6.9 Ein Wachstumssimulationsmodell für die Kiefer als Entscheidungshilfe für Waldbau und Holzvermarktung

Annett Degenhardt

1 Wachstumsmodelle als Entscheidungshilfen bei der Bewirtschaftung von Kiefernreinbeständen

Die waldbaulichen Zielsetzungen haben sich in den 1990er Jahren in den meisten Landesforstverwaltungen geändert. In Brandenburg wurde dieser Entwicklung mit dem „Grünen Ordner“ Rechnung getragen (Waldbau-Richtlinie 2004 „Grüner Ordner“ der Landesforstverwaltung Brandenburg).

Die im „Grünen Ordner“ formulierten Ansprüche an die Bewirtschaftung der Kiefer lassen einen größeren Spielraum als die durch Ertragstafeln vorgegebene Durchforstungsweise zu. Damit hat der Förster vor Ort einerseits einen größeren Gestaltungsspielraum. Andererseits werden an ihn höhere Anforderungen bzgl. der forstlichen Planung gestellt.

Aus diesem Grund war auch für Brandenburg die Entwicklung eines einzelbaumorientierten Wachstumssimulationsprogramms als Entscheidungshilfe für die Bewirtschaftung von Waldbeständen, insbesondere auch in der Phase des Waldumbaus, vorgesehen. Begonnen wurde mit der Modellierung des Wachstums der Kiefer, um optimale Behandlungsvarianten im Rahmen der Vorgaben des „Grünen Ordners“ für die Hauptwirtschaftsbaumart des Landes Brandenburg zu erschließen.

Ziel der Modellierung des Wachstums der Kiefer war die Entwicklung eines Entscheidungsunterstützungssystems für die Praxis sowie die Ableitung optimaler Behandlungsvarianten im Rahmen der Vorgaben des „Grünen Ordners“ für die Hauptwirtschaftsbaumart des Landes Brandenburg. Die Grundlage dafür bildet das durch Prof. Nagel an der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt entwickelte Wachstumssimulationsprogramm BWIN. Dieses Programm wurde Mitte der 1990er Jahre an der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt Göttingen konzipiert (Nagel 1999), um rechnergestützt reale und auch fiktive Rein- und Mischbestände waldwachstumskundlich zu beschreiben und deren weitere Entwicklung zu prognostizieren. Seitdem entstanden vielfältige Weiterentwicklungen (Nagel et al. 2003; Duda 2006) und Anwendungen (Schröder 2004).

BWIN wurde auf der Basis der vorhandenen Versuchsflächendaten in Brandenburg zunächst für das Wachstum der Kiefer durch die LFE parametrisiert. Besonderheiten, die aus der Bewirtschaftung der Kiefer in Brandenburg resultieren, wurden in das Programm eingearbeitet (Degenhardt 2006a).

2 Das Bestandessimulationsmodell BWIN für die Kiefer in Brandenburg

Die neue Qualität der Bestandessimulationsmodelle findet ihren Ausdruck in der Einzelbaumorientierung. Der Bestand wird in seine Einzelbäume zerlegt und deren Entwicklung anhand ihrer konkreten Wuchskonstellation modelliert. Über die Zusammenfassung der Einzelbauminformationen gelangt man zu den jeweiligen Bestandeswerten. Damit wird es möglich, den Einfluss unterschiedlichster einzelbaumorientierter Durchforstungseingriffe auf die Bestandesentwicklung aus waldwachstumskundlicher, betriebswirtschaftlicher und ökologischer Sicht zu simulieren und modellhaft zu quantifizieren. Schließlich können die Simulationsergebnisse als Entscheidungshilfe für die Behandlung von Kiefernbeständen dienen.

Der dem Programm zugrunde liegende Algorithmus (Abb. 1) besteht im Wesentlichen aus drei Teilschritten. Auf der Grundlage der Daten eines Bestandes wird eine Bestandesbehandlung simuliert, die Entwicklung für eine vorgegebene Zuwachsperiode prognostiziert und die Ergebnisse der Bestandesbehandlung und des Bestandeswachstums mit verschiedenen Methoden analysiert. Die in den einzelnen Teilschritten (Bestandesbehandlung, Wachstumsprognose und Ergebnisanalyse) verwendeten Methoden und Algorithmen sollen in den folgenden Abschnitten im Einzelnen erläutert werden.

