt, der Formulierung von monokausalen Wirkungszusammenhängen zwischen Standortfaktoren und Höhenzuwachs, können sowohl Versuchsergebnisse als auch Erfahrungswissen eingebracht werden. Im zweiten Schritt, bei der regressionsanalytischen Schätzung der Verknüpfungsparameter  $\gamma_1 \dots \gamma_5$  kommt das ganze Informationspotential aufgezeichneter Höhenwachstumsgänge auf Versuchsflächen zum Einsatz. Dabei ist der Lehrstuhl für Waldwachstumskunde den Herren A. ZINGG von der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft und Herrn Forstdirektor Dr. SPELLMANN von der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt besonders dankbar für die Bereitstellung des niedersächsischen und schweizerischen Datenmaterials mit extremen Standortausprägungen. Für die Standortleistungsmodellierung sind gerade extreme Standorte, auf denen aus pragmatischen Gründen seltener Versuchsflächen angelegt werden, besonders nützlich, indem sie stabile Kurvenverläufe in den Randbereichen des Parameter-raumes gewährleisten.

Mit einer solchen Standort-Leistungsmodellierung beschreiten wir einen Mittelweg zwischen statistischen und kausalen Modellansätzen. Indem sich der Ansatz von KAHN (1994) auf die Methode der linguistischen Variablen und Fuzzy logic stützt, kann er unser derzeitiges Wissen, das sich aus qualitativen und quantitativen Informationen aufbaut, bestmöglich ausschöpfen. Neue ökophysiologische Erkenntnisse und Modellkomponenten, etwa gesicherte Aussagen über die Wirkung von  $\text{CO}_2$ -Konzentration auf das Höhenwachstum, können in das Modell transferiert werden, ohne daß der gesamte Modellansatz verworfen und neu aufgebaut werden muß. Ein rein ökophysiologischer Modellansatz mit streng kausaler Erklärung der Stoffproduktion, wäre sicher noch besser für eine Vorhersage der Dynamik von Waldökosystemen unter sich verändernden Wuchsbedingungen geeignet, für die Parametrisierung solcher Modelle fehlen uns aber bisher schlichtweg noch die Daten.

Auch der hier angestrebte Übergang zur quasikausalen Erklärung des Einzelbaumwachstums erfordert die Nutzung von Daten aus forstwirtschaftlichen und forstwissenschaftlichen Quellen (Abb. 2): Zur Analyse und Quantifizierung des Zusammenhangs zwischen der räumlichen Wuchskonstellation von Einzelbäumen und ihrem Zuwachsverhalten eignen sich in besonderem Maße die Daten aus Feinanalysen auf vorhandenen und neu konzipierten Mischbestandes-Versuchsflächen. Die Erklärung und Steuerung der Einzelbaumentwicklung in Abhängigkeit von Standortfaktoren wird sich maßgeblich auf eher extensiv aber großregional erhobene Waldwachstumsdaten stützen müssen, damit ein breites Standort-spektrum abgedeckt werden kann.

3.3 Erweiterung des Aussagespektrums bei der Erfassung, Abbildung und modellhaften Reproduktion von Waldbeständen

Mit der Erweiterung des Aussagespektrums bei der Erfassung, Abbildung und modellhaften Reproduktion von Waldbeständen um Kenngrößen zur Stamm- und Kronenmorphologie, um Aussagen zu Güte-, Sorten- und Wertleistung und um Indizes zur Beschreibung der Bestandesstruktur wird ein dritter Arbeitsschwerpunkt gesetzt (Abb. 13). Eine Aufschlüsselung der Bestandesglieder nach Kronendimensionen und Baummorphologien erbrächte

