



UFZ-Bericht

UFZ-Bericht • UFZ-Bericht • UFZ-Bericht • UFZ-Bericht

UFZ-UMWELTFORSCHUNGSZENTRUM LEIPZIG-HALLE GMBH

Nr. 20/1999

Dissertation

**Die Dynamik räumlicher
Strukturen in naturnahen
Buchenwäldern Mitteleuropas**

Christian Neuert

ISSN 0948-9452

**Die Dynamik räumlicher
Strukturen in
naturnahen Buchenwäldern
Mitteleuropas**

Archiv

DISSERTATION

zur
Erlangung des Doktorgrades
der Naturwissenschaften
(Dr. rer. nat.)

dem
Fachbereich Physik
der
Philipps-Universität Marburg

vorgelegt von
Christian Neuert
aus Gladbeck

Marburg/Lahn 1999

Umweltforschungszentrum
Leipzig-Halle GmbH
Zentralbibliothek
Permoserstraße 15
04318 Leipzig

19- 1172

Vom Fachbereich Physik der Philipps-Universität Marburg als Dissertation
am 2. Juni 1999 angenommen.

Erstgutachter: Prof. Dr. C. Wissel

Zweitgutachter: Prof. Dr. W. Bestgen

Tag der mündlichen Prüfung am 25. Juni 1999.

Inhalt

Zusammenfassung.....	1
I Einleitung.....	3
II Grundsätzliches über Urwälder und Charakteristik des Buchen- urwaldes in Mitteleuropa.....	7
1 Begriffsbestimmung und Bedeutung von Urwäldern	7
1.1 Definition des Begriffes „Urwald“	7
1.2 Bedeutung von Urwäldern für Wissenschaft und Waldbau	8
2 Erkenntnisse über Buchenurwälder (<i>Fagus sylvatica</i> L.)	8
2.1 Verbreitung, klimatische und standörtliche Voraussetzungen..	8
2.2 Aufbau, Struktur und Entwicklung.....	10
3 Zusammenfassung.....	15
III Warum ein Buchenwaldmodell?	17
1 Allgemeine Motivation	17
2 Fragestellungen	18
3 Zusammenfassung.....	20
IV Existierende Buchenwaldmodelle.....	21
1 Ertragstafeln für Buchen-Reinbestände.....	21
2 Einzelbaumorientierte Wachstumsmodelle	22
3 Kleinflächenmodelle	23
4 Gitterbasierte Modelle.....	24
5 Zusammenfassung.....	25
V Entwicklung des Buchenwaldmodells.....	27
1 Erste Ansätze	27

Inhalt

1.1 Buchenwaldmodell auf der Grundlage eines Tropenurwaldmodells (FORMIX2)	28
1.2 Auftretende Probleme	46
2 Dreidimensionales gitterbasiertes Modell	49
2.1 Übersicht über die Modellstruktur, grundlegende biologische Prozesse und Wechselwirkungen	50
2.2 Übersicht über den Simulationsablauf	52
2.3 Wachstum von Buchen in einer einzelnen Zelle ohne Nachbarschaftswechselwirkungen	55
2.3.1 Wachstum von Sämlingen	55
2.3.2 Wachstum von Jungbuchen	56
2.3.3 Wachstum von Buchen der unteren Kronenschicht	57
2.3.4 Wachstum von Buchen des Hauptkronendaches	58
2.3.5 Lückenschließung im Hauptkronendach	59
2.3.6 Nachwuchs	59
2.4 Nachbarschaftswechselwirkung „Licht“	60
2.5 Nachbarschaftswechselwirkung „Wind“	62
2.6 Mögliche Anfangsverteilungen	63
3 Zusammenfassung	65
VI Ergebnisse mit Diskussionen	67
1 Referenz-Fall	67
1.1 Typische Raumstrukturen	70
1.1.1 Erscheinungsbild	70
1.1.2 Größe der Mosaikflächen	71
1.1.3 Relative Häufigkeit verschiedenartiger Mosaikflächen	76
1.2 Typische Zeitstrukturen	76
1.2.1 Flächenbedeckung in den unterschiedlichen Schichten	77
1.2.2 Lichtverhältnisse im Gesamtwald und in Waldausschnitten	86
1.2.3 Entwicklungsstadien	93

1.3 Weitere typische Merkmale	98
1.3.1 Kronengrößen	98
1.3.2 Stammzahlen	100
1.3.3 Derbholzvolumen	105
1.3.4 Diverses	108
1.4 Zwischenresümee	110
2 Einfluß der Waldgröße und -form	110
2.1 Waldgröße	110
2.2 Waldform	113
3 Einfluß von Sturmereignissen	117
3.1 Sturmhäufigkeit	117
3.2 Sturmstärke	120
3.3 Bedeutung des Kippwahrscheinlichkeitserhöhungsmaßes E_{pKipp} für die Walddynamik	126
4 Einfluß der Hauptwindrichtung	127
5 Einfluß unterschiedlich starker Samenproduktion	129
6 Mortalität und intraspezifische Konkurrenz	130
7 Verschiedene Ausgangssituationen	141
8 Kurze Betrachtung spezieller Fragestellungen	147
8.1 Waldmanagement	147
8.2 Klimaeinflüsse	149
8.3 Umwelteinflüsse	151
9 Referenz-Parameterbereich und sensitive Parameter	152
10 Zusammenfassende Diskussion	154
 A Anhang	 165
1 Vollständiger Regelsatz des Modells	165
2 Kurze Übersicht über die im Modell verwendeten Parameter	176
 Literatur	 179

Inhalt

Danksagung.....	185
-----------------	-----

Zusammenfassung

1. Gemeinhin wird angenommen, daß die Entwicklung eines reinen Buchenurwaldes auf Kleinflächen in Form eines Entwicklungszyklus verläuft, bei dem sich Aufbau, Struktur und Entwicklungsprozesse in typischer Art und Weise mit der Zeit verändern und wiederholen. Ein entsprechender Entwicklungszyklus wurde bisher jedoch noch nicht vollständig dokumentiert. Es stellt sich die Frage, ob Buchenwaldentwicklung tatsächlich auf diese Art und Weise erfolgt. Weiterhin wird danach gefragt, ob und wenn, wie lange es dauern würde, bis sich aus einem ausreichend großen Buchen-Naturwaldreservat ein „Urwald von morgen“ entwickeln würde, und was die ausreichende Mindestgröße für ein solches Urwaldreservat ist. Eng verbunden damit ist die Frage nach der zu erwartenden Biodiversität in unterschiedlich großen Urwäldern und Waldteilbereichen.
2. Es wurde ein phänomenologisch orientiertes und konzeptionell einfaches Modell entworfen, das die funktionalen Zusammenhänge im Buchenwald mit Hilfe von Regeln auf der Grundlage empirischen Wissens beschreibt. Das Modell vereint verschiedenartige, bereits vorhandene Modellkonzepte (gitterbasiert, individuenbasiert, nicht-individuenbasiert) miteinander und stellt das erste konsequent regelbasierte Buchenwaldmodell dieser Art dar.
3. Die Modellergebnisse unterstützen die bisherigen zur natürlichen Buchenwaldentwicklung gemachten Annahmen. Für Kleinflächen konnten autogen ablaufende Entwicklungszyklen nachgewiesen werden. Weiter konnte gezeigt werden, daß sich erst aus mindestens 20 ha bis 30 ha großen Buchen-Naturwaldreservaten prinzipiell sekundäre Urwälder entwickeln können. Damit zu rechnen ist aber frühestens nach etwa 500 Jahren bis 1000 Jahren. Zu klein gewählte Schutzgebiete haben einen

Zusammenfassung

negativen Einfluß auf die Biodiversität im Wald, da einzelne Waldstrukturelemente dann eventuell nicht vorhanden sind.

4. Das Modell stellt ein wertvolles Hilfsmittel zur Untersuchung grundlegender ökosystemarer Fragen im Buchenwald dar. Es hilft aufzuzeigen, welche Prozesse tatsächlich als entscheidend für die raumzeitliche Dynamik dieses Ökosystems anzusehen sind und welche eher nebensächlich sind. Es liefert einen wichtigen Beitrag bezüglich eines Verständniskewinns über dieses Ökosystem. Das Modell läßt sich in Grenzen auch als Instrument zur Vorhersage zukünftig zu erwartender Entwicklungstendenzen im Buchenwald sowie als Instrument zur Simulation waldbaulicher Eingriffe einsetzen. Des weiteren bietet es über diese Arbeit hinaus auch die Möglichkeit, Bewirtschaftungsformen zu identifizieren, die eine möglichst naturnahe Waldstruktur erlauben.

I Einleitung

Nur wenige Ökosysteme sind uns so allgegenwärtig wie der Wald. Er prägt unsere Umwelt ganz entscheidend mit. Doch der uns umgebende Wald ist i.a. ein anderer als er ursprünglich war. Durch waldbauliche Maßnahmen vielfach in eine Form gebracht, die eine möglichst hohe wirtschaftliche Verwertbarkeit verspricht, hat er seine Ursprünglichkeit verloren. Die Entwicklung des bewirtschafteten Waldes wird durch planmäßige Eingriffe in vorgegebene, mehr oder weniger feste Bahnen gelenkt, damit sie möglichst „berechenbar“ und ertragreich gestaltet werden kann.

Mittlerweile hat jedoch ein deutlicher Wertewandel bei der Beurteilung des Waldes stattgefunden. So fungiert der Wald neben seiner rein wirtschaftlichen Funktion als Rohstofflieferant vermehrt auch als wichtiger Erholungsraum, der einen Kontrast zur urbanen Landschaft bildet. In dieser Funktion treten die forstwirtschaftlichen Interessen in den Hintergrund. Aspekte des Naturschutzes dagegen, welche u.a. Naturnähe in der Waldstruktur und -entwicklung sowie in der Artenzusammensetzung fordern, gewinnen an Bedeutung.

