

Aus dem Lehrstuhl für Waldwachstumskunde der Universität München

Wuchsmodelle für Mischbestände als Herausforderung für die Waldwachstumsforschung¹

Von H. PRETZSCH

1 Einleitung

Unsere Forstwirtschaft ist in den vergangenen Jahrzehnten in wachsendem Umfang zur Begründung und intensiveren Pflege von Mischbeständen übergegangen, für die Planung und Kontrolle dieser Operationen fehlen ihr aber bisher adäquate Arbeitsgrundlagen.

Im folgenden werden erste methodische Ansätze zum Aufbau einer neuen Generation von Wuchsmodellen und Leistungstabellen für Rein- und Mischbestände vorgestellt. Im Mittelpunkt der Betrachtung stehen – unabhängig von den Baumarten – die Konzeption und Konstruktion einzelbaumorientierter Prognosemodelle für Rein- und Mischbestände. Die Studie konnte nicht, wie das für das Schwerpunktthema Eichenwirtschaft wünschenswert wäre, am Beispiel von Eichenmischbeständen durchgeführt werden. Sie stützt sich auf Mischbestände aus Fichte und Buche, denn nur für Fichten-Buchen-Mischbestände verfügen wir gegenwärtig schon über eine Datenbasis, die zur Prüfung erster Modellhypothesen ausreicht.

2 Wechselwirkungen zwischen dem Zuwachs des Einzelbaumes und seiner Wuchskonstellation

Wir beginnen mit einigen Vorüberlegungen zur Wuchskonstellation von Einzelbäumen im Bestand: Eine Tanne im Unterstand eines Fichten-Tannen-Buchen-Plenterbestandes wird auf Beschattung anders reagieren als auf eine Einengung ihrer Krone von der Seite und wieder anders, wenn beide Faktoren gleichzeitig auftreten. Ihr Wuchsverhalten kann nur dann zutreffend beurteilt und prognostiziert werden, wenn ihre räumliche Wuchskonstellation im Bestand hinreichend genau bekannt ist.

Die räumliche Umgebungsstruktur des Einzelbaumes und sein Wuchsverhalten stehen in enger Wechselwirkung miteinander. Lassen Sie mich diesen Tatbestand anhand von Abbildung 1 verdeutlichen: Die Bäume in einem Waldbestand beeinflussen ihre eigene Wuchskonstellation und die ihrer Nachbarn in dem langsam wirkenden Regelkreis: *Zuwachs des Einzelbaumes* > *Bestandesstruktur* > *Wuchskonstellation* > *Zuwachs des Einzelbaumes*. Durch den Zuwachs verändert sich die Struktur von Baum und Bestand, die Strukturänderungen stellen die Wuchsbedingungen des Baumes und seiner Nachbarn neu ein, wodurch wieder das Zuwachsverhalten gesteuert wird. Beispielsweise hat ein Baum mit günstigem Lichtangebot eine höhere Stoffproduktion und bessere Entwicklungsmöglichkeiten als seine stärker beschatteten Bestandesnachbarn. Er kann sich gegenüber diesen leichter durchsetzen und die Bestandesstruktur und seine Wuchskonstellation zu seinen Gunsten verändern. Jeder Baum wird von seinen Bestandesnachbarn gesteuert und wirkt selbst als Regler auf seine Nachbarn.

¹ Vortrag anlässlich der Forstlichen Hochschulwoche vom 24.–26. 10. 1990 in München.

In einem Wuchsmodell, das für ein breites Spektrum von Waldaufbauformen, für Rein- und Mischbestände, einsetzbar sein soll, kommt dem Regelkreis *Zuwachs des Einzelbaumes* > *Bestandesstruktur* > *Wuchskonstellation* > *Zuwachs des Einzelbaumes* eine zentrale Bedeutung zu. Als Ergebnis dieses Regelprozesses wächst die eingangs erwähnte Tanne im Plenterwald unter günstigen Bedingungen rasch aus dem Unterstand hinaus und hat mit 100 Jahren eine Höhe von 40 m erreicht, unter schlechteren Voraussetzungen wird sie bei minimalem Höhenwachstum im Unterstand 100 Jahre alt, wie wir das von Tannen und Fichten kennen, die von MAGIN (1959) und PREUHLER (1979) untersucht wurden. Das konzipierte Wuchsmodell muß ausreichend flexibel sein, um das ganze Spektrum der Entwicklungsmöglichkeiten von Einzelbäumen abbilden zu können (FRANZ 1987).

Zur Steuerung der Wuchsprozesse in einem einzelbaumorientierten Wuchsmodell müssen also für jeden Baum die räumlichen Umgebungsparameter erfaßt und ihre Regelwirkung auf das Wuchsverhalten quantifiziert werden. Eine wichtige Voraussetzung dafür ist die Analyse der räumlichen Umgebungsstruktur des Baumes.

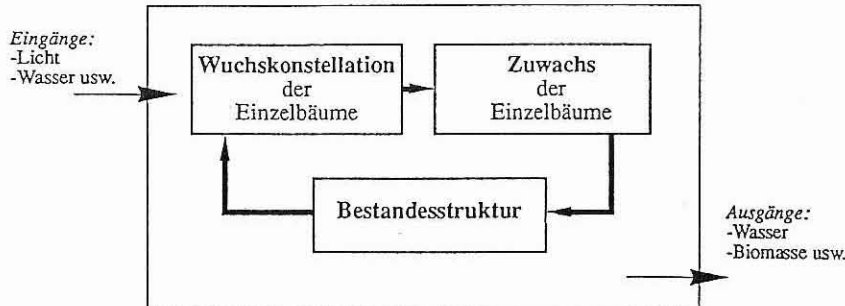


Abb. 1. Schematische Darstellung der Wechselwirkungen zwischen dem Zuwachs eines Einzelbaumes, der Bestandesstruktur und der Wuchskonstellation eines Baumes in einem Waldbestand.

Fig. 1. Schematic representation of the occurring interdependences between the growth rate of a single tree, the stand structure and the growth constellation of the tree within a stand

3 Strukturanalyse des Kronenraumes

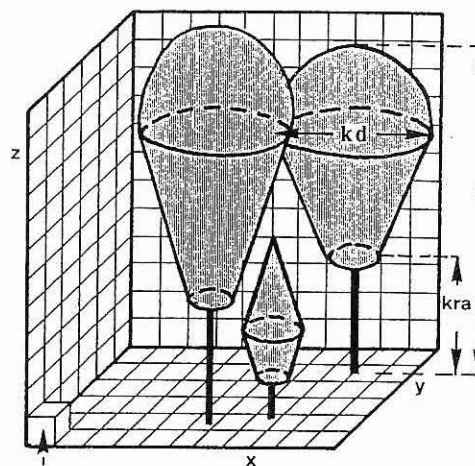
Um die räumliche Struktur des Kronenraumes und die Wuchskonstellation der Einzelbäume in einem Bestand erfassen zu können, wurde die Programmroutine RAUM erstellt.

Tragendes Element der Routine RAUM ist eine dreifach dimensionierte Matrix, in welche für jeden Kubikmeter Bestandesraum einer Versuchs- oder Testfläche ein Informationsgehalt eingespeichert werden kann (Abb. 2). Beispielsweise wäre für die räumliche Erfassung eines Untersuchungsbestandes mit den Abmessungen 20 m × 20 m und einer Maximalhöhe von 25 m eine Matrix mit der Dimensionierung (20, 20, 25) erforderlich; d. h. der Bestandesraum würde sich aus 10 000 Zellen der Größe 1 m³ aufbauen. Dem Zentrum der Zellen können beliebige Informationen zugeordnet werden.

Alle Bestandesglieder einer zu untersuchenden Testfläche werden nacheinander in die Matrix eingeführt: Auf der Basis der Stammfußkoordinaten, der Kronenradien sowie der Dimensionsgrößen Höhe und Kronenansatzhöhe und bei Zugrundelegung der baumartenspezifischen Kronenformen wird die räumliche Ausdehnung der Bäume in kartesischen Koordinaten umgesetzt und ihre Lage in der Raummatrix lokalisiert. Aus den Eingangsdaten Baumhöhe, Kronenansatzhöhe und den Kronenradien wird die räumliche Ausdehnung der Bäume nach den Kronenformmodellen von BADOUX und BURGER bestimmt: Der Lichtkronenabschnitt wird bei den Fichten als Kegel, bei den Buchen als kubisches Paraboloid und bei den Tannen als quadratisches Paraboloid dargestellt; der Schattkronenbereich wird durch Kegelstümpfe nachgebildet.

Abb. 2. Erfassung der Kronenstruktur eines Bestandes durch Einlesen aller Bäume in eine dreidimensionale Matrix. Nach dem Prinzip der Trefferabfrage kann für jede Zelle der Matrix bestimmt werden, von welchem Baum, welcher Baumart und wie häufig sie getroffen wird (h = Baumhöhe, kra = Kronenansatzhöhe, kd = mittlerer Kronendurchmesser, x, y = Stammfußkoordinaten)

Fig. 2. The crown structure of a stand is recorded by feeding the data of all trees into a three-dimensional matrix. According to the dot count-principle the following questions can be answered for each cell of the matrix: Which tree has hit? Which species has hit? The total number of hits in the cell? (h = tree height, kra = height of base of the crown, kd = mean crown diameter, x, y = coordinates of the position of the tree)



Zelle (1, 1, 1)
mit den Mittelpunktkoordinaten (0.5, 0.5, 0.5)

Nach dem Trefferprinzip wird für alle Zellenmittelpunkte der Raummatrix bestimmt, von welchen Bäumen, welchen Baumarten und mit welcher Häufigkeit sie getroffen werden. Die Ergebnisse der Trefferabfrage werden in der Raummatrix abgespeichert. Sie enthält dann ein gerastertes, modellhaftes Abbild der tatsächlichen Bestandesstruktur und stellt weitreichende Informationen, z. B. über die Ausnutzung des Kronenraumes durch die Baumkronen und die Präsenz verschiedener Baumarten in unterschiedlichen Höhenbereichen, bereit.