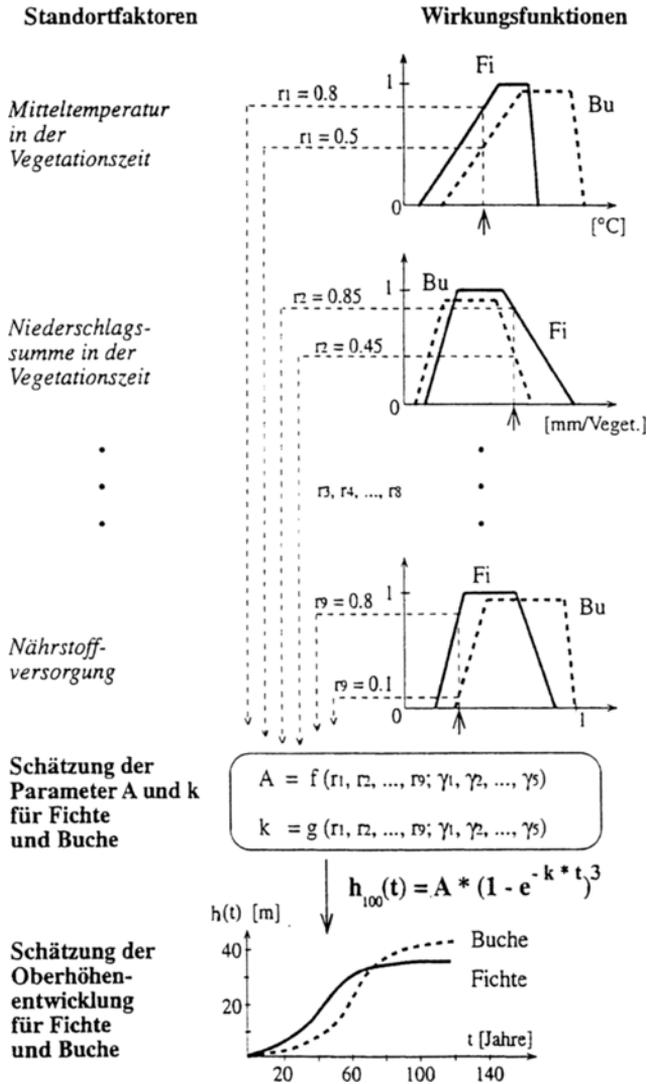


Abb. 12. Standortgestützte Schätzung der Oberhöhenentwicklung in einem zweistufigen Verfahren (KAHN 1994)

Fig. 12. Development of top height estimated in a two-step process, based on the site conditions (KAHN 1994)

Einblicke in den Wuchsraumbedarf und die Wachstumsstrategien der Baumarten in Abhängigkeit von Alter, sozialer Stellung und Durchforstung. Eine Weiterentwicklung der Verfahren zur Aufnahme, Auswertung und modellhaften Reproduktion der wichtigsten waldbaulich, waldwachstumskundlich und ökologisch bedeutsamen Strukturaspekte von Waldbeständen wie horizontales Verteilungsmuster, vertikale Differenzierung, Überschirmungsdichte, Artendiversität und Durchmischung vor und nach Durchforstungseingriffen könnte eine erste Grundlage dafür schaffen, verschiedene Bestandesaufbauformen und in diesen durchgeführte Pflegeeingriffe nicht nur in ihrer Wirkung auf Vorrat und Zuwachs, sondern auch hinsichtlich ihrer Wirkung auf Struktur, Vielfalt und ökologische Stabilität zu quantifizieren. Mit Programmroutinen zur Berechnung des Aggregationsmaßes  $R$  von CLARK und EVANS (1954) und des Segregationsindex  $S$  von PIELOU (1977) und mit dem Generator STRUGEN wurden erste Verfahrensgrundlagen dafür geschaffen, Bestandestypen, Mischungsformen und Pflegeeingriffe mit Blick auf ihre strukturprägende und strukturverändernde Wirkung zu beurteilen und modellhaft nachzubilden (PRETZSCH 1993). Eine Inventarisierung der vom Bestand erbrachten Güte-, Sorten- und Wertleistung würde es erlauben, Durchforstungsvarianten über rein naturale Größen bis hin zu ihrer Geldwertleistung durchzurechnen.

