

Einsatzmöglichkeiten des Einzelbaumsimulators SILVA 2 am Beispiel von Fichten- und Fichten/Buchen-Beständen ¹⁾

Markus Kahn und Hans Pretzsch

1. Zusammenfassung

Die zur Zeit wichtigsten Einsatzmöglichkeiten computergestützter Wachstumssimulatoren sind auf betrieblicher Ebene die Analyse von Betriebsklassen, die Unterstützung der Nutzungsplanung im Rahmen der Forsteinrichtung sowie die Liquiditätsplanung auf Betriebsebene. Weitere Anwendungsfelder zeichnen sich auf überbetrieblicher Ebene ab: die Analyse von Klimaszenarien mit ihren Auswirkungen auf Wald und Waldentwicklung zeigt im Kontext regionaler sozioökonomischer Kalküle soziale, wirtschaftliche und kulturelle Dimensionen. Jedoch auch ohne den Einfluß etwa klimabedingter Störgrößen auf die Waldentwicklung wird etwa eine Landschaftsbildsimulation z.B. im Rahmen landschaftsplanerischer Maßnahmen die Nutzung realitätsnaher Prognosen von Wachstumsprozessen erforderlich machen, sofern dabei ökologische Indikatorgrößen zu Stabilität, Diversität etc. für Entscheidungsfindungen zur Verfügung gestellt werden können. Ebenso ist die zukünftige Bedeutung, die mehrkriteriell nutzbaren Wuchsmodellen im Rahmen der Zertifizierung zukommen wird, absehbar, und zwar sowohl auf Basis einer Zertifizierung nach ISO 140000 als auch nach den Vorstellungen des Forest Stewardship Councils, sofern letztere sich überhaupt durchsetzen werden. Die Anwendungsmöglichkeiten des Wuchsmodells SILVA 2.0 werden in einer Variantenstudie Fichtenreinbestand versus Fichten/Buchen-Mischbestand demonstriert.

2. Wachstumsmodelle als Planungshilfe im Forstbetrieb

2.1 Wuchsmodelle zur Entscheidungsunterstützung

Waldwachstumsmodelle prognostizieren das Wachstum von Baum und Bestand und werden damit zum unentbehrlichen Hilfsmittel einer effizienten Wirtschaftsplanung im Forstbetrieb. Sie verdichten das von Forstwissenschaft und Forstwirtschaft angesammelte Informationspotential zum Waldwachstum und machen es für wirtschaftliche Entscheidungsfindungen nutzbar. Indem das am Lehrstuhl für Waldwachstumskunde der Universität München entwickelte computergestützte Waldwachstumsmodell SILVA 2.0 standortreagibel aufgebaut ist, ein breites Spektrum von Mischungsformen und Bestandesstrukturen nachbilden kann, und alle praxisrelevanten Behandlungsregime vorsieht, bietet es bestmöglichen Ersatz für die Ertragstafel. Eine Erweiterung der auf den Holzertrag ausgerichteten Ergebnisgrößen um Informationen zur Sortiments- und Holzerlösentwicklung, Bestandesstruktur, Bestandesstabilität und Diversität eröffnet Möglichkeiten zur Abwägung und Optimierung zwischen Produktions- und Schutzaspekten bei der Wirtschaftsplanung auf Einzelbaum-, Bestandes- und Betriebsebene

Der Spielraum für waldbauliche Phantasien und Experimente wird angesichts der kritischen Ertragslage der Forstwirtschaft zunehmend geringer. Aus der Krise geborene und in Mode kommende Behandlungsprogramme sollten weniger denn je ungeprüft propagiert, sondern

¹⁾ Vortrag auf der Jahrestagung der DVFFA-Sektion Ertragskunde, Grünberg 12.5.1997-14.5.1997

zunächst in ihren ertragskundlichen, betriebswirtschaftlichen und ökologischen Konsequenzen analysiert und bewertet werden. Möglich werden solche Analysen und Bewertungen durch den Einsatz moderner Waldwachstumsmodelle. Mit ihnen ausgeführte Variantenstudien können die mitunter emotional geprägte und oft Teilaspekte übergewichtende Diskussion über Vor- und Nachteile verschiedener Pflegemaßnahmen auf eine quantitative und konstruktive Grundlage zurückführen und die notwendige Sicherheit bei der Wahl geeigneter Behandlungsalternativen erbringen. Ertragstafeln, die für Modellrechnungen im Altersklassenwald lange Zeit ein unverzichtbares Hilfsmittel waren, stehen heute dem Übergang zu einzelbaumorientierten Behandlungsprogrammen in Rein- und Mischbeständen eher im Wege. Aufgrund ihrer Beschränkung auf flächenbezogene Vorratsprognosen für definierte, häufig veraltete Begründungs- und Behandlungsregime in gleichaltrigen Reinbeständen und z.T. erheblichen Divergenzen zwischen Erwartungswerten und wirklichem Wuchsverhalten können Ertragstafeln zu aktuellen Fragen der Begründung und zur einzelbaumorientierten Pflege von Rein- und Mischbeständen nur noch wenig beitragen.

So klar wie wir die Mängel unserer klassischen Planungsinstrumente erkannt haben, so wenig waren wir bisher in der Lage dazu, sie durch bessere Informationssysteme zu ersetzen (4). Wenig zielführend erscheint die Anpassung der klassischen Ertragstafel an veränderte Wuchsbedingungen und Behandlungsprogramme. Ebenso bedenklich erscheint der Übergang zu rein normativ begründeten Pflegeprogrammen, die in ihren Konsequenzen häufig ungeprüft sind. Denn beide Ansätze unterstellen wiederum statische standörtliche und wirtschaftliche Rahmenbedingungen, werden über kurz oder lang dieselben Probleme wie die Ertragstafeln erbringen und dem Informationsbedarf der forstlichen Praxis erneut hinterherlaufen. Gründen Modelle hingegen auf allgemein gültigen Gesetzmäßigkeiten des Baum- und Bestandeswachstums, so können mit ihnen auch Prognosen für Pflegeprogramme abgegeben werden, die im praktischen Versuch noch nicht realisiert wurden. Waldwachstumsmodelle können langfristige Versuche natürlich nicht ersetzen, liefern aber ad hoc in Form von ertragskundlichen und betriebswirtschaftlichen Basisdaten Entscheidungshilfen für Beurteilung und Umsetzung neuer Waldbauideen.

2.2 Positionsabhängige Einzelbaummodelle als Folgegeneration der Reinbestands-Ertragstafeln

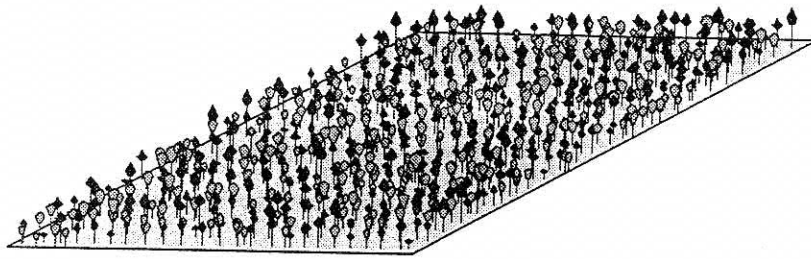
Einzelbaummodelle bieten einen bestmöglichen Zugang zur Wachstumsprognose strukturreicher Rein- und Mischbestände. Denn sie lösen den Bestand in sein Mosaik von Einzelbäumen auf und bilden ihn als dynamisches, räumlich-zeitliches System nach (12). Indem der gesamte Prognoseprozeß vom Einzelbaum und seiner Wuchskonstellation her aufgerollt wird, entsteht eine Modellflexibilität, die die Nachbildung verschiedenster Mischungs- und Strukturformen, Pflegeregime und Verjüngungsverfahren erlaubt. Ausgehend

von nur wenigen Start- und Steuergrößen, die die Ausgangssituation eines Bestandes beschreiben und die Standortbedingungen charakterisieren, wird über ein für den entsprechenden Standort initialisiertes Funktionensystem die Dynamik eines betrachteten Bestandes einzelbaumweise in 5-Jahres-Schritten von der Bestandesbegründung bis zum Generationenwechsel nachgebildet (Abb. 1). In ihrer Konstruktionstechnik sind die für den deutschsprachigen Raum vorliegenden Einzelbaummodelle (5, 10, 12, 18) so ausgereift, daß die unterschiedlichen Entwicklungslinien allmählich konvergieren. Es ist nicht ein Mangel in der Modelltechnik oder Benutzerfreundlichkeit, die den Übergang zu solchen Einzelbaummodellen bremst, sondern die noch immer lückenhafte Datenbasis zum Wachstum strukturreicher Rein- und Mischbestände. Werden Mischbestandsmodelle mangels geeigneter Daten dann ersatzweise mit Reinbestandsversuchsflächen oder ohne Berücksichtigung der Bestandesstruktur parametrisiert, so führt das nicht viel weiter, als die Anwendung der Reinbestands'ertragstafel auf Mischbestände.

Im folgenden werden am Beispiel des Wachstumsmodells SILVA 2.0 exemplarisch die zentralen Elemente von Einzelbaummodellen aufgezeigt, da Modelle dieses Typs in absehbarer Zeit zu einem zentralen Hilfsmittel der Wirtschaftsplanung werden. SILVA 2.0 wurde in den vergangenen Jahren am Lehrstuhl für Waldwachstumskunde der Ludwig-Maximilians-Universität München entwickelt (6, 7, 12, 13, 14) und kann sich wie kaum ein anderes Modell auf eine solide Basis von langfristigen Versuchsflächen und Wuchsreihen stützen, die ein denkbar breites Spektrum von Standorteinheiten, Behandlungsvarianten, Mischungsformen und Altersstrukturen aufweisen.

