

---

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Fachgebiet für Waldinventur und nachhaltige Nutzung

**Vom Bestand zum Betrieb**

Verknüpfung einzelbestandsweiser und betrieblicher Optimierungsansätze  
in der Forstwissenschaft

Ruth Dirsch

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Forstwissenschaft

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr. Reinhard Mosandl

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr. Th. F. Knoke
2. Univ.-Prof. Dr. M. Moog

Die Dissertation wurde am 20.01.2010 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt am 07.06.2010 angenommen.

## **Gliederung**

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | Einleitung .....  | 5  |
| 2     | Kenntnisstand .....                                       | 8  |
| 2.1   | Optimierungsverfahren .....                               | 9  |
| 2.2   | Optimierung auf der Bestandesebene .....                  | 13 |
| 2.2.1 | Die Durchforstung .....                                   | 13 |
| 2.2.2 | Bedingungen für das ökonomische Optimum.....              | 14 |
| 2.2.3 | Anwendungen von Methoden aus der Unternehmensforschung... | 16 |
| 2.3   | Optimierung auf der Betriebsebene.....                    | 20 |
| 2.3.1 | Ansätze der Forsteinrichtung .....                        | 20 |
| 2.3.2 | Rahmenbedingungen für eine optimale Planung .....         | 21 |
| 2.3.3 | Aktuelle Anwendungen .....                                | 22 |
| 2.4   | Vom Bestand zum Betrieb.....                              | 25 |
| 2.5   | Hypothesen .....  | 30 |
| 3     | Material und Methoden .....                               | 32 |
| 3.1   | Naturaldaten.....   | 32 |
| 3.2   | Modellbestandsbildung.....                                | 37 |
| 3.3   | Flächenanteile der Modellbestände.....                    | 42 |
| 3.4   | Prognose des Waldwachstums .....                          | 43 |
| 3.5   | Weitere Eingangsgrößen.....                               | 46 |
| 3.5.1 | Sortierung.....   | 46 |
| 3.5.2 | Holzpreise .....  | 47 |
| 3.5.3 | Aufarbeitungskosten .....                                 | 50 |
| 3.5.4 | Bestandesbegründung .....                                 | 53 |
| 3.5.5 | Berechnung von Bodenertragswerten.....                    | 54 |
| 3.6   | Durchforstungsoptimierung .....                           | 55 |

---

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 3.6.1 | Dynamische Programmierung.....                              | 55  |
| 3.6.2 | Vollständige Enumeration .....                              | 61  |
| 3.7   | Optimale Betriebsplanung .....                              | 62  |
| 3.7.1 | Formulierung eines betrieblichen Optimierungsproblems ..... | 64  |
| 3.7.2 | Einbinden verschiedener Behandlungsvarianten .....          | 66  |
| 4     | Ergebnisse .....  | 69  |
| 4.1   | Die Modellbestände.....                                     | 69  |
| 4.2   | Das Waldwachstum.....                                       | 76  |
| 4.3   | Die Bodenertragswerte.....                                  | 82  |
| 4.4   | Durchforstungsoptimierung .....                             | 84  |
| 4.4.1 | Vergleich der Optimierungsverfahren.....                    | 84  |
| 4.4.2 | Ergebnisse mit vollständiger Enumeration .....              | 92  |
| 4.5   | Optimale Betriebsplanung .....                              | 100 |
| 5     | Diskussion.....   | 110 |
| 5.1   | Datengrundlage.....   | 110 |
| 5.1.1 | Modellbestandsbildung .....                                 | 110 |
| 5.1.2 | Waldwachstumskundliche Prognose.....                        | 112 |
| 5.1.3 | Finanzielle Kennzahlen – Deckungsbeitragskalkulation.....   | 114 |
| 5.1.4 | Bodenertragswertberechnung.....                             | 115 |
| 5.2   | Durchforstungsoptimierung .....                             | 116 |
| 5.2.1 | Vergleich der Optimierungsverfahren.....                    | 116 |
| 5.2.2 | Ergebnisse der vollständigen Enumeration .....              | 123 |
| 5.2.3 | Optimale Betriebsplanung .....                              | 130 |
| 5.3   | Handlungsspielräume für optimale Planungen .....            | 134 |
| 6     | Ausblick.....   | 137 |
| 7     | Zusammenfassung.....  | 141 |
| 8     | Schlagwörter .....  | 144 |

---

|      |  |     |
|------|--|-----|
| 9    | Abkürzungen.....                                     | 145 |
| 10   | Literaturverzeichnis.....                            | 147 |
| 11   | Anhang.....  | 180 |
| 11.1 | Clusteranalyse.....                                  | 180 |
| 11.2 | Umsetzung der waldwachstumskundlichen Prognose ..... | 182 |

# 1 Einleitung

Die Frage nach der optimalen Waldbewirtschaftung beschäftigt die Forstwissenschaft seit ihrer Begründung als eigene Fachdisziplin. „Bei den Feldfrüchten kann man genau angeben, wenn sie reif zu nennen sind, bei dem Holze hingegen giebt es dafür keine bestimmten Merkmale und dasselbe kann schon im zehnten Jahre – und kann auch erst im hundertsten, oder noch später zur Benutzung reif werden, je nachdem ob man starkes oder schwaches Holz nötig hat“ (COTTA 1832, S. 68).

Um die unterschiedlichen Dimensionen von Raum und Zeit zu fassen, in welchen sich das Wachsen, Leben und Sterben, beziehungsweise Ernten der Bäume abspielt, wurden bereits die verschiedensten Methoden forstlicher Planungen entwickelt. Mit der vorliegenden Arbeit soll nicht so sehr eine weitere Möglichkeit hinzugefügt werden, sondern vielmehr ein Beitrag zur fundierten Anwendung geliefert und eine wichtige Verknüpfung der Planungsebenen des Waldbestandes und des Forstbetriebs aufgezeigt werden. Dabei besteht der entwickelte Ansatz aus einer Kombination forstlicher Nutzungskalküle und Methoden aus dem neueren Bereich der Unternehmensforschung, wobei sowohl produktions- als auch kosten-theoretische Aspekte<sup>1</sup> eingehen. Die Unternehmensforschung bietet hier Methoden zur Lösung von Allokationsproblemen (siehe RUNZHEIMER 1999), welche auf das klassische Planungsproblem in Forstbetrieben – die Zuordnung von Maßnahmen zu Beständen und Zeitperioden – anwendbar sind. Hierzu wurde eine Zielfunktion formuliert und Nebenbedingungen festgelegt, wobei die Zielfunktion maximiert, minimiert oder zur Berechnung eines festgelegten Werts verwendet wird.

---

<sup>1</sup> Die **Produktionstheorie** betrachtet die Produktionsbedingungen (im vorliegenden Fall in erster Linie das Waldwachstum) und die **Kostentheorie** die Produktionskostenstruktur (Boden, Arbeit, Vorrat, Kapital u.a. mit entsprechenden Gewichtungen). Von effizienter Produktion wird bei einem optimalen Faktoreinsatz gesprochen. Für ein Unternehmen gibt es deshalb ein Unternehmensoptimum, bei welchem der Faktoreinsatz in Bezug auf das Produktionsergebnis optimal ist (siehe BERGEN 2002, S. 34ff).

Diese Arbeit ist im Zusammenhang mit dem vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projekt „Perspektiven einer nachhaltig wertleistungsoptimierten Waldwirtschaft im walddreichen ländlichen Raum Ostalb“ entstanden, welches sich zum Ziel gesetzt hatte, die so genannte „wertleistungsoptimierte Waldwirtschaft“ zu analysieren, neue Wege zu entwickeln und diese für die Anwendung in der forstlichen Praxis zu beschreiben.

Die Arbeit gliedert sich wie folgt:

Zunächst werden im Kapitel **2, Kenntnisstand**, der aktuelle Stand des Wissens zu Optimierungsverfahren dargestellt, Methoden und Verfahren für die Lösung der Frage nach der optimalen Durchforstung erläutert sowie Kenntnislücken aufgedeckt. Anschließend werden die Forsteinrichtung und die Rahmenbedingungen für eine optimale Planung im Zusammenhang mit aktuellen Beispielen erklärt. Es folgt ein Überblick über die Literatur zu Verbindungen der Bestands- mit der Betriebsebene. Das Kapitel endet mit den aus dem Kenntnisstand abgeleiteten Hypothesen.

Im Teil **3, Material und Methoden**, werden die Naturaldaten, die Art und Weise der Modellbestandsbildung, die Flächenprojektion der Inventurdaten und die Prognose des Waldwachstums beschrieben. Weitere Unterkapitel klären die Fragen der Sortierung, der Holzpreise, der Aufarbeitungskosten, der Bestandesbegründung sowie der Berechnung von Bodenertragswerten. Zentral sind hierin die Methodik der Durchforstungsoptimierung und die hierfür angewandten Verfahren der Dynamischen Programmierung und der vollständigen Enumeration sowie die Methodik der optimalen Betriebsplanung. Hierzu werden ein betriebliches Optimierungsproblem formuliert und in einem weiteren Schritt verschiedene Behandlungsvarianten eingebunden.

Das Kapitel **4, Ergebnisse**, enthält einen Abriss der gebildeten Modellbestände, die Ergebnisse der Prognose des Waldwachstums und der Berechnung der Bodenertragswerte. Es werden die Lösungen der Durchforstungsoptimierung verglichen und dargestellt. Beschrieben werden auch die Lösungen der optimalen Betriebsplanung und die Unterschiede mit und ohne differenzierte Durchforstungsvarianten.

---

Es schließt sich das Kapitel **5, Diskussion**, zur kritischen Auseinandersetzung mit der Datengrundlage, folglich der Modellbestandsbildung, der waldwachstumskundlichen Fortschreibung und der Deckungsbeitragskalkulation an. Dann werden vor allem Methodik und Ergebnisse der Durchforstungsoptimierung und der optimalen Betriebsplanung eingehend betrachtet und die hierzu formulierten Hypothesen beantwortet. Außerdem wird der Handlungsspielraum für optimale Planungen allgemein diskutiert.

Zum Abschluss werden im Teil **6, Ausblick**, die Grenzen der vorliegenden Arbeit umrissen und der Raum für verbleibende Forschungsfragen beschrieben.

Es folgen noch eine Zusammenfassung, Begriffsdefinitionen, Schlagwörter, Literaturverzeichnis und im Anhang ein Abriss zur Clusteranalyse und die Wachstumsfunktionen zur Begrenzung des Oberhöhenwachstums.

## 2 Kenntnisstand

Angesichts der Vielfalt der existierenden Optimierungsverfahren und Heuristiken, die auf forstliche Themen angewandt werden, sind diese im nachfolgenden Abschnitt kurz charakterisiert. Anschließend werden Anwendungen auf Bestandesebene und auf Betriebsebene vorgestellt und deren spezifische Unterschiede herausgearbeitet. Dies geschieht vor dem Hintergrund der zentralen Fragestellung dieser Arbeit, wie optimale Behandlungsstrategien für Einzelbestände aussehen können und ob diese bei Betrachtung des gesamten Betriebs verändert werden müssen. Abschließend werden hieraus die zu klärenden Hypothesen abgeleitet.

Als Ausgang der Betrachtung wird grundlegend angenommen, dass die Ungeduld<sup>2</sup> eine zutiefst menschliche Eigenschaft ist, die unser Handeln prägt, und sich zusammen mit dem Bestreben nach größtmöglicher Effizienz, in der Entwicklung des Zinssatzes und damit der Finanzrechnung niedergeschlagen hat. Die Zeit ist beim Wachstum eines Baumes, welcher zum Großwerden hierzulande fast ein Menschenalter oder darüber hinaus braucht, der wichtigste Faktor. Es ist MARTIN FAUSTMANN, GOTTLÖB KÖNIG, GEORG OETZEL, GUSTAV HEYER und MAX ROBERT PRESSLER zu verdanken, dass die Forstökonomie seit Mitte des 19. Jahrhunderts über finanzmathematische Werkzeuge – respektive Formeln – verfügt, welche diesem Aspekt Rechnung tragen. Die Anwendungen dieser Werkzeuge reichen von der Wertermittlung, der Erzielung regelmäßigen Einkommens (siehe SPEIDEL 1972; SAGL 1995; KOEPKE 1999) bis zur Abwägung alternativer Anlagemöglichkeiten (siehe SAMUELSON 1976 sowie KNOKE und MOOG 2005).

---

<sup>2</sup> Die Ungeduld ist unsere Unfähigkeit warten zu können und untrennbar verbunden mit unserer Wahrnehmung der Zeit. So schreibt MARSHALL (1959) im Vorwort zu den Principles of Economics: „The element of time, which is the center of the chief difficulty of almost every economic problem [...]“ Die Zeit ist ihrer Natur nach nicht haltbar oder anhaltbar und damit als Währung für sich nicht geeignet (GEIGER 1998), weshalb sich eine homogene, teilbare, seltene und haltbare Recheneinheit (JARCHOW 1998) in Geldeinheiten durchgesetzt hat.



Aufgrund der von MARTELL et al. (1998) vorgefundenen Schwierigkeiten „[...] given the incredible diversity and rapid pace of change of forest management practices around the globe it is difficult to recommend a single text [...]“ (MARTELL et al. 1998, S. 2) werden im Folgenden allgemein Optimierungsverfahren und speziell forstliche Lösungen auf der Bestandes- und Betriebsebene dargestellt. Einen guten Überblick zu Anwendungen im Forstbereich geben darüber hinaus BETTINGER und CHUNG (2004).

## 2.1 Optimierungsverfahren

Die Vielfalt an Interpretationen des Begriffs „Optimierung“ ist gewaltig. Deshalb ein kurzer Überblick was „optimal“ im Kontext dieser Arbeit bedeutet: Umgangssprachlich wird Optimierung verwendet, um die Verbesserung eines Vorgangs oder Zustands bzgl. Qualität, Kosten, Geschwindigkeit, Effizienz und Effektivität zu beschreiben. Aber „[d]er Begriff „optimal“ gibt nur einen allgemeinen Hinweis auf die Entscheidungssituation und auf die Existenz eines Zieles“ (MÜLLER-MERBACH 1971, S. 21).

Eine klarere Definition findet man in der Mathematik oder vielmehr in der Wirtschaftsmathematik. Die reine Analysis bestimmt in der Kurvendiskussion nur Extrema, d.h. lokale oder globale Maxima und Minima (Hoch- und Tiefpunkte) ohne den wertenden Begriff „Optima“. Ein solches kann es nämlich erst bei vorheriger Festlegung einer konkreten Zielsetzung geben (siehe hierzu: MÜLLER-MERBACH 1971). In der Wirtschaftsmathematik ist „Optimierung“ deshalb die Bestimmung optimaler zulässiger Punkte eines Optimierungsproblems hinsichtlich einer gegebenen Zielfunktion. Die Fragestellung wird mathematisch in einer Funktion – der Zielfunktion – ausgedrückt, welche im Hinblick auf ihre Parameter (Variablen) zu minimieren oder zu maximieren ist. Als Beispiel sei als einfachstes Optimierungsproblem – das Auffinden eines Minimums oder Maximums einer analytischen eindimensionalen Funktion  $f(x)$  – genannt, was in der Regel durch Nullsetzen der ersten Ableitung geschieht (vgl. Abbildung 1 und 2). Im folgenden Beispiel ist die darauf folgende zweite Ableitung negativ. Also handelt es sich um ein Maximum.

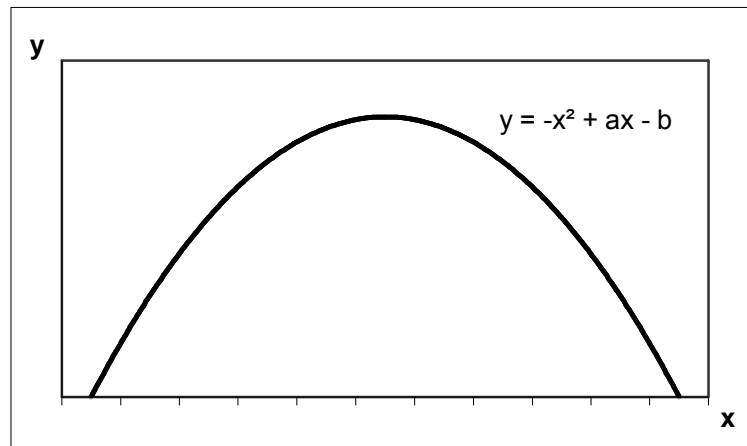


Abbildung 1: Funktion mit Maximum

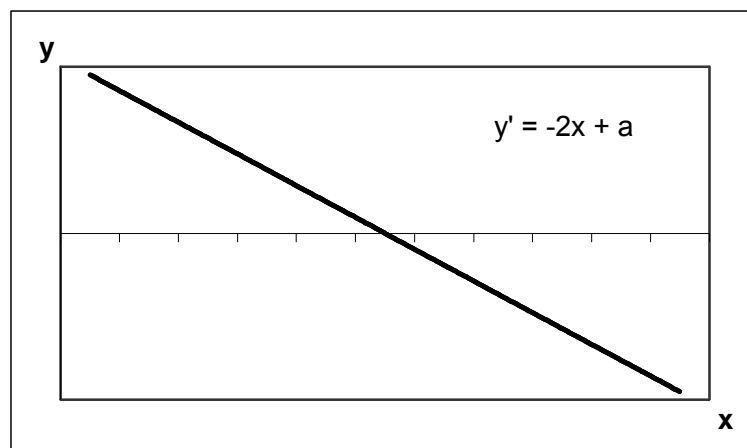


Abbildung 2: Auffinden des Maximums durch Identifizierung der Nullstelle der ersten Ableitung

In der Betriebswirtschaftslehre hat sich ein ganzer Teilbereich, die so genannte „Unternehmensforschung“ oder auf Englisch „Operations Research“ bzw. „Management Science“ (KATHÖFER und MÜLLER-FUNK, 2005) entwickelt, welcher sich mit der Lösung von praktischen Optimierungs- und Planungsproblemen auseinandersetzt<sup>3</sup>. Zur Vorbereitung möglichst optimaler Entscheidungen werden mathematische Methoden, verbunden mit einer starken planerischen Komponente verwendet (DOMSCHKE und DREXL, 2005). Hierzu wird ein reales Entscheidungsproblem in einem Optimierungs- oder Simulationsmodell abgebildet.

---

<sup>3</sup> Im Englischen wird zwischen einer stärker wirtschaftsingenieurwissenschaftlichen Ausrichtung des „Operations Research“ und einer stärker betrieblich - wirtschaftswissenschaftlichen Komponente des „Management Science“ unterschieden, wobei die Begriffe häufig auch synonym verwendet werden.

Die Optimierungsmodelle können dabei in effektive und heuristische Algorithmen unterteilt werden. Die Kategorie der **effektiven Algorithmen** kommt mit ihrer mathematischen Struktur nach endlich vielen Schritten zur Lösung und die Optimalität der Lösung ist sicher. Zu den effektiven Verfahren gehören:

- Lineare Optimierung oder Lineare Programmierung
- Dynamische Programmierung
- Graphentheorie und Netzplantechnik
- Ganzzahlige (lineare) und kombinatorische Optimierung
- Komplette Enumeration

Des Weiteren gibt es **heuristische Algorithmen** zur Zielwertverbesserung, welche das Finden der optimalen Lösung nicht garantieren bzw. einen Näherungswert für die Lösung liefern. Sie sind aber rechentechnisch weniger aufwendig und auf eine größere Menge von Optimierungsproblemen anwendbar als effektive Algorithmen. Hierzu rechnet man:

- Gierige Verfahren<sup>4</sup>
- Simulierte Abkühlung<sup>5</sup>
- Lokale Suchverfahren
- Nichtlineare Optimierung
- Warteschlangentheorie

Vergleiche zur Gliederung in effektive und heuristische Algorithmen DOMSCHKE und DREXL (2005) sowie KATHÖFER und MÜLLER-FUNK (2005).

Zusätzlich werden jeweils Entscheidungen bei Sicherheit (vollkommene Kenntnis aller Faktoren, insbesondere der Zukunft) und Entscheidungen bei Unsicherheit unterschieden. Zur Abbildung der Unsicherheit werden Simulations- und Prognosealgorithmen eingesetzt. Diese erforschen den Suchraum unter Zuhilfenahme von Zufallselementen (WINSTON 2004).

---

<sup>4</sup> Englisch: greedy algorithms

<sup>5</sup> Englisch: simulated annealing

Verfahren aus dem Bereich des Operations Research werden vor allem in Nordamerika, Skandinavien und Ozeanien schon länger für forstliche Planungen eingesetzt (siehe hierzu MARTELL et al. 1998 sowie BETTINGER und CHUNG 2004). Es lässt sich ein deutlicher Trend zu immer komplexeren Problemen feststellen, die häufig auch nicht von Forstwissenschaftlern allein, sondern meist in Kooperation mit Mathematikern aus dem Bereich der Unternehmensforschung gelöst werden. Behandelt werden Fragen der längerfristigen strategischen Planung<sup>6</sup>, bestandesweisen Einschlagsplanung<sup>7</sup>, Logistik<sup>8</sup> aber auch zunehmend Aspekte wie Berücksichtigung der biologischen Vielfalt<sup>9</sup> und gesellschaftlicher Ansprüche<sup>10</sup>. Für einen Gesamtüberblick siehe MARTELL et al. (1998). In diesem Zusammenhang nimmt die Einbeziehung räumlicher Strukturen in Form von Zielvariablen oder Restriktionen eine immer wichtigere Rolle ein (vgl. BETTINGER und CHUNG 2001).

Hierbei kommen neben den „klassischen“ Lösungsverfahren unter Verwendung von Algorithmen immer mehr multikriterielle Analysemethoden zum Einsatz (z. B. LEXER, 2005). Für Beispiele mit forstlichen Anwendungen und eine ausführliche Dokumentation ausgewählter Verfahren sei auf KASTRUP (1996) verwiesen.

Für die Fragestellungen dieser Arbeit sollen im Folgenden drei Verfahren näher beschrieben werden, welche sich für die zu lösenden Probleme anbieten. Dies sind zunächst die Dynamische Programmierung für die Optimierung der Bestandesbehandlung im Vergleich zur vollständigen Enumeration und darüber hinaus die Lineare Programmierung<sup>11</sup> auf

---

<sup>6</sup> Beispielsweise: AMIDON und AKIN (1968), KILKKI und VÄISÄNEN (1970), CHANG (1983), KAO (1984), PAREDES und BRODIE (1987) sowie DIRSCH und KNOKE (2007)

<sup>7</sup> Beispielsweise: GARCIA (1984), TIERNAN und NIEUWENHUIS (2005) sowie GUSTAFSON et al. (2006)

<sup>8</sup> Beispielsweise: RÖNNQVIST (2003), KARLSSON et al. (2004) sowie OLSSON und LOHMANDER (2004)

<sup>9</sup> Beispielsweise: DAVIS et al. (2001) sowie KNOKE und MOOG (2005)

<sup>10</sup> Beispielsweise: STEUER und SCHULER (1979) oder KNOKE und MOSANDL (2004)

<sup>11</sup> Synonym zu Lineare Optimierung

Betriebsebene um Restriktionen berücksichtigen zu können. In den folgenden Kapiteln wird auf aktuelle Beispiele eingegangen und die dieser Arbeit zugrunde liegenden Verfahren erläutert.

## **2.2 Optimierung auf der Bestandesebene**

Im vorliegenden Unterkapitel soll das Problem einer finanziell optimalen Bestandesbehandlung dargestellt werden. Hierzu wird die grundlegende Idee der Durchforstung beschrieben, anschließend ökonomische Aspekte betrachtet und schließlich Methoden aufgezeigt, wie eine finanziell optimale Durchforstung mit Verfahren aus dem Bereich des Operations Research gefunden werden kann.

### **2.2.1 Die Durchforstung**

„Dem weitesten Begriffe nach versteht man unter Durchforstung jene Hiebsmaßregel, welche zum Zwecke hat, die Entwicklung eines Bestandes derart zu leiten und zu fördern, dass das vorgesteckte Wirtschaftsziel in möglichster Vollkommenheit und mit zulässiger Beschleunigung erreicht wird“ (GAYER 1898, S. 579). Die Durchforstung ist die zentrale Maßnahme zur Steuerung des Bestandeswachstums. Entsprechend wurde ihr in den einzelnen Disziplinen der forstlichen Forschung auch sehr große Aufmerksamkeit geschenkt.

Die Waldwachstumskunde betrachtet die Auswirkungen der erfolgten Maßnahmen auf das weitere Wachstum. Einige der bekanntesten Gesetzmäßigkeiten werden von EICHHORN (1902), REINEKE (1933), ASSMANN (1961) und YODA et al.(1963) beschrieben. Diese Gesetzmäßigkeiten, zusammen mit den Ergebnissen der neueren Waldwachstumforschung, zu Änderungen des Bestandeswachstums sind die Grundlage für Vorhersagen, die nicht experimentell oder durch Versuche abgedeckt werden können (vgl. PRETZSCH 2001).

Waldbaulich werden besonders die verschiedenen Konzepte der Entnahme betrachtet. Hierbei werden die Verfahren der Hoch- und Niederdurchforstung, welche auf das gesamte Kollektiv – vom stärkeren oder schwächeren Ende her – abzielen, die Auslese- und Z-Baum-Durchforstung zur Begünstigung

der Besten und die Plenterung für den Erhalt, die Ernte und die Qualitätssicherung im Plenterwald angewandt. Die verschiedenen Ansätze wurden oft kontrovers diskutiert und die Aussage von KARL GAYER: „Sie [die Durchforstung] bildet heute im Gegenteil mehr als früher das offene Turnierfeld für widerstreitende und oft weit auseinandergehende mehr oder weniger spekulative Ansichten und Bestrebungen, je nach der Stellung, welche der sich Beteiligende in der allgemeinen waldbaulichen Richtung einnimmt“ (GAYER 1898, S.581), hat sicherlich nicht an Aktualität eingebüßt. Hierzu sei beispielsweise auf die Diskussion der Z-Baumauswahl von ABETZ (1987) und SCHOBER (1990) verwiesen.

Generell lässt sich eine Hinwendung zu einzelbaumorientierten Konzepten wie der Auslese- und Z-Baumdurchforstung beobachten. Gerade in Baden-Württemberg und im Untersuchungsgebiet der Region Ostalb werden Z-Baumkonzepte schon relativ lange eingesetzt. Der ökonomischen Betrachtung von Durchforstungen soll das nachfolgende Kapitel gewidmet werden.

### **2.2.2 Bedingungen für das ökonomische Optimum**

Die Durchforstung soll die zielgerichtete optimale Verwendung der Ressourcen Boden, Licht, Nährstoffe, Arbeit und Kapital im einzelnen Waldbestand sicherstellen. Die Betrachtung geht also über die naturale Frage des optimalen Standraums der Bäume hinaus; es werden zusätzlich die aufgewendete Arbeit für die einzelnen Maßnahmen, sowie die hierfür eingesetzten oder erhaltenen Geldbeträge berücksichtigt. Um die bestmögliche Wertentwicklung eines Bestandes für einen gewinnmaximierenden Waldbesitzer zu finden, gibt es, bei Kenntnis des Baumwachstums unter verschiedenen Bedingungen und den jeweils aufzuwendenden oder erzielten Geldbeträgen für einzelne Maßnahmen, einige klassische forstliche Verfahren.

Das mit Abstand berühmteste und am meisten diskutierte Verfahren zum Vergleich forstlicher Investitionsentscheidungen ist der auf FAUSTMANN (1849) beziehungsweise KÖNIG (1813), OETZEL (1850), PRESSLER (1860) und HEYER

(1871) sowie OHLIN (1921)<sup>12</sup> zurückgehende Ansatz zur Maximierung des Bodenertragswertes. Das Verfahren wird nach O'LAUGHLIN (1990) in der amerikanischen Literatur häufig „König-Faustmann Theorem“, nach den beiden Entwicklern MARTIN FAUSTMANN und GOTTLÖB KÖNIG, genannt. In Skandinavien wird es als „Faustmann-Pressler-Ohlin Theorem“ bezeichnet – mit MAX ROBERT PRESSLER als erstem Anwender im Hinblick auf die Bestimmung der optimalen Bewirtschaftung und BERTIL OHLIN als unabhängigem Entdecker. Es wird der Wert des für alle Zeit forstlich genutzten Bodens bestimmt, welcher zu Beginn der Betrachtung mit Bäumen bepflanzt wird. Mathematisch handelt es sich um die Barwertberechnung einer ewigen periodisch nachschüssigen Rente, welche sich aus der Summe der zukünftigen Abtriebswerte und den auf den Zeitpunkt der Endnutzung aufgezinnten Erlösen, abzüglich aufgezinster Kulturkosten und des Rentenbarwertes der Verwaltungskosten ergibt.

Nach PEYRON UND MAHEUT (1999) ist die Leistung Faustmanns herausragend, weil er eine gemeinsame Lösung für die zwei Probleme des Waldwertes und der Optimierung der Waldbewirtschaftung gefunden hat. Wie ODERWALD UND DUERR (1990) festhalten, war dies zunächst nur auf eine sinnvolle Waldbewertung ausgerichtet. Die Übertragung auf forstwirtschaftliche Optimierungsprobleme ist vielmehr der Verdienst von PRESSLER (1860) bzw. PRESSLER (1869) und HEYER (1871). SAMUELSON (1976) hat demonstriert, dass der Kalkül des diskontierten Bodenwertes und nicht die interne Verzinsung die richtige Grundlage für – nicht nur forstliche – Investitionsentscheidungen ist. Im Fall der internen Verzinsung hat Geld, aus der auf ein Stück Wald begrenzten Investition, und Geld, das auf dem vollkommenen Kapitalmarkt angelegt wird, einen unterschiedlichen Zinssatz, was einen erheblichen Widerspruch darstellt. Nachfolgende Investitionen haben hierbei keine nutzungsdauerverkürzende Wirkung (vgl. MRUSEK und GÖTZE 2006, S. 30ff).

Überträgt man die klassischen Grundlagen der ökonomischen Optimierung auf das Durchforstungsproblem, ist jene Variante die Beste, welche den

---

<sup>12</sup> siehe JOHANSSON und LÖFGREN (1985)

höchsten Kapitalwert oder forstlich den höchsten Bodenreinertrag<sup>13</sup> für den Bestand erwarten lässt. Dabei kann eine Optimierung der Durchforstung erfolgen, wenn die Umtriebszeit vorab festgelegt ist oder wenn eine simultane Optimierung der Umtriebszeit stattfindet. Wiederum vorausgesetzt, dass Gewinnmaximierung unter Annahme von Sicherheit das Ziel ist; d.h., der Entscheider muss risikoneutral eingestellt sein.

Die Maximierung des Bodenertragswertes wird nun schon seit gut 150 Jahren weltweit erfolgreich angewendet (NEWMAN 2002; BRAZEE 2001). Zur Vereinfachung werden in der forstlichen Investitionsrechnung die Menge der Holzerträge, die Zinsen, Preise und Kosten sowie Boden- und Wuchsverhältnisse häufig als konstant vorausgesetzt (siehe beispielsweise FAUSTMANN 1849; OHLIN 1921 u.v.m.).

### **2.2.3 Anwendungen von Methoden aus der Unternehmensforschung**

Im Gegensatz zum skandinavischen und angelsächsischen Raum, wo betriebswirtschaftliche Untersuchungen zur optimalen Durchforstung in Verbindung mit Optimierungsverfahren bereits häufiger durchgeführt wurden, ist diese Art der Herangehensweise woanders bisher kaum angewandt. Die meisten Veröffentlichungen im deutschsprachigen Raum zu ökonomisch optimalen Durchforstungen basieren auf empirischen Daten, unter anderem aus Durchforstungsversuchen wie UTSCHIG (2002), SPELLMANN und SCHMIDT (2003), KOHNLE und VON TEUFFEL (2004), HEIN et al. (2007), um nur einige zu nennen. Diese sind aufgrund der Datenlage in der Anzahl der untersuchbaren Varianten limitiert. Fortschritte in der Entwicklung von Waldwachstumsmodellen machen jedoch einen detaillierteren Blick in die Zukunft – beispielsweise mit verschiedenen Behandlungsalternativen – möglich. So arbeiten KNOKE (1998), SANCHEZ OROIS und VILCKO (2002), KNOKE (2003b), WIPPERMANN (2004), SEO (2005), HINRICHS (2006), BEINHOFER (2008a) und BEINHOFER (2008b) teilweise oder gänzlich auf Grundlage von Wachstumssimulationen.

---

<sup>13</sup> Bodenreinertrag, oder auch Bodenertragswert, ist die auf den heutigen Zeitpunkt bezogene Größe, in Geldeinheiten, für alle Ein- und Auszahlungen während des aktuellen und aller zukünftiger Bestandesleben (siehe u.a. SPEIDEL 1972; SAGL 1995).



Die Lösung des optimalen Durchforstungs- und Umtriebszeitproblems stellt dabei ein komplexes Entscheidungsproblem dar, da es zum einen sehr viele mögliche Lösungsvarianten gibt und zum anderen vor dem Hintergrund unsicherer Umweltbedingungen gelöst werden muss (GRÜNIG und KÜHN 2005, S. 11). Weltweit gesehen, haben sich hierzu Methoden zur Lösung ausgehend von ersten Beispielen mit Marginalanalyse von CHAPELLE und NELSON (1964), über die Anwendung des Maximumprinzips von NÄSLUND (1969) weiterentwickelt. Von besonderem Interesse ist dabei die Anwendung des effektiven Verfahrens der Dynamischen Programmierung<sup>14</sup>, das für ein forstliches Beispiel bereits von AMIDON und AKIN (1968) verwendet wird und im Folgenden eine rasche Ausbreitung und Weiterentwicklung erfährt (KILKKI und VÄISÄNEN 1970; SCHREUDER 1971; BRODIE et al 1978; KAO und BRODIE 1980; PAREDES und BRODIE 1987 u.v.m. ). Dieser Prozess ist eng verbunden mit der Evolution von Wachstumsmodellen, welche die Verfeinerung und Erweiterung um verschiedene Eingangsparameter ermöglichen. Die Entwicklung geht dabei von der Integration einfacher Formeln (KILKKI und VÄISÄNEN 1970; KAO und BRODIE 1980; MOOG et al. 2001) über bestandesweise Fortschreibungen (AMIDON und AKIN 1968; BRODIE et al. 1978; RIITERS et al. 1984) hin zur Verwendung von einzelbaumbasierten Simulatoren (MARTIN und EK 1981; HAIGHT et al. 1985; ARTHAUD und KLEMPERER 1988; ARTHAUD und PELKKI 1995; PELKKI 1997 sowie PELKKI und KIRILLOVA 2004). Parallel hierzu gewinnt die Integration von Risiko und Unsicherheit an Bedeutung. Diesem wird beispielsweise von KAO (1984) durch Übergangswahrscheinlichkeiten oder durch GUNN (2003), über den Ansatz der neuro-dynamischen Programmierung, Rechnung getragen.

Grundsätzlich findet man in der Literatur zur Dynamischen Programmierung zwei Varianten, einen rückwärts rekursiven und einen vorwärts rekursiven Ansatz. Diese unterscheiden sich in dem Zeitpunkt der Maßnahme und dem Übergang in den nächsten Zustand. Bei einem rückwärts rekursiven Ansatz

---

<sup>14</sup> Auf RICHARD BELLMAN (1957) zurückgehendes Verfahren zur Lösung komplexer Optimierungsprobleme. „Dynamische Programmierung beinhaltet Rechenverfahren zur Optimierung mehrstufiger Prozesse, bei denen die Entscheidung auf jeder Stufe die Entscheidungssituation auf der nächsten Stufe beeinflusst“ WÖHE (2000, S. 171).

(siehe CHEN et al. 1980 und SCHREUDER 1971) wird der Zuwachs in der Betrachtungsperiode von der vorhergehenden Nutzung und dem entsprechend reduzierten Bestand gerechnet. Damit können optimale Behandlungen auch für suboptimale Ausgangszustände berechnet werden. Die Berücksichtigung des Bodenertragswertes erfordert jedoch einen separaten Rechengang (siehe BRODIE et al. 1978). Beim vorwärts rekursiven Ansatz (siehe u.a. PAREDES und BRODIE 1987; CHANG 1998; PELKKI und KIRILLOVA 2004) findet die Maßnahme zum Ende des Betrachtungszeitraums statt und der entsprechende Wert des Bestandes nach dem Wachstum wird um die Entnahmemenge reduziert. Dies hat nach BRODIE et al. (1978) den Vorteil, dass die Lösung gleich für eine und alle folgenden Umtriebszeiten und optimale Durchforstungsstrategien für kürzere oder längere Umtriebszeiten als die optimalen kalkulierbar sind. Dabei widersprechen die Angaben von SCHREUDER (1971) denen von BRODIE et al. (1978), CHEN et al. (1980) und PELKKI und KIRILLOVA (2004). Nach Letzteren würde es sich bei dem dieser Arbeit zugrunde liegenden Rechenweg um einen rückwärts rekursiven Ansatz handeln.

Insgesamt hat die Dynamische Programmierung eine große Ähnlichkeit mit der Netzplantechnik was bereits in den Darstellungen von AMIDON und AKIN (1968) sowie KILKKI und VÄISÄNEN (1970) deutlich wird. Auch deshalb werden Netzwerkformulierungen, bzw. graphentheoretischen Lösungsverfahren an sich, zurückgehend auf DIJKSTRA (1959), auf forstwissenschaftliche Probleme angewandt (DYKSTRA 1984; PAREDES und BRODIE 1987).

Zusätzlich zur Weiterentwicklung der effektiven Verfahren haben gerade heuristische Techniken in den letzten Jahren auch in Deutschland an Bedeutung gewonnen. Beispiele sind: der Analytische Hierarchieprozess<sup>15</sup> von ALBERT (2003) zur Untersuchung verschiedener Waldentwicklungsszenarien zum Umbau von Fichtenreinbeständen verwendet, das Verfahren der simulierten Abkühlung<sup>16</sup> zum Finden von optimalen Durchforstungen (HINRICHS 2006) und in Abwandlung das so genannte „Modified Accelerated

---

<sup>15</sup> Zurückgehend auf SAATY (1990)

<sup>16</sup> Englisch: simulated annealing (KIRKPATRICK et al. 1983)

Simulated Annealing“ SEO (2005) zur Lokalisierung von optimalen Behandlungsalternativen in Fichtenbeständen. Die Nichtlineare Programmierung wird von WIPPERMANN (2004) zur Optimierung von Durchforstungen und Umtriebszeit eingesetzt (siehe auch KAO und BRODIE 1980; VETTENRANTA und MIINA 1999; HYYTIÄINEN und TAHVONEN 2002 als Beispiele im skandinavischen Raum). SODTKE et al. (2006) nutzen Fuzzy Logik<sup>17</sup> zur Entscheidungsunterstützung. Goal Programming<sup>18</sup> (BUONGIORNO et al. 1995) und Quadratische Programmierung<sup>19</sup> (HYYTIÄINEN und TAHVONEN 2002) haben als verwendete Referenzvariante eher Versuchscharakter.

Die am häufigsten verwendete Zielgröße der Optimierung ist dabei der Bodenertrags- oder der Bestandserwartungswert (beispielsweise KAO und BRODIE 1980; SÁNCHEZ OROIS 2003; PELKKI und KIRILLOVA 2004; HYYTIÄINEN et al. 2005). Der von WIPPERMANN (2004) verwendete interne Zinssatz kann sich insofern als problematisch erweisen, als dieses Verfahren den Effekt aller weiteren nachfolgenden Rotationen außer Acht lässt (siehe SAMUELSON 1976; MRUSEK und GÖTZE 2006, S. 30ff). Eine Verlängerung der Umtriebszeit bei höheren Zinsen wie bei WIPPERMANN (2004, S. 68) dürfte beispielsweise bei der Maximierung des Bodenertragswerts nicht vorkommen.

Die angewandten Verfahren im deutschsprachigen Raum greifen dabei entweder auf heuristische Techniken (WIPPERMANN 2004; SEO 2005; HINRICHS 2006; SODTKE et al. 2006) zurück, wo ein absolut sicheres Erreichen des optimalen Zustands nicht gegeben ist, oder verwenden einfache Wachstumsprognosen (MOOG et al. 2001). Gleichzeitig handelt es sich noch um ein sehr begrenztes Variantenstudium (siehe ALBERT 2003; SANCHEZ OROIS 2003).

---

<sup>17</sup> Englisch: fuzzy logic (siehe u.a. ZADEH 1997)

<sup>18</sup> Goal programming (auf Deutsch: ~ Zielwertprogrammierung) ist ein Verfahren zur Lösung von Multikriteriellen Entscheidungsproblemen und kann als Erweiterung der linearen Programmierung gesehen werden (ZIMMERMANN und GUTSCHE 1991).

<sup>19</sup> Die Quadratische Programmierung ist ein Spezialfall der Nichtlinearen Programmierung mit einer quadratischen Zielfunktion und ggfs quadratischen Restriktionen (PHAN-HUY-HAO 1978).

Mit der hier vorliegenden Untersuchung wird eine Optimierung der Bestandesbehandlung auf ökonomischer Basis mit einem effektiven Algorithmus entwickelt, welche einen ganzen Entscheidungsbaum mit verschiedenen starken Durchforstungen in den einzelnen Perioden zugrunde legt. Die naturalen Entwicklungspfade werden dabei mit einem einzelbaumbasierten Prognoseinstrument zur Vorhersage des Baumwachstums simuliert.

## 2.3 Optimierung auf der Betriebsebene

Betrachtet man nun nicht nur die einzelnen Waldbestände, sondern einen ganzen Betrieb als „[...] planvoll organisierte Wirtschaftseinheit [...]“ WÖHE (2000, S. 2), kann man die **Struktur** des Betriebes und die **betrieblichen Ansprüche** miteinbeziehen. Dies macht die abgebildete Entscheidungssituation aus Sicht vieler Waldbesitzer realitätsnäher.

### 2.3.1 Ansätze der Forsteinrichtung

Um auf der Betriebsebene optimale Ergebnisse zu erhalten, findet in Forstbetrieben eine Planung statt<sup>20</sup>. Diese wird im deutschen Sprachraum unter dem Begriff Forsteinrichtung zusammengefasst. Die Forsteinrichtung hat seit den Anfängen der forstlichen Planungsdisziplin bis heute, im Kontext der Problemstellungen und möglichen Lösungen der jeweiligen Zeit, einen inhaltlichen Bedeutungswandel erfahren. Im Vordergrund der ältesten Definitionen (siehe HUNDESHAGEN 1826; JUDEICH 1893) steht die zielgerichtete räumlich zeitliche Ordnung des Forstbetriebes. Für WAGNER (1928) ist Forsteinrichtung „planmäßige Organisation der Forstwirtschaft“. Bei den Arbeiten von PRODAN (1960) und KRAMER (1990) spielen vor allem die Aspekte der Inventur und Massenberechnung eine wichtige Rolle. SPEIDEL (1972, S. 16) setzt den Begriff Forsteinrichtung mit „mittelfristiger Wirtschaftsplanung im Forstbetrieb“ gleich und KURTH (1994, S. 24) sieht in der Forsteinrichtung die „nachhaltige Regelung des Waldes“, wobei seiner

---

<sup>20</sup> Nach SPEIDEL (1984) ist der Aspekt der Langfristigkeit und der damit verbundene Zwang, auch die ferne Zukunft in seine Rechnungen miteinzubeziehen, eine der Besonderheiten der forstbetrieblichen Steuerung.

Meinung nach nur die natürlichen Produktivkräfte betrachtet werden. Jedoch ist auch eine Einbeziehung ökonomischer Kenngrößen in die Planung nichts Neues (siehe u.a. PRESSLER 1860; HEYER 1871; JUDEICH 1893; ABETZ 1963 oder HENNE 1973). Ein tatsächlicher Bedeutungswandel zu „einer wirtschaftlichen Planung auf biologisch-technischer Grundlage“ wie ihn SPEIDEL (1972, S. 16) festzustellen meint, hat jedoch bislang nicht stattgefunden. Nach HANEWINKEL (2001) gilt es in Zukunft, die forstliche Planung neu auszurichten, hin zu einem strategischen Managementinstrument. Er versteht darunter vor allem die stratenweise Planung und die Anwendung von Simulationsverfahren zur Entscheidungsunterstützung und Nutzungskoordination. Erste Lösungsansätze in der von SPEIDEL (1972) definierten Richtung lassen die Arbeiten von MOOG und KNOKE (2003), KNOKE und MOSANDL (2004), KNOKE und MOOG (2005), KNOKE und WEBER (2006), FELBERMEIER et al. (2007), DIRSCH und KNOKE (2007), STANG (2008) sowie STANG und KNOKE (2009) erkennen. Der starke wirtschaftliche Bezug dieser Studien belegt, dass die Forsteinrichtung inzwischen als wirtschaftliche Planung auf biologisch-technischer Grundlage als in ersten Ansätzen verwirklicht betrachtet werden kann. Allerdings steht diese Auffassung der Forsteinrichtung noch am Anfang ihrer Entwicklung in Deutschland.

### 2.3.2 Rahmenbedingungen für eine optimale Planung

Die **Ausstattungen** der Forstbetriebe mit Waldfläche, deren Güte sowie der Holzvorrat sind sehr unterschiedlich. So sind die Forstbetriebsfläche durch Zukauf oder Pacht und die Wuchskraft des Standorts durch Meliorationsmaßnahmen zwar sehr wohl zu verändern, allerdings nur durch den Einsatz zusätzlicher Ressourcen und Zeit. Bei den hier angestellten Betrachtungen sollen diese Optionen zur Vereinfachung der Problemstellung aber nicht berücksichtigt werden.

Während in einigen Wäldern und Landesteilen verhältnismäßig hohe Holzvorräte stocken, wie die Ergebnisse der Bundeswaldinventur II (BWI<sup>2</sup>) (siehe BMELV 2005) gezeigt haben, bewegen sich andere – auch unfreiwillig aufgrund von Ereignissen wie Sturm, Borkenkäfer oder finanzieller Anforderungen – auf einem sehr niedrigen Niveau (vgl. HARTEBRODT und FILLBRAND 2006). Aufgrund verschiedener Risiken ist die Verteilung der

Bestände auf die Altersklassen und Baumartenzusammensetzungen nie ganz gleichmäßig, weshalb der annähernd perfekt aufgebaute Normalwald in der Realität sehr selten anzutreffen ist. Einer genauen Feststellung der jeweiligen Ausgangssituation dienen Inventurverfahren bzw. einfache Bestandesansprachen (siehe u.a. ZÖHRER 1980; POLLEY 2001 sowie KRAMER und AKÇA 2002).

Die **Zielsetzungen** von Waldeigentümern sind oft sehr verschieden (siehe hierzu VOLZ und BIELING 1998; KOEPKE 1999; SCHAFFNER 2001; SELTER 2006 sowie SCHLÜTER und SCHRAML 2006). Dabei wird der Forstbetrieb beispielsweise als eine inflationsbeständige, relativ krisensichere und steuerprivilegierte Kapitalanlage gesehen, die trotz begrenzter Rendite als wertbeständige Anlage langfristig gehalten werden soll.

Demgegenüber bestehen für den Staatswald oft andere Bewirtschaftungsziele, wie „[...] die den standörtlichen Gegebenheiten entsprechende, nachhaltig höchstmögliche Lieferung wertvollen Holzes [...] bei gleichzeitiger Erfüllung und nachhaltiger Sicherung der dem Wald obliegenden Schutz- und Erholungsfunktionen“ MLR (1995)<sup>21</sup>.

### 2.3.3 Aktuelle Anwendungen

BETTINGER und CHUNG (2004) geben einen guten Überblick über die Entwicklung im Bereich betrieblicher Optimierungsverfahren. Besonders hervorzuheben ist hierbei der Anstieg des Einsatzes von Techniken aus dem Bereich der Mathematischen Programmierung zur forstlichen Planung. Im Weiteren sollen hier exemplarisch Anwendungen aus dem Bereich der mathematischen Optimierung vorgestellt werden, da mit diesen Methoden effektive Lösungsmöglichkeiten für das Zuordnungsproblem der Forsteinrichtung bestehen.

Gute Einführungen der Methoden der betrieblichen Optimierung sind in den Lehrbüchern von RIDEOUT und HESSELN (2001), DAVIS et al. (2001) sowie BUONGIORNO und GILLESS (2001) enthalten. Erste deutschsprachige Beschreibungen von Anwendungen in der Forstwirtschaft finden sich bei

---

<sup>21</sup> LWaldG für Baden-Württemberg § 45 Abs. 1

ROSE (1992), der Lineare Programmierung auf strategische Planungsprobleme anwendet. Einen Einsatz zur Ernteplanung in Frankreich mit Linearer Programmierung findet man bei PEYRON (1993) sowie BUONGIORNO et al. (1995) für ein Planungsproblem in ungleichaltrigen Wäldern.

Die wichtigsten Trends sind dabei zum einen die Berücksichtigung verschiedener Zielsetzungen (siehe STEUER und SCHULER 1979; KORHONEN 1998; BEVERS und HOF 1999 oder BORGES et al. 2002) sowie die Berücksichtigung von Flächenrestriktionen im Zusammenhang mit der GIS-gestützten Kartenerstellung für die Planungsobjekte zum anderen (ÖHMAN und ERIKSSON 2001 sowie CHEN 2003). Trotz zahlreicher anderer heuristischer und exakter Verfahren ist nach wie vor die klassische Lineare Programmierung und „Integer Programming“ für ganzzahlige Probleme bzw. „Branch and Bound“<sup>22</sup> für forstbetriebsweise Planungen am weitesten verbreitet (siehe MCDILL und BRAZE 2001; CROWE et al. 2003; TIERNAN und NIEUWENHUIS 2005 sowie GUSTAFSON et al. 2006).

Eine Szenarienentwicklung für Planungen im deutschsprachigen Raum auf Basis von Wachstumsmodellen findet man unter anderem in DENSBORN (1999), OBERGFÖLL (2000) und LAPACEK (2003). Allerdings fehlt hier noch der Bezug zu tatsächlichen ökonomischen Optimierungen. Erste konkrete ökonomische Planungsbeispiele finden sich bei KOEPKE (1999), KNOKE et al. (2001), KNOKE (2003b), CHEN (2003), KNOKE et al. (2005), ESSER (2005) bzw. DIRSCH und KNOKE (2007) sowie KÜBLBÖCK (2008).

In diesen Studien können hierdurch Potentiale für die praktische forstbetriebliche Planung aufgezeigt werden (siehe FELBERMEIER et al. 2007). Hierbei sind für die Forstbetriebe nach eigenen Erfahrungen auch die aufgezeigten Spielräume und langfristigen Auswirkungen von verschiedenen Maßnahmen als Entscheidungsgrundlage von großer Bedeutung.

Bisher haben sich die Anwendungen der Linearen Planungsrechnung in Deutschland für betriebliche Zielsetzungen auf ein festes Schema der

---

<sup>22</sup> Branch and Bound (dt.: Verzweigung und Schranke) ist ein Verfahren aus dem Bereich der mathematischen Programmierung um ganzzahlige Optimierungsprobleme zu lösen (vgl. MACMILLAN 1975).

Bestandesbehandlung beschränkt (siehe ROSE 1992; KOEPKE 1999; MOOG und KNOKE 2003<sup>23</sup>; KNOKE und MOSANDL 2004<sup>24</sup>; KNOKE und MOOG 2005<sup>21</sup>; KNOKE und WEBER 2006<sup>25</sup> sowie DIRSCH und KNOKE 2007<sup>22</sup>). Es kann lediglich zwischen den zwei Möglichkeiten Durchforsten oder Ernten unterschieden werden. Dies gilt umso mehr für Veröffentlichungen im internationalen Umfeld, da hier generell ein weniger starker Fokus auf spezifischen Durchforstungen liegt.

Wichtige Herausforderungen sind in erster Linie die Entwicklung leistungsfähigerer Schnittstellen zu Waldwachstumsprogrammen als Grundlage für die Planung, zweitens nach MARTELL et al. (1998) das Berücksichtigen von Risiken und Unsicherheiten sowie drittens Verbindungen zu GIS Programmen.

Darüber hinaus gibt es Hinweise von CHEN (2003), dass eine forstbetriebliche Planung mit bestimmten Restriktionen auf Betriebsebene zu anderen Durchforstungsstrategien führt, als die rein bestandesbezogene Optimierung. Die tatsächlichen Auswirkungen werden von CHEN (2003) nicht weiter konkretisiert. Diese Tatsache ist jedoch umso bemerkenswerter, als die meisten Untersuchungen nur von der Richtigkeit der Annahmen auf einer Ebene ausgehen. Abweichungen der betrieblichen Optima von bestandesweisen Optima können beispielsweise dann auftreten, wenn bei einer Mengenrestriktion bestimmte Deckungsbeiträge pro Hektar zwar gleich, jedoch mit einem unterschiedlichen Holzanfall verbunden sind. So werden in diesem Fall nicht nur hohe Deckungsbeiträge, sondern hohe Deckungsbeiträge mit vergleichsweise niedrigen Holzanfällen bevorzugt. Im nachfolgenden Kapitel wird zur Untersuchung dieser Zusammenhänge eine Verknüpfung der Handlungsoptionen auf der Bestandesebene mit der Betriebsebene vorgestellt.

---

<sup>23</sup> Zur Bewertung von Nutzungseinschränkungen

<sup>24</sup> Zur Optimierung des Holzvorrats

<sup>25</sup> Zur Bewertung von Kohlenstoffspeicherung



## 2.4 Vom Bestand zum Betrieb

PERTZ (1983) stellt fest, dass bisher noch „keine Wirtschaftstheorie in Sicht [ist,] die nicht nur von ihren Begriffen und Methoden, sondern auch von ihrer Denkweise dem Wald gerecht wird“ (PERTZ 1983, S. 151). Er vermisst in der forstlichen Investitionstheorie die Einbeziehung externer Effekte und Skalenerträge. Die externen Effekte<sup>26</sup> und deren mögliche Inwertsetzung sind jedoch Ergebnisse eines politischen Aushandlungsprozesses (u.a. THOMMEN und ACHLEITNER 2004; WEISE et al 2005). Skalenerträge treten dann auf, wenn ein Forstbetrieb beispielsweise aufgrund seiner Größe Arbeiten rationalisieren kann und dadurch Kostenvorteile gegenüber einem kleineren Betrieb hat. Gleiches gilt auch für die Erlöse. So sind durch Bündelung von Mengen im Absatz höhere Preise zu erzielen (siehe beispielsweise SLOMAN 2000; WEISE et al 2005). Die Möglichkeit der Betriebsvergrößerung, um diesen Effekt ausnutzen zu können, ist für Forstbetriebe nur begrenzt vorhanden, wobei es neben Zukauf oder der in Deutschland sehr seltenen Pacht, durchaus auch die Möglichkeit gibt, das Forstpersonal durch Bewirtschaftungsverträge besser auszulasten. Dies spielt bisher aber eine eher untergeordnete Rolle.

Es stellt sich dennoch die Frage, ob der Betrieb einfach als Summe seiner Waldbestände aufgefasst werden darf, und dabei die auf der Bestandesebene geltenden Optimalitätskriterien Geltung haben, oder ob es aus gesamtbetrieblicher Sicht Einschränkungen gibt, welche eine isolierte Betrachtung der Bestände in Frage stellen. Hierbei war die Struktur des Forstbetriebs, d.h. dessen Aufteilung in Bestände verschiedener Baumarten und Altersklassen, bereits Gegenstand vieler Untersuchungen (PAULSEN 1795; HUNDESHAGEN 1826; GEHRHARDT 1923; JUDEICH 1923 u.a.). Entgegen den erwähnten Synergie- und Skaleneffekten gibt es aus betrieblicher Sicht noch eine andere Kategorie, welche den Übergang vom Bestand zum Betrieb nicht nahtlos möglich macht. Zu dieser zählen selbstauferlegte oder von außen wirkende Einschränkungen des betrieblichen Handelns. Dies

---

<sup>26</sup> Beispielsweise die Filterung von Abgasen, sauberes Trinkwasser oder die Bereitstellung von Erholungsraum.

können zum Beispiel Einschränkungen in Bezug auf mindestens zu erzielende Einnahmen sein, aber auch naturale Grenzen des Hiebssatzes oder des Vorrats sind denkbar und haben eine gewisse Tradition in der Praxis.

Zur Einordnung des Sachverhalts hilft ein Blick auf die allgemeine Investitionstheorie. Die Planung in einem Forstbetrieb kann dabei wie eine mehrperiodige Programmentscheidung voneinander abhängiger Investitionen behandelt werden (KRUSCHWITZ 2007). Die Holznutzung ist in diesem Kontext als Finanzierung zu sehen, da zum Zeitpunkt, in dem sie abgeschlossen wurde, eine Einzahlung stattfindet und sich während des weiteren Wachstums des Waldbestands Aus- oder Einzahlungen anschließen, je nachdem ob sich infolge der Wert des Bestands vermindert oder erhöht. Bestandesbegründung und Pflege sind Investitionen. Es gilt den optimalen Weg zwischen der möglichen Auswahl an Investitionen und Finanzierungen zu finden, welche nicht getrennt voneinander gesehen werden können, weswegen von einer simultanen Planung Gebrauch gemacht werden sollte.

Die Zielsetzung von Investoren ist entweder bei gegebenem Einkommensstrom das Vermögen am Ende der Planungsperiode zu maximieren – im Forstbereich eher üblich – oder bei einem fixen Vermögen am Ende der Planungsperiode die laufenden Auszahlungen zu maximieren (HAX 1993; KRUSCHWITZ 2007). Letzteres wäre zum Beispiel in Stiftungswäldern denkbar, die, ohne an Wert zu verlieren, möglichst hohe Auszahlungen bereitstellen sollen.

Wie HULTKRANTZ (1991) zeigt, unterscheiden sich die Umtriebszeiten eines Normalwaldmodells mit einer regelmäßigen Hiebssatzgrenze von denen im, mit optimalen Umtriebszeiten nach Faustmann bewirtschafteten, schlagweisen Hochwald, da ein Aufschieben oder Vorziehen der Ernte um den Hiebssatz zu erfüllen Kosten verursacht, wenn die Struktur nicht ausgeglichen ist. Diese Kosten schlagen sich – für sein Beispiel – auch in einer niedrigeren Umtriebszeit des Normalwaldmodells gegenüber dem nach Faustmann bewirtschafteten schlagweisen Hochwald nieder. Zu dem gleichen Ergebnis kommen auch MRUSEK und GÖTZE (2006) bei ihrem Vergleich einer Bewirtschaftung nach Faustmann mit einem betrieblich auf Nachhaltigkeit zielenden Ansatz, der unter Schaffung einer Altersklassenstruktur realisiert wird.

Noch deutlicher auf die Altersklassenstruktur gehen JOHANSSON und LÖFGREN (1985) ein. Sie setzen Teilbarkeit des Forstbetriebs in seine Bestände voraus und halten in ihrem Folgesatz 6.1 fest, dass die optimale Behandlung eines Bestandes in einem linearen Forstbetrieb nicht von der Größe und Ausstattung desselben abhängt (JOHANSSON und LÖFGREN 1985, S. 121). Hierbei wird ein Forstbetrieb nach ihrer Definition als „linear“ bezeichnet, wenn die zu maximierende Ertragsfunktion und die Nebenbedingungen linear sind<sup>27</sup>. Der nichtlineare Forstbetrieb wird noch durch konkave Kostenfunktionen (abnehmende Kosten bei älteren Beständen) ergänzt. JOHANSSON und LÖFGREN (1985) halten fest, dass alle aufgestellten Folgesätze gültig bleiben, wenn weitere Restriktionen zur Zusammensetzung des Waldes, wie Nutzungsfläche und –menge, hinzugefügt werden. Einzige Ausnahme stellen bindende Einkommensrestriktionen dar, die die Angebotskurve nicht mehr zunehmen, sondern konvex abnehmen lassen.