Als einziges reales Forschungsobjekt zur Klärung der natürlichen Beziehungen, Abläufe und Prozesse im Wald müssen die wenigen noch verbliebenen Urwaldreste angesehen werden. Entwicklung und Wachstum eines natürlichen Waldes geschehen nicht zufällig, sondern folgen inneren Gesetzmäßigkeiten. Wichtige Aufgabe ist es, diese Gesetzmäßigkeiten aufzudecken, da erst durch deren genaue Kenntnis eine Beurteilung der Naturnähe eines Wald- oder Schutzgebietes möglich wird. Die Aufdeckung dieser Gesetzmäßigkeit fällt jedoch nicht leicht, da insbesondere die langen Zeiten, in denen Waldentwicklung fortschreitet, entsprechende Untersuchungen erschweren bzw. unmöglich machen.

An dieser Stelle können theoretische Untersuchungen weiterhelfen. Mit Hilfe geeigneter EDV-gestützter Modelle ist es möglich, die Gültigkeit

Einleitung

angenommener Gesetzmäßigkeiten in natürlichen Wäldern zu bestätigen bzw. in Frage zu stellen und Antworten oder zumindest Hinweise auf die Beantwortung einiger sich daraus ergebender kontrovers diskutierter Fragen zu erhalten wie z.B. nach der als ausreichend anzusehenden Mindestgröße eines Naturwaldreservates oder der zeitlichen Veränderung der sich in einem solchen Reservat einstellenden räumlichen Waldstrukturen. Hinweise lassen sich auch erwarten in bezug auf die Beantwortung der Frage nach der anzunehmenden Zeitdauer, nach der frühestens damit gerechnet werden kann, daß sich aus einem nicht urwaldgemäßen Wald wie z.B. einem Wirtschaftswald ein sekundärer Urwald mit als typisch anzusehenden Urwaldeigenschaften entwickelt, sowie auch in bezug auf die Frage nach der zu erwartenden Biodiversität in unterschiedlich großen Urwäldern und Urwald-Teilbereichen. Entsprechende modelltheoretische Untersuchungen wurden in dieser Arbeit für die in Mitteleuropa weit verbreitete Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.) durchgeführt.

Die Arbeit ist in verschiedene Teilbereiche gegliedert. Nach einer kurzen Darstellung der grundlegenden Eigenschaften sowie der Charakteristik des mitteleuropäischen Buchenurwaldes (Kap.II), werden die Beweggründe für die Entwicklung eines Buchenwaldmodells dargestellt (Kap.III). Dabei werden neben der allgemeinen Motivation ganz gezielt wichtige, bisher noch unbeantwortete oder nur unzureichend geklärte Fragestellungen aufgeworfen, die mit Hilfe eines Modells beantwortet werden könnten. Nach einem kurzen Exkurs über bereits existierende Buchenwaldmodelle (Kap.IV) folgt, als ein erster Schwerpunkt der Arbeit, die Darstellung der Entwicklung des Buchenwaldmodells (Kap.V). Gezeigt wird der Versuch, ein bereits für einen tropischen Urwald entwickeltes Modell auf den mitteleuropäischen Buchenurwald zu übertragen sowie die sich bei diesem Versuch ergebenden Schwierigkeiten und die Gründe, die schließlich zum Verwerfen dieses Ansatzes führten. Anschließend erfolgt die vollständige Darstellung eines neuartigen, auf mehreren verschiedenartigen Modellkonzepten beruhenden

Modells, das die Basis für die weiteren Untersuchungen liefert. Kap.VI beschäftigt sich dann mit Ergebnissen, die dieses Modell liefert, wobei eine kritische Betrachtung und Diskussion dieser Ergebnisse zwecks besserer Übersichtlichkeit bereits an Ort und Stelle erfolgt. Dieses Kapitel stellt den zweiten großen Schwerpunkt der Arbeit dar. Trotz seines erheblichen Umfangs wird nicht der Anspruch einer vollständigen und alles umfassenden Analyse des Ökosystems „Buchenwald“ erhoben. Die dargestellten Ergebnisse besitzen vielmehr exemplarischen Charakter. Die Arbeit schließt mit einer kurzen zusammenfassenden Diskussion, in der noch einmal die wesentlichen Aspekte und Ergebnisse der Arbeit dargestellt, das Potential und die Möglichkeiten des Modells aufgezeigt, Verbesserungs- und Erweiterungsvorschläge gemacht sowie Grenzen und Kritikpunkte offengelegt werden. Ferner erfolgt in Kap.VII eine Einordnung des Modells bezüglich anderer Buchenwaldmodelle.

Einleitung

II Grundsätzliches über Urwälder und Charakteristik des Buchenurwaldes in Mitteleuropa

II.1 Begriffsbestimmung und Bedeutung von Urwäldern

II.1.1 Definition des Begriffes „Urwald“

Ganz allgemein wird unter einem „Urwald“ ein ursprünglicher Wald verstanden, der sich ohne direkte oder indirekte Einflüsse des Menschen auf natürliche Art und Weise entwickelte und immer noch entwickelt (SCHENK 1924). Neuere, detaillierte Definitionen berücksichtigen einige zusätzliche Aspekte. So versteht LEIBUNDGUT unter einem „Urwald“ einen Waldkomplex, dessen Vegetation, Standorte, Mischung der Baumarten und Aufbau nur durch natürliche Umwelt- und Standortfaktoren bestimmt wurden. Neben einer natürlichen Pflanzen- und Tierwelt gehört zusätzlich zu einem Urwald eine derart große Flächenausdehnung, daß sich in ihm die Einflüsse des Menschen und der durch den Menschen geprägten Umgebung verlieren (LEIBUNDGUT 1982, 1993). Eine noch etwas detailliertere Definition liefert KORPEL'. Danach versteht man unter einem „Urwald“ eine Waldgemeinschaft, deren Zusammensetzung, Aufbau, Wachstum und andere Lebensprozesse durch Eigenschaften der Umwelt, vor allem des Klimas, bedingt sind. Ein Urwald ist ein Wald mit dynamisch ausgewogenen Beziehungen zwischen Klima, Boden und Organismen, und vor solchen menschlichen Einflüssen verschont, die zu einer Änderung der Gesetzmäßigkeiten der Lebensprozesse und der Struktur der Bestandsgebilde führen würden (KORPEL' 1995).

II.1.2 Bedeutung von Urwäldern für Wissenschaft und Waldbau

Die Bedeutung der Urwälder für Wissenschaft und Waldbau kann nicht hoch genug eingeschätzt werden. Neben dem rein naturwissenschaftlichen Interesse an Urwäldern als grandiose „Naturlaboratorien“ mit speziell für jeden Urwald nach langer natürlicher Selektion hervorgebrachten Arten und Rassen ist auch insbesondere das forstliche Interesse an der Urwaldforschung groß. Gerade in Anbetracht einer zunehmend rationeller geprägten Bewirtschaftung unserer Wälder, ist es eine unabdingbare Voraussetzung, die natürlichen Lebensvorgänge im Wald zu kennen. So ist es auch das vorrangige Ziel der Urwaldforschung, die Kenntnisse darüber zu vergrößern. Um zu einer auch wirklich kontrollierbaren naturnahen Bewirtschaftung des Waldes zu gelangen, ist es notwendig, die natürliche Dynamik der im Wald vorkommenden Strukturen und Prozesse, genau zu beobachten, zu interpretieren und so gut wie nur möglich zu verstehen (HESSISCHES MINISTERIUM FÜR LANDESENTWICKLUNG, WOHNEN, LANDWIRTSCHAFT, FORSTEN UND NATURSCHUTZ 1991, KORPEL' 1995, LEIBUNDGUT 1978, 1982, 1993, MAYER 1978, MLINŠEK 1978). Die hier vorliegende theoretische Arbeit soll ihren Teil dazu beitragen.

II.2 Erkenntnisse über Buchenurwälder (*Fagus sylvatica* L.)

II.2.1 Verbreitung, klimatische und standörtliche Voraussetzungen

Die Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.) ist vor allem in West- und Mitteleuropa weit verbreitet, kommt aber auf der montanen Stufe bis auf das mittlere und südliche Iberien und südliche Griechenland auch in Süd- und Südosteuropa vor. In Osteuropa und in Skandinavien mit Ausnahme seines südlichen Teils fehlt sie fast ganz. Obwohl die Buche innerhalb ihres Verbreitungsgebietes weitgehend geschlossen vorkommt, gibt es neben einzelnen kleinräumigen

Vorposten außerhalb ihres geschlossenen Areals auch charakteristische Lücken in ihrem geschlossenen Verbreitungsgebiet. Zu nennen sind z.B. die kontinentalen Innenalpen, das ungarische Eichensteppengebiet oder auch die Küstenregion Nordwestdeutschlands. Das von der Buche bevorzugte Areal weist insgesamt einen mehr subatlantisch als subkontinental geprägten Charakter auf. Während die Buche im Norden ein Baum des tieferen Hügellandes ist, stellt sie sich im Süden als ausgeprägter Gebirgsbaum dar, der z.T. an der Bildung der Waldgrenze beteiligt ist, so daß sich ihr Höhenverbreitungsbereich insgesamt von 0 m bis auf über 2000 m (Ätna) über dem Meeresspiegel erstreckt (AAS u. RIEDMILLER 1987, DENGLER 1972, 1980, MAYER 1980, PETERS 1992).

Trotz des relativ großen Verbreitungsgebietes der Buche gibt es nur einige wenige Gebiete, in denen sich eine größere Zahl an Buchen-Urwaldresten erhalten konnte. Dazu zählen der Balkan, die dinarischen Alpen, die unerschlossenen Berglagen Südeuropas und die Karpaten (LEIBUNDGUT 1993).

Entsprechend der weitreichenden geographischen Verbreitung der Buche sind auch ihre klimatischen Ansprüche breit gefächert. So fehlt die Buche praktisch nur in Gebieten, die lange und strenge Winter und ausgedehnte Trockenzeiten im Sommer aufweisen. Niederschlagsmangel im Sommer in kontinental geprägten Gebieten und in südlichen Regionen ist für das dortige Fehlen der Buche verantwortlich. Tiefe Wintertemperaturen und Spätfröste begrenzen die nördliche und östliche Verbreitung der Buche. Die Buche bevorzugt ein submontan-montanes, ausreichend feuchtes Klima mit einer Niederschlagsmenge ab 600 mm pro Jahr. Ferner ist für ihr bestmögliches Gedeihen eine Vegetationszeit von mindestens fünf Monaten mit einer durchschnittlichen Tagestemperatur von 10 Grad Celsius oder mehr erforderlich. (BECKER 1981, DENGLER 1980, FRÖHLICH 1954, MAYER 1980, PETERS 1992).