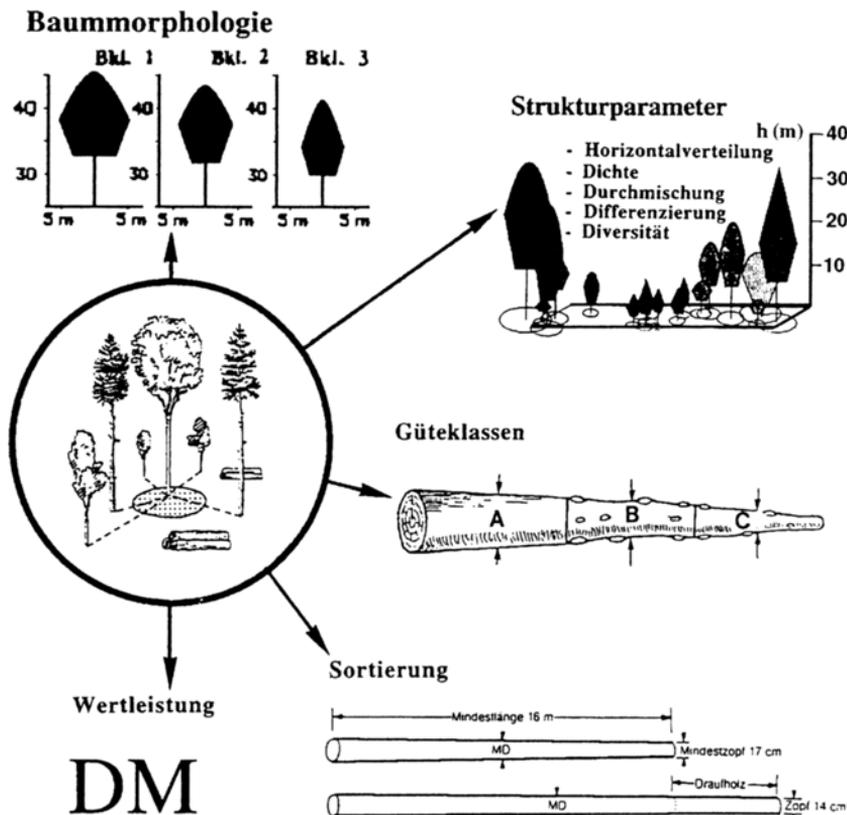


Abb. 13. Erweiterung des Aussagespektrums bei der Erfassung, Abbildung und modellhaften Reproduktion von Bestandesentwicklungen

Fig. 13. Expansion of the information spectrum through stand dynamics registration by measurement, statistical examination and growth model reproduction

#### 4 Weiterentwicklung des Fortschreibungsalgorithmus zu einem universalen Forschungs- und Prognoseinstrument

Münden sollen die angestrebte Verbesserung der Datenbasis, der Aufbau quasikausaler Erklärungsansätze für das Einzelbaumwachstum und die Erweiterung des waldwachstumskundlichen Aussagespektrums in den Aufbau eines Prognosesystems, mit dem die Waldentwicklung für ein breites Spektrum von Baumarten, Standorten, Mischungsformen und Behandlungsvarianten realitätsnah durchgerechnet werden können, und das nicht nur bis zu den klassischen, naturalen Aussagegrößen (Vorratsfestmeter, Mitteldurchmesser, lfd. jährl. Zuwachs usw.), sondern bis hin zur Geldwertleistung und zu ökologisch aussagekräftigen Strukturindizes (Abb. 4). Hierzu ist die Ankopplung von Programmroutinen zur Nachbildung der Schaftformen, zur Berechnung der Sorten-, Güte- und Wertleistung und zur Berechnung ökologischer Weiserwerte für die Bestandesstruktur vorgesehen. Bei der Nachbildung der Schaftform kann auf die Dimensionsgrößen Kronenbreite, Kronenansatzhöhe, Kronenlänge und auf die Konkurrenzsituation des betreffenden Baumes zurückgegriffen werden, auf Größen, die in einem Einzelbaummodell während des Prognoselaufes mitgeführt werden.

Auf die eingangs skizzierte Schwerpunktverlagerung der Waldwachstumsforschung wird durch einen solchen Modellansatz wie folgt reagiert: Indem es den Bestand in sein Mosaik von Einzelbäumen auflöst und deren Miteinander als räumlich-zeitliches System nachbildet, ist das Modell für Rein- und Mischbestände einsetzbar. In dem Modell bildet der Einzelbaum die eigentliche Informationseinheit, so daß Mischungsformen und Pflegeeingriffe auch in ihrer Wirkung auf ausgewählte Teilkollektive, z. B. Auslese- oder Z-Bäume, untersucht werden können. Indem es das Einzelbaumwachstum in Abhängigkeit von Wuchskonstellation und Standortfaktoren steuert, ist das Modell standortsensitiv konzipiert, wenngleich uns für eine wirklichkeitsnahe Abbildung des Standort-Leistungsbezugs noch wichtige Basisinformationen fehlen. Bestandesentwicklungen sollen von dem Prognosemodell nicht nur unter dem Aspekt ihrer Naturalerträge, sondern auch im Hinblick auf die Geldwertleistungen und Bestandesstruktur nachgebildet und bewertet werden. Die alle genannten Arbeitsschwerpunkte durchziehende Modellidee könnte zu einer Organisation waldwachstumskundlichen Wissens, zur Synthese von Einzelaspekten des Waldwachstums und zur Identifikation von Wissenslücken beitragen.