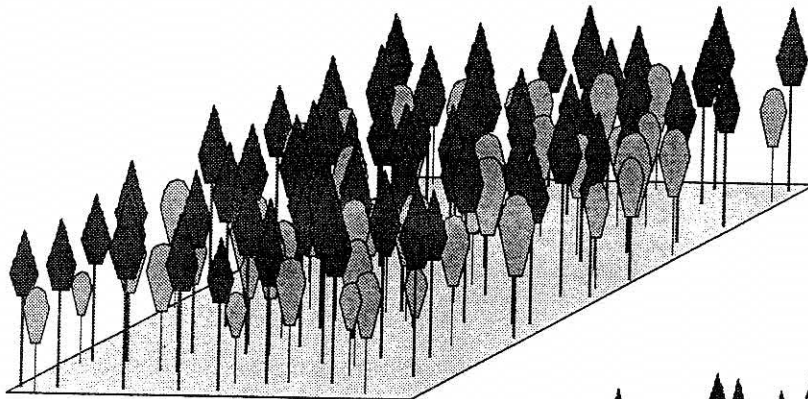
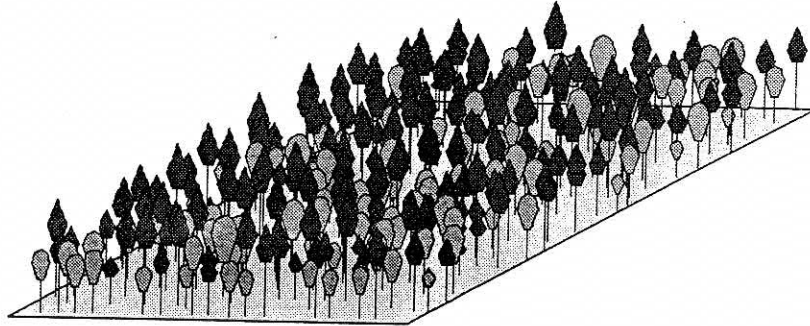
3. Anwendungsbeispiel: Variantenstudie Fichtenreinbestand versus Fichten/Buchen-Mischbestand

Der folgende Variantenvergleich Fichtenreinbestand versus Fichten-Buchen-Mischbestand verdeutlicht Funktion und Ergebnisstruktur des Wachstumsmodells SILVA 2.0. Das interne Funktionensystem zur Steuerung der Einzelbaumentwicklung von Fichte und Buche wird beispielhaft für einen mäßig trockenen bis mäßig frischen, gering nährstoffversorgten Standort im Wuchsbezirk oberbayerisches Tertiärhügelland initialisiert. Die Oberhöhenbonität der Fichte liegt bei 34 m, die Buche weist eine II. Bonität auf (2, 15). Ausgangssituation bilden 1400 Fichten pro ha im Reinbestand (Fichte: Alter 20) bzw. 1000 Fichten und 600 aus Naturverjüngung stammende Buchen pro ha im Mischbestand (Fichte und Buche: Alter 20 bzw. 25, vgl. Abb. 1). Die Bestände werden einer starken Auslesedurchforstung unterzogen, bei der die Eingriffstärke über baumartentypische Baumzahlleitkurven gesteuert wird (Abb. 2).



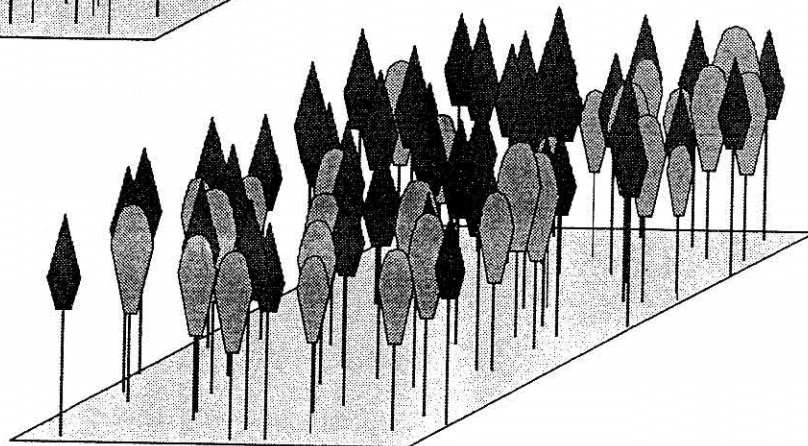
Startsituation:
Alter Fichte = 20
Alter Buche = 25

20 Jahre später:
Alter Fichte = 40
Alter Buche = 45



80 Jahre später:
Alter Fichte = 100
Alter Buche = 105

145 Jahre später:
Alter Fichte = 165
Alter Buche = 170



40 m
20 m
0 m

0 10 20 m

Abb. 1: Das Waldwachstumsmodell SILVA 2.0 bildet Rein- und Mischbestände in 5-Jahres-Schritten räumlich nach. Dargestellt ist die Entwicklung von Fichten (dunkel) und Buchen (hell) im Mischbestand vom Alter 20 bis 165.

3.1 Ertragszahlen für Einzelbäume und Bestand

Aus dem breiten Spektrum dendrometrischer Einzelbaum- und Bestandeskennwerte, die eine Prognose über 145 Jahre erbringt, greifen wir beispielhaft die Entwicklungsgänge von Grundfläche des verbleibenden Bestandes und lfd. jährlichem Volumenzuwachs heraus (Abb. 3). Die starken Eingriffe in der ersten Hälfte des Prognosezeitraumes schöpfen das hohe Zuwachsreaktionsvermögen der Fichte in dieser Altersphase aus. Ausgehend von 2,8 qm/ha im Fichtenreinbestand und 2,9 qm/ha im Fichten/Buchen-Mischbestand (35 % Buche) erreicht die Grundfläche im Alter 130 Maximalwerte von 67 bzw. 58 qm/ha und sinkt dann in fortgeschrittenem Alter ab. Diese und andere Befunddaten zur Höhen-, Durchmesser- und Vorratsentwicklung können für Planungs- und Optimierungszwecke verwendet werden. Wichtiger als die Quantität des produzierten Holzes ist für die Wirtschaftplanung jedoch die mit Einzelbaummodellen mögliche Aufgliederung von Vornutzungen und stehendem Vorrat nach handelsfähigen Holzsortimenten.

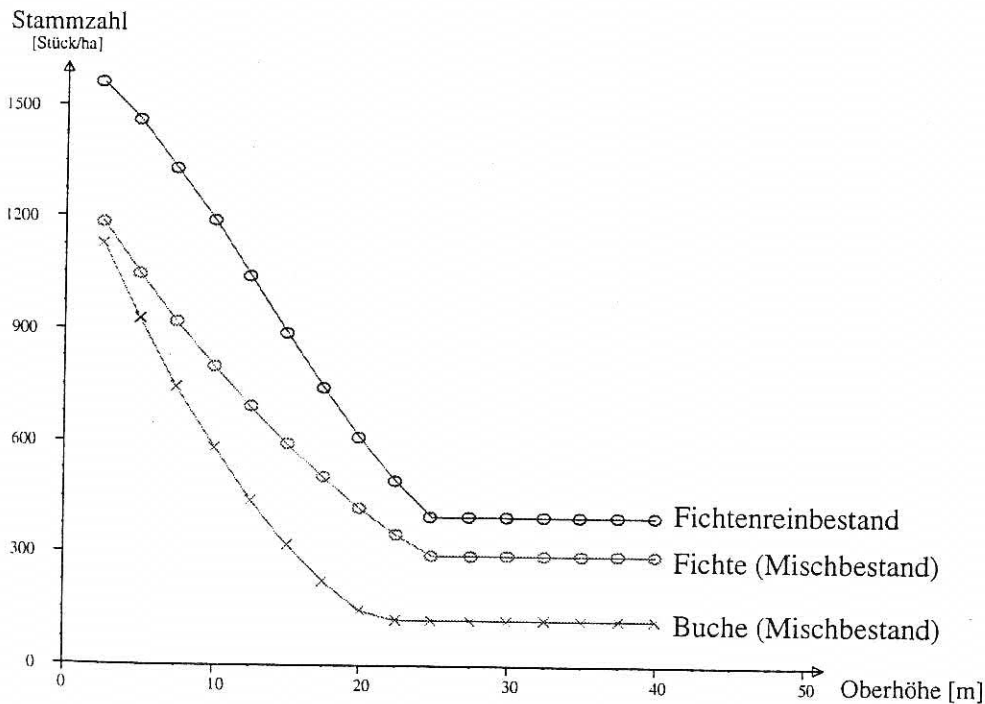


Abb. 2: Für die Variantenstudie Fichtenreinbestand versus Fichten/Buchen-Mischbestand können Pflegeprogramme u.a. durch Vorgabe von Baumzahl-Leitkurven definiert werden. Die Leitkurve der Buche ist für den Buchenoberbestand.