Entgegen den Annahmen von JOHANSSON und LÖFGREN (1985) sind aber gerade größere Forstbetriebe auf regelmäßige Einnahmen angewiesen. Ein aussetzender Betrieb, verbunden mit einer Sparkassenfunktion, d.h. Ernte bei Geldbedarf, ist vor allem in kleineren Privatwäldern zu finden. Ein indirekter Hinweis auf diesen Umstand könnte das sehr marginale Vorkommen von „bäuerlichen“<sup>28</sup> Plenterwäldern sein, denn von der komplexeren Bewirtschaftung verglichen mit Hochwald einmal abgesehen, gewährleisten gerade diese Plenterwälder ein regelmäßiges Einkommen. WIKSTRÖM (2000) findet mit „Tabu Search“<sup>29</sup>, einem Zinssatz von 3% und einem einzelbaumbasierten Wachstumsmodell für Fichte in Schweden 10% niedrigere Bodenertragswerte für die dauerhaft bestockte Plenterwaldbewirtschaftung<sup>30</sup> im Vergleich zur Bewirtschaftung als Hochwald. Die

---

<sup>27</sup> Diese Voraussetzungen werden auch unterstellt, um das Problem mit Linearer Programmierung lösen zu können.

<sup>28</sup> „Bäuerlich“ steht in diesem Zusammenhang für die verbreitete Struktur in landwirtschaftlichen Betrieben, wo der Wald nur als ein Teil des Gesamteinkommens zu sehen ist.

<sup>29</sup> Dt.: Tabu Suche – ein heuristisches Verfahren zur Lösung von komplexen Problemen.

<sup>30</sup> Die Übersetzung von „even-aged management“ = Hochwaldbewirtschaftung und „uneven-aged management“ = Plenterwaldbewirtschaftung ist nicht ganz treffend, die Autoren wollen

Zuwächse lagen bei der Hochwaldbetrachtung etwa doppelt so hoch wie bei der Dauerwaldvariante. Allerdings nimmt die Vorteilhaftigkeit der Hochwaldbewirtschaftung mit steigenden Zinssätzen ab (siehe CHANG 1981).

Darüber hinaus gibt es für einen Forstbetrieb zum Beispiel auf der naturalen Seite eine Hiebssatz- oder Vorratsbeschränkung, wie häufig im Staatswald<sup>31</sup>, genauso wie eine Einschränkung durch vorhandene Arbeitskapazitäten. Im Großprivatwald scheint der gewichtigste Faktor jedoch die Erzielung eines regelmäßigen Grundeinkommens zu sein.

Die Folgen von Ernterestriktionen sind in HEAPS und NEHER (1979) ausführlich beschrieben. Sie finden über Ableitung aus der Faustmannformel einen Hinweis auf die Konvergenz der optimalen Ernte mit der optimalen Umtriebszeitfunktion unabhängig von der ursprünglichen Altersverteilung der Bäume. Die Frage nach der Existenz eines Gleichgewichtszustands stellt HEAPS (1984) noch einmal eingehender durch Verschiebung der optimalen Erntestrategie, deren Ergebnisse sich aber asymptotisch immer wieder dem Gleichgewichtszustand eines mit Faustmannschen Umtriebszeiten aufgebauten Normalwaldes nähert. Allerdings sieht HEAPS eine tatsächliche numerische Lösung seiner analytischen Ergebnisse als sehr schwierig an, da der Lösungsraum der zulässigen Erntemengen nicht deutlich abzugrenzen ist. HULTKRANTZ (1991) beendet seinen Artikel ebenfalls mit der Annahme eines Gleichgewichtszustandes auf lange Sicht. MITRA UND WAN (1985) leiten einen solchen optimalen Gleichgewichtszustand, das „Optimal Stationary Programme“, für lineare und nicht lineare Nutzenfunktionen ab.

Den gut nachvollziehbaren Beweis, dass tatsächlich die Faustmannsche Umtriebszeitlösung für normal aufgebaute Wälder bei einer Gewinnmaximierungsabsicht des Waldbesitzers die Richtige ist, erbringen VIITALA und TAHVONEN (2004) bzw. TAHVONEN und VIITALA (2006). Ebenso stellen SALO und TAHVONEN (2002) die vorher nur angenommene langfristige Annäherung an einen Optimalzustand unabhängig von der

---

hiermit vielmehr die schlagweise gegenüber dauerhaft bestockten Bewirtschaftungsformen hervorheben.

<sup>31</sup> „Es wird nicht mehr eingeschlagen als nachwächst“ BAYSF (2007, S. 23).

Ausgangsverteilung der Altersklassen und SALO und TAHVONEN (2003) mithilfe einer nichtlinearen, abnehmenden Nutzenfunktion fest. Diese Annäherung an einen mit optimaler Umtriebszeit nach FAUSTMANN (1849) ( $U_{\text{Faustmann}}$ ) normal aufgebauten Betrieb hängt jedoch von der Zinsforderung und der betrachteten Periodenlänge ab. Ohne Einsatz von Zinsen findet diese Annäherung kaum statt; erst ab moderaten Zinsforderungen ist ein Umbau der Altersklassenverteilung zu beobachten. Außerdem verschwinden diese gleichmäßigen Zyklen, wenn die Periodenlänge gegen Null geht. Eine solche Periodenlänge könnte aufgrund saisonaler Schwankungen oder aufgrund eingeschränkter Arbeitskapazitäten eines Försters pro Flächeneinheit zustande kommen.

Durch den normalen Wald werden – einigermaßen konstante Holzpreise vorausgesetzt – gleichmäßige Auszahlungsbeträge gewährleistet, was in besonderem Maße die Liquidität sichert. Unter Liquidität wird hier nicht nur die Zahlungsfähigkeit im engeren Sinne, sondern auch die Liquidierbarkeit der Aktiva oder generell die mögliche Entnahme flüssiger Mittel<sup>32</sup> durch die Eigentümer verstanden. So gibt es beispielsweise nach BERGEN et al. (1988) und BORCHERT (2000) Hinweise, dass „Forstbetriebe eher nach Gesichtspunkten der Liquidität gesteuert werden“ (BORCHERT 2000, S. 8). Es kann also sein, dass die Annahme eines vollkommenen Kapitalmarktes, also eines Marktes auf welchem zu dem gleichen Zinssatz unbegrenzt Geld aufgenommen und wiederangelegt werden kann, nicht geeignet ist. Um diesem Aspekt Rechnung zu tragen, können entweder tatsächlich Zinssätze variiert werden oder es werden, wie in der Planung üblich, bestimmte Nebenbedingungen gefordert.

Der Wald oder respektive der Forstbetrieb ist damit nicht einfach nur als die arithmetische Summe seiner Bestände aufzufassen. Die Realität ist aufgrund der Anforderungen des Eigentümers beispielsweise bezüglich eines gleich bleibenden Hiebssatzes, einer gleichmäßigen Entnahme liquider Mittel oder eines Zinssatzes komplizierter.

---

<sup>32</sup> Nach SPEIDEL (1984) ist eine besonders hohe gebundene Eigenkapitalrate für Forstbetriebe charakteristisch.

## 2.5 Hypothesen

Aus den eingangs geschilderten Zusammenhängen zu bestandesweiser Optimierung von Durchforstungen, einer Verknüpfung mit der Planung auf Betriebsebene und den hierfür charakteristischen Anforderungen lassen sich zahlreiche Forschungsfragen ableiten. Es handelt sich bei den betrachteten Fragen um alltägliche Probleme forstwirtschaftlichen Handelns und dennoch sind die Hintergründe komplexer als es auf den ersten Blick scheint. In dieser Arbeit sollen nun folgende Hypothesen für die Bestandesbehandlung, die betriebliche Optimierung und allgemein die Anwendung von Optimierungsverfahren für forstbetriebliche Planungen, geprüft werden:

1. *„Durch die Anwendung von Optimierungsverfahren auf die Bestandesbehandlung lässt sich, verglichen mit existierenden Durchforstungsschemata, keine Steigerung der Zielfunktion<sup>33</sup> erzielen.“*

2. *„Die Hinzunahme der betrieblichen Ausstattung und betrieblicher Anforderungen ändern die bestandesweise optimale Durchforstungs- und Endnutzungsstrategie nicht.“*

Die erste Hypothese hebt auf die zu prüfende Vorteilhaftigkeit der Optimierung an sich ab. Die zweite Hypothese zielt auf die Existenz möglicher Nebenbedingungen für Forstbetriebe ab, deren Stärke und Wirkung so groß sein könnte, dass die aus der isolierten Betrachtung der Bestände abgeleiteten Empfehlungen für den Gesamtbetrieb nicht mehr gültig sind.

Darüber hinaus stellt sich auch die grundsätzliche Frage nach dem Gesamtnutzen, welcher durch den Einsatz von Optimierungsmethoden bei der Forstbetriebsplanung für einen Forstbetrieb erzielt werden kann.

---

<sup>33</sup> Die Zielfunktion ist hierbei die diskontierte Summe der Erträge, des Restwertes und des Bodenertragswertes.

---

3. *„Der Einsatz von dynamischen Optimierungsmethoden in der forstlichen Produktionsplanung führt zu keinem wesentlich höheren Gesamtwohlstand als die Bewirtschaftung nach der herkömmlichen Betriebsplanung.“*

Es ist denkbar, dass Forstbetriebe aufgrund ihrer spezifischen Restriktionen tatsächlich schon intuitiv im optimalen Bereich planen und wirtschaften.

Die drei Hypothesen sollen mit Hilfe von Betriebsdaten und Simulationsexperimenten in den nachfolgenden Kapiteln untersucht werden.

### 3 Material und Methoden

Im folgenden Kapitel sollen die einzelnen Datengrundlagen für die Optimierung vorgestellt und die Optimierungsverfahren erklärt werden.

#### 3.1 Naturaldaten

Es folgt eine Beschreibung des Untersuchungsgebiets „Ostalb“ und der vorhandenen Daten zur naturalen Ausstattung dieser Region.

Die „Ostalb“ wurde aufgrund ihres Waldanteils von 50% und der gut strukturierten Forst- und Holzwirtschaft ausgewählt. Das Projektgebiet umfasst den gesamten Landkreis Heidenheim und weite Teile des Landkreises Aalen. Die Abgrenzung erfolgte unter Berücksichtigung der standörtlichen Verhältnisse, weshalb die landläufig als Ostalb bezeichnete Region nicht gänzlich enthalten ist.

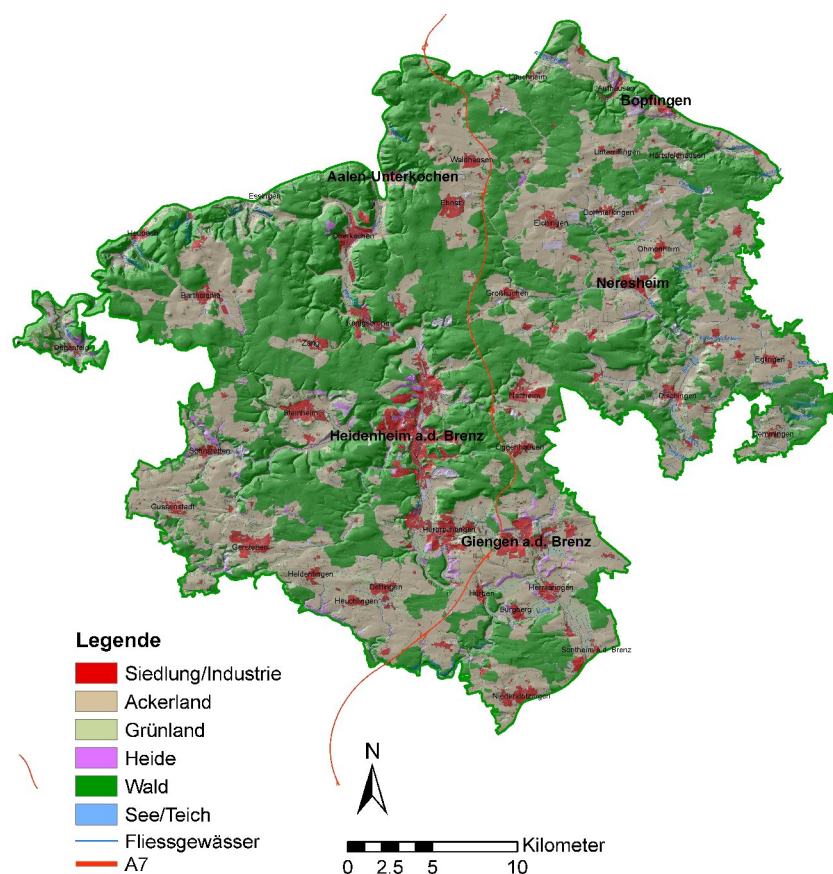


Abbildung 3: Übersichtskarte zum Projektgebiet



Der Keuperanstieg und das Ries wurden aus dem Untersuchungsgebiet ausgeklammert. Die geologischen Voraussetzungen sind deshalb einheitlich auf den Weißen Jura einzugrenzen. Teilweise kommen im Osten und Südosten Überlagerungen mit Bunter Breccie des Rieskraters vor.

Die standörtlichen Voraussetzungen in der Region mit vorherrschenden Braunerden und Böden der Rendzina-Terra Fusca Entwicklungsreihe, sowie auf den Hochflächen teilweise Überlagerung mit Feuersteinschutt sind für baden-württembergische Verhältnisse als durchschnittlich zu bezeichnen.

Von der Schwäbischen Alb unterscheidet sich die Ostalb vor allem in klimatischer Hinsicht. Die Jahresmitteltemperaturen liegen bei 7,5 °C (SCHLENKER und MÜLLER 1973), nach Angaben von GAUER und ALDINGER (2005) zwischen 6,5-7,6 °C, und der mittlere Niederschlag beträgt 1077 mm, wovon 487 mm auf die 151 Tage dauernde Vegetationsperiode entfallen. Damit ist die Region Ostalb etwas niederschlagsärmer, während die Temperatur mit dem Mittel für die Schwäbische Alb übereinstimmt.

Das Projektgebiet liegt im Wuchsgebiet „Mittlere Ostalb“ (Nummer 08.06.02). Die potentielle natürliche Vegetation sind Buchenwälder der Gesellschaft Hordelymo-Fagetum (Waldgersten-Buchenwald), auf den stärker basen- bzw. kalkreichen Standorten und flachgründigen Steilhängen handelt es sich um das Carici-Fagetum (Seggen- oder Orchideen-Buchenwald) und auf den feuersteinüberlagerten basenarmen Standorten das Luzulo-Fagetum (Hainsimsen-Buchenwald) sowie in einigen Bereichen des standörtlichen Mittelbereichs um das Galio odorati-Fagetum (Waldmeister-Buchenwald) (nach SCHLENKER und MÜLLER 1973; VILLINGER 1979; GAUER und ALDINGER 2005; FISCHER 1995 sowie Auswertungen der BWI<sup>2</sup> Daten).

Eine Auswertung der BWI<sup>2</sup> Daten macht eine genauere Beschreibung der naturalen Ausstattung der Region möglich. Auf jeweils 40% der Fläche sind Fichte und Buche die vorherrschenden Baumarten, gefolgt von der zusammengefassten Baumartengruppe „Anderes Laubholz Höherer Lebensdauer“ – ALH<sup>34</sup> mit gut 10%, Eiche und „Anderes Laubholz

---

<sup>34</sup> Hainbuche, Esche, Bergahorn, Spitzahorn, Feldahorn, Linde, Ulme, Kirsche, Robinie, Kastanie, Elsbeere

niedrigerer Lebensdauer“ – ALN<sup>35</sup>, sowie den anderen Nadelhölzern mit abnehmenden Anteilen (Abbildung 4).

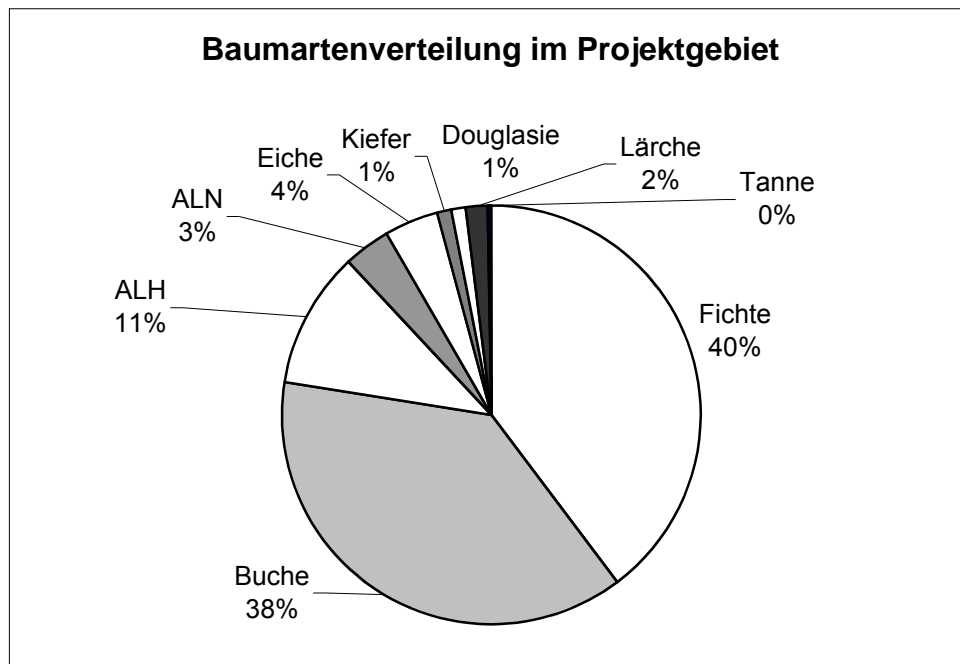


Abbildung 4: Anteile der Hauptbaumartengruppen

Ein Blick auf die Vorräte (vgl. Abbildung 5) in der Region Ostalb zeigt, dass diese zumeist niedriger sind als im Durchschnitt Süddeutschlands, aber über alle Baumarten hinweg in etwa dem bundesdeutschen Durchschnitt entsprechen. Auffällig sind die relativ geringen Fichtenvorräte. Die Zuwächse fallen über alle Baumarten hinweg deutlich geringer aus als der Bundesdurchschnitt (Abbildung 6). Die Unterschiede sind auch hier bei Fichte, Tanne, Lärche und Douglasie besonders hoch.

<sup>35</sup> Birke, Erle, Pappel, Balsampappel, Weide, Vogelbeere und sonstige Laubbäume

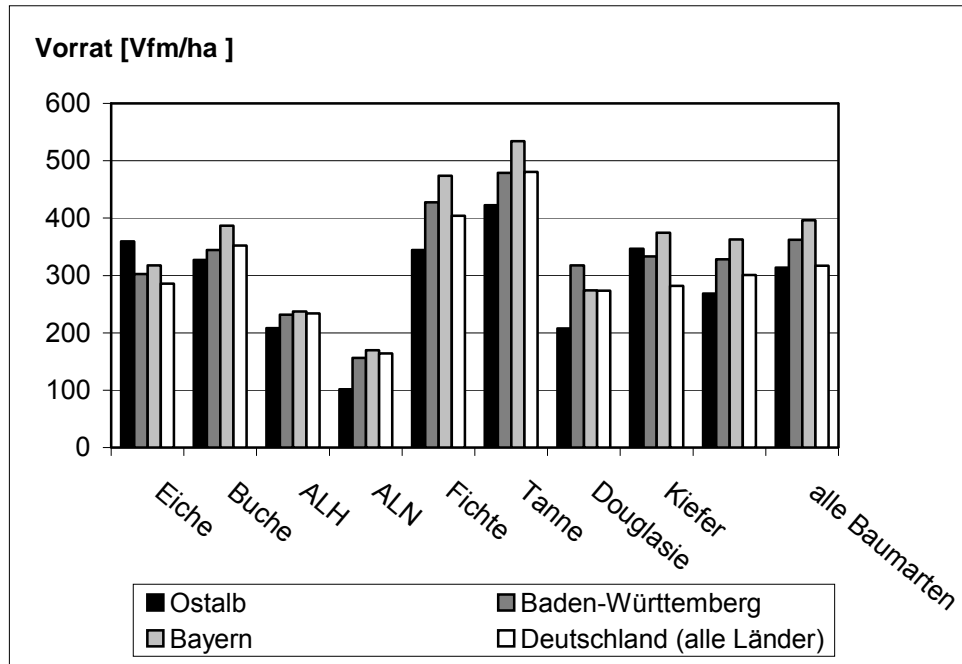


Abbildung 5: Vorrat im Untersuchungsgebiet nach Ergebnissen der BWI<sup>2</sup> im Vergleich zu anderen Regionen

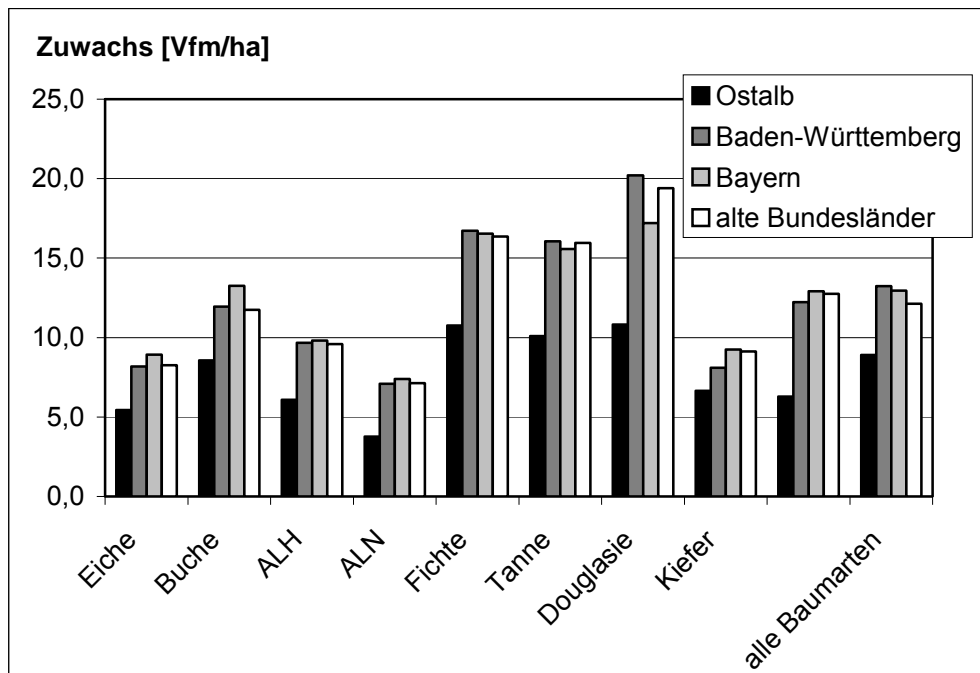


Abbildung 6: Zuwachs im Untersuchungsgebiet nach BWI<sup>2</sup> Ergebnissen

Die Altersklassenverteilung (Abbildung 7) erklärt die niedrigeren Vorräte und Zuwächse. Hier dominieren die beiden ersten Alterklassen mit durchschnittlich 19% bzw. 17% der Gesamtfläche. Allein für die Baumart Fichte entfallen knapp 50% ihrer Gesamtfläche auf diese beiden Alterklassen.

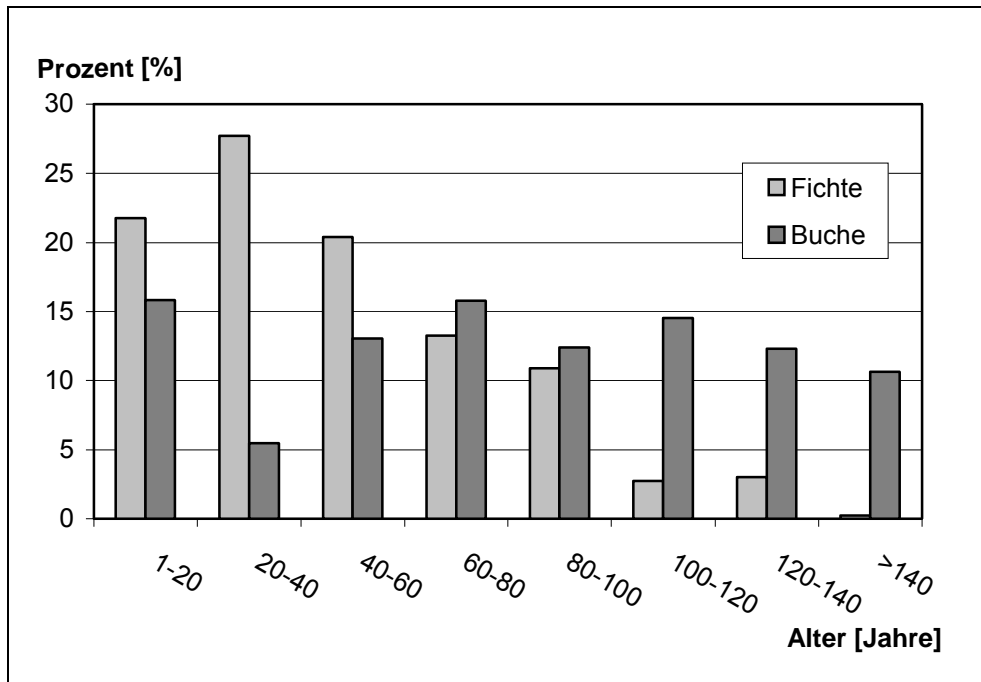


Abbildung 7: Flächenprozent der Altersklassen für Fichte und Buche.

Auf der Ostalb steht der Privatwald im Vordergrund, der knapp die Hälfte der Fläche einnimmt (Abbildung 8). Im Unterschied zu vielen anderen Regionen überwiegt der Großprivatwald (Abbildung 9). Für die Waldbewirtschaftung sind die betrieblichen Strukturen im Projektgebiet deshalb vergleichsweise günstig. Den zweitgrößten Flächenanteil mit einem guten Drittel nimmt der Staatswald des Landes Baden-Württemberg ein, gefolgt von den Kommunen mit einem Fünftel der Fläche. Bundeswald und Wald anderer Besitzarten sind in der Region vernachlässigbar.

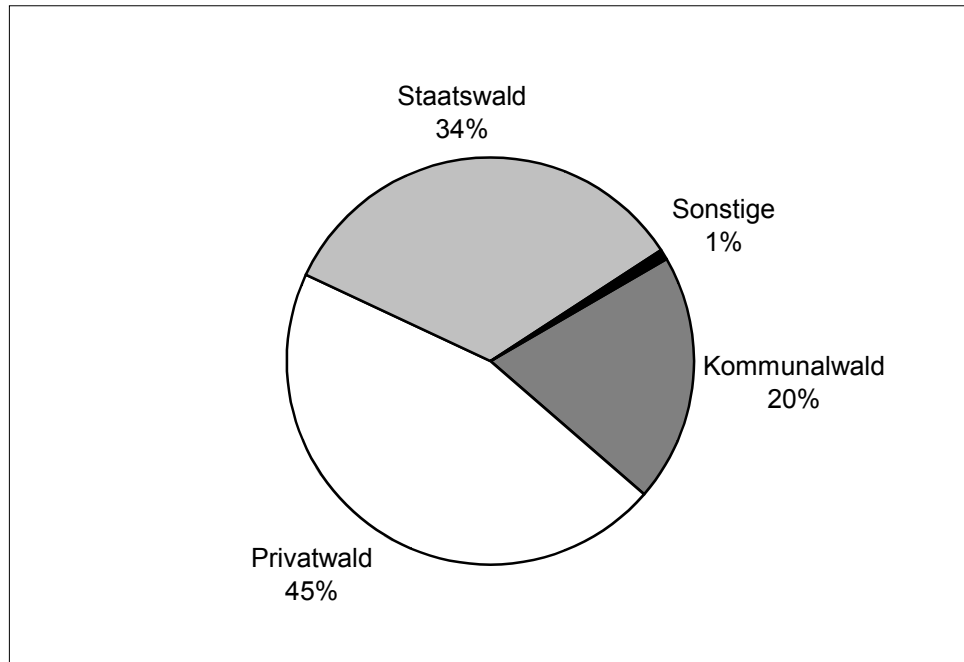


Abbildung 8: Besitzstruktur in der Region

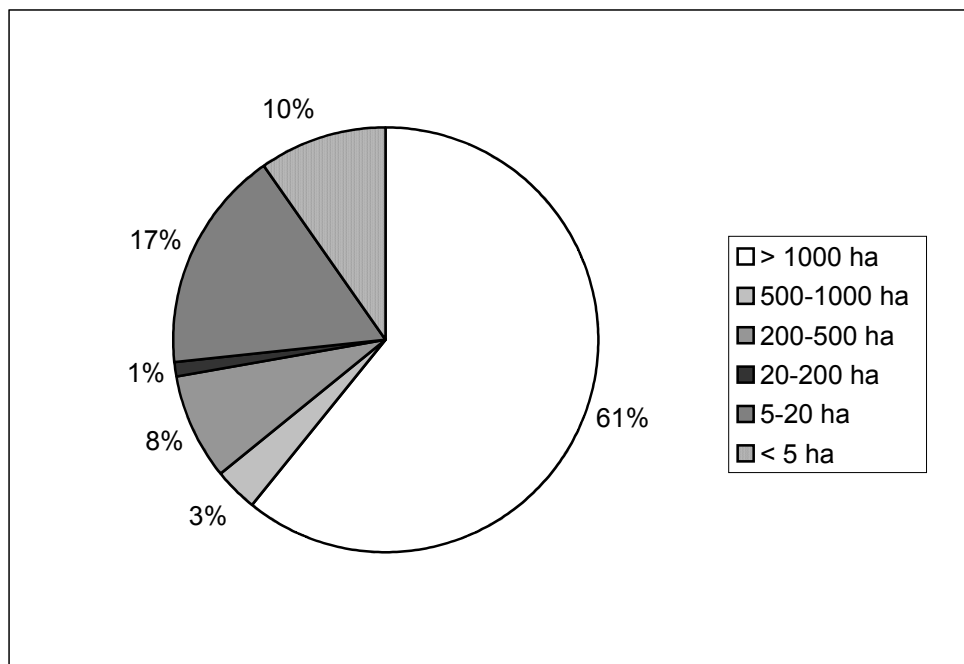


Abbildung 9: Größenklassenverteilung im Privatwald nach Besitzflächen

### 3.2 Modellbestandsbildung

Zur waldwachstumskundlichen Fortschreibung und vor allem für die spätere ökonomische Optimierung ist es nötig, die Inventurpunkte zu größeren Einheiten – den Modellbeständen – zusammenzufassen. Hier wurde der Weg einer nachträglichen Zuordnung oder „Post-Stratifizierung“ (vgl. BITTER

und MERREM 1998) gegangen. Für das Planungsgebiet mit rund 52.800 ha Waldfläche standen 486 Probepunkte<sup>36</sup> der BWI<sup>2</sup> zur Verfügung. Hiervon sind 473 Punkte so mit Daten hinterlegt, dass sie für eine Auswertung zur weiteren waldwachstumskundlichen Prognose in Frage kommen. Bei den 13 fehlenden Punkten handelt es sich um vorübergehend nicht bestockte Flächen. Des Weiteren gibt es 11.550 Probepunkte aus der betriebsweisen Stichprobeninventur im Staatswald und teilweise Stichprobeninventurdaten sowie Forsteinrichtungsoperare nach bestandesweiser Taxation im Privatwald.

Der Bestandestyp oder das Stratum (lat. Schicht) fasst Inventurpunkte oder Bestände zusammen, welche in einem oder mehreren Merkmalen, wie beispielsweise Baumarten, Alter, BHD, Höhe, Bonität oder Standort, übereinstimmen (siehe DUSCHL 2001, S. 31 oder MARTELL et al. 1998, S. 4). Der Modellbestand ist das Ergebnis der Zuordnung, welches zur waldwachstumskundlichen Fortschreibung verwendet wird.

Zur Stratifizierung und Modellbestandsbildung wurden für diese Arbeit die vorliegenden 473 BWI<sup>2</sup> Punkte nach den Kriterien Baumartenanteile, Bonität und Alter den Modellbeständen zugeordnet. Das Ausweisungsschema zur Bildung von Baumartenstraten und zusätzlichen Unterscheidung in Bonitäten sieht wie folgt aus (Abbildung 10):

---

<sup>36</sup> Die Probepunkte liegen hierbei jeweils auf den Traktecken des quadratischen Inventurtrakts mit 150 m Seitenlänge (siehe BMVEL 2001, S. 13).

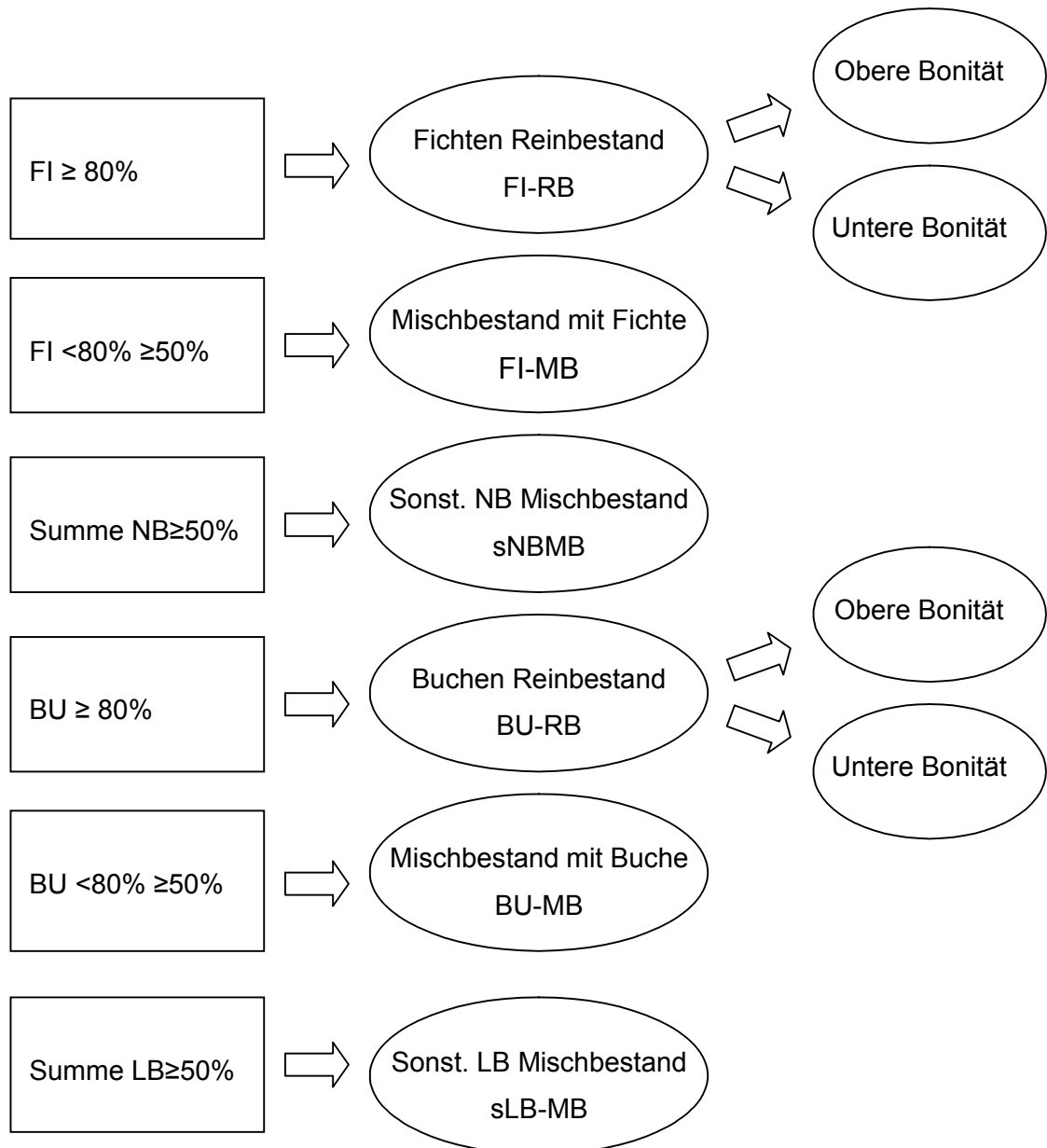


Abbildung 10: Zuordnungsschema nach Baumarten und Bonitäten

Hierbei sind die Baumartenanteile dem Zuordnungsschema der BWI<sup>2</sup> der Landesinventuranweisung für Baden-Württemberg (ANONYMUS 2001) entnommen.

Für die Unterteilung in untere und obere Bonität wurde aus allen vorhandenen Alters- und Höhenangaben, d.h. sowohl Daten der BWI<sup>2</sup> als auch den Betriebsinventurdaten, für die Baumarten Buche und Fichte eine Regressionskurve berechnet. Diese Kurve wurde als Grenze zwischen einer oberen und einer unteren Bonität verwendet. Alle Bestände, deren Höhenwachstum unter der Kurve lag, wurden der unteren Bonität zugerechnet und alle Bestände mit einem Höhenwachstum auf oder über der

Kurve, der oberen Bonität. Hierbei sind die Zuordnungskriterien das mittlere Alter und die mittlere Höhe aller Bäume des Hauptbestandes am Inventurpunkt.

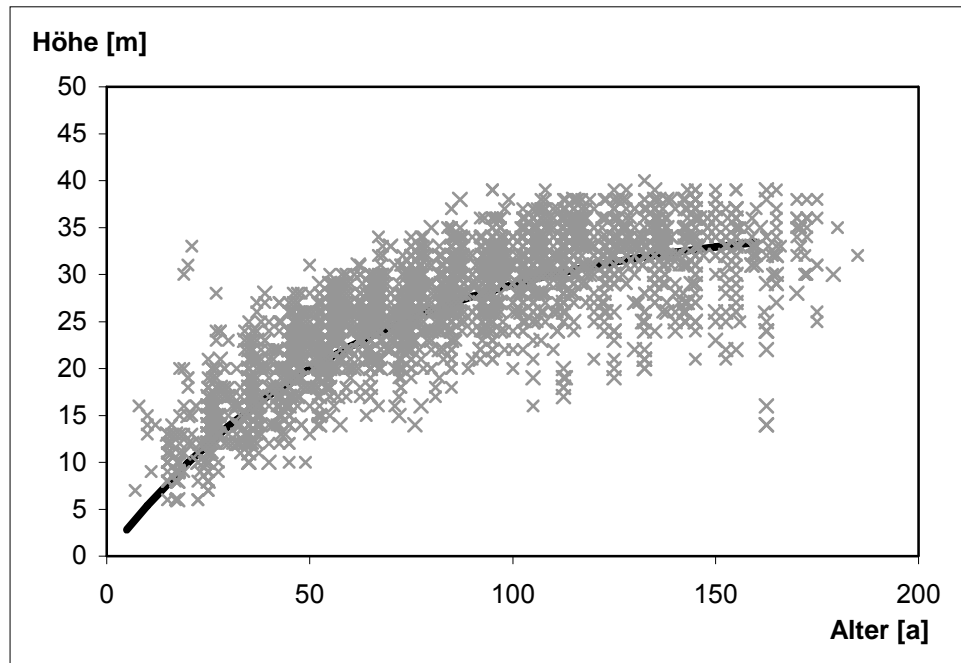


Abbildung 11: Alters-Höhenverteilung aus BWI<sup>2</sup>- und Betriebsinventur (BI)-Daten mit Regressionskurve für Buche

Um den Rechenaufwand zu begrenzen, wurde diese Teilung nur für die zwei Hauptbaumarten Buche und Fichte und die häufigsten Bestandestypen der Reinbestände vorgenommen.

Für die weitere Zuordnung nach Alter wurde folgendes Schema entwickelt:



Tabelle 1: Zuordnungsschema nach Alter<sup>37</sup> (in Jahren)

|                               | I Jugend | II Wachstum | III Wachstum | IV Alter | V Reife | VI Reife |
|-------------------------------|----------|-------------|--------------|----------|---------|----------|
| <b>Fichten-reinbestand</b>    | ≤20      | 21-40       | 41-60        | 61-80    | >80     |          |
| <b>Fichten-mischbestand</b>   | ≤20      | 21-40       | 41-60        | 61-80    | >80     |          |
| <b>Buchen-reinbestand</b>     | ≤20      | 21-40       | 41-60        | 61-80    | 81-100  | >100     |
| <b>Buchen-mischbestand</b>    | ≤20      | 21-40       | 41-60        | 61-80    | >80     |          |
| <b>Sonst. LB-mischbestand</b> | ≤20      | 21-60       |              | 61-100   |         | >100     |
| <b>Sonst. NB-mischbestand</b> | ≤20      | 21-60       |              | 61-100   |         | >100     |

Die Stufenweite ist aufgrund der nicht ausreichenden Datengrundlage in den seltener vorkommenden Bestandestypen „sonstiges Laubholz“ und „sonstiges Nadelholz“ 40 Jahre. Eine genauere Unterteilung der Wachstumsphase war aufgrund der Datenlage nicht möglich. Die zusätzliche VI. Stufe musste eingeführt werden, um die Länge der Umtriebszeit in den Buchenbeständen ausreichend gut abzubilden.

Die Zuordnung zu den Modellbeständen erfolgte über das mittlere Alter aller Bäume des Hauptbestandes am jeweiligen Inventurpunkt. Dadurch reduziert sich der Fehler bei gestuften Beständen. Alle anderen Bestandesschichten gehen aber genauso in die Modellbestände ein. Das Alter der Bäume ist jeweils das Alter am Inventurtag (Stichtag 1.10.2002). Bei allen Jungbeständen mit fehlender Altersangabe wurde das Alter 10 als Durchschnitt aller Bäume <20 Jahre angenommen. Die technischen Grenzen des Waldwachstumsprogramms und der Rechenkapazität haben eine Begrenzung des Eingangs-BHD auf größer als 7 cm notwendig gemacht.

<sup>37</sup> Die römischen Ziffern werden im Folgenden zur Bezeichnung der Altersstufen verwendet sind aber in den älteren Beständen, wie aus dem Schema hervorgeht, nicht ganz vergleichbar mit den forstlichen Altersklassen.

Aufgrund der Datenlage mussten die beiden jüngsten Buchenbestände der oberen Bonität aus Betriebsinventurdaten ergänzt werden. Hierzu wurde der Gesamtdatensatz aller verfügbaren Betriebsinventuren der Ostalb herangezogen und nach dem beschriebenen Schema ausgewertet. Da dieser Datensatz allerdings schon Mittelwerte der Inventurpunkte und nicht einzelne Baumdaten enthält, wurden die Bestände mit Hilfe des Wachstumsmodells SILVA 2.2 (PRETZSCH et al. 2002) über die errechneten Mittelwerte generiert.

Zur Verprobung der Modellbestandsausscheidung wurde eine Clusteranalyse durchgeführt, welche die Inventurpunkte aufgrund von Ähnlichkeiten der Baumartenanteile zuordnet. Die Ergebnisse hierzu sind dem Anhang S.180ff. zu entnehmen.

### **3.3 Flächenanteile der Modellbestände**

Die örtliche Zuordenbarkeit der Information ist nach VON GADOW (2003) eine der wichtigsten Voraussetzungen für die praktische Umsetzung von Planungen im Forstbetrieb. Hiermit wird gewährleistet, dass der Förster Maßnahmen Beständen vor Ort problemlos zuordnen kann. Die beplanten Modellbestände müssen also den Forsteinrichtungsflächen zugeordnet werden können. Dies konnte über die Größen Baumartenzusammensetzung und Alter geschehen, bzw. für die Bonität im Verschnitt mit der Standortskarte.

Im Rahmen einer Diplomarbeit zur Auswirkung waldbaulicher Behandlungen auf die Sickerwasserqualität konnten Flächenbezüge für einen Privatwaldbetrieb hergestellt werden (WIELAND 2007). Weitere Zuordnungen wurden über die Projektkooperation mit der FVA Freiburg von BÄUERLE (2008)<sup>38</sup> über einen automatisierten Zuordnungsalgorithmus vorgenommen. Das größte Problem hierbei waren die sehr unterschiedlichen Datengrundlagen der einzelnen Forstbetriebe.

---

<sup>38</sup> Projektinterne Ergebnisse des BMBF Projektes „Ostalb“ an der FVA Freiburg zur flächigen Projektion der Modellbestände.

In anderen Studien zu Optimierungsfragen im Forstbetrieb wie bei CHEN (2003) oder SÁNCHEZ OROIS (2003) wurden Daten aus Modellwäldern herangezogen, zu welchen alle Informationen bereits einheitlich und flächenscharf vorlagen. Für das weitere Vorgehen in dieser Arbeit wird ebenfalls die Variante eines Modellbetriebs gewählt, der aus typischen Flächenanteilen der Baumarten für die Region zusammengesetzt ist.

### **3.4 Prognose des Waldwachstums**

Zur Prognose einer künftigen Entwicklung des Waldes ist eine waldwachstumskundliche Fortschreibung nötig. Die Schwierigkeit hierbei ist, dass sich im Laufe der Zeit unterschiedliche Behandlungen durchgesetzt haben, ein verstärkter Trend hin zu Mischbeständen zu beobachten ist und es sich Änderungen der Wuchsbedingungen feststellen lassen (VON TEUFFEL et al. 2006). Für die Zielsetzung, das Wachstum bei verschiedenen Behandlungen in den vielfach ungleichaltrigen, gemischten Beständen der Ostalb möglichst gut abzubilden, kommen deshalb einfache Ertragstafeln nicht für eine Prognose in Frage.

Hierbei haben sich in Deutschland Wachstumsmodelle durchgesetzt, die die Wirkung von Mischungs- und Konkurrenzverhältnissen auf das Wachstum der Einzelbäume abbilden und nicht Bestandesmittelwerte fortschreiben. Das zu verwendende Modell musste für die Verhältnisse in Süddeutschland parametrisiert sein, um eine hinreichende Genauigkeit zu erreichen. Im Rahmen des Projektverbunds war es zusätzlich möglich, eine externe Evaluierung des Wuchsmodells SILVA 2.2 mit versuchskundlichen Daten aus Baden-Württemberg durchzuführen (ALBRECHT et al. 2009). Die Verwendung des im deutschsprachigen Raum derzeit einzigen distanzabhängigen Wachstumssimulators SILVA 2.2 von PRETZSCH et al. (2002) lag deshalb nahe.

Um der Forderung nach ausreichender Genauigkeit Sorge zu tragen, wurde noch eine Standortparametrisierung zur Anpassung des Höhenwachstums unter den gegebenen Verhältnissen in der Ostalb und eine Korrektur des Durchmesserzuwachses basierend auf den Ergebnissen von ALBRECHT et al. (2009) vorgenommen.

Die Anpassung des Höhenwachstums der Bäume erfolgte, regional angepasst, mit Hilfe der **Standortparametrisierung**, welche im Wachstumsmodell mit der Wachstumsfunktion von Chapman-Richards (siehe PRETZSCH 2001, S. 21) umgesetzt wird. Praktisch wurde dies mit der SAS Prozedur „NLIN“ für nichtlineare Regressionen vorgenommen. Die berechneten Kurvenparameter können beim sogenannten „automatisierten Betrieb“ in die Wachstumsprognose einfließen. Dem Rechenalgorithmus liegt die Methode der kleinsten Quadrate „least-squares method“ (siehe ANONYMUS 1992, S. 1136) zugrunde. Dabei wurde der MARQUARDT Algorithmus verwendet. Die für die einzelnen Baumarten errechneten Regressionskurven und zusätzlich die oberen Grenzwerte der zweifachen Standardabweichung ausgegeben, welche die für die SILVA-Einsteuerung nötigen Obergrenzen des Höhenwachstums sind.

Es hat sich gezeigt, dass trotz des Stichprobenumfangs von rund 28.000 Bäumen aus den Betriebsinventuren und 3.900 Bäumen aus der BWI<sup>2</sup> für einige Baumarten eine manuelle Einstellung der Höhenobergrenze in Anlehnung an vergleichbare Baumarten vorgenommen werden musste. Eine Darstellung der Daten und der errechneten Höhenausgleichskurven mit den zugehörigen Formelparametern siehe Anhang Kapitel 11.2.

Die **Durchmesserzuwachskorrektur** wurde als Zusatzmodul direkt in SILVA 2.2 implementiert. Die Korrekturfaktoren des  $d_{100}$  und des  $d_g$  (Tabelle 2) für die Baumarten Buche und Fichte wurden nach Behandlungsstärke gestaffelt direkt in den Programmcode geschrieben.

Tabelle 2: Korrekturfaktoren für das Durchmesserwachstum verschiedener Eingriffsstärken aus Ergebnissen von ALBRECHT et al. (2009)

|                               | Buche     |        | Fichte    |        |
|-------------------------------|-----------|--------|-----------|--------|
|                               | $d_{100}$ | $d_g$  | $d_{100}$ | $d_g$  |
| <b>Unbehandelt</b>            | 1         | 1      | 1,0315    | 1,0364 |
| <b>schwache Durchforstung</b> | 1,0098    | 1,0066 | 1,0460    | 1,0263 |
| <b>starke Durchforstung</b>   | 1,0234    | 1,0118 | 1,0413    | 1,0413 |

Dies ist mit einer Routine möglich, welche die jeweils verwendete Eingriffstärke erkennt und das Wachstum entsprechend anpasst. Die kalkulierten Abweichungen liegen bei 1 - 4%. Alle Durchforstungen mit Reduktionen der Grundfläche von bis zu 20% wurden als schwach und ab 20% als stark klassifiziert.

Ausführliche Dokumentationen von Fortschreibungen auf Bestandes- und Betriebsebene mit der automatisierten Version des Programmes SILVA 2.2 sind den Arbeiten von ĀURSKÝ (2000), DUSCHL (2001), DÖBBELER (2004) u.a. zu entnehmen. Des Weiteren ist die Beschreibung der einzelnen Parameter und Rechenschritte sowie der Dateien der Dokumentation in Form des SILVA Handbuchs von BIBER et al. (2000) sowie bei PRETZSCH (2001) ausführlich festgehalten.

Für die eigentlichen waldwachstumskundlichen Berechnungen wurden fünf abgestufte **Behandlungen** mit Grundflächenentnahmen von 0%, 10%, 25%, 50% und 100% gegenüber dem unbehandelten Bestand zugrunde gelegt (Abbildung 12).

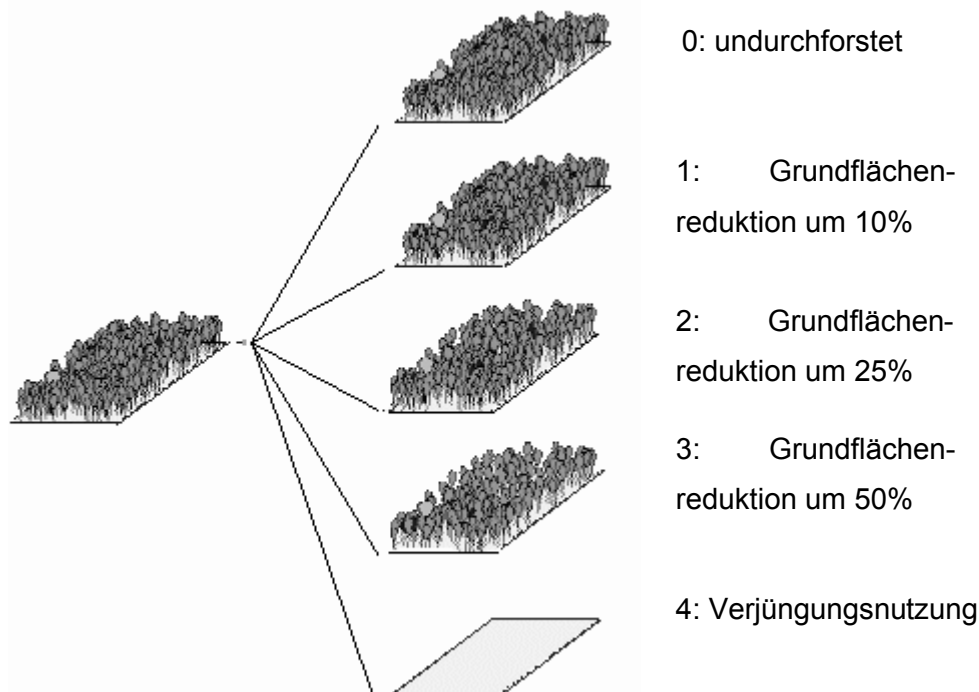


Abbildung 12: Entnahmeschemata

Hierbei hat sich der im Wachstumsmodell implementierte Durchforstungsalgorithmus „Auslesedurchforstung“ KAHN (1995) nur als

begrenzt geeignet erwiesen, da hier eine klare Grundflächenabsenkung nicht immer möglich war. Deswegen wurde für die Fortschreibungen der Eingriffsalgorithmus „Hochdurchforstung“ verwendet. Für eine genaue Beschreibung der technischen Vorgehensweise siehe 11.2.

### 3.5 Weitere Eingangsgrößen

Im folgenden Abschnitt werden neben den naturalen Daten des Waldwachstums die Eingangsparameter für die Optimierung erläutert. Diese gliedern sich in die Aufteilung der Holzmengen in Sortimente, Bewertung der Holzsortimente mit entsprechenden Holzpreisen, Aufarbeitungskosten, Kosten für die Bestandesbegründung sowie Bodenertragswertbestimmung.

#### 3.5.1 Sortierung

Die Sortierung erfolgt mit dem Programm „Holzsortierung“ von FELBERMEIER (2007) basierend auf dem Voluminierungs- und Sortierungsprogramm BDatPro (KUBLIN und SCHARNAGEL 1988). Es wurde entschieden 2 Varianten zu sortieren, die dann auch im Nachgang in flexiblen Anteilen kombiniert werden können. Die Sortiervorgaben waren wie folgt:

Tabelle 3: Sortiervorgaben Variante „Fixlängen“

|   | <b>Fixlänge</b>                 | <b>Zopf (o.R.)</b> |
|---|---------------------------------|--------------------|
| <b>Nadelholz</b>  | 4,1 m                           | 12 cm              |
| <b>Buche und ALH</b>  | 3,6 m<br>pot. Wertholz /Rotkern | 33 cm              |
|   | 8 m<br>Stammholzstück           | 27 cm              |
| <b>Sonst. Laubholz</b>  | 12 m                            | 22 cm              |
| Industrieholz (IH) bis 7 cm Zopf, X-Holz-Anteil festgelegt auf 30% des IH |                                 |                    |

Tabelle 4: Sortiervorgaben Variante „Stammholz“

|   | <b>Stammholzlänge</b> | <b>Zopf (o.R.)</b> |
|---|-----------------------|--------------------|
| <b>Nadelholz</b>  | 20 m                  | 12 cm              |
| <b>Buche und ALH</b>  | 12 m                  | 27 cm              |
| <b>Sonst. Laubholz</b>  | 12 m                  | 22 cm              |
| Industrieholz (IH) bis 7 cm Zopf; X-Holz-Anteil festgelegt auf 30% des IH |                       |                    |

Nach der Sortierung lagen die Stammholzanteile für Buche bei ca. 39% und damit etwas höher als der bei den Forstbetrieben abgefragte Durchschnitt von 28%. Diese Anteile können je nach Marktlage jedoch von einem Jahr auf das andere stark schwanken, weshalb von einer nachträglichen Änderung abgesehen wurde.

### 3.5.2 Holzpreise

Es ist äußerst schwierig einen länger gültigen Wert für die stark schwankenden Holzpreise anzugeben. Zahlreiche Untersuchungen wie beispielsweise KROTH und BARTHELHEIMER (1993) oder SOHNGEN et al. (1999) beschäftigen sich mit dem Holzmarkt und Aspekten des Angebots (WEAR und PARKS 1994) oder der Nachfrage (OLLMANN 1985). Holzpreiszeitreihen in Verbindung mit regressionsanalytischen Methoden sind, wie NEUNER (2008) zeigen konnte, kein für sich stehendes zuverlässiges Vorhersageinstrument. Der Ansatz von LESKINEN und KANGAS (2001) auf Expertenwissen zurückzugreifen, erscheint vielversprechender, weswegen von dieser Idee Gebrauch gemacht wird.

Die Preistabellen für die nachfolgenden Rechnungen wurden auf Basis einer Expertenbefragung<sup>39</sup> in der Region erstellt. Diese sind den folgenden Abbildungen<sup>40</sup> zu entnehmen. Hierbei wurden die B, bzw. BC Mischpreise für

<sup>39</sup> Erwartungswerte für Holzpreise der nächsten Jahre nach Expertenschätzung: Befragt wurden hierzu Anfang 2006 acht Experten aus der Region sowohl aus der Forstbetriebsleitung als auch aus der Holzindustrie. Die Schwankung der Einschätzungen lag hierbei um 20%.

<sup>40</sup> Alle Preise und Kosten sind ohne Mehrwertsteuer gerechnet.

Nadelholz sowie die regionaltypischen Anteile der Qualitäten A - C bei Buche und Eiche abgefragt. Um die Zu- und Abschläge für die restlichen Qualitäten zu erhalten, wurden aus der Holzpreisstatistik der Jahre 1971 - 1998 für Baden-Württemberg und 2000 - 2004 für Bayern Mittelwerte herangezogen. Dabei hat sich herausgestellt, dass der Abschlag für C-Holz über die Jahre einen zunehmenden Trend aufweist.

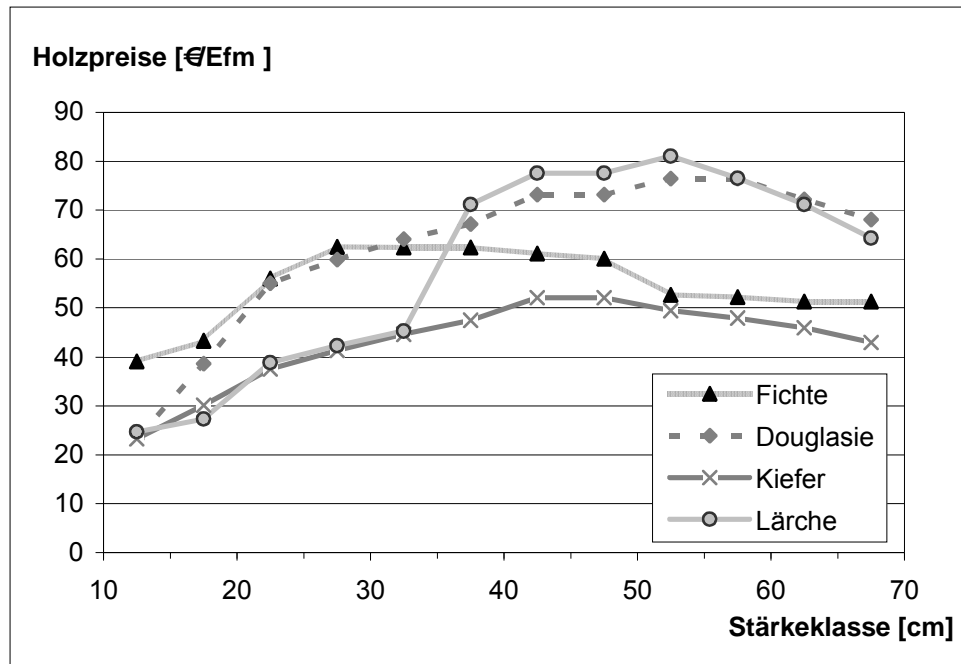


Abbildung 13: Preiserwartung für Nadelstammholz<sup>41</sup>

<sup>41</sup> Erwartungswerte für Holzpreise der nächsten Jahre nach Expertenschätzung.



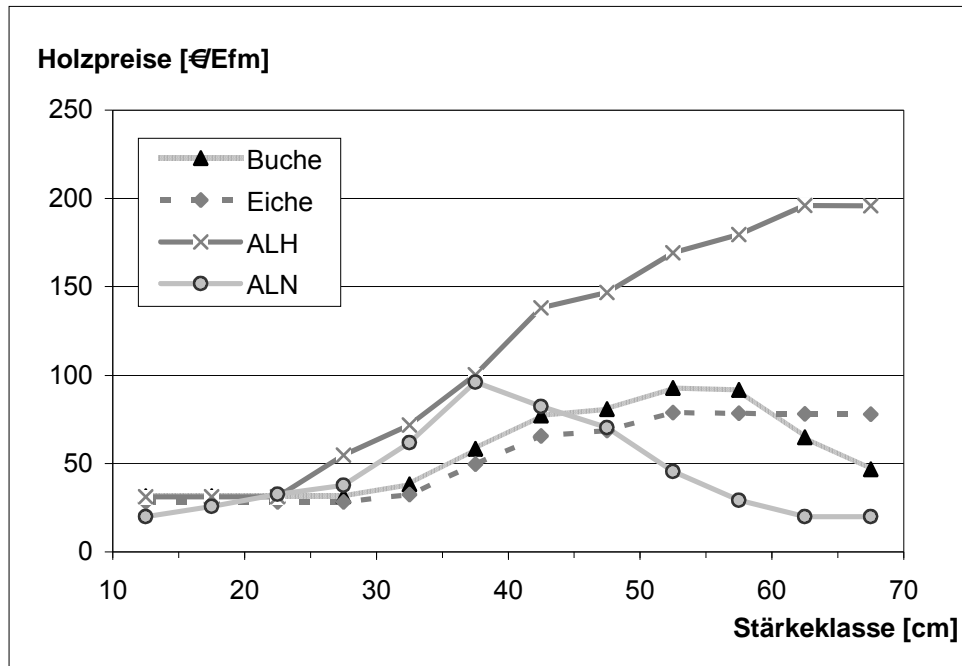


Abbildung 14: Preiserwartung für Laubstammholz<sup>42</sup>

Die Preise für als X-Holz sortierte Abschnitte, die als Brennholz betrachtet werden, liegen zwischen etwas über 20 bis 40 €/fm (siehe Tabelle 5).