Die Buche erreicht ihr Wuchsoptimum in der unteren Bergstufe auf tiefgründigen, gut durchlüfteten, nachhaltig frischen, nährstoff- und

basenreichen (pH 3,5 bis 7), gut drainierten Kalksteinbraunlehen und Braunerden. Unter entsprechenden Klimabedingungen gedeiht sie aber selbst noch auf kalkarmen und auch sauren Böden, nicht aber auf Gley- und Pseudogleyböden. Für ihr Gedeihen ist u.a. die Bodenfeuchtigkeit ein mitentscheidender Faktor. Stark ungünstig erweisen sich wechselfeuchte und staunasse Böden (AAS u. RIEDMILLER 1987, KNAPP u. JESCHKE 1991, LE TACON 1981, MAYER 1980, PETERS 1992).

II.2.2 Aufbau, Struktur und Entwicklung

Bevor der Aufbau, die Struktur und die natürliche Entwicklung speziell von Buchenwäldern beschrieben wird, sollen zunächst noch einige grundlegende Merkmale über Urwälder im allgemeinen angeführt werden.

Als ein grundlegendes Merkmal von Urwäldern wird die Dauerhaftigkeit der Baumartenmischung und auch anderer für den Aufbau und die Entwicklung des Urwaldes wichtig erscheinender Pflanzen über einen lang anhaltenden Zeitraum hinweg angesehen. Dies gilt in besonderem Maße für Urwälder, welche aus Reinbeständen gebildet werden. Dauerhaftigkeit bedeutet dabei dauerhafte Existenz der entscheidenden urwaldbildenden Arten, wobei kein Übergang in eine andere Phytozönose stattfindet. (JENÍK 1979, KORPEL' 1995, RUBNER 1968)

Ein weiteres Merkmal ist durch die charakteristische Altersklassenstruktur der Urwaldbäume gegeben. Sowohl Gleichaltrigkeit auf größeren Flächen als auch vollkommene Verschiedenaltrigkeit sind nur als Ausnahmen anzusehen. Ersteres kann durch Katastrophen wie z.B. Feuer oder Massen-Windwurf hervorgerufen werden (FRÖHLICH 1925), letzteres setzt dagegen eine stetig vorhandene Verjüngung, einen konstanten Konkurrenzdruck sowie das Ausbleiben extremer Witterungsverhältnisse voraus. (KORPEL' 1995)

Darüber hinaus ist das Vorhandensein von Bäumen, die erst nach Erreichen ihres physischen Höchstalters anfangen abzusterben, als ein

weiteres Kennzeichen von Urwäldern anzusehen (KORPEL' 1995, MAYER 1980).

Des weiteren prägt das stellenweise gehäuft auftretende stehende oder liegende Totholz den Charakter des Urwaldes mit (KORPEL' 1995, LEIBUNDGUT 1993).

Ebenso muß die Fähigkeit des Urwaldes, sich unablässig selbst zu regenerieren, als ein dem Urwald innewohnendes Merkmal angesehen werden. Voraussetzung dazu ist das Vorhandensein einer natürlichen Verjüngung an den Orten, die die Voraussetzungen zu diesem Prozeß liefern (KORPEL' 1995).

Nach dieser kurzen Darstellung der wichtigsten Merkmale des Urwaldes soll nun im folgenden speziell auf den Aufbau, die Struktur und die Entwicklung von Buchenwäldern eingegangen werden.

Nach heute gängiger Auffassung findet in natürlichen Wäldern — und auch ganz speziell in natürlichen Buchenwäldern — ein stetiger Wandel zwischen verschiedenen aufeinanderfolgenden Entwicklungszuständen statt, welche sich in ihrer Struktur und den intern in ihnen ablaufenden Prozessen stark voneinander unterscheiden (JENSSEN u. HOFMANN 1996, 1997, KNAPP u. JESCHKE 1991, KORPEL' 1992, 1995, LEIBUNDGUT 1982, 1993). Bei der Beschreibung dieser Entwicklung wird von den verschiedenen Autoren eine zwar ähnliche, teilweise aber unterschiedliche Terminologie verwendet. So sprechen einige Autoren von sogenannten Entwicklungsphasen (z.B. Optimalphase, Altersphase, Zerfallsphase, Verjüngungsphase, Plenterwaldphase, Jungwaldphase, Phase des gleichförmigen starken Stangenholzes und Baumholzes, u.ä.), welche ein natürlicher Buchenwald zyklisch durchläuft (KNAPP u. JESCHKE 1991, LEIBUNDGUT 1959, 1982, 1993). Andere wiederum sprechen von Entwicklungsstadien (z.B. Buschiges Jungwuchs- oder Dickungsstadium, Dichtes Jungbaum- oder Stangenholzstadium, Baum-Hallenstadium, Altbaum-Hallenstadium, Desintegrations- und Formierungsstadium, u.ä.) (JENSSEN u. HOFMANN 1996, 1997, KORPEL' 1992, 1995). Im folgenden soll ausschließlich die von

KORPEL' vorgeschlagene Terminologie Verwendung finden, weil in ihr sämtliche von anderen Autoren verwendeten Bezeichnungen für die unterschiedlichen Entwicklungszustände und strukturellen Besonderheiten des Urwalds eingegliedert werden können. Nach KORPEL' durchläuft ein natürlicher Buchenwald im Laufe eines Entwicklungszyklus drei in ihrem Charakter völlig unterschiedliche Stadien. Dieser Entwicklungszyklus ist unterteilt in ein sogenanntes Heranwachsstadium, ein Optimalstadium und ein Zerfallsstadium (Abb.1).

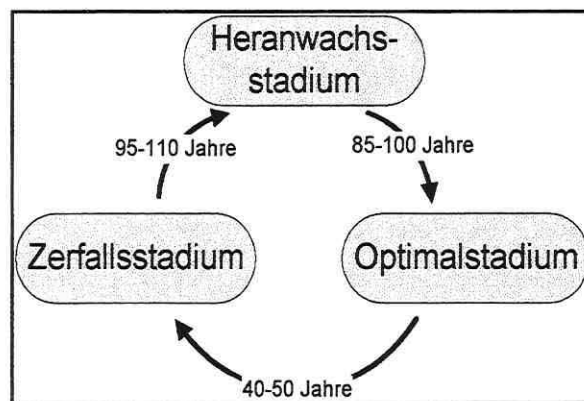


Abb.1 Natürlicher Entwicklungszyklus eines Buchenwaldes mit einer Zyklusdauer von etwa 220 bis 260 Jahren.

Das Stadium des Heranwachsens (Abb.2) wird zunehmend geprägt von Bäumen der jungen Generation, welche nun langsam ihre volle Wuchsfähigkeit entfalten. Vorhanden sind typischerweise aber auch ältere Bäume höherliegender Schichten. Der Holzvorrat nimmt in diesem Stadium Durchschnittswerte an. Kleinere Lücken, die durch das Absterben einzelner starker Bäume entstehen, werden schnell wieder geschlossen oder verjüngen sich. Dieser zunächst vertikal stark differenzierte Bestand verliert im Laufe der Zeit mehr und mehr seine höhenmäßige Schichtung und mündet schließlich in das Optimalstadium (Abb.3).



Abb.2 Heranwachsstadium des Buchenwaldes

Im Optimalstadium wird trotz der verringerten Anzahl von Bäumen pro Fläche aufgrund des Überwiegens der größten Stärkekassen die maximale Baummasse erreicht. Der Bestand ist kaum noch geschichtet und der Wald erhält schließlich das typische Aussehen eines Hallenwaldes mit dicht geschlossenem Kronendach, welches insbesondere von einer größeren Anzahl von Bäumen maximaler Höhe und maximaler Stammstärke hervorgerufen wird. Die Mortalität der das Kronendach bildenden Bäume ist in diesem reifsten Stadium des Buchenwaldes stark herabgesetzt und die intraspezifische Konkurrenz zwischen den riesigen Altbäumen sinkt auf ein Minimum ab, so daß sie keine nennenswerte Rolle mehr spielt. Buchenjungwuchs hat praktisch keine Chance, sich zu etablieren und fehlt deshalb nahezu ganz. Das Optimalstadium geht schließlich über in das Zerfallsstadium.

Im Zerfallsstadium (Abb.4) erfolgt schließlich der Zusammenbruch des Hallenwaldes, indem Bäume, die ihr physisches Höchstalter überschritten haben, absterben. So entstehen nach und nach immer größere Lücken im Kronendach, die nicht mehr rasch geschlossen werden können. Durch diese Lücken und die damit verbundenen veränderten Lichtverhältnisse in Bodennähe entstehen nun wieder Bedingungen, die Sämlingen und

Grundsätzliches über Urwälder und Charakteristik des Buchenurwaldes in Mitteleuropa

Jungwuchs die Möglichkeit geben, zur Erneuerung des Buchenwaldsystems beizutragen.