3.2 Entwicklung der Sortenstruktur

Die Sortenentwicklung, wie sie auf Abbildung 4 beispielhaft für Fichten und Buchen im Mischbestand dargestellt ist, kann für verbleibenden, ausscheidenden und gesamten Bestand abgerufen werden. Die HKS-gerechte Heilbronner Sortierung des verbleibenden Bestandes für

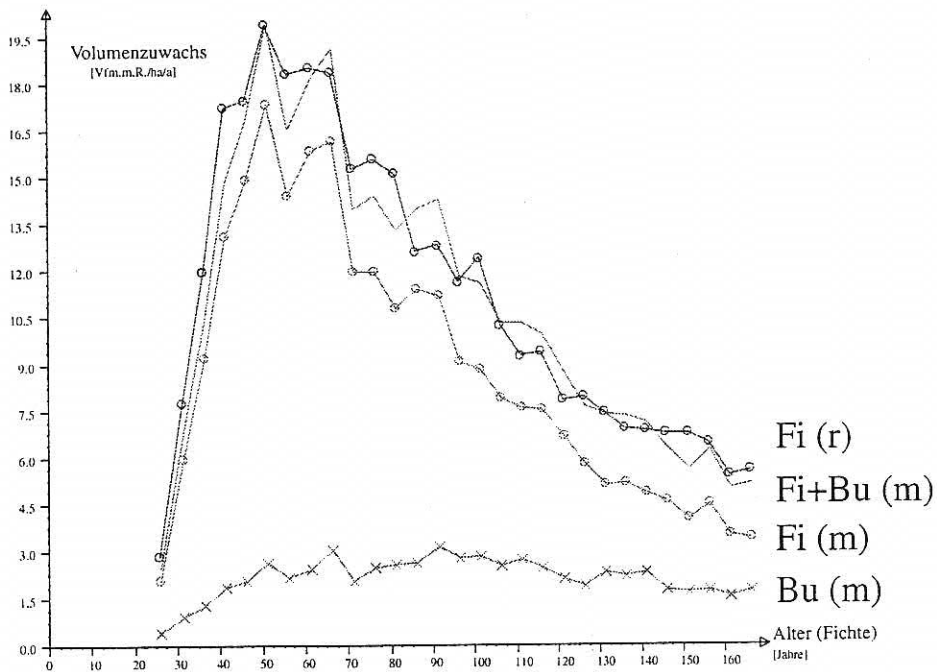
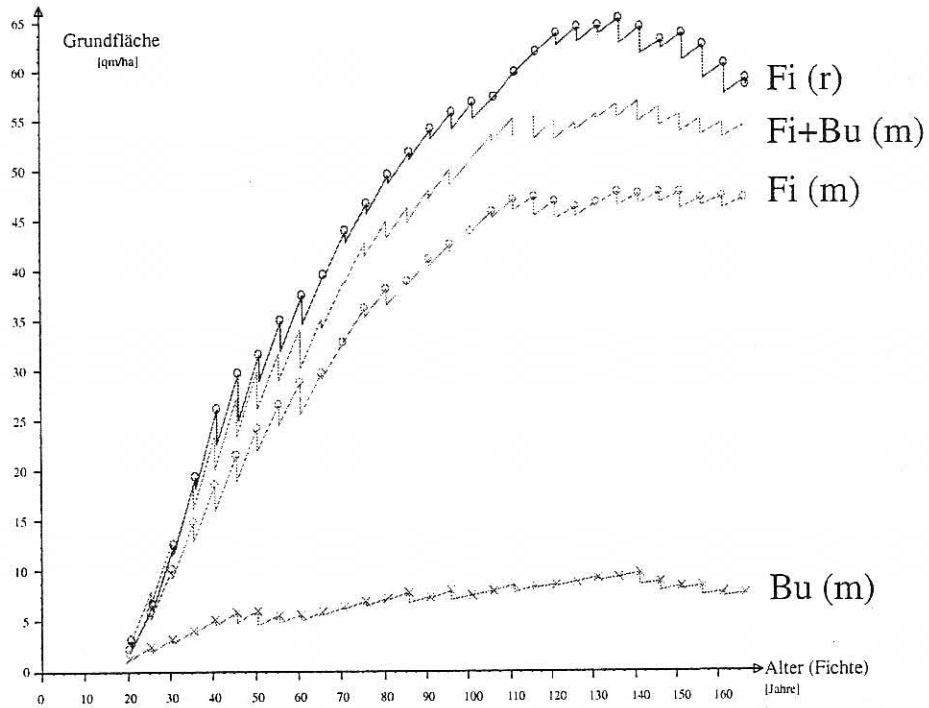


Abb. 3: Auszug aus dem Ergebnisprotokoll der Variantenstudie Fichtenreinbestand versus Fichten/Buchen-Mischbestand: Grundfläche (oben) des verbleibenden Bestandes und lfd. jährlicher Volumenzuwachs (unten) in dem 145-jährigen Prognosezeitraum. Fi (r) = Fichtenreinbestand, Fi (m) = Fichte im Mischbestand, Bu (m) = Buche im Mischbestand, Fi+Bu (m) = Fichte und Buche gesamt im Mischbestand.

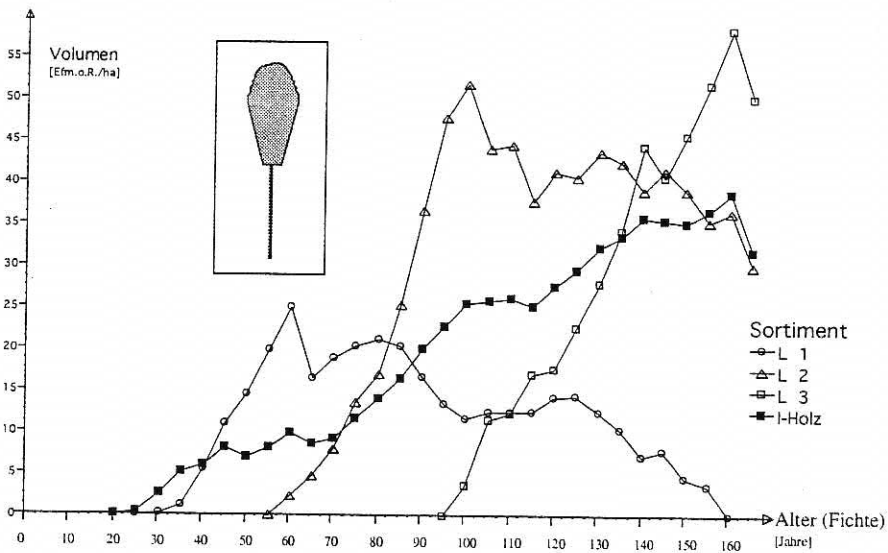
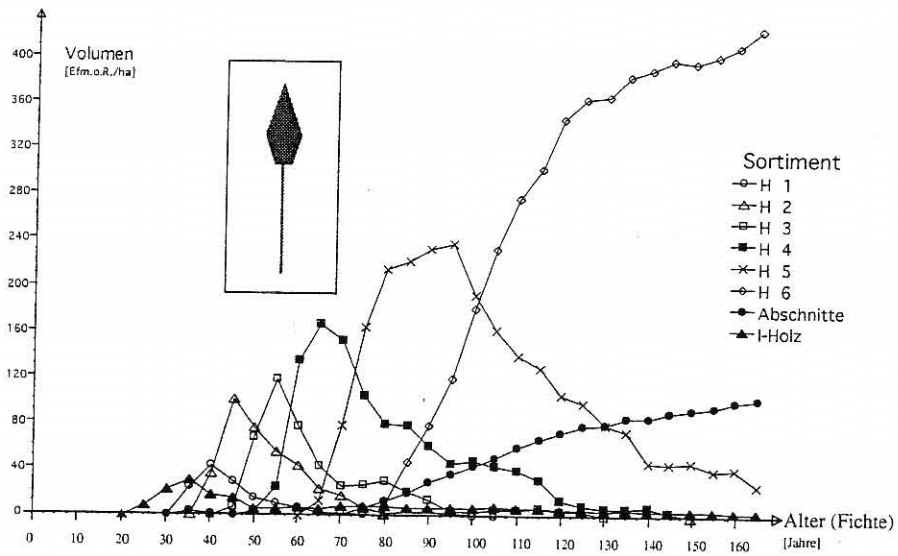


Abb. 4: Sortimententwicklung des verbleibenden Bestandes im 145-jährigen Prognosezeitraum gesondert für Fichte (oben) und Buche (unten) im Mischbestand.

Fichte läßt erkennen, daß die Sorten H1, H2 und H3 nur sehr kurzzeitig aufkommen und schon im Alter 60 in das Sortiment H4 übergehen. Ab einem Alter von ca. 100 Jahren dominiert das Sortiment H6, mit dem zugleich nennenswerte HL-Abschnitte anfallen, weil eine Transportlängenbeschränkung des Stammholzes von 21 m angenommen wurde.

Die Buche erreicht auch am Ende des Prognosezeitraumes nur Mittenstärkesortimente der Klasse L3, was die waldbaulich dienende Stellung der Buche in dem Mischbestand unterstreicht. Die Aushaltung des Stammholzes der Buche erfolgte bis zum Kronenansatz, der aufgrund des einzelbaumorientierten Modellansatzes für jeden Baum bekannt und von der räumlichen Wuchskonstellation des Baumes abhängig ist. Das über dem Kronenansatz befindliche Derbholz wird komplett dem Industrieholz zugeteilt.