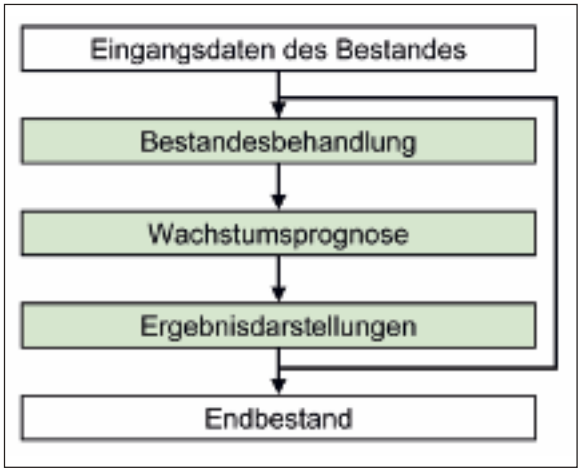

Abb. 1: Programmstruktur von BWIN

2.1 Bestandesbehandlung

Für die Modellierung der Bestandesbehandlung wurde versucht, möglichst viele Strategien der Praxis zu analysieren, angepasste Algorithmen zu entwickeln und diese mit geeigneten Parametern zu steuern. Schwerpunkt der Bestandesbehandlung bildete die Z-Baum-orientierte Durchforstung, die Art und Weise der Durchforstung zwischen den Z-Bäumen sowie die Anlage von Rückegassen.

Alle Durchforstungseingriffe werden dabei wesentlich über die Kronendimensionen (Kronenansatz, Kronenbreite) der Einzelbäume gesteuert. Die Funktionen für den Kronenansatz und die Kronenbreite wurden aus den auf den Versuchsflächen erhobenen Daten abgeleitet und sind im Folgenden beschrieben.

Der Kronenansatz (KRA [m]) lässt sich geeignet durch den Brusthöhendurchmesser D [cm] und die Höhe H [m] des Einzelbaumes über folgende Funktionen bestimmen (Abb. 2):

$$KRA = H \cdot \left(1 - \exp\left(-\left(0{,}679388 + 0{,}59120419 \cdot \frac{H}{D} + 0{,}00073396 \cdot D\right)\right)\right)$$

Bei der Parametrisierung der Kronenbreite (KRB [m]) wird neben dem Brusthöhendurchmesser D [cm] der relative Radius des Standraumes RSR des Einzelbaumes berücksichtigt (Abb. 3):

$$KRB = 0{,}69978845 + 0{,}33121715 \cdot RSR + 0{,}12271199 \cdot D,$$

wobei RSR durch $RSR = \sqrt{SR/SR_{ET}}$

mit SR als Standraum des Einzelbaumes und SR_{ET} als mittlerer Standraum ($SR_{ET} = 10000/N_{ET}$) nach Kiefern-Ertragstafel (Lembcke et. al. 1975) definiert ist.

Im Programm erfolgt die Steuerung der Z-Baum-orientierten Durchforstung durch die Parameter „Anzahl der Z-Bäume je ha“ (Feld „Z-Baum“ in Abb. 4) und den bei der Durchforstung zu erzeugenden Grad der Kronenfreistellung („Freistellungsgrad“). Der Freistellungsgrad ist derart definiert, dass ein Wert von 1,2 eine Kronenüberlappung von 20 % erlaubt. Analog fordert ein Wert von 0,8 die Entnahme von Bedrängern, deren Abstand geringer als das 1,2-fache der mittleren Kronenbreiten benachbarter Bäume ist.

In ähnlicher Weise ist der Algorithmus der Durchforstung zwischen den Z-Bäumen umgesetzt („restliche Fläche durchforsten“). Hier erfolgt eine Auswahl temporärer Pflegebäume, deren Pflege analog über den Grad ihrer Kronenfreistellung gesteuert wird. Zusätzlich kann die Stärke der Durchforstungseingriffe durch das Festlegen der Entnahmemengen eingeschränkt werden („Durchforstung Menge [m³/ha]“). Bei der Simulation von Rückegassen lassen sich die Parameter „Breite“ der Gasse und „Abstand“ zwischen den Gassen variieren.