Die folgenden Abbildungen zeigen die Ergebnisse der räumlichen Strukturanalyse am Beispiel eines Fichten-Buchen-Mischbestandes in grafischer Form:

Das Programm Aufriß fertigt für beliebige Bestandesausschnitte Aufrißzeichnungen an. Auf Abbildung 3 (oben und unten) sind zwei Entwicklungsphasen (1954 und 1982) der Fichten-Buchen-Mischbestandsversuchsfläche in Zwiesel (ZWI 111/3) dargestellt. Zu Beginn des betrachteten Wachstumszeitraumes (Abb. 3, oben, Bestandesalter 60–80 Jahre) war die Bestockung relativ dicht und demzufolge der Konkurrenzdruck zwischen den Bäumen groß. 28 Jahre später (Abb. 3, unten) hat der Bestand einen homogenen Aufbau. Durchforstungseingriffe und Selbstdifferenzierungsprozesse haben, besonders bei der Buche, zu einem Rückgang der Stammzahl geführt.

Aus den Informationen, die in der Raummatrix abgespeichert sind, können vom Programm RAUM beliebige Horizontal- und Vertikalschnitte durch den Kronenraum erstellt werden:

Abbildung 4 zeigt Horizontalschnitte durch den Kronenraum des Fichten-Buchen-Mischbestandes Zwiesel 111/3 in den Höhen 20 m und 25 m für das Jahr 1982 mit den Ergebnissen der Trefferabfrage. Die Buche (hellgrau) dominiert in der mittleren Höhenschicht, im oberen Kronenraum kommen Buchen und Fichten (dunkelgrau) etwa gleich häufig vor und nutzen den vorhandenen Wuchsraum fast vollständig aus.

4 Wuchskonstellation des Einzelbaumes

Nach dem Prinzip der Trefferabfrage können außerdem weitreichende Informationen über die räumliche Umgebungsstruktur von Einzelbäumen aus Aufnahmedaten erschlossen werden. Wir gehen damit über zur einzelbaumweisen Betrachtung, die in den letzten Jahren vor allem von ABETZ favorisiert worden ist. PETRI (1966) hat in den 60er Jahren in diese Richtung vorgedacht und Begriffe zur Charakterisierung der Wuchskonstellation von

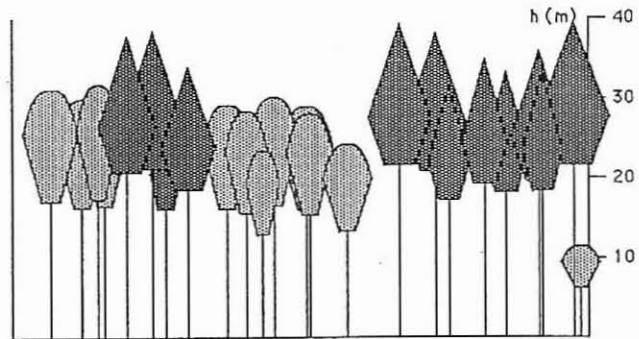
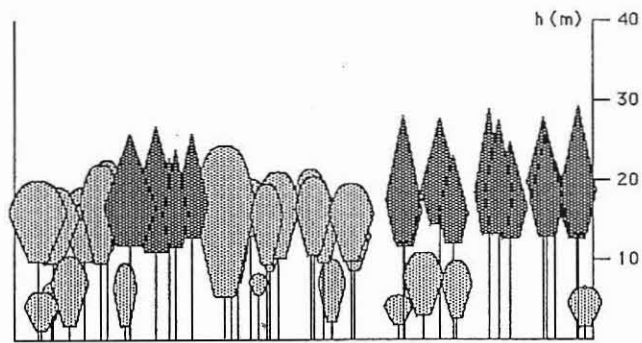


Abb. 3. Bestandesaufrißzeichnungen für einen Fichten-Buchen-Mischbestand (Versuchsfläche ZWI 111/3, Zone 30–35 m) im Jahr 1954 (oben) und im Jahr 1982 (unten) (hellgrau: Buche, dunkelgrau: Fichte)

Fig. 3. Vertical sectional drawings for a mixed stand of spruce and beech (experimental plot ZWI 111/3, zone 30–35 m) in 1954 (above) and in 1982 (below) (light-grey: beech, dark-grey: spruce)

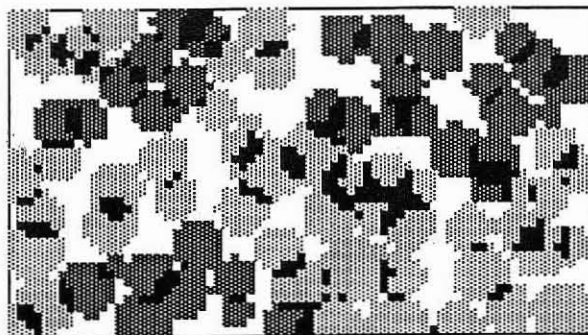
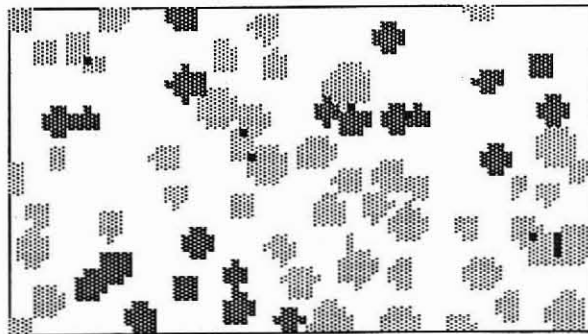


Abb. 4. Horizontalschnitte durch den Kronenraum der Fichten-Buchen-Mischbestandsfläche Zwiesel 111/3 (vgl. Abb. 3, unten) in 20 m und 25 m Höhe (Aufnahme 1982) (hellgrau: Buche, dunkelgrau: Fichte, schwarz: Mehrfach-überschirmung)

Fig. 4. Horizontal profiles of the crown space of the mixed stand of spruce and beech Zwiesel 111/3 (fig. 3, below) at a height of 20 m and 25 m (1982 mapping) (light-grey: beech, dark-grey: spruce, black: multiple sheltering)

Einzelbäumen wie „Kontaktzone zwischen Nachbarn“, „Überlagerung“, „Versperrung“ und „Ablenkung“ geprägt.

Für die Steuerung des Wachstums des Einzelbaumes haben sich vor allem zwei Strukturparameter als wichtig erwiesen: Die seitliche Einengung der Krone und ihre Beschattung.

Seitliche Einengung der Krone ε

Die seitliche Kroneneinengung ε wird nach dem folgenden Verfahren bestimmt (Abb. 5, links):

1. Für einen zu beurteilenden Baum A wird aus einer zuvor abgeleiteten Beziehung der potentielle Kronendurchmesser kd_{pot} bestimmt, der bei optimaler Kronenentwicklung zu erwarten wäre.
2. Von allen Nachbarn der gleichen Kronenschicht wird die Überlappungsfläche mit dem Zentralbaum A berechnet.
3. Die Bestimmung der Überlappungsflächen erfolgt nach dem oben vorgestellten Prinzip der Rasterabfrage an der Grenze zwischen Licht- und Schattkrone des zu beurteilenden Baumes. Die Überlappungsflächen werden in Beziehung zur Gesamtfläche bei potentielltem Kronendurchmesser gesetzt; damit ergibt sich ein relatives Maß für die seitliche Kroneneinengung.

Es ist hervorzuheben, daß diese Überlappungsanalyse auf der Grundlage des räumlichen Modellansatzes in der Baumhöhe durchgeführt werden kann, in der eine seitliche Einengung durch den Nachbarn wirksam wird (Höhenbereich mit dem größten Kronendurchmesser von Baum A). Würde die Überlappungsanalyse unter Vernachlässigung der Baumhöhe nur auf Basis der Kronenprojektionskarten erfolgen, so würden in höhenstrukturierten, mehrschichtigen Beständen häufig Überlappungen – d. h. seitliche Konkurrenzeffekte – diagnostiziert, die nicht bestehen (z. B. Abb. 5, links, Bäume A und D).

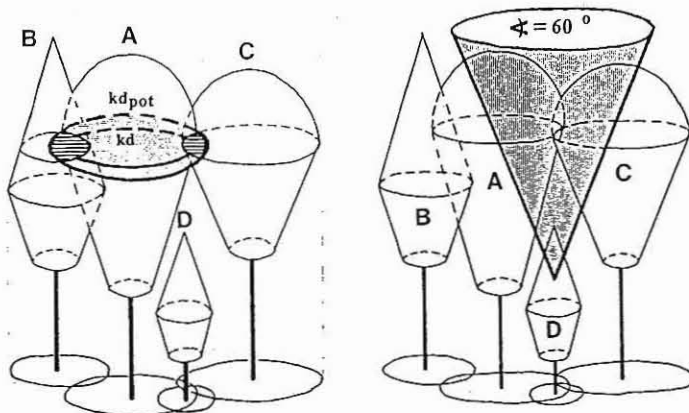


Abb. 5. Bestimmung der seitlichen Kroneneinengung ε (links) und der Beschattung ω (rechts) von Einzelbäumen (links: Bestimmung der seitlichen Kroneneinengung ε von Baum A, rechts: Bestimmung der Beschattung ω von Baum D nach der Lichtkegelmethode)

Fig. 5. Determination of the lateral crown restriction ε (left) and the amount of shade ω (right) of single trees (left: determination of the lateral crown restriction ε of a tree A, right: determination of the amount of shade ω of tree D according to the cone-of-light principle)

Durch Wiederholung des Rechenganges für die Bestandesstruktur nach einem Durchforstungseingriff können ε_{vor} und ε_{nach} bestimmt und die durchforstungsbedingte seitliche Freistellung $\Delta\varepsilon = \varepsilon_{vor} - \varepsilon_{nach}$ quantifiziert werden.

Bestimmung der Beschattung der Krone ω

Zur Bestimmung der Beschattung eines Baumes konstruieren wir, in Anlehnung an SLOBODA und PFREUNDT (1989), in 70 Prozent der Baumhöhe einen Lichtkegel mit einem Öffnungswinkel von 60 Grad (Abb. 5, rechts). Je weiter sich die Nachbarbäume in den Lichtkegel des Zentralbaumes ausbreiten, um so ungünstiger sind sein Lichtangebot und seine Wuchskonstellation. Die Überschirmungsverhältnisse innerhalb des Lichtkegels werden über den Kennwert ω erfaßt. Die Herleitung des Kennwertes ω baut auf dem bereits beschriebenen Rasterverfahren auf und umfaßt – hier stark vereinfacht dargestellt – folgende Schritte:

1. Für den Zentralbaum werden der Lichtkegel und die in den Kegel hineinreichenden Konkurrenten bestimmt.
2. Von den Zellenmittelpunkten innerhalb des Lichtkegels wird nach einem speziellen Algorithmus abgefragt, ob sie Biomasse enthalten. Wenn das der Fall ist, fließt der Raumpunkt mit in den Beschattungsindex ω ein. Der errechnete Beschattungsindex ω ist ein relatives Maß für die Beschattung eines Baumes durch seine Nachbarn.