3.3 Holzerntekosten und holzerntekostenfreie Erlöse des ausscheidenden Bestandes

Am Beispiel des Fichtenreinbestandes werden Sortenstruktur (Abb. 5, oben), Holzerntekosten (Mitte) und holzerntekostenfreie Erlöse (unten) der Vornutzungen bis Alter 165 veranschaulicht, wie sie SILVA 2.0 in grafischer und tabellarischer Form erzeugt. Nach anfänglichem Aufkommen von Industrieholz dominieren dann die Sorten H1 bis H4. Ab einer Oberhöhe von etwa 25 m enden die planmäßigen Eingriffe; die durch ein Mortalitätsmodell nachgebildeten Stammabgänge erbringen danach v.a. die Sorten H5 und H6. Die Holzerntekosten werden entsprechend dem Erweiterten Sortentarif EST ermittelt, der dem Wuchsmodell SILVA 2.0 implementiert ist. Unter Berücksichtigung von Stücklohngeldfaktor, Motorsäggeldfaktor, Werkzeuggeld und Lohnnebenkosten wird auf die Tabellenwerte des EST zugegriffen. Bestandes- und standortsbezogene Hiebszuschläge sind ebenfalls enthalten. Die baumbezogenen Hiebsmerkmale wie Formigkeit und Länge des Grünastbereiches werden für jede Periode des Prognoselaufes direkt aus den Einzelbaumdaten des Wuchsmodells abgeleitet. Rückekosten können entsprechend den Stückmassen des ausscheidenden Bestandes zugeordnet werden. Erwartungsgemäß sind die Holzerntekosten bei der Jungdurchforstung am höchsten und in der Folgezeit mit zunehmender Stück-Masse rückläufig. Den holzerntekostenfreien Erlösen liegen Durchschnittspreise der Bayerischen Staatsforstverwaltung des Forstwirtschaftsjahres 1994 für gerücktes, unentrindetes Holz zugrunde. Die Durchschnittspreise schließen die Güteklassen A bis D ein. Die Deckungsbeiträge der ersten Durchforstungen erreichen im Alter 35 mit ca. -500 DM je ha ihren Tiefstwert. In der Altersperiode 20 bis 50 summieren sich die negativen holzerntekostenfreien Erlöse zu etwa 1300 DM je ha auf.

3.4 Bewertung der Betriebsklassen

Fassen wir die bisher als Altersverläufe interpretierten, in zeitlichem Nacheinander auftretenden Bestandesbefunde als räumlich nebeneinanderliegende Bestände entsprechend behandelter

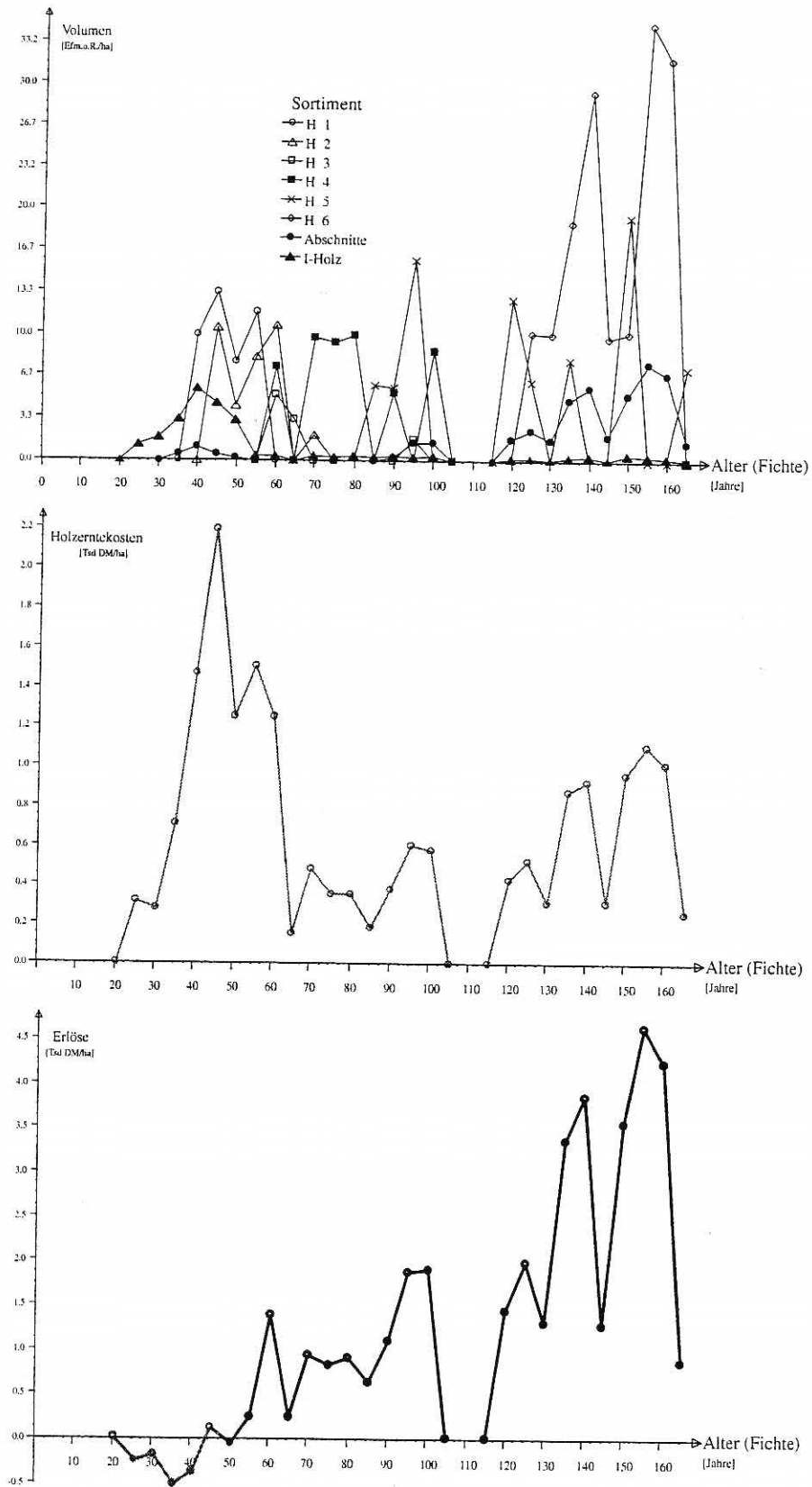


Abb. 5: Sortenstruktur, Holzertekosten und holzertekostenfreie Erlöse (von oben nach unten) der Vornutzungen im Fichtenreinbestand bis zum Alter 165.

Betriebsklassen auf, so ermöglicht das die finanzielle Bewertung von Handlungsalternativen auf Betriebsklassenebene. Bestmögliche Kenngröße für eine solche Bewertung ist der durchschnittliche Gesamtwertzuwachs $dGWZ$ (=Abtriebswert im betrachteten Alter plus Wertleistung aller bis dahin angefallenen Vornutzungen, dividiert durch das Bestandesalter). Der laufend jährliche Wertzuwachs LWZ entspricht der Differenz aus der Gesamtwertleistung zweier aufeinanderfolgender Perioden dividiert durch die Periodenlänge. Im durchschnittlichen Gesamtwertzuwachs $dGWZ$ ist die reine Fichten-Betriebsklasse im gezeigten Beispiel der Mischbestands-Betriebsklasse überlegen (Abb. 6, oben). Zum Zeitpunkt der Wertzuwachskulmination, der bei der Fichten-Betriebsklasse im Alter 120 liegt, lassen sich mit der reinen Fichte auf Basis der gegebenen Kosten und Preise nachhaltig 730 DM je ha und Jahr Erlösen, sofern die Umtriebszeit bei $dGWZ_{max}$, also bei 120 Jahren, liegt. Dabei werden Preis- und Kostenkonstanz angenommen und bestandesgefährdende Risiken ausgeschlossen.

Der durchschnittliche Wertzuwachs der Fichten-Buchen-Betriebsklasse kulminiert im Alter 120 mit einem nachhaltigen holzerntekostenfreien Erlös von 620 DM je ha und Jahr (Abb. 6, oben). Die Differenz zur Fichten-Betriebsklasse wird somit durch Opportunitätskosten von 110 DM je ha und Jahr (= 730 DM - 620 DM) charakterisiert. Legt man in der Fichten-Betriebsklasse aber eine Umtriebszeit von 80 Jahren zugrunde, weil beispielsweise Rotfäule, Immissionsschäden, Stürme oder Käferkalamitäten ein längeres Hinauszögern des Abtriebs nicht gestatten, so sinken die holzerntekostenfreien Erlöse auf 600 DM je ha und Jahr. In diesem Fall wäre die Mischbestandsbetriebsklasse der Reinbestandsbetriebsklasse um 20 DM je ha und Jahr überlegen. Aufgrund des steilen Anstiegs des $dGWZ$ vor dem Kulminationszeitpunkt und dem nur langsamen Absinken nach diesem Zeitpunkt wird deutlich, daß bei Verlängerung der Umtriebszeit größere Spielräume bestehen als bei einer Verkürzung. Dies verdeutlicht auch die Entwicklung des laufenden Wertzuwachses, der im Bestandesalter von 50 bis 80 Jahren Spitzenwerte von 1200 - 1640 DM/ha und Jahr erreicht (Abb. 6, unten).

3.5 Wertentwicklung am Einzelbaum

Das Wuchsmodell SILVA 2.0 bildet den Bestand als Mosaik von Einzelbäumen nach, so daß analog zu dem durchschnittlichen Gesamtwertzuwachs des Bestandes auch die Wertentwicklung des Einzelbaumes mitgeführt wird (Abb. 7). Im Mischbestand kulminiert der $dGWZ$ der verbleibenden Fichten bei Durchmesser von 50 bis 60 cm mit durchschnittlichen holzerntekostenfreien Wertzuwachsen von 1.5 bis 4.0 DM pro Baum und Jahr, während sich die Buche mit 1.0 bis 1.5 DM pro Baum und Jahr noch in der Aufschwungphase befindet.