#### Literatur

- ASSMANN, E., 1953/54: Die Standraumfrage und die Methodik von Mischbestandsuntersuchungen. *AFJZ* 125, 149-153.
- ASSMANN, E., 1961: *Waldertragskunde*. München, Bonn, Wien: BLV Verlagsgesellschaft.
- BACHMANN, M., 1994: Zur Verbesserung des waldwachstumskundlichen Untersuchungsinstrumentariums im geneigten Gelände am Beispiel natürlicher Bergmischwälder. Vortrag auf der Forstlichen Hochschulwoche vom 26.-28. 10. 1994 in München. Manuskriptdruck, unveröff., 8 S. zuzgl. Abb. und Tab.
- BIGING, G. S.; DOBBERTIN, M. 1992: A comparison of distance-dependent competition measures for height and basal area growth of individual conifer trees. *Forest Science* 38, 695-720.
- CLARK, Ph. J.; EVANS, F. C., 1954: Distance to nearest neighbor as a measure of spatial relationships in populations. *Ecology* 35, 445-453.
- FRANZ, F., 1987: Zum Aufbau eines neuzeitlichen Informationssystems für die Forstwirtschaft. *Forstarchiv* 58, 131-137.
- KAHN, M., 1994: Modellierung der Höhenentwicklung ausgewählter Baumarten in Abhängigkeit vom Standort. *Forstl. Forschungsber.* München, Nr. 141, 221 S.
- KIMMINS, J. P., 1993: Scientific foundations for the simulation of ecosystem function and management in FORCYTE-11. Information Report NOR-X-328, Forestry Canada, Northwest Region, Northern Forestry Centre, 88 S.
- MONSERUD, R. A., 1975: Methodology for simulating Wisconsin northern hardwood stand dynamics. Ph. D. thesis, University of Wisconsin-Madison, 156 S.

- MOOSMAYER, H.-U.; SCHÖPFER, W., 1972: Beziehungen zwischen Standortfaktoren und Wuchsleistung der Fichte. *AFJZ* 143, 203-215.
- NIEWIERRA, C., 1993: Leistung und Struktur von Kiefern-Buchen-Fichten-Mischbeständen auf Tripelstandorten in der Oberpfalz. Dipl.-arbeit, Lehrstuhl für Waldwachstumskunde, Univ. München, unveröff., 173 S.
- OTTO, H.-J., 1994: *Waldökologie*. Stuttgart: Ulmer.
- PIELOU, E. C., 1977: *Mathematical Ecology*. Chichester: Wiley & Sons.
- PRETZSCH, H., 1992: Konzeption und Konstruktion von Wachstumsmodellen für Rein- und Mischbestände. *Forstl. Forschungsber. München*, Nr. 115, 358 S.
- PRETZSCH, H., 1992: Zunehmende Unstimmigkeiten zwischen erwartetem und wirklichem Wachstum unserer Waldbestände, Konsequenzen für zukünftige ertragskundliche Informationssysteme. *Forstw. Cbl.* 111, 366-382.
- PRETZSCH, H., 1993: Analyse und Reproduktion räumlicher Bestandesstrukturen. Versuche mit dem Strukturgenerator STRUGEN. *Schriften aus der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen und der Nieders. Forstl. Versuchsanstalt*, Band 114. Frankfurt/M.: Sauerländer's Verlag.
- PRETZSCH, H., 1994: Waldwachstumsforschung in strukturreichen Rein- und Mischbeständen. Untersuchungsansatz – Arbeitsschwerpunkte – Kooperationsbedarf. Bericht von der Jahrestagung der Sektion Ertragskunde im Deutschen Verband Forstlicher Forschungsanstalten 1994 in Bamberg, S. 6-26.
- SMALTSCHINSKI, TH., 1990: Mischbestände in der Bundesrepublik Deutschland. *Forstarchiv* 61, 137-140.
- STERBA, H., 1989: Concepts and techniques for forest growth models. In: *Artificial intelligence and growth models for management decisions*, Proc. IUFRO S 4.01 and S 6.02, Meeting Univ. f. Bodenkultur Wien, 18-22.09.1989, School of For. a. Wildlife Res., Virg. Polytech. Inst. and State Univ. Blacksburg, Publ. No. FWS-1-89, S. 13-20.
- STERBA, H., 1994: Die Auswirkung von Rahmenbedingungen der Forstwirtschaft auf die Ansprüche an Wachstumsmodelle. Bericht von der Jahrestagung der Sektion Ertragskunde im Deutschen Verband Forstlicher Forschungsanstalten 1994 in Bamberg, S. 1-5.
- THOMASJUS, H., 1992: Prinzipien eines ökologisch orientierten Waldbaus. *Forstw. Cbl.* 111, 141-155.
- WYKOFF, R. W.; CROOKSTON, N. L.; STAGE, R. A., 1982: User's guide to the stand prognosis model. *U. S. For. Serv., Gen. Techn. Rep. INT-133*, 12 S.

*Anschrift des Verfassers:* Prof. Dr. HANS PRETZSCH, Lehrstuhl für Waldwachstumskunde der Ludwig-Maximilians-Universität München, Hohenbachernstraße 22, D-85354 Freising