Tabelle 5: Brennholzpreise

| Fichte/<br>Tanne [€/fm] | Sonst. NH<br>[€/fm] | Buche<br>[€/fm] | Eiche<br>[€/fm] | ALH<br>[€/fm] | ALN<br>[€/fm] |
|-------------------------|---------------------|-----------------|-----------------|---------------|---------------|
| 26,0                    | 21,5                | 41,4            | 38,0            | 41,3          | 23,0          |

Eine Ergänzung für nicht angegebene Sortimente wurde im Abgleich mit anderen Statistiken aus Baden-Württemberg/Bayern vorgenommen. Die Fixlängenpreise sind über Zu- und Abschläge auf Basis der Marktpreisstatistik Bayern des Jahres 2004 errechnet. Die Preiserwartungen lagen zu dem Zeitpunkt der Schätzung dabei im Schnitt leicht über den historischen Mittelwerten.

<sup>42</sup> Beim Edellaubholzpreis (ALH) sind sehr gute zu erzielende Preise für Ahorn und niedrige Abschläge eingegangen, welche die Dimension erklären. Der Preis spielt jedoch in der Bewertung eine untergeordnete Rolle, da nur wenig Holz dieser Baumarten anfällt.

### 3.5.3 Aufarbeitungskosten

Für die maschinelle Holzernte wurden Kosten und Arbeitsproduktivitäten für das Königsbronner Harvesterverfahren von HEINDL und PAUSCH (2007) sowie motormanuelles Aufarbeiten und Rücken mit dem Forstschlepper aus vorliegenden betrieblichen Unterlagen aus der Region herangezogen. Grundsätzlich wird motormanuelle Aushaltung im Stammholz und maschinelle Ernte der Fixlängen mit dem Harvester zugrundegelegt.

Parameter für **maschinelle Aufarbeitung**:

eingehend nach Stückmasse (pro Baum)

- 25 €/h Kosten für Waldarbeiter aus Testbetriebsnetz „Ostalb“
- 145 €/h Kosten d. Harvesters
- 85 €/h Kosten d. Forwarders

Es wird die technische Arbeitsproduktivität (TAP) und die Wahrscheinlichkeit des Zufällens für einen Rückegassenabstand von 30 m<sup>43</sup> in Abhängigkeit von Stückmasse und Abstand zur Gasse, nach Ergebnissen von HEINDL und PAUSCH (2007), kalkuliert. Außerdem wird im Laubholz eine reine Harvester-aufarbeitung bis zu einer Stückmasse von 1,4 fm unterstellt. Deshalb schneidet die Aufarbeitung von Laubholz etwas besser ab als die Ernte von Nadelholz (siehe Abbildung 15).

---

<sup>43</sup> Kompromiss aus Richtlinie zur Feinerschließung in Baden-Württemberg und Praxis im Privatwald

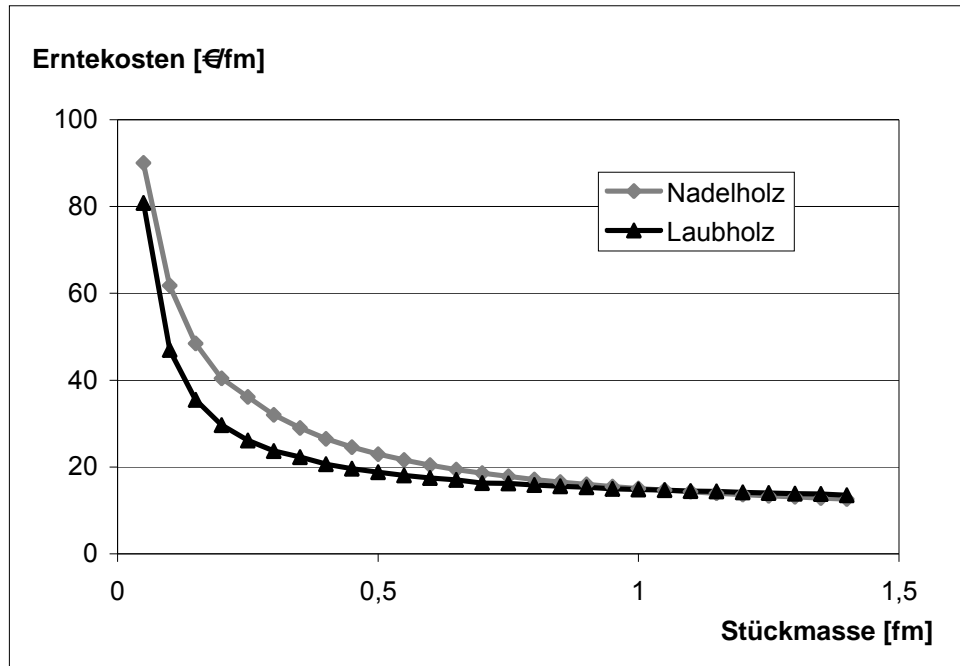


Abbildung 15: Kosten für maschinelle Aufarbeitung mit dem Königsbronner Harvesterverfahren im Nadelholz und Laubholz in Abhängigkeit von der Stückmasse

Die TAP<sup>44</sup> bezieht sich dort auf Ergebnisse von PAUSCH und PONITZ (2002). Die jungen Laubholzbestände (Buchenrein- und Mischbestände sowie sonstiges Laubholz) werden mit motormanueller Holzernte gerechnet, da mit der verwendeten Datengrundlage in den schwächeren Sortimenten keine kostendeckenden Erlöse erzielbar sind. Dies erscheint bei Einsatz von Selbstwerbern in den Buchenjungdurchforstungen gerechtfertigt und gibt die real erzielbaren positiven Deckungsbeiträge besser wieder. Als Werte für die TAP zum Rücken bei Harvesteraufarbeitung mit dem Forwarder wurden Ergebnisse von LÜTHY (1997) zugrunde gelegt.

Für die Kosten der motormanuellen Aufarbeitung des Stammholzes (Abbildung 16) wurde der erweiterte Sorten Tarif (EST) bzw. Unternehmerlohntabellen mit ortstypischen Zuschlägen nach Daten aus der Region

<sup>44</sup> Zugrunde liegende Annahmen:

- durchschnittliche Fahrtstrecke pro Baum = 1,5 m
- 40% grüne Krone
- Zuschläge für Lbh normale bis gute Qualität
- Anteil X-Holz =  $3,7 - 3,5 \times \ln(\text{STM})$

(THORWARTH 2007; SCHREIBER 2007; KRAFT 2007)<sup>45</sup> und ein entsprechender Rücketarif<sup>46</sup> (STRAUB 2007; SCHREIBER 2007; KRAFT 2007)<sup>47</sup> verwendet.

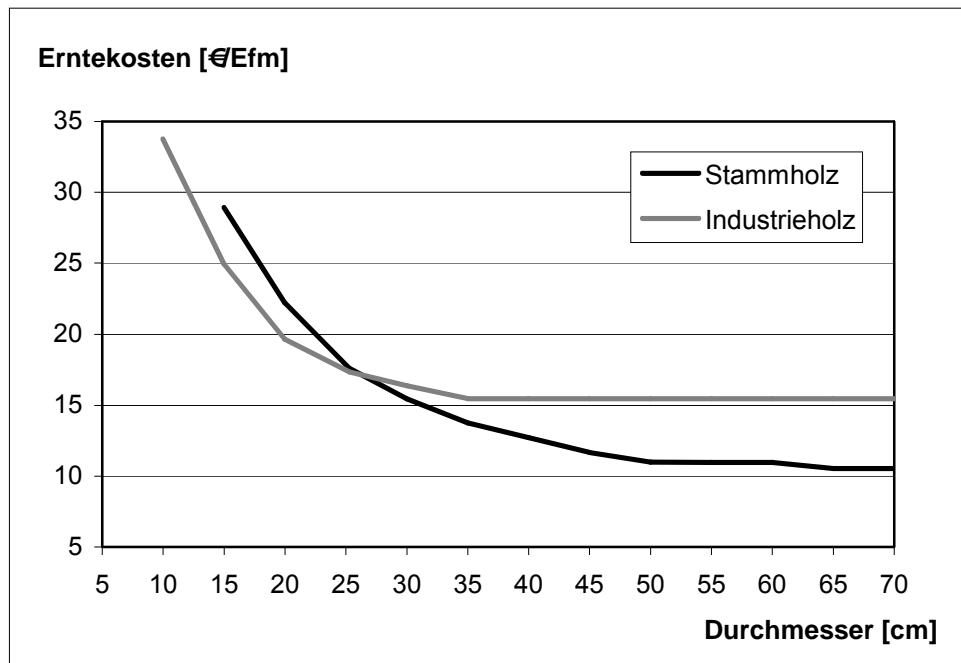


Abbildung 16: Kosten für motormanuelle Aufarbeitung und Rücken in €/Efm über dem Mittendurchmesser des jeweiligen Sortiments für Nadelholz (in Anhalt an den EST)

Die Höhe des Hiebsanfalls und die bei geringeren Anfällen höheren Umsetzwege wurden nicht berücksichtigt. Niedrigere Aufarbeitungskostenätze, beispielsweise für Endnutzungen, wurden nicht angesetzt. Dies erscheint im Hinblick auf die in der Praxis üblichen langfristigen Verjüngungsverfahren gerechtfertigt.

Vergleicht man die erntekostenfreien Erlöse der einzelnen Baumarten nach Fixlängen- bzw. Stammholzsortierung miteinander, so schneidet die Fixlängensortierung in den jüngeren Beständen wegen der voll angesetzten Aufarbeitungskosten bei niedrigen X-Holz- und IH-Preisen wesentlich schlechter ab (negative Werte). Dieses Verhältnis kehrt sich in Beständen mit

<sup>45</sup> Ergebnisse aus der schriftlichen Befragung der regionalen Maschinenbetriebe bzw. Unternehmerlohnsätze im Privatwald

<sup>46</sup> Bringung mit dem Forstschlepper

<sup>47</sup> s.o. Fußnote 45

mittelstarken Bäumen zugunsten der Fixlängensortierung um, welches hier vor allem in den Nadelholzbeständen das günstigste Verfahren darstellt. In den älteren Laubholzbeständen kehrt sich dieses Verhältnis aufgrund der Durchmesserobergrenze von 35 cm (~Stückmasse 1,4 fm) für maschinelle Aufarbeitung wieder um.

Neben den einzelnen Aushaltungen wurden generell die Anteile von 60% Stammholz- und 40% Fixlängenaushaltung gewählt. Mit den gewählten Varianten können die Umfragewerte zur Aushaltung im Projektgebiet (nach BAUMANN 2006<sup>48</sup>) hinreichend gut nachgebildet werden.

### 3.5.4 Bestandesbegründung

Die Kulturkosten setzen typische Pflanzzahlen zur Bestandesbegründung aus der Waldentwicklungstypenrichtlinie (LANDESFORSTVERWALTUNG BADEN-WÜRTTEMBERG 1999), Kosten pro Pflanze von 0,40 - 0,90 € pro Stück und eine Arbeitsproduktivität bei Winkelpflanzung von 60 Pflanzen/h mit einem Zeitlohn von 35 €/h voraus. Zusätzlich wurden die für das Projektgebiet typischen Anteile von Naturverjüngung bzw. Pflanzung (Tabelle 6) angesetzt.

Tabelle 6: Anteile Naturverjüngung im Projektgebiet und entsprechende Pflanzkosten

|                              | Anteil Naturverjüngung | Kosten [€/ha] |
|------------------------------|------------------------|---------------|
| <b>Buchenreinbestand</b>     | 100%                   | 0             |
| <b>Buchenmischbestand</b>    | 70%                    | 700           |
| <b>Fichtenmischbestand</b>   | 70%                    | 1230          |
| <b>Fichtenreinbestand</b>    | 60%                    | 1210          |
| <b>Douglasienreinbestand</b> | 0%                     | 2230          |
| <b>sonst. LHmischbestand</b> | 80%                    | 1400          |
| <b>Sonst. NHmischbestand</b> | 80%                    | 930           |

In den Mischbeständen müssen Anteile an Edellaubholz eingebracht werden, bzw. es muss eine Mischungsregulierung stattfinden. Die Fichtenbestände verjüngen sich im Projektgebiet größtenteils natürlich, allerdings werden

<sup>48</sup> Zwischenbericht II des BMBF Projekts „Ostalb“, Teilprojekt Logistik. Universität Freiburg.

Arbeitskosten für 25 h/ha Freischneiden der Naturverjüngung veranschlagt und auf den Zeitpunkt der Pflanzung diskontiert.

### 3.5.5 Berechnung von Bodenertragswerten

Die Bodenertragswerte werden sowohl in der Dynamischen Programmierung als auch später in der vollständigen Enumeration zur Summe der Erlöse hinzugezählt, um die Erträge einer auf ewig weitergeführten forstlichen Bodennutzung wiederzugeben (siehe analog WIKSTRÖM 2001, S. 1059). Hiermit können auch unterschiedliche Anreize zur Bestandesbehandlung beispielsweise bei einem Baumartenwechsel dargestellt werden. Die Bodenertragswerte wurden mit der klassischen Formel von FAUSTMANN (1849) (Gleichung 1) für ein Szenario mit mittleren Entnahmesätzen ermittelt.

Gleichung 1: Bestimmung des Bodenertragswertes der einzelnen Bestandestypen

$$BEW = \frac{A(T) - c \cdot (1+r)^T + \sum_{i=1}^{T-1} N_i \cdot (1+r)^{(T-i)}}{(1+r)^T - 1}$$

A = Abtriebswert

N = Vornutzungserlös

r = Zinsrate als Dezimalzahl (z.B. 0,02)

T = Umtriebszeit

i = Zeitpunkt der Maßnahmen

c = Kulturkosten

Hierzu wurden aus den Modellbeständen unechte Zeitreihen je Bestandestyp gebildet und mit Hilfe von Funktionen ausgeglichen. Das Maximum der Bodenertragswerte wurde in die eigentliche Optimierungsformel eingeführt.

Insgesamt wurde immer eine schwache Durchforstung unterstellt (vgl. auch Abschnitt 4.2). Stärkere aufeinanderfolgende Durchforstungen sind für eine solche unechte Zeitreihe nicht geeignet, da die Bestände oft aus einem schwächeren Behandlungsregime stammen und sonst die Gesamtwuchsleistung in Relation zur Ertragstafel um ein Wesentliches überschritten wird. Für die Bodenertragswerte können vorab keine optimierten Behandlungen zugrunde gelegt werden.

## 3.6 Durchforstungsoptimierung

Die Darstellung des Wachstums während eines ganzen Bestandeslebens ist, aufgrund der Änderungen der Umweltbedingungen und der verschiedenartigen Behandlungen im Laufe von mehreren Generationen von Bewirtschaftern, nur begrenzt möglich. Deshalb werden in dieser Studie lediglich die 30-jährigen Fortschreibungen mit Hilfe der gebildeten, unterschiedlich alten Modellbestände, in Form einer unechten Zeitreihe nebeneinander gestellt, um Bewirtschaftungsempfehlungen für die nächstliegenden Planungsperioden zu erhalten.

Für diese Arbeit wurde ein automatisierbares Verfahren zur Optimierung der Durchforstungsvarianten verwendet, da der Entscheidungsbaum bereits bei wenigen Durchforstungsvarianten, in Kombination mit den 6 Planungsperioden im 30-jährigen Prognosezeitraums, sehr schnell eine unüberschaubare Vielzahl an Lösungswegen bereit hält. Zusätzlich wird aber auch der Aufwand der Rechnung eines vollständigen Entscheidungsbaumes betrieben.

### 3.6.1 Dynamische Programmierung

Es wurde zunächst das von RICHARD BELLMAN (1957) entwickelte Verfahren der Dynamischen Programmierung angewendet. Es ist für die Frage nach der optimalen Durchforstung insofern geeignet, als die Konsequenzen von jetzt getroffenen Entscheidungen für die zukünftigen Möglichkeiten berücksichtigt werden. Das heißt: Entnehme ich heute Bäume in einer Durchforstungsmaßnahme, stehen diese nicht mehr für das weitere Wachstum und spätere Eingriffe zur Verfügung. Deshalb zählt dieses Verfahren im Gegensatz zu den statischen Verfahren, die solche Abhängigkeiten nicht berücksichtigen, zu den dynamischen Entscheidungsmodellen (siehe hierzu auch BAMBERG und COENENBERG 2006 sowie DOMSCHKE und DREXEL 2005). Anwendungen der dynamischen Programmierung zur Lösung der Frage nach der optimalen Durchforstung und Umtriebszeit in der Forstwirtschaft sind beispielsweise bei AMIDON und AKIN (1968), KAO und BRODIE (1980), ARTHAUD und KLEMPERER (1988), ARTHAUD und PELKKI (1996) sowie PELKKI und KIRILLOVA (2004) zu finden.

Die Dynamische Programmierung findet die optimale Lösung in einem dreistufigen Prozess, bestehend aus:

- 1) Untergliederung des Problems in kleinere Unterprobleme
- 2) Finden der optimalen Lösung des Unterproblems
- 3) Verwendung dieser optimalen Lösung, um eine optimale Lösung für das Gesamtproblem zu finden.

Oder in den Worten von BELLMAN: „An optimal policy has the property that whatever the initial state and initial decisions are, the remaining decisions must constitute an optimal policy with regard to the state resulting from the first decision.“<sup>49</sup> (BELLMAN 1957, S. 83).

Im Gegensatz zu anderen Verfahren heißt dies allerdings auch, dass es weder einen vorab definierten Algorithmus noch ein allgemein anwendbares Programm zur Lösung gibt (vgl. HILLIER und LIEBERMAN 1986; KENNEDY 1986, S. 18). Die Zerlegung des Problems in seine Teilprobleme und die schrittweise Identifikation der optimalen Lösung muss individuell vorgenommen werden.

Im Gegensatz zu zahlreichen Autoren wie KAO (1984), PAREDES und BRODIE (1985), VALSTA (1990), PELKKI (1997) und GUNN (2003) wurden die einzelnen Zustände<sup>50</sup> nicht in Klassen zu sogenannten Knoten zusammengefasst, sondern es wurde ausgehend von den tatsächlichen Zuständen weitergerechnet. Hierdurch wird eine höhere Genauigkeit erreicht. Betrachtet man eine vollständige Enumeration, potenziert sich der Rechenaufwand. Die dieser Arbeit zugrunde liegende Formulierung des Dynamischen Optimierungsproblems ist in der Zielfunktion deckungsgleich mit üblichen Darstellungen, legt allerdings der Rechnung kein Netzwerk aus Pfaden und

---

<sup>49</sup> „Eine optimale Politik hat die folgende Eigenschaft: unabhängig vom Anfangszustand und der ersten Entscheidung müssen die restlichen Entscheidungen, unter Berücksichtigung desjenigen Zustandes, der aus der ersten Entscheidung resultiert, eine optimale Politik ergeben“ Übersetzung aus NEMHAUSER (1969, S. 59). Das Englische „policy“ ist im Deutschen jedoch besser mit dem Wort „Strategie“ zu übersetzen als mit Politik.

<sup>50</sup> Englisch: states



Knoten, wie zum Beispiel AMIDON und AKIN (1968) oder KILKKI und VÄISÄNEN (1970) zugrunde.

Die Unterschiede sind in Abbildung 17 skizziert.

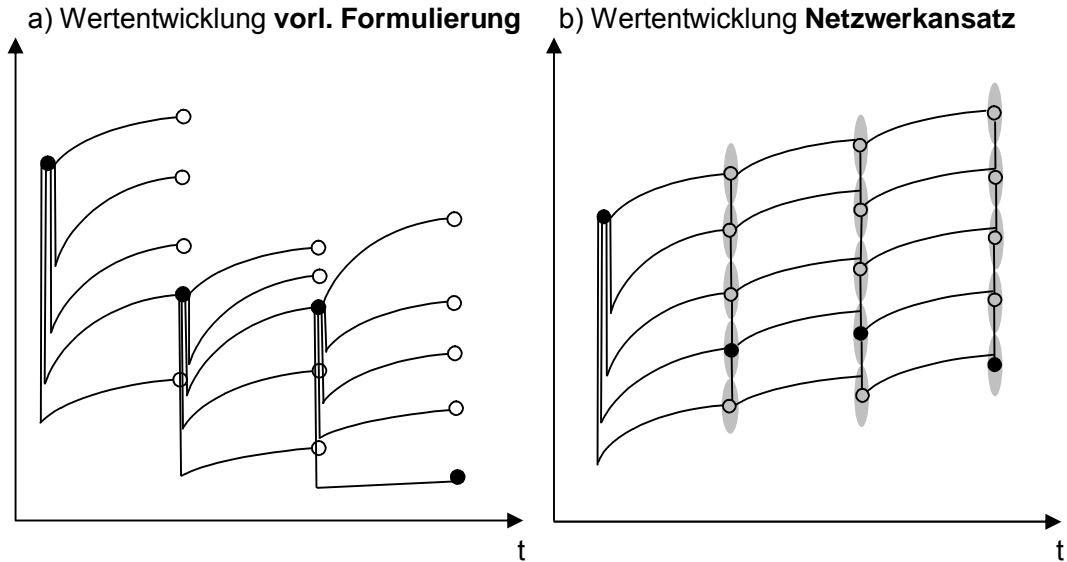


Abbildung 17: Unterschiede zwischen der dieser Arbeit zugrunde gelegten Formulierung (a) und Netzwerkansatz (b) für ein dynamisches Programmierungsproblem.

Die jeweils gewählten optimalen Pfade sind mit schwarzen Punkten gekennzeichnet. Für diese muss die Summe aus Durchforstungserlös plus dem anschließenden Wertanstieg durch das Wachstum maximal sein. Bei dem dieser Arbeit zugrunde gelegten Schema spielen Unterschiede im Wachstumspotential eine wesentlich größere Rolle. Beim Netzwerkansatz werden die möglichen Unterschiede durch die in der Skizze (Abbildung 17b) grau hinterlegten Zustände und deren größeren Umfang ausgeglichen. Für eine Netzwerkformulierung ist aufgrund der offenen Übergänge von einem Knoten zum nächsten allein die Bedingung der Monotonität, d.h. eine durchgehende Funktion ohne Definitionslücken zu erfüllen.

In dem gewählten Schema dieser Arbeit werden an einem Punkt alle fünf dort möglichen zukünftigen Behandlungsvarianten verglichen. Dabei wird die Möglichkeit weiterer zu diesem Zeitpunkt realisierbarer Punkte aus den verschiedenen Eingriffsstärken der Vorperiode außer Acht gelassen, die auf der höheren Ebene beispielsweise durch eine Entnahme realisierbar wären. Diese Formulierung des Problems setzt jedoch voraus, dass die Wertentwicklung konkav verläuft. Lokale Minima und Maxima können zu einer fehlerhaften Auswahl des optimalen Pfades führen. Eine Prüfung dieses

Umstands wird am vorliegenden Datensatz durch den Vergleich mit den Ergebnissen der vollständigen Enumeration dargestellt.

Die Rekursion nach dem Prinzip BELLMANS für die Dynamische Programmierung wurde dabei rückwärts rekursiv beispielsweise von VALSTA (1990) umgesetzt. Das heißt, die Durchforstung findet am Ende der Planungsperiode statt und es werden der Durchforstungserlös und der Wert des Bestands vor der Durchforstungsmaßnahme summiert.

Im vorliegenden Fall wurde dies zur Summe aus dem Durchforstungserlös vor Beginn der Betrachtungsperiode und dem Wert des Bestandes nach der Maßnahme am Ende dieses Zeitraums umformuliert. Dies entspricht einem vorwärts rekursiven Ansatz (siehe auch SCHREUDER 1971 sowie PELKKI und KIRILLOVA 2004). Die Rekursionsgleichung lässt sich dabei wie folgt formulieren:

Gleichung 2: Rekursionsgleichung für die Durchforstungsoptimierung

$$DF_{\text{opt}} = \max_{\{A_{i+1,v}\}} [N_{i,v} + A_{i+1,v} \cdot q^{-5}]$$

wenn  $v = 4$  dann ist  $A_{i+1} = 0$

$i$  = Periode  $i \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$ ; jeweils multipliziert mit 5 ergibt Jahre

$v$  = 0 bis 4 = Nutzungsvarianten (nach G/ha gestaffelte Entnahmen)

$N$  = Erlös der Nutzungsvariante

$A_{i+1,v}$  = Wert des Bestandes zum Zeitpunkt  $i+1$  nach der Nutzung  $,v'$  eine Periode später bzw. nach fünfjährigem Wachstum

$q$  = Diskontfaktor =  $1 + r$ ;  $r$  = Zinssatz als Dezimalzahl

Dabei steht  $DF_{\text{opt}}$  für den höchsten Wert der Rekursionsgleichung, welcher als Ergebnis die optimale Durchforstungsvariante liefert. Der Wert als Funktion des Durchforstungserlöses nach der Durchforstungsalternative  $,v'$  zum Zeitpunkt  $,i'$  muss maximiert werden im Hinblick auf den Wert des Bestandes nach der Durchforstung und nach fünfjährigem Wachstum  $,A_{i+1,v}'$ . Im Fall der Variante  $,v = 4'$  entspricht der Durchforstungserlös dem Abtriebswert und  $A_{i+1} = 0$ . Damit wird die Idee von KAO und BRODIE (1980) bzw. VALSTA (1990) aufgegriffen, die die Endnutzung einfach als stärkste

„Durchforstungsvariante“ auf die gleiche Stufe mit den Durchforstungen gestellt hatten.

Gleichung 2 zeigt das zugrunde liegende Rechenprinzip. Zusätzlich zur Art und Weise der Rechnung muss allerdings noch der Zeithorizont berücksichtigt werden, der im vorliegenden Fall als unbegrenzt angenommen wird. Dies wird mit der in Gleichung 3 beschriebenen Zielfunktion umgesetzt. Entgegen gängigen Formulierungen für die so genannte „vorwärts rekursive Dynamische Programmierung“ von BRODIE et al. (1978), HAIGHT et al. (1985), PAREDES und BRODIE (1987) oder ARTHAUD und PELKKI (1996) wurde der Bodenertragswert als Äquivalent für die Kosten und Erlöse der forstlichen Landnutzung und deren unterschiedliche Produktivitäten im Sinne von CHANG (1998) und WIKSTRÖM (2001) hinzugefügt. Das Problem wird damit zu einem infiniten Planungshorizont erweitert (siehe auch JOHANSSON und LÖFGREN 1985, S. 114). VALSTA (1990) errechnet dagegen den Bodenertragswert erst im zweiten Schritt nach Festlegung der optimalen Umtriebszeit. Die Addition des Bodenertragswertes wird analog zu BULLARD et al. (1985), SANCHEZ OROIS und VILCKO (2002) sowie HINRICHS (2006) vorgenommen. Auf diese Weise können optimale Behandlungen für Bestände gefunden werden, die bis zum Beginn der Optimierung nicht optimal behandelt wurden. Die Zielfunktion fasst den Erlös der Durchforstung jetzt, den Abtriebswert der folgenden Fortschreibungsperiode als Restwert und den Bodenertragswert als Wert für alle zukünftigen Nutzungen zum zu maximierenden Optimierungskriterium  $DP_{opt}$  (siehe Gleichung 3) zusammen.

Gleichung 3: Formel zur Bestimmung der Abfolge der optimalen Durchforstungen mit dynamischer Programmierung

$$DP_{opt} = \max \sum_{i=0}^5 \sum_{v=0}^4 N_{i,v} + A_{i+1,v} \cdot q^{-5} + BEW \cdot q^{-5\lambda}$$

$\lambda = 0$  falls  $v = 4$

sonst  $\lambda = 1$

$i$  = Zeit in Perioden  $i \in \{0, 1, 2, 3, 4, 5\}$ ; jeweils multipliziert mit 5 ergibt Jahre

$v$  = Nutzungsvarianten  $v \in \{0, 1, 2, 3, 4\}$  (nach G/ha gestaffelte Entnahmen)

- N = Erlös der Nutzungsvariante  
A = Abtriebswert oder Bestandeswert  
q = 1 + r; r = Zinssatz  
BEW = Bodenertragswert des Bestandestyps  
 $\lambda$  = Korrekturfaktor  $\lambda \in \{0,1\}$

Der Korrekturfaktor  $\lambda$  nimmt bei der stärksten Durchforstungsvariante den Wert ‚0‘ an und stellt damit eine korrekte zeitliche Erfassung des Bodenertragswertes sicher. Für den Fall  $v = 4$ , wird der Bodenertragswert direkt zum Zeitpunkt  $i$  der Maßnahme hinzugezählt. Die gleichzeitige Indizierung von N bzw. A mit  $i$  und  $v$  stellt sicher, dass die zulässige Menge nur alle auf dem gleichen Ast liegenden Durchforstungsvarianten, also alle erlaubten  $5^5$  Varianten enthält.  $DP_{opt}$  steht für die Zielfunktion mit dynamischer Programmierung.

In einem Satz zusammengefasst lässt sich sagen:

*Optimal ist die höchste Barwertsumme aus Nutzung, Bestandeswert und Bodenertragswert. Wobei immer nur zwei aufeinanderfolgende Perioden betrachtet werden.*

In der praktischen Umsetzung wurden die Baumlisten aus der waldwachstumskundlichen Prognose mit SILVA 2.2 über ein Makro in das Statistik- und Datenbankprogramm SAS<sup>51</sup> eingelesen und zu einer großen Datenbank verknüpft. An diese Basis – 57,4 Millionen Einzelbaumdaten – wurden dann die Ergebnisse der Sortierung aus dem Programm Holzsortierung (FELBERMEIER 2007), die Bewertung des Holzes und die Aufarbeitungskosten im Ergebnis als Deckungsbeitrag angehängt und darauf basierend die eigentliche Optimierung gerechnet. Die Anzahl der Zustandsvariablen, welche innerhalb des Wachstumsmodells gewählt werden können, wurde damit auf die nach Grundflächen gestaffelte Entnahme begrenzt und durch die Zusammenfassung in eine monetäre Größe in die Optimierung eingeführt.

---

<sup>51</sup> SAS = statistical analysis software

### 3.6.2 Vollständige Enumeration

Wenn alle möglichen Ergebnisse vorliegen, also alle Pfade und Knoten des Entscheidungsbaums in Zahlenform gespeichert sind, ist es naheliegend – und rechentechnisch nicht aufwendiger – das gesamte Ergebnis und nicht schrittweise Teillösungen zu betrachten. Dieses Vorgehen wird als vollständige Enumeration bezeichnet. Anhand der Ergebnisse der vollständigen Enumeration lässt sich auch die Lösung der Dynamischen Programmierung überprüfen.

Hierbei werden im Gegensatz zur Dynamischen Programmierung nicht nur die Maßnahmen in einem Zeitausschnitt von 5 Jahren betrachtet, sondern alle möglichen Nutzungen über 25 Jahre und zusätzlich der noch verbleibende Abtriebswert nach 30 Jahren aufsummiert und analog zur Dynamischen Programmierung in Gleichung 3 der Bodenertragswert addiert.

Der Weg zur Lösung wird mit der Formel in Gleichung 4 beschrieben, hierbei ist die Zielfunktion mit  $EN_{opt}$ , dem optimalen Pfad mit vollständiger Enumeration benannt.

Gleichung 4: Formel zur Bestimmung der Abfolge der optimalen Durchforstungen mit vollständiger Enumeration

$$EN_{opt} = \max \sum_{i=0}^5 \sum_{v_i=0}^4 N_{i,v_i} \cdot q^{-5i} + A_{30,v_i} \cdot q^{-30} \cdot \lambda_i + BEW \cdot q^{-(5i\delta+30\lambda_i)}$$

$\lambda_i, \dots, \lambda_5 = 0$  und  $\delta = 1$  falls  $v_{i-1} = 4$

sonst  $\lambda_i = 1$  und  $\delta = 0$

$i$  = Zeit in Perioden  $i \in \{0, 1, 2, 3, 4, 5\}$  jeweils multipliziert mit 5 ergibt Jahre

$v_i$  = Nutzungsvarianten  $v \in \{0, 1, 2, 3, 4\}$  zum Zeitpunkt  $i$

$N$  = Erlös der Nutzungsvariante

$A$  = Abtriebswert oder Bestandeswert

$q$  =  $1 + r$ ;  $r$  = Zinssatz

$BEW$  = Bodenertragswert des Bestandestyps

$\lambda$  = Korrekturfaktor  $\lambda \in \{0, 1\}$

$\delta$  = Korrekturfaktor  $\delta \in \{0, 1\}$

Falls  $v_{i-1} = 4$ , dann sind alle folgenden Nutzungen  $N_{i,v} = 0$  sowie der Abtriebswert  $A_{30} = 0$  und der Bodenertragswert  $BEW \cdot q^{-i}$  wird nur über den Zeitraum bis zur Verjüngungsnutzungsvariante diskontiert. Dadurch, dass  $N$  zu allen Zeitpunkten mit der Variante  $v$  der entsprechenden Zeitpunkte indiziert ist, und  $v$  alle Werte im zulässigen Bereich annehmen darf, wird sichergestellt, dass gerade alle  $5^5$  zulässigen Pfade erzeugt werden, aus denen das Maximum herausgesucht wird.

In einem Satz zusammengefasst:

*Optimal ist die höchste Barwertsumme aus allen Nutzungen, dem noch vorhandenen Abtriebswert am Ende des Bestandeslebens und dem Bodenertragswert.*

Weicht die optimale Lösung der Dynamischen Programmierung von der nach vollständiger Enumeration ab, so muss es in der Wertentwicklung der Zielfunktion auf der Zeitachse lokale Optima geben, an denen die Dynamische Programmierung auf einen nicht optimalen Nutzungspfad verzweigt.

### 3.7 Optimale Betriebsplanung

Wie im Kapitel Kenntnisstand erläutert, soll die praktische Forsteinrichtung für eine optimale Betriebsplanung um ökonomische Aspekte erweitert und zum Errechnen der besten Lösung auf das Verfahren der linearen Programmierung zurückgegriffen werden. Hierzu werden im Folgenden zwei Möglichkeiten der Formulierung verglichen: zum einen die Optimierung für einen Forstbetrieb mit nur einer zulässigen Durchforstungsvariante pro Modellbestand aus der optimalen Bestandesbehandlung und zum anderen eine Optimierung mit mehreren verschiedenen Bestandesbehandlungen zur Auswahl.

Die Zielvorgaben müssen dazu mit der real vorhandenen Ausstattung an Fläche, Holzvorrat, Material und Arbeitskapazität verknüpft werden. Als Datengrundlage wurde aus den 40 Modellbeständen ein Betrieb mit einer zugrunde gelegten Holzbodenfläche von 800 ha und einer regional typischen Altersklassenverteilung und Baumartenausstattung konstruiert. Im Weiteren

gelten alle naturalen Grundlagen, welche bereits in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben wurden. Die in das Optimierungstableau mit einer zulässigen Durchforstungsvariante aufgenommenen Bestandesbehandlungen sind die optimalen Durchforstungsgänge, welche das Ergebnis des Kapitels 4.4 darstellen. Endnutzungen aus der Durchforstungsoptimierung wurden nicht als solche ausgegeben, sondern wie ein ab dem Endnutzungszeitpunkt unbehandelter Bestand eingelesen, um in der betrieblichen Optimierung den Endnutzungszeitpunkt unabhängig bestimmen zu können.

Die Zielsetzungen von Waldeigentümern wurden nach eigenen Befragungen der Betriebsleiter im Projektgebiet anhand eines Gesprächsleitfadens ermittelt. Sie lassen sehr deutlich eine Gewinnmaximierungs- bzw. Überschussmaximierungsabsicht erkennen. Hier stehen im Privatwald ein Erhalt der Waldfläche als Grundvermögen der Familie des Besitzers und bei größeren Betrieben die Erzielung kontinuierlicher Einnahmen aus der Bewirtschaftung im Vordergrund.

Dabei gehen die Forderungen in Bezug auf eine tatsächliche Verzinsung des Waldvorratsvermögens auseinander. Diese reichen von einer klaren Zinsforderung von beispielsweise 2% über eine Zinsforderung von 4-5% bis zu einem Verzicht der Berechnung einer gesamtbetrieblichen Verzinsung. Als mittlerer Weg scheint deshalb eine Rechnung mit 2% Zinsen realitätsnah (siehe auch ENDRES 1923 – 3%, HEAL et al. 1996 – 2%<sup>52</sup>, MOOG und BORCHERT 2001 – 3-4% MÖHRING und RÜPING 2006 – 1,5% sowie KNOKE 2008 – 2%).

Die Untergliederung des Wirtschaftszieles in Produkt-, monetäre und Sicherheitsziele, wie sie SPEIDEL (1984) vornimmt, ist zur Formulierung eines ergebnisorientierten Produktionsplanes geeignet, wenn sie in Form von Restriktionen darstellbar sind. Es wird hierzu ein Hauptziel – in der Regel die Maximierung des Gewinns – definiert und dabei andere Ziele in Form von Mindest- oder Maximalgrößen als Nebenbedingungen hinzugefügt.

Um nun die optimale Lösung für das Problem der Betriebsplanung zu finden, welches im Grunde aus der Zuordnung von Behandlungen zu einzelnen

---

<sup>52</sup> Bei sehr langfristigen Investitionen in der Größenordnung von 100 Jahren.

Beständen und Zeitperioden besteht, wird hier das Optimierungsverfahren der Linearen Programmierung verwendet. Die Lineare Programmierung geht auf GEORGES B. DANTZIG zurück und dient bei Formulierung allgemeiner Ziele dazu, einen detaillierten Weg von Entscheidungen zur bestmöglichen Erreichung aufzuzeigen, wenn die praktische Fragestellung eine relativ hohe Komplexität aufweist (DANTZIG und THAPA 1997). Dabei basiert die Rechnung auf dem so genannten Simplex Algorithmus, welcher Schritt für Schritt die Ecken des zulässigen Lösungsraumes abschreitet und daraus das optimale Ergebnis ausgibt.

Die Umsetzung fand mit der in Excel implementierbaren Software *What'sBest!* der Firma LINDO Systems statt. Diese erlaubt die Formulierung von linearen Planungsproblemen mit 32.000 veränderbaren Zellen, 16.000 Restriktionen bzw. 3.200 nichtlinearen oder ganzzahligen Variablen. Hierzu müssen alle entscheidenden Eingangsgrößen in einem Optimierungstableau verknüpft werden. Die Art und Weise der Verbindung ist den nachfolgenden Formeln zu entnehmen.

### 3.7.1 Formulierung eines betrieblichen Optimierungsproblems

Um analog zur Formulierung des bestandesweisen Optimierungsproblems vorzugehen, schreibt sich die Formel zur betrieblichen Optimierung wie in Gleichung 5 folgt. Die Größe der Zielfunktion wird durch die zu maximierende Barwertsumme  $B_{opt}$  angegeben.

Gleichung 5: Formel zur Rechnung der optimalen Betriebsplanung mit linearer Programmierung

$$B_{opt} = \max \sum_{i=0}^5 \sum_{v \in \{0,4\}} \sum_{b=1}^{40} N_{i,b,v_i} \cdot q^{-i} \cdot f_{i,b} \cdot \lambda_i + A_{30,b} \cdot q^{-30} \cdot f_{30,b} \cdot \lambda_{30} \\ + BEW \cdot q^{-(5i\delta+30\lambda_i)} \cdot f_{i,b}$$

$\lambda_i, \dots, \lambda_5 = 0$  und  $\delta = 1$  falls  $v_{i-1} = 4$

sonst  $\lambda_i = 1$  und  $\delta = 0$

$i$  = Zeit in Perioden  $i \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$  jeweils multipliziert mit 5 ergibt Jahre

$b$  = Bestände  $b \in \{1, \dots, 40\}$  Bestandestypen nach Baumart, Altersklasse und Bonität



- $N$  = erntekostenfreie Erlöse der Nutzungen  
 $A$  = Abtriebswert nach 30 Jahren  
 $f$  = Flächen  
 $q$  =  $1 + r$ ;  $r$  = Zinssatz  
 $v_i$  = Variante der Behandlung  $v_i \in \{0,4\}$  0 = Bestand belassen 4 = Bestand ernten  
 BEW = Bodenertragswert  
 $\lambda_i$  = Korrekturfaktor  $\lambda_i \in \{0,1\}$   
 $\delta$  = Korrekturfaktor  $\delta \in \{0,1\}$

Unter den Nebenbedingungen:

$$(1) F = \sum_b f_{i,b} = 800 \text{ ha}$$

(F ist die insgesamt verfügbare Fläche der Bestände zu den jeweiligen Zeitpunkten und entspricht der Waldfläche des Betriebs)

$$(2) \lambda_i, \dots, \lambda_5 = 0 \text{ und } \delta = 1 \text{ falls } v_{i-1} = 4 \\ \text{sonst } \lambda_i = 1 \text{ und } \delta = 0$$

(Korrekturfaktor, der sicherstellt, dass bei Ernte des Bestands alle folgenden Nutzungen den Wert ,0' annehmen)

$$(3) (\forall f \in \mathbb{R}^+_0): f_{i,b} \leq f$$

(Für alle Flächen  $f$  gibt es eine Flächengröße  $f$  in  $\mathbb{R}^+_0$  [Raum der positiven Zahlen mit 0], sodass  $f_{i,b}$  immer durch die verfügbare Fläche des Bestandestyps zum jeweiligen Zeitpunkt begrenzt wird. Durch  $\mathbb{R}^+_0$  wird die Nichtnegativitätsbedingung sichergestellt)

$$(4) f = f_{VN} + f_{VJ}$$

(Fläche ist jeweils als Vornutzung  $f_{VN}$  – mit Durchforstungserträgen oder Verjüngungsnutzung  $f_{VJ}$  zuzuordnen)

$$(5) \text{ falls } f_{i,b} = f_{VJ} \text{ dann } f_{(i+1),b} = 0$$

(Wenn die vorhergehende Nutzung eine Verjüngungsnutzung ist, nimmt die Fläche der nachfolgenden Nutzungen den Wert ,0' an.)

$$(6) \text{ Hiebssatz } \leq 1-18 \text{ Efm/ha/a}^{53}$$

(Hiebssatz als Nutzungssatz pro Periode bleibt unter der festgelegten Obergrenze)

---

<sup>53</sup> Im verwendeten Beispiel stellen höhere Hiebssätze als 18 Efm/ha/a für das Optimierungssystem im gewählten Beispiel keine bindende Restriktion dar und müssen deswegen nicht gesondert angegeben werden.

$$(7) \sum_{\substack{i=1 \\ b \in \{1, \dots, 40\}}}^5 N_{i,b} \cdot f_i / F \cdot 5 \geq 100-370 \text{ €/ha/a}^{54}$$

(Summe der jährlichen Erlöse aller Nutzungen eines Zeitpunktes erreicht den jeweils geforderten Deckungsbeitrag)

Die beschriebene Gleichung 5 ist nicht ganz analog zu der von KNOKE (2003b), DIRSCH und KNOKE (2007), sowie KÜBLBÖCK (2008) verwendeten Grundlage. Im vorliegenden Fall werden die Kulturkosten nicht direkt, sondern indirekt über die Addition des Bodenertragswertes hinzugefügt. Dies geschieht bei allen im Verlauf der Optimierung geernteten Beständen und bei ungeernteten Beständen entsprechend zum Ende des Planungshorizontes über die Addition des gleichermaßen diskontierten Bodenertragswertes.

Für detailliertere Beschreibungen der Formulierung eines linearen Planungsproblems für einen Forstbetrieb sei auf BUONGIORNO und GILLESS (2001), KNOKE (2003b), ESSER (2005) sowie KÜBLBÖCK (2008) verwiesen.

### 3.7.2 Einbinden verschiedener Behandlungsvarianten

Bisher wurden forstliche Planungsprobleme unter Festlegung einer bestimmten Durchforstungsvariante bzw. mit fest vorgegeben Vornutzungssätzen der Forsteinrichtung gelöst. Im Rahmen dieser Arbeit war es Zielsetzung, eine Auswahl von verschiedenen Durchforstungsverfahren, die auf der Bestandesebene bewertet wurden, in die betriebliche Optimierung einzustellen.

Zur Formulierung eines Optimierungsproblems mit mehreren Durchforstungen muss, in Erweiterung des gängigen Schemas, sichergestellt werden, dass sobald auf einer Teilfläche ein bestimmtes Behandlungskonzept gewählt wurde, dieses auch bis zum Ende weiter verfolgt wird. Ein Wechsel innerhalb eines Bestandestyps von einem beispielsweise zunächst stark durchforsteten Bestand mit hohen Nutzungserträgen zu einem undurchforsteten Bestand mit hohem Endwert ist nicht zulässig. Aufgrund der Kapazitäten der verwendeten Optimierungssoftware konnten nicht alle pro

---

<sup>54</sup> Auch hier, bezogen auf den verwendeten Beispielsbetrieb, sind Deckungsbeiträge unter 100 €/ha/a nicht bindend. Die noch lösbare Obergrenze liegt bei etwas über 370 €/ha/a.

Bestand gerechneten 3125 Varianten<sup>55</sup> in das Optimierungstableau eingelesen werden. Es wurden hieraus sieben verschiedene Durchforstungsregimes festgelegt. Die sieben ausgewählten Durchforstungsmöglichkeiten sind:

- keine Durchforstung
- regelmäßige schwache Durchforstung
- regelmäßige mittelstarke Durchforstung
- regelmäßige starke Durchforstung
- abwechselnd schwache und mittlere Durchforstung
- abwechselnd mittlere und starke Durchforstung
- starke Durchforstung aussetzend schwächer werdend

Falls die optimale Behandlungsvariante der bestandesweisen Optimierung der Durchforstung noch nicht enthalten war, wurde diese zusätzlich als achte Variante angehängt.

Die Zielfunktion wird hierfür erweitert zu:

Gleichung 6: Formel zur Rechnung der optimalen Betriebsplanung mit 8 verschiedenen Durchforstungsregimes

$$B_{\text{opt}} = \max \sum_{i=0}^5 \sum_{v \in \{0,4\}} \sum_{b=1}^{40} \sum_{d=1}^8 N_{i,v,b,d} \cdot q^{-5i} \cdot f_{i,b,d} \cdot \lambda_{5i} \\ + A_{30,b,d} \cdot q^{-30} \cdot \lambda_{30} + \text{BEW} \cdot q^{-(5i\delta+30\lambda_i)} \cdot f_{i,b}$$

$\lambda_i, \dots, \lambda_5 = 0$  und  $\delta = 1$  falls  $v_{i-1} = 4$

sonst  $\lambda_i = 1$  und  $\delta = 0$

$i$  = Zeit in Perioden (multipliziert mit 5 in Jahren)  $i \in \{0, \dots, 5\}$

$b$  = Bestände  $b \in \{1, \dots, 40\}$  Bestandestypen nach Baumart, Altersklasse und Bonität

$N$  = erntekostenfreie Erlöse der Nutzungen

---

<sup>55</sup> 3125 (mögliche Durchforstungsvarianten) x 40 (Modellbestände) x 6 (Perioden) = 750.000 Kombinationsmöglichkeiten

- A = Abtriebswert nach 30 Jahren  
 f = Flächen  
 q =  $1 + r$ ; r = Zinssatz  
 $v_i$  = Variante der Behandlung  $v_i \in \{0,4\}$  0 = Bestand belassen 4 = Bestand ernten  
 d = Durchforstungsregime  $d \in \{1, \dots, 8\}$   
 BEW = Bodenertragswert  
 $\lambda$  = Korrekturfaktor  
 $\delta$  = Korrekturfaktor  $\delta \in \{0,1\}$

Unter den Nebenbedingungen:

Nebenbedingungen (1)-(7) siehe Gleichung 5

und

$$(8) f_{5,b,d} = f_{10,b,d} = f_{15,b,d} = f_{20,b,d} = f_{25,b,d} = f_{30,b,d}$$

(Das einmal gewählte Durchforstungsregime ‚d‘ für einen Bestand ‚b‘ wird auf der jeweiligen Fläche bis zum Zeitpunkt  $i = 5$  beibehalten.)

$$(9) f_{VN,i,d} = f_{VJ,i+1,d} + f_{VN,i+1,d}$$

(Die Fläche der jeweils gewählten Durchforstung steht in der nachfolgenden Periode für Durchforstung oder Verjüngung zur Verfügung)

$$(10) f_{VJ,i+1,d} + f_{VN,i+1,d} \leq (f_{VJ,20,d} + f_{VN,20,d}) - f_{VJ,25,d}$$

(Die zum Zeitpunkt  $i = 6$ , d.h. nach 30 Jahren noch vorhandenen Flächen – rechter Teil der Ungleichung – dürfen zum Erhalt des Restwerts im linken Teil der Ungleichung nicht überschritten werden.)

Diese Formulierung des optimalen Betriebsplanungsproblems mit verschiedenen Durchforstungsvarianten in Gleichung 6 erlaubt damit den Vergleich mit den Ergebnissen der betrieblichen Optimierung, bei welchen nur jeweils die Verjüngung des Bestands zur Auswahl steht.

## 4 Ergebnisse

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Modellbestandsbildung, der waldwachstumskundlichen Prognose sowie der optimalen Bestandesbehandlung und Betriebsplanung dargestellt.

### 4.1 Die Modellbestände

Die aus der Stratifizierung entstandenen 40 Bestände werden im Folgenden in ihrem Flächenumfang, d.h. ihrer Repräsentativität, ihren Eigenschaften, ihrer Datenhinterlegung und mit den entsprechenden Streuungsparametern beschrieben.

Bei einer Einteilung nach Baumartenanteilen und Bonität ergeben sich insgesamt sieben Modellbestandstypen beziehungsweise Baumartenstraten. Diese haben folgende Flächenanteile am Projektgebiet (Abbildung 18):

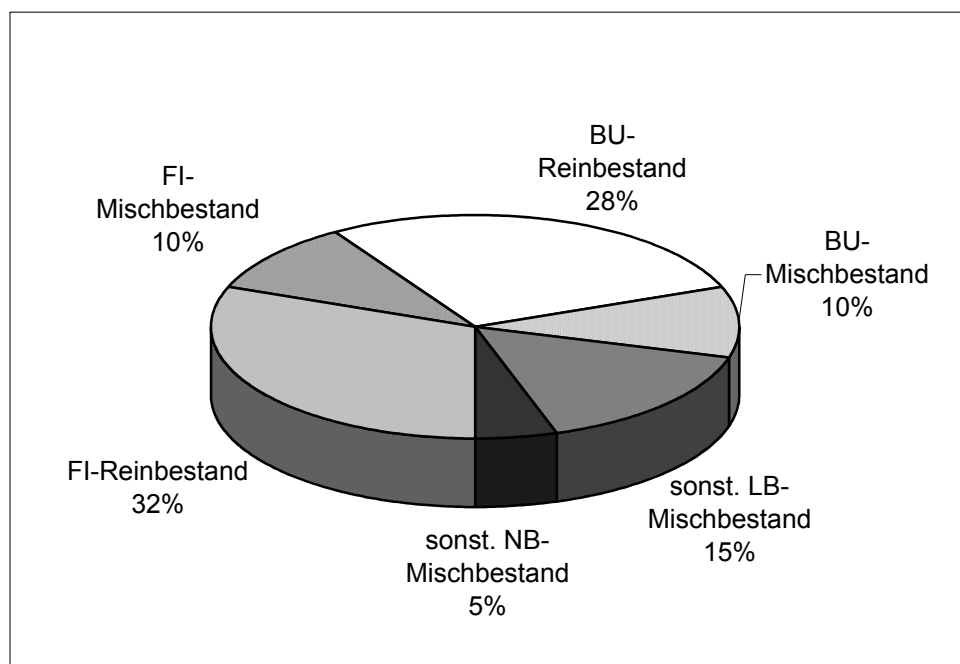


Abbildung 18: Flächenanteile der Modellbestandstypen nach BWI Daten gewichtet

Erweitert man das Stratifizierungsschema um die Ebene der Altersstraten, so verteilen sich die Inventurpunkte auf die 40 Bestände wie folgt (Tabelle 7):

Tabelle 7: Anzahl der Inventurpunkte pro Modellbestand

| Altersklasse                      | I        | II       | III | IV | V  | VI |
|-----------------------------------|----------|----------|-----|----|----|----|
| Fichtenreinbestand untere Bonität | 14       | 30       | 18  | 10 | 13 |    |
| Fichtenreinbestand obere Bonität  | 4        | 19       | 11  | 11 | 3  |    |
| Fichtenmischbestand               | 11       | 4        | 8   | 3  | 19 |    |
| Buchenreinbestand untere Bonität  | 13       | 7        | 5   | 9  | 7  | 33 |
| Buchenreinbestand obere Bonität   | <u>0</u> | <u>1</u> | 7   | 9  | 11 | 20 |
| Buchenmischbestand                | 4        | 3        | 4   | 10 | 23 |    |
| Sonst. Laubholz-mischbestand      | 16       | 20       | 11  | 20 |    |    |
| Sonst. Nadelholz-mischbestand     | 2        | 11       | 7   | 2  |    |    |

Aufgrund der relativ niedrigen Zahl an Traktecken waren die Buchenreinbestände der ersten und zweiten Altersklasse (in Tabelle 7 grau und unterstrichen) nicht sehr gut mit Inventurpunkten hinterlegt. Die unterstrichenen Modellbestände wurden, wie eingangs beschrieben (Kapitel 3.2), generiert. Es wurden 433 Inventurpunkte zur Modellbestandsbildung verwendet, die restlichen Inventurpunkte mussten aufgrund fehlender Alters- oder Höhenangaben für die Hauptbestandesschicht (8 Punkte) sowie wegen zu geringer Durchmesser (32 Punkte) ausscheiden.

Die gebildeten Fichten-Modellbestände lassen sich wie folgt charakterisieren: Das Zuordnungskriterium „Baumartenanteil Fichte mindestens 80%“ führt zu sehr homogenen Fichtenbeständen.

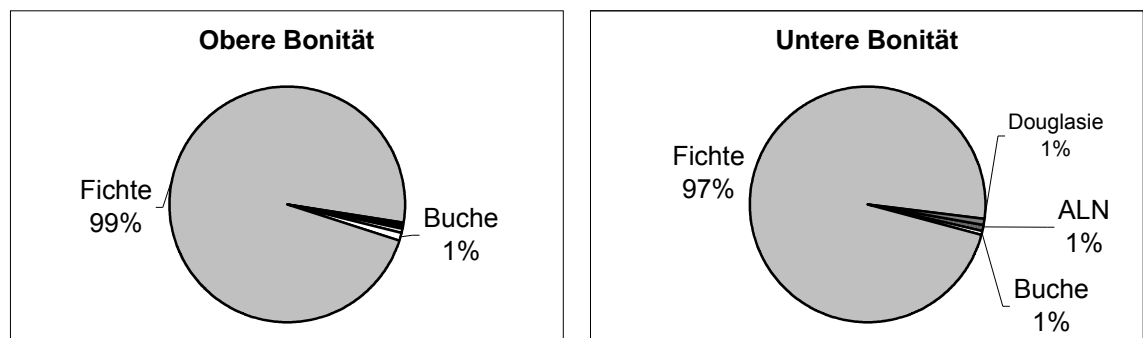


Abbildung 19 und Abbildung 20: Baumartenanteile der Fichten-Reinbestände aller Altersklassen

Die Mischbaumartenanteile in den Fichtenreinbeständen der unteren und oberen Bonität in Abbildung 19 und Abbildung 20 unterscheiden sich leicht.

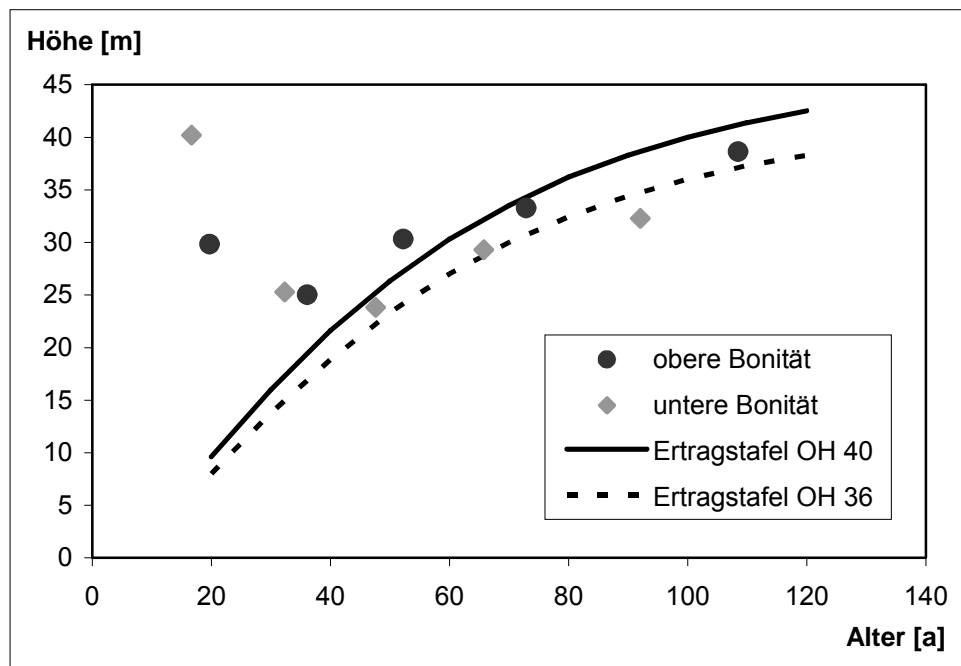


Abbildung 21: Oberhöhe (OH) der Fichtenreinbestände im Vergleich zur Ertragstafel<sup>56</sup>

Der Vergleich mit der Ertragstafel macht deutlich, dass die Modellbestände in ihrem Leistungspotential des Standorts (siehe Abbildung 21) gut mit den Ertragstafelwerten übereinstimmen. Ein Blick auf Grundfläche und Vorrat in Abbildung 22 und Abbildung 23 zeigt jedoch, dass sich Grundfläche und Vorrat der Ertragstafel und der Realität stark unterscheiden. Dies liegt sicher zum einen an den starken Sturmereignissen und den damit verbundenen Zwangsnutzungen der vergangenen Jahre, zum anderen aber auch an einem grundsätzlichen Wandel der Bestandesbehandlung. Stärkere hochdurchforstungsartige Eingriffe haben in den letzten Jahrzehnten an Bedeutung gewonnen. Ein ähnliches Bild ergeben auch die Buchenreinbestände.