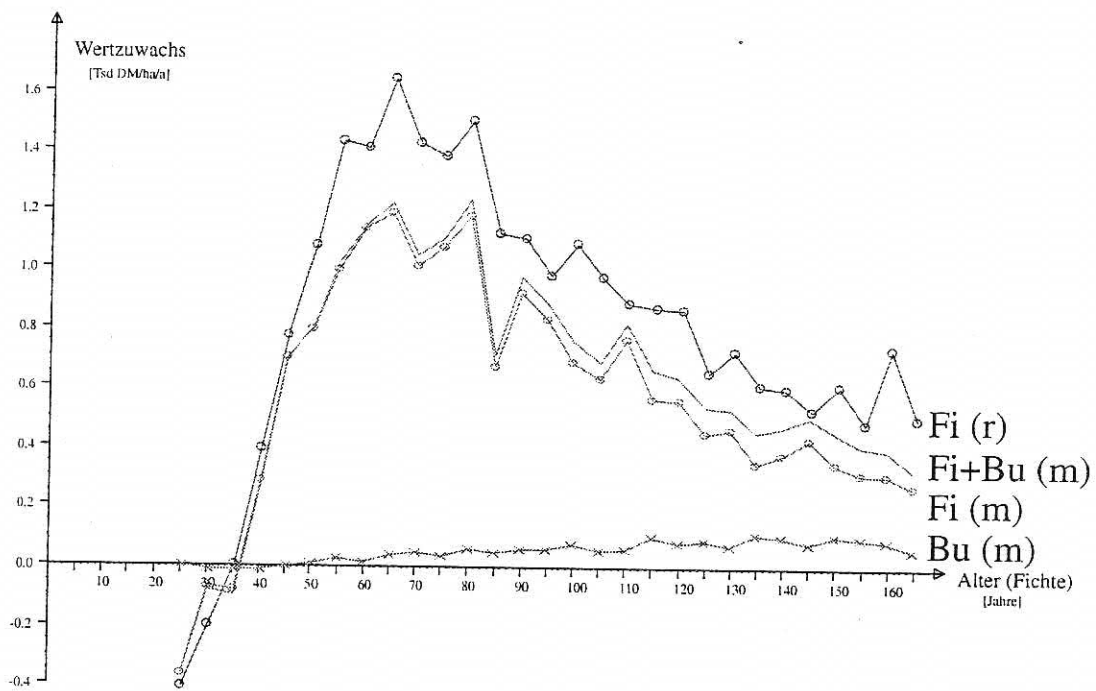
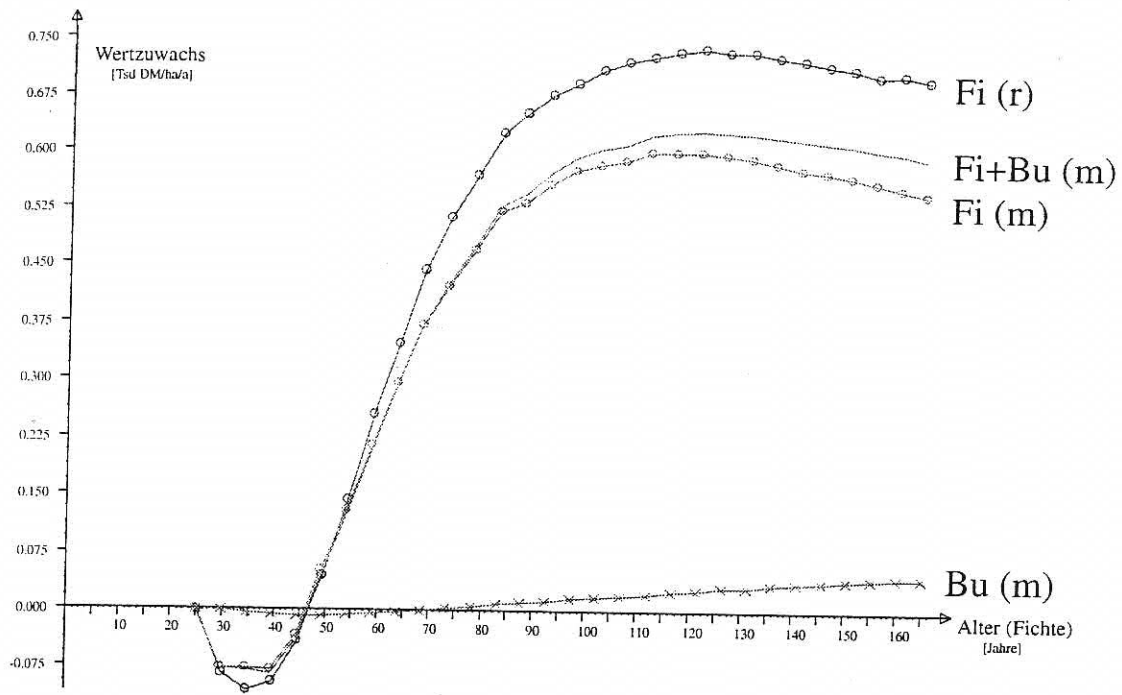


Abb. 6: Auszug aus dem Ergebnisprotokoll der Variantenstudie Fichtenreinbestand versus Fichten/Buchen-Mischbestand: Entwicklung von durchschnittlichem jährl. Wertzuwachs (oben) und lfd. jährl. Wertzuwachs (unten) in dem 145-jährigen Prognosezeitraum. Fi (r) = Fichtenreinbestand, Fi (m) = Fichte im Mischbestand, Bu (m) = Buche im Mischbestand, Fi+Bu (m) = Fichte und Buche gesamt im Mischbestand.

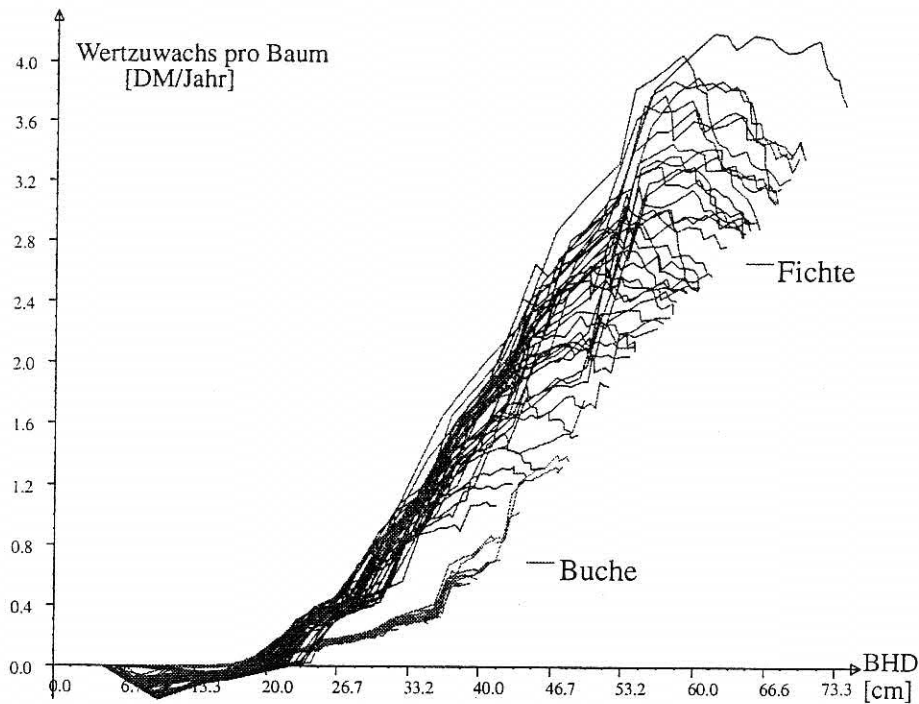


Abb. 7: Entwicklungsgang des durchschnittlichen Gesamtwertzuwachses von Fichten und Buchen im Mischbestand.

Indem der Blick beim Wertzuwachs, aber auch bei allen anderen Ergebnisgrößen des Modells, zugleich auf Bestand und Einzelbäume gerichtet werden kann, entsteht ein Planungswerkzeug, das auch für die Analyse und Optimierung moderner einzelbaumorientierter Nutzungsstrategien bestens geeignet ist. Denn bei diesen gilt es, den Wertzuwachs auf Bestandes- und Einzelbaumebene zugleich angemessen ins Kalkül zu ziehen.

3.6 Entwicklung der strukturellen Vielfalt

Indem SILVA 2.0 den Bestand in 5-Jahres-Schritten wirklichkeitsnah als räumlich-zeitliches System nachbildet (vgl. Abb. 1), ermöglicht es in jeder Phase des Prognoselaufes die Berechnung von Strukturindizes, die einen Indikatorwert für die Habitat- und Artendiversität des nachgebildeten Bestandes besitzen. Die Indizes R für das horizontale Baumverteilungsmuster (3), A für das vertikale Artenprofil (14, 16) und S für die Artendurchmischung (11) zeigen an, wie die Struktur im Rein- und Mischbestand durch die Altersentwicklung und die ausgeführte Auslesedurchforstung modifiziert wird (Abb. 8).

Der Index R kann zwischen 0 (stärkste Klumpung) und 2.1491 (streng regelmäßige Verteilung) liegen. R-Werte um 1.0 zeigen eine zufällige Baumverteilung an. In Rein- und Mischbestand überführt die starke Auslesedurchforstung die anfänglich regelmäßige Verteilung ($R = 1.1$ bis 1.4) in eine zufällige bis geklumpete ($R = 0.9$ bis 1.0); sie fördert damit die Heterogenität. Zurückzuführen ist dies auf den Erhalt von Unter- und Zwischenstand und eine gelegentliche Belassung guter Zuwachsträger in Gruppenstellung.