Abb.3 Beginnendes Optimalstadium des Buchenwaldes



Abb.4 Zerfallsstadium des Buchenwaldes

Die Dauer eines vollständig abgeschlossenen Entwicklungszyklus wird dabei bestimmt von der Lebensdauer der herrschenden Schlüsselorganismen, in diesem speziellen Fall also vom maximal erreichbaren Alter der Buche, (KORPEL' 1995, REMMERT 1988, 1989) und erstreckt sich von der Verjüngung einer Generation bis zum Lebensende der Individuen derselben Generation. Unter der Voraussetzung, daß die Gesamtfläche des Urwaldes ausreichend groß ist, kann davon ausgegangen werden, daß — von

Extremzuständen einmal abgesehen — der Flächenanteil der verschiedenen Entwicklungsstadien im Urwald an dessen Gesamtfläche nahezu konstant bleibt. Aus bekanntem Flächenanteil der Entwicklungsstadien und der Dauer des ganzen Entwicklungszyklus läßt sich nach KORPEL' dann die Dauer der einzelnen Entwicklungsstadien berechnen. Demnach beträgt nach seinen Untersuchungen der Flächenanteil des Heranwachstadiums an der Gesamtfläche eines größeren Buchenwaldes der Westkarpaten in etwa 35% - 38%, der des Optimalstadiums ungefähr 20% - 22% und der des Zerfallsstadiums circa 42% - 45%. Dieses entspricht bei einer angenommenen Zyklusdauer von 220 bis 260 Jahren in etwa einer Dauer von 85 - 100 Jahren für das Stadium des Heranwachsens, 40 - 50 Jahren für das Optimalstadium und 95 - 110 Jahren für das Zerfallsstadium (KORPEL' 1995).

II.3 Zusammenfassung

Urwälder sind, sowohl aus rein naturwissenschaftlicher Sicht als auch im Hinblick auf eine möglichst naturnahe Bewirtschaftung unserer Wälder, hervorragend geeignete Studienobjekte. In Europa ist die Rotbuche auch aufgrund ihrer breitgefächerten standörtlichen und klimatischen Ansprüche weit verbreitet und konnte sich in einigen abgelegenen Gebieten unbeeinflusst vom Menschen in Reinkultur entwickeln. Es wird angenommen, daß die Entwicklung eines Buchenwaldes kleinflächig betrachtet in Form eines Entwicklungszyklus verläuft, bei dem sich Aufbau, Struktur und Entwicklungsprozesse des Buchenwaldes in typischer Art und Weise mit der Zeit verändern und wiederholen.

Grundsätzliches über Urwälder und Charakteristik des Buchenurwaldes in Mitteleuropa

III Warum ein Buchenwaldmodell?

III.1 Allgemeine Motivation

Der Ausgangspunkt zur Entwicklung des dieser Arbeit zugrunde liegenden Buchenwald-Simulationsmodells war ursprünglich ein von WISSEL vorgestelltes Buchenwald-Modell, welches auf der Annahme eines von REMMERT beschriebenen Mosaikzyklus im Buchenwald beruhte (REMMERT 1985, 1987, 1991, WISSEL 1991, 1992). Mit Hilfe dieses Modells wurde für einen Buchenwald versucht, die Konsequenzen aufzuzeigen, die sich unmittelbar aus dem Mosaik-Zyklus-Konzept ergeben. Bei der Entwicklung des Modells wurde Wert darauf gelegt, es möglichst einfach zu gestalten, indem nur die für das Ökosystem Buchenwald wichtig erscheinenden Schlüsselfaktoren berücksichtigt wurden. Aufgrund der Einfachheit des Modellansatzes war es möglich, zu generellen Aussagen über das Buchenwald-Ökosystem zu gelangen und weiter sogar noch verallgemeinerungsfähige Aussagen zu ähnlich gelagerten Systemen oder Situationen zu erhalten.

Bei der Konstruktion und Entwicklung des Modells von WISSEL wurde als der entscheidende Schlüsselfaktor für die Formierung von ausgeprägten räumlichen Strukturen, die Beobachtung angesehen, daß Buchen empfindlich auf plötzlich erhöhte Sonneneinstrahlung auf ihren Stamm bzw. ihre Rinde reagieren können und aufgrund dessen innerhalb nur weniger Jahre absterben (NIKOLAI 1986, REMMERT 1985, 1987). Auch wenn dieser mögliche Effekt auf Buchen hier nicht geleugnet werden soll, so erscheint es nach Ansicht von Forstexperten (GRUNDMANN pers. Mitteilung) und auch Urwaldexperten doch eher unwahrscheinlich, daß dieser sog. „Rindenbrand“ als der entscheidende Faktor für die Entwicklung der räumlichen Strukturen im natürlichen Buchenwald angesehen werden darf.

Warum ein Buchenwaldmodell?

Eine weitere zentrale Annahme, die dem Modell von WISSEL zugrunde lag, war, daß es sich bei einem Buchenurwald um einen Urwald mit sehr einseitigem Altersaufbau handelt, d.h. die Buchen in einzelnen zusammenhängenden Bereichen sind alle fast gleich alt, und artgleicher Unterwuchs spielt nur eine vergleichsweise geringe Rolle (REMMERT 1985, 1989). Daß dieses großenteils nicht der Fall ist, wurde bereits im vorherigen Kapitel deutlich.

Somit beruht WISSELS Buchenwaldmodell, welches aus rein theoretischer Sicht weiterhin große Bedeutung besitzt, leider gerade in den zentralen Punkten auf teilweise nicht haltbaren oder zumindest fragwürdigen Annahmen. Es diene somit als Auslöser zur Wiederaufnahme des Projekts „Buchenwald-Simulationsmodell“ unter vollständig verändertem Modellaufbau und veränderten Modellannahmen.

III.2 Fragestellungen

Obwohl sich in der Literatur mittlerweile relativ viel Wissen über die Struktur und Dynamik der (auch nichttropischen) Urwälder angesammelt hat, gibt es zu diesem Bereich noch immer genügend Fragen, auf die keine klaren Antworten gegeben werden können oder die zumindest kontrovers diskutiert werden.

Z.B. ist eine in bezug auf die Errichtung von Naturwaldreservaten immer wiederkehrende Frage, die nach der ausreichenden Mindestgröße für ein solches Naturwaldreservat, d.h. nach der Größe eines Abschnitts, auf welchem die ungestörte Entwicklung der Waldgemeinschaft beobachtet werden kann. Vorschläge existieren beinahe genau so viele wie es Forscher gibt, die sich mit dieser Frage beschäftigen. So halten einige unter bestimmten Bedingungen eine Mindestgröße von bereits 2 ha schon für ausreichend (LEIBUNDGUT 1970). Oft werden aber auch 5 ha (NIEMANN 1968) oder 10 ha bis 20 ha

als ausreichendes Mindestmaß genannt (SEIBERT u. HAGEN 1974). Aber auch noch höhere Anforderungen an das ausreichende Flächenmaß sind keine Seltenheit. SCAMONI fordert etwa 20 ha bis 30 ha (SCAMONI 1953). KORPEL¹ schließt sich dieser höheren Forderung für Buchenwälder an und verlangt für einige Waldgemeinschaften wie den homogenen Fichtenwald sogar bis zu 60 ha (KORPEL¹ 1995). Aus dieser Uneinheitlichkeit der Aussagen in bezug auf die ausreichende Mindestgröße eines Naturwaldreservats ergibt sich eine der Fragestellungen, die mit Hilfe dieses Modells angegangen und nach Möglichkeit beantwortet werden soll: Welches kann als die ausreichende Mindestgröße für ein Buchen-Naturwaldreservat angesehen werden?

Eng verbunden hiermit muß auch der Frage nach den räumlichen Strukturen im Buchenurwald und ihrer zeitlichen Veränderung nachgegangen werden. Welche räumlichen Strukturen kann man in einem ausreichend großen Naturwaldreservat tatsächlich erwarten, und wie ist ihre zeitliche Veränderung? Lassen sich die in der Natur beobachteten Strukturen in Urwäldern anhand einer Simulation reproduzieren und läuft die in der Literatur vielfach beschriebene Dynamik des Urwaldes tatsächlich auf die dort beschriebene Art und Weise ab oder sind grundlegend andere Prozesse für die Ausbildung dieser Strukturen verantwortlich? Schließlich handelt es sich bei den angenommenen Entwicklungszyklen auch nur um verbale Modelle über Waldentwicklung und -dynamik, und es gibt natürlich niemanden, der einen dieser postulierten Entwicklungszyklen vollständig hätte beobachten können (VAN MIGROET 1996).

Ebenso von großem Interesse ist es, danach zu fragen, ob sich aus einem bereits vorhandenen Buchen-Wirtschaftswald oder auch anderen, nicht urwaldgemäßen Waldstrukturen, ein sekundärer Buchenurwald mit urwaldtypischen Eigenschaften entwickeln könnte und wenn ja, wie lange es dauern würde, bis ein solcher „Urwald von morgen“ entstünde.

Schließlich soll auch noch der Frage der Biodiversität im Urwald bezüglich unterschiedlicher räumlicher Skalen nachgegangen werden. Was läßt sich über

Warum ein Buchenwaldmodell?

die Biodiversität in unterschiedlich großen Urwäldern oder auch Urwald-Teilbereichen sagen?

Ein zur Beantwortung all dieser Fragen dienendes Buchenwaldmodell muß damit einerseits grundlagenforschungsorientiert, andererseits aber auch — zumindest in gewissen Grenzen — anwendungsbezogen sein.

III.3 Zusammenfassung

Den Anlaß zur Entwicklung eines neuen Buchenwald-Simulationsmodells lieferte ein bereits existierendes Buchenwald-Simulationsmodell, welches in seinen zentralen Annahmen auf falschen oder zumindest fragwürdigen Annahmen beruht und somit nur beschränkt aussagekräftig ist.

Mit Hilfe eines neuartigen, unter vollständig verändertem Modellaufbau und Modellannahmen entwickelten Buchenwald-Modells wird versucht, Antworten auf kontrovers diskutierte Fragen zu geben.

- Was kann als ausreichende Mindestgröße für ein Buchen-Naturwaldreservat angesehen werden?
- Welche räumlichen Strukturen kann man in einem ausreichend großen Naturwaldreservat tatsächlich erwarten, und wie ist ihre zeitliche Veränderung?
- Wie lange würde es in etwa dauern, bis sich aus einem Buchen-Wirtschaftswald oder anderen, nicht urwaldgemäßen Waldstrukturen ein sekundärer Buchenurwald mit für einen Urwald als typisch anzusehenden Eigenschaften entwickelt?
- Was läßt sich über die Biodiversität in unterschiedlich großen Urwäldern oder auch Urwald-Teilbereichen sagen?