Es ist hervorzuheben, daß nicht nur die Beschattung ω insgesamt, sondern auch ihre Zusammensetzung nach Baumarten ermittelt wird. In einem Fichten-Buchen-Mischbestand könnte das Ergebnis der Beschattungsanalyse eines Baumes beispielsweise lauten: $\omega = 3$, mit einer Zusammensetzung von $\omega_{FI} = 1$ und $\omega_{BU} = 2$; d. h. der zu beurteilende Baum wird stärker durch benachbarte Buchen als durch Fichten beschattet.

Die Beschattungsanalyse wird, analog der Ermittlung von ϵ , für die Strukturverhältnisse vor und nach Durchforstungseingriffen durchgeführt.

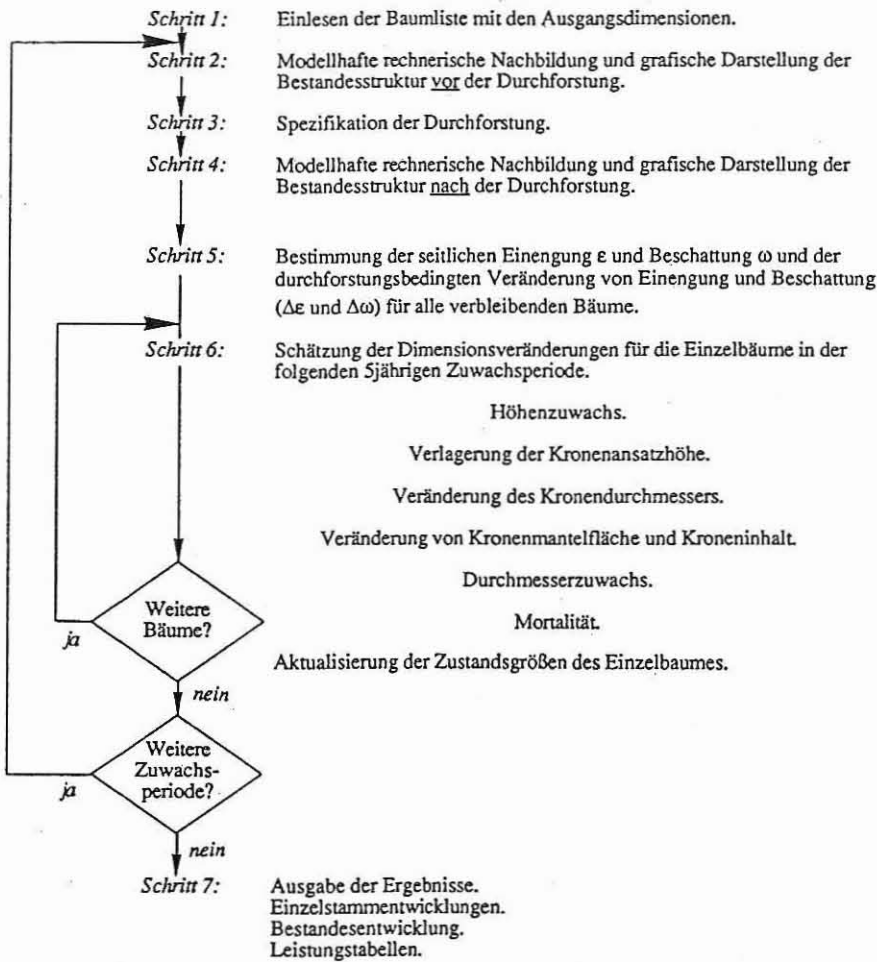
5 Modellkonzeption

Die Strukturparameter ϵ und ω bilden die zentralen Steuergrößen in unserem Simulationsmodell (Übers. 1), das in einem ersten Schritt die Baumliste mit den Ausgangsdimensionen eines Waldbestandes einliest und in einem zweiten die Bestandesstruktur vor der Durchforstung rechnerisch nachbildet und grafisch darstellt (vgl. Abb. 9). Nach Spezifikation der Durchforstung (Schritt 3) erfolgt in Schritt 4 die rechnerische Nachbildung und grafische Darstellung der Bestandesstruktur nach dem Durchforstungseingriff. In Schritt 5, dem rechenintensivsten Teil des Simulationsprogramms, werden für jeden Baum die Strukturparameter ϵ und ω und ihre durchforstungsbedingten Veränderungen ($\Delta\epsilon$ und $\Delta\omega$) bestimmt, die in Schritt 6 zur Steuerung des Höhenzuwachses, des Kronenbreitenzuwachses, der Verlagerung der Kronenansatzhöhe, des Grundflächenzuwachses und der Mortalität in der folgenden fünfjährigen Zuwachsperiode eingesetzt werden. Die aktualisierten Zustandsgrößen der Einzelbäume am Ende des ersten fünfjährigen Simulationszyklus bilden die Startwerte des zweiten Simulationszyklus. Die Schritte 2 bis 6 werden so lange wiederholt, bis der gesamte Prognosezeitraum in Schritten von jeweils fünf Jahren durchlaufen ist und der Prognoselauf mit der Ausgabe der Ergebnisse abschließt. Die äußere Schleife in Übersicht 1 verkörpert den eingangs eingeführten Regelkreis (Abb. 1), und die Strukturparameter ϵ und ω sind seine zentralen Steuergrößen.

6 Modellkonstruktion

Ein Wachstumsmodell dieser Architektur wurde für Fichten-Buchen-Mischbestände realisiert. Als Datengrundlage standen Versuchsflächen in Rein- und Mischbeständen aus Fichte und Buche im Bayerischen Wald, Harz und Allgäu zur Verfügung. Das Modell stützt sich im wesentlichen auf fünf Versuchsreihen mit insgesamt 22 Versuchspartellen der Größe 0,2 bis 0,5 ha im Forstamt Zwiesel im Bayerischen Wald.

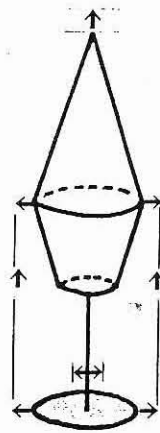
Übersicht 1. Darstellung der wichtigsten Programmschritte in einem Simulationsprozeß
 Review 1. Presentation of the most important steps during a simulation run



Die vorgestellten Verfahren der dreidimensionalen Strukturanalyse wurden zur Gewinnung einzelbaumbezogener Umgebungskennwerte aus den Versuchsflächendaten verwendet. In dieser Hinsicht ist das Informationspotential, das in unseren Versuchsflächendaten stecken, noch bei weitem nicht voll erschlossen. Für alle Bäume eines Bestandes können die Kennwerte ϵ und ω Werte ermittelt werden.

Von der Mehrzahl der Bestandesglieder sind der Zuwachs an Höhe und Kronenbreite, die Verschiebung des Kronenansatzes und die Veränderung des Brusthöhendurchmessers für mehrere Fünf-Jahres-Perioden bekannt. Diese Zuwachsinformationen können mit den Strukturparametern ϵ , ω , $\Delta\epsilon$ und $\Delta\omega$ in Verbindung gebracht und zur Parametrisierung der auf Abbildung 6 vorgestellten Teilmodelle benutzt werden.

Die Dimensionsveränderungen des Baumes werden über die auf Abbildung 6 dargestellten Modellansätze beschrieben. Es wurden geeignete Schätzfunktionen entwickelt und diese durch nichtlineare Regressionsanalyse bzw. logistische Regressionsrechnung angepaßt (PRETZSCH 1990a u. 1990b).



$$\hat{z}h = f(zh_{pot}, B, \varepsilon, \omega_{FI}, \omega_{BU}, \Delta\varepsilon, \Delta\omega)$$

Mortalitätsmodell:

$$\hat{T} = j(\varepsilon, \omega, M, V, g_a, \hat{z}g)$$

$$\hat{z}kd = g(zkd_{pot}, \varepsilon, \omega_{FI}, \omega_{BU}, \Delta\varepsilon, \Delta\omega)$$

$$\hat{\Delta}B = i(h, \omega_{FI}, \omega_{BU})$$

$$\hat{z}d = h_1(\hat{z}g) = h_2(g_a, M, V, \omega_{FI}, \omega_{BU}, \Delta\omega)$$

Abb. 6. Modellansätze für die wichtigsten Dimensionsveränderungen des Einzelbaumes – vorläufige Ergebnisse

Ziel -bzw. Schätzgrößen:

zh	Höhenzuwachs
zkd	Kronendurchmesserzuwachs
$\Delta\hat{B}$	Veränderung des Bekronungsgrades
zd	Durchmesserzuwachs
$z\hat{g}$	Grundflächenzuwachs
\hat{T}	Mortalität bzw. Überlebensstatus

Steuergrößen:

ω_{FI}, ω_{BU}	Beschattung durch Fichte und Buche
ε	seitliche Kroneneinengung
$\Delta\omega, \Delta\varepsilon$	durchforstungsbedingte Änderung von ω und ε
zh_{pot}	potentieller Höhenzuwachs
zkd_{pot}	potentieller Kronendurchmesser-Zuwachs
h	Baumhöhe
M	Kronenmantelfläche
V	Kronenvolumen
g_a	Ausgangsgrundfläche

Fig. 6. Model approaches for the most important changes in dimension of single stems – preliminary results:

predicted dimensions:

zh	height increment
zkd	increase of crown diameter
$\Delta\hat{B}$	change of live crown ratio
zd	diameter increment
$z\hat{g}$	basal area increment
\hat{T}	mortality

variables of influence:

ω_{FI}, ω_{BU}	amount of shade by spruce and beech
ε	lateral crown restriction
$\Delta\omega, \Delta\varepsilon$	changes in ω, ε by thinning
zh_{pot}	potential height increment
zkd_{pot}	potential increase of crown diameter
h	tree height
M	crown surface area
V	crown volume
g_a	initial basal area