Die Grundrissdarstellungen eines Beispielbestandes in Abbildung 5 sollen das Spektrum der durch das Simulationsmodell abbildbaren Durchforstungsvarianten demonstrieren: (a) Ausgangsbestand (b) Auswahl von 50 Z-Bäumen je ha und deren weitgehende Solitärstellung (Freistellungsgrad=1,5) (c) Auswahl von 150 Z-Bäumen je ha und Schaffung von Kronenfreiheit (Freistellungsgrad = 1,0) (d) selektive Durchforstung mit Freistellung temporärer Pflegebäume und Anlage einer Rückegasse.

2.2 Wachstumsprognose

Die Wachstumsprognose basiert auf der Modellierung des Wachstums der Einzelbäume des Bestandes. Das Bestandeswachstum wird anschließend aus dem Wachstum der Einzelbäume zusammengesetzt. Bei der Prognose beschränkt sich das Modell im Wesentlichen auf die Fortschreibung der folgenden vier Einzelbaumgrößen: Durchmesser, Höhe, Kronenparame-

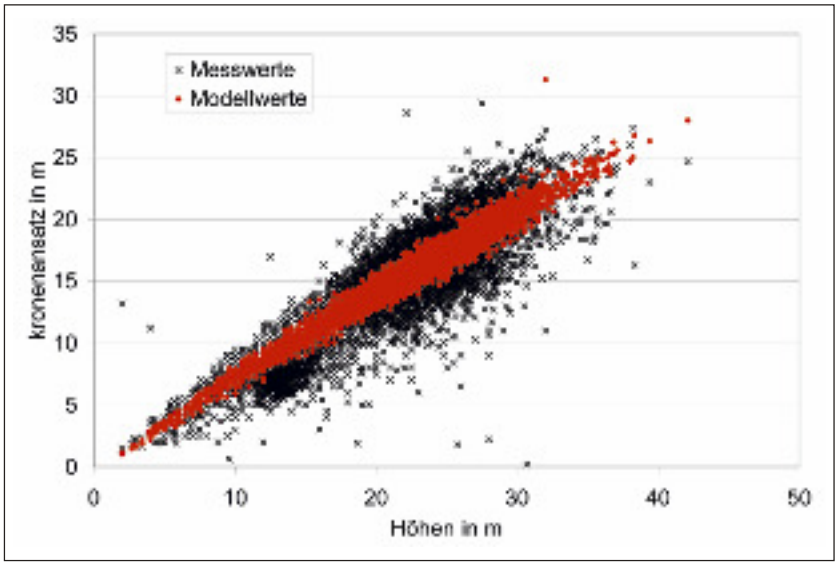

Abb. 2: Die Messwerte und Modellwerte für den Kronenansatz dargestellt über der Höhe der Einzelbäume

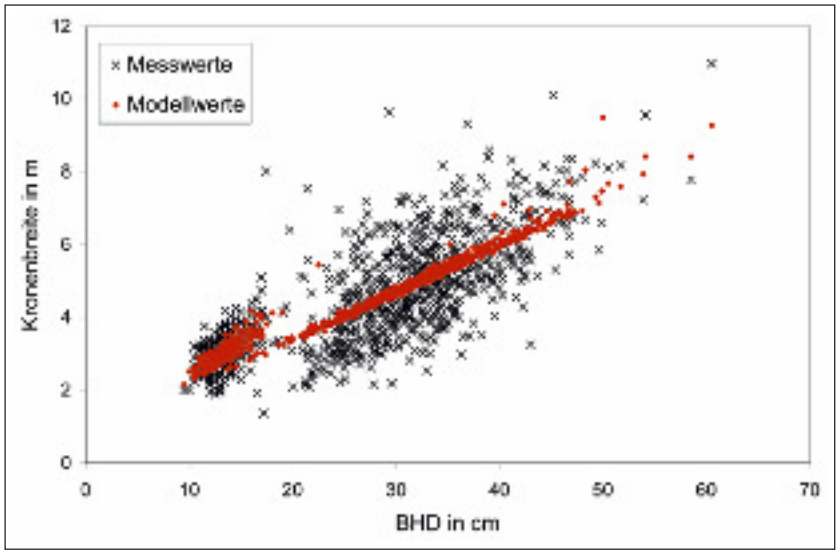

Abb. 3: Die Messwerte und Modellwerte für die Kronenbreite dargestellt über dem BHD der Einzelbäume