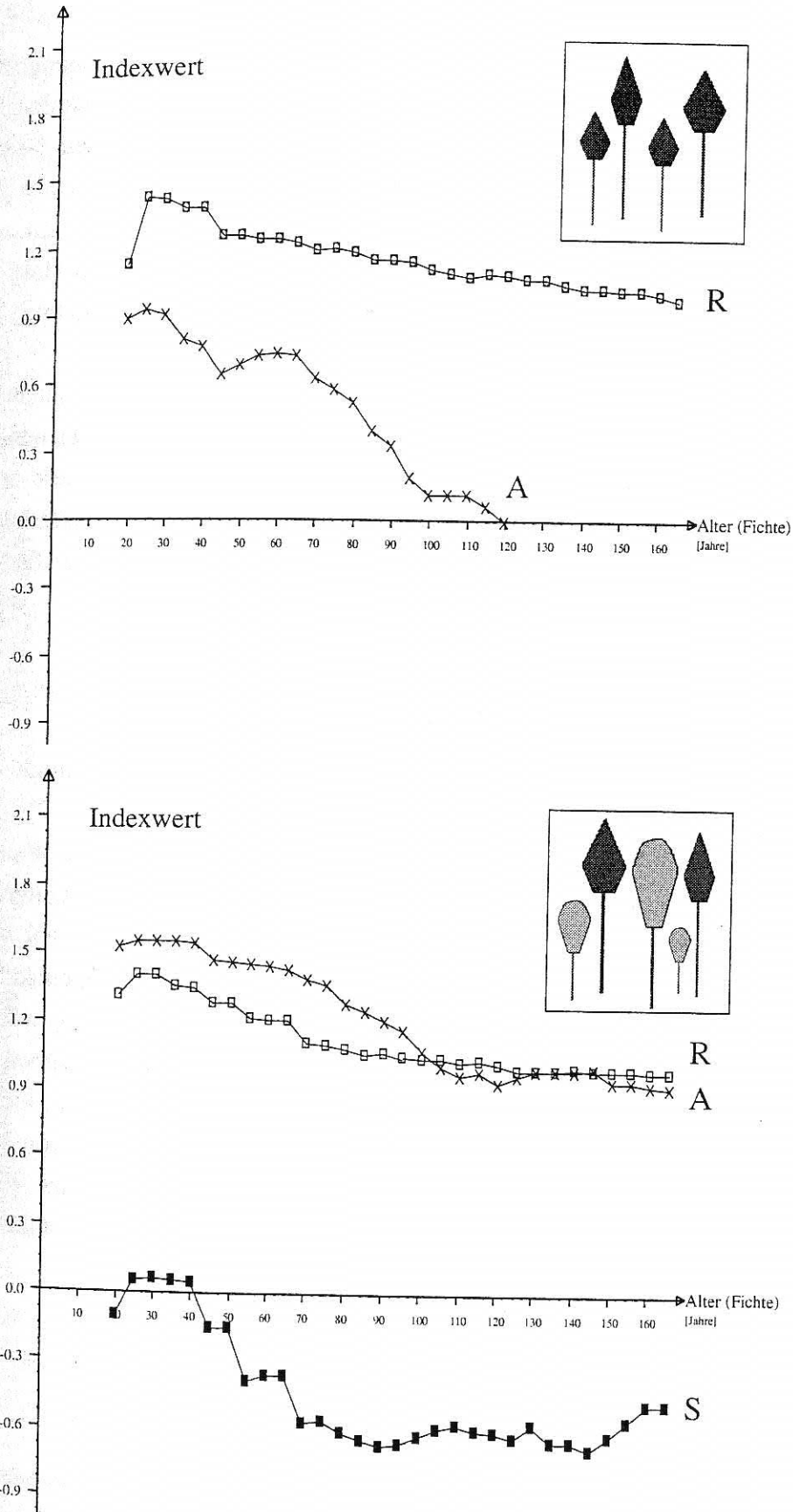


Abb. 8: Veränderung der Struktur von Rein- und Mischbestand (oben bzw. unten) in dem 145-jährigen Prognosezeitraum, ausgedrückt durch die Strukturparameter R, A und S.

Der Index A charakterisiert die Vertikalstruktur von Beständen, indem er ihre Abweichung von der Struktur einschichtiger Reinbestände quantifiziert ($A = 0$). Je heterogener das Vertikalprofil, umso größer wird A. Erwartungsgemäß nimmt die starke Auslesedurchforstung dem in der Stangenholzphase noch höhenstrukturierten Fichtenreinbestand mit zunehmendem Alter die Vertikalstrukturierung; A geht nahezu linear zurück. Völlig anders entwickelt sich der Indexwert A im Mischbestand. Schon zu Beginn der Prognose liegt A bei 1.5, und er sinkt im Laufe des Bestandeslebens nur auf 0.9 ab. Dies ist eine Folge der Auslesedurchforstung, die der Buche ein Überleben im Unter- und Zwischenstand ermöglicht.

Der Index S liegt zwischen -1 und +1 und zeigt bei Werten unter 0 eine intensive Durchmischung, bei Werten über 0 ein getrenntes Vorkommen der Arten an. So entsteht im Mischbestand im Laufe des Prognosezeitraumes eine intensive Einzelmischung. Diese wird durch Pflegeeingriffe in Stangenholz und schwachen Baumholz eingestellt und gewährleistet bis ins hohe Bestandesalter ein heterogenes Mosaik von inter- und intraspezifischen Konkurrenzbeziehungen zwischen Fichte und Buche (Abb. 8, unten).

3.7 Mehrkriterielle Betrachtungsebene

Vergleich und Abwägung zwischen verschiedenen Behandlungsvarianten werden durch eine zusammenfassende Darstellung verschiedener Ergebnisgrößen unterstützt (Abb. 9). Die dargestellten Ergebnisprofile enthalten neben den Strukturindizes R, A und S den h/d-Wert als Stabilitätsweiser, den dGZ_{\max} als ertragskundliche sowie den $dGWZ_{\max}$ als monetäre Leitgröße. Die Strukturindizes sowie der h/d-Wert beziehen sich auf die Bestandesstruktur bei einer Bestandesoberhöhe von 30 m; gleich Profile lassen sich aber für jeden Zeitpunkt des Prognosehorizontes erzeugen. Es verdichtet sich der Eindruck, daß auf dem gewählten Standort, bei der eingesteuerten Durchforstung und den getroffenen Annahmen zu Holzerntekosten, Holzpreisen und Risiken die Fichten-Betriebsklasse der Fichten/Buchen-Betriebsklasse in Volumenzuwachs und Wertleistung überlegen ist. In den Struktur- und Stabilitätsmerkmalen ist die Reinbestands-Betriebsklasse unterlegen. Erst durch eine solche Quantifizierung ökonomischer und ökologischer Behandlungseffekte lassen sich Produktions- und Stabilitätsaspekte im Modell miteinander verknüpfen und optimieren.

4. Diskussion

4.1 Start- und Steuergrößen

Um die Einsetzbarkeit für eine breite Palette von Standorten und Waldbausystemen sicherzustellen, werden die im Wachstumsmodell enthaltenen Funktionen zur Steuerung der Entwicklung von Baumhöhe, Durchmesser, Kronenbreite, Kronenlänge usw. über einen Satz von Standortvariablen auf die jeweiligen Wuchsbedingungen adjustiert. Dieser Variablensatz umfaßt im allgemeinen verfügbare Angaben zum Wuchsbezirk, zu Wasserhaushalt und