7 Teilmodell zur Bestimmung des Höhenzuwachses

Am Beispiel des Teilmodells zur Steuerung des Höhenzuwachses soll im folgenden gezeigt werden, wie die Strukturparameter ε und ω in die Modellgleichung einfließen und den Höhenzuwachs steuern. Der aktuelle Höhenzuwachs (zh) eines Baumes wird geschätzt aus seinem potentiellen Höhenzuwachs zh_{pot} , der unter Optimalbedingungen zu erwarten wäre. Dieser wird bei Abweichung des Baumes von den Optimalbedingungen, die in dem Multiplikator STEUH zum Ausdruck kommt, reduziert (Formel 1).

$$zh = zh_{pot} \times STEUH \quad \text{Formel 1}$$

STEUH setzt sich aus vier Faktoren zusammen:

$$STEUH = BSTEUH \times \varepsilon STEUH \times \omega STEUH \times \Delta STEUH$$

BSTEUH = B^{b_0}	Einfluß des Bekronungsgrades
ε STEUH = $b_1 \times e^{(b_2 \times \varepsilon + b_3 \times \varepsilon^2)}$	Einfluß der seitlichen Kroneneinengung ε
ω STEUH = $e^{(b_4 \times \omega FI + b_5 \times \omega BU)}$	Einfluß der Beschattung ω
Δ STEUH = $(1,0 + b_6 \times \Delta\varepsilon + b_7 \times \Delta\omega)^{b_8}$	Einfluß der durchforstungsbedingten seitlichen Freistellung $\Delta\varepsilon$ und Auflichtung $\Delta\omega$

Durch Einsetzen der vier Faktoren BSTEUH, ε STEUH, ω STEUH und Δ STEUH, die den Einfluß von Bekronungsgrad (B), seitlicher Kroneneinengung (ε), Beschattung (ω) und abrupter Veränderung von Einengung und Beschattung ($\Delta\varepsilon$ und $\Delta\omega$) auf die Höhenentwicklung steuern, erhalten wir für das Höhenzuwachsmodell:

$$\hat{z}h = zh_{pot} \times B^{b_0} \times b_1 \times e^{(b_2 \times \varepsilon + b_3 \times \varepsilon^2)} \times e^{(b_4 \times \omega FI + b_5 \times \omega BU)} \times (1,0 + b_6 \times \Delta\varepsilon + b_7 \times \Delta\omega)^{b_8} \quad \text{Formel 2}$$

mit den Variablenbezeichnungen:

$\hat{z}h$	= wirklicher Höhenzuwachs
zh_{pot}	= potentieller Höhenzuwachs
B	= Bekronungsgrad (Kronenlänge/Baumhöhe)
ε	= Kennwert für die seitliche Kroneneinengung
ωFI , ωBU	= Beschattung durch Fichte bzw. Buche
$\Delta\varepsilon$, $\Delta\omega$	= durchforstungsbedingte abrupte Veränderung der seitlichen Kroneneinengung ε bzw. der Beschattung ω
b_0 bis b_8	= baumartenspezifische Modellparameter (vgl. Tab. 1).

Wir werden bei der folgenden Besprechung des Höhenzuwachsmodells nur auf den Effekt eingehen, den ε und ω auf die Zuwachsgrößen haben.

Tabelle 1. Koeffizienten b_0 bis b_8 und Bestimmtheitsmaße (= B) des Höhenzuwachsmodells für Fichte und Buche (Formel 2) (b_0 bis b_5 Parameter des Höhenzuwachsmodells ohne Durchforstungseffekt, b_6 bis b_8 Parameter zur Steuerung des Durchforstungseffekts)

Table 1. Parameters and multiple R^2 (=B) of the models of height increment for spruce and beech (formula 2) (b_0 bis b_5 Parameters of the height increment model without the effect of thinning, b_6 bis b_8 Parameters describing the effect of thinning)

Baumart	n	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7	b_8	B
Fichte	622	0.1004	0.840	0.378	-0.208	-0.629	-0.465	0.839	0.113	-0.810	0.47
Buche	568	0.0875	0.890	0.247	-0.144	-0.437	-0.208	0.060	0.114	-0.423	0.35

Seitliche Einengung der Krone ε und Beschattung der Krone ω

Das Ziel der zweifaktoriellen Beschreibung der Wuchskonstellation über die Kennzahlen ε und ω ist es, horizontale und vertikale Konkurrenz zu trennen und ihre spezifischen Wirkungen auf den Zuwachs zu quantifizieren.

Abbildung 7a und b zeigt für Fichte und Buche die Kombinationswirkung von seitlicher Einengung ε und Beschattung ω auf den Multiplikator STEUH (STEUH = 1,0 bedeutet potentieller Zuwachs). Zwischen dem Grad der seitlichen Einengung (ausgedrückt durch die Kennzahl ε) und dem Höhenzuwachs von Fichte und Buche besteht eine Optimum-Beziehung: Maximale Höhenzuwächse werden bei mittlerem seitlichem Konkurrenzdruck ε erreicht.

Mit zunehmender Beschattung ω der Krone fällt der Höhenzuwachs – bei Konstanthaltung aller anderen Einflußfaktoren – exponentiell ab. Der Schattbaumcharakter der Buche kommt dadurch zum Ausdruck, daß ihr Kurvenabfall im Vergleich zur Fichte wesentlich schwächer ist (Abb. 7a und b). Beispielsweise sinkt der Zuwachs der Buche bei einer

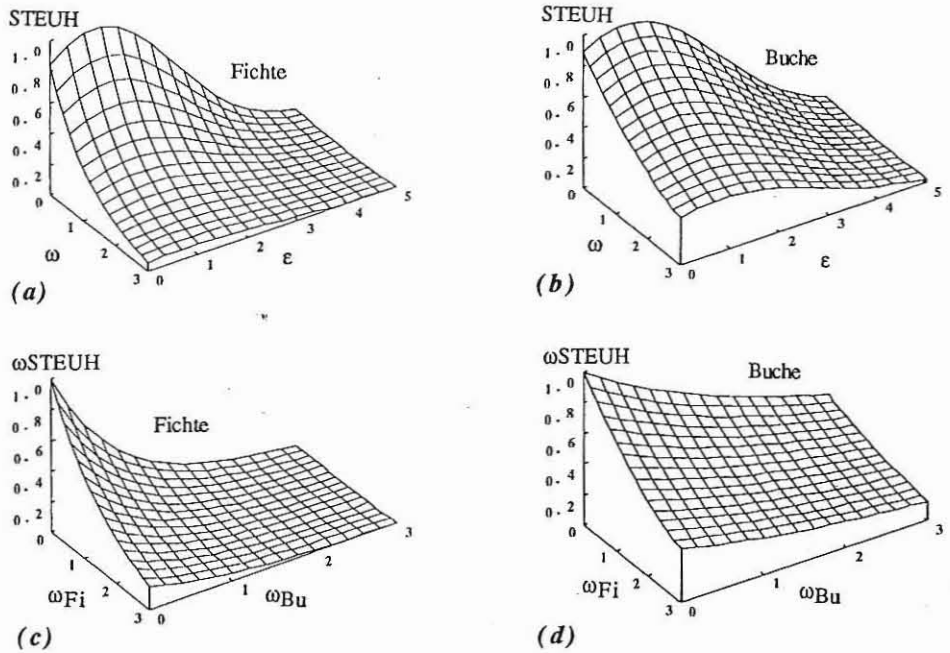


Abb. 7. Einfluß der Strukturparameter ϵ und ω auf den Höhenzuwachs – vorläufige Ergebnisse (a und b: Kombinationswirkung von ϵ und ω auf den Höhenzuwachs von Fichte [a] und Buche [b], c und d: baumartenspezifische Beschattungswirkung von Fichte und Buche auf den Höhenzuwachs von Fichte [c] und Buche [d])

Fig. 7. Influence of the structure parameters ϵ and ω on height increment – preliminary results (a and b: effect of the combination of ϵ and ω on height increment of spruce [a] and beech [b], c and d: effect of the amount of shade (specific to different species) of spruce and beech on height growth of spruce [c] and beech [d])

Beschattung von $\omega = 1$ auf 70 % (STEUH = 0,7) und bei der Fichte auf 40 % (STEUH = 0,4) des potentiellen Höhenzuwachses (STEUH = 1,0) ab.

Für einen Baum fließen seine Beschattung durch benachbarte Fichten und Buchen ω_{Fi} und Buche ω_{Bu} separat, d. h. mit verschiedenen Parametern in das Modell ein (Tab. 1). Aus Abbildung 7c kann für eine Fichte abgelesen werden, wie ihr Höhenzuwachs reagiert, wenn sich ihr Umfeld ausschließlich aus Buchen ($\omega_{Bu} > 0$, $\omega_{Fi} = 0$) oder ausschließlich aus Fichten ($\omega_{Fi} > 0$, $\omega_{Bu} = 0$) aufbaut. In diesen Fällen erfolgt die Ablesung an den zur x- und y-Achse parallelen Basislinien der Regressionsflächen, welche Reinbestandsverhältnisse repräsentieren. Außerdem kann die Wirkung beliebiger Mischverhältnisse von Buche und Fichte auf den Zuwachs abgegriffen werden ($\omega_{Fi} > 0$ und $\omega_{Bu} > 0$). Die Ablesung des Höhenzuwachses erfolgt dann bei der entsprechenden Wertekombination (z. B. $\omega_{Fi} = 1$, $\omega_{Bu} = 3$).

Im Modell wird also nicht nur die bekannte Tatsache berücksichtigt, daß die Zuwachsreaktion auf Beschattung baumartenspezifisch ist, daß etwa die Buche schattentoleranter als die Fichte ist, sondern auch, daß der Beschattungsbeitrag der Nachbarn baumartenabhängig ist, daß z. B. die Fichte lichtundurchlässiger ist als die Buche. Durch die Zusammenfassung dieser beiden Effekte in den Modellgleichungen kann, wie FRANZ es bezeichnen würde, „... der Reinbestand zum Grenzfall des Mischbestandes ...“ nachgebildet werden.