ter und Mortalität. Das Modell der Durchmesserzuwachsentwicklung ist ausführlich in Kap. 5.2 diskutiert worden. Die Kronenparameter ergeben sich aus denen in Abschnitt 2.1. dargestellten Funktionen für die Kronenbreite und den Kronenansatz.

Der Höhenzuwachs HZ wird in Anlehnung an die Einheitshöhenkurven aus der Kiefern-Ertragstafel geschätzt. Dazu sei D_A der Durchmesser des Einzelbaumes zum Anfang der Zuwachsperiode und jDZ der jährliche Durchmesserzuwachs. H_A bezeichnet die über die Einheitshöhenkurve der Kiefern-Ertragstafel bestimmte Höhe.

$$H_A = 10^{a+b\cdot\ln(D_A)+c\cdot\ln^2(D_A)}$$

Analog sei D_{A+P} der Durchmesser des Baumes am Ende der Zuwachsperiode P und H_{A+P} die über die Einheitshöhenkurve der Kiefern-Ertragstafel bestimmte Höhe.

$$D_{A+P} = D_A + P \,.\, jDZ$$

$$H_{A+P} = 10^{a+b\cdot\ln(D_{A+P})+c\cdot\ln^2(D_{A+P})}$$

Dann berechnet sich der Höhenzuwachs HZ aus

$$HZ = H_{A+P} - H_A.$$

Die Mortalitätsalgorithmen basieren auf der Erkenntnis, dass die Bestandesdichte bei der Zuwachssimulation nicht unrealistisch anwachsen kann. Grundlage des Mortalitätsmodells bilden Untersuchungen zu Absterbehäufigkeiten auf langfristigen Versuchsflächen. Die Mortalität der Bäume lässt sich mit Hilfe einer Mortalitätswahrscheinlichkeitsfunktion modellieren. In dieser Funktion (Abb. 6) wurden der relative Standraum, der relative Durchmesser und die relative Höhe der Bäume berücksichtigt.

$$Mort = \frac{1}{1 + e^{-3,7955924+3,81532882\cdot relD+3,3435611\cdot relH+1,14055558\cdot RSR}},$$

wobei $relD = D/DG_{ET}$ mit dem Durchmesser des Grundflächenmittelstammes (DG_{ET}), als relativer Durchmesser und $relH = H/HG_{ET}$ mit der Höhe des Grundflächenmittelstammes (HG_{ET}) als relative Baumhöhe definiert ist. Nach diesem Modell wird ein Baum bei der