IV Existierende Buchenwaldmodelle

Neben der fast unüberschaubaren Zahl an Modellen, die sich mit Urwäldern aus tropischen Gebieten beschäftigen, beschränkt sich die Zahl der Modelle, welche sich mit Urwäldern aus für uns heimischen Baumarten, speziell der Buche, beschäftigen, auf ein Minimum. Die wenigen mir bekannten überhaupt existierenden Buchenwald-Modelle sind hauptsächlich auf vom Menschen beeinflusste Wirtschaftswälder, nicht aber auf Urwälder, ausgerichtet. Entsprechend ertragskundlich sind diese Modelle orientiert.

Im folgenden wird ein kurzer Überblick über bereits existierende Buchenwaldmodelle gegeben. Auf einen umfassenden Überblick über Waldmodelle allgemein wird bewußt verzichtet.

IV.1 Ertragstafeln für Buchen-Reinbestände

Als klassisches Beispiel eines ertragskundlichen Modells seien hier zuallererst die Reinbestands-Ertragstafeln für das Wachstum gleichaltriger, einschichtiger Buchen-Reinbestände für speziell definierte Wuchsbedingungen, Standortverhältnisse und Behandlungsprogramme erwähnt (SCHOBER 1972, SCHWAPPACH 1893, WIEDEMANN 1930, 1932). Diese Modelle sind auf einer rein deskriptiven Auswertung von Versuchsflächendaten aufgebaut. Sie beruhen dabei auf Aussagen über beobachtete Entwicklungsvorgänge im Bestand auf Basis von Summen- und Mittelwerten. Ihre Aufgabe besteht darin, als Instrumente für Taxation und Planung zu dienen.

Die von GEHRHARDT entwickelten Ertragstafeln beruhen im Gegensatz zu den oben dargestellten so weit wie möglich auf theoretisch abgeleiteten Modellansätzen über die Wuchsgesetzmäßigkeiten der Buche. Dabei wurde

Existierende Buchenwaldmodelle

auf der Datengrundlage bereits vorhandener Ertragstafeln versucht, diese Wuchsgesetzmäßigkeiten mathematisch zu erfassen, zu formulieren und zur erweiterten Grundlage dieser Ertragstafeln zu machen (GEHRHARDT 1930).

IV.2 Einzelbaumorientierte Wachstumsmodelle

Mit dem steigenden und veränderten Informationsbedarf der Forstwirtschaft und -praxis fort von Bestandesmittelwerten hin zu Angaben über Einzelstammdimensionen zwecks Ausübung anderer, neuer Behandlungsprogramme für Rein- und Mischbestände, veränderte sich auch der Anspruch an die bisher verwendeten Modelle.

Durch den Einsatz EDV-gestützter Prognose- und Managementmodelle auf Basis von Einzelbäumen als kleinste Informationseinheit wurde versucht, diesem Anspruch gerecht zu werden. Diese einzelbaumorientierten Wachstumsmodelle stellen den Bestand als eine Vielzahl einzelner Bäume dar. Anhand eines Gleichungssystems zur Steuerung des Wuchsverhaltens der Einzelbäume wird der Bestand auf dem Rechner als dynamisches System nachgebildet. Dadurch wird versucht, sowohl zu Aussagen über das Wachstum einzelner Bäume im Bestand als auch zu Aussagen über die Bestandesentwicklung als Ganzes durch summarische Zusammenfassung und Betrachtung aller Bestandesmitglieder zu gelangen. Ein Modell dieser Art, welches auch für heterogen aufgebaute Buchen-Reinbestände — bei exakter Kenntnis von Stammpositionen und Baumdimensionen aller Bestandesmitglieder — angewendet werden kann und das Wuchsverhalten von Einzelbäumen in Abhängigkeit von ihrer jeweiligen individuellen räumlichen Umgebungsstruktur beschreibt, wurde von PRETZSCH vorgestellt (PRETZSCH 1992). Dieses Modell berücksichtigt keine physiologischen Prozesse, sondern fußt auf kausalen, biologisch interpretierbaren Zusammenhängen. Als reines Managementmodell ist es

daraufrin konzipiert, die Entwicklung einzelner Bäume eines ganz speziellen Bestandes auf kleiner Standortfläche über einen Zeitraum von 60 Jahren hinweg möglichst genau zu prognostizieren. Durch die Möglichkeit eine Beimischung von Fichte mitzuberücksichtigen, ergeben sich für das Modell erweiterte Anwendungsmöglichkeiten, die über die Prognose der Einzelbaumentwicklung eines speziellen Buchen-Reinbestandes hinaus auch die der Einzelbaumentwicklung eines speziellen Buchen-Fichten-Mischbestandes und Fichten-Reinbestandes abdecken. Bei ausreichender Datenlage besteht zusätzlich die theoretische Möglichkeit, die Populationsdynamik unter Störeinflüssen wie z.B. immissionsbedingten Zuwachseinbußen nachzubilden.

IV.3 Kleinflächenmodelle

Bei den Kleinflächen- oder Gap-Modellen ist die zugrunde liegende Informationseinheit weder der gesamte Bestand noch der Einzelbaum, sondern eine Baumgruppe auf einer Kleinfläche. Die Größe dieser Kleinfläche orientiert sich dabei an der Standfläche eines großen Altbaumes. Kleinflächenmodellen liegt die Auffassung zugrunde, daß sich ausgedehnte Waldsysteme mosaikartig aus einzelnen Teileinheiten zusammensetzen, in denen Waldentwicklung zyklisch verläuft. Aussagen über die Bestandesentwicklung ergeben sich durch die summarische Betrachtung der Entwicklung auf den einzelnen Kleinflächen. Kleinflächenmodelle haben vor allem hinsichtlich der Untersuchung von Konkurrenz- und Sukzessionserscheinungen in naturnahen Wäldern Bedeutung erlangt. Eines der bekanntesten Modelle dieser Art ist das EDV-gestützte Simulationsmodell JABOWA zur Analyse der Wuchsdynamik von Waldbeständen im Nordosten der USA (BOTKIN et al. 1972). Das Einzelbaumwachstum wird dabei als abhängig von vorhandenen Klima-, Boden- und Lichtverhältnissen sowie der

Existierende Buchenwaldmodelle

Wasserversorgung auf der Kleinfläche angesehen. Eine genaue Kenntnis der Stammposition einzelner Bäume wird nicht verlangt. Verjüngungs- und Absterbeprozesse werden im Modell stochastisch berücksichtigt. Durch eine Vielzahl von Simulationsläufen lassen sich Aussagen über das mittlere zu erwartende Wuchsverhalten eines Bestandes unter den vorgegebenen Standortverhältnissen treffen.

Eine Erweiterung und Anwendung des Modells auf größere Waldflächen ist durch die zusätzliche Berücksichtigung von Wechselwirkungsprozessen zwischen benachbarten Kleinflächen unter der Annahme einer Variation in den flächenspezifischen, das Wachstum bestimmenden Parametern möglich.

Die erfolgreiche Anwendung des Modells verlangt nach einer relativ großen Anzahl an waldwachstums- und bodenkundlichen sowie physiologischen und meteorologischen Daten eines vorgegebenen Standortes. Eine ausreichend große und notwendige Datenbasis für eine mögliche erfolgreiche Anpassung von JABOWA an den mitteleuropäischen Buchenwald existiert jedoch (noch) nicht.

Von WATT wurde allerdings bereits im ersten Viertel dieses Jahrhunderts ein einfaches, rein verbal formuliertes Kleinflächenmodell für den Buchenwald vorgestellt (WATT 1923, 1925).

IV.4 Gitterbasierte Modelle

Bei gitterbasierten Modellen wird der vorgegebene Raum in kleinere Abschnitte, sogenannte „Zellen“, unterteilt. Der Zustand einer jeden Gitterzelle wird dabei durch einem Satz von Größen beschrieben, der die Verhältnisse in der Zelle ausreichend genau wiedergibt. Dieser Zustand ändert sich von Zeitschritt zu Zeitschritt. Die Zustandsänderung hängt dabei von den Zuständen benachbarter Zellen und dem der Zelle selbst ab, die diese im

vorherigen Zeitschritt besaßen und wird beschrieben durch einen Satz an Regeln, d.h. Vorschriften.

Ein Buchenwald-Modell, welches sich der Gruppe der gitterbasierten Modelle zuordnen läßt, ist das von WISSEL entwickelte, welches bereits im vorherigen Kapitel erwähnt wurde (WISSEL 1991, 1992). Dieses Modell setzt auf lokaler, d.h. Zellebene eine automatisch ablaufende Dynamik voraus. Sein Modell basiert dabei auf einer angenommenen zyklischen Sukzession von Entwicklungsstadien für eine jede Zelle des Buchenwaldsystems. Durch Berücksichtigung von empirisch begründeten Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Zellen kann eine Änderung des Ablaufs des Zyklus in den einzelnen Zellen auftreten und eine Herausbildung charakteristischer räumlicher Muster beobachtet werden. Anhand dieses relativ einfachen Modells wurde versucht, die Reaktion des Systems Buchenurwald in bezug auf Störeinflüsse zu untersuchen und anhand der gefundenen Ergebnisse zu generellen Aussagen über dieses natürliche Ökosystem und ähnlich gelagerte Systeme zu gelangen. Das Modell von WISSEL verfolgt somit in der Hauptsache keine forstliche Interessen, sondern wurde vor allem deshalb entwickelt, um zu einem vertieften Verständnis (WISSEL 1989) über dieses und ähnlich gelagerte Ökosysteme zu gelangen.

IV.5 Zusammenfassung

Bisher entwickelte Buchenwald-Modelle sind vorwiegend ertragskundlich geprägt. Neben den in der Hauptsache forstlichen Interessen genügenden Ertragstafeln für Buchen-Reinbestände und einzelbaumorientierten Wachstumsmodellen sowie der Entwicklung einfacher, verbaler Kleinflächenmodelle existieren auch gitterbasierte Modelle, welche sich mit grundlegenden ökosystemaren Fragen in Buchenwald-Systemen auseinandersetzen.