In die Teilmodelle zur Steuerung der Entwicklung von Brusthöhendurchmesser, Höhe,

Kronendurchmesser und Kronenansatzhöhe fließen – ähnlich wie in das Höhezuwachsmo-
dell – neben den Strukturparametern ε und ω zu Beginn der Zuwachsperiode die
durchforstungsbedingten Veränderungen $\Delta\varepsilon$ und $\Delta\omega$ ein (Abb. 6). Hierdurch wird
berücksichtigt, daß ein Baum auf ε - und ω -Werte, die durch abrupte Freistellung entstan-
den sind, anders reagiert als auf eine Wuchskonstellation gleicher ε - und ω -Werte, die
allmählich entstanden ist.

8 Ergebnisse eines Test-Simulationslaufs (A-Grad)

Durch Kompilation der Teilmodelle für die Bestimmung der Höhen- und Kronenbreiten-
entwicklung, der Verlagerung der Kronenansatzhöhe, der Durchmesserentwicklung und
der Mortalität (Abb. 6) entsteht ein Wachstumssimulator für Fichten-Buchen-Mischbe-
stände. Nach Spezifikation einer Ausgangssituation kann mit dem Simulator das Wuchs-
verhalten bei verschiedenen Mischungsanteilen und Mischungsformen nachgebildet wer-
den, und es lassen sich verschiedene Durchforstungseingriffe simulieren.

Die vom Modell erzeugten Aussagewerte werden am Beispiel eines Prognoselaufs für
einen Fichten-Buchen-Mischbestand auf einer weitverbreiteten Standorteinheit im Bayeri-
schen Wald erläutert. Der Simulationslauf vermittelt einen Eindruck von der Wuchsdyna-
mik ostbayerischer, submontaner Fichten-Buchen-Mischbestände, in denen die Fichte
optimale Wuchsbedingungen findet und der Buche in der Wuchsleistung deutlich überle-
gen ist. Der Bestand stockt auf einer zweischichtigen frischen Podsol-Braunerde aus
Fließerde über Grundsclutt (Standorteinheit 2, 7, 2 nach dem bayerischen Dezimalsystem
zur Kennzeichnung von Standorteinheiten).

Der Prognoselauf soll aber weniger das bestandestypische Wachstum, als vielmehr die
Ergebnisstruktur eines Simulationslaufs und die Palette der vom Modell erzeugten Infor-
mationen sichtbar machen. Wir haben als Startsituation des Simulationslaufs ($t = 0$) die
Bestandesstruktur auf einem 0,1 ha großen Ausschnitt der im Jahr 1954 aufgenommenen
Fichten-Buchen-Mischbestands-Versuchsfläche ZWI 111/3 im Forstamt Zwiesel ausge-
wählt.

Höhen- und Durchmesser-Wachstumsverläufe der Einzelbäume

Sie sehen auf Abbildung 8 (oben und unten) die Höhen- und Durchmesser-Wachstumsver-
läufe aller Einzelbäume dieser Testfläche als Ergebnisse eines Simulationslaufs über 60
Jahre. Der Simulationslauf repräsentiert A-Grad-Verhältnisse; er zeigt die ohne aktive
Entnahmen zu erwartenden Einzelbaumentwicklungen.

Zum Startzeitpunkt war die Fichte etwa 60jährig und stellte einen Mischungsanteil von
ca. 70 %, die Buche war 80jährig und hatte einen Anteil von ca. 30 % (Grundflächenpro-
portionen). Der Standort liegt unterhalb der für die Buche günstigen Inversionslage im
Bayerischen Wald. Die Buche ist dort – trotz ihres Altersvorsprungs – der Fichte im
Höhenwachstum deutlich unterlegen. Die Wachstumsverläufe (Fichte schwarz, Buche
punktiert) lassen erkennen, daß die Fichte – weitgehend ungestört von der Buche – den
oberen Bereich der Kurvenschar abdeckt. Nichtparallelitäten in den Wachstumskurven
zeichnen sich vor allem im Mittelfeld der Kurvenschar ab, da hier die Selbstdifferenzie-
rungsprozesse besonders wirksam sind. Bei der Buche zeigen sich in diesem Dimen-
sionsbereich häufig einschwenkende Kurvenverläufe oder Ausfälle, da sie der Fichte in der
Konkurrenz unterlegen ist.

Häufigkeitsaussagen über Einzelstamm-Dimensionen

Für beliebige Zeitpunkte können die aktuellen Häufigkeitsverteilungen der Einzelbaum-
dimensionen abgerufen werden. Abbildung 8 (unten) zeigt für drei Zeitpunkte ($t = 0$,

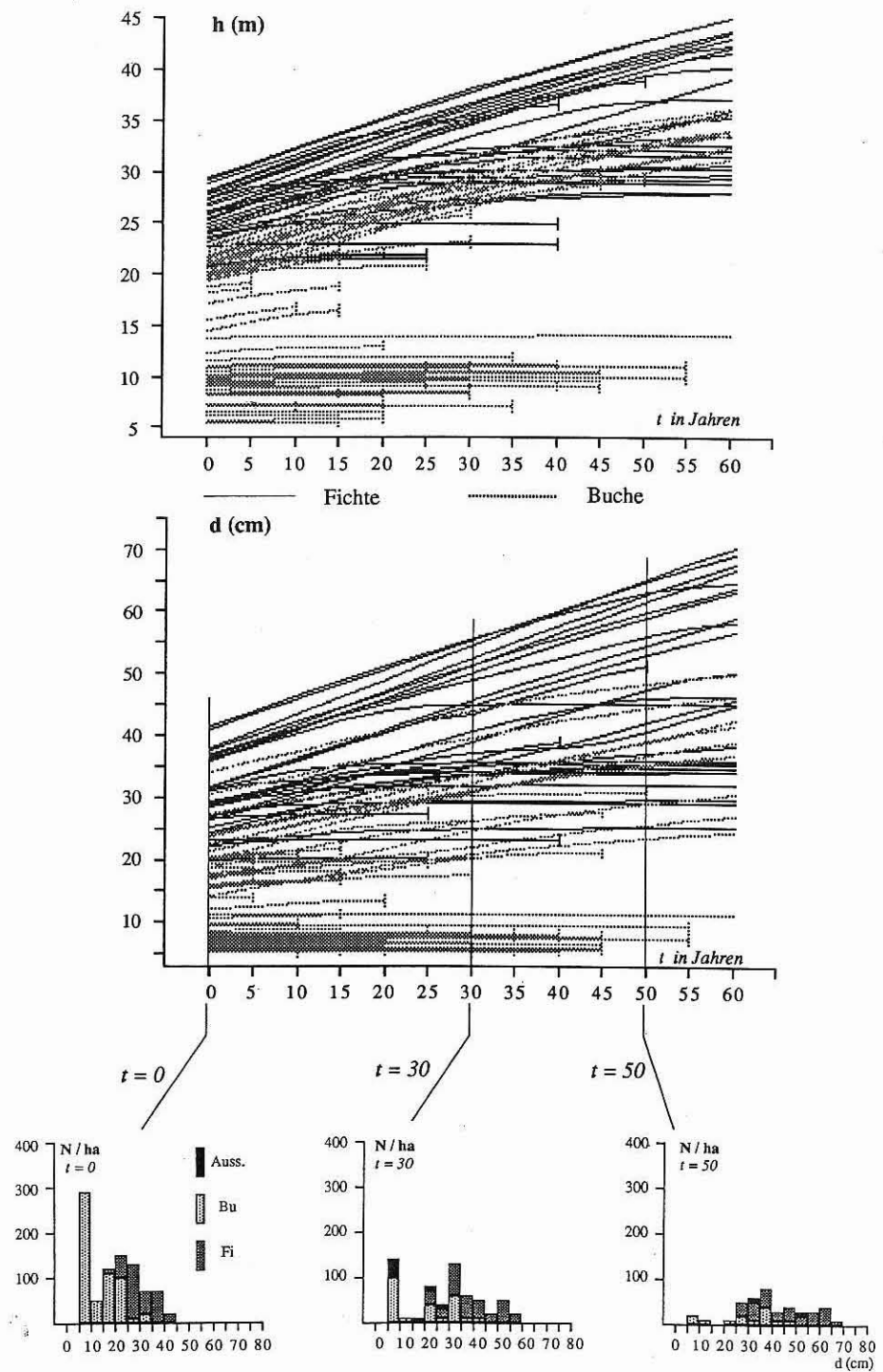


Abb. 8. Dimensionsentwicklungen der Einzelbäume auf einer 0.125 ha großen Testfläche eines Fichten-Buchen-Mischbestandes (durchgezogene Linien: Fichten und punktierte Linien: Buchen) nach den Ergebnissen eines Simulationslaufs über 60 Jahre (vorzeitig abbrechende, mit Querstrich versehene Linien bezeichnen Stammusaufälle) (oben: Höhenwachstumsverläufe, unten: Stammzahlwachstumsverläufe für die Zeitpunkte $t = 0$, $t = 30$ und $t = 50$)

Fig. 8. Development of the dimensions of single stems on an experimental area of 0.125 hectares of a mixed forest stand of spruce and beech (solid lines: spruce, dotted lines: beech) according to the results of a simulation process of 60 years (stem losses are indicated by broken lines marked by a cross-line) (above: course of height growth, middle: course of diameter growth, below: stem numbers in 5-cm diameter classes for different points of time $t = 0$, $t = 30$ and $t = 50$)

$t = 30$ und $t = 50$) beispielhaft die Stammzahlfrequenzen über 5-cm-Durchmesserstufen, auf die bei einer Kalkulation der Sorten- und Wertleistung zurückgegriffen wird.

Zeitreihen von Aufrißzeichnungen zur Darstellung der Strukturentwicklung

Für jede Phase des Simulationslaufs können wir uns die aktuelle Bestandesstruktur einblenden lassen. Abbildung 9 (oben) zeigt die Bestandesstruktur auf einem 5 m breiten Streifen der Testfläche zu Beginn des Simulationslaufs (Fichte 60jährig, Buche 80jährig). Auf den Abbildungen 9 (Mitte und unten) ist die simulierte Bestandesstruktur nach 20, 40 und 60 Jahren dargestellt ($t = 20$, $t = 40$ und $t = 60$). Anhand der Bildsequenz kann die Entwicklung von Einzelbäumen verfolgt werden. Beispielsweise ist erkennbar, daß die Buche, sofern sie nicht gepflegt wird oder in Gruppen steht, unter A-Grad-Bedingungen zunehmend von der Fichte eingeengt wird und ausfällt. Im Unterstand vergrößert sie, um die Lichtaufnahme zu erhöhen, ihre Kronenbreite.