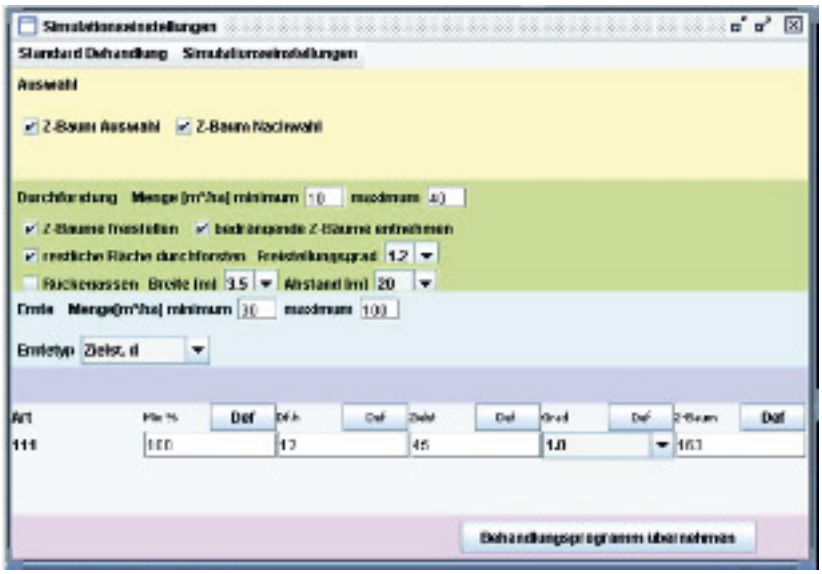

Abb. 4: Fenster zur Einstellung der Parameter der Bestandesbehandlung

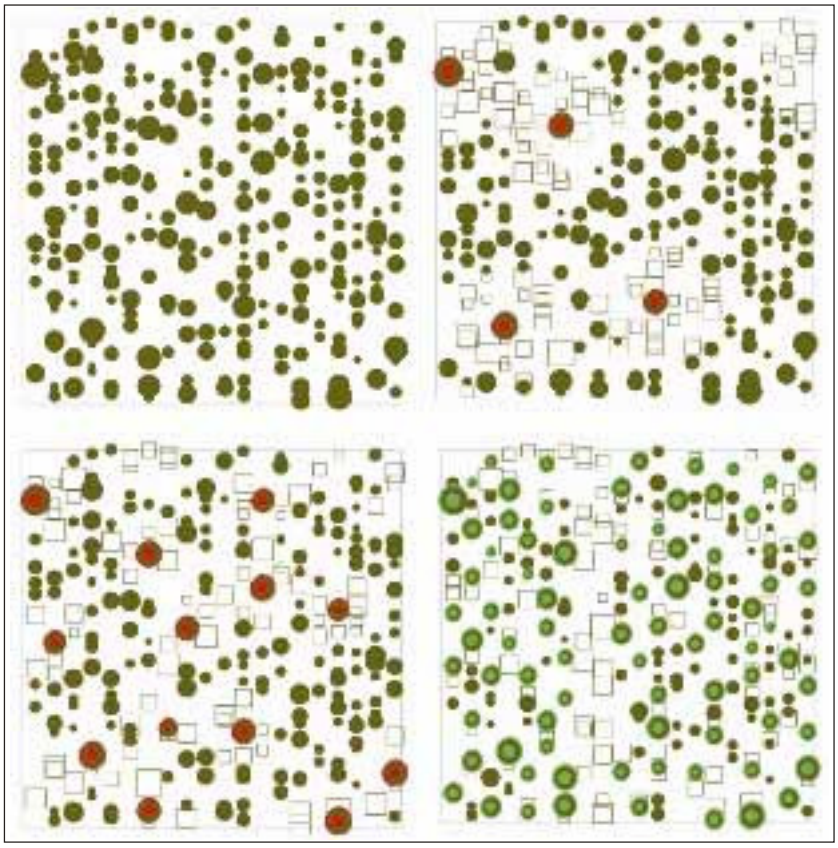

Abb. 5: Beispiele für simulativ erzeugte Bestandesbehandlungen

Simulation als absterbend gekennzeichnet, wenn der aus der Funktion berechnete Wert für die Mortalitätswahrscheinlichkeit Mort größer als eine im Intervall [0,1] gleichverteilte Zufallszahl ist.

Zusätzlich wird die Mortalität über kritische Werte für den relativen Standraum (RSR), den relativen Durchmesser und die relative Höhe gesteuert, die es einem Baum nicht mehr möglich machen zu existieren. Als kritische Werte wurden die minimalen, innerhalb der Versuchsflächendaten beobachteten Werte festgelegt. Darüber hinaus bietet das Modell die Möglichkeit, die Lebensdauer der Baumarten auf ein maximales Alter zu begrenzen.

2.3 Ergebnisdarstellungen

Um verschiedene Simulationen vergleichbar zu machen, sind im 3. Teilschritt des Modells (Abb. 1) verschiedene Ergebnisdarstellungen implementiert. Dazu gehören grafische Darstellungen wie beispielsweise Durchmesserverteilungen, Durchmesser-Höhen-Beziehungen, der Bestandesgrundriss und der Bestandesaufriss. Aber auch Ergebnislisten, die der Analyse der Simulationsergebnisse dienlich sind, werden erzeugt. Auf der Grundlage der Kiefern-Ertragstafel lassen sich beispielsweise ertragskundliche Parameter des Bestandes für jedes Prognosealter in einer Tabelle auflisten (Abb. 7). Gleichfalls liefern die im Simulationsprogramm