Existierende Buchenwaldmodelle

V Entwicklung des Buchenwaldmodells

Dieses Kapitel soll einen Überblick darüber geben, wie es zur Entwicklung des neuen Buchenwald-Simulationsmodells kam, und welche die entscheidenden Prozesse waren, die schließlich zu dieser Entwicklung führten. Ferner soll das Modell in seinen wesentlichen Bestandteilen dargestellt und erläutert werden.

V.1 Erste Ansätze

Das dieser Arbeit zugrunde liegende Buchenwaldmodell ist natürlich nicht „einfach so vom Himmel gefallen“, sondern das Resultat einer insgesamt langwierigen Entwicklungszeit. Ursprung der Entwicklung eines neuen Buchenwald-Simulationsmodells war das bereits erwähnte, von WISSEL vorgestellte Buchenwaldmodell (WISSEL 1991, 1992)¹. Dieses aus theoretischer Sicht nach wie vor bedeutende Modell, besitzt leider nur stark eingeschränkte Aussagekraft, da es gerade in seinen zentralen Annahmen auf falschen oder zumindest fragwürdigen Annahmen beruht².

Die Suche nach einem neuen Modellansatz zur Beschreibung und Analyse der komplexen Zusammenhänge in einem natürlichen Buchenwald-Ökosystem gestaltete sich dann aber als recht schwierig. Um so mehr, da Wert darauf gelegt wurde, ein möglichst einfaches Modell zu entwickeln, in welchem nur die entscheidenden Schlüsselfaktoren zur Beantwortung der bezüglich dieses Systems gestellten Fragen³ berücksichtigt werden sollten. Denn Ziel sollte es sein, mit Hilfe dieses einfachen Modells zu einem vertieften Verständnis für die entscheidenden Mechanismen und funktionalen

¹ vgl. Kapitel III.1

² vgl. Kapitel III.1

³ vgl. Kapitel III.2

Entwicklung des Buchenwaldmodells

Zusammenhänge des Buchenwaldsystems zu gelangen. Leider konnte aber zu Beginn dieser Arbeit zunächst nicht geklärt werden, welche als die entscheidenden Schlüsselfaktoren anzusehen sind. Und so erschien es mehr als gewagt, aufbauend auf dieser unsicheren Basis ein stark idealisiertes und abstrahiertes Modell zu entwerfen, bei dem unklar war, was als essentiell für die entscheidenden Fragestellungen über das System „Buchenurwald“ angesehen werden konnte.

Nach reichlich Literaturstudium schien sich als eine mögliche Lösung dieses Problems die Übertragung eines speziell für den Tropenurwald entwickelten erfolgreichen Modells auf den Buchenurwald anzubieten. Dieser erste konkrete Ansatz und Versuch zur Entwicklung eines eigenen Buchenwaldmodells und die Gründe, die schließlich zum Verwerfen dieses zunächst vielversprechenden Ansatzes führten, sollen im folgenden genauer betrachtet werden.

Es sei bereits jetzt darauf hingewiesen, daß dieser im folgenden Kapitel V.1.1 dargestellte Modellansatz nur als theoretische Alternative zu dem später tatsächlich benutzten, in Kapitel V.2 ausführlich erläuterten, in Frage kommt. Aufgrund der in Kapitel V.1.2 dargestellten Probleme mußte der erste konkrete Ansatz wieder verworfen werden. Eine weitere Auswertung dieses Ansatzes bleibt somit aus. Dem Leser, der sich nicht weiter für die detaillierte Beschreibung dieses ersten Ansatzes interessiert, wird deshalb empfohlen, das Kapitel V.1.1 zu überspringen und mit der Lektüre in Kapitel V.1.2 fortzufahren.

V.1.1 Buchenwaldmodell auf der Grundlage eines Tropenurwaldmodells (FORMIX2)

Von BOSSEL und KRIEGER wurde zu Beginn dieses Jahrzehnts das mathematisch geprägte Urwaldmodell FORMIX2 entwickelt, welches das

Wachstum von Tropenbäumen auf Grundlage der Photosynthesereproduktion in unterschiedlichen Kronenschichten beschreibt (BOSSSEL u. KRIEGER 1991, 1994). Das ursprüngliche Ziel dieses Modells war, die Auswirkungen unterschiedlicher Nutzungsstrategien speziell für Dipterocarpaceen-Regenwälder auf Borneo zu beschreiben. Es konnte gezeigt werden, daß die dort praktizierten Nutzungszyklen zu kurz sind, um eine ausreichende Regeneration des Urwaldes zu gewährleisten. Als Folge ist eine langfristige Schädigung des Waldes zu erwarten. Mittlerweile ist auch eine erfolgreiche Anpassung von FORMIX2 an Moorwälder in Malaysia erfolgt (HUTH et al. 1994).

Das Simulationsmodell FORMIX2 unterscheidet fünf verschiedene Gruppen (Seedlings, Saplings, Poles, Main Canopy, Emergents), welche durch ihr eigenes Wuchsverhalten und ihre eigene typische Wuchshöhe gekennzeichnet sind. Dadurch ergibt sich eine vertikale Aufteilung des Raumes in fünf verschiedene Schichten. Die Gruppe mit der größten Wuchshöhe ist in allen Schichten, die mit der zweitgrößten Wuchshöhe in allen mit Ausnahme der obersten Schicht vertreten u.s.w.. Die Gruppe mit der kleinsten Wuchshöhe findet sich demnach nur in der untersten Schicht wieder. Für jede Gruppe läßt sich in jeder Schicht die gesamte Biomasse und Stammzahl berechnen. Durch Betrachtung der Biomasse pro Baum lassen sich anhand eines Modells über die Baumgeometrie der Kronendurchmesser, die Höhe und der Stammdurchmesser (in Brusthöhe) eines Baumes abschätzen. Dabei erhalten Bäume einer Gruppe innerhalb einer Schicht alle einen für sie als typisch anzusehenden mittleren Brusthöhen-Durchmesser.

Die Änderung der Biomasse und der Stammzahl einer Gruppe in einer Schicht wird durch verschiedene Prozesse beeinflusst:

Eine Zunahme der Biomasse erfolgt durch Photosynthese und das Hineinwachsen von Bäumen einer Gruppe aus tiefergelegenen Schichten in die betrachtete Schicht. Eine Abnahme der Biomasse ist bedingt durch Respirationsverluste, das Hineinwachsen von Bäumen einer Gruppe in die

Entwicklung des Buchenwaldmodells

nächsthöher gelegene Schicht und das natürliche Absterben und dem damit verbundenen Verlust an Biomasse. In der untersten Schicht wird durch ein Samenbank-Submodell das „Hineinwachsen“ in diese Schicht simuliert. In der obersten Schicht kann kein Biomassentransfer aus dieser Schicht heraus in eine andere (nicht vorhandene) höhere Schicht erfolgen.

Eine Änderung der Stammzahl einer Gruppe in einer Schicht ergibt sich — ähnlich wie bei den Biomassenbetrachtungen beschrieben — aus Übergängen von Bäumen aus einer Schicht in die nächste Schicht und durch eine entsprechend vorhandene Mortalitätsrate bei diesen Bäumen.

Zwischen den Gruppen findet Konkurrenz um Raum und Licht statt.

Konkurrenz um Raum wird dadurch berücksichtigt, daß eine erhöhte Mortalität einsetzt, wenn die Kronenprojektionsflächen aller Bäume in einer Schicht größer als die Bestandesfläche werden.

Bei der Konkurrenz um Licht wird davon ausgegangen, daß jede Schicht Licht proportional zu ihrer Blattfläche absorbiert, so daß tieferliegende Schichten entsprechend den Verhältnissen weniger Licht erhalten. Verminderter Lichteinfall führt dann zu verminderter Photosyntheseproduktion.

Neben der vertikalen Struktur des Modells existiert auch noch eine horizontale Struktur. Diese wird dadurch bestimmt, daß ein 1 ha großes Gebiet in 25 kleinere Untergebiete (Gaps) von 20 m mal 20 m unterteilt wird. Jedes dieser Teilgebiete entspricht von seiner Ausdehnung her in etwa der Kronenprojektionsfläche eines großen, ausgewachsenen Urwaldbaumes. Benachbarte Gaps beeinflussen sich gegenseitig. Zum einen können Bäume absterben, umfallen und dabei den Bestand in benachbarten Gaps schädigen, zum anderen kann ein unterschiedlich großer Anteil der Samen, die von den Bäumen verschiedener Gruppen produziert werden, in benachbarte Gaps fallen und die dortige Entwicklung mitprägen.

Bei dem Versuch, das Tropenwaldmodell FORMIX2 auf einen Buchenurwald zu übertragen, soll zunächst auf die essentiellen Unterschiede

zwischen FORMIX2 und einem möglichen Buchenurwaldmodell eingegangen werden.

Einer der Hauptunterschiede zwischen FORMIX2 und einem möglichen Buchenurwaldmodell ist der, daß bei FORMIX2 verschiedene Gruppen die Grundlage der vertikalen Struktur dieses Modells bilden. Bei einem praktisch nur aus Buchen bestehenden Urwald können hingegen Gruppen nicht als Strukturgeber fungieren. Da aber auch ein Buchenurwald eine starke vertikale Schichtung aufweist, erscheint es möglich und auch sinnvoll, hier entsprechend von einer einzelnen Gruppe auszugehen, die in allen Schichten eines Buchenwaldes vertreten ist.

Durch das Vorhandensein nur einer einzigen Gruppe entfällt eine der bei FORMIX2 angenommenen gegenseitigen Beeinflussungen benachbarter Gaps: Die Bilanzierung der Samen einer jeden Gruppe in einer Samenbank für jedes Gap ist nicht mehr notwendig, da nur noch eine Gruppe vorhanden ist und die Waldentwicklung in benachbarten Gaps immer auf die gleiche Art und Weise erfolgt: Auf Buche folgt Buche.

Andere möglicherweise entscheidende Wechselwirkungen zwischen benachbarten Gaps sind dagegen eventuell noch gar nicht berücksichtigt und müßten ergänzt werden.