Ertrags Elemente des Bestandes

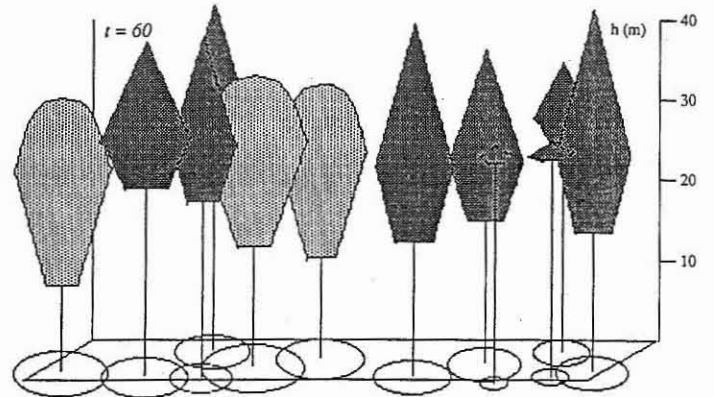
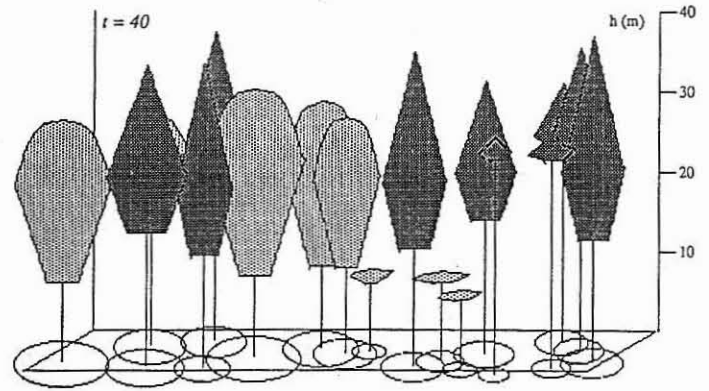
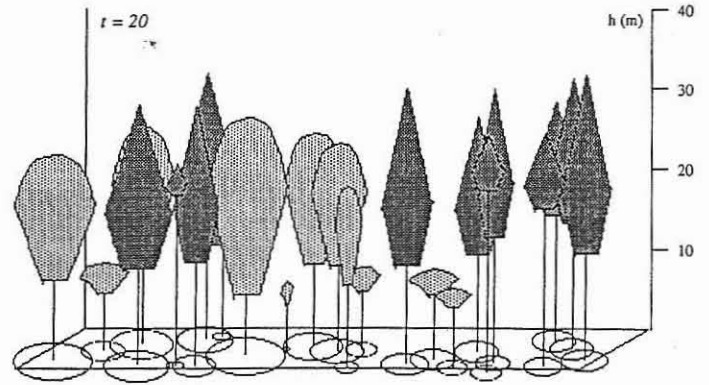
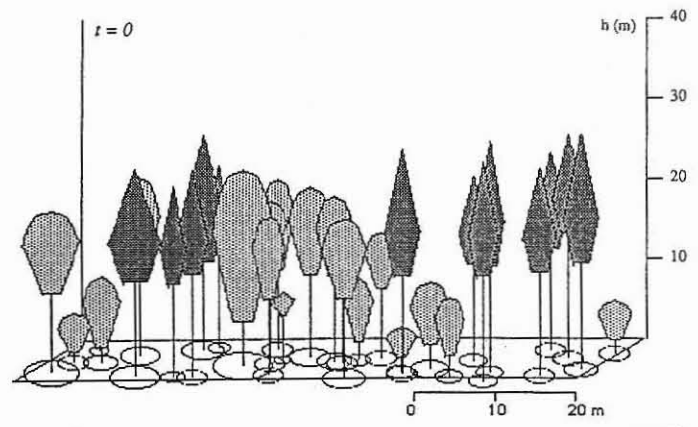
Durch summarische Betrachtung aller Einzelbaum-Veränderungen gelangen wir auf die nächst niedrigere Auflösungsebene: Wir erhalten die klassischen bestandesbezogenen Daten. Abbildung 10 zeigt die Kurvenverläufe von Mittelhöhe (= Höhe des Grundflächenmittelstammes), Stammzahl, Grundfläche und Derbholzvorrat pro ha in dem 60jährigen Prognosezeitraum für die soeben vorgestellte Mischbestands-Testfläche (A-Grad-Verhältnisse). Die Entwicklung der Mittelhöhen unterstreicht die Überlegenheit der Fichte. Unter A-Grad-Verhältnissen, ohne Pflegeeingriffe, nimmt die Stammzahl der Buche kontinuierlich ab. Die Grundflächen- und Volumenkurven stimmen sowohl im Niveau als auch im Alterstrend gut mit den Befunddaten benachbarter, unbehandelter und nur schwach behandelter Versuchspartellen und unseren Erwartungswerten überein.

Die Ergebnisse des Simulationslaufs werden schließlich in Standort-Leistungstabellen zusammengefaßt, die dem klassischen Aufbau der Ertragstabellen entsprechen (Tab. 2). In ihnen sind die Ertrags Elemente des Bestandes in Fünf-Jahres-Intervallen gesondert für Fichte und Buche ausgewiesen. Diese Tabellen repräsentieren nur einen kleinen Ausschnitt – nämlich die Bestandesmittel- und -summenwerte – aus der breiten Palette der von unserem Einzelbaumsimulator erzeugten Aussagenwerte.

Neben der Entwicklung von Fichten-Buchen-Mischbeständen mit verschiedenen Mischungsanteilen, räumlichen Mischungskonfigurationen und Behandlungsprogrammen kann auch die Entwicklung von Reinbeständen aus Fichte und Buche mit dem Simulator nachgebildet werden. Die auf dem betrachteten Standort zu erwartenden Entwicklungen für Fichte und Buche im Reinbestand bilden – im Sinne von FRANZ – die Grenzfälle des Fichten-Buchen-Mischbestandes und werden vom Modell mit abgedeckt. Auf Abbildung 11 sind Ausschnitte aus dem Simulationslauf für einen Fichtenreinbestand (oben) und Buchenreinbestand (unten) in den Phasen $t = 0$, $t = 20$ und $t = 60$ (Altersphasen 60 bis 120 Jahre bei Fichte und 80 bis 140 Jahre bei Buche) dargestellt.

9 Schlußbetrachtung

Der hier vollzogene Übergang zur einzelbaumorientierten Betrachtungsweise und Modellbildung bedeutet in vielem einen Paradigmenwechsel in der Waldwachstumsforschung. Er eröffnet neue, erfolgversprechende Ansätze zum Verständnis und zur modellhaften Nachbildung des Wachstums von Rein- und Mischbeständen. Der Modellansatz stellt einen Mittelweg dar zwischen den bestandesbezogenen, statistischen Wuchsmodellen ASSMANN/Franz'scher Prägung und ökophysiologischen Prozeßmodellen, vertreten durch SLOBODA,



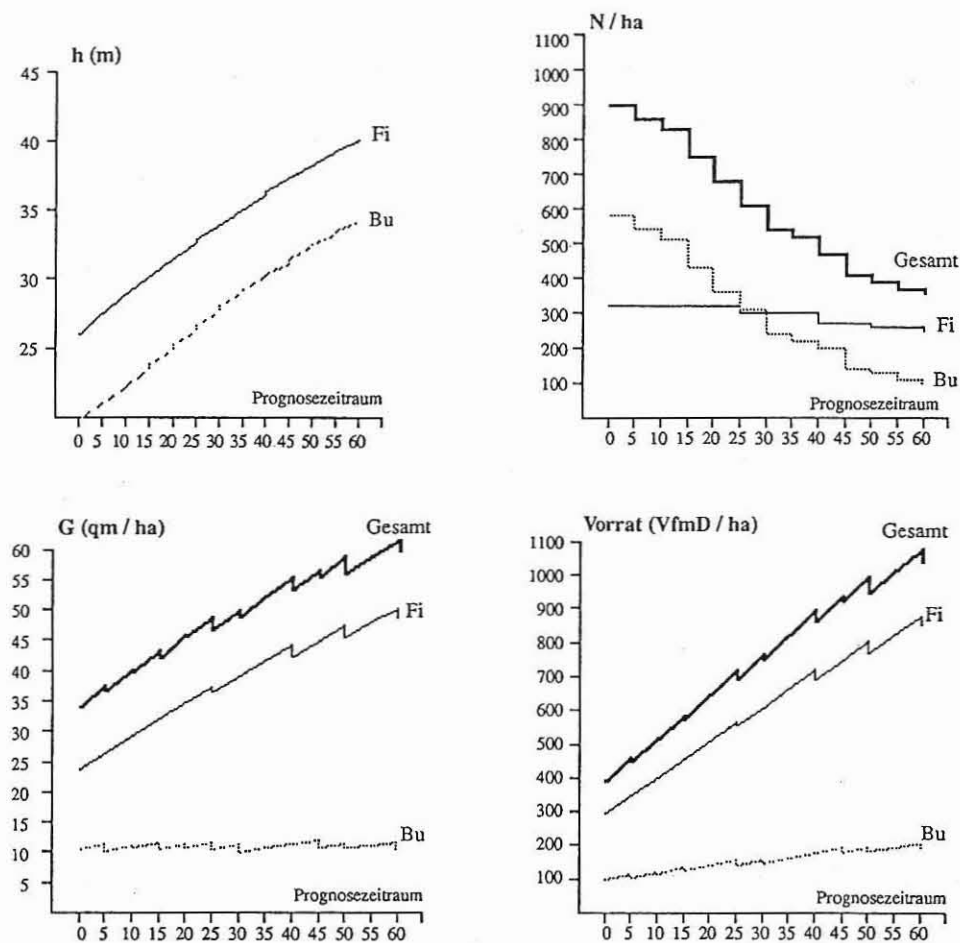


Abb. 10. Entwicklung der wichtigsten Bestandeswerte des verbleibenden Bestandes auf der Fichten-Buchen-Mischbestands-Testfläche (hochgerechnet auf ha-Werte) nach den Ergebnissen eines Simulationslaufs über 60 Jahre ($t = 0$ bis $t = 60$) (oben: Höhe des Grundflächenmittelstammes [h_m in m] und Stammzahl [N/ha], unten: Grundfläche [G in qm/ha] und Derbholzvorrat [V_D in V_{fmD}/ha])