<sup>56</sup> Ertragstafel für Fichte: ASSMANN-FRANZ (1963) Oberhöhenbonität 40 (bzw. 36), mittleres Ertragsniveau

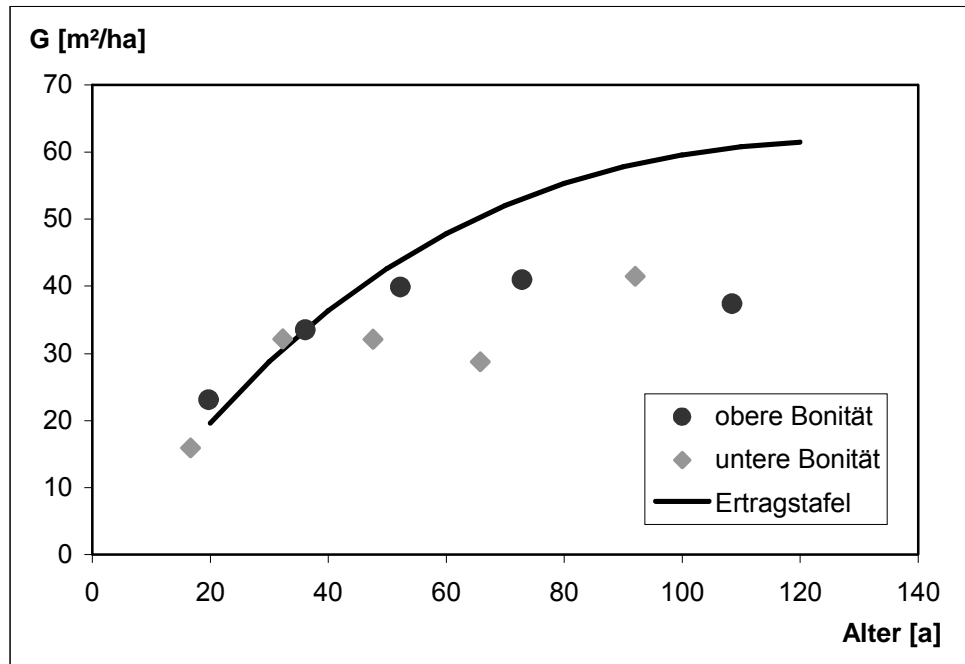


Abbildung 22: Grundfläche der Fichtenreinbestände im Vergleich zur Ertragstafel<sup>57</sup>

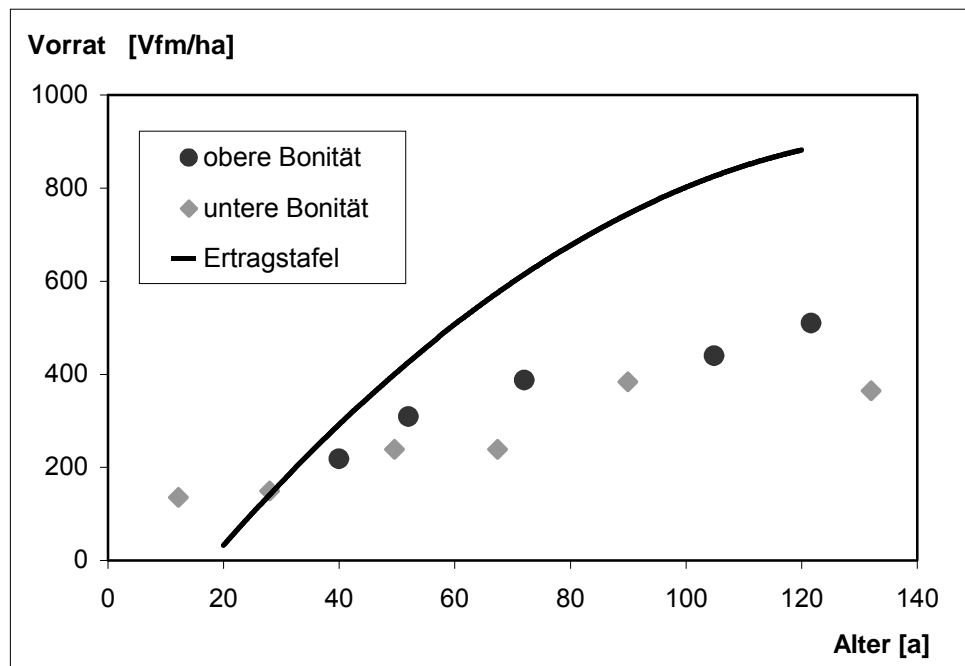


Abbildung 23: Vorrat der Fichtenreinbestände im Vergleich zur Ertragstafel<sup>58</sup>

<sup>57</sup> Ertragstafel für Fichte: ASSMANN-FRANZ (1963) Oberhöhenbonität 40 (bzw. 36), mittleres Ertragsniveau

<sup>58</sup> Ertragstafel für Fichte: ASSMANN-FRANZ (1963) Oberhöhenbonität 40 (bzw. 36), mittleres Ertragsniveau



Tabelle 8: Ertragskundliche Daten der Fichtenreinbestände und der Fichten- und Buchenmischbestände

|   | Altersklasse                | I    | II   | III | IV  | V   |
|---|-----------------------------|------|------|-----|-----|-----|
| <b>Fichtenreinbestände<br/>obere Bonität</b>  | <b>Alter [a]</b>            | 20   | 36   | 52  | 73  | 108 |
|   | <b>N/ha</b>                 | 1145 | 892  | 508 | 303 | 252 |
|   | <b>G [m<sup>2</sup>/ha]</b> | 23   | 34   | 40  | 41  | 37  |
|   | <b>Vorrat [Vfm/ha]</b>      | 212  | 340  | 516 | 601 | 620 |
| <b>Fichtenreinbestände<br/>untere Bonität</b> | <b>Alter [a]</b>            | 17   | 32   | 48  | 66  | 92  |
|   | <b>N/ha</b>                 | 1073 | 1404 | 684 | 427 | 359 |
|   | <b>G [m<sup>2</sup>/ha]</b> | 16   | 32   | 32  | 29  | 41  |
|   | <b>Vorrat [Vfm/ha]</b>      | 100  | 245  | 334 | 337 | 583 |
| <b>Fichten-<br/>mischbestände</b>             | <b>Alter [a]</b>            | 15   | 29   | 52  | 66  | 108 |
|   | <b>N/ha</b>                 | 1164 | 2155 | 555 | 362 | 263 |
|   | <b>G [m<sup>2</sup>/ha]</b> | 13   | 31   | 31  | 35  | 30  |
|   | <b>Vorrat [Vfm/ha]</b>      | 81   | 217  | 351 | 440 | 442 |
| <b>Buchen-<br/>mischbestände</b>              | <b>Alter [a]</b>            | 16   | 32   | 52  | 73  | 123 |
|   | <b>N/ha</b>                 | 604  | 716  | 930 | 382 | 317 |
|   | <b>G [m<sup>2</sup>/ha]</b> | 9    | 14   | 31  | 21  | 34  |
|   | <b>Vorrat [Vfm/ha]</b>      | 47   | 86   | 339 | 276 | 503 |

Tabelle 9: Ertragskundliche Daten der Buchenreinbestände und der sonstigen Laub- und Nadelholzmischbestände

|  | <b>Altersklasse</b>         | <b>I</b> | <b>II</b> | <b>III</b> | <b>IV</b> | <b>V</b> | <b>VI</b> |
|--|-----------------------------|----------|-----------|------------|-----------|----------|-----------|
| <b>Buchenreinbestände<br/>obere Bonität</b>  | <b>Alter [a]</b>            | 20       | 40        | 52         | 72        | 105      | 122       |
|  | <b>N/ha</b>                 | 7816     | 1244      | 495        | 411       | 314      | 206       |
|  | <b>G [m<sup>2</sup>/ha]</b> | 23       | 24        | 25         | 26        | 28       | 29        |
|  | <b>Vorrat [Vfm/ha]</b>      | 82       | 218       | 309        | 388       | 407      | 509       |
| <b>Buchenreinbestände<br/>untere Bonität</b> | <b>Alter [a]</b>            | 12       | 28        | 50         | 67        | 90       | 132       |
|  | <b>N/ha</b>                 | 409      | 1089      | 857        | 451       | 738      | 279       |
|  | <b>G [m<sup>2</sup>/ha]</b> | 11       | 18        | 27         | 22        | 32       | 27        |
|  | <b>Vorrat [Vfm/ha]</b>      | 136      | 150       | 239        | 239       | 384      | 365       |
| <b>Sonst. Laubbaum -<br/>mischbestände</b>   | <b>Alter [a]</b>            | 12       | 43        | 80         | 156       |          |           |
|  | <b>N/ha</b>                 | 610      | 900       | 645        | 381       |          |           |
|  | <b>G [m<sup>2</sup>/ha]</b> | 12       | 29        | 35         | 29        |          |           |
|  | <b>Vorrat [Vfm/ha]</b>      | 121      | 278       | 440        | 382       |          |           |
| <b>Sonst. Nadelbaum-<br/>mischbestände</b>   | <b>Alter [a]</b>            | 17       | 44        | 77         | 125       |          |           |
|  | <b>N/ha</b>                 | 222      | 872       | 415        | 430       |          |           |
|  | <b>G [m<sup>2</sup>/ha]</b> | 7        | 24        | 31         | 31        |          |           |
|  | <b>Vorrat [Vfm/ha]</b>      | 48       | 208       | 400        | 362       |          |           |

Die Baumartenanteile der übrigen Bestände verteilen sich wie folgt:

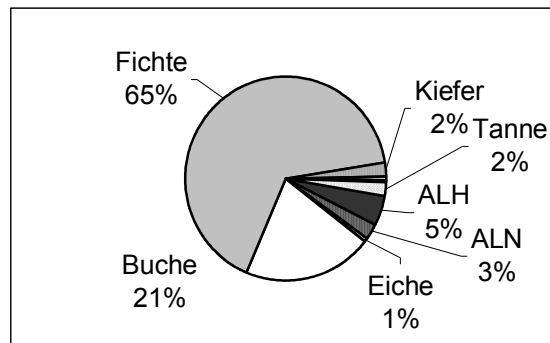


Abbildung 24: Baumartenanteile der Fichtenmischbestände aller Altersklassen

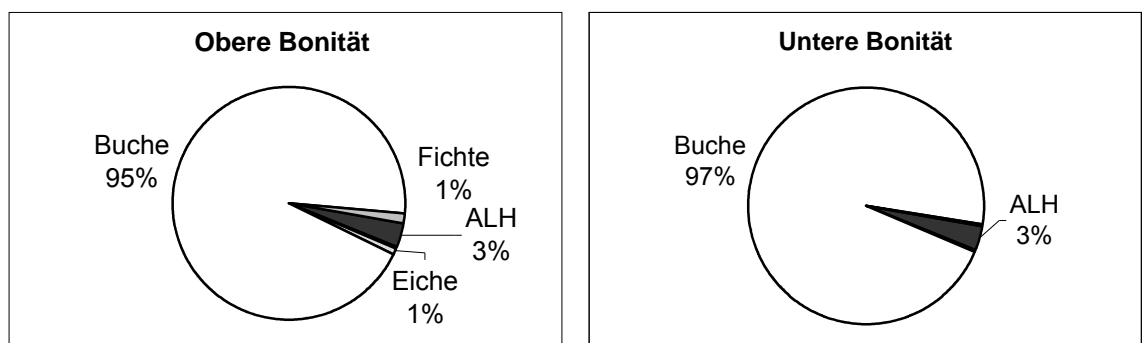


Abbildung 25 und Abbildung 26: Baumartenanteile der Buchenreinbestände aller Altersklassen

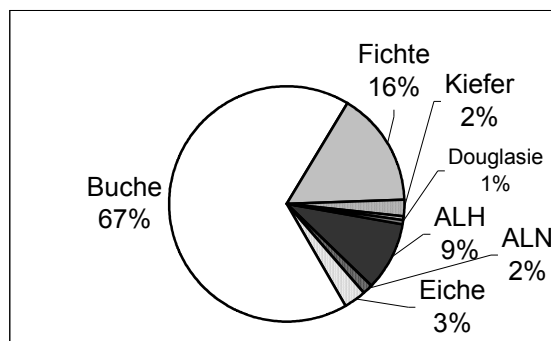


Abbildung 27: Baumartenanteile der Buchenmischbestände aller Altersklassen

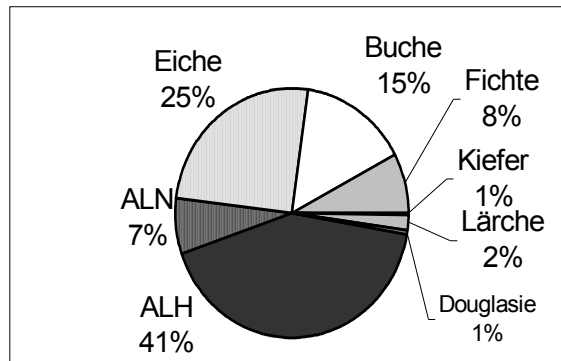


Abbildung 28: Baumartenanteile der sonstigen Laubbaummischbestände aller Altersklassen

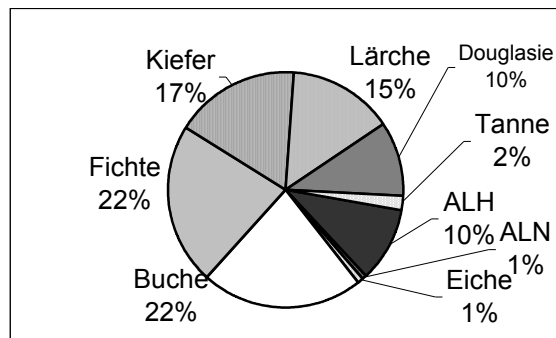


Abbildung 29: Baumartenanteile der sonstigen Nadelbaummischbestände aller Altersklassen

## 4.2 Das Waldwachstum

Um die Auswirkungen der verschiedenen Durchforstungsstärken zu zeigen, und einen Eindruck von der Wuchsleistung zu bekommen, werden vier ausgewählte Wachstumsverläufe für zwei mittelalte Reinbestände vorgestellt.

Die hinterlegten Eingriffsstärken entsprechen dabei folgendem Schema:

undurchforstet = keine Entnahme

schwach = regelmäßige Entnahme<sup>59</sup> von 10% der Grundfläche

mittel = regelmäßige Entnahme von 25% der Grundfläche

stark = regelmäßige Entnahme von 50% Grundfläche.

<sup>59</sup> Bezogen auf den unbehandelten Bestand. Regelmäßig heißt alle fünf Jahre ein Eingriff.

Unter regelmäßiger Entnahme wird dabei verstanden, dass nach der ersten noch unbehandelten Periode alle fünf Jahre ein Durchforstungseingriff stattfindet. Ähnliche Eingriffsstärken mit der Abstufung 15, 35 und 50% haben PESONEN und HIRVELÄ (1992) in ihrer Untersuchung zu Durchforstungsmodellen für Südfinnland verwendet. Ebenfalls auf der Grundflächenentnahme basierte Entnahmesätze verwendet HINRICHS (2006), wobei seine Abstufungen wesentlich moderatere Eingriffe vorsehen.

Es ist jeweils die Entwicklung in den fünf aufeinanderfolgenden Perioden dargestellt und die Ausgangssituation in der ersten Periode sowie der Zustand nach den Maßnahmen. Beim Blick auf die Grundflächenentwicklung des Buchenreinbestandes in Abbildung 30, sowie des Fichtenreinbestandes in Abbildung 31, zeigt sich, dass die unbehandelten Varianten in ihrer simulierten Wuchsleistung weit über die Daten der Ertragstafeln hinausgehen. Außerdem wird deutlich, dass es Schwierigkeiten gibt, bei wiederholter Entnahme von 50% der Grundfläche, in der stärksten Durchforstung, noch Bäume für die Entnahme im Sinne einer Hochdurchforstung auszuwählen. Die Grundflächenabnahmen bleiben hinter den erwarteten Werten des Entnahmeschemas zurück und steigen, weil der Zuwachs die technisch noch mögliche Entnahme sogar leicht übertrifft.

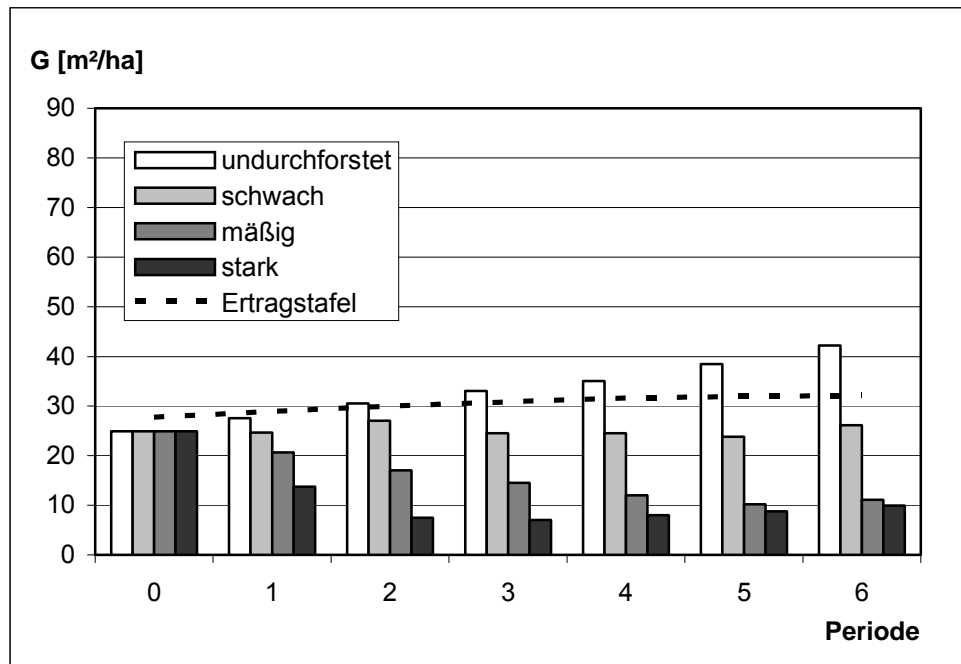


Abbildung 30: Grundflächenentwicklung des Buchenreinbestands, III. Alterskl., ob. Bonität mit gestaffelter Eingriffsstärke gegenüber WIEDEMANN (1931)<sup>60</sup> I. Ertragskl.

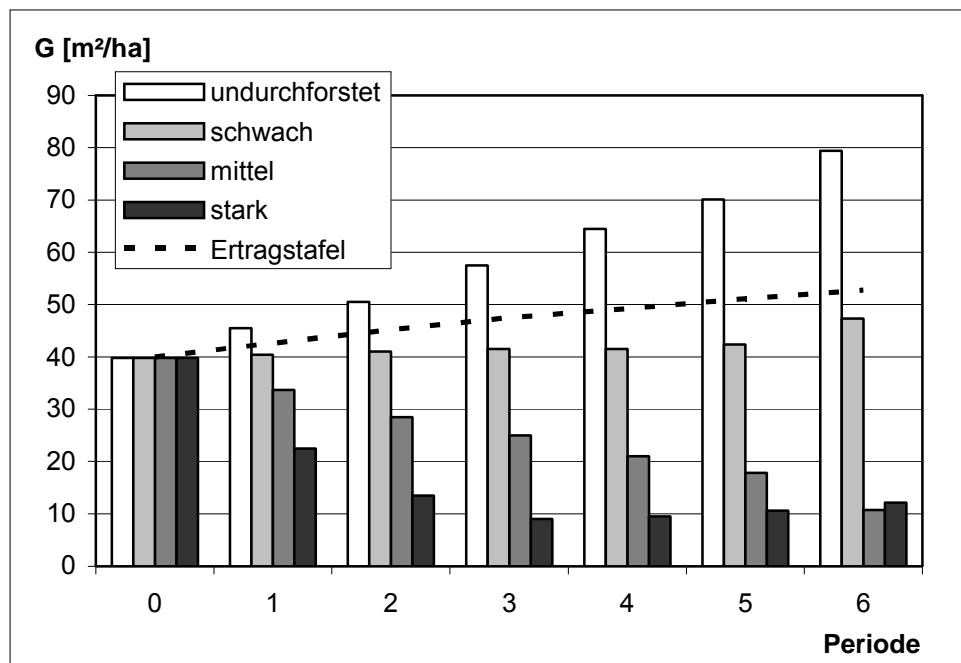


Abbildung 31: Grundflächenentwicklung des Fichtenreinbestands, III. Altersklasse, obere Bonität mit gestaffelter Eingriffsstärke gegenüber ASSMANN/FRANZ (1963) Oberhöhenbonität 40

Es zeigt sich grundsätzlich, dass das Wachstum, gerade in den jüngeren Beständen, durchweg über den Ertragstafelwerten liegt. In den älteren

<sup>60</sup> WIEDEMANN (1931) Ertragstafel für Rotbuche mäßige Durchforstung

Beständen wurden durch Nutzungen die Grundflächen und Vorräte unter die Tafelwerte abgesenkt. Es muss natürlich beachtet werden, dass vorhergehende Nutzungen nicht in den Vornutzungen aufscheinen, da sie außerhalb des jeweils betrachteten Zeitraums für die verschiedenen alten Bestände liegen. Die gewählte Darstellung der unechten Zeitreihen unterschlägt damit einen Teil der Vornutzungserträge beziehungsweise erlaubt es, beispielsweise bei stärkeren Eingriffen, auf ein relativ hohes Vorratsniveau zurückzugreifen, welches bei gleicher Behandlung über das gesamte Bestandesleben so nicht vorhanden wäre.

Betrachtet man die Durchmesser des Grundflächenmittelstamms ( $d_g$ ) des verbleibenden und des ausscheidenden Bestands für verschiedene Durchforstungsstärken, so kann man Rückschlüsse auf die Homogenität der Bäume in den jeweiligen Kollektiven ziehen. In der Abbildung 32 und Abbildung 33 sind jeweils die  $d_g$  der einzelnen fünfjährigen Simulationsperioden dargestellt. Die Eingriffe entsprechen wiederholten schwachen, mäßigen und starken Eingriffen analog zur Abbildung 30 und Abbildung 31. Höhere Abweichungen sind jeweils vor allem bei der starken Durchforstung zu verzeichnen. Die starken Zunahmen im  $d_g$  des verbleibenden Bestandes bei starker Durchforstung in Abbildung 33 sind auf eine rechnerische Verschiebung zurückzuführen. Analog sinkt der  $d_g$  der entnommenen Bäume. In den älteren Altersklassen nehmen die Abweichungen noch zu. Dies liegt an der geringeren Stammzahl insgesamt, wo die einzelne Entnahme eines dickeren oder dünneren Baumes noch stärker ins Gewicht fällt. Es kann jedoch von einigermaßen gleichmäßigen Kollektiven ausgegangen werden.

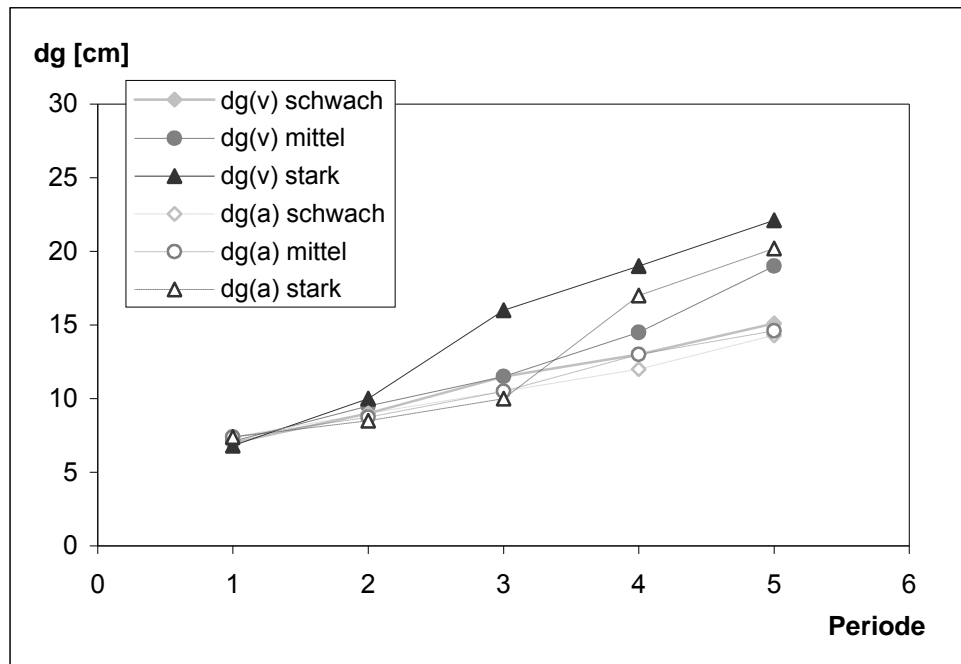


Abbildung 32: Durchmesserentwicklung des Buchenreinbestands, jeweils verbleibender  $d_g(v)$  und ausscheidender Bestand  $d_g(a)$ , der oberen Bonität, I. Altersklasse über 5 Perioden und drei Durchforstungsstärken.

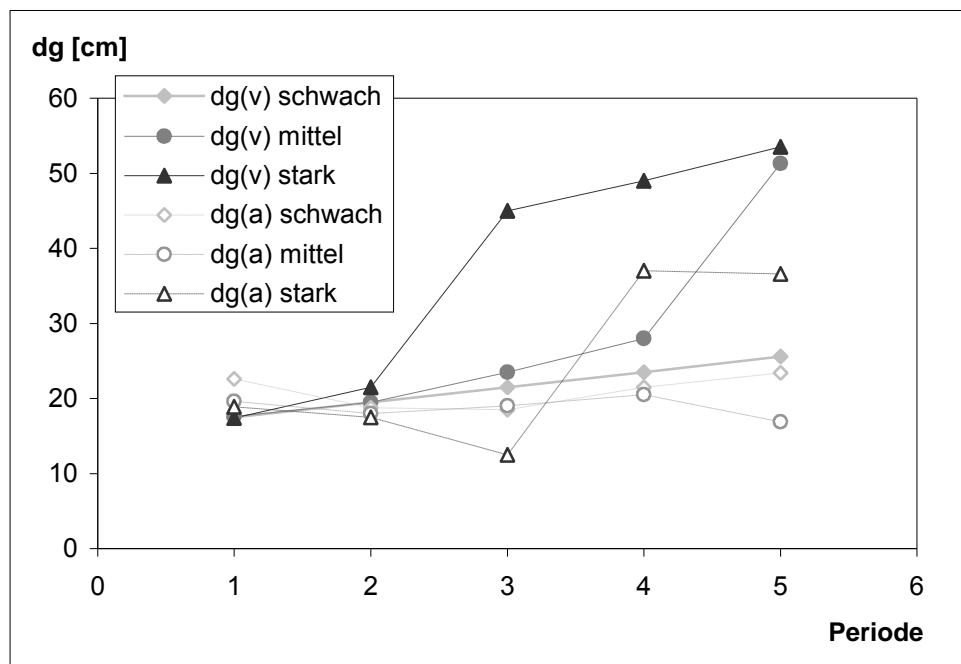


Abbildung 33: Durchmesserentwicklung des Fichtenreinbestands, jeweils verbleibender  $d_g(v)$  und ausscheidender Bestand  $d_g(a)$ , der oberen Bonität, I. Altersklasse über 5 Perioden und drei Durchforstungsstärken.

Wichtiges Kriterium für die Einbindung der Ergebnisse in eine Optimierung sind die Schwankungsbereiche innerhalb derer sich die Wachstumsprognose bewegt. Exemplarisch ist dies für zufällig ausgewählte Modellbestände aus



den Berechnungen des Wachstumsmodells SILVA 2.2 bei fünfmaliger Prognosewiederholung über 9 Perioden Simulation, ohne natürliche Mortalität nach KÜBLBÖCK (2008) in Tabelle 10 dargestellt.

Tabelle 10: Prozentuale Standardfehler für die Grundfläche und den Vorrat des verbleibenden Bestands

|   | Grundfläche verbl. Bestand   |                              |                            | Vorrat verbl. Bestand        |                              |                            |
|---|------------------------------|------------------------------|----------------------------|------------------------------|------------------------------|----------------------------|
|   | kleinster Standardfehler [%] | mittlerer Standardfehler [%] | größter Standardfehler [%] | kleinster Standardfehler [%] | mittlerer Standardfehler [%] | größter Standardfehler [%] |
| <b>BURB, ob. Bon., I. Aikl.</b> <sup>61</sup> | 0,1                          | 0,7                          | 4,0                        | 0,1                          | 1,6                          | 6,8                        |
| <b>BURB, unt. Bon., IV. Aikl.</b>             | 0,1                          | 6,0                          | 10,9                       | 0,3                          | 6,0                          | 10,8                       |
| <b>FIRB, unt. Bon., I. Aikl.</b>              | 0,1                          | 0,8                          | 31,8                       | 0,1                          | 0,8                          | 32,3                       |
| <b>FIRB, ob. Bon., V. Aikl.</b>               | 0,1                          | 0,1                          | 0,3                        | 0,1                          | 0,1                          | 0,3                        |
| <b>BUMB, II. Aikl.</b>                        | 0,1                          | 1,8                          | 13,5                       | 0,4                          | 2,3                          | 13,8                       |
| <b>FIMB, V. Aikl.</b>                         | 0,1                          | 0,4                          | 5,0                        | 0,1                          | 0,5                          | 5,8                        |
| <b>sNBMB, II. Aikl.</b>                       | 0,1                          | 3,0                          | 1,6                        | 0,1                          | 0,5                          | 1,7                        |
| <b>sLBMB, III. Aikl.</b>                      | 0,1                          | 3,0                          | 1,6                        | 0,1                          | 0,5                          | 1,6                        |

Dies konnte nicht durch mehrmalige Prognosewiederholung, wie üblich, aufgefangen werden, da bei der Durchforstungsstärkeinstellung die Steuerdatei der neuen Periode durch Überschreiben der Alten generiert wird. Dabei ist das Überschreiben als Synthese aus mehreren Prognoseläufen nicht möglich, weil ja die tatsächlich auf der Fläche stehenden Bäume nicht gemittelt werden können. Hinzu kommt, dass sich der Aufwand mit weiteren Läufen potenziert. Eine höhere Genauigkeit wäre höchstens im Nachgang in der Darstellung aus den Mittelwerten, nicht aber im Datensatz selber gegeben.

<sup>61</sup> BURB = Buchenreinbestand, FIRB = Fichtenreinbestand, BUMB = Buchenmischbestand, FIMB = Fichtenmischbestand, sNBMB = sonstiger Nadelbaummischbestand, sLBMB = sonstiger Laubbaummischbestand

### 4.3 Die Bodenertragswerte

Auf die Bildung von unechten Zeitreihen wurde auch bei der Bodenertragswertberechnung zurückgegriffen. Exemplarisch sind die Bodenertragswerte der Variante mit 2% Zins in Abbildung 34 für Fichtenreinbestände der verschiedenen Bonitäten dargestellt.

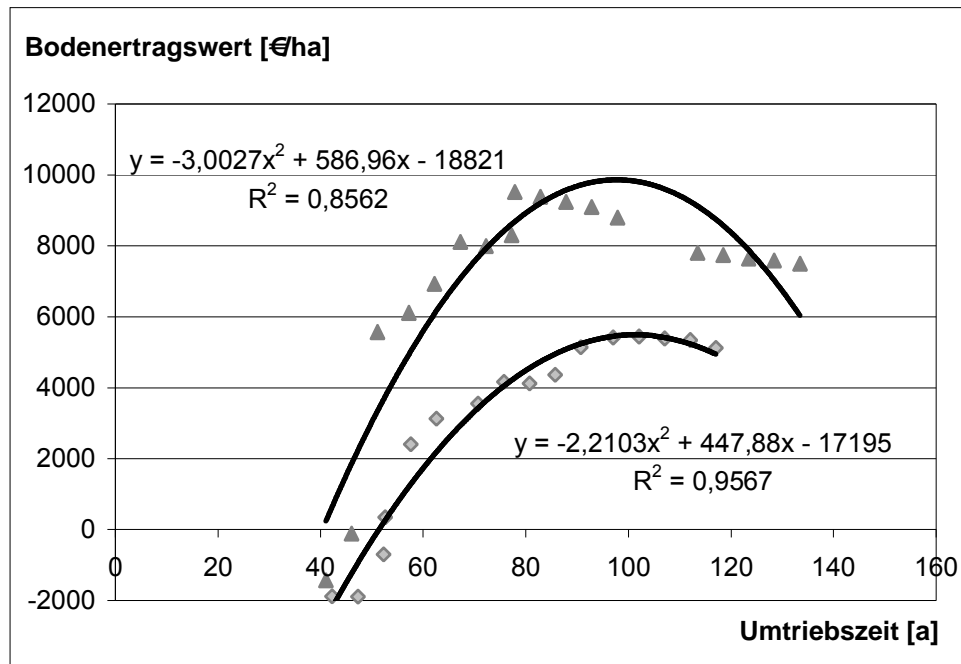


Abbildung 34: Unechte Zeitreihe aus Bodenertragswerten zweier Fichtenreinbestände, obere Bonität (▲) und untere Bonität (◇) mit Ausgleichsfunktion und Bestimmtheitsmaß ( $R^2$ ) bei 2% Zins

Hierbei sieht man beispielsweise in der oberen Bonität deutlich die einzelnen Zeitreihen und die Übergänge im Alter 50, 80 und 120.

Zum Vergleich zeigt Abbildung 35 die Bodenertragswerte der Fichten- und Buchenmischbestände gerechnet mit einem Zinsfuß von 2%. Hier wird deutlich, dass der weniger ertragreiche Buchenmischbestand auch eine etwas längere optimale Umtriebszeit aufweist.

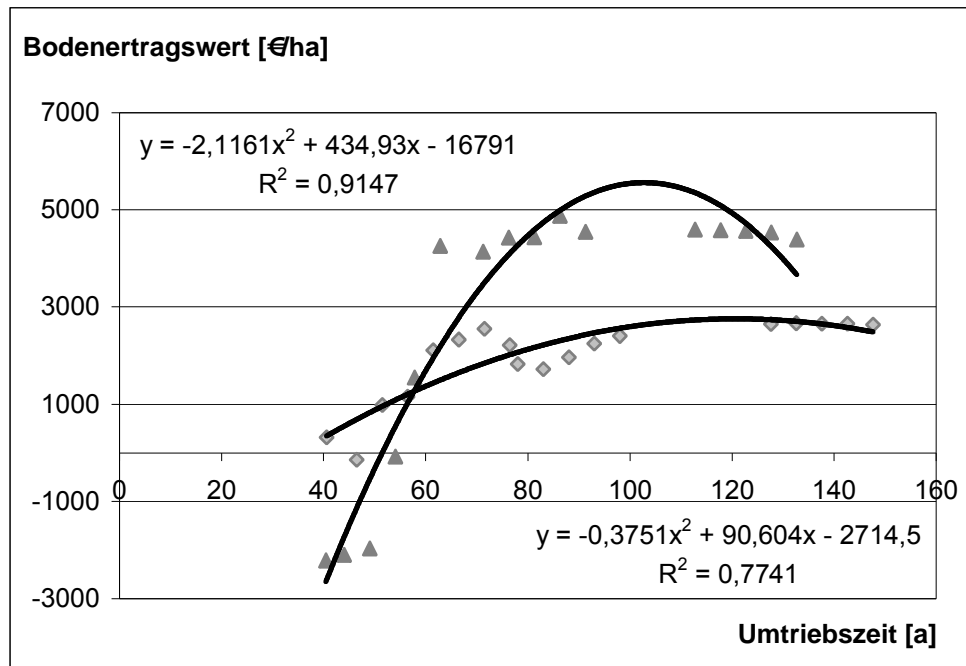


Abbildung 35: Unechte Zeitreihe aus Bodenenertragswerten eines Fichten (▲)- und eines Buchenmischbestands (◇), mit Ausgleichsfunktion und Bestimmtheitsmaß ( $R^2$ ) bei 2% Zins

Unterschiede in der Umtriebszeit sind auch entsprechend für die verschiedenen Zinssätze darstellbar (siehe Abbildung 36).

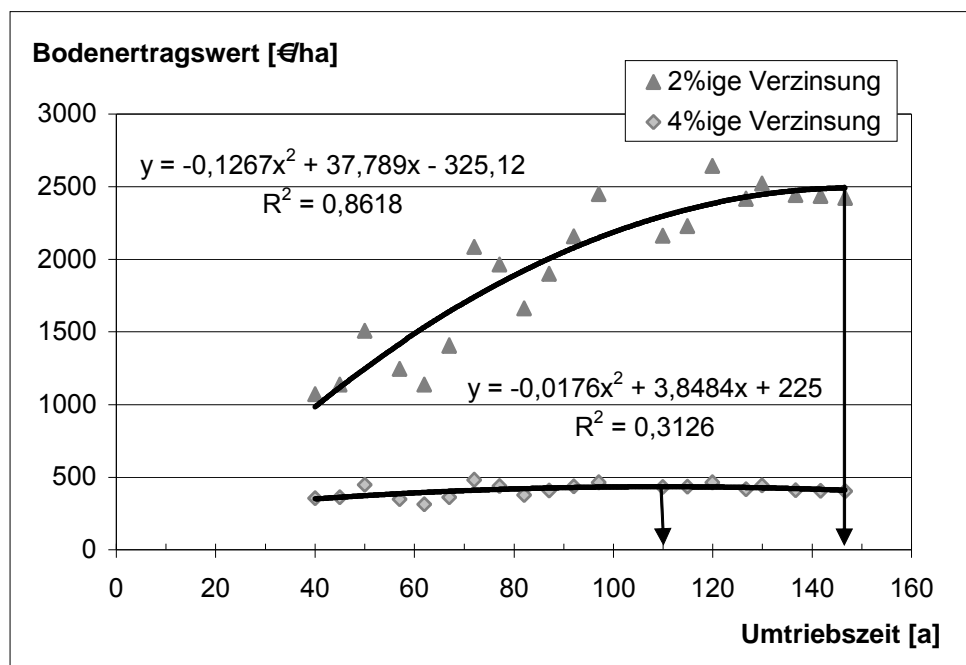


Abbildung 36: Unechte Zeitreihe aus Bodenenertragswerten eines Buchenreinbestands der oberen Bonität bei einem Zinsfuß von 2% und 4%

Hierbei haben die Buchenreinbestände bei 2% eine Umtriebszeit von 147 Jahren bei 4% sinkt diese auf 115 Jahre. Die Umtriebszeitänderung mit dem

Zins ist in den meisten Beständen jedoch etwas weniger stark ausgeprägt. Es muss allerdings angemerkt werden, dass das Bestimmtheitsmaß im Fall der Buchenreinbestände mit hohen Nachhiebsresten in den Jungbeständen und für die selteneren und sehr heterogenen sonstigen Nadel- und vor allem Laubbaummischbestände die ungünstigsten Absicherungen aufweist. In den meisten Beständen bewegt sich das Bestimmtheitsmaß im Bereich von 0,75 und darüber.

## **4.4 Durchforstungsoptimierung**

Nachdem die Grundlagen der Optimierung und erste Ergebnisse aus waldwachstumskundlicher Sicht entsprechend gewürdigt wurden, folgt ein Vergleich der beiden Optimierungsverfahren. Anschließend werden die Ergebnisse der Rechnung mit vollständiger Enumeration näher betrachtet.

### **4.4.1 Vergleich der Optimierungsverfahren**

Beim Vergleich der Verfahren der Dynamischen Programmierung mit dem der vollständigen Enumeration stellt man fest, dass die Durchforstungsgänge sich zu rund einem Viertel hinsichtlich der Endnutzungsentscheidungen und zur Hälfte mit Blick auf die Durchforstungen unterscheiden. Dies führt, bei einem hypothetischen Betrieb aus allen 40 Modellbeständen, die alle gleiche Anteile haben, zu einem 15% niedrigeren Zielfunktionswert<sup>62</sup> gegenüber der Rechnung mit Dynamischer Programmierung.

Die entscheidende Rolle in finanzieller Hinsicht spielen nicht so sehr die teilweise sehr ähnlichen Durchforstungsgänge, sondern vor allem andere Ernteentscheidungen bei der Dynamischen Programmierung. Wird beispielsweise ein noch nicht hiebsreifer Bestand aufgrund eines folgenden lokalen Minimums bereits geerntet, so sind die Unterschiede in der Zielfunktion, d.h. auch die Auswirkungen auf das finanzielle Ergebnis des Waldbesitzers, am wichtigsten (siehe auch KILKKI und VÄISÄNEN 1970).

In den folgenden Abbildungen sind die Vorratsentwicklungen der Bestände

---

<sup>62</sup> Diskontierte Barwerte aller Einnahmen über dem 25-jährigen Planungshorizont plus dem Restwert der Bestände nach 30 Jahren und dem Bodenertragswert.

jeweils für die Dynamische Programmierung (gestrichelte Linien) und die vollständige Enumeration (durchgehende Linien) dargestellt. Verlaufen die Vorratsentwicklungskurven bzw. die Eingriffsmaßnahmen genau gleich, so überlagert die gestrichelte Linie der Dynamischen Programmierung die der vollständigen Enumeration. Die verschiedenen alten Modellbestände sind von jung (hell) bis alt (dunkel) gekennzeichnet.

Betrachtet man die Entwicklung der Fichtenreinbestände der oberen Bonität im Vergleich der Verfahren in Abbildung 37, so fallen vor allem die nicht behandelten bzw. nicht geernteten Altbestände der letzten beiden Stufen ins Auge. Die jüngeren Bestände werden mit Dynamischer Programmierung tendenziell etwas stärker behandelt. Die Fichtenreinbestände der unteren Bonität (Abbildung 38) werden bis zum ältesten Bestand durchgängig relativ schwach durchforstet.

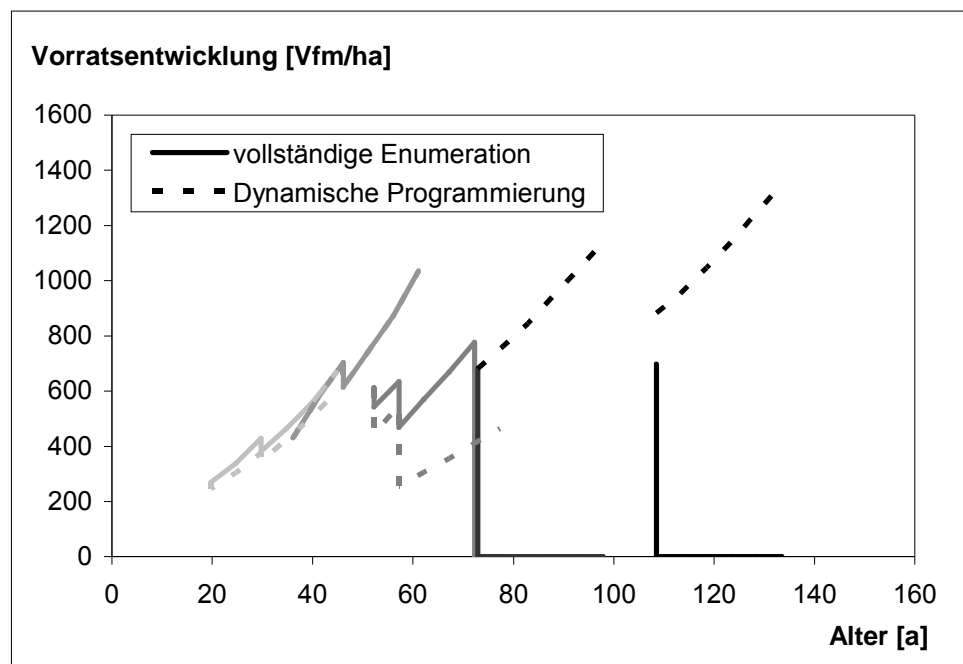


Abbildung 37: Vorratsentwicklung der Fichtenreinbestände der oberen Bonität mit vollständiger Enumeration (durchgehende Linien) und Dynamischer Programmierung (gestrichelt)

Unter Anwendung der Dynamischen Programmierung wird etwas stärker eingegriffen und der zweitälteste Bestand wird im Alter 86 geerntet. Nach dem ersten starken Eingriff in der ältesten Altersklasse wird der Bestand nicht wieder zur Durchforstung vorgesehen und auch nicht geerntet.

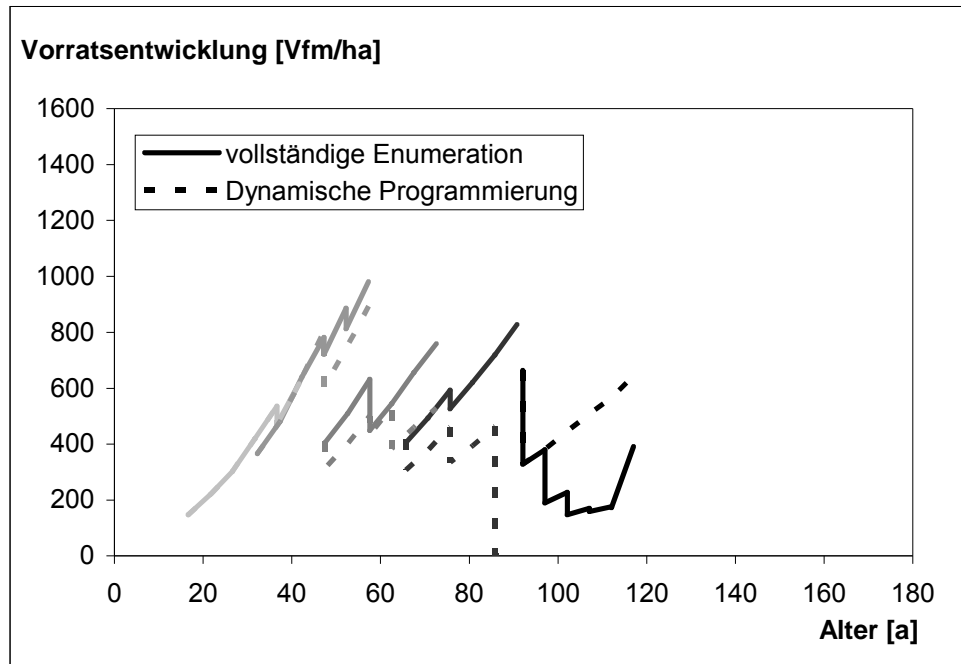


Abbildung 38: Vorratsentwicklung der Fichtenreinbestände der unteren Bonität mit vollständiger Enumeration (durchgehende Linien) und Dynamischer Programmierung (gestrichelt)

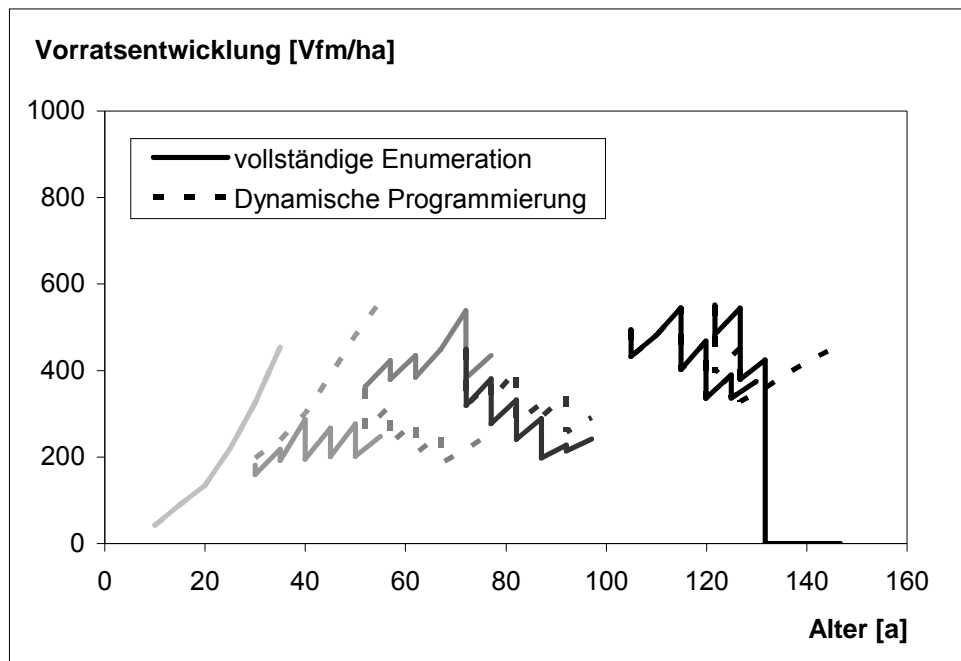


Abbildung 39: Vorratsentwicklung der Buchenreinbestände der oberen Bonität mit vollständiger Enumeration (durchgehende Linien) und Dynamischer Programmierung (gestrichelt)

Wie aus Abbildung 39 hervorgeht, wird in den zwei jüngsten Beständen bei beiden Verfahren zunächst nicht durchforstet. Ab dem drittältesten Bestand wird bei der Dynamischen Programmierung stärker durchforstet und der

viert- und fünftälteste Bestand wird im Laufe der Fortschreibung geerntet. Die älteste Altersklasse wird nach zwei stärkeren Eingriffen mit Dynamischer Programmierung nicht geerntet.

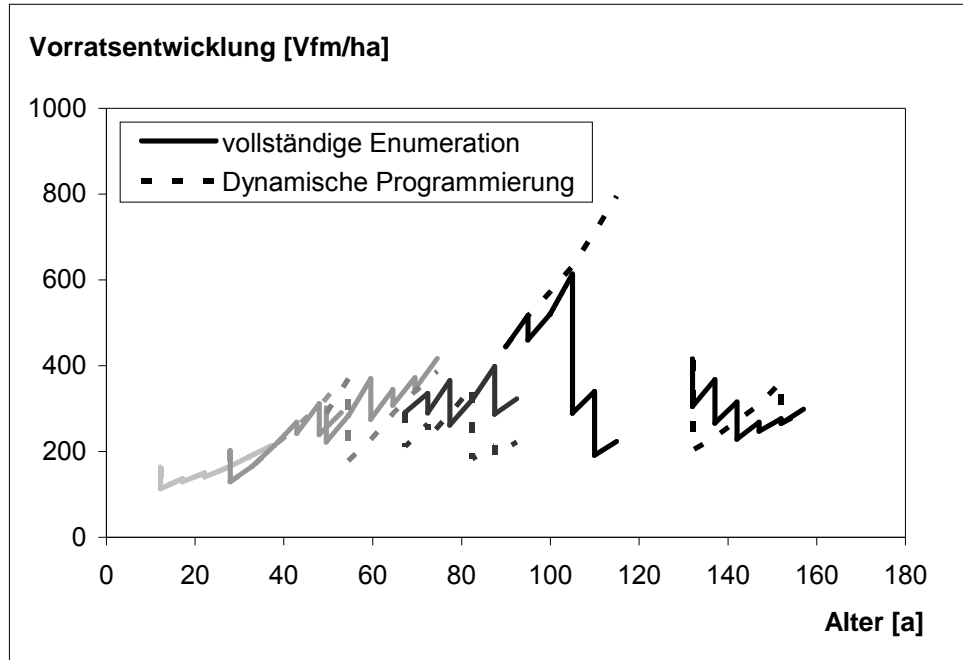


Abbildung 40: Vorratsentwicklung der Buchenreinbestände der unteren Bonität mit vollständiger Enumeration (durchgehende Linien) und Dynamischer Programmierung (gestrichelt)

Die Buchenreinbestände der unteren Bonität in Abbildung 40 werden bei beiden Verfahren zunächst gleich bzw. annähernd gleich, in den mittelalten Beständen mit Dynamischer Programmierung etwas stärker behandelt. Die Bestände der zweitältesten Altersstufe bleiben, im Gegensatz zu stärkeren Eingriffen nach vollständiger Enumeration, unbehandelt.

Auch in den Fichtenmischbeständen (Abbildung 41) finden sich sehr ähnliche Eingriffsverläufe in den mittelalten Beständen. Der jüngste Bestand bleibt in beiden Varianten unbehandelt. Die bei vollständiger Enumeration stattfindende Endnutzung im Alter 118 unterbleibt bei der dynamischen Programmierung.

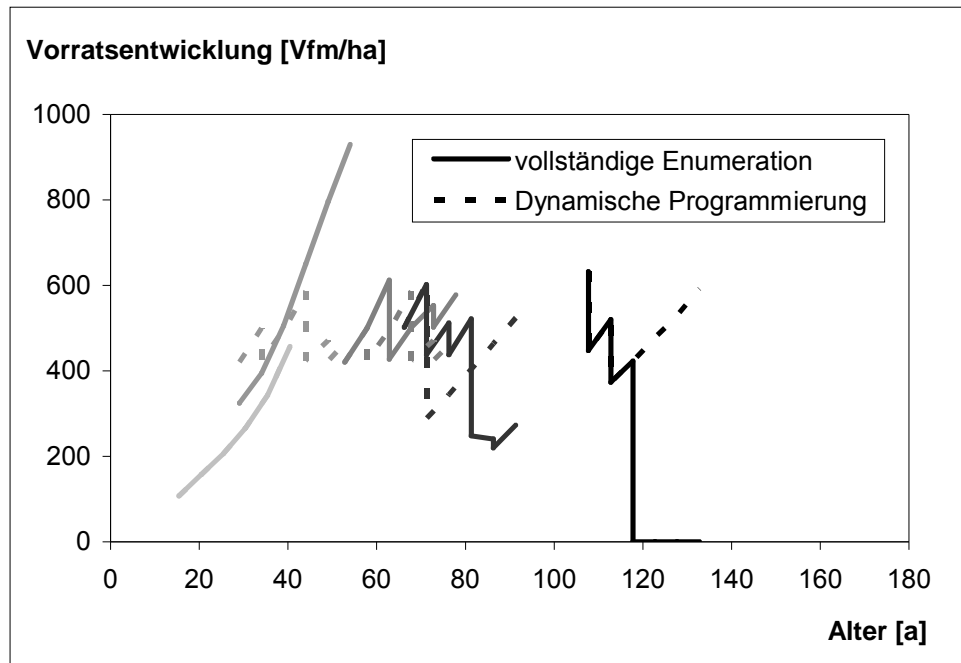


Abbildung 41: Vorratsentwicklung der Fichtenmischbestände mit vollständiger Enumeration (durchgehende Linien) und Dynamischer Programmierung (gestrichelt)

Die Buchenmischbestände in Abbildung 42 zeigen zunächst zwei vorzeitige Endnutzungen in den beiden jüngsten Beständen bei der Anwendung der Dynamischen Programmierung. In den mittelalten Beständen wird bei der vollständigen Enumeration mal stärker, mal schwächer eingegriffen als bei der Dynamischen Programmierung. Die Endnutzung im Alter 143 findet nur bei der vollständigen Enumeration statt.



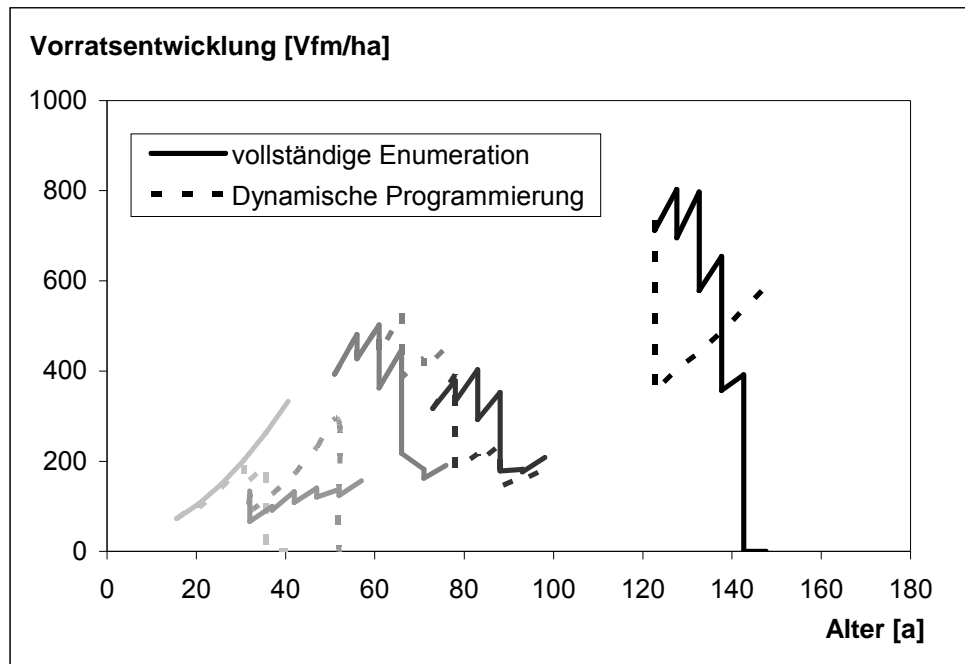


Abbildung 42: Vorratsentwicklung der Buchenmischbestände mit vollständiger Enumeration (durchgehende Linien) und Dynamischer Programmierung (gestrichelt)

Die Entwicklung der Vorräte in den Nadelbaummischbeständen ist zunächst für beide Verfahren ähnlich, die Endnutzungen finden jedoch nur bei der Dynamischen Programmierung statt.

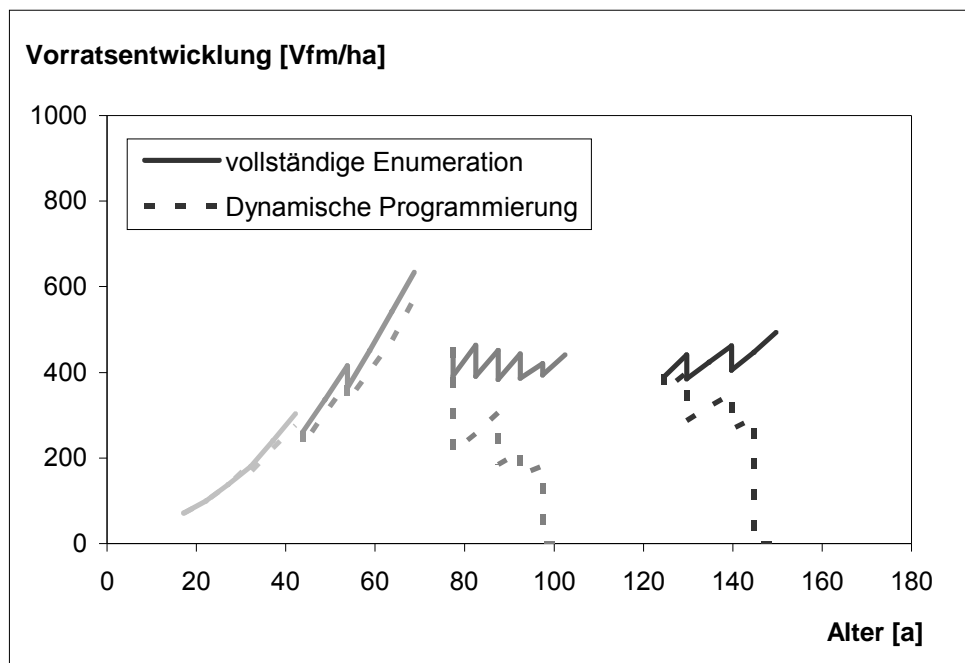


Abbildung 43: Vorratsentwicklung der sonstigen Nadelbaummischbestände mit vollständiger Enumeration (durchgehende Linien) und Dynamischer Programmierung (gestrichelt)

Ein heterogenes Bild zeigt sich bei den sonstigen Laubbaummischbestände in Abbildung 44.

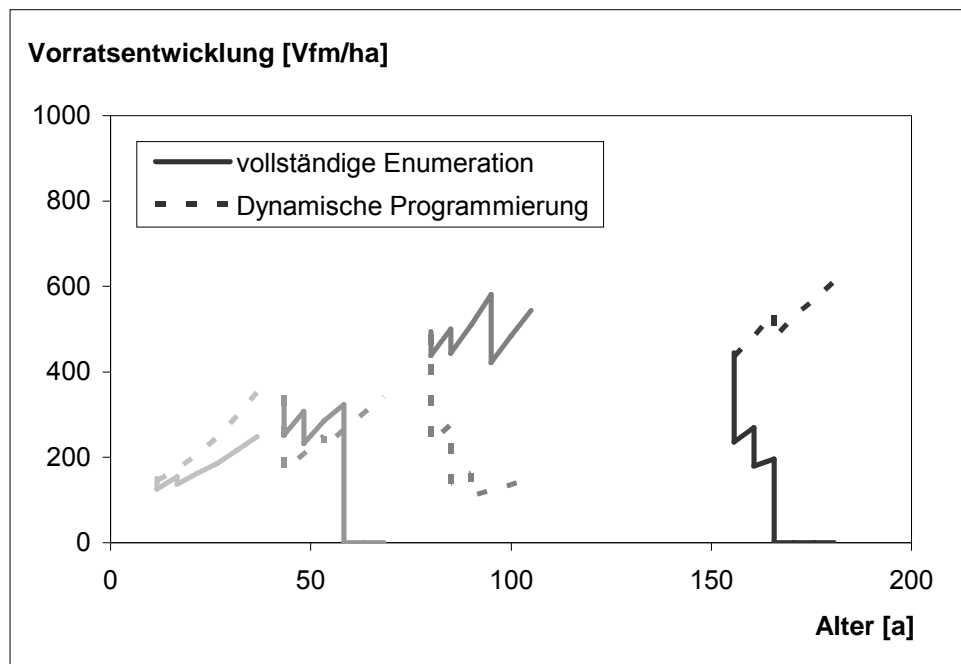


Abbildung 44: Vorratsentwicklung der sonstigen Laubbaummischbestände mit vollständiger Enumeration (durchgehende Linien) und Dynamischer Programmierung (gestrichelt)

Hierbei ist zu beachten, dass die Vorratsentwicklung nicht das Optimierungskriterium wiedergibt und ein gegebenenfalls höherer Endvorrat der Dynamischen Programmierung nicht unbedingt finanziell vorteilhafter sein muss.