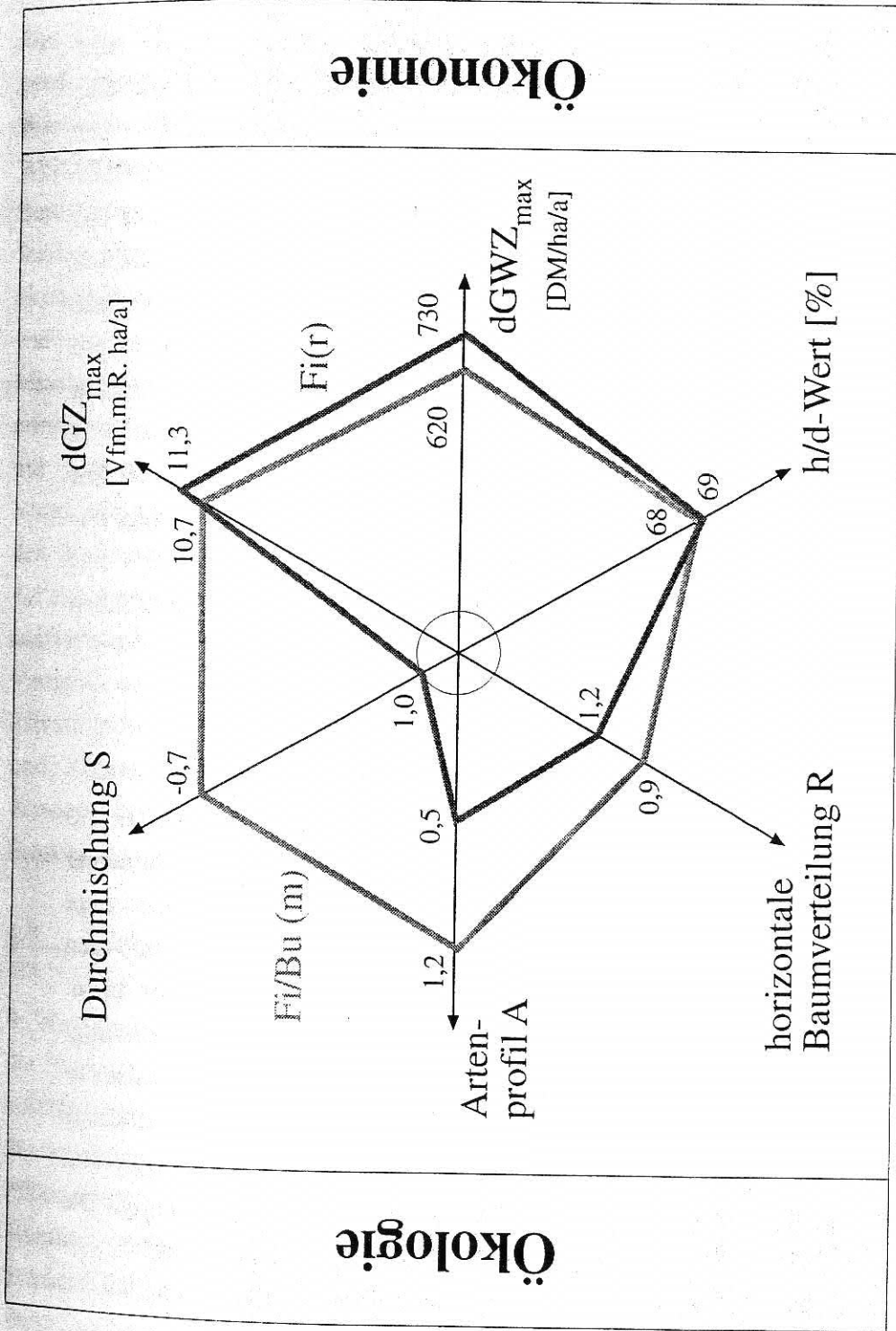


Abb. 9: Profile der wichtigsten Ausgabegrößen für Rein- und Mischbestand (Strukturindizes R, A, S, h/d-Werte, dGZ und dGWZ) erlauben eine Abwägung und Optimierung von ökonomischen bzw. ökologischen Aspekten der Bestandesbehandlung. Fi/Bu (m) = Fichten/Buchen-Mischbestand, Fi (r) = Fichtenreinbestand.

Nährstoffversorgung. Darauf aufbauend können u. a. die Höhenwachstumsverläufe in ihrem standörtlichen Potential, d.h., ohne Beeinträchtigung von inter- und intraspezifischer Konkurrenz, geschätzt werden. Ähnlich wie die Höhenentwicklung sind auch die Durchmesserentwicklung, Kronenentwicklung und Mortalität standortabhängig (6, 12).

In ihrer Anwendbarkeit waren positionsabhängige Wuchsmodelle (5, 10, 18) bisher sehr begrenzt, da sie als Startwerte die Stammfußkoordinaten aller Einzelbäume benötigten, die aber allenfalls auf langfristigen Versuchsflächen oder permanenten Probeflächen der Betriebsinventuren bekannt sind. Durch Vorschaltung des Strukturgenerators STRUGEN lassen sich nun auch für Bestände, von denen die Baumverteilung nicht exakt bekannt ist, Anfangskonstellationen für Prognoseläufe erzeugen, die mit den wirklichen Anfangskonstellationen in den dynamikprägenden Merkmalen gut übereinstimmen. Verbale Strukturbefunde, wie z.B. trupp- bis gruppenweise Mischung, setzt der Generator in ein konkretes Anfangsbild um, mit dem das nachgeschaltete Wuchsmodell dann seinen Prognoselauf beginnt. Sind von einem fortzuschreibenden Bestand alle Strukturinformationen vorhanden, also auch die Stammfußkoordinaten für den Startzeitpunkt, so nutzt das Modell selbstverständlich die Originalwerte. Fehlen dagegen die Baumverteilungsdaten und liegt nur eine verbale Charakterisierung der Mischungsform vor, dann fungiert STRUGEN als Datengenerator, d.h. er erzeugt wirklichkeitsnahe Werte, die das Wuchsmodell als Startgrößen einsetzt.

4.2 Einzelbaumorientierte Definition von Pflegeprogrammen

Damit sich auch anspruchsvolle Pflegevorschriften mit dem Wachstumsmodell SILVA 2.0 nachbilden lassen, wurde ein regelbasiertes Durchforstungsmodell konzipiert (7). Mit seiner Hilfe läßt sich dann für den gesamten Prognosezeitraum ein Bestandesbehandlungskonzept festlegen, das in seinen Auswirkungen auf die Entwicklung der Bestandesstruktur, den Bestandeszuwachs oder die Dimensionsveränderung der Einzelbäume analysiert werden kann. Dem Wuchsmodell sind zahlreiche definierte Pflegevorschriften (Nieder-, Hochdurchforstung, Lichtung) ebenso implementiert wie moderne Auslesedurchforstungen auf Z-Baum-Basis. Die Durchforstungsstärke wird grundflächengesteuert oder über baumartenweise getrennte Baumzahlleitkurven kontrolliert. Die Durchforstungszeitpunkte können explizit vorgegeben werden, alternativ sie sind vom Bestandesalter oder der Höhenentwicklung abhängig. Die Auswahl der Durchforstungsregime wird im Computerprogramm graphisch unterstützt.

4.3 Sortierungsroutine BDAT

Dem Wachstumsmodell SILVA 2.0 ist das an der Baden-Württembergischen Forstlichen Versuchsanstalt entwickelte Sortierungsprogramm BDAT angekoppelt (8). So können sowohl

der aufstockende Bestand als auch die entnommenen Bäume nach Heilbronner oder Mittenstärkesortierung mengen- und sortenmäßig nachgebildet werden.

4.4 Holzerntekosten und holzerntekostenfreie Erlöse

Die von BDAT ausgegebenen Sortimentsstrukturen werden von einer angeschlossenen betriebswirtschaftlichen Programmroutine mit aktuellen Preisen und Kosten bewertet. Wichtigste Ergebnisgrößen bilden die Erlösentwicklung des ausscheidenden Bestandes und die Wertzuwachsentwicklung von verbleibendem und gesamtem Bestand, wie sie bisher zur Beurteilung waldbaulicher Behandlungskonzepte nicht verfügbar war. Die grundsätzliche Stärke dieser Betrachtungsebene liegt allerdings nicht allein in der Ankopplung einer ökonomischen Schnittstelle (9). Hinzu kommt vielmehr, daß diese Ankopplung nun auf einem waldwachstumskundlichen Einzelbaummodell fußt, welches eine flexible Anwendung auf Mischbestände unter einem breiten Spektrum von Standort- und Strukturbedingungen ermöglicht. Holzerntekosten können in SILVA 2.0 sowohl auf der Grundlage des EST als auch mit Kostensätzen mechanisierter Harvestereingriffe berücksichtigt werden. Ökonomische Vergleiche zwischen motormanuellen und vollmechanisierten Aufarbeitungsvarianten zählen zu den Standardergebnissen des Wachstumsmodells, was auf der Basis des EST eine Schätzung von Arbeitervorgabezeiten und damit des Arbeitskräftebedarfs einschließt. Anstelle der tarifvertraglich vereinbarten Geldfaktoren des EST können über dem Prognosezeitraum auch Varianten erprobt werden, die zeitvariabel sind oder auf individuellen Kostensätzen etwa von Privatforstbetrieben beruhen. Ebenso können zur Erlösermittlung betriebsindividuelle Preise und Kosten angesetzt werden. Die Anwendung des Wachstumsmodells zur Ermittlung von Abtriebs- und Bestandserwartungswerten im Rahmen der Bestandesbewertung mit oder ohne Einschluß von Zinssätzen liegt auf der Hand.

4.5 Strukturparameter zur ökologischen Bewertung

In Wirtschaftswäldern gilt die räumliche Bestandesstruktur als wichtige Bestimmungsgröße für die Habitat- und Artendiversität. Obwohl entsprechende quantitative Studien selten sind (1), besteht weitgehende Übereinstimmung darin, daß mit Zunahme der horizontalen und vertikalen Strukturierung eines Waldes in der Regel auch die Vielfalt der darin vorkommenden Tier- und Pflanzenarten ansteigt und die zwischenartlichen Verknüpfungen, die zur ökologischen Stabilität beitragen, zunehmen. Durch die Ankopplung einer Programmroutine zur Strukturanalyse an das Wachstumsmodell können mit SILVA 2.0 auch die Effekte verschiedener Begründungsstrukturen, Durchforstungsarten und Durchforstungsgrade auf die strukturelle Vielfalt der nachgebildeten Bestände durchleuchtet werden. Eine Einbindung von Strukturaussagen in bisher ausschließlich auf Holzertrag ausgerichtete waldwachstumskundliche Prognosemodelle ist neu und eröffnet Möglichkeiten zur Abwägung

und Optimierung zwischen Produktions-, Stabilitäts- und Diversitätsaspekten bei der Waldbehandlung (17).

5. Ausblick zu weiteren Einsatzmöglichkeiten

Abschließend seien die zur Zeit wichtigsten Einsatzmöglichkeiten computergestützter Wachstumssimulatoren noch einmal kurz genannt. Die Analyse von Betriebsklassen wurde bereits an einem Beispiel ausführlich demonstriert. An Bedeutung wird in kürzester Zeit sicherlich die Unterstützung der Nutzungsplanung im Rahmen der Forsteinrichtung gewinnen (Abb. 10), wobei auch die Ankopplung an Geographische und speziell Betriebliche Informationssysteme im Interessen- und Anwendungsmittelpunkt stehen wird. Desweiteren wird die Nutzung von computergestützten Wachstumssimulatoren zur Liquiditätsplanung auf Betriebsebene weiter vorangetrieben werden, weil Optimalitätsüberlegungen auf der Basis normaler Betriebsklassen bei weitem nicht ohne Berücksichtigung betrieblicher Besonderheiten zur Umsetzung errechneter Waldbaustrategien führen dürfen.