Submodell für eine Schicht

Für ein auf FORMIX2 beruhendes Buchenwaldmodell erscheint es sinnvoll, ähnlich wie bei FORMIX2 zunächst ein Submodell für eine Schicht zu entwickeln und dieses dann auf andere Schichten zu übertragen, da in jeder Schicht zum größten Teil die gleichen Prozesse ablaufen wie z.B. Respiration, Photoproduktion, Beschattung tieferliegender Schichten, Stammzahl- und Biomassentransfer von tieferen zu höheren Schichten u.s.w..

Eine Möglichkeit der vertikalen Strukturierung des Buchenwaldes besteht durch die Unterteilung in vier ($i = 1, 2, 3, 4$) verschiedene Höhenschichten.

Entwicklung des Buchenwaldmodells

Dieses wären namentlich die Sämlingsschicht ($i = 1$), die Jungbuchenschicht ($i = 2$), das untere Kronendach ($i = 3$) und das Hauptkronendach ($i = 4$).

Ein Submodell für eine Schicht sähe dann wie folgt aus:

Durch zwei Zustandsvariablen wird der momentane Zustand einer Schicht des Buchenwaldes beschrieben. Dieses sind die Stammzahl pro ha, N_i , und die Biomasse pro ha, B_i .

Die zeitliche Änderung der Stammzahl pro ha, N_i , ist gegeben durch die Differenz von Stammzahlgewinn und Stammzahlverlust.

Stammzahlgewinne kommen zustande durch den Transfer aus der tiefer gelegenen Schicht in die betrachtete Schicht (n_{i-1}). Stammzahlverluste ergeben sich aus dem Transfer von Bäumen in die nächsthöhere Schicht (n_i) und dem Absterben von Bäumen (m_i).

$$\frac{dN_i}{dt} = n_{i-1} - n_i - m_i \quad (5.1),$$

$$[N_i] = \frac{\text{Baum}}{\text{ha}}$$

dabei: N_i = Stammzahl pro ha in der Schicht i
 n_{i-1} = Stammzahltransferrate aus der (tieferliegenden) Schicht $i-1$ in die Schicht i
 n_i = Stammzahltransferrate aus der Schicht i in die (nächsthöhere) Schicht $i+1$
 m_i = Baum-Mortalitätsrate in der Schicht i

Die zeitliche Änderung der Biomasse pro ha, B_i , ist gegeben durch die Differenz von Biomassengewinn und Biomassenverlust.

Biomassengewinne erfolgen aus dem Biomassentransport aus der darunter liegenden Schicht in die betrachtete Schicht (b_{i-1}) und Biomassenzuwachs aufgrund von Photosynthese der in der Schicht verbleibenden Bäume (phb_i). Biomassenverluste sind Resultat des Biomassentransports von dieser in die darüberliegende Schicht (b_i), des Absterbens von einzelnen Bäumen (mb_i) und der Respiration (r_i).

$$\frac{dB_i}{dt} = b_{i-1} + phb_i - b_i - mb_i - r_i \quad (5.2),$$

$$[B_i] = \frac{t_{ODM}}{ha}$$

- dabei: B_i = Biomasse in Tonnen organischer Trockenmasse (= t_{ODM}) pro ha in der Schicht i
 b_{i-1} = Biomassentransferrate aus der (tieferliegenden) Schicht $i-1$ in die i -te Schicht
 phb_i = Biomassenproduktionsrate durch Photosynthese in der i -ten Schicht
 b_i = Biomassentransferrate aus der Schicht i in die (nächsthöhere) Schicht $i+1$
 mb_i = Biomassen-Mortalitätsrate in der i -ten Schicht
 r_i = Biomassenverlustrate aufgrund von Respiration in der i -ten Schicht

Ähnliche geartete Modellstrukturen finden sich in jeder Schicht wieder. Folgende Unterschiede zwischen den einzelnen Schichten sind aber zu beachten:

- Aus der obersten Schicht, dem Hauptkronendach, heraus kann kein Stammzahl- oder Biomassentransfer in eine (nicht vorhandene) höher gelegene Schicht erfolgen.
- In die Sämlingsschicht kann kein Stammzahl- oder Biomassentransfer aus einer (nicht vorhandenen) tiefer gelegenen Schicht erfolgen.
- Nur Bäume der oberen beiden Schichten produzieren Samen. Diese Samen liefern die Grundlage für den Stammzahl- und Biomasseneintrag in die Sämlingsschicht.

Abb.5 gibt einen Überblick über die Beziehungen zwischen den Submodellen für die verschiedenen Schichten.

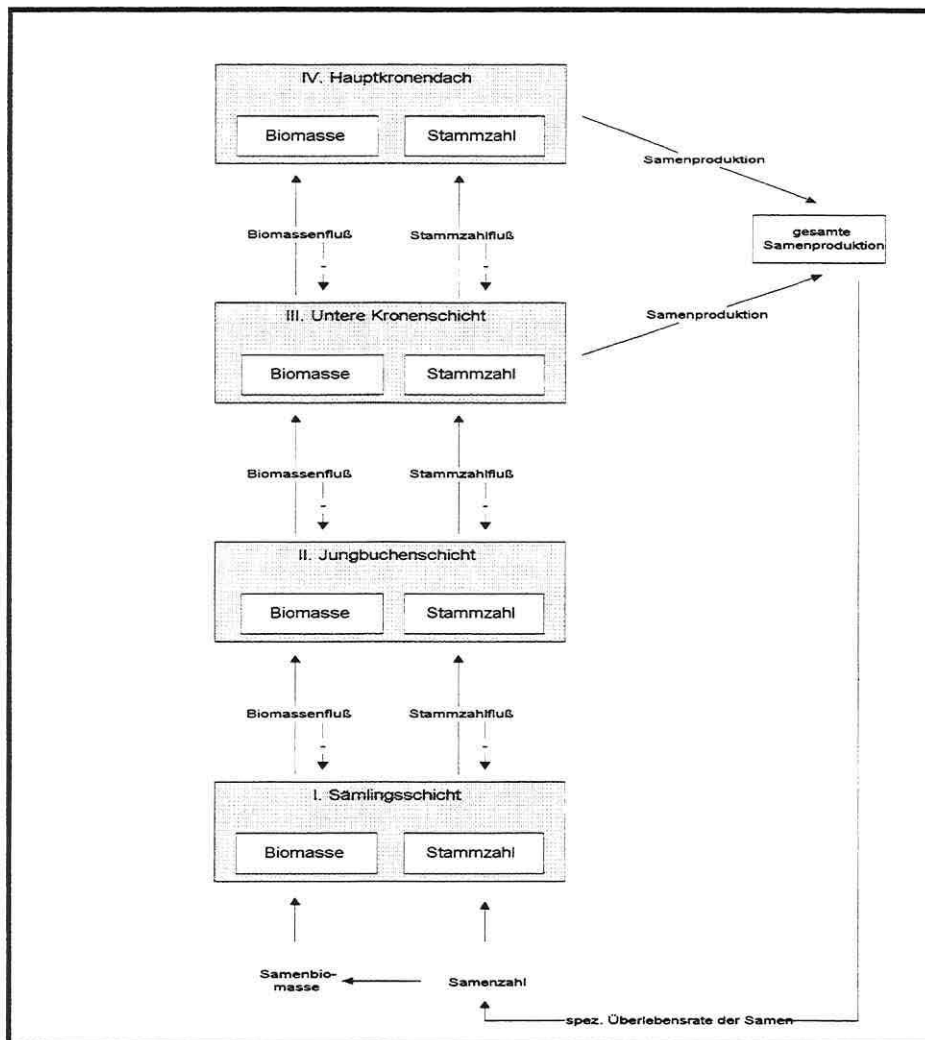


Abb.5 Schematische Darstellung der Beziehungen zwischen den Submodellen für die verschiedenen Schichten eines Buchenurwaldmodells auf Basis von FORMIX2

Die einzelnen Terme aus den Gleichungen (5.1) und (5.2) lassen sich wie folgt bestimmen:

Abschätzung der Größe der Baum-Mortalitätsrate m_i und der Biomassen-Mortalitätsrate mb_i

Die Baum-Mortalitätsraten m_i in den verschiedenen Schichten lassen sich bestimmen durch Multiplikation der lebenden Bäume pro ha in der Schicht i (N_i) mit der für diese Schicht entsprechenden durchschnittlichen spezifischen Mortalitätsrate (m_i^{spez}) für Buchen.

$$m_i = m_i^{spez} \cdot N_i \quad (5.3),$$

$$[m_i] = \frac{\text{Baum}}{\text{ha} \cdot \text{Jahr}}$$

dabei: m_i = Baum-Mortalitätsrate in der i -ten Schicht
 m_i^{spez} = spez. Mortalitätsrate in der i -ten Schicht
 N_i = Stammzahl pro ha in der Schicht i

Die spez. Mortalitätsrate m_i^{spez} ist dabei abhängig von der Baum-Dichte in der entsprechenden Schicht. Ihr normaler Wert beträgt mn_i^{spez} und ist bei Übervölkerung, d.h. bei Situationen, in denen die Summe der Kronenprojektionsflächen aller Bäume einer Schicht größer als die Bestandesfläche wird, auf den Wert me_i^{spez} erhöht. Also:

$$m_i^{spez} = mn_i^{spez} \quad (5.4), \text{ falls keine Übervölkerung vorhanden}$$

und

$$m_i^{spez} = me_i^{spez} \quad (5.5), \text{ bei Übervölkerung.}$$

$$[m_i^{spez}] = \frac{1}{\text{Jahr}}$$

dabei: m_i^{spez} = spez. Mortalitätsrate in der i -ten Schicht
 mn_i^{spez} = normale spez. Baum-Mortalitätsrate in der i -ten Schicht
 me_i^{spez} = erhöhte spez. Baum-Mortalitätsrate in der i -ten Schicht aufgrund Übervölkerung

Entwicklung des Buchenwaldmodells

Wenn infolge von m_i Bäume sterben, geht ein entsprechender Biomassen-Anteil verloren. Diese Biomassen-Mortalitätsrate mb_i kann aus m_i erhalten werden durch die Einführung einer spezifischen Biomasse (= Biomasse pro Baum) B_i^{spez} .