Um den Effekt der finanziellen Bewertung besser abschätzen zu können und sicherzustellen, dass die unterschiedlichen Ergebnisse mit Dynamischer Programmierung und vollständiger Enumeration nicht aufgrund der Bewertung auftreten, wurde das Programm einmal mit reinen Holzvolumina (Preise – Kosten = „1“) gerechnet. Dabei musste auf die Addition eines Bodenertragswertes verzichtet werden. Auch in diesem Fall waren die Ergebnisse beider Verfahren nicht identisch.

Betrachtet man die reine Optimierung der Massenleistung<sup>63</sup> mit dem Verfahren der Dynamischen Programmierung, so finden in den jüngeren

<sup>63</sup> Die Anwendung eines Zinssatzes macht ohne einen „Holz-Bodenertragswert“ keinen Unterschied, weswegen hierauf verzichtet wurde. Der „Holz-Bodenertragswert“ müsste dann

Beständen schwache bis mittlere, immer wieder aussetzende Durchforstungen statt. In den älteren Beständen dominieren mäßige bis starke Eingriffe. Die ältesten Fichten- und Buchenreinbestände der oberen Bonität werden geerntet, d.h. der Kulminationspunkt der optimalen Holzvorratshaltung ist erreicht. Gerechnet mit der vollständigen Enumeration finden tendenziell eher schwächere Eingriffe statt. Die ältesten Fichten- und Buchenbestände werden auch hier nicht geerntet. Stattdessen findet eine mäßige bis starke Durchforstung statt. Geerntet werden die ältesten sonstigen Laub- und Nadelholzbestände nach 15 Jahren. Bei Rechnung ohne Zinsforderung ist das Bild ähnlich. Insgesamt sind die Eingriffsstärken geringer und die Tendenz zu schwächeren Eingriffen bei der vollständigen Enumeration ist noch stärker ausgeprägt. In keiner der beiden Varianten finden Endnutzungen statt.

Exemplarisch sei hier in Abbildung 45 die Zuwachsentwicklung für einen Fichtenmischbestand, der dritten Altersstufe dargestellt. Hier unterscheiden sich die Bestandesbehandlungen zwischen vollständiger Enumeration – keine Durchforstungseingriffe – und Dynamischer Programmierung mit einem mittleren Eingriff in der Periode 2 und einem schwächeren Eingriff in der Periode 4.

---

eingeführt werden, wenn eine auf ewig fortgesetzte Holznutzung auf dem Boden betrachtet werden soll. Analog zum Bodenertragswert ginge damit der Wert des Bodens als Produktionsfläche für Holz (beim Bodenertragswert für Geldeinheiten) ein.

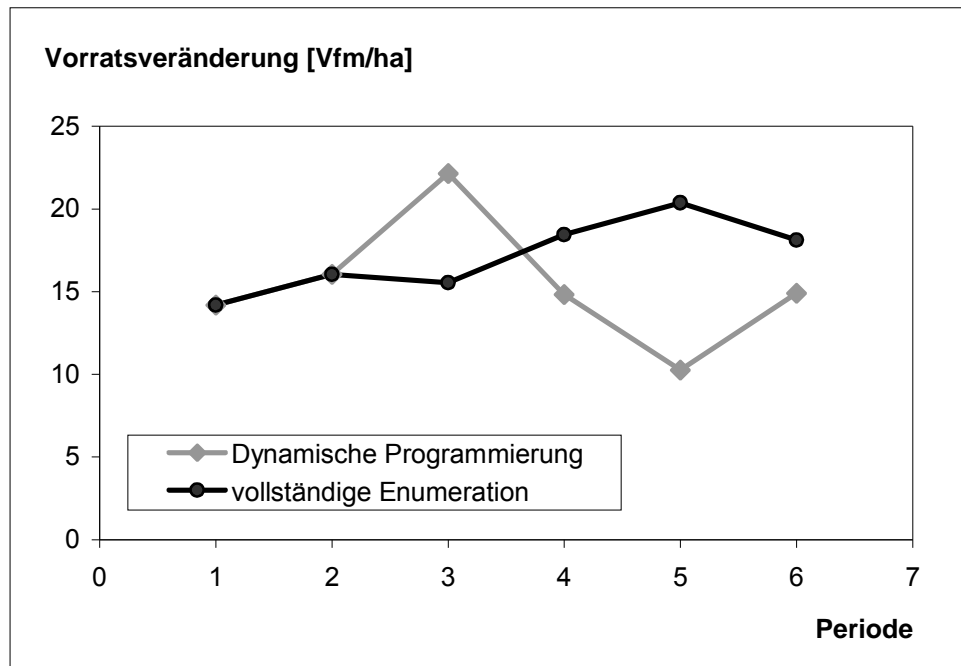


Abbildung 45: Holzvorratszuwachs zuzüglich Entnahmen von einer Periode zur nächsten im mittelalten Fichtenmischbestand.

Dabei sind die Summen der diskontierten Holzzuwächse über den 30jährigen Zeitraum entscheidend. Es können also auch bei der Dynamischen Programmierung zwischenzeitlich höhere Zuwächse oder ein höherer Endvorrat auftreten.

Das Problem der Dynamischen Programmierung, in der beschriebenen Umsetzung, besteht darin, dass sie aus dem Vergleich zweier Perioden nicht erkennt, ob es sich um ein lokales Optimum handelt. Damit wird ein Bestand beispielsweise schon früher geerntet als es bei Kenntnis des weiteren Verlaufs der Fall wäre. Im Folgenden werden deswegen lediglich die Ergebnisse der vollständigen Enumeration ausführlich dargestellt und für die weitere Optimierung auf Betriebsebene verwendet.

#### 4.4.2 Ergebnisse mit vollständiger Enumeration

Zunächst werden die naturalen Bestandesentwicklungen in der bereits verwendeten Darstellung, ergänzt um die Entnahmesätze, dargestellt. Anschließend wird auf die Streuung der Ergebnisse in finanzieller Hinsicht eingegangen. Der Vergleich der optimalen Behandlungsgänge mit einem gängigen Durchforstungskonzept, welches sich über ein ganzes Bestandesleben hinzieht, ist auf Basis der Zeitreihen nicht ohne weiteres möglich. Weshalb hier auf eine tabellarische Übersicht zu den optimalen

Entnahmesätzen verzichtet wird. Die graphische Darstellung ist Abbildung 46 bis Abbildung 49 zu entnehmen.

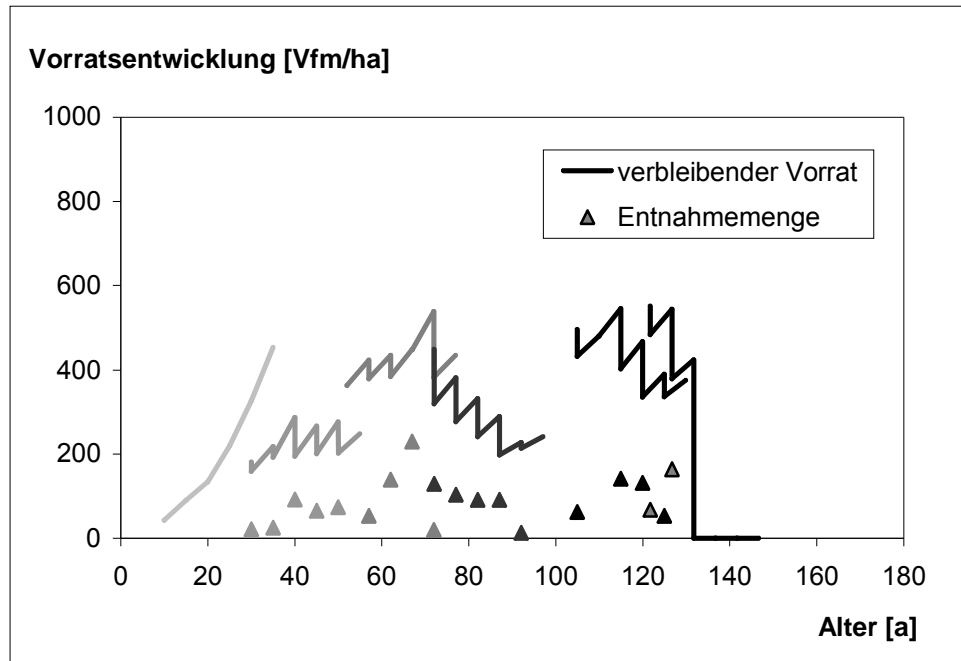


Abbildung 46: Entwicklung des Vorrats und der Entnahmesätze für Buchenreinbestände der oberen Bonität gerechnet mit vollständiger Enumeration.

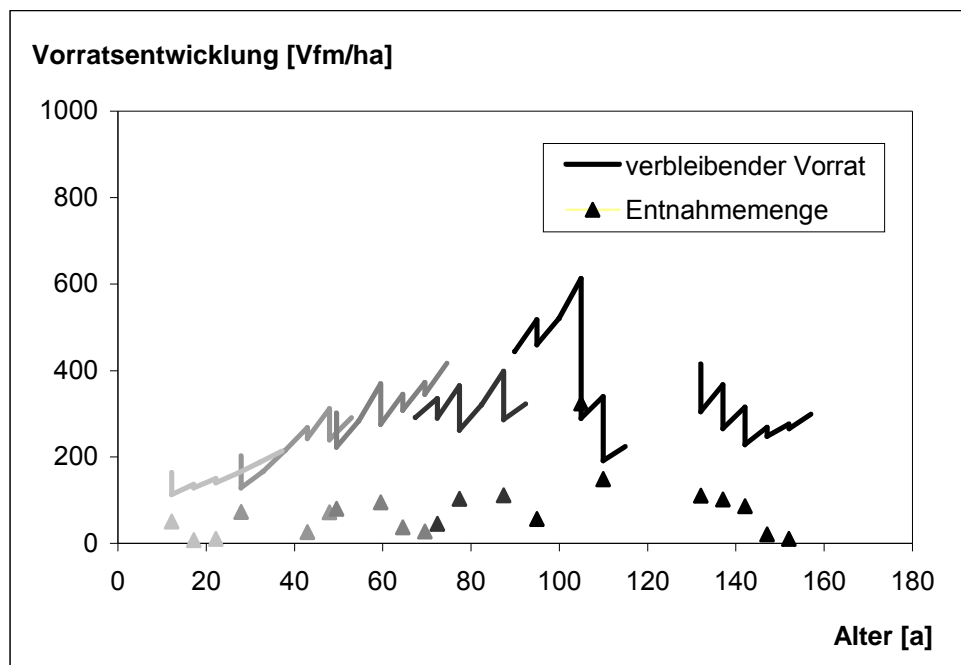


Abbildung 47: Entwicklung des Vorrats und der Entnahmesätze für Buchenreinbestände der unteren Bonität gerechnet mit vollständiger Enumeration.

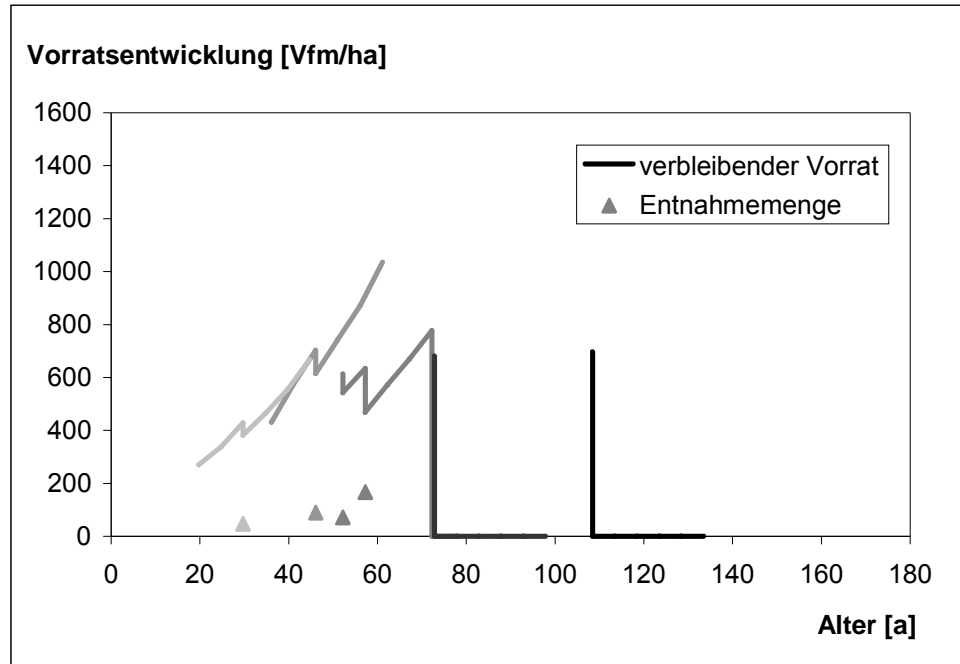


Abbildung 48: Entwicklung des Vorrats und der Entnahmesätze für Fichtenreinbestände der oberen Bonität gerechnet mit vollständiger Enumeration

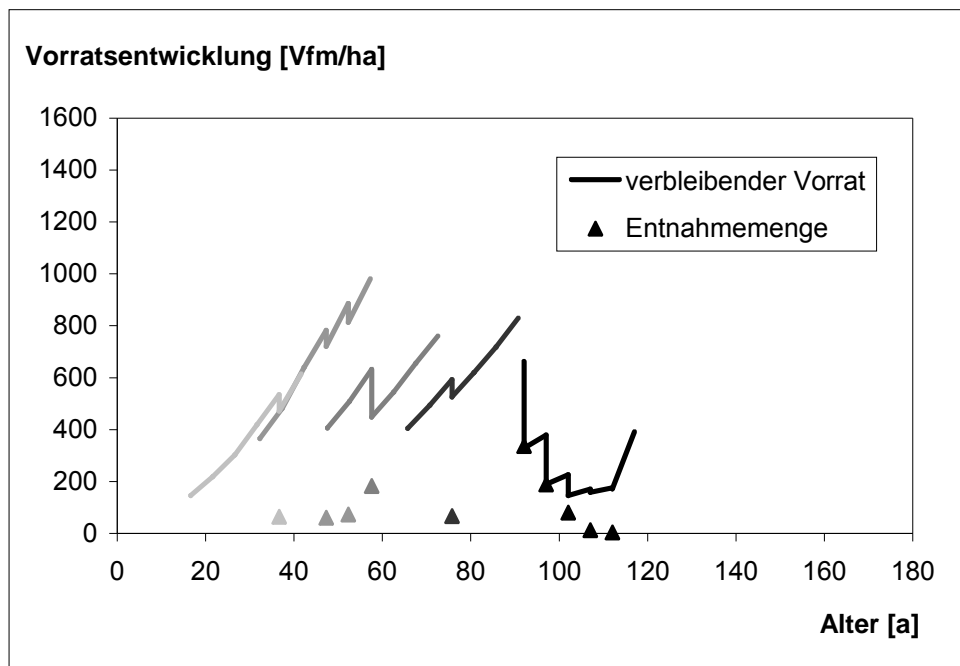


Abbildung 49: Entwicklung des Vorrats und der Entnahmesätze für Fichtenreinbestände der unteren Bonität gerechnet mit vollständiger Enumeration.

Nach der Darstellung der naturalen Ergebnisse nun zu den finanziellen Aspekten: Betrachtet man die diskontierten Erträge bei fünf möglichen Eingriffen über dem Planungszeitraum von 30 Jahren zeigt sich, dass diese von Bestand zu Bestand unterschiedlich stark schwanken. Die Höhe der Schwankungen ist nicht unwichtig, weil hierdurch klar wird, wo ungünstige

Maßnahmen zu den höchsten Verlusten führen und umgekehrt durch die optimale Durchforstungsmaßnahme die höchsten Gewinne erzielbar sind. Zur Verdeutlichung ist die Streuung in den Boxplots der Abbildung 50 und Abbildung 51 dargestellt. Hierbei sind die Boxplots nicht im statistischen Sinne zu lesen. Vielmehr ist das obere Ende der zu erzielende Maximalwert und das untere Ende stellt die finanziell ungünstigste Variante dar. Ist der Abstand der beiden Extrema insgesamt groß, hat die Wahl der richtigen Bestandesbehandlung umso höheren Einfluss auf das Ergebnis. Der Bestand reagiert deutlich auf verschiedene Eingriffe.

Die Unterschiede liegen im Schnitt über alle Bestände bei 11,4%. Die Unterschiede sind am geringsten in den älteren Fichtenbeständen und in den Mischbeständen. Sehr hohe Schwankungen treten bei den jüngeren Fichtenbeständen und den jüngeren sonstigen Nadelholzbeständen auf. Dies liegt vor allem an den hier stattfindenden Sortimentssprüngen, welche die Entscheidung für die Vorteilhaftigkeit einer Maßnahme, innerhalb eines kurzen Zeitraums, stark beeinflussen können. Außerdem wurden hier, im Gegensatz zu den Buchenbeständen, keine positiven Deckungsbeiträge in den Jungdurchforstungen unterstellt, was stellenweise zu negativen Ergebnissen und zusätzlich zur größeren Spreitung der Ergebnisse beiträgt. Der auf der y-Achse aufgetragene Ertragswert, der dem Wert der Zielfunktion entspricht, ist hierbei die Summe aller diskontierten Durchforstungserlöse über 25 Jahre plus dem Abtriebswert im Jahr 30 und dem diskontierten Bodenertragswert.

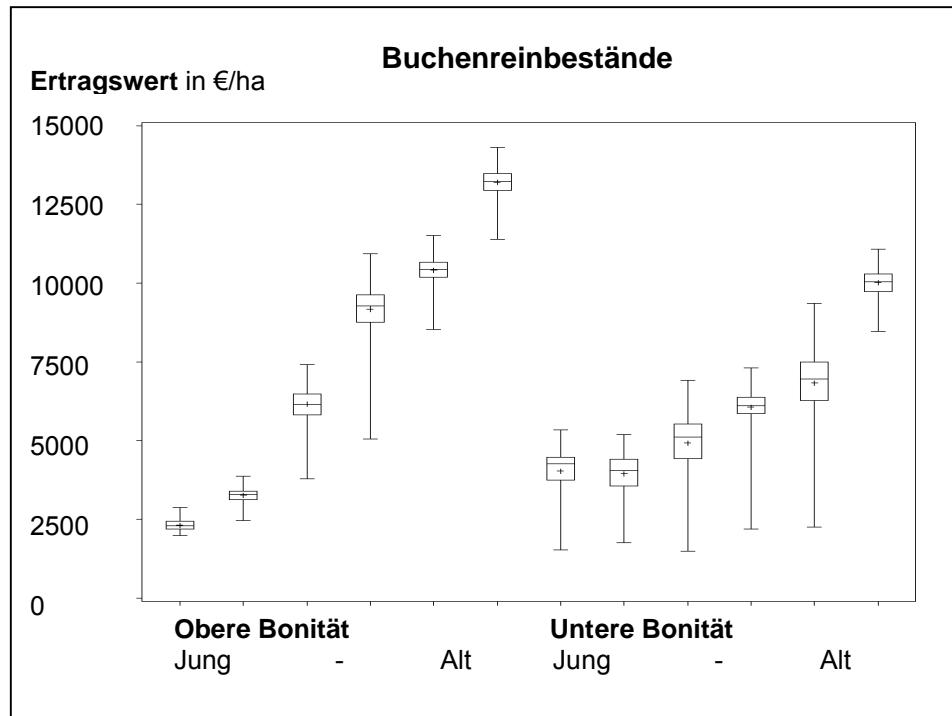


Abbildung 50: Boxplots aller diskontierten Erträge über 5 Durchforstungsperioden plus Endwert und Bodenertragswert der Buchenreinbestände, 2% Zins

Die höheren Ertragswerte für die zwei jüngsten Bestände der unteren Bonität (Abbildung 51) sind durch höhere Anteile an Nachhiebsresten zu erklären.

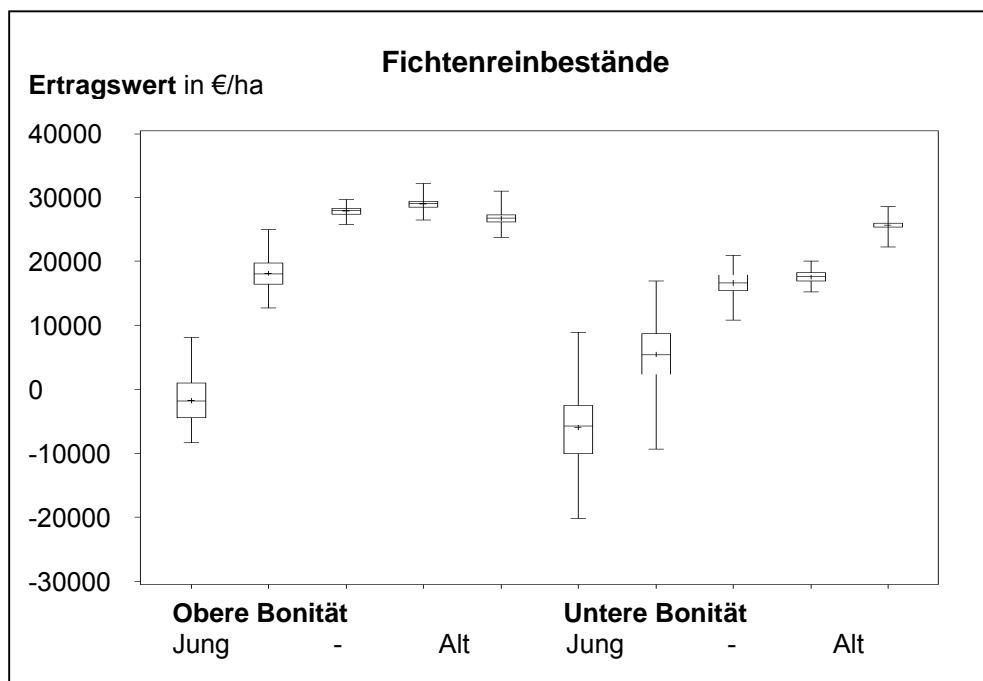


Abbildung 51: Boxplots aller diskontierten Erträge über 5 Durchforstungsperioden plus Endwert und Bodenertragswert der Fichtenreinbestände bei 2% Zins

Die oberen Enden der Boxplots repräsentieren die günstigste Behandlungsvariante. Dies ist beispielsweise im Fall eines Fichtenreinbestands der ersten



Altersklasse eine schwache Durchforstung im 30-jährigen Optimierungszeitraum. Umgekehrt wäre das untere Ende des Boxplots eine sofortige Endnutzung gefolgt von der Behandlungsvariante mit starken Durchforstungen. In der fünften Altersklasse der Fichtenreinbestände ist wiederum eine Endnutzung bzw. starke Durchforstung am günstigsten.

Interessant ist nun, wie das Ergebnis in finanzieller Hinsicht aussieht, wenn man optimale Bestandesbehandlung und reguläre Durchforstung vergleicht. Die Behandlungen werden dabei nach dem gleichen Verfahren bewertet wie die optimale Durchforstung, d.h. es werden die Barwerte aller anfallenden Durchforstungserlöse und des Endwerts nach 30 Jahren sowie des Bodenertragswert aufsummiert und das Bewertungskriterium in Form der Zielfunktion auf der y-Achse dargestellt.

Der Vergleich der Zielfunktionen mit einer mittleren Auslesedurchforstung und der optimalen Durchforstung ist in Abbildung 52 und Abbildung 53 für Buchenreinbestände der oberen und der unteren Bonität wiedergegeben.

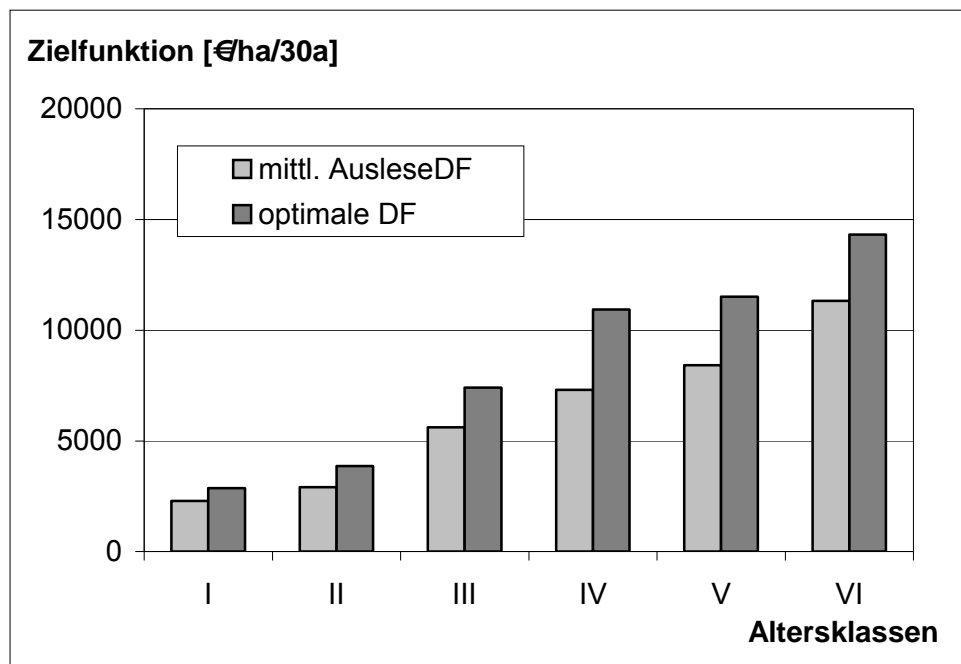


Abbildung 52: Vergleich der Zielfunktionen für Buchenreinbestände der oberen Bonität

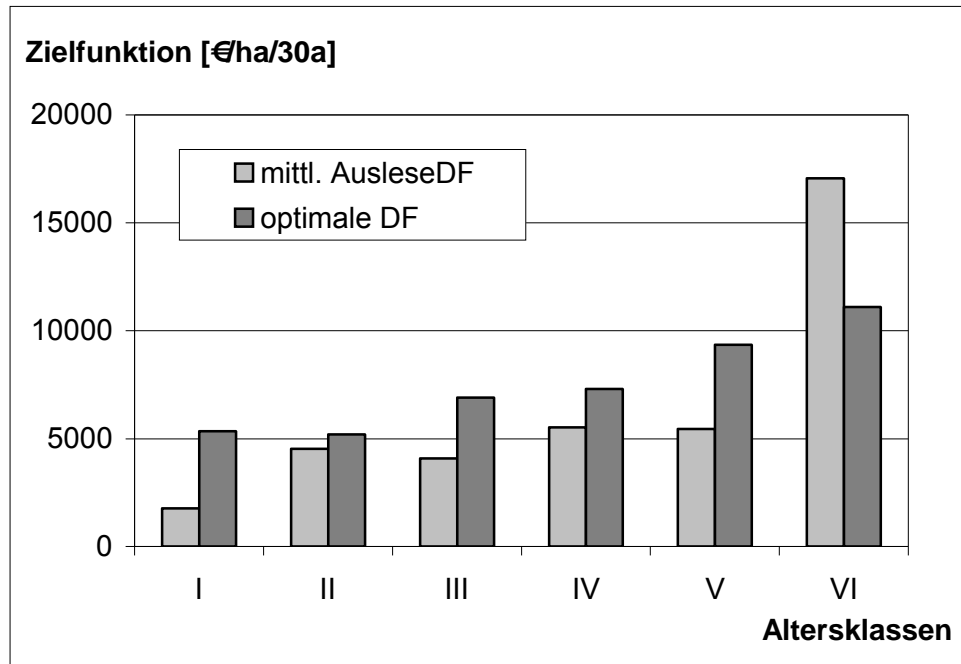


Abbildung 53: Vergleich der Zielfunktionen für Buchenreinbestände der unteren Bonität

Die VI. Altersklasse der Buchenreinbestände der unteren Bonität fällt hierbei aus dem Rahmen. Das wesentlich bessere Abschneiden der Auslesedurchforstung liegt am um 60% höheren Restwert nach der Behandlung im Vergleich zur optimalen Behandlung. Letztere greift schon früher kräftig ein und entnimmt im Blick auf den mittleren BHD sogar etwas schwächere Bäume, allerdings in wesentlich höheren Anteilen. Dem entgegen werden in der Auslesedurchforstung Bäume mit einem mittleren  $d_g$  von 47 cm geerntet und der verbleibende Bestand hat nach 30 Jahren im Vergleich einen  $d_g$  von 44 cm. Dadurch sinkt die Gesamtwuchsleistung nicht ab und der Wert des Bestandes bleibt erhalten. Diese teilweise Zielstärkennutzung mit noch schwächeren Grundflächenentnahmen als die schwächste Eingriffsvariante vorsieht, hat sich offenbar in den Rechnungen der vollständigen Enumeration nicht abbilden lassen.

Bei der Fichte gestalten sich die Ergebnisse ähnlich. Auch hier liegt die optimale Durchforstung über der Auslesedurchforstung wie in Abbildung 54 - Abbildung 55 ersichtlich.

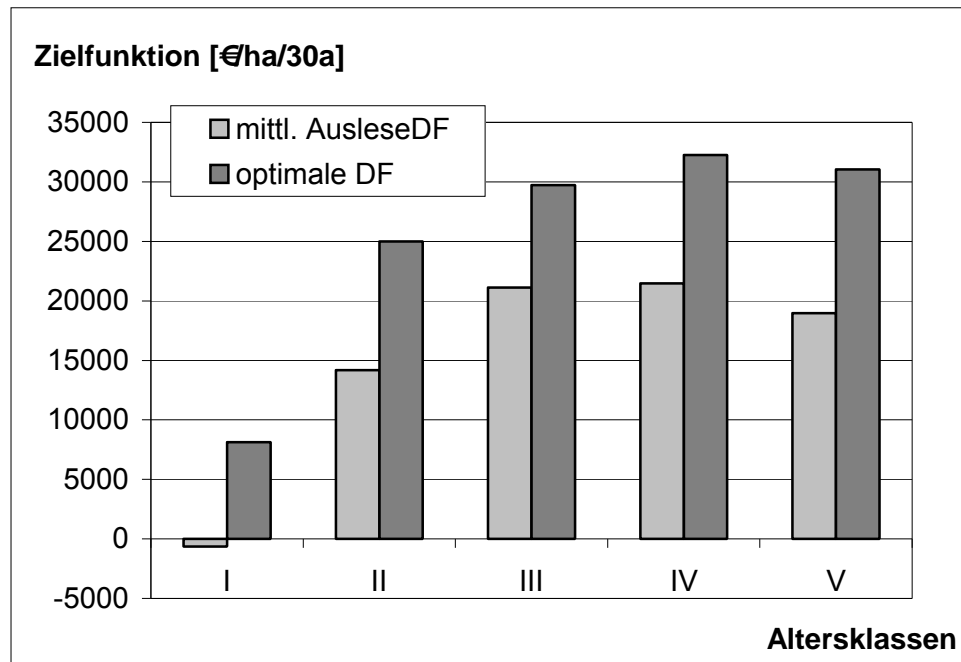


Abbildung 54: Vergleich der Zielfunktionen für Fichtenreinbestände der oberen Bonität

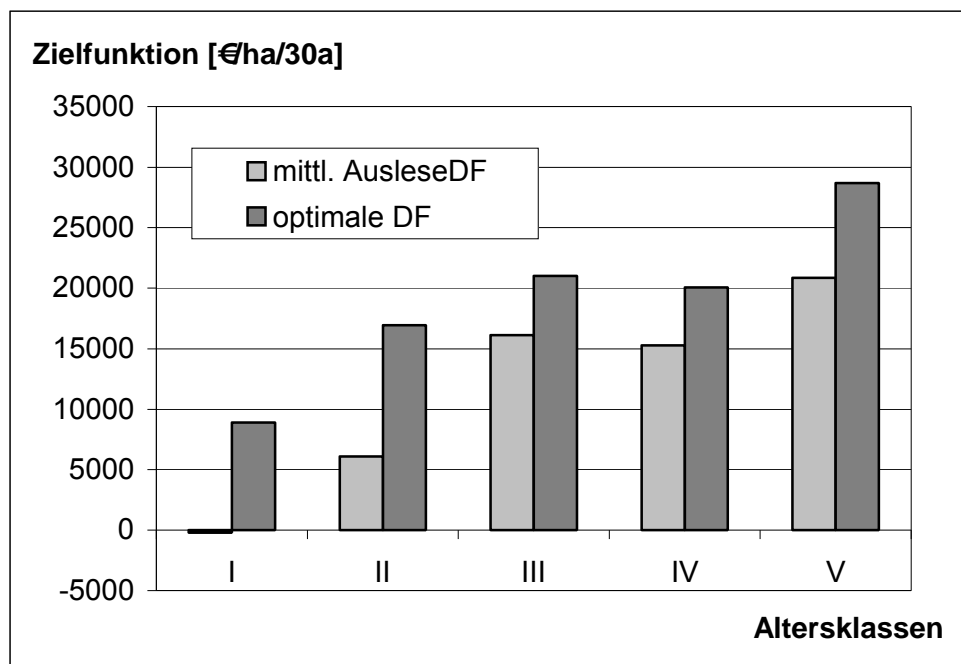


Abbildung 55: Vergleich der Zielfunktionen für Fichtenreinbestände der unteren Bonität

Für die Zielfunktion kann im Schnitt über alle Bestände und Altersklassen eine Erhöhung um 15 - 25% gegenüber der regulären Auslesedurchforstung festgestellt werden. Gerade in den älteren hiebsreifen Beständen ist entscheidend, ob diese in der Optimierung schon eingereicht werden. Ein direkter Vergleich zwischen fortgesetzter Durchforstung und Ernte der Bestände lässt hier natürlich die Verjüngungsnutzung finanziell wesentlich vorteilhafter abschneiden.

Insgesamt entsprechen die Ergebnisse, in jungen Beständen stark und später nur noch schwach einzugreifen, nicht den gängigen Empfehlungen in Waldbauprogrammen. Dies liegt an den bereits in Kapitel 4.2 erwähnten Sprüngen in den Sortimenten auf höhere Stammholzanteile und den möglichen Durchmessern der ausscheidenden Bäume. Erst ab einer gewissen Schwelle werden die erntekostenfreien Erlöse so lukrativ, dass auf eine Erhöhung des stehenden Vorrats durch Belassen der Bäume verzichtet wird. Größere Mortalitäts- bzw. Zuwachsverluste aufgrund zu hoher Bestandesdichte können, trotz des deaktivierten Mortalitätsmoduls im Waldwachstumsprogramm SILVA 2.2 ausgeschlossen werden, da in den undurchforsteten und schwach durchforsteten Beständen erst ab der vierten Fortschreibungsperiode Bestockungsgrade über 1,0 erreicht werden.

#### **4.5 Optimale Betriebsplanung**

Es gilt die Frage zu klären, ob bei Betrachtung eines Gesamtbetriebs die Berücksichtigung weiterer Planungsgrößen zu anderen Behandlungen führt, als es die Betriebsplanung mit bestandesweise optimalen Umtriebszeiten und Durchforstungsstärken vorsehen würde. Hierzu werden die Ergebnisse aus den Rechnungen mit und ohne Durchforstungsvarianten gegenüber gestellt. Zunächst wird von der Annahme eines perfekten Kapitalmarktes ausgegangen. Das heißt, alles Geld, welches durch Nutzungen Erlöst wird, wird zu gleichen Bedingungen wieder im System angelegt und eine Kreditaufnahme zu diesen Bedingungen ist ebenfalls unbegrenzt möglich (KRUSCHWITZ 2007).

Werden Einschränkungen auf der Gesamtbetriebsebene eingeführt, wie beispielsweise eine Nutzungsobergrenze welche Menge in allen Fünfjahresperioden höchstens entnommen werden darf, dann ergeben sich Unterschiede zwischen den zwei Optimierungsansätzen. Gibt es keine betrieblichen Restriktionen, sind die Ergebnisse der Optimierungstableaus mit und ohne Durchforstungsvarianten deckungsgleich. Diese werden nun exemplarisch für eine Hiebssatzrestriktion und eine Deckungsbeitragsrestriktion dargestellt.

Die Festlegung eines bestimmten Hiebssatzes ist das zentrale Steuerungskriterium in der Forsteinrichtung. Hieran orientiert sich die gesamte Betriebsplanung, weshalb im Folgenden die Auswirkungen einer **Hiebssatzrestriktion** auf die Optimierung dargestellt werden. Hierzu wird der Hiebssatz schrittweise verringert. Bei einem Hiebssatz von 19 Efm/ha/a und darüber ist die Optimierung nicht eingeschränkt. Wird der Hiebssatz nun schrittweise verringert, so nimmt der Wert der Zielfunktion exponentiell ab (siehe Abbildung 56). Bei dem extremsten Wert, einer erlaubten Ernte von lediglich einem Festmeter, sinkt beispielsweise der erzielbare Deckungsbeitrag auf 23 €/ha/a im Gegensatz zu möglichen erzielbaren 252 €/ha/a in der optimalen Variante ohne Einschränkungen. Der Zuwachs liegt, je nach gewählten Maßnahmen, relativ konstant im Bereich von 15 - 17 Efm/ha/a. Außerdem wird in den grauen Säulen der Abbildung 56 deutlich, wie mit steigender Verschärfung der Restriktion diese von anfangs in einer, ab 16 Efm/ha/a in zwei, ab 12 Efm/ha/a auch in drei und ab 9 Efm/ha/a in fünf Perioden bindend wird. Die Restriktion bewirkt eine Verteilung der verschiedenen Maßnahmen von „undurchforstet wachsen lassen“ über „schwach“, „mittel“ und „stark Durchforsten“ bis zur „Verjüngung“ des Bestandes, welche von der rein bestandesweise optimalen Maßnahmenplanung abweicht.

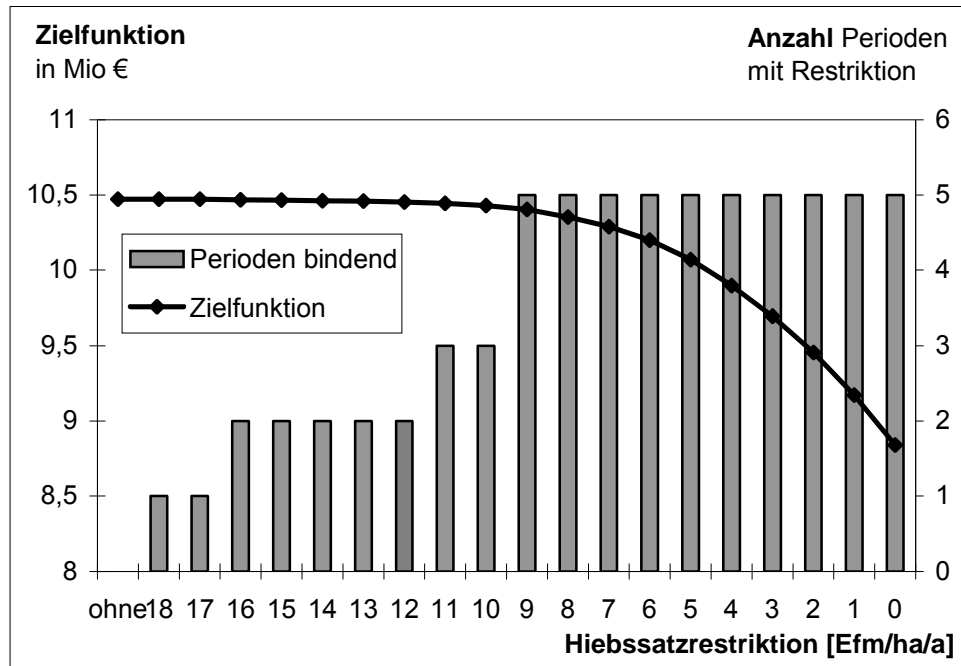


Abbildung 56: Abnahme der Zielfunktion bei schrittweiser Abnahme des Hiebssatzes und Anzahl der Perioden, in welchen die Restriktion bindend ist. Dargestellt für die Variante mit 8 Durchforstungsalternativen.

Der maximale Wert der Zielfunktion ohne Restriktionen beträgt 10.490.669 €. Dieser stellt analog zu den Gleichung 5 und 6 die flächengewichtete Summe der diskontierten Durchforstungserlöse, des diskontierten Abtriebs-erlöses nach 30 Jahren sowie des diskontierten Bodenertragswertes dar.

Vergleicht man die beiden gerechneten Varianten mit und ohne Auswahl von verschiedenen Durchforstungsmöglichkeiten bei Einschränkung des Hiebssatzes miteinander (Abbildung 57), können Unterschiede in der Zielfunktion von 0,1% bis 3,5% festgestellt werden. Diese nehmen, wie aus Abbildung 57 hervorgeht, mit steigender Einschränkung des Hiebssatzes zu. Ab einem Hiebssatz von unter 12 Efm/ha/a findet das Programm ohne Durchforstungsalternativen keine Lösung. Dies liegt daran, dass die eingestellten Behandlungen nicht immer die Alternative „undurchforstet wachsen lassen“ beinhalten und damit immer eine gewisse Menge an Holz, auch bei Aussetzen aller Endnutzungsmaßnahmen, anfällt.

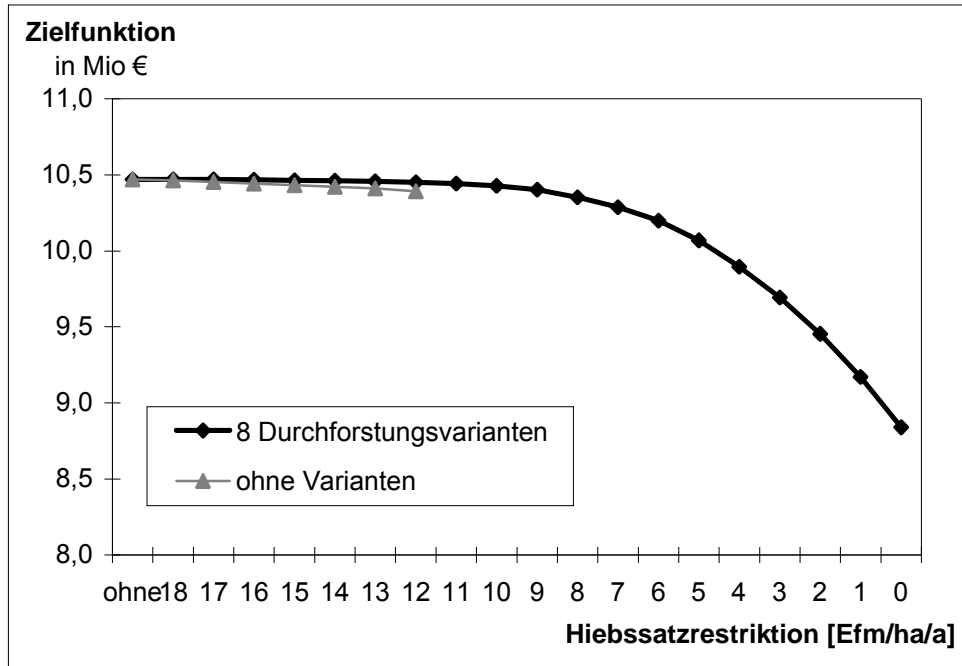


Abbildung 57: Abnahme der Zielfunktion bei Hiebssatzrestriktion mit verschiedenen Durchforstungsvarianten (schwarz) und ohne Auswahlmöglichkeiten (grau).

Hierbei teilen sich die Maßnahmen auf die einzelnen Bestände nicht gleichmäßig auf. Ohne Restriktionen sind die Einschläge gleich den bestandsweise optimalen Durchforstungen. Bei einer mittleren Hiebssatzrestriktion von 10 Efm/ha/a werden schwächere Eingriffe vor allem in den produktiven Fichtenbeständen vorgenommen und die Ernte des Gesamtbestands wird im Schnitt 1 - 2 Perioden später vorgenommen. Es kommt jedoch auch vor, dass ein Bestand geerntet wird, der im optimalen Programm ohne Restriktionen nicht zur Ernte vorgesehen ist, wie beispielsweise der Buchenmischbestand der 3. Altersstufe nach 4 Fortschreibungsperioden oder der älteste Fichtenreinbestand der unteren Bonität nach 2 Fortschreibungsperioden, der ohne Restriktion durchgehend sehr stark durchforstet wird. Schwächere Eingriffe bzw. gar keine Eingriffe finden in den jüngsten zwei Fichtenreinbeständen und in den zwei jüngsten sonstigen Nadelholzmischbeständen statt. Wird der Hiebssatz mittels Restriktion sehr stark auf 3 Efm/ha/a eingeschränkt, so ist diese Tendenz noch deutlicher. Endnutzungen finden nur noch in den ältesten Fichtenbeständen statt, in 29 von 40 Beständen finden gar keine Vornutzungen mehr statt. Die verbleibenden Vornutzungen sind schwächer und nur in fünf Fällen mit bereits schwachen Eingriffen ohne Restriktionen gleich bleibend. Einzige

Ausnahme stellen die Endnutzungen im sonstigen Laubholzmischbestand dar, welche auf einer Teilfläche von rund 68 ha in die 2. Periode vorgezogen werden. 32ha des gleichen Bestands werden zunächst undurchforstet in der 3. (10ha) und 4. Periode (22ha) geerntet.

Vergleicht man verschieden starke Hiebssatzrestriktionen (siehe Abbildung 58) miteinander, so wird deutlich, dass sich sowohl eine Änderung der Endnutzungszeitpunkte als auch eine Änderung der Durchforstungsstrategien ergibt. Bei zunehmender Hiebssatzrestriktion werden die Durchforstungen tendenziell immer schwächer oder unterbleiben ganz, wie in den beiden ältesten Buchenmischbeständen (Abbildung 57) zu erkennen ist.

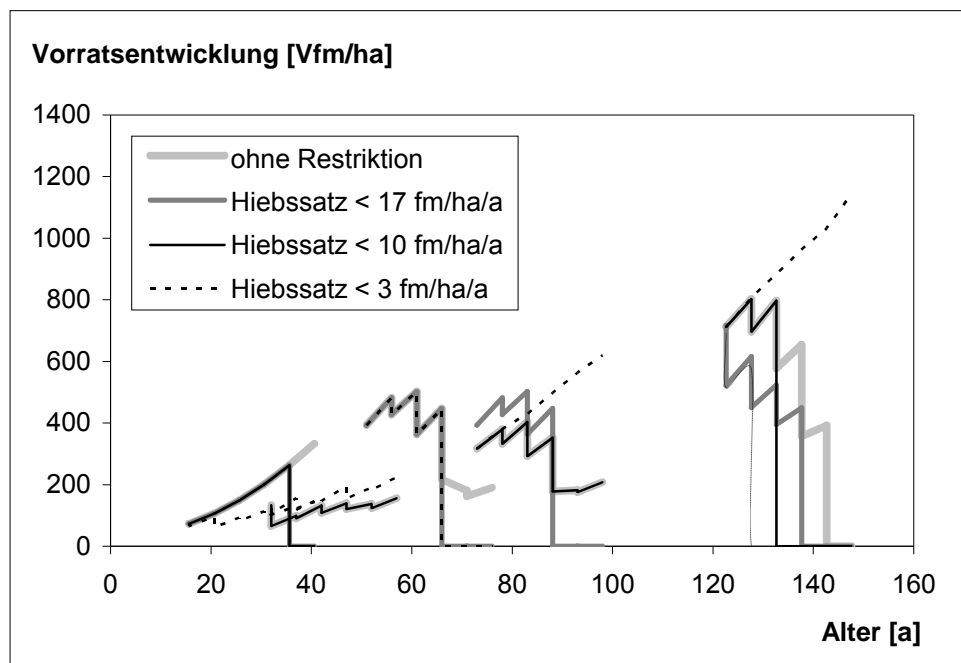


Abbildung 58: Vorratsentwicklung bei unterschiedlich starken Hiebssatzrestriktionen in Buchenmischbeständen verschiedener Altersklassen

Grundsätzlich werden mit steigender Hiebssatzrestriktion nur noch die Maßnahmen realisiert, die bei gleichem Holzanfall die höchsten Beiträge zur Zielfunktion liefern.

Bei der Forderung eines **Mindestdeckungsbeitrags** verringert sich die Zielfunktion bei schrittweiser Erhöhung der Deckungsbeitragsforderung in zunehmendem Maße. Dies geschieht für die Variante mit mehreren Durchforstungen (siehe Abbildung 59) bis zu einer Grenze von 370 €/ha/a,



welche gerade noch erzielt werden kann (weißer Punkt<sup>64</sup>). Ab einem geforderten Deckungsbeitrag von 371 €/ha/a findet das Programm keine Lösung mehr.

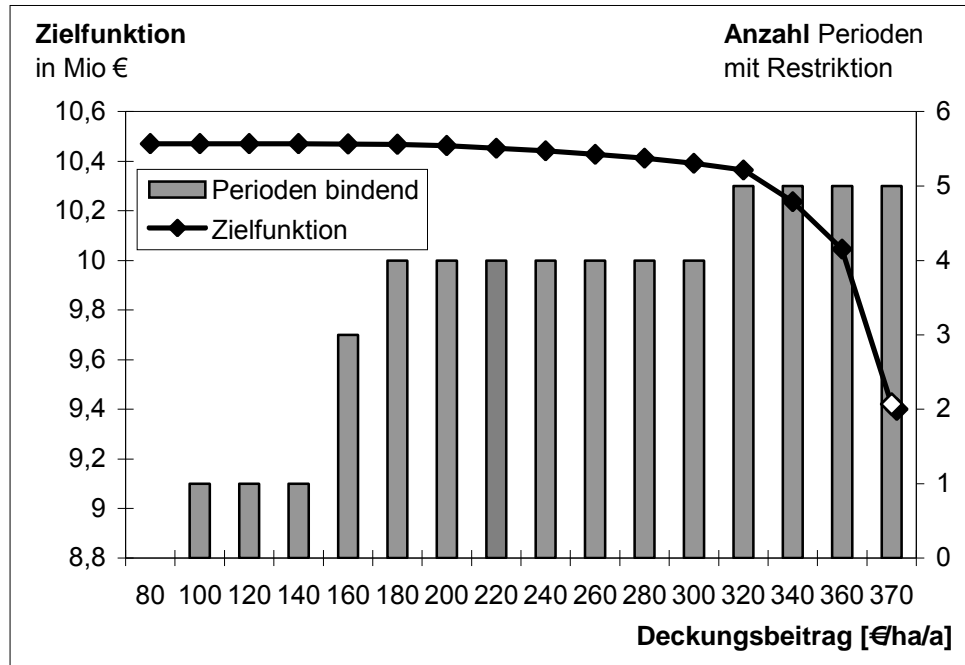


Abbildung 59: Abnahme der Zielfunktion bei Einführung einer Deckungsbeitragsforderung und Anzahl der Perioden in welchen die Restriktion bindend ist für 8 Durchforstungsvarianten

<sup>64</sup> Achtung: Darstellung auf der x-Achse ist deshalb nicht genau maßstabsgetreu.

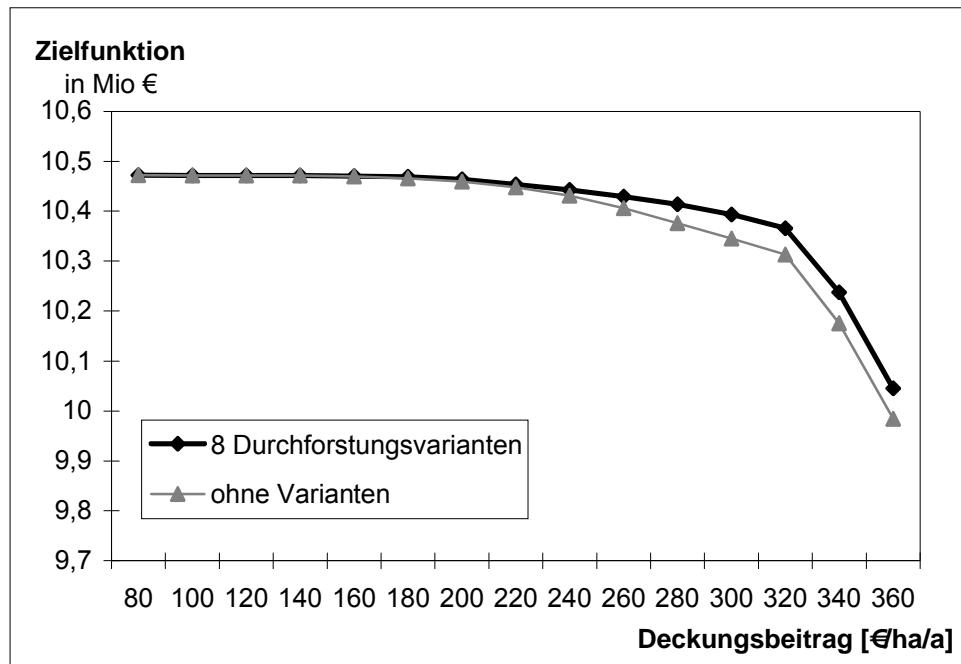


Abbildung 60: Abnahme der Zielfunktion bei Deckungsbeitragsrestriktion mit verschiedenen Durchforstungsvarianten (schwarz) und ohne Auswahlmöglichkeiten (grau).

Bestehen keine Auswahlmöglichkeiten zwischen verschiedenen Behandlungsstärken auf Bestandesebene, d.h. ist nur die Entscheidung Durchforsten oder Ernten möglich, ändern sich die Beträge der Zielfunktion nur marginal. Allerdings ist der maximale erreichbare Deckungsbeitrag mit 364 €/ha/a geringer. Im Grenzbereich, solange gerade noch eine Lösung möglich ist, bewirken die Auswahlmöglichkeiten besonders durch die Wahl stärkerer Behandlungen statt dem Ernten von Beständen eine etwas höhere Zielfunktion (analog siehe Abbildung 60). Dies geschieht, weil im Gegensatz zu neu begründeten Beständen noch Vorräte und Zuwächse auf den Flächen vorhanden sind. Es wird nun zu einer optimalen Betriebsplanung nicht nur die eine bestandsweise optimale Durchforstungsvariante ausgewählt, sondern es ist möglich, die Maßnahmen auf verschiedene Durchforstungsstärken zu verteilen.

Die schrittweise Erhöhung des Deckungsbeitrags führt zunächst nicht zu gänzlich gleichgerichteten Änderungen der Behandlungs- und Erntestrategie. Bei einer Deckungsbeitragsforderung von 100 €/ha/a ändert sich gegenüber der Optimierung ohne Restriktion nur eine Endnutzung in dem Fichtenbestand der unteren Bonität, der vierten Altersstufe. Ein Fünftel der Fläche des Gesamtbestands wird in der letzten Planungsperiode geerntet.

Bei einer schrittweisen Erhöhung der Deckungsbeitragsforderung auf 200 €/ha/a variieren einige Endnutzungen, dies allerdings jeweils nur auf einem Teil der Fläche, die der Bestandestyp insgesamt einnimmt. In den Fichtenreinbeständen der oberen Bonität, in der dritten und vierten Altersstufe werden Endnutzungen um eine Periode nach hinten verschoben. Gleiches gilt für die Fichtenreinbestände der unteren Bonität der vierten Altersstufe sowie für die Laubholzmischbeständen der ersten und zweiten Altersstufe. Eine kleinere Teilfläche in eben diesem Bestand der zweiten Altersstufe wird jedoch auch eine Periode vorgezogen.

Bei einer noch stärkeren Deckungsbeitragsrestriktion von 300 €/ha/a wird das Bild noch etwas inhomogener. Es gibt Verschiebungen der Endnutzung auf einen späteren Zeitpunkt, wie in den ältesten Buchenreinbeständen der oberen Bonität, den beiden ältesten Fichtenreinbeständen der oberen Bonität, und den beiden jüngsten Laubholzmischbeständen. In die entgegengesetzte Richtung wirkt die Restriktion bei den Buchenmischbeständen der vierten Altersklasse, den Buchenreinbeständen der vierten Altersklasse beider Bonitäten, den Fichtenmischbeständen der dritten Altersklasse, den Fichtenreinbeständen ebendieser Altersklasse sowie jeweils den beiden ältesten Klassen der Laub- und Nadelholzmischbestände.

Geht man nun ganz an das Extrem der gerade noch leistbaren Deckungsbeitragsforderung von 370 €/ha/a, so vereinheitlicht sich das Bild wieder etwas. Endnutzungen werden deutlich um teils mehrere Perioden im Vergleich zur Deckungsbeitragsforderung „300 €/ha/a“ vorgezogen. Einzig in den ältesten Buchenmischbeständen und in den Fichtenreinbeständen der vierten Altersklasse, obere Bonität, wird vor der Ernte in Periode 3 stärker durchforstet als bei niedrigeren Deckungsbeitragsrestriktionen.

Vergleicht man die Behandlungsschemata bei den Eingriffen mit Einkommenssteuerung mit denen der Mengensteuerung, stellt man fest, dass bei der Einkommenssteuerung vor allem Endnutzungszeitpunkte variiert werden. Die Variation der Eingriffsstärke spielt eine sehr untergeordnete Rolle. Bei einer Mengensteuerung, wie sie die Hiebssatzsteuerung ist, findet man durch eine Kombination aus Regulation der Eingriffsstärke und Endnutzungszeitpunkt die betriebsweise optimale Bewirtschaftungsstrategie.

Diese beiden, in der forstlichen Betriebssteuerung oft konkurrierenden Paradigmen, haben also einen deutlichen Einfluss auf die Art und Weise des Wirtschaftens. So greift die Einkommenssteuerung bei höheren Forderungen vor allem auf die hiebsreifen Altbestände zurück, wohingegen bei einer starken Mengenbegrenzung auch ideale Behandlungspfade in jüngeren und mittelalten Beständen verlassen werden.

Bei der Integration verschiedener Durchforstungsstärken in eine betriebliche Optimierung sind die Unterschiede zu einem ohne Durchforstungsvarianten formulierten Problem im Hinblick auf die Unterschiede in der Zielfunktion nicht spektakulär. Hierbei gilt es jedoch zu beachten, dass die Zielfunktion relativ träge reagiert und die eingeführten Restriktionen vorwiegend geringe Änderungen hervorrufen. So wird bei zunehmender Hiebssatzrestriktion auf schwächere Vornutzungen bis hin zu gar keine Behandlung umgestellt. Allerdings sind beispielsweise in den älteren hiebsreifen Fichtenreinbeständen der oberen Bonität, die pro geerntetem Festmeter einen sehr hohen Beitrag zur Zielfunktion leisten, die Nutzungen noch lang unverändert. Erst bei sehr hohen Hiebssatzrestriktionen von 4 Efm/ha/a werden auch hier Erntemaßnahmen nur noch zum Teil sofort vorgenommen (17 ha), auf der verbleibenden Fläche (23 ha) einmal mäßig durchforstet und in der zweiten Periode geerntet. Bei einer weiteren Reduktion werden weniger Flächen sofort geerntet und mehr Flächen mit späterer Ernte durchforstet. Endnutzungen werden insgesamt tendenziell zurückgestellt.

Vergleicht man unterschiedlich starke Deckungsbeitragsrestriktionen (Abbildung 61) miteinander, so variieren hier in erster Linie die Endnutzungszeitpunkte. Andere Durchforstungsregimes treten nur in drei Fällen auf.