Fig. 10. Development of the most important data for the residual stand (per ha) on the experimental area of the mixed stand for spruce and beech according to the results obtained by a 60-year simulation run (from $t = 0$ to $t = 60$) (above: height of the average tree [h_m in metres] and stem number [N/ha], below: basal area [G in square metres/ha] and volume [V_D in m^3 standing volume/ha])

Abb. 9. Bestandesdynamik auf einem 5 m breiten Streifen der Fichten-Buchen-Mischbestands-Testfläche nach den Ergebnissen eines Simulationslaufs über 60 Jahre. Dargestellt ist die Bestandsstruktur zu Beginn des Simulationslaufs ($t = 0$) und nach 20, 40 und 60 Jahren ($t = 20$, $t = 40$ und $t = 60$)

Fig. 9. Dynamics of a stand on a 5-m strip within the experimental plot of the spruce-beech stand (according to the results obtained by a 60-year simulation run). We see the structure of the stand in the beginning ($t = 0$) and after 20, 40, and 60 years ($t = 20$, $t = 40$ and $t = 60$)

Tabelle 2. Tabellarische Zusammenfassung der Bestandeswerte auf der Fichten-Buchen-Mischbestands-Testfläche nach den Ergebnissen eines Simulationslaufs über 60 Jahre (hochgerechnet auf ha-Werte). In den Spalten (von links nach rechts) sind folgende Bestandeswerte verzeichnet:

BA Baumart
A Alter
h_o biologische Oberhöhe

Für den verbleibenden Bestand:

h_m Höhe des Grundflächenmittelstammes
d_m Durchmesser des Grundflächenmittelstammes
V_D Derbholzvorrat

N Stammzahl
G Bestandesgrundfläche
f_{1,3} Derbholzformzahl

Für den ausscheidenden Bestand:

h_m Höhe des Grundflächenmittelstammes
d_m Durchmesser des Grundflächenmittelstammes
V_D Derbholzvorrat

N Stammzahl
G Bestandesgrundfläche

Für den Gesamtbestand:

Lz_G laufender jährlicher Grundflächenzuwachs

Lz_{V_o} laufender jährlicher Derbholzzuwachs

Table 2. Tabular summary of the values on the experimental area of the mixed stand of spruce and beech according to the results obtained by a simulation run of 60 years (the projection is made for hectare values). The different columns (from left to right) show the following data for the stand:

BA tree species
A age
h_o biological top height

For the residual stand:

h_m average total height
d_m average diameter
V_D growing stock volume

N number of trees
G stand basal area
f_{1,3} form factor

For the removed trees:

h_m average total height
d_m average diameter
V_D volume

N number of trees
G stand basal area

For the whole stand:

Lz_G annual basal area increment

Lz_{V_o} annual volume increment

Baumart	Alter	biologische Oberhöhe	Verbleibender Bestand						Ausscheidender Bestand					Gesamtbestand		Alter	Baumart
			Mittelhöhe	Stammzahl	Mittlerer Durchmesser	Grundfläche	Derbholzvorrat	Derbholzformzahl	Mittelhöhe	Stammzahl	Mittlerer Durchmesser	Grundfläche	Derbholzvorrat	Lfd. jährl. Grundflächenzuwachs	Lfd. jährl. Derbholzzuwachs		
BA	A	h _o	h _m	N	d _m	G	V _D	f _{1,3}	h _m	N	d _m	G	V _D	Lz _G	Lz _{V_o}	A	BA
FI	60	29,4	26,0	320	30,7	23,7	297	480	0,0	0	0,0	0,0	0	0,54	10,1	60	FI
BU	80	24,7	19,8	580	15,0	10,3	98	482	0,0	0	0,0	0,0	0	0,17	3,1	80	BU
SU			900		34,0	395			0	0	0,0	0,0	0	0,72	13,2		SU
FI	65	31,3	27,5	320	32,4	26,4	347	477	0,0	0	0,0	0,0	0	0,55	10,6	65	FI
BU	85	26,0	21,0	540	15,5	10,2	105	488	20,2	40	17,8	1,0	10	0,17	3,2	85	BU
SU			860		36,6	451			40	40	1,0	1,0	10	0,72	13,8		SU
FI	70	32,9	28,9	320	34,1	29,2	400	474	0,0	0	0,0	0,0	0	0,56	11,0	70	FI
BU	90	27,2	22,3	510	16,3	10,6	116	493	20,1	30	13,7	0,4	4	0,17	3,4	90	BU
SU			830		39,8	516			30	30	0,4	4	4	0,73	14,4		SU
FI	75	34,4	30,2	320	35,7	32,0	455	470	0,0	0	0,0	0,0	0	0,55	11,1	75	FI
BU	95	28,3	23,8	430	17,5	10,3	123	499	20,0	80	13,2	1,1	10	0,16	3,3	95	BU
SU			750		42,3	578			80	80	1,1	1,1	10	0,71	14,4		SU
FI	80	35,6	31,4	320	37,2	34,8	510	467	0,0	0	0,0	0,0	0	0,52	10,6	80	FI
BU	100	29,4	25,2	360	19,6	10,8	138	504	14,6	70	7,6	0,3	2	0,16	3,4	100	BU
SU			680		45,6	648			70	70	0,3	2	2	0,68	14,1		SU
FI	85	36,6	32,8	300	39,3	36,4	554	463	21,6	20	24,0	0,9	10	0,51	10,7	85	FI
BU	105	30,4	26,6	310	20,7	10,4	141	508	22,9	50	17,6	1,2	14	0,15	3,4	105	BU
SU			610		46,9	695			70	70	2,1	23	23	0,66	14,1		SU
FI	90	37,5	33,9	300	40,7	39,0	607	459	0,0	0	0,0	0,0	0	0,54	11,4	90	FI
BU	110	31,3	28,1	240	23,0	9,9	143	512	24,6	70	15,0	1,2	15	0,15	3,3	110	BU
SU			540		48,9	750			70	70	1,2	15	15	0,69	14,8		SU
FI	95	38,2	35,0	300	42,1	41,7	665	455	0,0	0	0,0	0,0	0	0,53	11,4	95	FI
BU	115	32,2	29,2	220	24,8	10,6	159	515	10,5	20	6,8	0,1	0	0,14	3,3	115	BU
SU			520		52,3	824			20	20	0,1	0	0	0,67	14,6		SU
FI	100	38,8	36,3	270	44,7	42,3	691	450	31,4	30	29,3	2,0	30	0,52	11,4	100	FI
BU	120	33,0	30,3	200	26,7	11,2	175	517	10,6	20	6,8	0,1	0	0,12	3,1	120	BU
SU			470		53,5	866			50	50	2,1	31	31	0,65	14,5		SU
FI	105	39,2	37,3	270	46,0	44,9	748	447	0,0	0	0,0	0,0	0	0,53	11,5	105	FI
BU	125	33,8	31,5	140	31,3	10,8	176	520	27,1	60	15,1	1,1	14	0,12	2,9	125	BU
SU			410		55,7	924			60	60	1,1	14	14	0,64	14,5		SU
FI	110	39,5	38,2	260	47,2	45,5	770	443	38,9	10	51,3	2,1	36	0,48	10,8	110	FI
BU	130	34,6	32,5	130	32,2	10,6	180	521	29,3	10	30,8	0,7	11	0,11	2,8	130	BU
SU			390		56,1	950			20	20	2,8	47	47	0,59	13,6		SU
FI	115	39,7	39,2	260	48,4	47,9	824	439	0,0	0	0,0	0,0	0	0,44	10,0	115	FI
BU	135	35,3	33,5	110	35,7	11,0	193	523	10,7	20	8,6	0,1	0	0,10	2,7	135	BU
SU			370		58,9	1017			20	20	0,1	0	0	0,55	12,7		SU
FI	120	40,1	40,0	260	49,5	50,1	874	436	0,0	0	0,0	0,0	0	0,45	10,2	120	FI
BU	140	36,0	34,2	110	36,5	11,5	207	524	0,0	0	0,0	0,0	0	0,10	2,7	140	BU
SU			370		61,7	1081			0	0	0,0	0,0	0	0,55	13,0		SU

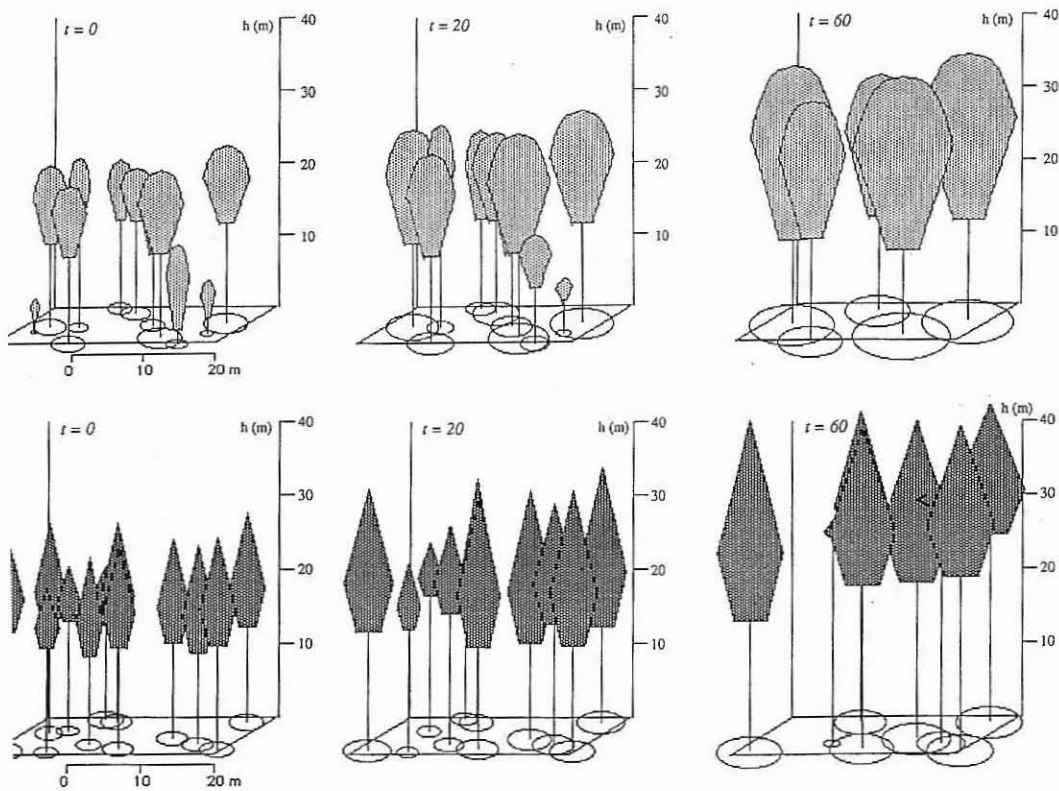


Abb. 11. Entwicklung eines Fichten-Reinbestandes (oben) und eines Buchen-Reinbestandes (unten) nach den Ergebnissen eines Simulationslaufs über 60 Jahre. Dargestellt in die Bestandesstruktur zu Beginn des Simulationslaufs ($t = 0$) und in den Phasen $t = 20$ und $t = 60$ auf einem 5 m breiten und 30 m langen Ausschnitt der Testfläche