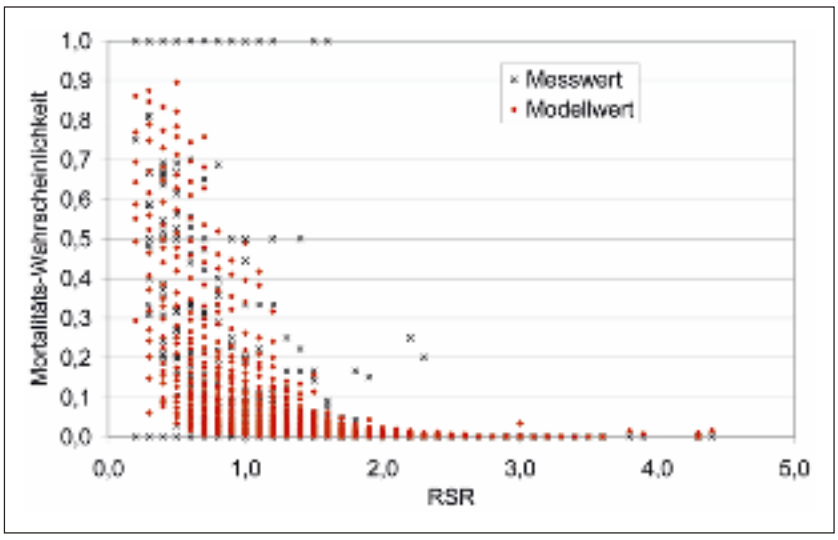

Abb. 6: Messwerte und Modellwerte des Mortalitätsmodells

integrierten Algorithmen zur Modellierung der Holzernte die zu erwartenden Erntekosten, Holzerlöse sowie erntekostenfreie Erlöse (Abb. 8)

3. Bestandessimulation zur Entscheidungsunterstützung

Mit Hilfe des Bestandessimulationsmodells wird es möglich, Bestandesentwicklungen bei unterschiedlichsten Behandlungsvarianten näherungsweise zu prognostizieren. Im Ergebnis können ökologische, ertragskundliche und ökonomische Parameter dargestellt werden.

Ziel der Parametrisierung des Simulationsmodells BWIN war zunächst die Entwicklung eines Entscheidungsunterstützungssystems für die Bewirtschaftung von Kiefern-Reinbeständen. Mit Hilfe dieses Modells kann die Bestandesentwicklung unter Berücksichtigung verschiedenster Faktoren wie des Standortes, der Art und der Kosten der Bestandesbehandlung, der Sortierung des anfallenden Holzes sowie der Preissituation näherungsweise prognostiziert werden. Die abgeleiteten Ergebnisse lassen damit Vergleiche zwischen den untersuchten Behandlungsvarianten zu.

Bei der Anwendung von Bestandessimulationsprogrammen sollten aber auch immer die Grenzen des Modells beachtet und die erhaltenen Ergebnisse kritisch hinterfragt werden. Eine Fehlerquelle bildet beispielsweise die Qualität des Datenmaterials. Obwohl für die Parametrisierung des Wachstumssimulationsmodells BWIN sehr umfangreiche, an der Landesforstanstalt erhobene Daten zur Verfügung standen, konnte teilweise nicht der gesamte Wertebereich ausreichend abgedeckt werden. Beispielsweise ließ sich das Wachstum bei sehr starker Freistellung des Einzelbaumes nicht sicher belegen. Derzeitig laufen daher Untersuchungen zum Wachstum von Kiefern-Solitären.

Grundsätzlich ist bei der Anwendung von einzelbaumbasierten Simulationsmodellen zu beachten, dass mit zunehmendem Prognosezeitraum die Genauigkeit der Ergebnisse sinkt. Für praktische Anwendungen werden daher Prognosen von 20-30 Jahren empfohlen. Hinzuweisen ist auch darauf, dass die mit dem Modell erzeugten Bestandesentwicklungen von „idealen Bedingungen“ ausgehen, d. h. im Modell werden keine Schadereignisse wie z. B. Windwurf oder Insektenbefall berücksichtigt.