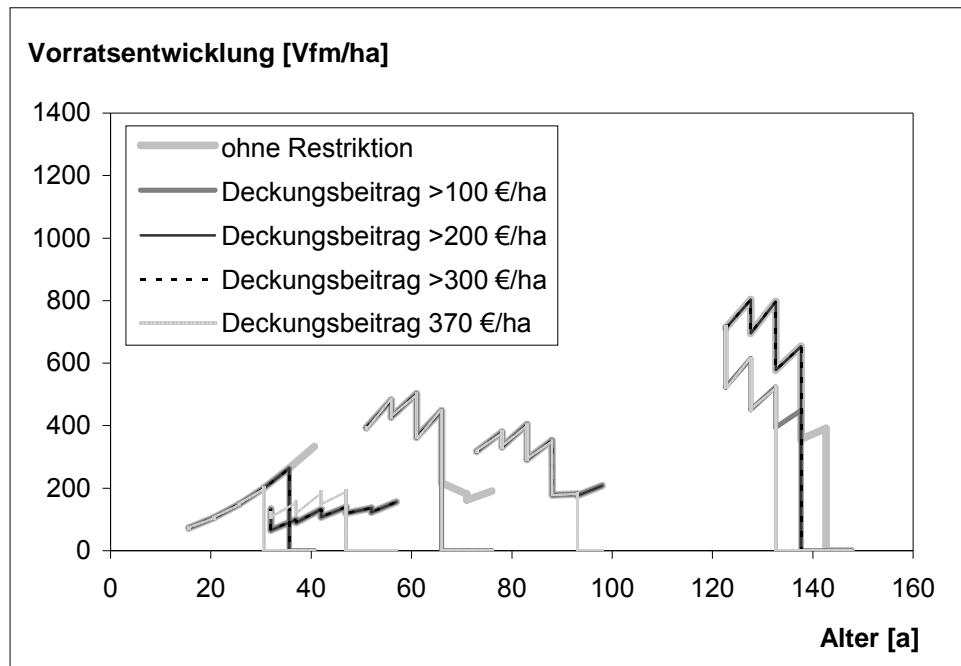


Abbildung 61: Vorratsentwicklung bei unterschiedlich starken Deckungsbeitragsrestriktionen in Buchenmischbeständen verschiedener Altersklassen

Ein Vergleich der forstplanerischen Paradigmen „Mengensteuerung“ und „Einnahmensteuerung“ ergibt damit ein differenziertes Bild. Werden Höchstmengen vorgegeben, so kommt es bei stärkerer Bindungswirkung der Restriktionen zu suboptimaler Durchforstung. Es entstehen Pflegerückstände in allen Altersklassen. Bei der Vorgabe von Mindesteinnahmen variieren die Vornutzungseingriffe kaum. Es werden lediglich mehr noch nicht hiebsreife Bestände zur Ernte eingereicht. Damit bekommt der Forstbetrieb insgesamt eine jüngere Altersklassenstruktur.

Die Wahlmöglichkeiten bei der Einbindung verschiedener Durchforstungsmöglichkeiten pro Bestand haben es ermöglicht, diese Zusammenhänge aufzuzeigen und sie helfen, das tatsächliche betriebliche Handeln in einem realistischen Spektrum abzubilden.

## 5 Diskussion

Nachfolgend werden die wichtigsten Datengrundlagen der Arbeit, die Aspekte der bestandesweisen und betrieblichen Optimierung und Handlungsspielräume für optimale Planungen diskutiert sowie die eingangs gestellten Hypothesen beantwortet.

### 5.1 Datengrundlage

Das Untersuchungsgebiet mit seinen sturmbedingt niedrigen Vorräten und relativ hohen Buchenanteilen kann für Deutschland nicht als unbedingt typisch angesehen werden. Der Schluss vom speziellen Fall auf das Allgemeine sollte jedoch in vorsichtigem Umfang trotzdem möglich sein. Die nachfolgenden Unterkapitel behandeln noch einmal explizit die Aspekte der Modellbestandsbildung, der wachstumskundlichen Fortschreibung und der finanziellen Eingangsgrößen.

#### 5.1.1 Modellbestandsbildung

Die Modellbestandsbildung legt die Grundlage für die waldwachstumskundliche Modellierung und ist damit einer der wichtigsten Bausteine zur Abbildung der forstlichen Produktion. Die Erfordernisse, einen relativ hohen Detaillierungsgrad zu erreichen, um die Modellbestände anschließend auch auf der Betriebsebene zuordnen zu können, haben die gewählte Vorgehensweise erforderlich gemacht. Entgegen der Annahme, mit dem statistischen Verfahren der Clusteranalyse ein sehr gutes Instrument zu Stratifizierung der Modellbestände an der Hand zu haben, hat sich diese vor dem Hintergrund einer Verwendung mit weiteren anders gearteten Datensätzen nicht als günstiger erwiesen. Eine zusätzliche Zuordnung weiterer Bestände zu den auf BWI<sup>2</sup>-Basis gebildeten Clustern ist nicht möglich. Hierzu müssten auch, in einem zweiten Schritt, wiederum unschärfere Zuordnungskriterien definiert werden. Ein Beispiel für die Anwendung eines clusteranalytischen Verfahrens zur Zuordnung von Inventurdaten zu Modellbeständen beschreibt LAPACEK (2003).

Das Alter wurde deshalb als zweites Zuordnungsmaß für die Bestandesausscheidung gewählt, weil es eine sehr gebräuchliche betriebliche Größe und für die Planung gut nachvollziehbar ist. Es wird standardmäßig in der Forsteinrichtung erhoben, im Operat mitgeführt und ist für die weiteren Betrachtungen beispielsweise der Rentabilität sehr wichtig. Für die BWI<sup>2</sup> wurde es in einer Vorklärung bzw. aus Jahrringzählungen an Stöcken oder durch Zählen von Astquirlen und ggf. Altersbohrungen ermittelt (BMELV 2001). Zudem lässt sich bis zu einem gewissen Grad auch die Unterschiedlichkeit der Bestände bzw. Standorte wiedergeben. Das Alter entspricht außerdem der menschlichen Beurteilung eher als die biometrische Einteilung z.B. nach Durchmessern oder Höhen.

Aber es gibt auch andere Ansätze wie die Klassifikation nach Durchmesser Höhe, Nutzungsart oder Standort. Allerdings ist der BHD wie er von FELBERMEIER und MOSHAMMER (2007) verwendet wird, von der vorausgehenden Behandlung abhängig und kann bei verschiedener Behandlung das Bild der eigentlichen Leistung verzerren. Eine behandlungsunabhängige Zuordnungsgröße wäre die Baumhöhe, aber hier kann es gegebenenfalls Messungenauigkeiten geben (siehe ZINGG 1999). Keine Berücksichtigung bei den gewählten Bestandestypen fand die Einteilung nach Nutzungsarten (siehe z.B. Richtlinien für Forsteinrichtung (FER) StMELF 1982 oder WURM 2007), da es sich bei den Modellbeständen um eine rein schematische Einteilung handelt. Auf eine standörtliche Differenzierung wurde zugunsten der Übersichtlichkeit verzichtet<sup>65</sup>.

Insgesamt entspricht die Vorgehensweise der stratenweisen Forsteinrichtung, diese ist in Baden-Württemberg mit den so genannten Waldentwicklungstypen realisiert (HANEWINKEL 2001). Abschließend lässt sich deshalb feststellen, dass die vorgeschlagene Modellbestandsbildung mit

---

<sup>65</sup> Zusätzlich wurde das Konzept der Modellbestände noch mit dem verantwortlichen Forsteinrichter ULRICH FRIEDHOFF diskutiert. Im Vergleich mit dem von der Forsteinrichtung unterschiedenen Waldentwicklungstypen fehlt eine Differenzierung der Fichtenreinbestände auf labilen und stabilen Standorten und der Buchenmischbestände in nadelbaum- und laubbaumdominierte Mischbestände.

der bei der Betriebsinventur und der traditionellen Forsteinrichtung vorgenommenen Bestandestypenausscheidung kompatibel ist.

### 5.1.2 Waldwachstumskundliche Prognose

Die Ergebnisse der waldwachstumskundlichen Fortschreibungen sollen hiermit noch einmal kritisch hinterfragt werden.

Gründe für die unzureichende Abbildung des Durchmesserwachstums gerade in stärkeren Durchforstungen sind wahrscheinlich in der Verfügbarkeit einer ausreichend großen Anzahl an geeigneten Versuchsflächen, mit welchen der Waldwachstumssimulator SILVA parametrisiert wurde, zu suchen. Eine Korrektur, wie sie sich von den stärker durchforsteten Versuchsflächen aus Baden-Württemberg ableiten lässt, war für die vorliegende Fragestellung nach KOHNLE (2006)<sup>66</sup> unabdingbar.

In diesem Zusammenhang wurde auch geprüft, ob die Güte der Abbildung der Eingriffsstärke vor allem im Hinblick auf stärkere Eingriffe gewährleistet ist. Hierzu wurde ein Blick auf die zur Parametrisierung und Validierung von SILVA verwendeten Versuchsflächen geworfen (siehe auch BIBER UND SCHÜTZE 1998). Es konnten Flächen mit entsprechenden starken Eingriffen identifiziert werden (STEINACKER UND NICKEL 2006)<sup>67</sup>. Grundflächenabsenkungen von 50% gegenüber dem A-Grad kamen bei den wichtigsten Baumarten Buche und Fichte auf 6 beziehungsweise 7 Flächen<sup>68</sup> vor und wurden dort nach den Schemata der Auslese- bzw. Z-Baumdurchforstung behandelt. Meist handelt es sich dabei um jüngere Versuche ab 1965 oder Wuchsreihen, da in der Vergangenheit eher schwächere Hoch- bzw. Niederdurchforstungen praktiziert wurden.

---

<sup>66</sup> Mündliche Mitteilung - projektinterne Besprechung

<sup>67</sup> Mündliche Mitteilung der Versuchsflächenleiter des Lehrstuhls für Waldwachstumskunde

<sup>68</sup> **Buche:** Arnstein ARN 638, Rothenbuch ROT 640, Ebrach EBR 630, Starnberg STA 91, Zwiesel 111

**Fichte:** Sachsenried SAC 602, SAC 607, Zusmarshausen ZUS 603, Denklingen DEN 606, Fürstenfeldbruck FUE 612, Weißenburg WBU 613, Vohenstrauß VOH 622

**Eiche:** Waldleiningen WAL 88, Rohrbrunn ROH 90, ROH 620



Zu den hohen Grundflächenzuwächsen der unbehandelten Bestände (siehe Abbildung 30 und Abbildung 31) ist noch anzumerken, dass durch das Ausschalten des Moduls für natürliche Mortalität eventuell das Wachstum überschätzt wurde. Dies war jedoch aufgrund der speziellen Parametrisierung für die Ostalb die robustere Vorgehensweise. Grundsätzlich wird das Wachstum der Bäume im Waldwachstumssimulator mit der biologischen Obergrenze des Standorts eingeschränkt. Das heißt bei sehr hohen Bestockungsgraden, wenn keine Konkurrenten durch natürliche Mortalität ausfallen, wachsen die Bäume nur ganz marginal zu. Das tatsächliche Durchmesserwachstum sämtlicher Einzelbäume ist geringer, damit die summarischen Bestandeswerte nicht über der Realität liegen.

In der praktischen Umsetzung ergaben sich einige Schwierigkeiten. Das sind zunächst, wie schon aus den Ergebnissen der Grundflächenentwicklung (siehe Kapitel 4.2) ersichtlich, geringere Vornutzungserträge als erwartet. Außerdem sinkt mit zunehmender Stärke der Durchforstung meist der BHD der ausscheidenden Bäume. Der Sprung im finanziellen Ergebnis von der stärksten Durchforstungsvariante, mit Entnahme der halben Grundfläche, zu „alle Bäume entnehmen“ wird hierdurch vergrößert. Zusätzlich ist es durch einen eigenen Programmierfehler in einigen älteren Durchforstungsstufen vorgekommen, dass bereits vor dem Wachstum Bäume entnommen wurden, statt wie vorgesehen erst nach dem Wachstum. Diese wurden jedoch trotzdem zu den erfolgten Entnahmen dazugezählt. Dies hat zur Folge, dass die Entnahmesätze leicht unterschätzt und das Wachstum des Bestandes aufgrund der bereits weggefallenen Konkurrenten leicht überschätzt wurde. Dies betrifft nur den Fortschreibungszeitpunkt 25 Jahre und hier einen Anteil von 62% der Bestände.

Eine Neueinstellung des Wachstums und eine Korrektur dieser Fehler ist teils gar nicht beziehungsweise nur sehr begrenzt möglich. Insgesamt sollten diese Fehler jedoch das Gesamtergebnis in seiner Richtung nicht beeinflussen und zusätzlich durch genaue Betrachtung der in der Ergebnisdatei angehängten naturalen Größen, auch im Einzelfall, weitgehend nachvollziehbar sein.

### 5.1.3 Finanzielle Kennzahlen – Deckungsbeitragskalkulation

In der Wahl der Eingangsparameter im Bereich der Deckungsbeitragskalkulation liegt ein ganz entscheidender Faktor für die Ausprägung der Ergebnisse. Je nach Preisstaffelung und entsprechender Kostendegression fällt das Ergebnis zugunsten einer Bestandesbehandlung zur Erzielung von Qualitäten in Form dickerer Bäume oder zur maximalen Massenleistung aus. Entsprechend werden schwächere oder stärkere Sortimente produziert.

In der vorliegenden Arbeit wurde auf eine möglichst realitätsnahe Gestaltung der Eingangsparameter Wert gelegt. Hierbei bewegen sich die Aufarbeitungskosten auf einem relativ konstanten Niveau. Die Prognose der stark schwankenden Holzpreise ist dabei als sehr schwierig anzusehen und keiner der befragten Experten wagt eine tatsächliche Vorhersage des Preises für 30 Jahre. Wichtig für die Gültigkeit der Aussagen zur optimalen Durchforstungs- und Erntestrategie ist jedoch nicht so sehr das absolute Niveau, sondern vor allem die Relation der Preise der einzelnen Sortimente zueinander.

Denkbar wäre auch der – aus analytischen Gesichtspunkten sehr interessante – Ansatz von JOHANSSON und LÖFGREN (1985) sowie WIPPERMANN (2004) gewesen, die Ertragsfunktion zu variieren. WIPPERMANN (2004) unterstellt Erlösmodelle mit konkaver, linearer und fixer Wertentwicklung. Bei einer Zinsforderung von 1,5% wird bei konkaver Wertsteigerung, im Hinblick auf die Kontrollgrößen Stammzahlentnahme und Bestockungsgradabsenkung, am stärksten durchforstet. Bei linearer Wertentwicklung wird anfangs freigestellt und erst später wieder stärker durchforstet. Bei fixem Verlauf der Wertentwicklung, d.h. keine Preissteigerung mit stärkeren Sortimenten und keine sinkenden Aufarbeitungskosten, wird in Bezug auf die Stammzahlabnahme genauso stark durchforstet wie bei linearer Wertentwicklung. Allerdings ist die Bestockungsgradabsenkung insgesamt höher. Aufgrund der bereits zahlreichen Untersuchungsvarianten wurde zugunsten der Übersichtlichkeit der vorliegenden Arbeit auf diese Berechnungen verzichtet.

#### 5.1.4 Bodenertragswertberechnung

Die Höhe der angesetzten Bodenertragswerte liegt im Rahmen der Werte aus der Literatur z.B. SANCHEZ OROIS (2003) 6.000-9.000 € (Seekiefer in Galicien, 4% Zins, 1,5 €/ha/a Fixkosten), MÖHRING et al. (2006) 5.000 € (Fichte, 1% Zins; 1.000 €/ha bei 1,5%; negative Werte ab 2%), BEINHOFER (2008a) 3.200 €/ha (Kiefer, 2% Zins). Diese schwanken jedoch sehr stark, abhängig von den zugrunde liegenden Annahmen zu Kultur- und Pflegekosten sowie den Vorerträgen. In den genannten Quellen sind die Bodenertragswerte immer als Nebenergebnisse erwähnt. Eine genaue Diskussion zu deren Höhe und eine weitere Einwertung fand bei den oben genannten Autoren nicht statt.

Die gewählte Methode, das Maximum einer Ausgleichsfunktion und nicht das tatsächliche Maximum während des Bestandeslebens heranzuziehen, resultiert aus den ausschließlich zur Verfügung stehenden unechten Zeitreihen. Stärkere Abweichungen, wie sie vor allem zeitlich zwischen höchstem Wert und Maximum der Ausgleichkurve, im Hinblick auf den optimalen Nutzungszeitpunkt auftreten, spielen dabei keine Rolle, da in die Optimierung nur die Höhe des Werts eingeht. Der Versuch, Bodenertragswerte aus Ertragstafelwerten – und damit vollständigen Zeitreihen – herzuleiten, wurde wieder verworfen, da die Mischbestände und Behandlungsregime im Untersuchungsgebiet damit nicht abzubilden waren.

Ein weiteres Problem der Addition der Bodenertragswerte in der Zielfunktion trat in jüngeren Beständen mit noch sehr geringen Wertzuwachsen auf. In diesen Beständen ist der Gewinn durch eine Verkürzung des Diskontierungszeitraums der Bodenertragswerte höher als der tatsächliche Wertzuwachs, weshalb diese sofort geerntet werden. Dieses Problem könnte durch eine Verlängerung des Betrachtungshorizonts behoben werden, es würde jedoch die Grenzen der Wachstumssimulation sprengen. Erntemaßnahmen in diesem Kontext wurden deshalb nicht in die optimale Lösung aufgenommen.

Insgesamt ist der unbegrenzte Betrachtungshorizont, der mit den Bodenertragswerten darstellbar ist, für die Durchforstungsoptimierung in sich nicht ganz konsistent, weil die Grundlage für die Bodenertragswerte, die vorab noch nicht optimierten Durchforstungen sind. Dieses Problem des

tatsächlich korrekten Bodenertragswertes ist in der vorliegenden Formulierung nur annäherungsweise bei  $i \rightarrow \infty$  lösbar. An der Zielfunktion nehmen die Bodenertragswerte im Schnitt über alle Bestände einen Anteil von rund einem Viertel des Gesamtbetrags ein. In jüngeren Beständen sind die Anteile wie bereits diskutiert höher, in älteren geringer.

## 5.2 Durchforstungsoptimierung

Die Ergebnisse der Durchforstungsoptimierung sind im Hinblick auf die finanziellen Ergebnisse recht viel versprechend. Eine Ableitung einer allgemein anwendbaren Behandlungsstrategie gestaltet sich aufgrund der Arbeit mit unechten Zeitreihen schwierig.

Im Folgenden werden die Ergebnisse noch einmal kritisch hinterfragt und mit der vorhandenen Literatur abgeglichen. Dies geschieht zum einen für die Verwendung der zwei verschiedenen Optimierungsverfahren, zum anderen für den Abgleich der Ergebnisse der unterschiedlichen Behandlungsstrategien.

### 5.2.1 Vergleich der Optimierungsverfahren

Die hier vorliegende Rechnung eines großen Datensatzes ergibt eine einmalige Vergleichsmöglichkeit der angewandten Lösungsverfahren. Im Folgenden sollen die Gründe für Unterschiede und mögliche andere Lösungsverfahren diskutiert werden.

Es gibt, wie eingangs beschrieben, zwei Möglichkeiten das dynamische Optimierungsproblem zu formulieren. Die Vor- und Nachteile seien im Folgenden diskutiert. Die höheren Ergebnisse (Abbildung 37 bis Abbildung 44) der vollständigen Enumeration verglichen mit der Dynamischen Programmierung in der vorliegenden Formulierung liegen an der nicht erfüllten Bedingung einer konkaven Wertentwicklungsfunktion. Das heißt, es dürfen in der Funktion keine lokalen Maxima oder Minima vorkommen. Ansonsten kann aus dem Vergleich zweier Perioden in der vorliegenden Formulierung nicht sicher die optimale Variante gefunden werden.

Für das Abweichen von einer konkaven Wertentwicklungsfunktion im Datensatz dieser Arbeit gibt es vier grundsätzliche Ursachen:

- 1) Dies sind zum einen die **Unterschiede der Preise** in den jeweiligen Sortimentsklassen. Das sind so genannte Klassensprünge, die sich dann besonders drastisch auf die Wertentwicklung eines Bestandes auswirken, wenn sehr viele Bäume gleichzeitig eine bestimmte Dimension erreichen. Dies ist zum Beispiel von Industrieholz- zu Stammholz- oder Fixlängendimensionen der Fall.
- 2) Ein weiterer Faktor für einen abweichenden Verlauf von der eigentlich glatten Kurve der **Aufarbeitungskosten** sind die Grenzen der Aufarbeitungsverfahren. So muss beispielsweise in stärkeren Dimensionen die Aufarbeitung von maschineller Ernte mit dem Harvester wieder auf motormanuell umgestellt werden, was abrupt mit entsprechend höheren Kosten verbunden ist.

Der Kurvenverlauf der Preis- und Kostenfunktion könnte jedoch ohne erheblichen Aufwand funktional ausgeglichen werden, falls damit die richtige Lösung gefunden werden könnte. Diese Anpassung wäre dann eine Glättung der realen Werte auf einen konkaven Wertentwicklungsverlauf.

Zur Prüfung, ob mit dieser Korrektur die richtige Lösung möglich ist, wurde der Einfluss der Preis- und Kostenrelationen aus dem Programm herausgenommen. Es wurden hierzu Preise gleich ,1' und Kosten gleich ,0' gesetzt und mit dem gleichen Optimierungsalgorithmus, allerdings ohne Bodenertragswerte gerechnet. Somit wurde eine Holzzuwachsoptimierung durchgeführt. Von der Berechnung eines eigenen „Holzertragswertes“ wurde abgesehen, da auch ein Weglassen des Bodenertragswertes in der Grundvariante die Ergebnisse beider Verfahren nicht übereinstimmen ließ. Auch hier gab es deutliche Unterschiede zwischen der Dynamischen Programmierung und der vollständigen Enumeration.

- 3) Entscheidender Faktor für die unterschiedlichen Behandlungen mit Dynamischer Programmierung und vollständiger Enumeration ist jedoch das verschiedene Wachstumspotential, welches sich aufgrund der unterschiedlich starken Eingriffe mit dem verwendeten Waldwachstumsprogramm ergibt.
- 4) Zusätzlich kann noch die Geschwindigkeit des Baumwachstums an sich als Grund für die Schwierigkeiten der Dynamischen

Programmierung genannt werden. Das Wachstum der Bäume ist gemeinhin ein relativ langsamer Vorgang. Die Reaktion auf Maßnahmen wie einen stärkeren Eingriff hat nicht nur Einfluss auf die nächsten fünf Jahre des Wachstums aus, sondern zeigt viel länger Wirkung (siehe FREIST 1962, S. 61ff). Hierauf basieren explizit einige verbreitete Behandlungsprogramme der Buche wie z. B. die Lichtwuchsdurchforstung nach ALTHERR (1971).

Zu beachten sind auch die Schwankungen, die aus Zufallsparametern im Waldwachstumssimulator resultieren (MARTIN und EK 1981). Diese können Abweichungen von bis zu 30% des Volumenzuwachses ausmachen, bewegen sich jedoch in der Regel im Bereich von 0,5 - 6% (siehe Tabelle 10). Für Unterschiede der beiden Verfahren können sie jedoch im vorliegenden Fall nicht verantwortlich gemacht werden, da für beide Verfahren der Ausgangsdatensatz absolut identisch war. Man muss sich dieser Tatsache im Hinblick auf starke Wertzuwachsänderungen, auch bei Rechnung mit gemittelten Werten des Wachstums, bewusst sein.

Die in Punkt 3 genannten unterschiedlichen Wachstumspotentiale spielen bei den von BULLARD et al. (1985) verwendeten Funktionen, bzw. einfacheren Modellen, keine Rolle. AMIDON und AKIN (1968), BRODIE et al. (1978), BRODIE und KAO (1979) sowie KAO und BRODIE (1980) unterstellen beispielsweise explizit ein lineares Wachstum. Mit ausgefeilteren einzelbaumbezogenen Wachstumsalgorithmen können jedoch unterschiedliche Wertentwicklungen abhängig von der vorausgehenden Entnahme abgebildet werden. Hinweise hierauf finden sich bei SCHREUDER (1971, S. 334): „If the method of successive approximations is used, no warning at all is available as to whether one is or is not at the global maximum“ oder HOF und KENT (1990, S. 900ff) sowie ARTHAUD und KLEMPERER (1988, S. 1121) „[...] with certain yield functions, the possibility exists for violations of the principle of optimality in thinning optimization with forward dynamic programming [...]“.

Exemplarisch ist aus dem vorliegenden Datensatz die Wertentwicklung für die II. Altersklasse der Buchen- und Fichtenbestände zu den einzelnen Zeitpunkten in Abbildung 62 und Abbildung 63 dargestellt. Es sind deutliche Sprünge im Vergleich der einzelnen Behandlungsschemata von

undurchforstet bis stark durchforstet zu verzeichnen. Die abgebildete Wertentwicklung gibt dabei nicht exakt die Zielfunktion (Gleichung 3) wieder, da hier der Bodenertragswert nicht hinzugezählt wurde, sondern soll vielmehr die Sprünge im endlichen Betrachtungshorizont verdeutlichen.

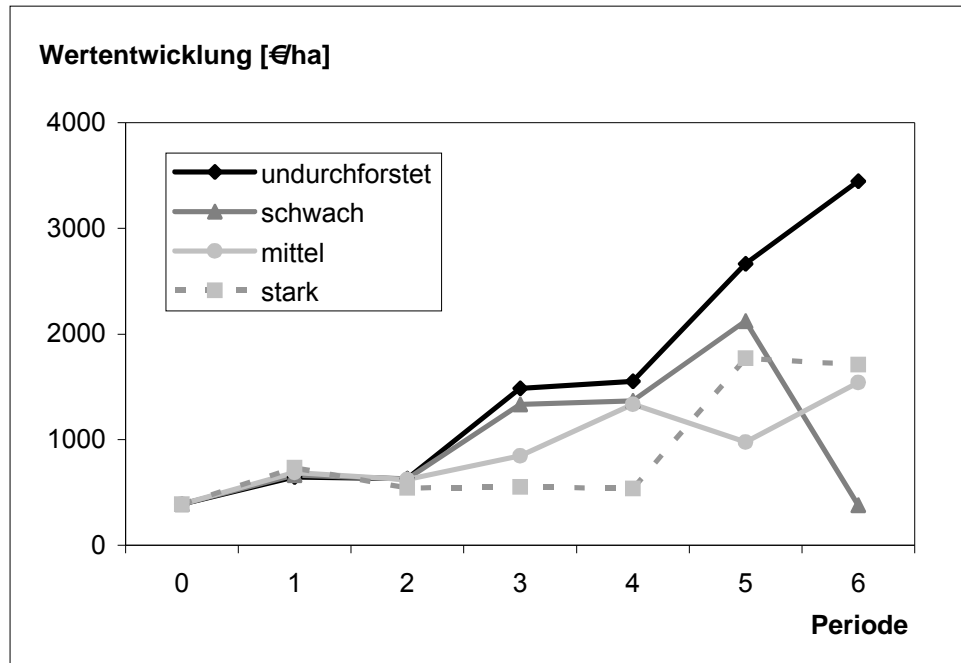


Abbildung 62: Wertentwicklung (jeweils Durchforstungserlös plus Abtriebswert zum jeweiligen Zeitpunkt) eines 30-jährigen Buchenreinbestands, über 6 Fortschreibungsperioden (zu je 5 Jahren), bei unterschiedlichen Behandlungsstärken

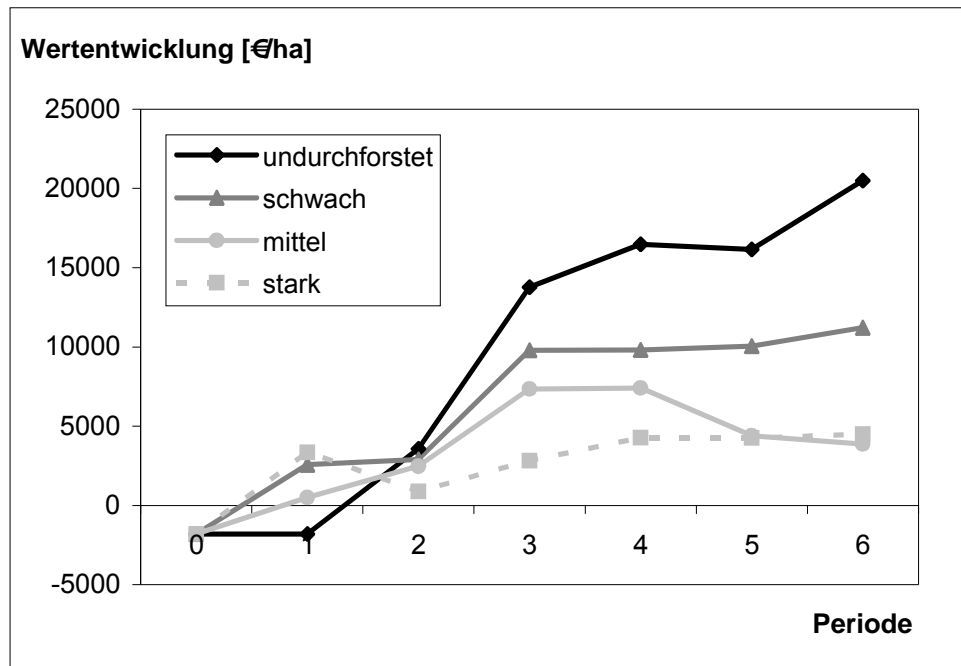


Abbildung 63: Wertentwicklung (Durchforstungserlös plus Abtriebswert zum jeweiligen Zeitpunkt) eines 36-jährigen Fichtenreinbestands, über 6 Fortschreibungsperioden (zu je 5 Jahren), bei unterschiedlichen Behandlungstärken

Für die Dynamische Programmierung in der Netzwerkformulierung gilt nicht die bereits genannte strenge Bedingung der Konkavität, sondern es muss vielmehr nur die Kontinuität der Wertentwicklungsfunktion gesichert sein. Wenn diese Kontinuität gesichert ist, kann aus dem errechneten Netzwerk mit zulässigen Pfaden und Knoten die optimale Variante herausgefunden werden.

Allerdings kann es auch bei einer Netzwerkformulierung des Dynamischen Optimierungsproblems zu Schwierigkeiten kommen, siehe PELKKI (1997, S. 394) “[...] nonuniform intra-neighborhood growth potentials led to serious violations of the principle of optimality [...]”. Mit der Verletzung des Optimalitätsprinzips ist hierbei die Voraussetzung zur Anwendung der Dynamischen Programmierung gemeint. Wenn nicht alle Knoten des Netzwerks eindeutig ineinander überführbar sind, findet die Dynamische Programmierung kein globales Optimum. Das heißt, auch bei weit gefassten Grenzen der Zustandsvariablen dürfen nicht mehrere Knoten durch ihr Wachstum in den gleichen nachfolgenden Knoten gelangen.

Eine weitere Ursache für die beobachteten Unterschiede ist der von NEMHAUSER (1969) beschriebene „coarse grid approach“, der bei weiten



Zustandsabständen, d.h. langen Fortschreibungsperioden, höhere Ergebnisse beobachtet hat. Dies wäre analog zu Punkt 4 des langsamen Baumwachstums. Hier sind die Ergebnisse bei entsprechend weitem Betrachtungszeitraum am höchsten.

Längere Betrachtungszeiträume als ein 5-Jahreshorizont für die Dynamische Programmierung oder gar wechselnde Zeiträume könnten diese Schwäche, allerdings auf Kosten einer komplizierteren Programmformulierung, ausgleichen. SCHREUDER (1971, S. 337) ergänzt beispielsweise zu seiner Rechenanweisung, dass die Rekursionsgleichung bezüglich des Ertrags zu maximieren ist, und dabei das Zeitfenster so groß zu wählen ist, dass alle lokalen Maxima und Minima eingeschlossen werden.

Mit einem zugrundeliegenden Netzwerkansatz vergleicht PELKKI (1997) einmal klassische Dynamische Programmierung und dann Dynamische Programmierung kombiniert mit einem vorausschauenden Parameter für das künftige Wachstumspotential. Wenn dieses Potential stark abweichend ist, liefert der Vorschaualgorithmus, mit der aufwändigeren Berechnung, bessere Ergebnisse. Bei einer Netzwerkformulierung der Dynamischen Programmierung ist natürlich auch die Knotenweite des Netzwerks entscheidend für die Güte des Ergebnisses, welche mit dem Begriff des „neighborhood storage“ (PAREDES und BRODIE 1987; ARTHAUD und KLEMPERER 1988 sowie PELKKI 1997) beschrieben wird. Damit ist ähnlich wie beim „coarse grid“ die Feinauflösung des Systems, allerdings in diesem Fall die Feinauflösung der Entscheidungsvariablen bzw. Zustände, gemeint. Dies sagt beispielsweise wie viele verschiedene Durchforstungen zugelassen werden und wie eng die Intervalle beispielsweise der verschiedenen Grundflächenhaltungen gefasst sind, von denen aus weiter gerechnet werden kann. Insgesamt gibt es also auch bei der Formulierung der Dynamischen Programmierung in Netzwerkschreibweise Ungenauigkeiten, welche in erster Linie aus der Festlegung der Knotenweite und der Anzahl der betrachteten Zustände resultieren.

Abschließend soll der Aufwand der Rechnung der vollständigen Enumeration dargestellt werden, um deutlich zu machen, wie viel Rechenkapazität für die tatsächlich genaue Lösung zur Verfügung gestellt werden muss. Dabei ist zu

beachten, dass es sich bei der Anzahl der Varianten in Abbildung 64 um jeweils einzelne Läufe des Waldwachstumsprogramms handelt. Ein Vorgang der nicht durchgängig automatisierbar ist.

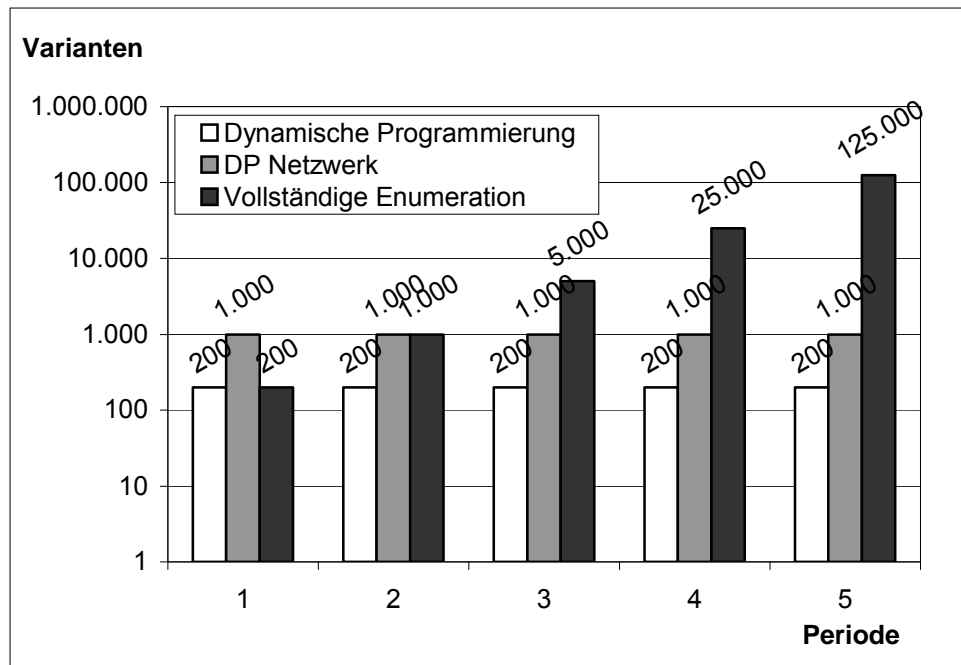


Abbildung 64: Anzahl der zu rechnenden Varianten für die einzelnen Fortschreibungszeitpunkte mit der vorliegenden Formulierung der Dynamischen Programmierung (DP), mit DP in Netzwerkform und vollständiger Enumeration

Der von PAREDES und BRODIE (1987, S. 17) beschriebene „curse of dimensionality“ ist deutlich zu spüren, weil die möglichen Varianten mit der Anzahl der Zeitpunkte potenziert werden. Dem hohen Aufwand für das Rechnen des gesamten Entscheidungsbaumes mit 295.260 Knoten, als Summe aller Varianten mit Endnutzungen, muss der Informations- d.h. Genauigkeitsgewinn der wesentlich weniger aufwendigen dynamischen Variante gegenübergestellt werden (siehe Abbildung 64). Die Variante der Netzwerkformulierung der Dynamischen Programmierung erfordert einmal die Berechnung der zulässigen Pfade und Knoten des Netzwerks und wurde zur Darstellung in jeder Periode hinzugefügt (Abbildung 64).

Abschließend noch ein Blick auf die beobachteten Unterschiede in vergleichenden Studien aus der Literatur, wennauch die wirkliche Referenz mit einer vollständigen Enumeration in anderen Studien fehlt. Ähnliche, wenn auch im absoluten Niveau wesentlich geringere, Unterschiede werden von

VALSTA (1990) diskutiert. Er stellt Abweichungen von 0,1 - 3% für Dynamische Programmierung mit Netzwerkformulierung verglichen mit direkter Suche fest. Random Search Verfahren wichen zwischen 1,1 - 5,7% vom Optimum ab, je nach Zinssatz und Anzahl der untersuchten Durchforstungen. Für niedrige Zinssätze liegt die Dynamische Programmierung besser, bei höheren Zinssätzen schneiden beide Verfahren annähernd gleich gut ab.

Einen Vergleich von Dynamischer Programmierung als Netzwerk mit Nichtlinearer Programmierung zeigt, dass die Ergebnisse der Dynamischen Programmierung um 1 - 3% (KAO und BRODIE 1980), 3% (VALSTA 1990) bis zu sogar 20% (ROISE 1986) niedriger ausfallen. Verglichen mit Dynamischer Programmierung zeigt A\* Optimierung<sup>69</sup> nach ARTHAUD und PELKKI (1996) Zunahmen von 0 - 1,2%. Hierbei kommen die Autoren zu dem Schluss, dass diese suboptimalen Ergebnisse aus der kontinuierlichen Formulierung der Probleme stammen könnten.

Das Problem der Durchforstungsoptimierung geht methodisch über die klassischen finanzmathematischen Modelle hinaus, welche ein bestimmtes Wachstum in Form einer Zinsrate unterstellen, weil das Wertwachstum wiederum von der Behandlung des Bestands abhängig ist und sich hierbei von Behandlung zu Behandlung und Periode zu Periode unterschiedliche Raten ergeben können. Für eine korrekte Lösung muss deswegen ein sehr hoher Aufwand betrieben werden, auf eine Netzwerkformulierung oder auf Näherungswerte aus heuristischen Lösungsverfahren zurückgegriffen werden.

### **5.2.2 Ergebnisse der vollständigen Enumeration**

Insgesamt entsprechen die Ergebnisse sowohl bezüglich des Endnutzungszeitpunktes als auch hinsichtlich der Durchforstungsstärke der nach der ökonomischen Theorie zu erwartenden Reihung. Mathematische Begründungen bezüglich der Wirkungen des Zinssatzes,

---

<sup>69</sup> Heuristisches Suchverfahren auch A-asterisk genannt und u.a. auch zur Spracherkennung, Bewegungsmodellierung oder 3D-Erkennung (ARTHAUD UND PELKKI 1996) eingesetzt.

Bestandesbegründungskosten sowie Holzpreisen und Erntekosten sind CHANG (1983) zu entnehmen. MÖHRING (1994) diskutiert ebenfalls die verschiedenen Verfahren zur Bestimmung der Vornutzungsentscheidungen und der Endnutzungsentscheidungen in älteren Beständen. Für die Holzproduktion in einem ungleichaltrigen Wald mit einer Analyse von optimalen Zieldurchmessern bzw. Vorrat verdeutlicht KNOKE (1999) die Wirkmechanismen. MOOG und BORCHERT (2001) konnten in ihrer Studie einen Zusammenhang zwischen Vorratshaltung beziehungsweise Umtriebszeit und Wirtschaftlichkeit herstellen.

Die konkreten Ergebnisse sollen jedoch noch bezüglich der Eingriffsstärke, der Durchforstungsart, im Hinblick auf die Qualität sowie unter Einbeziehung des Risikos einer kritischen Betrachtung unterzogen werden.

Der Vergleich der optimalen Durchforstung mit einer regulären Auslesee-durchforstung weist in einem Fall einen niedrigeren Wert für die optimale Durchforstung aus (siehe Abbildung 53). Dies stellt jedoch nicht das Verfahren als solches in Frage, welches aus einem vorliegenden Datensatz zuverlässig das Optimum findet. Vielmehr dokumentiert es, dass trotz der Vielzahl der gerechneten Durchforstungsmöglichkeiten immer noch Potential durch die Hinzunahme weiterer Möglichkeiten besteht. In der vorliegenden Studie wurden nur gestaffelte Eingriffsstärken der Hochdurchforstung untersucht. Weitere Auswahlmöglichkeiten zwischen verschiedenen Durchforstungskonzepten (siehe z.B. PELKKI und KIRILLOVA 2004) sind wünschenswert. Insgesamt ist das Verfahren mit im Schnitt 20% höheren Werten der Zielfunktion, verglichen mit der regulären Durchforstungspraxis<sup>70</sup>, sehr überzeugend.

Bei der Absenkung der Grundflächenhaltung in der Optimierung fällt eine Ähnlichkeit mit der bayerischen Richtlinie zu Pflege und Verjüngung der **Buche** (STMELF 2000) auf. Allerdings ist die optimale Behandlung im Blick auf die unechte Zeitreihe kritisch zu hinterfragen. Die bei einem moderaten Zinssatz auftretenden Grundflächenabsenkungen können auch tendenziell Ernte von Zielstärken oder im Sinne einer Verjüngungsnutzung gesehen

---

<sup>70</sup> Referenz ist eine mäßige Auslesee-durchforstung siehe Kapitel 4.4.2.

werden. Der mittlere Durchmesser der entnommenen Bäume übertrifft den mittleren BHD des verbleibenden Bestandes zumeist erheblich. Darüber hinaus werden bei einem höheren Zinssatz, tatsächlich auch diese Bestände ab dem Alter 100 sukzessive geerntet. Die Grundflächenabsenkungen können deswegen nicht uneingeschränkt als Vornutzung gesehen werden, wie sie in der bayerischen Richtlinie (STMELF 2000) festgesetzt sind. Unbeachtet bleibt allerdings im Gegensatz zum Konzept der Richtlinie eine tatsächliche Qualitätsverbesserung durch das angewandte Verfahren. Mit der gewählten Methode können nur Massen für einzelne Sortimenten quantifiziert werden und die Bewertung erfolgt über durchschnittliche Qualitätsverteilungen (siehe Kapitel 3.5). Eine Berücksichtigung der Qualität findet beispielsweise in KNOKE (2003a) im Hinblick auf Buchenrotkern oder HYYTIÄINEN et al. (2005) für Kiefer bezüglich Astigkeit und Anteil juvenilen Holzes statt.

ZELL (2002) untersucht verschiedene Zielstärkennutzungen für Buche unter Berücksichtigung des Rotkernrisikos und deren Vorteilhaftigkeiten im Vergleich. Der geringste untersuchte Zieldurchmesser von 50 cm hat sich, bei Zinssätzen von 1% und 2%, als am günstigsten erwiesen. Auch ohne die Berücksichtigung von Qualitäten werden in der vorliegenden Untersuchung die Buchenbestände der oberen Bonität mit Erreichen eines durchschnittlichen BHD von 50 cm geerntet sowie in der unteren Bonität noch einmal stark hochdurchforstet und anschließend geerntet.

HYYTIÄINEN und TAHVONEN (2002) erhalten in ihrer Untersuchung für **Fichte** und Kiefer auch relativ späte erste Durchforstungen und hohe Bestandesdichten, trotz abnehmender Durchmesserzuwächse in jungen Beständen. Sie können dies klar auf die mit steigendem Durchmesser konkav abnehmenden Erntekosten zurückführen. Allerdings betonen sie, dass dies auch ein tatsächliches unverzögertes Wiederaufnehmen des Wachstums nach erfolgter Freistellung voraussetzt.

Auffallend bei der Fichte sind die seltenen und wenn dann nur schwachen Durchforstungen (siehe Kapitel 4.4.2). Allerdings war die Ausgangsstammzahl aller Fichtenbestände verhältnismäßig niedrig (Tabelle 8). Die Ableitung einer Empfehlung aus den Ergebnissen der optimalen Behandlung muss deshalb kritisch gesehen werden.

Bedauerlicherweise sind die Ergebnisse dieser Arbeit nicht direkt mit aktuellen Ergebnissen von Durchforstungsoptimierungen aus dem gleichen Wuchsraum vergleichbar. WIPPERMANN (2004) hat Kiefernreinbestände untersucht, welche durch die sonstigen Nadelbaumbestände nicht wiedergegeben werden. Er kommt je nach Zinsforderung ebenfalls zu erheblichen Bestockungsgradabsenkungen bis zu einem Bestockungsgrad von 0,5. Diese finden jedoch erst in den ältesten Beständen statt, was sich mit den Ergebnissen für Fichtenbestände in der vorliegenden Arbeit deckt. Hierbei ändert sich die marginale Rendite um  $-1,3\%$  bis  $+1,5\%$  pro  $0,1\%$  Altersverschiebung. Die Auswirkungen verteilen sich von den negativen Abweichungen in den Jungbeständen bis zu den höchsten positiven Auswirkungen in den mittelalten Beständen. Ein Vergleich mit einer regulären Durchforstung, wie er in dieser Arbeit dargestellt ist (siehe Abbildung 52 bis Abbildung 55), wurde von WIPPERMANN (2004) nicht vorgenommen.

SÁNCHEZ und VILČKO (2002) beschränken ihre Untersuchungen auf die zwei Alternativen „Durchforsten“ und „nicht Durchforsten“, mit einer Beschränkung auf mäßige Niederdurchforstungen in 38 ausgewählten Fichtenbeständen des Solling. Die im Ergebnis dargestellten Raum-Zeit-Muster für Vor- und Endnutzungen bei verschiedenen Holzpreisen sind nur schwierig mit den Ergebnissen dieser Arbeit vergleichbar.

Auch KNOKE (1998) untersucht die Behandlung der Fichte mit dem Ziel einer ökonomischen Bewertung von Durchforstungskonzepten, die auf eine höhere Einzelbaumstabilität abzielen. Bei seiner Studie sind ab Zinssätzen von  $2,8\%$  starke Durchforstungen in Verbindung mit einer Zieldurchmesserernte am vorteilhaftesten. Bei niedrigeren Zinssätzen erbringt eine kombinierte Durchforstung aus schwacher Auslesedurchforstung in den Jungbeständen und schwacher Niederdurchforstung in den älteren Beständen die höchsten Kapitalwerte. Die Wertzuwachsverluste aufgrund der starken Eingriffe werden durch die früher anfallenden größeren Einzahlungen bei höheren Zinssätzen ausgeglichen. Im Vergleich zu den in vorliegender Arbeit für optimal gefundenen Behandlungen fällt auf, dass analog bei Fichtenbeständen der oberen Bonität auch erst Entnahmen im Alter 35 – bei KNOKE (1998) im Alter 33 – und bei der unteren Bonität erst im Alter 42 kostendeckend sind. Vorher werden im vorliegenden Fall keine Maßnahmen

realisiert. Die Vorgehensweise ändert sich auch bei Rechnung mit einem höheren Zinssatz von 4% nicht. Die Entnahmesätze liegen hierbei im Alter 35 – 55 (obere Bonität) mit 69 Efm im Jahrzehnt, und im Alter 40 – 60 (untere Bonität) mit 67 Efm im Jahrzehnt, zwischen den schwachen Entnahmesätzen der kombinierten Durchforstung nach KNOKE (1998), erreichen aber die starken Entnahmen der Zieldurchmessererntevariante (ebd.) nicht. Ab dem Alter 57 (obere Bonität) und Alter 63 (untere Bonität) werden die Eingriffe jedoch deutlich stärker und münden schließlich in einer Verjüngungsnutzung im Alter 72 (obere Bonität) sowie Alter 92 (untere Bonität) und sukzessiver sehr starker Entnahme, welche als schrittweise Einreihung gesehen werden kann. Es ist denkbar, dass die Ergebnisse von KNOKE (1998) durch eine feinere Abstufung zwischen den Entnahmestärken mit den Ergebnissen dieser Studie noch besser in Deckung gebracht werden könnten.

Beim Vergleich von Niederdurchforstung mit **Hochdurchforstung** von KILKKI und VÄISÄNEN (1970) ist die, auch in dieser Studie zugrunde gelegte, Hochdurchforstung mit 2 - 12% Unterschied, günstiger als die Niederdurchforstung. Größte Verluste beim Nichtbefolgen des optimalen Programms treten nach KILKKI und VÄISÄNEN (1970) bei Überbestockung auf. Auch verglichen mit der Optimierung von PELKKI und KIRILLOVA (2004) scheint die in vorliegender Arbeit gewählte Vorgehensweise sinnvoll. In ihrer Studie haben PELKKI und KIRILLOVA (2004) Eichenbestände untersucht und kommen beim Vergleich verschiedener Durchforstungsstrategien zu dem Schluss, dass Auslesedurchforstung bzw. Hochdurchforstung die besten Ergebnisse liefert. Die Rechnung mit einer Auslesedurchforstung war aber leider im Waldwachstumssimulator SILVA für die Absenkung der Durchforstungsstärken nicht geeignet, weil die Grundflächen nicht durchgängig auf das nötige Maß abgesenkt wurden und daher in der vorliegenden Studie durchgängig nur Hochdurchforstung zugrunde gelegt werden konnte. Die von PELKKI und KIRILLOVA (2004) gefundenen Unterschiede bewegen sich im Bereich von 0 - 10% Überlegenheit der Auslesedurchforstung bei Eiche gegenüber der Hochdurchforstung. Keine Unterschiede bzw. ein etwas besseres Abschneiden der Hochdurchforstung ergab sich in Beständen mit geringeren Eichen- und Wertholzanteilen. Die Verbesserungen gegenüber der 0-Variante ohne Durchforstung waren beträchtlich und lagen im Bereich

von bis zu 20%. Diese Steigerung kann für Laubholz- und Buchenbestände (Abbildung 50) in der vorliegenden Untersuchung noch übertroffen werden. Der Effekt von verlängerten Umtriebszeiten bei zunehmender Anzahl an Durchforstungen, wie ihn PELKKI und KIRILLOVA (2004) mit einer Größenordnung von durchschnittlich 5 - 10 Jahren bei Auslesedurchforstung und sogar 20 - 50 Jahren bei Hochdurchforstung feststellen, wurde in der vorliegenden Arbeit nicht untersucht.

JOHNSTON et al. (1967) konnten nicht zeigen, dass sich die Barwerte der Durchforstungserlöse mit der Durchforstungsart ändern. Allerdings hat diese natürlich einen Einfluss auf die weitere Wertentwicklung des noch stehenden Bestandes. Ein ganzes Bestandesleben wurde bei JOHNSTON et al. (1967) jedoch nicht abgebildet.

Eine Verbindung des Durchforstungs- und Umtriebszeitproblems unter Berücksichtigung von **Risiko** löst KAO (1984) mit Dynamischer Programmierung am Beispiel der Douglasie. Hierzu fügt er die Wahrscheinlichkeiten einen bestimmten Zustand zu erreichen direkt in die Rekursionsgleichung der Dynamischen Programmierung ein. Ähnliche Untersuchungen für mitteleuropäische Verhältnisse liegen von BEINHOFER (2008a) für Kiefer und BEINHOFER (2008b) für Fichte vor, der explizit auf die Schwankungen der Preise und auf Überlebenswahrscheinlichkeiten der Baumarten eingeht. Hierbei ist für Fichte die Niederdurchforstung bei niedrigen Zinssätzen bis 2% und die Z-Baumdurchforstung ab 3% am besten, unabhängig von der Höhe des Ausfallrisikos. Darüber hinaus konnte in vorliegender Studie durch die Simulation eines Sturms in Stärke des Orkans „Lothar“<sup>71</sup> geprüft werden, ob in Erwartung eines künftigen Schadereignisses Bestandesbehandlungen angepasst werden (DIRSCH et al. 2009). Hierbei ergaben sich grundsätzlich keine durchgehend anderen Behandlungsstrategien als die dieser Arbeit zugrunde liegenden Optimalvarianten.

---

<sup>71</sup> Analoge Wiedergabe der Windgeschwindigkeit und Richtung wie der Sturm „Lothar“ vom 26. Dezember 1999, der große Schäden in Südwestdeutschland, Nordfrankreich und der Schweiz angerichtet hat.



Das Interessante am gewählten Ansatz ist nicht das Aufzeigen einer schlüssigen Strategie für ein gesamtes Bestandesleben, sondern von Handlungsoptionen für die aktuell vorhandenen Bestände. Dies entspricht der Idee des Waldoptionenmodells von VON GADOW (2003) und zeigt für das Untersuchungsgebiet, wie sich verschiedene Behandlungen auf die aktuell vorhandenen Bestände auswirken. Hierbei sind Zielfunktionen mit Maximierung des Barwertes des Betriebsergebnisses unter linearen Restriktionen nach MARTELL et al. (1998) am weitesten verbreitet, auch wenn immer mehr multikriterielle Analyseverfahren zum Einsatz kommen. Multikriterielle Methoden haben den Nachteil, im Ergebnis zumeist „wenn-dann“ Analysen zu liefern und nicht die von den Entscheidern geschätzte klare Aussage. ZADNIK STIRN (2006) spricht in diesem Zusammenhang sogar von einem „deterministic problem“.

Als Ausblick hat heute, auch mit den vielen technischen Innovationen der Zwischenzeit, das über hundert Jahre alte Zitat KARL GAYERS nicht ganz an Aktualität verloren: „Obwohl sich die Theorie dieser Maßregel der Bestandespflege mit der fortschreitenden Erkenntnis der Wachstumsgesetze mehr und mehr entwickelt hat, so ist dieselbe doch noch nicht zu jenem feststehenden Grundsätzen gediehen, wie sie für einen so wichtigen Teil der Waldbaulehre erwünscht sein muß“ GAYER (1898, S. 581). Die tatsächliche Umsetzung eines konsistenten Bestandesbehandlungsprogramms auf der Fläche mit der Überzeugung und Schulung der ausführenden Förster und Waldbesitzer ist mit Sicherheit eine gleich große, wenn nicht die größere Aufgabe, ohne die auch neue wissenschaftliche Erkenntnisse wertlos bleiben.

Es bleibt jedoch festzuhalten, dass trotz intensiver waldbaulicher und waldwachstumskundlicher Forschung eine Verbindung mit neuen wissenschaftlichen interdisziplinären Methoden (siehe auch KNOKE o. J.) einen zusätzlichen Erkenntnisgewinn bringen kann. Die eingangs gestellte **erste Hypothese**, dass durch die Anwendung von Optimierungsverfahren auf die Bestandesbehandlung, verglichen mit Durchforstungsschemata mit fester Eingriffsstärke, keine Steigerung der Wertleistung zu erzielen ist, kann abgelehnt werden. Der Vergleich unter finanziellen Gesichtspunkten zeigt

deutliche Vorteile der optimierten Behandlungen im Gegensatz zu regulären bestandesweisen Nutzungssätzen.

### 5.2.3 Optimale Betriebsplanung

Bei der Formulierung des linearen Programmierungsmodells werden bei der Verjüngung der Bestände meist die Kulturkosten eingerechnet. Im vorliegenden Fall wurde dieses Vorgehen durch die Addition des Bodenertragswertes ersetzt. Dieser stellt den Wert der bis in alle Ewigkeit fortgesetzten forstwirtschaftlichen Nutzung dar, in dem Kulturkosten bereits enthalten sind. Darüber hinaus ist es, für verschiedene Baumarten oder deren Mischungen in Abhängigkeit von Wüchsigkeit, Holzwert und Verjüngungsaufwand möglich, die Bewirtschaftung auch dahingehend anzupassen. DAVIS und JOHNSON (2001) rechnen Beispiele mit maximierten Barwerten über einen fixen Betrachtungszeitraum. Auch MOOG und KNOKE (2003), KNOKE und MOSANDL (2004), KNOKE und MOOG (2005), KNOKE und WEBER (2006) sowie FELBERMEIER et al. (2007) beschränken sich auf einen begrenzten Planungshorizont. JOHANSSON und LÖFGREN (1985) rechnen dahingegen auch ein allgemeines Beispiel mit einem unbegrenzten Planungshorizont. Durch die Berücksichtigung aller zukünftigen Erträge wird die Ernte des aktuellen Bestandes etwas vorgezogen<sup>72</sup> (siehe auch HEAPS und NEHER 1979). HYYTIÄINEN und TAHVONEN (2002) nennen als expliziten Grund für eine Begrenzung auf eine Umtriebszeit die extreme Wirkung negativer Bodenertragswerte bei hohen Zinsen, welche zu einer ewig fortgeführten Durchforstung auf einem sehr niedrigen Vorratsniveau führt (siehe HYYTIÄINEN und TAHVONEN 2002, S.276). Deshalb wird der Bodenertragswert in diesen Fällen in der vorliegenden Arbeit als Null angenommen. Die Addition der Bodenertragswerte hat jedoch auch noch einen zusätzlich stabilisierenden Effekt auf die Zielfunktion. Die Abnahme der Zielfunktion bei Restriktionen ist im stärksten Fall 16%. Der Restwert hat immer ein gewisses Niveau, selbst wenn alle Bestände geerntet werden. Bei endlicher Betrachtung eines Betriebs mit Abzug der Kulturkosten und

---

<sup>72</sup> positive Bodenertragswerte vorausgesetzt

Fortschreibung im Fall der Ernte von Beständen, fällt die prozentuale Änderung deswegen unter sonst gleichen Umständen höher aus.

Nach JOHANSSON und LÖFGREN (1985) hat die Ausstattung eines Forstbetriebs mit Beständen verschiedener Altersklassen und Baumarten keine Auswirkungen auf die optimale Managementstrategie, wenn keine Restriktionen zu Altersaufbau und Erntemenge gemacht werden. Die Ergebnisse dieser Arbeit mit den eingeführten Hiebssatzrestriktionen zeigen darüber hinaus, dass die optimale Bestandesbehandlung, d.h. die Managementstrategie – bei gegebener betrieblicher Ausstattung – sehr wohl von Einschränkungen in der Erntemenge abhängt.

CHEN (2003) untersucht verschiedene Durchforstungen, d.h. Hoch- und Niederdurchforstung sowie eine mittlere und eine starke Entnahme und betrachtet diese auch im Hinblick auf das gesamtbetriebliche Optimum. Er stellt hierbei fest, dass je größer die Anzahl der möglichen Durchforstungen, je feiner also die Auflösung ist, desto höher liegt das forstbetriebliche Optimum. Dieses Optimum ist aufgrund der Restriktionen, wie auch in vorliegender Studie gezeigt werden konnte, nicht das Gleiche wie das Optimum der Bestandesbehandlung. Einen guten Kompromiss aus Rechenkapazität und Verbesserung des Ergebnisses sieht CHEN (2003) bei 20 Varianten. Eine genauere Diskussion, welche Varianten letztlich lokal und global am günstigsten waren, unterbleibt jedoch. Dafür liegt der Fokus der Arbeit sehr stark auf der Prüfung der verschiedenen Optimierungsverfahren selber und einer theoretischen Umsetzung am Lehrbeispiel des Solling.

Die von HEAPS und NEHER (1979) untersuchten Auswirkungen von Ernterestriktionen machen sich auch in den Ergebnissen vorliegender Arbeit als Reduktion der Zielfunktion bemerkbar. Denn durch die Hiebssatzeinschränkungen werden Maßnahmen statt einer sofortigen Durchführung über mehrere Perioden gestreckt oder sogar andere Maßnahmen gewählt.

Im Hinblick auf die Einkommensrestriktionen können die Ergebnisse nicht mit denen von SALO und TAHVONEN (1998) verglichen werden, da diese noch zusätzliches Einkommen der Waldbesitzer berücksichtigen.

Auch mit dem forstlichen Analyse- und Managementplanungsinstrument MELA von SIITONEN et al. (2001) wird explizit auf die Unterschiede von

bestandsweiser und betrieblicher Planung eingegangen. Eine tatsächliche Gegenüberstellung der Ergebnisse ist jedoch nicht bekannt. Aktuellere Simulations- und Optimierungsinstrumente wie SIMO, beschrieben in MÄKINEN et al. (2006) oder RASINMÄKI et al. (2009), gehen nicht explizit auf diesen Zusammenhang ein.