Fig. 11. Development of a pure stand of spruce (above) and beech (below) as result of a simulation run of 60 years. We see the structure of the stand in the beginning ($t = 0$) and in the phases $t = 20$ and $t = 60$ on a sector within the experimental plot which is 5 metres in width and 30 metres in length

HARI, MÄKELÄ und MOHREN. Aufgebaut wird auf der Forschungslinie von BOTKIN et al. (1972), MONSERUD (1975), MITCHELL (1975) und WENSEL und KOEHLER (1985) in Nordamerika und neueren Arbeiten von KOOP (1989) in den Niederlanden und STERBA (1989) in Wien. Eine einfache Schlüsselerkenntnis aus den genannten neueren Arbeiten von SLOBODA, KOOP und STERBA ist, daß wir der Entwicklung von Rein- und Mischbeständen nur weiter auf den Grund gehen können, indem wir den Bestand in ein Mosaik von Einzelbäumen auflösen und ihr Miteinander als dynamisches, räumlich-zeitliches System verstehen und modellhaft am Rechner nachbilden.

Die hier dargestellte erste Modellversion bildet das Wachstum der oberirdischen Sproßteile eines Bestandes in Abhängigkeit vom Lichtangebot und seitlichen Konkurrenzdruck nach. Das Modell kann nach Maßgabe neuer Informationen – etwa über die Abläufe im Wurzelraum oder über klimatische Einflüsse – weiter ausgebaut werden. Es deuten sich hier neue Schnittstellen zur Standortkunde, zur Baumphysiologie, zum Waldbau und zur Forsteinrichtung an. In Deutschland befinden wir uns gegenwärtig in der Initialphase dieser Forschungslinie.

Zusammenfassung

Gestützt auf das Datenmaterial langfristig beobachteter Rein- und Mischbestände aus Fichte und Buche wird ein Einzelbaum-Wachstumsimulator für Fichten-Buchen-Mischbestände entwickelt. Das Kernstück des Simulators bilden Funktionen zur Steuerung der Höhenentwicklung, der Kronenbreitenentwicklung, der Verlagerung der Kronenansatzhöhe, der Durchmesserentwicklung und der Mortalität des Einzelbaumes in Abhängigkeit von seiner Wuchskonstellation. Die Steuerungsfunktionen berücksichtigen, daß die Zuwachsreaktionen eines Baumes auf bestimmte Konkurrenzverhältnisse baumartenspezifisch sind, daß die Buche beispielsweise schattentoleranter ist als die Fichte. Außerdem sehen sie vor, daß die Konkurrenzwirkung davon abhängt, aus welchen Baumarten sich die Nachbarschaft eines Baumes aufbaut; daß z.B. benachbarte Buchen lichtdurchlässiger sind als benachbarte Fichten.

Nach Spezifikation der Ausgangssituation eines Bestandes bildet der Simulator die Dimensionsentwicklung aller Einzelbäume des Bestandes in Abhängigkeit von ihrer seitlichen Kroneneinengung ϵ und ihrer Beschattung ω in Fünf-Jahres-Schritten modellhaft nach. Die Veränderung der Bestandesstruktur während eines Prognoselaufs kann am Rechner anhand von Bestandesaufrißzeichnungen bildhaft nachvollzogen werden. Der Simulator erzeugt Aussagen über die Dimensionsentwicklung aller Einzelbäume einer Testfläche, Häufigkeitsaussagen über Einzelbaum-Dimensionen und faßt die flächenbezogenen Ertrags Elemente des Bestandes in Leistungstabellen zusammen, die den klassischen Aufbau von Ertragstabellen haben.

Die vorgestellte Modellversion bildet das Wachstum der oberirdischen Sproßteile in Abhängigkeit vom Lichtangebot und seitlichen Konkurrenzdruck nach. Das Modell kann nach Maßgabe neuer Informationen – etwa über die Abläufe im Wurzelraum – weiter ausgebaut werden.

Summary

Growth models for mixed forest tree stands as a challenge for growth and yield research

Based on data material obtained by long-term observation of pure and mixed forest stands of spruce and beech, a single-stem growth simulator for mixed stands of spruce and beech is developed. The basic items of the simulator are several functions for controlling development of height and crown width as well as changes of the positions of the crown, diameter growth, and mortality of single trees as related to their respective growth constellation. These control functions take into account the fact that growth reactions of a tree with regard to other trees are specific to each species. Beech, for example, is more tolerant to shade than spruce. Besides, competition and control functions depend on the neighbourhood of a tree; neighbouring beeches, for example, are more light-transmissive than neighbouring spruces.

After specifying the initial situation on a test plot the simulator reproduces the growth development of all stems of a stand as related to their lateral crown restriction ϵ and their amount of shade ω in intervals of five years. Changes in stand structure during the prognosis period can be reproduced with the help vertical sectional drawings of the stand. The simulator generates statements of the development of every single stem on a plot and also frequency statements on the dimension of single stems; in addition, it summarizes the different yield elements of the plot in performance tables which have the structure of the classical yield tables.

The model version presented here reproduces the growth of sprouts above ground in dependence on light available and lateral competitive situation. The model can be extended when new information is given, for instance information about growth in the root zone.

Literatur

- ABETZ, P., 1987: Das Solitärprogramm 1987 – Ein Beitrag zur forstlich relevanten Umweltkontrolle. AFZ, H. 45, 1172.
- ASSMANN, E.; FRANZ, F., 1965: Vorläufige Fichten-Ertragstafel für Bayern. Forstwiss. Centralblatt 84, 13–43.
- BOTKIN, D. B.; JANAK, J. F.; WALLIS, J. R., 1972: Some ecological consequences of a computer model of forest growth. Journal of Ecology 60, 872.
- FRANZ, F., 1987: Zum Aufbau eines neuzeitlichen Informationssystems für die Forstwirtschaft. Forstarchiv 58, 4, 131–137.
- KOOP, H., 1989: Forest Dynamics. Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokio und Hongkong.
- KRUMLAND, B. E., 1982: A tree-based forest yield projection system for the north coast region of California. Ph. D. Thesis, Univ. Calif., Berkeley.
- MAGIN, R., 1959: Struktur und Leistung mehrschichtiger Mischwälder in den bayerischen Alpen. Mitt. a. d. Staatforstverw. Bayerns, H. 30.

- MITCHELL, K. J., 1975: Dynamics and simulated yield of douglas-fir. Forest Science, Monograph 17.
- MONSERUD, R. A., 1975: Methodology for simulating Wisconsin Northern hardwood stand dynamics. Ph. D. Thesis, Univ. of Wisconsin, Madison.
- PETRI, H., 1966: Versuch einer standortgerechten, waldbaulichen und wirtschaftlichen Standraumregelung von Buchen-Fichten-Mischbeständen. Mitt. a. d. Landesforstverw. Rhld.-Pfalz, Bd. 1; zugleich Mitt. a. d. Forsteinrichtungsamt Koblenz Nr. 13.
- PRETZSCH, H., 1990a: Analyse der Bestandesstruktur als Grundlage für die Entwicklung eines Wachstumssimulators für Mischbestände. Tagungsberichte der Arbeitsgruppe Biometrie in der Ökologie. Deutsche Region der Internationalen Biometrischen Gesellschaft, H. 1, 52-71.
- PRETZSCH, H., 1990b: Strukturparameter zur Steuerung von Wuchsmodellen für Rein- und Mischbestände. Tagungsbericht von der Jahrestagung 1990 der Sektion Ertragskunde im DVFFA in Verden/Aller, 80-100.
- PREUHLER, T., 1979: Ertragskundliche Merkmale oberbayerischer Bergmischwald-Verjüngungsbestände auf kalkalpinen Standorten im Forstamt Kreuth. Forstliche Forschungsberichte München, Nr. 45.
- SLOBODA, B.; PFREUNDT, J., 1989: Baum- und Bestandeswachstum. Ein systemanalytischer räumlicher Ansatz mit Versuchsplanungskonsequenzen für die Durchforstung und Einzelbaumentwicklung. Tagungsbericht von der Jahrestagung 1989 der Sektion Ertragskunde im DVFFA in Attendorn/Olpe, 17/1-17/25.
- STERBA, H., 1989: Concepts and techniques for forest growth models. Artificial intelligence and growth models for forest management decisions: Bericht von der Tagung der IUFRO Subject Group S 4.01 in Wien, Publ. No. FWS-1-89, Virg. Polytechn. Inst. and State Univ., Blacksburg, Virginia, 13-20.
- WENSEL, L. C.; KOEHLER, J. R., 1985: A tree growth projection system for Northern California coniferous forests. Northern California Forest Yield Cooperative, Dept. of Forestry and Res. Mgt., Univ. Calif. Research Note. No. 12.

Anschrift des Verfassers: Dr. habil. HANS PRETZSCH, Lehrstuhl für Waldwachstumskunde der Universität München, Amalienstraße 52, W-8000 München 40, Bundesrepublik Deutschland