Exaktere Ergebnisse wären darüber hinaus zu erwarten, wenn bei der Holzaushaltung und der Erlöskalku-

Bestand :KÖPENICK 187 (4)
Bestandesflaeche [ha] :0.09
Jahr :2034

Jahr :	Art	Alter	Dg	Hg	alten	rlten	D100	H100	N/ha	G/ha	BG	V/ha	ausN/ha	ausG/ha	ausV/ha
1999	111	26	12.7	13.7	36.5	-1.1	21.1	15.6	2,622.2	33.5	1.0	229.1	455.6	5.7	38.6
2004	111	31	14.5	15.7	37.2	-1.3	25.3	18.5	2,411.1	39.8	1.1	309.2	180.9	3.3	25.8
2009	111	36	16.3	17.6	37.7	-1.4	29.3	21.0	2,077.8	43.3	1.1	371.0	144.4	3.7	31.9
2014	111	41	18.3	19.5	37.9	-1.5	32.9	23.2	1,655.6	43.6	1.1	436.0	111.1	4.4	41.9
2019	111	46	20.0	20.8	38.3	-1.6	36.9	25.4	1,511.1	47.4	1.1	471.3	77.8	2.4	24.0
2024	111	51	22.0	22.2	38.1	-1.5	39.8	27.0	1,122.2	42.5	1.0	447.1	166.7	8.5	92.2
2029	111	56	23.9	23.5	38.2	-1.5	43.7	28.7	966.7	43.3	1.0	479.3	77.8	2.9	30.8
2034	111	61	25.7	24.7	38.2	-1.6	47.3	30.3	911.1	47.1	1.0	544.5	0.0	0.0	0.0

Abb. 7: Tabelle der Ertragskennwerte

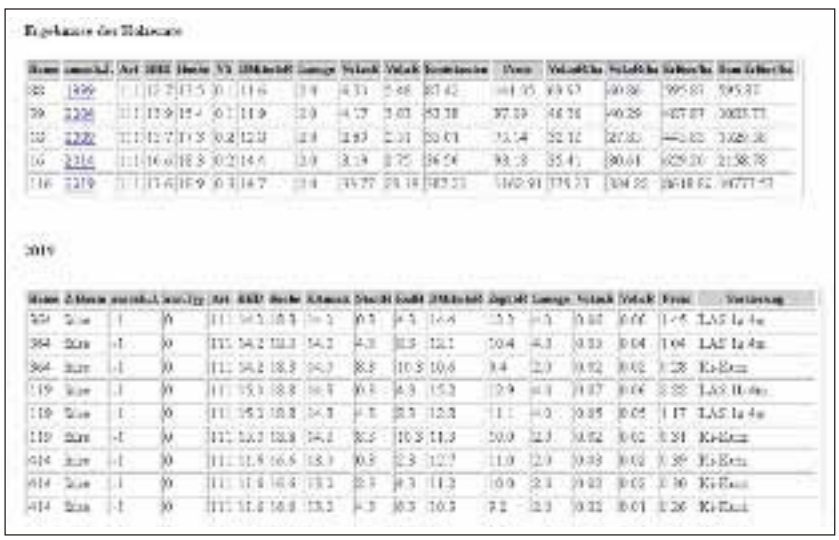

Abb. 8: Ergebnisse der Holzerntekalkulation

lation Holzqualitäten berücksichtigt würden. Es ist jedoch bisher nicht ausreichend untersucht, inwieweit ein geasteter Z-Baum auch Wertholz liefert bzw. ob der nicht geastete Füllbestand ebenfalls zum Wertholzaufkommen beitragen kann. Zusätzliche Untersuchungen müssen außerdem klären, welchen Einfluss die unterschiedlichen Wuchsräume der Einzelbäume auf die Entwicklung von qualitativen Stammmerkmalen haben. Macht man sich diese Fehlerquellen bewusst, so kann die sachgemäße Anwendung des Programms entscheidend zum Verständnis der Auswirkungen verschiedenster Durchforstungseingriffe auf die Bestandesentwicklung beitragen und damit die Entscheidungsfindung bei der Bewirtschaftung von Kiefern-Reinbeständen unterstützen.

Dr. Annett Degenhardt
Landesforstanstalt Eberswalde