Die **zweite Hypothese**, dass die Hinzunahme betrieblicher Ausstattung und Anforderungen die bestandesweise optimale Durchforstungs- und Endnutzungsstrategie nicht ändert muss separat betrachtet werden. Der Teilaspekt der Hypothese welcher eine Änderung der Strategie von der betrieblichen Ausstattung abhängig macht kann für einen linearen Forstbetrieb im Sinne von JOHANSSON und LÖFGREN (1985) nicht abgelehnt werden. Erst mit einer Hinzunahme von betrieblichen Anforderungen ändern sich die bestandesweisen Behandlungsstrategien. Zunächst werden zwar andere Durchforstungen in mehreren Fällen gewählt, die zentral besten Strategien bleiben jedoch erhalten. Änderungen gibt es vor allem bei den stärksten Restriktionen, das heißt, in den Randbereichen der Optimierung kurz bevor diese an die Grenzen des Lösbaren stößt. Gerade hier erlaubt es die gewählte Methode das betriebliche Handeln und auch seine Folgen besser abzubilden.

Die Unterschiede, die monetär als Abnahme der Zielfunktionen bei Optimierung ohne Durchforstungsvarianten und mit Durchforstungsvarianten zur Auswahl festgehalten wurden, sind, wie sich bei den Ergebnissen zeigt, nicht besonders groß. Wichtig ist jedoch der aufgedeckte Unterschied zwischen den verschiedenen betrieblichen Steuerungsmöglichkeiten – „Holzmenge“ versus „monetäre Einnahme“. Die in der Praxis häufig gebräuchliche Mengensteuerung führt, bei der vorliegenden Formulierung des Problems, in vielen Fällen, gerade in jüngeren Beständen, zu einem Verlassen der optimalen Bestandesbehandlungspfade. Es entstehen mit zu starken Hiebssatzeinschränkungen Pfliegerückstände mit den entsprechenden Folgen für die Zukunft. Bei der Forderung einer monetären Einnahme ist dies nicht der Fall. Hier werden durch die Restriktion fast ausschließlich die Endnutzungszeitpunkte variiert. Dies ist ein gänzlich anderes Vorgehen, welches im extremsten Fall zu einem starken Rückgang des Vorrats mit einem hohen Anteil an Jungbeständen führt.

---

Diese betrieblichen Handlungsmöglichkeiten und Folgen der getroffenen Maßnahmen konnten nur mit einem betrieblichen Optimierungsprogramm abgebildet werden, welches auch abgestufte Behandlungsvarianten für die Bestände zulässt. Für eine effektive Umsetzung in der betrieblichen Planung müssten sicher noch einige Schnittstellen geschaffen werden, wie sie – bis jetzt ohne eine verfeinerte Integration unterschiedlicher Bestandesbehandlungen – in verschiedenen Projekten bereits bearbeitet werden (u.a. FELBERMEIER et al. 2007).

### 5.3 Handlungsspielräume für optimale Planungen

Es bleibt noch zu prüfen ob die dritte Hypothese zu widerlegen ist. Diese lautete: *„Der Einsatz von dynamischen Optimierungsmethoden in der forstlichen Produktionsplanung führt zu keinem wesentlich höheren Gesamtwohlstand als die Bewirtschaftung nach der herkömmlichen Betriebsplanung.“* Hierzu seien im Folgenden einige aktuelle Arbeiten verschiedener Autoren sowie die eigenen Ergebnisse diskutiert.

Zum Vergleich mit anderen aktuellen Studien kann auf TIERNAN und NIEUWENHUIS (2005) verwiesen werden, die eine finanzielle Optimierung der Ernte mit Linearer Programmierung für die irische Forstverwaltung Coillte durchführten. Hierbei stellten Sie auch eine Abweichung des bis dato gerechneten Durchforstungs- und Umtriebsalters aus der so genannten „Thinning and Rotation Classification“ von Coillte und des von Ihnen gerechneten Umtriebsprogramms fest. Mit Linearer bzw. Gemischter Ganzzahliger Optimierung konnten sie eine Verbesserung der Barwerte um 13 - 22% erreichen. Das Gleiche konnten FELBERMEIER et al. (2007) im Rahmen eines Projektes mit den Bayerischen Staatsforsten zeigen. Die Ergebnisse, im Vergleich zu einer Referenzvariante, betrug ebenfalls eine Zunahme des Ertragswertes von 20%, abhängig von den gewählten Restriktionen und naturalen Ausgangsbedingungen wie Naturverjüngung oder Pflanzung.

Finanzielle Optimierungsspielräume in einem Privatforstbetrieb in der Region Ostalb untersuchte KÜBLBÖCK (2008) mit optimierter Behandlung als Ergebnis einer Linearen Programmierung unter zusätzlicher Beachtung eines Sicherheitsäquivalents. Eine Optimierung nach rein finanziellen Kriterien führte zu einem anderen Einschlagsverhalten als dem real praktizierten. Eine schrittweise Hinzunahme von Restriktionen zur Deckung der Betriebskosten und zur Höhe des Hiebssatzes ergab eine deutliche Annäherung an das reale Wirtschaften des Forstbetriebs. Gleiches war bei der Hinzunahme des Sicherheitsäquivalents feststellbar, um der Risikoscheu des Menschen Rechnung zu tragen. Es werden hierbei die Kosten des Risikos vom Betrag der Zielfunktion, des betrieblichen Vermögens, abgezogen (siehe KNOKE und

MOSANDL 2004). Bei einer stark risikoaversen Einstellung des Entscheidungsträgers wurde exakt der Hiebssatz der betrieblichen Forsteinrichtung erreicht. Für den Forstbetrieb ist es hierdurch möglich, die Folgen seines Handelns besser abzuschätzen und Potentiale aufzudecken. Es wurde auch deutlich, dass beispielsweise ein Verzicht auf die Hiebssatzrestriktion lediglich einen Zuwachs von 2% in der Zielfunktion gegenüber der Referenzvariante ausmacht.

Die eigenen Rechnungen auf Ebene der betrieblichen Optimierung zeigen, bei einfachen Restriktionen ebenfalls keine substantielle Verschlechterung des Ergebnisses. Die Minderung der Zielfunktion bewegt sich im Bereich von 0,01 - 18% Verringerung je nach Stärke der eingeführten Restriktion. Hierzu muss jedoch angemerkt werden, dass die Variante ohne Restriktionen und Sicherheitsäquivalent, wie von KÜBLBÖCK (2008) gezeigt, nicht das reale Handeln des Forstbetriebs wiedergibt und hier auch im Detail, d.h. über die reine Höhe des Hiebssatzes oder Vorrats hinaus, noch Potential vorhanden wäre. Hierzu müsste sich das betriebliche Handeln am optimalen Einschlag und an der Ernte der einzelnen Bestände orientieren.

Auf der Bestandesebene konnten KILLKI und VÄISÄNEN (1970) 2 - 12% höhere Barwerte bei der Hochdurchforstung gegenüber der Niederdurchforstung erzielen. PELKKI und KIRILLOVA (2004) haben gegenüber der undurchforsteten Variante Verbesserungen von bis zu 20% in gemischten Laubholzbeständen nachgewiesen. Eine Zunahme der Bodenertragswerte um bis zu 14% mit flexiblen bzw. mit steigender Anzahl von Durchforstungen konnten HYYTIÄINEN et al. (2005) zeigen. WIKSTRÖM (2001) kann eine Barwertzunahme von 10 - 20% für Fichten-Kiefernbestände bei Durchforstungsoptimierung mit „Tabu Search“ und Enumeration errechnen. Bei MARTIN und EK (1981) liegen die mit Dynamischer Programmierung optimierten Durchforstungen von *Pinus resinosa* 25 - 30% über anderen gängigen Durchforstungsstrategien.

Ein echter Vergleich gegenüber einer Referenzvariante fand im Rahmen der vorliegenden Arbeit auf Bestandesebene statt. Die Ergebnisse der optimierten Behandlung gegenüber einer mittleren Auslesedurchforstung

zeigen einen deutlichen Zuwachs in der Zielfunktion der sich im Bereich von 15 - 25%, je nach Bestand, bewegt.

Die wenigen tatsächlichen Vergleiche zwischen optimaler Behandlung und realem Handeln sind auf die Schwierigkeiten des Nachvollzugs der realen Bewirtschaftung vor allem auf Betriebsebene zurückzuführen. Die meisten Studien beziehen sich deshalb auf den Vergleich verschiedener Optimierungsverfahren (siehe u.a. KAO und BRODIE 1980, BULLARD et al. 1985, ROISE 1986, VALSTA 1990, ARTHAUD und PELKKI 1995, PELKKI 1997).

Die **dritte Hypothese**, dass die Anwendung von Optimierungsmethoden keine Handlungsspielräume für optimale Planungen in Forstbetrieben aufdecken kann, lässt sich damit ebenfalls verneinen.



## 6 Ausblick

Um das weite Feld von Optimierungen auf Bestandesebene bis hin zur Betriebsebene zu bearbeiten, wurden einige Vereinfachungen im Sinne der Aussage SAMUELSONS gemacht: „If the solution is to be simple, the assumptions must be heroic“ SAMUELSON (1976, S. 470). Grundsätzlich blieben Unsicherheiten und Risiken bezüglich des Ausfalls von Bäumen durch Sturm oder Insekten und Schwankungen der monetären Eingangsgrößen – in erster Linie der Holzpreise – unberücksichtigt.

Die grundlegenden Größen der Optimierung wurden nach bestem Stand der Technik ermittelt. Die Erwartungswerte für Preise und Kosten stammen von Experteninterviews in Abgleich mit offiziellen Preisstatistiken, die Waldbestände wurden auf Basis der BWI<sup>2</sup> Daten zusammengestellt und mit einer gesondert für die Region Ostalb programmierten Version des Waldwachstumssimulators SILVA 2.2 fortgeschrieben sowie mit dem Voluminierungs- und Sortierungsprogramm BDat bzw. Holzsortierung sortiert.

Einfache eingängige Ergebnisse sind die deutlichen finanziellen Vorteile, die mit der bestandesweisen Optimierung möglich sind. Um den Rechenaufwand der vollständigen Enumeration zu vermeiden und gleichzeitig die strenge Bedingung der konkaven Wertzuwachsfunction zu umgehen, sollte auch die Netzwerkformulierung der Dynamischen Programmierung zur Optimierung von Durchforstungen geprüft werden. Die Konstruktion von betrieblichen Optimierungsmodellen mit unterschiedlich starken Behandlungen ist zukunftsweisend, weil gerade die häufig angewandten Hiebssatzrestriktionen zu anderen Bestandesbehandlungen führen.

Mit den Erkenntnissen der Anwendung von Methoden aus dem Bereich der Unternehmensforschung ist es für Forstbetriebe möglich, ihr Handeln besser anzupassen als nach der Forstbetriebsplanung auf rein naturalen Grundlagen aus der Forsteinrichtung. Es wird die Lücke zwischen der Rechnung mit einem festen monetären Betriebsergebnis und der naturalen Planung des Einschlags, auf Basis von Vorrat und Zuwachs aus der Inventur, geschlossen. Der Planungsprozess wird mit einer einheitlichen monetären

Zieleinheit in sich konsistent gerechnet. Dies stößt nicht durchgängig auf Zustimmung. So kritisiert KURTH (1994) die Verallgemeinerung der Forsteinrichtung zum Führungsinstrument schlechthin sowie die „Dialektik von ökonomischer und natürlicher Produktion“ und klammert die ökonomische Seite der forstlichen Produktion, einen Verlust der Nachhaltigkeit fürchtend, aus seinen Betrachtungen aus.

Weiteres Potential besteht bei der Verwendung des Waldwachstums-simulators SILVA, welcher für die Verhältnisse in Süddeutschland sehr gut parametrisiert ist. Zu Schwierigkeiten können jedoch die eingebauten Zufallsparameter führen, weil diese gegebenenfalls stochastische Optimierungsmethoden erfordern. Einige Schnittstellen sind bei der hier verwendeten Version SILVA 2.2 noch schwierig zu bedienen und haben im Verlauf der Arbeit sehr viel Mühe gekostet. Die Weiterentwicklung zu der aktuell neu aufgelegten Version SILVA 3 bringt eventuell bereits größere Vereinfachungen mit sich, welche aber für die vorliegende Arbeit noch nicht zur Verfügung standen. Die Aussage von VON TEUFFEL et al. (2006, S. 37) „Tree models have proven to be adequate instruments to enhance forest management planning as well as strategic long-term planning in forestry“ kann unterstrichen werden. Wenngleich die direkte Integration von Wachstumsformeln und Wahrscheinlichkeiten in den Optimierungszusammenhang, wie sie beispielsweise im skandinavischen Bereich verbreitet ist, große Vorteile hat.

Außerdem scheint eine Berücksichtigung des Risikos viel versprechend. So lässt sich bei Kenntnis von Ausfallrisiken beispielsweise durch Sturm (KÖNIG 1995) oder Überlebenswahrscheinlichkeiten (KOUBA 2002) die Bewirtschaftung entsprechend anpassen. Im Projektverbund war in Kooperation mit AXEL ALBRECHT von der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt (FVA) Baden-Württemberg auch die Simulation des Sturmwurftrisikos, auf Basis des von SCHMIDT et al. (2006) entwickelten Modells, möglich. Eine genaue Parametrisierung eines analogen Sturmmodells auch für bayerische oder gesamtdeutsche Verhältnisse erscheint hierbei wünschenswert. Hierdurch ließen sich, im Gegensatz zu Überlebenswahrscheinlichkeitsmodellen, wie sie beispielsweise BEINHOFER (2008b) verwendet, tatsächlich die Stabilität bzw. das Überleben einzelner

Bäume anhand individueller Merkmale feststellen. Auf dieser Basis können auf Stabilität ausgerichtete Behandlungsoptionen entwickelt werden.

Natürlich sind nicht allein die Darstellung des Sturmwurftrisikos, sondern auch Insektenkalamitäten als weitere wichtige Ausfallgröße zu beachten. Hierfür ist eine stabilisierende Behandlung nur begrenzt möglich, allerdings wäre die Angabe einer Befallswahrscheinlichkeit auf Basis von Temperatur und Niederschlagsverteilung, bei gegebenen Standorten, auch in Verbindung mit Klimaprognosen denkbar. Damit ist auch diese Größe zur Festlegung einer individuellen Ernteentscheidung zu verwenden und nicht notwendigerweise generalisiert in Form von Überlebenswahrscheinlichkeiten (BEINHOFER 2008b) ansetzbar.

Hohe Schwankungen des Betriebsergebnisses gibt es jedoch nicht nur aufgrund natürlicher Unsicherheiten. Auf der Seite der finanziellen Bewertung sind in erster Linie die Holzpreise sehr starken Schwankungen unterworfen. Änderungen von 25% sind in einem Zeitraum von 40 Jahren keine Einzelergebnisse (siehe NEUNER 2008). Hierauf kann man die Produktion einzelner Sortimente und Qualitäten (BEINHOFER 2008a) abstimmen oder darüber hinaus auf der Betriebsebene über die Portfoliotheorie auch optimale Baumartenmischungen herleiten (siehe KNOKE et al. 2005, KNOKE und WURM 2006). Die Berücksichtigung von Preisschwankungen mit der Wette auf zukünftige Änderungen führt dabei mit Mindestpreisen zu einer Verlängerung der Umtriebszeit (BRAZEE und MENDELSON 1988).

Die Ermittlung von optimalen Bestandesbehandlungen mit Dynamischer Programmierung hat deutliche Vorteile gebracht, blieb aber in der vorliegenden Formulierung hinter den Ergebnissen der vollständigen Enumeration zurück. Die Formulierung des Dynamischen Programmierungsproblems in Form eines Netzwerks könnte Lösungen mit wesentlich reduziertem Aufwand gegenüber der vollständigen Enumeration liefern. Gelingt die Prüfung mit einem umfangreichen Datensatz, wie dem vorliegenden, hätte die waldbaulich-waldwachstumskundliche Forschung auch ein handhabbares Analyseinstrument für optimale Bestandesbehandlungen in der Hand.

Offen bleibt die Frage, ob sich Wälder in gewinnmaximierenden Forstbetrieben tatsächlich auch einem umtriebszeitorientierten Normalwaldmodell annähern, wie es HEAPS und NEHER (1979), sowie HULTKRANTZ (1991) annehmen, wenn man das Risiko in die Betrachtungen miteinbezieht. Eine Berücksichtigung der höheren Risiken der reifen, wertvolleren Bestände (MÖHRING 1986) sollte hierzu unbedingt stattfinden.

Aufgrund der Langfristigkeit forstlicher Planungen ist die Berücksichtigung von Unsicherheiten ein wichtiger Aspekt. Um nach den oben genannten Ansätzen möglichst gute Kenntnis über die Umweltzustände und die damit verbundenen Risiken zu erlangen, gibt es auch die Möglichkeit, begrenzt rationale Entscheidungen (GIGERENZER und SELTEN 2002) zu treffen. Das heißt, die Rationalität des Entscheidenden ist aufgrund von Informationsbeschaffungskosten und Unsicherheiten eingeschränkt und das Ergebnis wird über eine Optimierung unter Nebenbedingungen ermittelt. Hierbei ist die Verwendung von einfachen Heuristiken üblich, die nicht alle zur Verfügung stehenden Informationen nutzen. Eine weitere Möglichkeit, unbekanntem Eintrittswahrscheinlichkeiten von Ereignissen gerecht zu werden, bietet die „information-gap“ Entscheidungstheorie von BEN-HAIM (2005), welche auch bereits in einer Optimierung des Baumartenportfolios (siehe KNOKE 2008) forstlich angewandt wurde.

Dabei ist Folgendes sicher: “[t]he issue of the long-term management of forest resources will not go away and the belief that we can explain positive behaviour into areas that Faustmann never considered” NEWMAN (2002, S. 15). Hier versucht die ökonomische Forschung einerseits in ihren Modellen das Verhalten von Entscheidern zu erklären und andererseits bessere Entscheidungsgrundlagen zur liefern.

Allerdings konstatierte schon KARL GAYER: „Die ausführende Praxis steht der Sache kühler gegenüber; Sie rechnet vor allem mit der Durchführbarkeit der Theorie im großen Betriebe“ GAYER (1898, S. 587). So kann die von SAMUELSON (1976) beschriebene einfache Lösung gerade für die Umsetzung bestechend sein, wenn auch die zugrunde liegenden Informationen nie vollständig sind und die Berechnungen im Hintergrund komplexe Verfahren erfordern.

## 7 Zusammenfassung

Forstbetriebe planen in der Regel auf der Bestandesebene. Dieses Vorgehen führt aber, bei den in der Praxis üblichen betrieblichen Einschränkungen wie einem geforderten Mindestdeckungsbeitrag oder einem maximalen zulässigen Hiebssatz, zu anderen, als den bestandsweise optimalen Behandlungs- und Ernteregimes (CHEN 2003).

Die Optimierung forstbetrieblicher Planungen mit Methoden aus dem Bereich der Unternehmensforschung bietet hierzu gute Lösungsansätze dies beweisen unter anderem die aktuellen Beispiele aus dem deutschsprachigen Raum von KOEPKE (1999), KNOKE et al. (2001), ESSER (2005) sowie KÜBLBÖCK (2008). Die Formulierung forstbetrieblicher Optimierungsprogramme mit dem Verfahren der Linearen Programmierung (DANTZIG und THAPA 1997) ist dabei schon seit längerem erprobt (CURTIS 1962). Hierbei wird gebräuchlicherweise nur eine Durchforstungsvariante vorgegeben und entsprechende betriebliche Vorgaben zu ökonomischen, ökologischen oder sozialen Kriterien festgelegt. Das Optimierungsprogramm kann entsprechend nur zwischen den Alternativen „Durchforsten“ oder „Ernten“ des Bestands entscheiden.

Mit der vorliegenden Arbeit ist es gelungen, acht verschiedene Durchforstungsstrategien als Auswahlmöglichkeiten pro Bestand, von „undurchforstet wachsen lassen“ bis zu „regelmäßiger 50%-iger Grundflächenentnahme“, in die Formulierung des Linearen Programmierungsproblems aufzunehmen. Bei stärkeren Restriktionen zu einer jährlichen Mindesteinnahme führt dies nicht zu grundsätzlich anderen Durchforstungsalternativen, der Bestand wird bei erhöhtem Geldbedarf lediglich früher geerntet. Im Gegensatz hierzu wirkt ein höchstens erlaubter Hiebssatz sehr deutlich auf die Bestandesbehandlung. Es werden nur Maßnahmen realisiert, die - bei gleichem Beitrag zur Zielfunktion - einen geringen Holzanfall mit sich bringen. Der Zielfunktionswert, für die um Durchforstungsalternativen erweiterte Variante, liegt auch bei stärkeren Restriktionen nur marginal höher. Allerdings können mit einem einzigen

Durchforstungsprogramm ab einer bestimmten Grenze keine stärkeren Hiebssatzrestriktionen mehr abgebildet werden; im vorliegenden Fall lag die Grenze bei 11 Efm/ha/a d.h. bei niedrigeren Erntevorgaben findet die Optimierung keine Lösung mehr. Auch der maximal mögliche Mindestdeckungsbeitrag liegt mit 364 €/ha/a etwas niedriger als die bei mehreren Varianten zur Auswahl möglichen 370 €/ha/a.

Durch eine Integration von verschiedenen Durchforstungsalternativen auf der Betriebsebene lässt sich das tatsächliche betriebliche Handlungsspektrum besser abbilden und auch die Prognose der naturalen und monetären Entwicklung von Forstbetrieben wird realitätsnäher.

Auf der Bestandesebene wurde das auf RICHARD BELLMAN (1957) zurückgehende Verfahren der Dynamischen Programmierung verwendet um optimale Behandlungsstrategien für verschiedene Waldbestände aufzuzeigen und mit den Ergebnissen der vollständigen Enumeration zur Berechnung des gleichen Sachverhalts verglichen. Die hierzu notwendigen umfangreichen Berechnungen von fünf abgestuften Eingriffsstärken wurden mit dem Waldwachstumssimulator SILVA 2.2 von PRETZSCH et al. (2002) durchgeführt. Die gewählte Problemformulierung des Dynamischen Optimierungsproblems führte nicht in allen Fällen zu den gleichen Ergebnissen wie die vollständige Enumeration. Dies lag an der strengen hinreichenden Bedingung einer konkaven Wertentwicklungsfunktion. Mit dem vorliegenden realen Datensatz wurden an lokalen Minima oder Maxima falsche Behandlungspfade gewählt. Eine Möglichkeit die strenge Bedingung der Konkavität zu umgehen, wäre die Formulierung eines Netzwerks aus zulässigen Knoten und Pfaden (siehe AMIDON und AKIN 1968; KILKKI und VÄISÄNEN 1970; BRODIE et al. 1978; PAREDES UND BRODIE 1987 VALSTA 1990). Hierbei sind die Grenzen der einzelnen Zustände sehr sorgfältig abzustecken (PELKKI 1997). Bei dem Netzwerkansatz müssen die Pfade aber nur kontinuierlich sein, d.h. dürfen keine Lücken oder Sprünge aufweisen. Die strenge Bedingung der konkaven Wertentwicklung entfällt. Das Verfahren der vollständigen Enumeration zur Lösung des Durchforstungsproblems heranzuziehen, erscheint für die Praxis aufgrund des sehr hohen Rechenaufwands nicht geeignet. Die auf diesem Wege gefundenen optimalen Durchforstungsstrategien haben sich jedoch, verglichen mit einer

mäßigen Auslesedurchforstung, als um rund 20% vorteilhafter erwiesen. Insgesamt entsprechen die gefundenen Durchforstungsstärken nicht den gängigen Waldbauprogrammen.

Die vorliegende Arbeit möchte insgesamt aufzeigen, dass der Einsatz von dynamischen Optimierungstechniken aus dem Bereich der Unternehmensforschung zu einem höheren Gesamtwohlstand für Forstbetriebe führen kann. Hierzu werden zusätzlich zu den eigenen, vor allem im Bereich der Durchforstungsoptimierung vielversprechenden Ergebnissen, noch zahlreiche Beispiele aus der Literatur angeführt.

## **8 Schlagwörter**

Durchforstung, Forstliche Betriebsplanung, Investitionsrechnung, Optimierung, Dynamische Programmierung, Lineare Programmierung



## 9 Abkürzungen

|           |  |
|-----------|--|
| A         | = Abtriebswert oder Bestandeswert  |
| ALH       | = anderes Laubholz höherer Lebensdauer   |
| ALN       | = anderes Laubholz niedriger Lebensdauer   |
| b         | = Bestandestyp nach Baumart, Altersklasse und Bonität  |
| BaySF     | = Bayerische Staatsforsten Anstalt des öffentlichen Rechts (AÖR)   |
| BEW       | = Bodenertragswert   |
| BHD       | = Brusthöhendurchmesser  |
| BI        | = Betriebsinventur   |
| BMELV     | = Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz  |
| BUMB      | = Buchenmischbestand   |
| BURB      | = Buchenreinbestand  |
| BW        | = Baden-Württemberg  |
| BWI       | = Bundeswaldinventur   |
| d         | = Durchforstungsregime   |
| $d_g$     | = Durchmesser des Grundflächenmittelstamms   |
| $d_{100}$ | = Durchmesser der 100 dicksten Bäume in cm   |
| DP        | = Dynamische Programmierung  |
| EST       | = Erweiterter Sortentarif zur Entlohnung der motormanuellen Holzernte (ab 1.1.2008 mit neuem TV-Forst ausgelaufen) |
| F         | = Gesamtfläche des Betriebs  |
| f         | = Fläche des Einzelbestands  |
| FIMB      | = Fichtenmischbestand  |
| FIRB      | = Fichtenreinbestand   |
| FVA       | = Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt   |

---

|                  |  |
|------------------|--|
| G                | = Grundfläche in m <sup>2</sup> /ha  |
| h <sub>g</sub>   | = Höhe des Grundflächenmittelstamms  |
| h <sub>100</sub> | = Höhe der 100 höchsten Bäume  |
| i                | = Periode multipliziert mit 5 ergibt Jahre                                   |
| IH               | = Industrieholz  |
| LP               | = Lineare Programmierung   |
| MLR              | = Ministerium für Ernährung und Ländlichen Raum Baden-<br>Württemberg        |
| N/ha             | = Stammzahl pro Hektar   |
| N                | = Nutzungserlös  |
| q                | = Diskontfaktor  |
| r                | = Zinssatz als Dezimalzahl (z.B. 0,02)                                       |
| IR               | = Raum der reellen Zahlen  |
| sNBMB            | = sonstiger Nadelbaummischbestand  |
| sLBMB            | = sonstiger Laubbaummischbestand   |
| StmELF           | = Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und<br>Forsten |
| T                | = Umtriebszeit   |
| v                | = Durchforstungsvariante   |
| q                | = Diskontfaktor = (1+r)  |
| λ                | = Korrekturfaktor  |
| δ                | = Korrekturfaktor  |
| X-Holz           | = nicht verwertbare Sortimente   |

## 10 Literaturverzeichnis

- Abetz, Karl (1929) Gedanken zu Theorie und Praxis der forstlichen Rentabilitätslehre. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung. S. 287-298.
- Abetz, Karl (1963) Finanzplanung und Erfolgsveranschlagung im Rahmen der Forsteinrichtung. Forstwissenschaftliches Centralblatt 82/7-8: 193-207.
- Abetz, Peter (1987) Erwiderungen zu Schober: Durchforstung nach Zahlen? Allgemeine Forst- und Jagdzeitung 159/1-2: 1-3.
- Akça, Alparslan (1997) Waldinventur. Cuivillier Verlag. Göttingen.
- Albert, Matthias (2003) Analyse und multikriterielle Bewertung alternativer Waldentwicklungsszenarien mit Hilfe des Analytischen Hierarchieprozesses. DVFFA Sektion Ertragskunde. Jahrestagung 2003. Torgau.
- Albrecht, Axel, Sebastian Hein, Ulrich Kohnle, Peter Biber (2009) Evaluierung des Waldwachstumssimulators Silva 2.2 anhand langfristiger ertragskundlicher Versuchsflächen in Baden-Württemberg. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung 180/3-4: 55-64.
- Albers, Sönke, Daniel Klapper, Udo Konradt, Achim Walter, Joachim Wolf (Hrsg.) (2007) Methodik der empirischen Forschung. 2. Auflage. Gabler Verlag. Wiesbaden.
- Aldinger, Eberhard, Hans Gerd Michiels (1997): Baumarteneignung in der forstlichen Standortskartierung Baden-Württemberg. Allgemeine Forstzeitung AFZ - Der Wald 5: 234-238.
- Altherr, Eduard (1971) Wege zur Buchenstarkholzproduktion. Festschrift zur 15. Hauptversammlung des Baden-Württembergischen Forstvereins und 100-Jahr-Feier der Baden-Württembergischen Forstlichen Versuchsanstalt. Freiburg. S. 123-127.

- Alvarez, Luis H.R., Erkki Koskela (2003) On Forest Rotation under Investment Rate Variability. Keskusteluaiheita – Discussion Papers of the Elinkeinoelämän Tutkimuslaitos. The Research Institute of the Finnish Economy 840. Helsinki.
- Amidon, Elliot T., Garth S. Akin (1968) Dynamic Programming to Determine Optimum Levels of Growing Stock. *Forest Science* 14/3: 287-291.
- Anonymus (1992) SAS/STAT® User's Guide. Volume 1-2. Version 6. SAS Institute Inc.. Cary.
- Anonymus (2001) Landesinventuranweisung für Baden-Württemberg. Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt (FVA). Freiburg.
- Arthaud, Greg, J., W. David Klemperer (1988) Optimizing high and low thinnings in loblolly pine with dynamic programming. *Canadian Journal of Forest Research* 18/9: 1118–1122.
- Arthaud, Greg J., Matthew H. Pelkki (1996) A Comparison of Dynamic Programming and A\* in Optimal Forest Stand Management. *Forest Science* 42 /4: 498-503.
- Assmann, Ernst (1961) *Waldetragskunde. Organische Produktion, Struktur, Zuwachs und Ertrag von Waldbeständen*. BLV Verlagsgesellschaft. München.
- Assmann, Ernst, Friedrich Franz (1963) Vorläufige Fichten-Ertragstafel für Bayern. Institut für Ertragskunde der Forstlichen Forschungsanstalt. In: Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (Hrsg.)(1990) *Hilfstafeln für die Forsteinrichtung*. München.
- Bamberg, Günther, Adolf G. Coenenberg, (2006) *Betriebswirtschaftliche Entscheidungslehre*. 13. Auflage. Verlag Franz Vahlen. München.
- Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (StmELF) (Hrsg.) (1982) *Richtlinien für die mittel- langfristige Forstbetriebsplanung in der Bayerischen Staatsforstverwaltung (Forsteinrichtungsrichtlinien) FER 1982*.

- Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (StmELF) (Hrsg.) (2000) Richtlinie zur Pflege und Verjüngung der Buche.
- Bayerische Staatsforsten AöR (2007) Nachhaltigkeitsbericht Bayerische Staatsforsten. [http://www.baysf.de/uploads/media/BaySF\\_NHB07\\_Internet\\_01.pdf](http://www.baysf.de/uploads/media/BaySF_NHB07_Internet_01.pdf). Stand 01/2009.
- Beinhofer Bernhard (2008a) Umtriebszeit, Durchforstung und Astung der Kiefer aus finanzieller Perspektive. Forstarchiv 79: 106-115.
- Beinhofer, Bernhard (2008b) Zum optimalen Einschlagszeitpunkt von Fichtenbeständen. Allgemeine Forst und Jagdzeitung. 179: 121-132.
- Bellman, Richard (1957) Dynamic Programming. Princeton University Press. Princeton.
- Ben-Haim, Yakov (2005) Value-at-risk with info-gap uncertainty. The Journal of Risk Finance 6: 388–403.
- Bergen, Volker, Martin Moog, C.-M. Kirschner, F. Schmid (1988) Analyse des Nadelstammholzmarktes in der Bundesrepublik Deutschland und dessen Beeinflussung durch die Waldschäden. Schriften aus der forstlichen Fakultät der Universität Göttingen und der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt. Band 92. J.D. Sauerländer's Verlag. Frankfurt a. M.
- Bergen, Volker, Wilhelm Löwenstein, Roland Olschewski (2002) Forstökonomie. Volkswirtschaftliche Grundlagen. Verlag Franz Vahlen. München.
- Bettinger, Pete, Woodam Chung (2004) The key literature of, and trends in, forest level management planning in North America. International Forestry Review 6/1: 40-50.
- Bevers, Michael, John Hof (1999) Spatially optimizing wildlife habitat edge effects in forest management linear and mixed- linear programming. Forest Science 45/2: 249-258.

- Biber, Peter, Jan Ďurský, Arne Pommerening, Hans Pretzsch, Erich Seifert, Thomas Seifert (2000) SILVA 2.2 Benutzerhandbuch. Version vom 25.5.2000. Lehrstuhl für Waldwachstumskunde. Freising.
- Biber, Peter, Gerhard Schütze (1998) Konzeption und Konstruktion von Wuchs- und Prognosemodellen für Mischbestände in Bayern. Projektbericht W28. Lehrstuhl für Waldwachstumskunde. Freising.
- Biethahn, Jörg (1978) Optimierung und Simulation. Anwendung verschiedener Optimierungsverfahren auf ein stochastisches Lagerhaltungsproblem. Neue Betriebswirtschaftliche Forschung. Band 5. Gabler Verlag.
- Bitter, Andreas W., Max Merrem (1998) Typenorientierte Kontrollstichprobe – Konzept und Verfahrensweise. Allgemeine Forstzeitung AFZ - Der Wald 23: 1414-1417.
- Borchert, Herbert (2000) Die Bestimmung der für Forstbetriebe ökonomisch optimalen Holznutzungsmengen – Ein kontrolltheoretischer Ansatz. Dissertation. Lehrstuhl für forstliche Wirtschaftslehre. TU München. Freising.
- Borchert, Herbert, Bettina Leischner, Martin Moog (2001) unveröffentlichter Abschlussbericht. Renaturierung der Donau-Auen zwischen Neuburg und Ingolstadt – Teil 1. Lehrstuhl für forstliche Wirtschaftslehre. Freising.
- Borges, José G. Hoganson, Howard M., Falcao, André O. (2002) Heuristics in Multiobjective Forest Management. In: Pukkala, Timo (Ed). Multi-objective Forest Management. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht.
- Bortz, Jürgen (1999) Statistik für Sozialwissenschaftler. 5. Auflage. Springer Verlag. Berlin.
- Brazeo, Richard J., Robert Mendelsohn (1988) Timber Harvesting with Fluctuating Prices. Forest Science 34/2: 359-372.
- Brazeo, Richard J. (2001) The Faustmann Formula: Fundamental to Forest Economics 150 Years After Publication. Forest Science 47/4: 441-442

- Brodie, J. Douglas, Darius M. Adams, Chiang Kao (1978) Analysis of Economic Impacts on Thinning and Rotation for Douglas-fir, Using Dynamic Programming. *Forest Science* 24/4: 513-522.
- Brodie, J. Douglas, Chiang Kao (1979) Optimizing Thinning in Douglas-fir with Three-Descriptor Dynamic Programming to Account for Accelerated Diameter Growth. *Forest Science* 25/4: 665-672.
- Bullard, Steven H., Hanif D. Sherali, W. David Klemperer (1985) Estimating Optimal Thinning and Rotation for Mixed-Species Timber Stands Using a Random Search Algorithm. *Forest Science* 30/2: 303-315.
- Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz - BMELV (2001) Aufnahmeanweisung für die Bundeswaldinventur II (2001-2002). 2. korrigierte, überarbeitete Auflage. Bonn.
- Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz - BMVEL (2005) Die zweite Bundeswaldinventur. Der Inventurbericht. <http://www.bundeswaldinventur.de/>. Stand 05/2009. Berlin.
- Buongiorno, Joseph, Jean-Luc Peyron, Francois Houllier, Max Bruciamacchie (1995) Growth and Management of Mixed-Species, Uneven-Aged Forests in the French Jura: Implications for Economic Returns and Tree Diversity. *Forest Science* 41/3: 397-429.
- Buongiorno, Joseph, J. Keith Gilles (2001) Decision methods for forest resource management. Academic Press. Amsterdam.
- Busch-Lüty, Christiane (1995) Neue Bewertungen als Voraussetzung und Orientierung für nachhaltiges Wirtschaften. In: Grenzdörfer, K. (Hrsg.) (1997) Neue Bewertungen in der Ökonomie. Centaurus Verlag. Pfaffenweiler. S. 97-113.
- Chang, Sun Joseph (1981) Determination of the optimal growing stock and cutting cycle for an uneven-aged stand. *Forest Science* 27/4: 739-744.
- Chang, Sun Joseph (1983) Rotation Age, Management Intensity, and the Economic Factors of Timber Production: Do Changes in Stumpage Price,

- Interest Rate, Regeneration Cost, and Forest Taxation Matter? *Forest Science* 29/2: 267-277.
- Chang, Sun Joseph (1984) Determination of the Optimal Rotation Age: A Theoretical Analysis. *Forest Ecology and Management* 8: 137-147.
- Chang, Sun Joseph (1998) A generalized Faustmann model for the determination of optimal harvest age. *Canadian Journal of Forest Research* 28: 652-659.
- Chappelle, Daniel E., Thomas C. Nelson (1964) Estimation of optimal stocking levels and rotation ages of loblolly pine. *Forest Science* 10/4: 471-502.
- Chen, Chung M., Dietmar W. Rose, Rolfe A. Leary (1980) Derivation of Optimal Stand Density Over Time A Discrete Stage, Continuous State Dynamic Programming Solution. *Forest Science* 26/2: 217-227.
- Chen, Bowang (2003) Applications of Optimization Methods to Forest Planning Problems. Dissertation an der Georg-August Universität Göttingen. Cuvillier Verlag. Göttingen.
- Cotta, Heinrich (1832) Grundriß der Forstwissenschaft. 1. Auflage. Arnoldische Buchhandlung. Dresden Leipzig.
- Crowe, Kevin, John Nelson, Mark Boyland (2003) Solving the area-restricted harvest-scheduling model using the branch and bound algorithm. *Canadian Journal of Forest Research* 33: 1804-1814.
- Curtis, Floyd H. (1962) Linear programming the management of a forestry property. *Journal of forestry* 60/9: 611-616.
- Dantzig, Georges B., Mukund N. Thapa, (1997) Linear Programming. 1. Introduction. Springer. New York.
- Davis, Lawrence S., K. Norman Johnson, Pete Bettinger, Theodore E. Howard (2001) Forest Management to Sustain Ecological, Economic, and Social Values. 4. Ausgabe. McGraw Hill. New York.



- Densborn, Stefan (1999) Betriebssimulation – Instrument für die strategische Planung im Forstbetrieb. Schriften aus dem Institut für Forstökonomie der Universität Freiburg. Band 11.
- Dijkstra, Edsger W. (1959) A note on two problems in connexion with graphs. Numerische Mathematik 1: 269-271.
- Dirsch, Ruth, Thomas Knoke (2007): Zur finanziellen Analyse der Höhe des Holzvorrates: eine Anwendung der Linearen Programmierung im Rahmen der Forstbetriebssteuerung. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung 178-7/8: 142-150.
- Dirsch, Ruth, Herbert Borchert, Wolfgang S. Madl (2009) Ökonomische Optimierung forstlicher Produktionspläne unter Einbeziehung der Gemeinwohlleistungen der Wälder. Perspektiven einer nachhaltig wertleistungsoptimierten Waldwirtschaft im walddreichen ländlichen Raum Ostalb. Freiburger Forstliche Forschungsberichte 81: 35-60.
- Doebbeler, Heidi (2004) Simulation und Bewertung von Nutzungsstrategien unter heutigen und geänderten Klimabedingungen mit dem Wachstumsmodell SILVA 2.2. Dissertation. Göttingen.
- Domschke, Wolfgang, Andreas Drexl (2005) Einführung in Operations Research. Springer Verlag. Berlin.
- Duda, Henriette A. A. (2006) Vergleich forstlicher Managementstrategien. Umsetzung verschiedener Waldbaukonzepte in einem Waldwachstumssimulator. Dissertation. Göttingen.
- Duerr, William A., W.E. Bond (1952): Optimum Stocking of a Selection Forest. Journal of Forestry 50: 12-16.
- Ďurský, Ján (2000) Einsatz von Waldwachstumssimulatoren für Bestand, Betrieb und Großregion. Habilitationsschrift. Lehrstuhl für Waldwachstumsunde. Freising.

- Duschl, Christian (2001) Simulation forstbetrieblicher Sachverhalte auf der Basis gegenwärtiger Waldstrukturen. Forstliche Forschungsberichte 181. München.
- Dykstra, Dennis P. (1984) Mathematical programming for natural resources management. McGraw-Hill. New York.
- Eichhorn, Fritz (1902) Ertragstafeln für die Weißtanne. Verlag Julius Springer. Berlin.
- Endres, Max (1923) Lehrbuch der Waldwertrechnung und Forststatistik. 4. Auflage. Julius Springer Verlag. Berlin.
- Esser, Ruth (2005) Zur Optimierung des betrieblichen Holzvorrats: Eine Studie am Beispiel des Gräflich Arco – Zinneberg'schen Forstbetriebs in Tschechien. Diplomarbeit. Lehrstuhl für Waldbau und Forsteinrichtung. München.
- Faustmann, Martin (1849) Berechnung des Werthes, welchen Waldboden, sowie noch nicht haubare Holzbestände für die Waldwirtschaft haben. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung 56: 441-455.
- Faustmann, Martin (1854) Wie berechnet man den Geldwerth junger, noch nicht haubarer Holzbestände oder überhaupt den Produktionswerth eines Holzbestandes? Allgemeine Forst- und Jagdzeitung 11: 81-86.
- Felbermeier, Bernhard, Ralf Moshhammer (2007) Nachhaltigkeitskonzeption Bayerische Staatsforsten. Projekt des Fachgebiets Waldinventur und nachhaltige Nutzung sowie des Lehrstuhls für Waldwachstumskunde. Freising.
- Felbermeier, Bernhard, Thomas Knoke, Reinhard Mosandl (2007) Forstbetriebsplanung unterstützen durch lineare Programmierung. Allgemeine Forstzeitung AFZ – Der Wald 3: 115-116.
- Fischer, Anton (1995) Forstliche Vegetationskunde. Parey Verlag. Berlin.
- Frank, Artur (2006) Strategie einer zielgerechten Produktion von Qualitätsholz. Allgemeine Forstzeitung AFZ - Der Wald 19: 1026-1029.

- Freist, Helmuth (1962) Untersuchungen über den Lichtungszuwachs der Rotbuche und seine Ausnutzung im Forstbetrieb. Forstwissenschaftliche Forschungen. Band 17. Paul Parey Verlag. Berlin.
- Frey, Bruno S., Matthias Benz, (2002) Ökonomie und Psychologie eine Übersicht in: Frey, Dieter und Lutz von Rosenstiel (Hrsg.) Enzyklopädie der Wirtschaftspsychologie. Hogrefe Verlag. Göttingen.
- Gadow, Klaus von (1991) Integration von Einzel- und Gesamtnutzungsplanung in der Forsteinrichtung. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung 162/4: 72-75.
- Gadow, Klaus von (2003) Steuerung und Analyse der Waldentwicklung. Forstwissenschaftliches Centralblatt 122: 4.
- Gadow, Klaus von (2005) Forsteinrichtung – Analyse und Entwurf der Waldentwicklung. Universitätsverlag. Göttingen.
- García, Oscar (1984) A Forestry-Oriented Linear Programming Interpreter. Nagumo, H. Et al (Hrsg.) Proceedings IUFRO Symposium on Forest Management Planning and Managerial Economics. University of Tokyo.
- Gauer, Jürgen, Eberhard Aldinger (2005) Waldökologische Naturräume Deutschlands – Forstliche Wuchsgebiete und Wuchsbezirke – mit Karte 1:1.000.000. In: Mitteilungen des Vereins für Forstliche Standortskunde und Forstpflanzenzüchtung 43: 295-299.
- Gayer, Karl (1898) Der Waldbau. 4. verbesserte Auflage. Paul Parey Verlag. Berlin.
- Geiger, Hans (1998) Die Zeit der Banken. Erweiterte Antrittsvorlesung. Zürich. [www.isb.uzh.ch/publikationen/pdf/workingpapernr11.pdf](http://www.isb.uzh.ch/publikationen/pdf/workingpapernr11.pdf). Stand 06/2009.
- Gehrhardt Ernst (1923) Ertragstabellen für Eiche, Buche, Tanne, Fichte und Kiefer. Springer Verlag. Berlin.
- Gigerenzer, Gerd, Reinhard Selten (2002) Rethinking Rationality. In: Gigerenzer und Selten (Hrsg.) Bounded Rationality – The Adaptive

- Toolbox. Dahlem Workshop Reports. MIT Press. Cambridge Massachusetts, London England.
- Gordon, Geoffrey (1972) Systemsimulation. Oldenburg Verlag. München Wien.
- Grünig, Rudolf, Richard Kühn (2005) Entscheidungsverfahren für komplexe Probleme. 2. Auflage. Springer. Berlin Heidelberg.
- Gunn, Eldon (2003) A neuro-dynamic programming approach to the optimal stand management. System Analysis in Forest Resources: Proceedings of the 2003 Symposium. Portland.
- Gustafson, Eric J., L. Jay Roberts, Larry A. Leefers (2006) Linking linear programming and spatial simulation models to predict landscape effects of forest management alternatives. Journal of Environmental Management 81/4: 339-350.
- Haight, Robert G., J. Douglas Brodie, Walter G. Dahms (1985) A Dynamic Programming Algorithm for Optimization of Lodgepole Pine Management. Forest Science 31/3: 321-220.
- Hanewinkel, Marc (2001) Neuausrichtung der Forsteinrichtung als strategisches Managementinstrument. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung 172: 202-211.
- Hanewinkel, Marc, Konstantin von Teuffel (Hrsg.) (2004) Waldwachstumsmodelle für Prognosen in der Forsteinrichtung – Stand der Wissenschaft in Mitteleuropa. Freiburger Forstliche Forschung. Band 50.
- Hartebrodt, Christoph, Thomas Fillbrand (2006) Auszüge aus dem Testbetriebsnetz Baden-Württemberg für das BMBF Projekt „Ostalb“. FVA Freiburg.
- Hasenauer, Hubert (Hrsg.)(2006) Sustainable Forest Management. Growth Models for Europe. Springer Verlag. Berlin.

- Hax, Herbert, Helmut Laux (1972) Flexible Planung – Verfahrensregeln und Entscheidungsmodelle für die Planung bei Ungewissheit. Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung 24: 318-340.
- Hax, Herbert (1993) Investitionstheorie, 5. Auflage. Physica Lehrbuch. Physica Verlag. Heidelberg.
- Heal, Geoffrey M., Graciela Chichilnisky, Andrea Beltratti (1996) Sustainable use of renewable resources. Social Science Research Network Electronic Library. <http://ssrn.com/abstract=1613>. Stand:12/2008.
- Heaps, Terry, Philip A. Neher (1979) The Economics of Forestry when the Rate of Harvest Is Constrained. Journal of Environmental Economics and Management 6: 297-319.
- Heaps, Terry (1984) The Forestry Maximum Principle. Journal of Economic Dynamics and Control 7: 131-151.
- Heidingsfelder, Armin, Thomas Knoke (2004) Douglasie versus Fichte. Ein betriebswirtschaftlicher Leistungsvergleich auf der Grundlage des Provenienzversuches Kaiserslautern. Schriften zu Forstökonomie 26. J.D. Sauerländer's Verlag. Frankfurt a.M.
- Hein Sebastian, Elke Lenk, Joachim Klädtke, Ulrich Kohnle (2007) Z-Baumorientierte Auslesedurchforstung in Buche [*Fagus sylvatica* L.] Auswirkungen auf Qualität, Sortenstruktur und Wertleistung. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung 178/1: 8-20.
- Heindl, Ulrich, Reinhard Pausch (2007) Nadelstarkholz erwünscht. LWFaktuell 59: 6-7.
- Henne, Arthur (1973) Forsteinrichtung als betriebswirtschaftliche Planung und Kontrolle. Band 11. J.D. Sauerländer's Verlag. Frankfurt a.M..
- Heyer, Gustav (1871) Die Methoden der forstlichen Rentabilitätsrechnung. Handbuch der forstlichen Statik. Erste Abtheilung. B.G. Teubner Verlag. Leipzig.

- Herrmann, Hans-Joachim (1991) Modellgestützte Planung in Unternehmen. Entwicklung eines Rahmenkonzepts. Gabler Verlag. Wiesbaden.
- Hillier, Frederick S., Gerald J. Lieberman (1986) Operations Research – Einführung. R. Oldenbourg Verlag. München Wien.
- Hinrichs, Lars (2006) Untersuchungen zur Simulation von Behandlungspfaden für Buchen-Fichten-Mischbestände. Dissertation. Göttingen. <http://webdoc.sub.gwdg.de/diss/2007/hinrichs/>. Stand 01/2009.
- Hof, John G., Brian M. Kent (1990) Nonlinear Programming Approaches to Multistand Timber Harvest Scheduling. *Forest Science* 36/4: 894-907.
- Hof, John G., Linda A. Joyce (1993) A mixed integer linear programming approach for spatially optimizing wildlife and timber in managed forest ecosystems. *Forest Science* 39/4: 816-834.
- Höltermann, Anke (2001) Verantwortung für zukünftige Generationen in der Forstwirtschaft. Schriften aus der Forstökonomie Band 14. Freiburg.
- Hultkrantz, Lars (1991) A note on the Optimal Rotation Period in a Synchronized Normal Forest. *Forest Science* 37/4: 1201-1206.
- Hundeshagen, Johann Christian (1826) Die Forstabschätzung auf neuen, wissenschaftlichen Grundlagen, nebst einer Charakteristik und Vergleichung aller bisher bestandenen Forsttaxations-Methoden. Heinrich Laupp Verlag. Tübingen.
- Hyytiäinen, Kari, Olli Tahvonen (2002) Economics of Forest Thinnings and Rotation Periods for Finnish Conifer Cultures. *Scandinavian Journal of Forest Research* 17: 274-288.
- Hyytiäinen, Kari, Olli Tahvonen, Lauri Valsta (2005) Optimum Juvenile Density, Harvesting, and Stand Structure in Even Aged Scots Pine Stands. *Forest Science* 51/2:120-133.
- Jarchow, Hans-Joachim (1998) Theorie und Politik des Geldes. I. Geldtheorie. 9. Auflage. Vandenhoeck & Ruprecht. Göttingen.

- Jöbstl, Hans A. (1998) Erweitertes Forstbetriebliches Rechnungswesen – Waldvermögensänderungen und Umweltlesitungen in der forstlichen Erfolgsrechnung. Beiträge zur Forstökonomie Festschrift für Prof. Dr. Sagl. Eigenverlag d. Instituts für forstliche Sozioökonomik. Wien. S. 95-124.
- Johann, Klaus (1982) Der „A-Wert“ ein objektiver Parameter zur Bestimmung der Freistellungsstärke von Zentralbäumen. Tagung der Sektion Ertragskunde DVFFA. Weibersbrunn 24-27. Mai. S. 146-158.
- Johansson, Per-Olov, Karl-Gustav Löfgren (1985) The Economics of Forestry and Natural Resources. Basil Blackwell Verlag. Oxford New York.
- Johnston, Grayson, Bradley (1967) Forest Planning. Faber. London.
- Judeich, Friedrich (1893) Die Forsteinrichtung. 5. Auflage. G. Schönfeld's Verlagsbuchhandlung. Dresden.
- Judeich, Friedrich (1923) Die Forsteinrichtung. 8. Auflage. bearbeitet von Max Neumeister. Verlagsbuchhandlung Paul Parey. Dresden.
- Kändler, Gerald (2006) Projektinterne Beschreibung der Bestandestypenausscheidung. <http://www.waldundholz-ostalb.de/de/SECURE/standardgruppe/downloads.php>. Stand 01/2006.
- Kahn, Markus (1995) Die Fuzzy Logik basierte Modellierung von Durchforstungseingriffen. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung. 166/9-10: 169-176.
- Kant, Shashi (2005) Institutions, Sustainable Forest Management, and Post-Newtonian Economics. In: Institutions, Sustainability, and Natural Resources. Kant, Shashi, Berry, R. Albert (Eds). Springer. New York.
- Kao, Chiang, J. Douglas Brodie (1980) Simultaneous optimization of thinning and rotation with continuous stocking and entry levels. Forest Science 26/3: 338-346.
- Kao, Chiang (1984) Optimal Stocking Levels and Rotation Under Uncertainty. Forest Science 30/4: 921-927.

- Karlson, Jenny, Mikael Rönquist, Johan Bergström (2004) An optimisation model for annual harvest planning. *Canadian Journal of Forest Research* 34: 1747-1754.
- Kastrup, Martin J. (1996) Zur Rationalität forstbetrieblicher Entscheidungsmodelle. Schriften aus dem Institut für Forstökonomie der Universität Freiburg. Band 5.
- Kathöfer, Ulrich, Ulrich Müller-Funk (2005) *BWL-Crash Kurs Operations Research*. UTB Taschenbuch Wirtschaftswissenschaften. UVK Verlagsgesellschaft. Konstanz.
- Kennedy, John O.S. (1986) *Dynamic Programming – Applications to Agriculture and Natural Resources*. Elsevier Applied Science Publishers. London New York.
- Kilki, Pekka, Unto Väisänen (1970) Determination of the optimal cutting policy for the forest stand by means of dynamic programming. *Acta forestalia Fennica* 102: 5-22.
- Kirkpatrick, Scott, C. D. Gelatt, Mario P. Vecchi (1983) Optimization by Simulated Annealing. *Science*. New Series 220 (4598): 671-680.
- Klemperer, W. David (1996) *Forest Resource Economics and Finance*. McGrawHill, Inc. New York.
- Knoke, Thomas (1998) Die Stabilisierung junger Fichtenbestände durch starke Durchforstungseingriffe – Versuch einer ökonomischen Bewertung. *Forstarchiv* 69: 219-226.
- Knoke, Thomas (1999) Zur betriebswirtschaftlichen Optimierung der Vorratshöhe in einem Plenterwald. *Forst und Holz* 16: 483-488.
- Knoke, Thomas, Martin Moog, Niels Plusczyk (2001) On the effect of volatile stumpage prices on the economic attractiveness of a silvicultural transformation strategy. *Forest Policy and Economics* 2: 229-240.
- Knoke, Thomas (2003a) Eine Bewertung von Nutzungsstrategien für Buchenbestände (*Fagus sylvatica* L.) vor dem Hintergrund des Risikos



der Farbkernbildung – eine waldbaulich-forstökonomische Studie. Forstliche Forschungsberichte München. Band 193.

Knoke, Thomas (2003b) Forstwirtschaftsplan für die Jahre 2003-2022. Stiftungswald der LMU. Band 1.

Knoke, Thomas, Reinhard Mosandl (2004) Integration ökonomischer, ökologischer und sozialer Ansprüche: Zur Sicherung einer umfassenden Nachhaltigkeit im Zuge der Forstbetriebsplanung. Forst und Holz 59/11: 535-539.

Knoke, Thomas, Martin Moog (2005) Timber harvesting versus forest reserves—producer prices for open-use areas in German beech forests (*Fagus sylvatica* L.). *Ecological Economics* 52/1: 97-110.

Knoke, Thomas, Bernd Stimm, Christian Ammer, Martin Moog (2005) Mixed Forests reconsidered: A Forest Economics Contribution on an Ecological Concept. *Forest Ecology and Management* 213: 102-116.

Knoke, Thomas, Michael Weber (2006) Expanding Carbon Stocks in Existing Forests – A Methodological Approach for Cost Appraisal on the Enterprise Level. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 11: 579-605.

Knoke, Thomas, Johannes Wurm (2006) Mixed forests and a flexible harvest policy: a problem for conventional risk analysis?. *European Journal of Forest Research* 125: 303-315.

Knoke, Thomas (2007) Bioeconomic modelling and optimisation of forest stands: Towards silvicultural economics. Projektantrag Deutsche Forschungsgesellschaft. Fachgebiet für Waldinventur und nachhaltige Nutzung. TU München. Freising.

Knoke, Thomas, Andreas Hahn (2007) Baumartenvielfalt und Produktionsrisiken: Ein Forschungseinblick und –ausblick. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* 158: 312-322.

- Knoke, Thomas (2008) Mixed forests and finance – Methodological approaches. *Ecological Economics* 65: 590-601.
- Knoke, Thomas, Thomas Seifert (2008) Integrating selected ecological effects of mixed European beech-Norway spruce stands in bioeconomic modelling. *Journal of Ecological Modelling* 210: 487-498.
- Knoke, Thomas (o.J.) A Scientific Perspective for Silviculture. In: Spathelf, Peter (Hrsg.) *Sustainable Management in a Changing World. A European Perspective*. Springer Series. *Managing Forest Ecosystems* 19. Im Druck.
- Koepke, Detlev (1999) Zielbildung im Privatwald als individueller Problemlösungsprozeß – ein Instrument zur Aufstellung konsistenter Wirtschaftsziele. Cuvillier Verlag. Göttingen.
- König, Andreas (1995): Sturmgefährdung von Beständen im Altersklassenwald. Ein Erklärungs- und Prognosemodell. J.D. Sauerländer's Verlag. Frankfurt am Main.
- König, Gottlob (1813) Anleitung zur Holztaxazion. Becker'sche Buchhandlung. Gotha.
- König, Gottlob (1835) Forstmathematik mit Anweisung zur Holzvermessung, Holzschätzung und Waldwerthberechnung nebst Hülftafeln für Forstschätzer. Becksche Buchhandlung. Gotha.
- Kohnle, Ulrich, Konstantin von Teuffel (2004) Ist die Produktion von Fichten-Starkholz noch zeitgemäß in Baden-Württemberg? Ertragsvergleich von vier Modellen zur Produktion von starkem und mittel-starkem Holz. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 175: 171-182.
- Korhonen, Pekka (1998) Multiple Objective Linear Programming in Supporting Forest Management. *Proceedings of 2<sup>nd</sup> Berkeley-Kvl Conference on Natural Resource Management*. Copenhagen.
- Koskela, Erkki, Markku Ollikainen (2001) Forest Rotation under Spatial and Temporal Interdependence: A Re-Examination. *Forest Science* 47/4: 484-496.

- Kouba, Jan (2002): Das Leben des Waldes und seine Lebensunsicherheit. Forstwissenschaftliches Centralblatt 121: 211-228.
- Kraft, Detlev (2007) Betriebsinterne Unterlagen zur Unternehmerentlohnung. Blauwald GmbH. Ebnat.
- Kramer, Horst (1990) Nutzungsplanung in der Forsteinrichtung. 2. Auflage. J.D. Sauerländer's Verlag. Frankfurt a.M.
- Kramer, Horst, Alparslan Akça (2002) Leitfaden zur Waldmesslehre. 3. Auflage. J.D. Sauerländer's Verlag. Frankfurt a.M.
- Kroth, Werner (1968) in: Adomat, R., E. Assmann, H.D. Brabänder. Möglichkeiten optimaler Betriebsgestaltung in der Forstwirtschaft. Der forstliche Produktionszeitraum. S. 173-184. Bayer. Landwirtschaftsverlag. München Basel Wien.
- Kroth, Werner, Peter Bartelheimer (1993) Holzmarktlehre. Pareys Studentexte. Band 77. Paul Parey Verlag. Hamburg Berlin.
- Kruschwitz, Lutz (2007) Investitionsrechnung, 11. Auflage. R. Oldenburg Verlag. München Wien.
- Küblböck, Tobias (2008) Zur Abschätzung von finanziellen Optimierungsspielräumen im Rahmen der Forstbetriebsplanung. Diplomarbeit am Fachgebiet Waldinventur und nachhaltige Nutzung. TU München. Freising.
- Kublin, Edgar, G. Scharnagl (1988). Verfahrens- und Programmbeschreibung zum BWI-Unterprogramm BDAT. FVA Baden-Württemberg. Freiburg.
- Kurth, Horst (1994) Forsteinrichtung. Nachhaltige Regelung des Waldes. DLV Deutscher Landwirtschaftsverlag. Berlin.
- Landesforstverwaltung Baden-Württemberg (Hrsg.) (1960) Dienstanweisung für die Forsteinrichtung in den Staats- und Körperschaftlichen Waldungen (FED 1960) GABL BW 10: 185-204.