Weitere Anwendungsfelder zeichnen sich auf überbetrieblicher Ebene ab: die Analyse von Klimaszenarien mit ihren Auswirkungen auf Wald und Waldentwicklung zeigt im Kontext regionaler sozioökonomischer Kalküle soziale, wirtschaftliche und kulturelle Dimensionen. Jedoch auch ohne den Einfluß etwa klimabedingter Störgrößen auf die Waldentwicklung wird etwa eine Landschaftsbildsimulation z.B. im Rahmen landschaftsplanerischer Maßnahmen die Nutzung realitätsnaher Prognosen von Wachstumsprozessen erforderlich machen, sofern dabei sozioökonomische und auch ökologische Indikatorgrößen zu Stabilität, Diversität etc. für Entscheidungsfindungen zur Verfügung gestellt werden können.

Die Bedeutung, die mehrkriteriell nutzbaren Wuchsmodellen im Rahmen der Zertifizierung zukommen wird, ist absehbar, und zwar sowohl auf Basis einer Zertifizierung nach ISO 14000 als auch nach den Vorstellungen des Forest Stewardship Councils, sofern letztere sich überhaupt durchsetzen wird. Die Nutzung zur Nachhaltsplanung auf ertragskundlicher, ökonomischer und ökologischer Ebene ist mit einer Schwerpunktaufgabe bei der Entwicklung computergestützter Wuchsmodelle.

Auf die Nutzung von Wuchsmodellen im Rahmen von Forschung, Schulung und Lehre sei nur hingewiesen.

5. Literatur

- (1) AMMER, U., DETSCH, R. und SCHULZ, U., 1995: Konzepte der Landnutzung, Forstw. Cbl., 114. Jg., S. 107-125
- (2) ASSMANN, E. and FRANZ, F., 1963: Vorläufige Fichten-Ertragstafel für Bayern in BAYERISCHE STAATSMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN (Hrsg.), 1990: Hilfstafeln für die Forsteinrichtung. 334 S.
- (3) CLARK, P. J. und EVANS, F. C., 1954: Distance to nearest neighbor as a measure of spatial relationships in populations, Ecology, Vol. 35, No. 4, S. 445-453

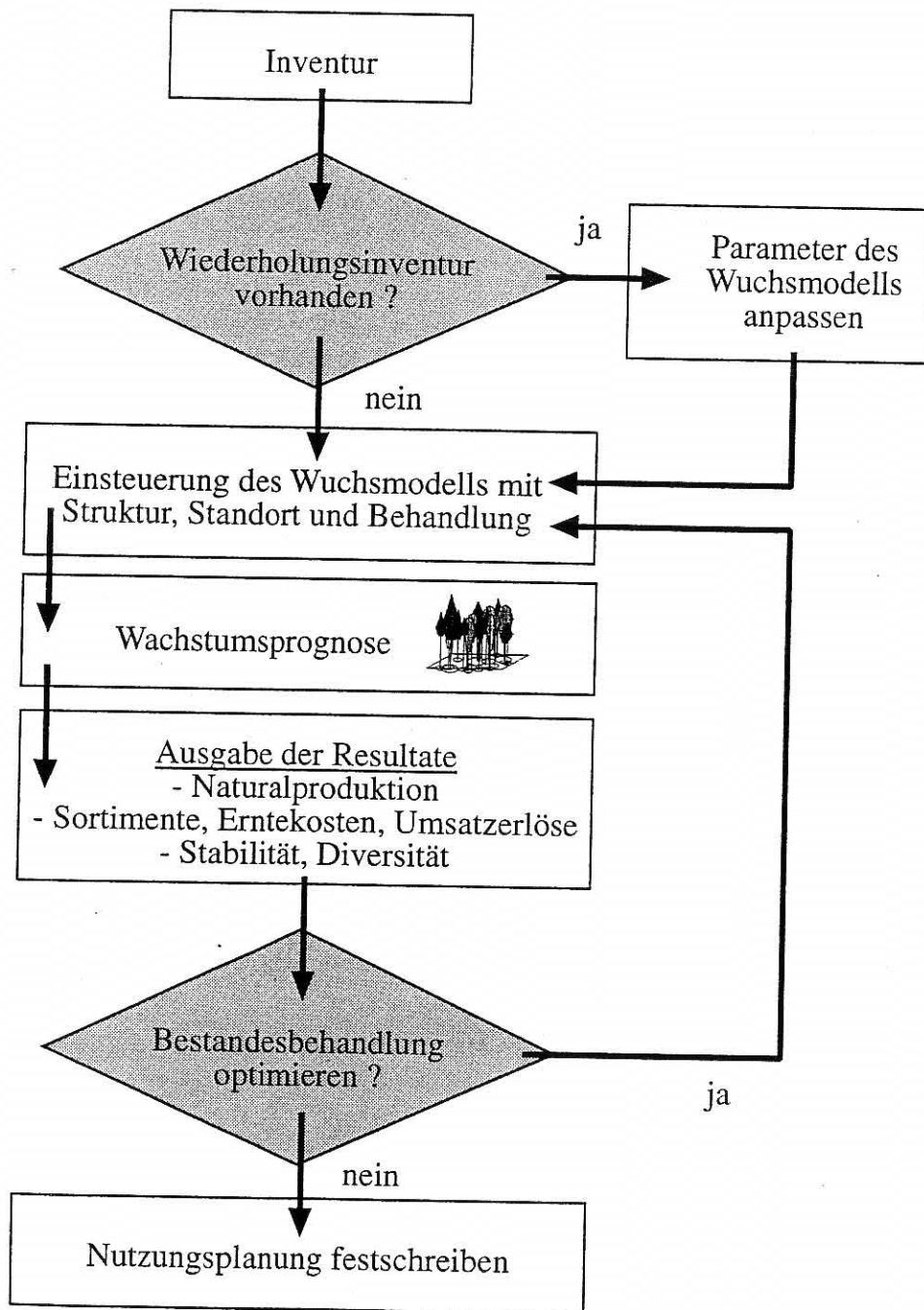


Abb. 10: Einsatzmöglichkeit von Wachstumssimulatoren bei der Nutzungsplanung im Rahmen der Forsteinrichtung.

- (4) VON GADOW, K., 1996: Möglichkeiten und Grenzen der mittelfristigen Waldbauplanung, AFJZ, 167. Jg., H. 1/2, S. 24-28
- (5) HASENAUER, H., 1994: Ein Einzelbaumwachstumssimulator für ungleichaltrige Kiefern- und Buchen- Fichtenmischbestände, Forstliche Schriftenreihe Universität für Bodenkultur, Wien, 152 S.
- (6) KAHN, M., 1994: Modellierung der Höhenentwicklung ausgewählter Baumarten in Abhängigkeit vom Standort, Forstl. Forschungsber. München, Nr. 141, 221 S.
- (7) KAHN, M., 1995: Die Fuzzy Logik basierte Modellierung von Durchforstungseingriffen, AFJZ, 166. Jg., H. 9/10, S. 169-176
- (8) KUBLIN, E. und SCHARNAGL, G., 1988: Verfahrens- und Programmbeschreibung zum BWI-Unterprogramm BDAT, Forstliche Forschungs- und Versuchsanstalt Baden-Württemberg, 87 S.
- (9) LEMM, R., 1991: Ein dynamisches Forstbetriebs-Simulationsmodell. Prognosen von betriebsspezifischen Waldentwicklungen, Waldschäden und deren monetäre Bewertung unter variablen Einflußgrößen. Diss. Nr. 9369 Eidgenössische Technische Hochschule Zürich. Professur für Forsteinrichtung und Waldwachstum: 235 S.
- (10) NAGEL, J., 1996: Anwendungsprogramm zur Bestandesbewertung und zur Prognose der Bestandesentwicklung, Forst und Holz, 51. Jg., H. 3, S. 76-78
- (11) PIELOU, E. C. , 1974: Population and community ecology. Principles and methods, Gordon and Breach Science Publishers, New York, Paris, London, 424 S.
- (12) PRETZSCH, H., 1992: Konzeption und Konstruktion von Wachstumsmodellen für Rein- und Mischbestände, Forstl. Forschungsber. München, Nr. 115, 358 S.
- (13) 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, Sauerländer's Verlag, 87 S.
- (14) PRETZSCH, H., 1996: Strukturvielfalt als Ergebnis waldbaulichen Handels, AFJZ, 167. Jg., S. 213-222
- (15) SCHOBER, R., 1975: Ertragstabellen wichtiger Baumarten bei verschiedener Durchforstung. 157 S.
- (16) SHANNON, C. E., 1948: The mathematical theory of communication. In C. E. SHANNON, W. WEAVER (Hrsg.): The mathematical theory of communication, Urbana, Univ. of Illinois Press, S. 3-91
- (17) SPELLMANN, H. 1995: Vom strukturarmen zum strukturreichen Wald, Forst und Holz, 50. Jg., H. 2, S. 35-44
- (18) STERBA, H., 1995: PROGNAUS - ein abstandsunabhängiger Wachstumssimulator für ungleichaltrige Mischbestände, Tagungsberichte Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten, Sektion Ertragskunde, Jahrestagung vom 29.5.95-31.5.95, Tagungsberichte S. 173-183

Anschrift der Verfasser:

Dr. Markus Kahn und Prof. Dr. Hans Pretzsch

Lehrstuhl für Waldwachstumskunde der Ludwig-Maximilians-Universität München

Am Hochanger 13, D-85354 Freising

Email: M.Kahn@lrz.uni-muenchen.de

bzw. H.Pretzsch@lrz.uni-muenchen.de

1
D
B
g
r
d
g
z
V
s
E

2
D
D
B
r
z
G
.
.
.
.