- Landesforstverwaltung Baden-Württemberg (Hrsg.) Ministerium Ländlicher Raum Baden-Württemberg (1999) Richtlinie landesweiter Waldentwicklungstypen. Stuttgart.
- Lapacek, Kai (2003) Wertorientierte Unternehmensplanung im Forst – Komponentenbasiertes Modellkonzept auf Grundlage von Betriebsinventur und Betriebssimulation. Dissertation. TU Dresden.
- Lappi, Juha (1992) JLP: A Linear Programming Package for Management Planning. The Finnish Forest Research Institute. Research Papers 414. Suonenjoki.
- Laux, Helmut (1991) Entscheidungstheorie I & II, Grundlagen, 2. Auflage. Heidelberger Lehrtexte. Wirtschaftswissenschaften. Springer Verlag. Berlin.
- Lemm, Renato (2003) Ein Modell für alle Fälle. Einfache, alternative Simulationsmodelle. in: Wachstumsmodelle in der Forsteinrichtung. Freiburger Forstliche Forschung 50: 32-48.
- Leskinen, Pekka, Jyrki Kangas (2001) Modelling Future Timber Price Development by Using Expert Judgements and Time Series Analysis. Silva Fennica 35/1: 93-102
- Lexer, Manfred (2005) Multikriterielle Entscheidungsmethoden (MCDM) – Einsatz für forstliche Fragestellungen. Tagungsband Arbeitsgemeinschaft Forsteinrichtung. 13.-15. Oktober. Teisendorf. S. 1-27.
- Löffelholz, Joseph (1980) Repetitorium der Betriebswirtschaftslehre. 6. Auflage. Gabler Verlag. Wiesbaden.
- Lopes, Lola L. (1987) Between hope and fear. The Psychology of Risk. Advances in experimental social psychology 20: 255-295. Academic Press. New York.
- Lüthy, Christoph (1997) Leistungsschätzung beim Holzrücken mit Forwarder. Wald und Holz 78/4: 33-35.

- MacMillan, Claude (1975) *Mathematical Programming*, 2<sup>nd</sup> Edition. John Wiley & Sons. New York.
- Mäkinen, Antti, Jouni Kalliovirta, Jussi Rasinmäki (2006) *Next-Generation Simulation and Optimization Platform for Forest Management and Analysis*. Proceedings of the eighth annual forest inventory and analysis symposium. Monterey. [http://nrs.fs.fed.us/pubs/gtr/gtr\\_wo079/gtr\\_wo079\\_393.pdf](http://nrs.fs.fed.us/pubs/gtr/gtr_wo079/gtr_wo079_393.pdf). 16.-19. Oktober: 393-400.
- Mantel, Wilhelm (1959) *Forsteinrichtung*. 2. Auflage. J.D. Sauerländer's Verlag. Frankfurt a.M.
- Marshall, Alfred (1959) *Principles of Economics*. 8. Ausgabe. Reprint. Macmillan. London.
- Martell, David L., Eldon A. Gunn, Andres Weintraub (1998) *Forest management challenges for operational researchers*. Invited Review. *European Journal of Operational Research* 104: 1-17.
- Martin, George L., Alan R. Ek (1981) *A dynamic programming analysis of silvicultural alternatives for red pine plantations in Wisconsin*. *Canadian Journal of Forest Research* 11: 370-379.
- McDill, Marc E., Janis Braze (2001) *Using the Branch and Bound Algorithm to Solve Forest Planning Problems with Adjacency Constraints*. *Forest Science* 47/3: 403-418.
- Meilby, Henrik, Bo J. Thorsen, Niels Strange (2003) *Adaptive spatial harvest planning under risk of windthrow*. *Journal of Environmental Economics and Management* 19: 109-126.
- Michiels, Hans Gerd (1998): *Der Standortswald im Südwestdeutschen Standorts-kundlichen Verfahren*. *Mitteilungen des Vereins für Forstliche Standortskunde und Forstpflanzen e.V.* 38: 73-80.
- Miner, Cynthia L., Nancy R. Walters, Monique L. Belli (1988) *A guide to the TWIGS program for the North Central United States*. USDA Forest Service. General Technical Report NC-125.

- Ministerium für Ernährung und Ländlichen Raum Baden-Württemberg (MLR) (1995) Waldgesetz für Baden-Württemberg (LwaldG) Fassung vom 31.08.1995. [http://www.landwirtschaft-mlr.baden-wuerttemberg.de/servlet/PB/show/1200178\\_I1/LWaldG\\_aktuelle%20Fassung%20vom%2015.12.2009.pdf](http://www.landwirtschaft-mlr.baden-wuerttemberg.de/servlet/PB/show/1200178_I1/LWaldG_aktuelle%20Fassung%20vom%2015.12.2009.pdf). Stand 01/2010
- Mitra, Tapan, Henry Y. Wan (1985) Some Theoretical Results on the Economics of Forestry. *Review of Economic Studies* 169: 263-282.
- Möhring, Bernhard (1986) Dynamische Betriebsklassensimulation: ein Hilfsmittel für die Waldschadenbewertung und Entscheidungsfindung im Forstbetrieb. Berichte des Forschungszentrum Waldökosysteme, Waldsterben 20. Dissertation. Göttingen.
- Möhring, Bernhard (1994) Über ökonomische Kalküle für forstliche Nutzungsentscheidungen. *Schriften zur Forstökonomie*. Band 7. J.D. Sauerländer's Verlag. Frankfurt a.M..
- Möhring, Bernhard, Ursula Rüping (2006) Bewertungskonzept für forstliche Nutzungseinschränkungen. J.D. Sauerländer's Verlag. Band 32. Frankfurt a. M..
- Möhring, Bernhard, Ursula Rüping, Georg Leefken, Markus Ziegeler (2006) Die Annuität - Ein „missing link“ der Forstökonomie. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 177/2:21-29.
- Moog, Martin, Herbert Borchert, Bettina Leischner (2001) unveröffentlichter Abschlussbereich des Forschungsauftrags: „Renaturierung der Donau-Auen zwischen Neuburg und Ingolstadt“. Lehrstuhl für forstliche Betriebswirtschaftslehre. München.
- Moog, Martin, Herbert Borchert (2001) Increasing rotation periods during a time of decreasing profitability of forestry-a paradox?. *Forest Policy and Economics* 2/2:101-116.
- Moog, Martin, Thomas Knoke (2003) Zur betriebswirtschaftlichen Bewertung von Einschränkungen der Waldbewirtschaftung. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 122: 59-76.

- Moore, James C. (1999) *Mathematical Methods for Economic Theory 1. Studies in Economic Theory 9*. Springer Verlag. Berlin Tokyo.
- Mrusek, Frank, Uwe Götze (2006) *Die optimale Rotationsperiode erneuerbarer Ressourcen. Überlegungen aus investitionstheoretischer Perspektive*. GUC Verlag. Chemnitz.
- Müller-Merbach, Heiner (1971) *Operations Research. Methoden und Modelle der Optimalplanung*. 2. Auflage. Verlag Vahlen. München.
- Nagel, Jürgen (2002) *Das Open Source Entwicklungsmodell - eine Chance für Waldwachstumssimulatoren*. Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten - Sektion Ertragskunde. Jahrestagung Schwarzburg. 13-15. Mai. S. 1-6.
- Näslund, Bertil (1969) *Optimal Rotation and Thinning*. *Forest Science* 15/4: 446-451.
- Nautiyal, Jagdish C., Jeremy S. Williams (1990) *Response of Optimal Stand Rotation and Management Intensity to One-Time Changes in Stumpage Price, Management Cost, and Discount Rate*. *Forest Science* 36/2: 212-223.
- Nemhauser, George L. (1969) *Einführung in die Praxis der dynamischen Programmierung*. R. Oldenbourg Verlag. München-Wien.
- Neuner, Michael (2008) *Holzpreiszeitreihen und ihre Entwicklung. Eine Anwendung von Analysemodellen*. Bachelorarbeit. TU München. Freising.
- Newman, David H. (2002) *Forestry's golden rule and the development of the optimal forest rotation literature*. *Journal of Forest Economics* 8: 5-27.
- Nohlen, Dieter, Rainer-Olaf Schultze, Suzanne S. Schüttemeyer (1998) *Lexikon der Politik. Band 7. Politische Begriffe*. C.H. Beck. München.
- Obergföll, Patrick (2000) *Modelle der Nutzungsplanung auf der Basis von Wiederholungsinventuren*. Dissertation. Freiburg.

- Oderwald, Richard G., William A. Duerr (1990) König-Faustmannism: A Critique. *Forest Science* 36/1: 169-174.
- Ötzel, Georg (1850) Ueber Berechnung des Werthes, welchen Waldboden, sowie noch nicht haubare Holzbestände besitzen. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung*. S. 243-250.
- Öhman, Karin, Ljusk Ola Eriksson (2001) Allowing for spatial consideration in long-term forest planning by linking linear programming with simulated annealing. *Forest Ecology and Management* 161: 221-230.
- Ohlin, Bertil (1921) Till frågan om skogarnas omloppstid. *Ekonomisk Tidskrift* 22. Übersetzung in (1995) Concerning the Question of the Rotation Period in Forestry. *Journal of Forest Economics* 1/1:89-114.
- O'Laughlin, Jay (1990) Comment III. *Forest Science* 36/1: 180-184.
- Ollmann, Heiner (1985) Der Holzverbrauch in der Bundesrepublik Deutschland bis zum Jahre 2000. *Allgemeine Forstzeitschrift* 40/30-32: 776-778.
- Olsson, Leif, Peter Lohmander (2004) Optimal Forest Transportation with respect to road investments. *Forest Policy and Economics* 7/3: 369-379
- Paredes, Gonzalo L., J. Douglas Brodie (1987) Efficient Specification and Solution of th Even-aged Rotation and Thinning Problem. *Forest Science* 33/1: 14-29.
- Paulsen, Johann Christian (1795) Kurze praktische Anleitung zum Forstwesen. Verfaßt von einem Forstmanne. Hrsg. von Kammerrat G. F. Führer. Detmold.
- Pausch, Reinhard, K. Ponitz (2002) Leistung von Harvestern bei unterschiedlichen Hiebsbedingungen auf der Basis langfristiger Beobachtung, *Forst und Technik* 4: 10-14.
- Pelkki, Matthew H. (1997) The Effects of Neighborhood Storage Size on Dynamic Programming Solutions. *Forest Science* 43/3: 387-395.



- Pelkki, Matthew H., Natalia V. Kirillova (2004) Managing mixed species Hardwood stands for Maximum Financial Returns. Proceedings of the 14th Central Hardwood Forest Conference. GTR-NE-316.
- Pelz, Dieter R. (1987) Modelle der betriebsweisen Inventur. Forstwissenschaftliches Centralblatt 106/3: 168-175.
- Pennanen, Juho, Timo Kuuluvainen (2002) A spatial simulation approach to natural forest landscape dynamics in boreal Fennoscandia. Forest Ecology and Management 164:157-175.
- Pertz, K. (1983) Grenzen einer marktwirtschaftlichen Interpretation der Forstwirtschaft. Forstarchiv 54: 147-152.
- Peyron, Jean-Luc (1993) Présentation illustrée d'une méthode de planification de la gestion forestière et de la gestion forestière et de détermination de l'effort de régénération. Revue Forestière Française 1: 59-74.
- Peyron, Jean-Luc, Jacques Maheut (1999) Les fondements de l'économie forestière moderne: Le rôle capital de Faustmann, il y a 150 ans, et celui de quelques-uns de ses précurseurs et successeurs. Revue Forestière Française 6: 679-697.
- Phan-Huy-Hao, Emmanuel (1978) Quadratische Programmierung mit quadratischen Restriktionen: auf linearen und simplizialen Approximationen basierende Lösungsverfahren. Dissertation. Eidgenössische Technische Hochschule (ETH). Zürich.
- Polley, Heino (2001) Aufnahmeanweisung für die Bundeswaldinventur II. 2. Auflage. Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz BMELV. Bonn.
- Pott, Miriam (2002) Von Strukturparametern zu Nachhaltigkeitskriterien. Ein methodischer Beitrag zur Bewertung der Nachhaltigkeit von Wäldern. Dissertation. Freising.

- Pressler, Max Robert (1860) Zur Verständigung über den Reinertragswaldbau und dessen Betriebsideal. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung 36: 41-55, 173-191, 261-271.
- Pressler, Max Robert (1869) Forstliches Hülfsbuch für Schule und Praxis nach neuem Stande der Wissenschaft und Erfahrung in Tafeln und Regeln zur Erleichterung und Vervollkommnung holzwirtschaftlicher und verwandter Rechnungs-, Messungs-, Schätzungs-, und Betriebs- Arbeiten mit besonderer Rücksicht auf einen nationalökonomisch und forsttechnisch möglichst rationellen Reinertragswaldbau. Wold. Türk's Verlagshandlung. Dresden.
- Pretzsch, Hans (1996) Growth Trends of Forests in Southern Germany. In: Spiecker, Heinrich, Kari Mielikäinen, Michael Köhl, Jens P. Skovsgaard (Hrsg.) Growth Trends in European Forests. Springer Verlag. Berlin. S. 107-132.
- Pretzsch, Hans (2001) Modellierung des Waldwachstums. Parey Verlag. Berlin.
- Pretzsch, Hans, Peter Biber, Jan Ďurský (2002) The single tree-based stand simulator SILVA: construction, application and evaluation. Forest Ecology and Management 162: 3–21.
- Prodan, Michael (1960) Grundlagen der Forsteinrichtung. In: Bauer, Franz (Hrsg.) Fortschritte in der Forstwirtschaft. BLV Verlag. München.
- Pukkala, Timo, Jari Miina (1997) A method for stochastic multiobjective optimization of stand management. Forest Ecology and Management 98: 189-203.
- Rasinmäki, Jussi, Antti Mäkinen, Jouni Kalliovirta (2009) SIMO - An adaptable simulation framework for multiscale forest resource data. Computers and Electronics in Agriculture 66/1: 76-84.
- Reeves, Laurence H., Robert G. Haight (2000) Timber Harvest Scheduling with price uncertainty using Markowitz portfolio optimization. Annals of Operations Research 95: 229-250.

- Reimeier, Simon (2001) Analyse der Zuwachsveränderungen von Waldbeständen und Möglichkeiten der Prognose aus Daten permanenter Stichprobeninventuren. Dissertation. Fachgebiet für Forsteinrichtung. TU München.
- Reineke, L.H. (1933) Perfecting a stand density index for even-aged forests. *Journal of Agricultural Research* 46: 627-638.
- Richter, Albert (1963) Einführung in die Forsteinrichtung. Neumann Verlag. Radebeul.
- Rideout, Douglas B., Hayley Hessel (2001) *Principals of Forest and Environmental Economics*. 2. Auflage. Resource and Environmental Management, LLC. Fort Collins.
- Riesenhuber, Felix (2007) Großzahlige empirische Forschung. In: Albers et al. (Hrsg.) *Methodik der empirischen Forschung*. 2. Auflage. Gabler Verlag. Wiesbaden.
- Riitters, Kurt, J. Douglas Brodie (1984) Implementing Optimal Thinning Strategies. *Forest Science* 30/1: 82-85.
- Rittershofer, Fredo (1994) *Waldpflege und Waldbau*. Rittershofer. Freising.
- Röhle, Heinz (1994) Zum Wachstum der Fichte auf Hochleistungsstandorten in Südbayern. Ertragskundliche Auswertung langfristig beobachteter Versuchsreihen unter besonderer Berücksichtigung von Trendänderungen im Wuchsverhalten. Habilitationsschrift. Forstwissenschaftliche Fakultät Universität München.
- Roise, Joseph P. (1986) A nonlinear programming approach to stand optimization. *Forest Science* 32: 735-748.
- Rönnqvist, Mikael (2003) Optimization in forestry. *Mathematical Programming* 97/ 1-2: 267-284
- Rose, Dietmar (1992) *Quantitative Modelle in der strategischen Planung am Beispiel der Forstwirtschaft*. Hochschulverlag. Freiburg.

- Rosset, Christian (2006) Zielgerichtete Waldbewirtschaftung mit WIS.2. Bündner Wald 2. o.O.
- Rosset, Christian (2005) Système de gestion sylvicole intégrée et d'aide à la décision. Le WIS.2, un instrument informatique pour une gestion sylvicole efficiente et ciblée, durable, multifonctionnelle et proche de la nature. Dissertation. Nr. 16005. ETH Zürich.
- Runzheimer, Bodo (1999) Operations Research – Lineare Planungsrechnung, Netzplantechnik, Simulation und Warteschlangentheorie. Gabler Verlag. Wiesbaden.
- Saaty, Thomas L. (1990) Multicriteria decision making - the analytic hierarchy process. Planning, priority setting, resource allocation. 2. Auflage. RWS Publishing. Pittsburgh.
- Sagl, Wolfgang (1995) Bewertung in Forstbetrieben. Pareys Studentexte 80. Blackwell Wissenschaftsverlag. Berlin. Wien.
- Salo, Seppo, Olli Tahvonen (2002) On the optimality of a Normal Forest with Multiple Land Classes. Forest Science 48/3: 530-542.
- Salo, Seppo, Olli Tahvonen (2003) On the economics of forest vintages. Journal of Economic Dynamics and Control 27: 1411-1435.
- Samuelson, Paul A. (1976) Economics of Forestry in an Evolving Society. Economic Inquiry 14: 466-492.
- Sánchez Orois, Sofia, František Vilčko (2002) Bewertung und Optimierung von Vornutzungen in Fichtenbeständen. Forstwissenschaftliches Centralblatt 121:250-264.
- Sánchez Orois, Sofía (2003) Untersuchungen zur optimalen Steuerung der Waldentwicklung. Dissertation. Universität Göttingen.
- Sanglhuber, Walter, Harald Vacik (2005) Das Entscheidungsunterstützungssystem DSD v.1.1 und dessen Anwendung. Tagungsband Arbeitsgemeinschaft Forsteinrichtung. 13.-15. Oktober. Teisendorf. S. 1-27.

- Schaffner, Stefan (2001) Realisierung von Holzvorräten im Kleinprivatwald - Typen von Waldbesitzern und deren Verhalten bezüglich Waldbewirtschaftung und Nutzungsaufkommen. Dissertation am Wissenschaftszentrum Weihenstephan der TU-München
- Schendera, Christian FG (2004) Datenmanagement und Datenanalyse mit dem SAS-System. Oldenburg Wissenschaftsverlag. München.
- Schlenker, Gerhard, Siegfried Müller (1973) Erläuterungen zur Karte der Regionalen Gliederung von Baden-Württemberg 1. Teil mit Anhang. In: Mitteilungen des Vereins für Forstliche Standortskunde und Forstpflanzenzüchtung 23: 3-65.
- Schlüter, Achim, Ulrich Schraml (2006) Managing small-scale private forests, a new commons?. Paper submitted to the IASCP European Regional Meeting: "Building the European commons: from open fields to open source". Brescia.
- Schmidt, Matthias, Jürgen Bayer, Gerald Kändler (2006) Sturm ‚Lothar‘ – Ansatz einer inventurbasierten Risikoanalyse. Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten. Sektion Ertragskunde. Jahrestagungsband. S. 5-20.
- Schneeweiss, Christoph (1999) Ethics and Operations Research in: Modelling and Decisions in Economics. Leopold-Wildburger et al. (Hrsg.) Physica Verlag. Heidelberg.
- Schober, Reinhard (1990) Bedeutung des Umsetzens von Waldbäumen für Z-Baumdurchforstungen. Allgemeine Forstzeitung 32: 824-827.
- Schober, Reinhard (1995) Ertragstabeln wichtiger Baumarten bei verschiedener Durchforstung. 4. neubearb. Auflage. J.D. Sauerländer's Verlag. Frankfurt a.M.
- Schreuder, Gerard F. (1971) The Simultaneous Determination of Optimal Thinning Schedule and Rotation for an Even-Aged Forest. Forest Science 17/3: 333-339.

- Sedjo, Roger A. (Hrsg.) (2003) Economics of Forestry. Ashgate. Hants Burlington.
- Sekot, Walter (1993) Studienunterlagen zur Forsteinrichtung. Schriftenreihe des Instituts für forstliche Betriebswirtschaft und Forstwirtschaftspolitik. Band 19. Universität für Bodenkultur. Wien.
- Seo, Jeong-Ho (2005) Modeling Applications for Forest Management. Dissertation. Cuvillier Verlag. Göttingen.
- Seiler, Armin (2000) Planning. BWL in der Praxis III. Orell Füssli Verlag. Zürich.
- Selter, Andy (2006) Der Einsatz multivariater statistischer Methoden zur Erarbeitung einer Betriebstypologie für den bäuerlichen Privatwald. Dissertation. Universität Freiburg.
- Siitonen, Markku, Aimo Anola-Pukkila, Arto Haara, Kari Härkönen, Visa Redsvén, Olli Salminen, Aila Suokas (2001) MELA Handbook. Finnish [http://www.mm.helsinki.fi/mmvar/opetusteknologia/metsasuunnittelu\\_verkossa-hanke/mela2000.pdf](http://www.mm.helsinki.fi/mmvar/opetusteknologia/metsasuunnittelu_verkossa-hanke/mela2000.pdf). Stand November 2009. Forest Research Institute. Helsinki Joensuu.
- Sloman, John (2000) Mikroökonomie. 3. Auflage. Internationale Standardlehrbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften. Oldenbourg Verlag. München Wien.
- Smant, David J.C. (1998) Modelling trends, expectations and the cyclical behavior of prices. Economic Modelling 15: 151-161.
- Sodtke, Rainer M., Heinz Utschig, Hans Pretzsch (2006) A Decision Support System for Multi-Criteria Forest Estate Planning, Integrating a Forest Growth Simulator, Fuzzy-Interference Techniques and a Heuristic Optimisation Approach. In: Hasenauer (Hrsg.) Sustainable Forest Management: Growth Models for Europe. Springer Verlag. S. 211-233.

- Sohngen, Brent, Robert Mendelsohn, Roger Sedjo (1999) Forest management, conservation, and global timber markets. *American Journal of Agricultural Economics* 81/1: 1-13.
- Speidel, Gerhard (1984) *Forstliche Betriebswirtschaftslehre*. 2. Auflage. Paul Parey. Hamburg & Berlin.
- Speidel, Gerhard (1972) *Planung im Forstbetrieb. Grundlagen und Methoden der Forsteinrichtung*. Paul Parey Verlag. Hamburg, Berlin.
- Spellmann, Hermann (1998) Überführung als betriebliche Aufgabe. *Forst und Holz* 54/4: 110-116.
- Spellmann, Hermann, Matthias Schmidt (2003) Massen-, Sorten- und Wertertrag der Fichte in Abhängigkeit von der Bestandesbehandlung. *Forst und Holz* 58/13-14: 412-419.
- Stang Sebastian (2008). Optimierung der Forstbetriebsplanung zur Bewertung von Nutzungseinschränkungen. *Allgemeine Forst Zeitschrift für Waldwirtschaft und Umweltvorsorge* 63: 905-907.
- Stang, Sebastian, Thomas Knoke (2009) Optimierung der Hiebsatzplanung zur Quantifizierung von finanziellen Ertragseinbußen durch den Klimawandel am Beispiel des Forstbetriebes der Stadt Zittau *AFSV Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz* 8: 87-92.
- Starbatty, Joachim (2005) *Geschichte wirtschaftspolitischer Konzeptionen*. Vorlesung. Universität Tübingen. <http://www.uni-tuebingen.de/uni/wwa/download/GeschWipo/Geschichtewirtss2005.pdf> . Stand 05/2009.
- Steinacker, Leonhard und Martin Nickel (2006) mündliche Mitteilung. Versuchsflächenleiter des Lehrstuhls für Waldwachstumskunde. TU München. Freising.
- Steuer, Ralph E., Albert T. Schuler (1979) An interactive Multiple-Objective Linear Programming Approach to a Problem in Forest Management. *Forest, Ecology and Management* 2: 191-205.

- Sullivan, Jay (1997) Linear programming and forest planning. extract from: Rideout, Douglas B. and Hayley Hesseln (Hrsg.). Principles of forest and environmental economics. 2nd edition. Ressource and Environmental Management, LLC. Fort Collins.
- Tahvonen, Olli, Seppo Salo (1998) Optimal Forest Rotation with in Situ Preferences. Journal of Environmental Economics and Management 37: 106-128.
- Tahvonen, Olli, Esa-Jussi Viitala (2006) Does Faustmann Rotation Apply to Fully Regulated Forests?. Forest Science 52/1: 23-30.
- Teuffel, Konstantin von, Markus Krebs (1999) Forsteinrichtung im Wandel. Das überarbeitete Forsteinrichtungsverfahren in Baden-Württemberg. AFZ Der Wald 16: 858-864.
- Teuffel, Konstantin von, Sebastian Hein, Marijan Kotar, Emilia Pinto Preuhsler, Jana Puumalainen, Peter Weinfurter (2006) End User Needs and Requirements. In: Hasenauer Hubert (Hrsg). Sustainable Forest Management. Springer. Berlin Heidelberg. S. 19-38
- Thees, Oliver, Renato Lemm, Urs Mühlethaler (2001) Wie wichtig ist die Gewinnerzielung für die Waldbesitzer? Auswertung der Umfrage an der Forstmesse in Luzern. Wald Holz 83/1: 26-29.
- Thommen, Jean-Paul, Ann-Kristin Achleitner (2004) Allgemeine Betriebswirtschaftslehre. 4. Auflage. Gabler Verlag. Wiesbaden.
- Thomson, Thomas A. (1991) Efficient Combinations of Timber and Financial Market Investments in Single-Period and Multi-Period Portfolios. Forest Science 37/2: 461-480.
- Tiernan, Dermot, Maarten Nieuwenhuis (2005) Financial optimisation of forest-level harvest scheduling in Ireland – A case study. Journal of Forest Economics 11: 21-43.
- Utschig, Heinz (2002) Analyse der Standraumökonomie von Einzelbäumen auf langfristig beobachteten Versuchsflächen – Methoden,



- Programmentwicklung und erste Ergebnisse. Forstwissenschaftliches Centralblatt 121/6: 335-348.
- Valsta, Lauri T. (1990) A comparison of numerical methods for optimizing even-aged stand management. Canadian Journal of Forest Research 20: 961-969.
- Valsta, Lauri T. (1993) Stand management optimization based on growth simulators. Academic dissertation. The Finnish Forest Research Institute. Research Papers 453.
- Vettenranta, Jouni, Jari Miina (1999) Optimizing Thinnings and Rotation of Scots Pine and Norway spruce Mixtures. Silva Fennica 33/1: 73-84.
- Villinger, Bernhard (1979) Regionale Waldbaurichtlinie Ostalb. o.V.
- Viitala, Esa-Jussi, Olli Tahvonen (2004) Does Faustmann Rotation Apply to Fully Regulated Forests? Finnish Forest Research Institute. Helsinki.
- Voigt, Kai-Ingo (1992) Strategische Planung und Unsicherheit. Forschung zur Unternehmensführung. Gabler Verlag. Wiesbaden.
- Voigt, Stefan (2003) Institutionenökonomik. UTB Fink Verlag. München.
- Volz, Karl-Reinhard, Alfons Bieling (1998) Zur Soziologie des Kleinprivatwaldes. Forst und Holz 53/3: 67-71.
- Wagner, Christian (1928) Lehrbuch der theoretischen Forsteinrichtung. Parey Verlag. Berlin.
- Wallman, Patrick, Harald Sverdrup, Mats G.E. Svenson, Matthias Alveteg (2002) Integrated Modelling. In: Sverdrup & Stjernquist (Hrsg.) Developing Principles and Models for Sustainable Forestry in Sweden. Kluwer Academic Publishers. S. 57-83.
- Wear, David N., Peter J. Parks (1994) The Economics of timber supply: an analytical synthesis of modelling approaches. Natural Resource Modelling 8/3: 199-223.

- Weise, Peter, Wolfgang Brandes, Thomas Eger, Manfred Kraft (2005) Neue Mikroökonomie. 5. Auflage. Physica Verlag. Heidelberg.
- Wiedemann, Eilhard (1931) Die Rotbuche M. u. H. Schaper. Hannover . In: Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (Hrsg.)(1990) Hilfstafeln für die Forsteinrichtung. München.
- Wieland, Karl-Josef (2007) Auswirkungen verschiedener waldbaulicher Modelle auf die Sickerwasserqualität und die daraus resultierenden finanziellen Folgen für einen Forstbetrieb am Beispiel der Blauwald GmbH & Co KG in Ebnat. Diplomarbeit. Fachhochschule Weihenstephan. Freising.
- Wikström, Peder (2000) A Solution Method for Uneven-Aged Management Applied to Norway Spruce. Forest Science 46/3: 452-463.
- Wikström, Peder (2001) Effect of decision variable definition and data aggregation on a search process applied to a single-tree simulator. Canadian Journal of Forest Research 31/6:1057–1066.
- Winston, Wayne L. (2004) Operations Research. Applications and Algorithms. 4. Ausgabe. Thomson Brooks/Cole. Belmont.
- Wippermann, Christian (2004) Ökonomische Optimierung von Durchforstungen und Umtriebszeit. Schriften zur Forstökonomie 30. J.D. Sauerländer's Verlag Frankfurt a.M.
- Wurm, Johannes (2007) Projektunterlagen zum Projekt „Waldbau – Controlling mit Kennzahlen aus der betriebsweisen Stichprobeninventur“. Fachgebiet Waldinventur und nachhaltige Nutzung. TU München. Freising.
- Wöhe, Günter (2000) Einführung in die Allgemeine Betriebswirtschaftslehre. 20. Auflage. Vahlen Verlag. München.
- Yoda, K., T. Kira, H. Ogawa, K. Hozumi (1963) Self Thinning in overcrowded pure stands under cultivated and natural conditions (Intraspecific

- competition among higher plants XI). Journal of the Institute of Polytechnics, Osaka City University. Series D. 14: 107-129.
- Zadeh, Lotfi A. (1997) Toward a theory of fuzzy information granulation and its centrality in human reasoning and fuzzy logic. Fuzzy sets and systems 90/2: 111-127.
- Zadnik Stirn, Lidija (2006) Integrating the fuzzy analytic hierarchy process with dynamic programming approach for determining the optimal forest management decisions. Ecological Modelling 194: 296-305.
- Zell, Jürgen (2002) Ökonomische Optimierung der Zieldurchmesserernte bei der Buche unter Berücksichtigung des Risikos rotkernbedingter Entwertung - ein Anwendungsbeispiel der Linearen Programmierung. Arbeitsbericht 32-2002. Institut für Forstökonomie. Universität Freiburg.
- Zimmermann, Hans-Jürgen, Lothar Gutsche (1991) Multi-Criteria Analyse. Einführung in die Theorie der Entscheidungen bei Mehrfachzielsetzungen. Heidelberger Lehrtexte Wirtschaftswissenschaften. Springer Verlag. Berlin.
- Zingg, Andreas (1999) Genauigkeit und Interpretierbarkeit von Oberhöhen. – Centralblatt für das gesamte Forstwesen 116/1-2: 25-34.
- Zöhler, Fritz (1980) Forstinventur. Ein Leitfadens für Studium und Praxis. Paul Parey Verlag. Hamburg Berlin.

## 11 Anhang

### 11.1 Clusteranalyse

Ziel von Clusteranalysen ist es „[...] Objekte anhand ihrer Merkmalsausprägungen zu Gruppen zusammenzufassen, dass sich einerseits die Unterschiede zwischen den Objekten innerhalb der Cluster möglichst gering sind, aber andererseits die Unterschiede zwischen den Clustern möglichst groß sind“ (SCHENDERA 2004, S. 540). Dies ist gleichermaßen das Ziel der Modellbestandsbildung wie im SILVA Handbuch (BIBER ET AL. 2000) beschrieben. Es wurde dabei die Prozedur „FASTCLUS“ im Statistikprogramm SAS verwendet. Diese gehört zu den partitionierenden oder direkten Verfahren, d.h. die Anzahl der zu berechnenden Cluster wird vorab festgelegt. Das Verfahren rechnet nach dem Prinzip des „Nearest-Centroid-Sorting“ – was ausgehend von festgelegten Startwerten (=Centroids) alle nächsten Werte aufgrund ihrer Ähnlichkeit den entsprechenden Startwerten zuordnet. Es ist im Gegensatz zur Prozedur „CLUSTER“, welche den hierarchisch-agglomerativen Verfahren<sup>73</sup> zugeordnet wird, auch für die größeren Fallzahlen ( $N > 100$ ) der vorliegenden Analyse geeignet (vgl. ANONYMUS 1992; BORTZ 1999; SCHENDERA 2004).

Die Verprobung mit der Clusteranalyse hat andere Bestandestypen als nach der Zuordnung gemäß dem eingangs vorgestellten Schema, entstehen

---

<sup>73</sup> **Agglomerative Clusterverfahren** gehen zunächst von allen Beobachtungen aus und fassen diese sukzessiv zu einem neuen Cluster zusammen, bis sich letztendlich alle Objekte in einem Cluster befinden. Bei der Analyse wird im Nachgang festgelegt, bei welcher Stufe gestoppt werden soll, d.h. wie viele und wie unterschiedliche Cluster für die weitere Bearbeitung in Frage kommen.

**Divisive Clusterverfahren** starten umgekehrt bei einem Cluster und teilen dieses solange, bis jedes Cluster nur noch eine Beobachtung enthält.

Beide Verfahren werden als hierarchische Verfahren bezeichnet (SCHENDERA 2004, S. 540; BORTZ 1999, S. 555f).

lassen. Es werden neben einem Fichten- und Buchenbestand mit niedrigeren Baumartenanteilen der führenden Fichten und Buchen, aber dafür einem höheren Anteil an der Gesamtfläche, ein Laubholzmischbestand höherer Lebensdauer (ALH), ein Laubholzmischbestand niedriger Lebensdauer (ALN), ein Eichenmischbestand sowie ein sonstiger Bestand mit führenden Nadelbäumen - Nadelholzmischbestand gebildet.

Für eine weitere Verwendung mit anderen Daten, wie zum Beispiel den Betriebsinventurdaten, musste allerdings auch hier eine Zuordnung der Clusterbestände über Baumartenanteile möglich sein. Nach einigen Testläufen hat folgende Zuordnung in Tabelle 11 die Baumartenanteile der von der Clusteranalyse ausgeschiedenen Modellbestandstypen am besten getroffen:

Tabelle 11: Zuordnungskriterien nach Clusteranalyse

|                                     |              |
|-------------------------------------|--------------|
| <b>Buchenbestand</b>                | ≥ 50% Buche  |
| <b>Fichtenbestand</b>               | ≥ 50% Fichte |
| <b>Weichlaubholzmischbestand</b>    | ≥ 40% ALN    |
| <b>Edellaubholzmischbestand</b>     | ≥ 40% ALH    |
| <b>Eichenmischbestand</b>           | ≥ 40% Eiche  |
| <b>Sonst. Nadelholzmischbestand</b> | Rest         |

Eine Prüfung ergab auch eine Übereinstimmung von 95% (449 von 473 gleich zugeordnet) in der Zuordnung zwischen Clusteranalyse und nachgebildeter Clusterzuordnung über die Baumartenanteile.

Die Baumartenanteile der führenden Baumarten lagen zwischen 69% beim ALN-Mischbestand und 89% beim Fichtenbestand. Das Ergebnis erscheint zunächst bestechend, da es ermöglicht, die Behandlung einzelner Baumarten im Kollektiv eines Bestandes ihrer Art abzubilden.

Allerdings ergaben sich bei der weiteren Alterseinteilung Probleme, da einige der Mischbestände nicht mehr oder nur sehr schlecht mit Daten hinterlegt werden konnten.

Vergleicht man die Standardabweichung über alle Modellbestände (Tabelle 12), so zeigt sich, dass sich die nachgebildete Clusterzuordnung, wie sie zur Verwendung weiterer Datenquellen unabdingbar ist, und die normale Zuordnung kaum unterscheiden.

Tabelle 12: Standardabweichung der Baumartenanteile aller Inventurpunkte und der verschiedenen Zuordnungsverfahren

|                            | <b>Standardabweichung<br/>Baumartenanteile<sup>74</sup></b> |
|----------------------------|---|
| <b>Alle Inventurpunkte</b> | 18  |
| <b>Clusteranalyse</b>      | 0,2   |
| <b>Clusterzuordnung</b>    | 2,0   |
| <b>Normale Zuordnung</b>   | 1,9   |

Ein Beispiel für die Anwendung eines hierarchischen Verfahrens ist bei LAPACEK (2003) beschrieben. Als Kriterien unterschied LAPACEK (2003) die Hauptbaumarten Buche oder Fichte, den Anteil der Hauptbaumarten am Bestand und fünf Wuchsklassen, sowie zur weiteren Untergliederung Mischungsbaumarten, Flächendeckung Oberstand, Verjüngung und Flächendeckung der Verjüngung. Es ergeben sich hieraus 27 Modellbestandstypen für Fichte und 14 für Buche (LAPACEK 2003, S. 135ff). Zur tatsächlichen Beurteilung fehlt allerdings eine Angabe der Standardabweichung oder ein Vergleich mit einem anderen Zuordnungsschema.

## 11.2 Umsetzung der waldwachstumskundlichen Prognose

Für die technische Umsetzung der Waldwachstumsprognose mit der automatisierten Version des Programms Silva 2.2 musste der Bestand zur Erzeugung der abgestuften dfo-Datei<sup>75</sup>, in der die Eingriffsstärke festgelegt ist, jede Periode undurchforstet fortgeschrieben werden. Anschließend wurde

<sup>74</sup> Summe der gewichteten Standardabweichung über alle Baumarten (in Prozent) bei Ausscheidung von 8 Bestandestypen.

<sup>75</sup> dfo-Datei = enthält Informationen zur Durchforstungsstärke

der Bestand mit Durchforstung, aus den Einstellungen der dfo-Datei, bei gleichzeitiger Erzeugung einer neuen 6.inv-Datei<sup>76</sup> und Baumlisten prognostiziert. Diese Baumlisten dienen dann als Eingangsdateien in die Sortierung und Optimierungsrechnung wobei gleichzeitig in der 6.inv-Datei alle entnommenen Bäume entfernt werden. Diese Baumliste der 6.inv-Datei ist dann wiederum Basis für die Erzeugung der nächsten vier möglichen Varianten und bildet den Übergang zur nächsten Stufe der Fortschreibung. Die Erzeugung der neuen Varianten mit der jeweils richtigen Nomenklatur wurde über ein SAS Makro gesteuert.

Mit dieser Vorgehensweise wird sichergestellt, dass alle in einer Durchforstungsmaßnahme entnommenen Bäume tatsächlich für alle späteren Fortschreibungen nicht mehr zur Verfügung stehen und die Rückkopplung auf den Bestand und das Wachstum korrekt wiedergegeben ist.

Zusätzlich wurde zur genaueren Wiedergabe der örtlichen Wuchsverhältnisse eine Alters-Höhenparametrisierung vorgenommen und über die jeweils angegebenen Kurvenparameter der Chapman-Richardsfunktion in das Wachstumsmodell eingelesen. Die Kurvenparameter und deren Herleitung für die einzelnen Baumarten sind in Tabelle 13 sowie Abbildung 65 bis Abbildung 73 dargestellt.

---

<sup>76</sup> 6inv-Datei = Grunddatei zur automatisierten Fortschreibung in SILVA 2.2 mit allen Baumdaten, BHD, Höhe, Position etc.

Nähere Beschreibung siehe Anhang 11.2 und im SILVA-Handbuch (BIBER et al. 2000)

Tabelle 13: Chapman-Richards Funktion oberes Konfidenzintervall für die prognostizierten Baumarten

|   |  |
|---|--|
| <b>Anderes Laubholz<br/>höherer Lebensdauer<br/>(ALH)</b>   | $Höhe = 38 \cdot (1 - e^{(-0,025 \cdot Alter)})_{1,25}$    |
| <b>Anderes Laubholz<br/>niedriger Lebensdauer<br/>(ALN)</b> | $Höhe = 33 \cdot (1 - e^{(-0,03 \cdot Alter)})_{1,45}$     |
| <b>Buche</b>  | $Höhe = 40 \cdot (1 - e^{(-0,018 \cdot Alter)})_{1,4}$     |
| <b>Eiche</b>  | $Höhe = 41,5 \cdot (1 - e^{(-0,0185 \cdot Alter)})_{0,95}$ |
| <b>Douglasie</b>  | $Höhe = 47 \cdot (1 - e^{(-0,023 \cdot Alter)})_{1,2}$     |
| <b>Fichte</b>   | $Höhe = 45 \cdot (1 - e^{(-0,02 \cdot Alter)})_{1,4}$      |
| <b>Kiefer</b>   | $Höhe = 38,5 \cdot (1 - e^{(-0,035 \cdot Alter)})_{0,9}$   |
| <b>Lärche</b>   | $Höhe = 37 \cdot (1 - e^{(-0,038 \cdot Alter)})_{1,26}$    |
| <b>Tanne</b>  | $Höhe = 38 \cdot (1 - e^{(-0,026 \cdot Alter)})_{1,15}$    |



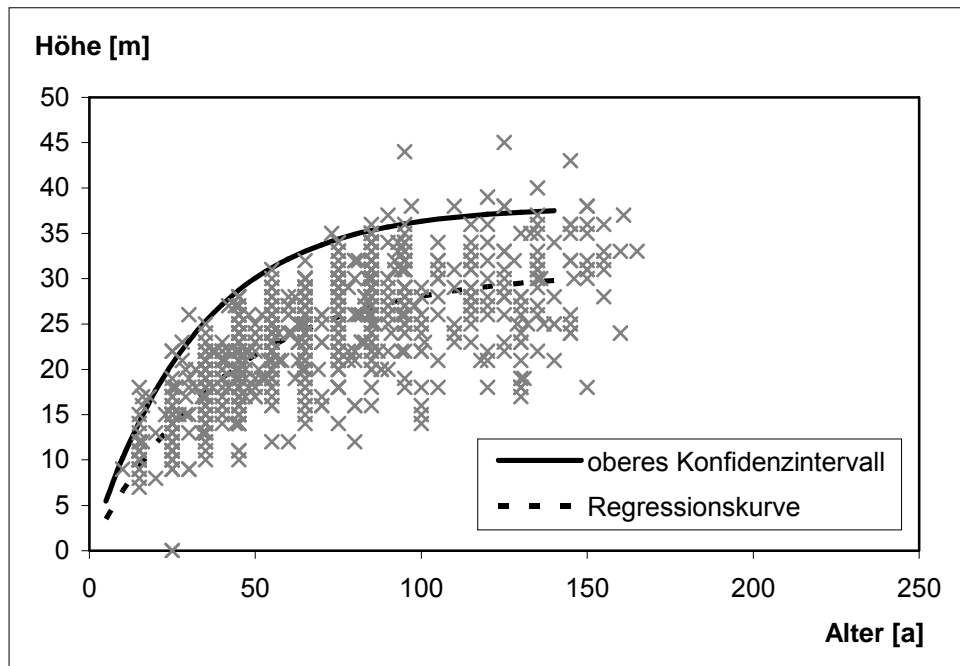


Abbildung 65: Höhenausgleichskurve für ‚Anderes Laubholz höherer Lebensdauer‘ - ALH; gestrichelt Regressionskurve, durchgehend zweifache Standardabweichung bzw. obere Grenze des Höhenwachstums für SILVA

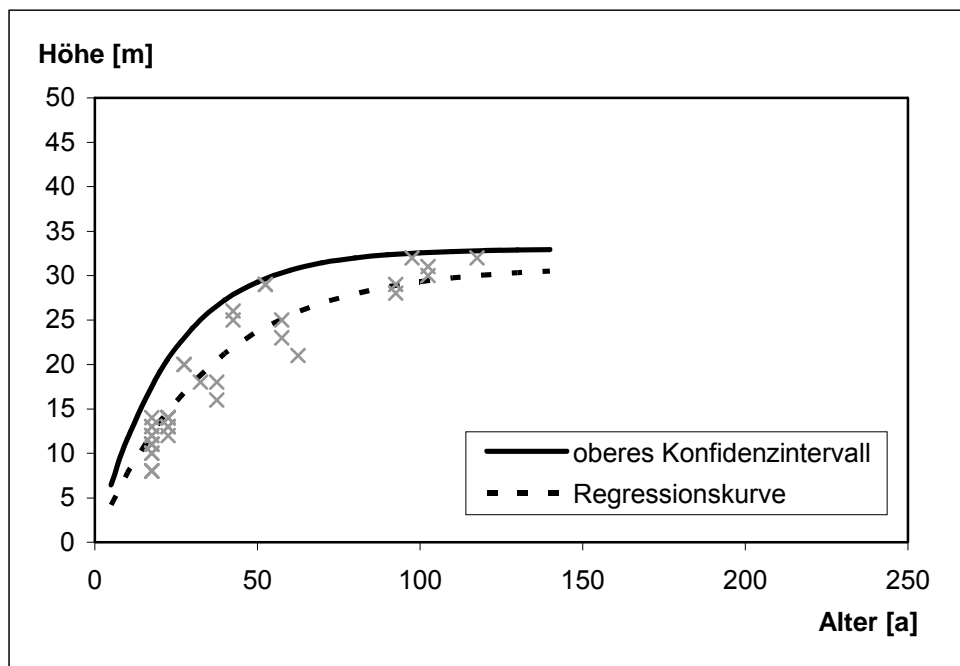


Abbildung 66: Höhenausgleichskurve für ‚Anderes Laubholz niedriger Lebensdauer‘ - ALN

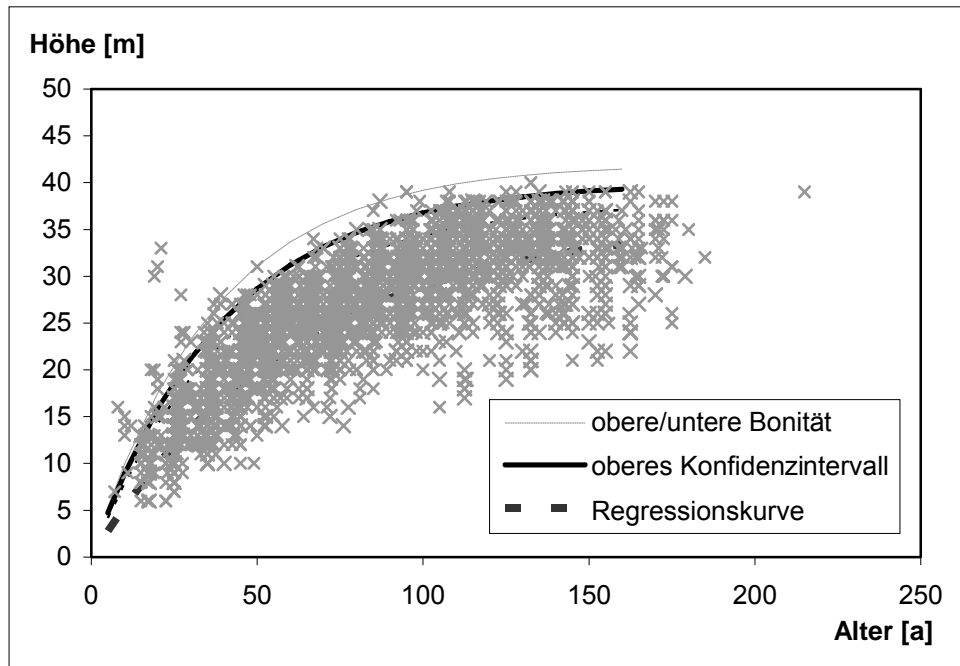


Abbildung 67: Höhenausgleichskurve für Buche mit Regressionskurve - gestrichelt und oberem Konfidenzintervall - durchgezogen mit den Grenzen der oberen und unteren Bonität - fein gestrichelt

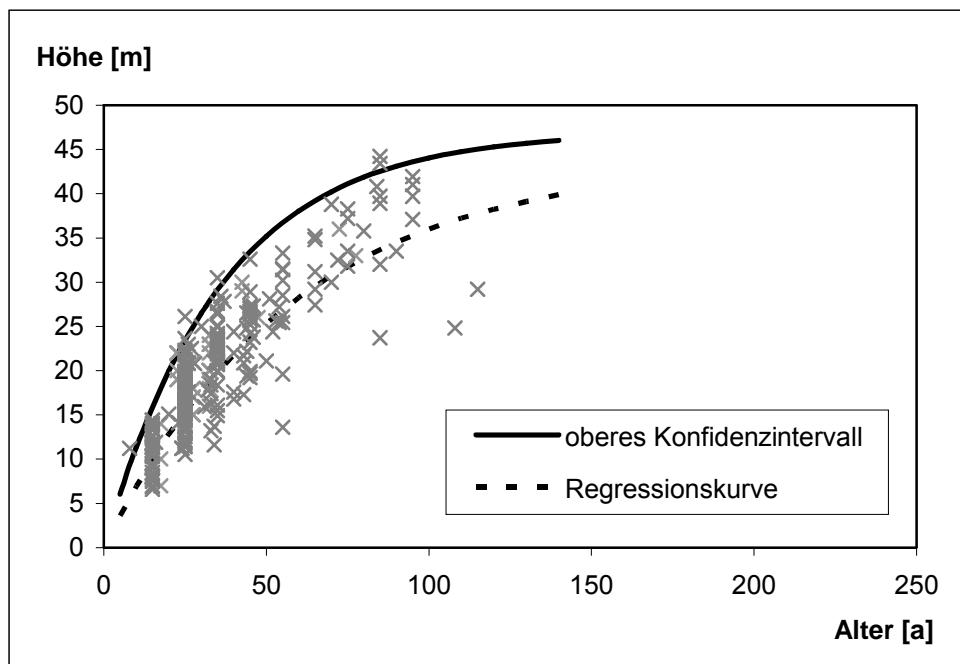


Abbildung 68: Höhenausgleichskurve für Douglasie

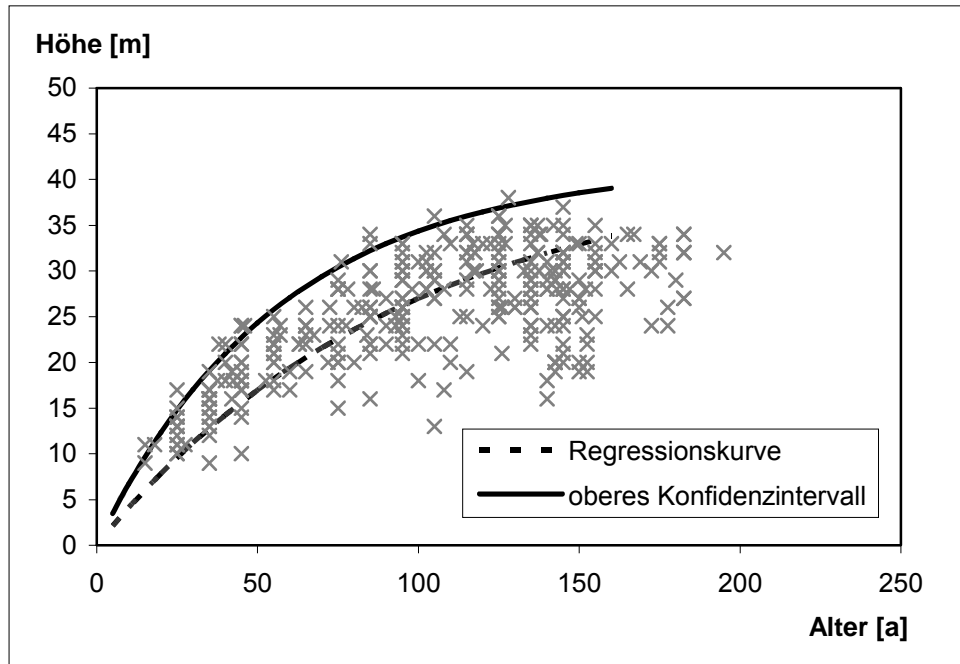


Abbildung 69: Höhenausgleichskurve für Eiche

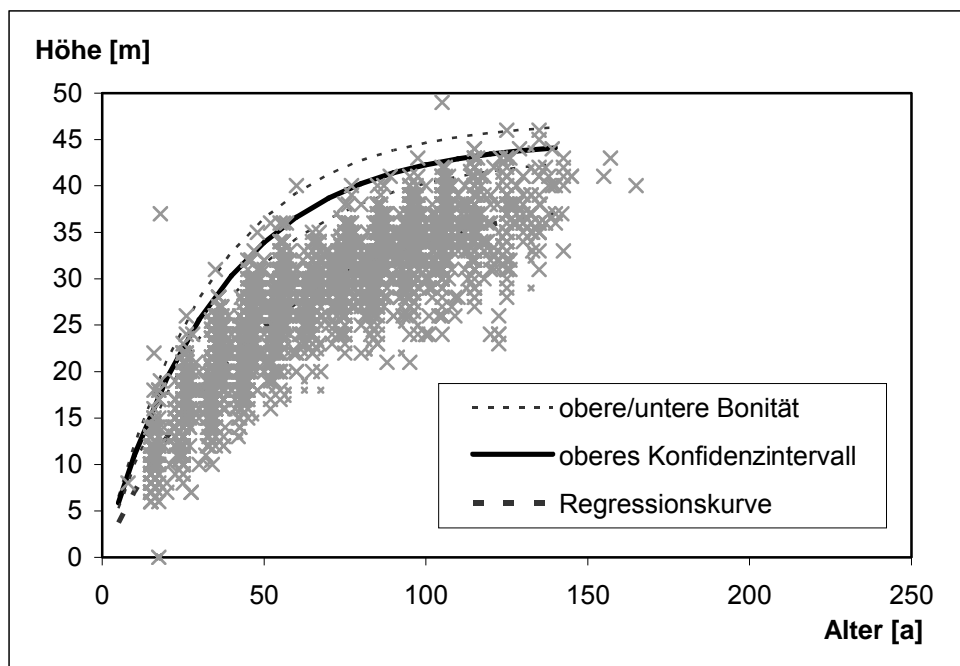


Abbildung 70: Höhenausgleichskurve für Fichte mit Regressionskurve - gestrichelt und oberem Konfidenzintervall - durchgezogen mit den Grenzen der oberen und unteren Bonität - fein gestrichelt

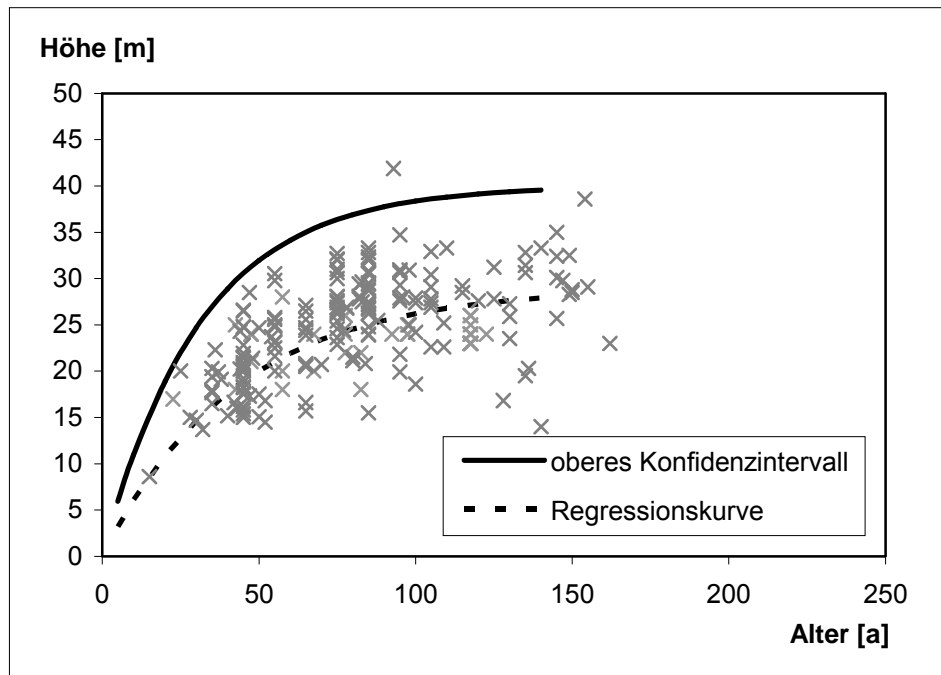


Abbildung 71: Höhenausgleichskurve für Kiefer

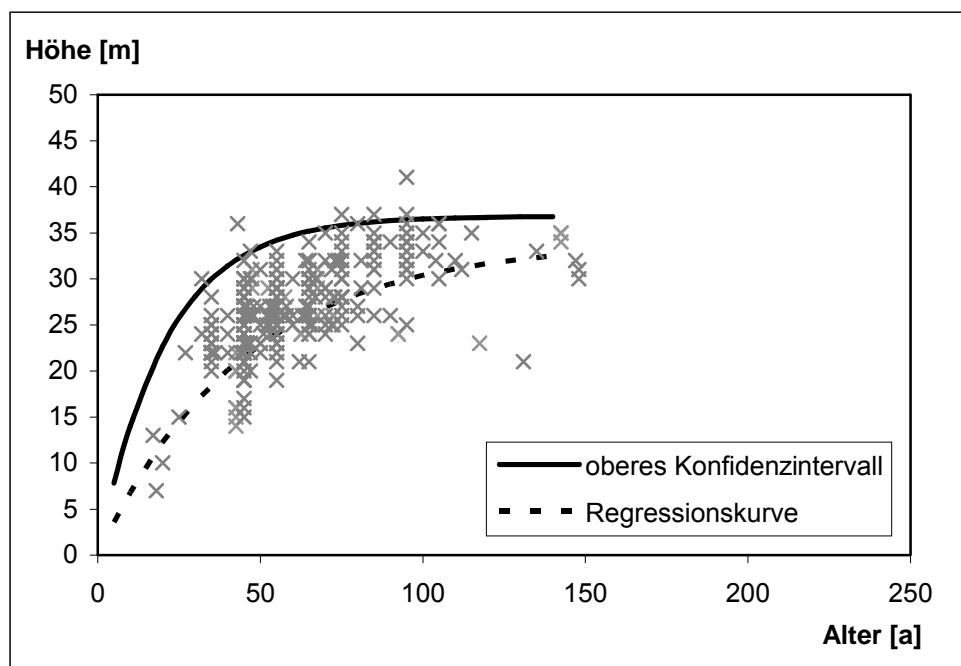


Abbildung 72: Höhenausgleichskurve für Lärche

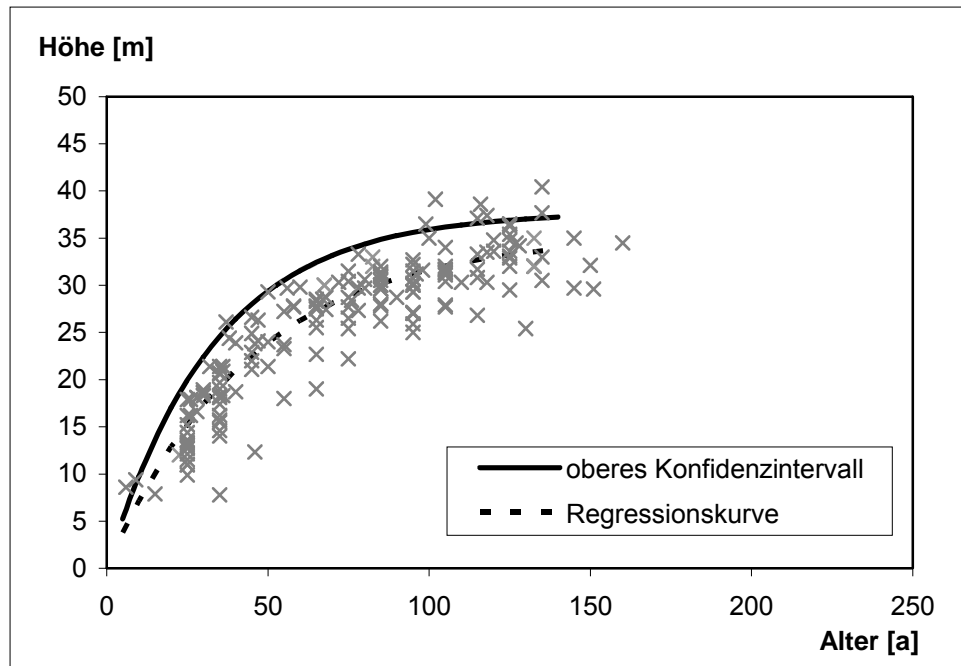


Abbildung 73: Höhenausgleichskurve für Tanne