$$mb_i = B_i^{spez} \cdot m_i \quad (5.6),$$

$$[mb_i] = \frac{t_{ODM}}{\text{ha} \cdot \text{Jahr}}$$

dabei: mb_i = Biomassen-Mortalitätsrate in der Schicht i

m_i = Baum-Mortalitätsrate in der Schicht i

B_i^{spez} = spez. Biomasse in der Schicht i

Die Holz-Biomasse pro Baum B_i^{spez} ist dabei gegeben aus dem Quotienten aus der gesamten Holz-Biomasse pro ha B_i durch die momentan aktuelle Stammzahl pro ha N_i .

$$B_i^{spez} = \frac{B_i}{N_i} \quad (5.7),$$

$$[B_i^{spez}] = \frac{t_{ODM}}{\text{Baum}}$$

dabei: B_i^{spez} = spez. Biomasse in der Schicht i

Bestimmung der Respiration r_i und der Biomassen-Produktionsrate aufgrund Photosynthese phb_i

Aufgrund von Atmungsverlusten erfolgt in jeder Schicht i ein Verlust an Biomasse. Die entsprechende Biomassenverlustrate r_i läßt sich bestimmen aus

$$r_i = v_i \cdot B_i \quad (5.8),$$

$$[r_i] = \frac{t_{ODM}}{\text{ha} \cdot \text{Jahr}}$$

dabei: r_i = Aufnahmeverlangen zum Erhalt der hölzernen Baumteile der Schicht i
 v_i = biomassenproportionale Energie-Verlust-Rate der Schicht i

Die sich ständig erneuernden Baum-Komponenten (Blätter, dünne Wurzeln, Früchte) werden durch einen der Blattfläche proportionalen Energie-Verlust-Anteil berücksichtigt. Dieser beinhaltet auch eine der Blattfläche proportionale Respiration. Das Respirationsverlangen für Blätter, Früchte und feine Wurzeln und die Aufnahme, die für die Erneuerung dieses Biomassen-Bruchteils gebraucht wird, lassen sich aus der aktuellen Brutto-Photoproduktionsrate phb_i^{brutto} bestimmen.

$$phb_i = V_i \cdot phb_i^{brutto} \quad (5.9),$$

$$[phb_i] = \frac{t_{ODM}}{\text{ha} \cdot \text{Jahr}}$$

dabei: phb_i = Biomassenproduktionsrate durch Photosynthese in der i -ten Schicht

phb_i^{brutto} = aktuelle Brutto-Photoproduktionsrate der Schicht i

V_i = blattflächenproportionaler Energie-Verlust-Anteil (d.h. %ualer Anteil der Brutto-Photoproduktion, der durch blattflächenproportionale Energie-Verluste verloren geht)

Zur Bestimmung der aktuellen Brutto-Photoproduktionsrate phb_i^{brutto} in der Schicht i wird als Ausgangspunkt ein von KIRA verwendeter Modellansatz verwendet (KIRA 1978). Bei diesem Modellansatz wird von einer exponentiell abnehmenden Lichtverteilung innerhalb einer Baumkrone als Funktion der Blattfläche pro ha in dieser Schicht und der photosynthetisch wirksamen Strahlung I über dieser Schicht ausgegangen. Die Brutto-Photoproduktion p^{brutto} ist durch eine Sättigungskurve folgender Art gegeben:

$$p^{brutto} = \frac{m \cdot I}{1 + \frac{m}{p_{max}^{brutto}} \cdot I} \quad (5.10),$$

Entwicklung des Buchenwaldmodells

dabei: p^{brutto} = Brutto-Photoproduktion

I = Strahlung

m = Anfangs-Photoproduktions-Anstieg mit ansteigender Strahlung (s.u.)

p_{max}^{brutto} = max. Brutto-Photoproduktion bei Licht-Sättigung

p_{max}^{brutto} und m sind spezies-abhängige Parameter, die durch die sogenannte Licht-Reaktions-Kurve gegeben sind. Diese Kurve beschreibt die Abhängigkeit der Brutto-Photoproduktion p^{brutto} von der Strahlung I . Dabei ist für kleine Strahlungsmengen zunächst ein linearer Anstieg von p^{brutto} mit I zu beobachten. Für hohe Strahlungsenergien ist dagegen das Erreichen eines Sättigungswertes p_{max}^{brutto} erkennbar.

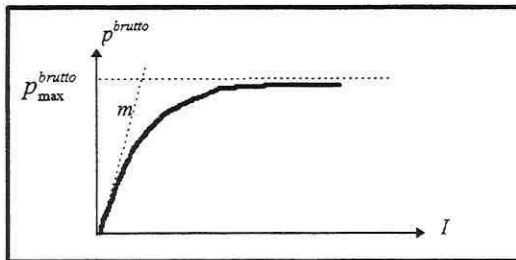


Abb.6 Schematischer Verlauf der Licht-Reaktionskurve bei Buche

Die Licht-Abschwächung innerhalb des Blätterdaches lässt sich durch das sog. Lambert-Beer-Gesetz beschreiben.

$$I = I_0 e^{-kf} \quad (5.11),$$

dabei: I = Strahlung in einer bestimmten Höhe

I_0 = Strahlung oberhalb des Blätterdaches

k = Licht-Extinktions-Koeffizient

f = Blattfläche pro ha zwischen Oberkante des Blätterdaches und betrachteter Höhen-Stufe

Einsetzen von I (5.11) in den Ausdruck für p^{brutto} (5.10) und anschließende Integration über alle Schichten ergibt die gesamte Brutto-Photoproduktion.

$$p_t^{brutto} = \frac{P_{max}^{brutto}}{k} \ln \frac{1 + \frac{m}{P_{max}^{brutto}} I_0}{1 + \frac{m}{P_{max}^{brutto}} I_0 e^{-k \cdot F_t}} \quad (5.12),$$

dabei: F_t = gesamte Blattfläche pro ha
 p_t^{brutto} = gesamte Brutto-Photoproduktion

Wenn man diesen Ansatz nun auf eine Schicht bezogen umsetzt (Index i) und vertikal über das Blätterdach integriert, d.h. von 0 bis zur max. Blattfläche pro ha einer gegebenen Schicht, erhält man die spezifische maximale Brutto-Photosynthese-Produktionsrate phb_i^{max} für die i -te Schicht.

$$phb_i^{max} = \frac{C \cdot P_{max}^{brutto}}{k_i} \ln \frac{1 + \frac{m}{P_{max}^{brutto}} I_i}{1 + \frac{m}{P_{max}^{brutto}} I_i e^{-k_i \cdot F_i}} \quad (5.13),$$

$$[phb_i^{max}] = \frac{t_{ODM}}{\text{ha} \cdot \text{Jahr}}$$

dabei: phb_i^{max} = spez. max. Brutto-Photo-Produktionsrate in der Schicht i
 I_i = Strahlung, welche die Schicht i erreicht
 P_{max}^{brutto} = max. Photoproduktionsrate
 m = Anfangs-Photoproduktions-Anstieg mit ansteigender Strahlung
 k_i = Licht-Extinktions-Koeffizient der Schicht i
 F_i = Blattfläche pro ha in der Schicht i
 C = Umrechnungsfaktor der Photoproduktion in Einheiten von Tonnen organischer Trockenmasse pro ha und Jahr

Die aktuelle jährliche Produktion ist das Integral über phb_i^{max} über eine wechselnde tages- und jahreszeitlich schwankende Strahlung I_i .

Der Normalfall wird der sein, daß eine Kronenschicht nur teilweise geschlossen ist. In diesem Fall muß phb_i^{max} mit der gesamten relativen Kronenprojektionsfläche P_i der Schicht i multipliziert werden, um die aktuelle Brutto-Photoproduktionsrate phb_i^{brutto} zu erhalten.

Entwicklung des Buchenwaldmodells

$$phb_i^{brutto} = P_i \cdot phb_i^{max} \quad (5.14),$$

$$[phb_i^{brutto}] = \frac{t_{ODM}}{ha \cdot Jahr}$$

dabei: phb_i^{brutto} = aktuelle Brutto-Photoproduktionrate
 P_i = ges. relative Kronenprojektionsfläche der Schicht i
 phb_i^{max} = spez. max. Brutto-Photosynthese-Produktionsrate

Die Sonnenstrahlung, die die Schicht i erreicht, hängt von der Blattfläche pro ha der darüberliegenden Schicht $i+1$, also von F_{i+1} , und der Strahlung I_{i+1} oberhalb der darüberliegenden Schicht $i+1$ ab.

$$I_i = I_{i+1} e^{-k_{i+1} \cdot F_{i+1}} \quad (5.15), \text{ falls } i < 4 \text{ und}$$

$$I_i = \hat{I}, \quad (5.16), \text{ falls } i = 4 \text{ (oberste Schicht)}$$

$$[I_i] = \frac{W}{m^2}$$

dabei: $\hat{I}$ = Strahlung oberhalb des Hauptkronendaches

Bestimmung der Stammzahltransferraten n_i und Biomassentransferraten b_i von einer Schicht in die nächsthöhere

Aufgrund von Photoproduktion beginnen die Bäume zu wachsen. Beim Erreichen eines bestimmten Schwellendurchmessers des Stammes in Brusthöhe für die entsprechende Schicht können sie in die nächsthöhere Schicht hineinwachsen. Transfer findet statt, wenn die Durchmesser-Differenz zwischen maximalem Brusthöhen-Durchmesser d_i^{max} für die Schicht i und aktuellem Brusthöhen-Durchmesser d_i von Bäumen dieser Schicht kleiner gleich Null wird. Also wenn

$$d_i^d = d_i^{\max} - d_i \leq 0 \quad (5.17)$$

$$[d_i^d] = m$$

dabei: d_i^d = Durchmesserdiffferenz zwischen max. Brusthöhen-Durchmesser und aktuellem Brusthöhen-Durchmesser eines Baumes in der i -ten Schicht

$d_i^{\max}$ = max. Durchmesser eines Baumes in Brusthöhe in der i -ten Schicht

d_i = aktueller Durchmesser eines Baumes in Brusthöhe in der i -ten Schicht

Damit gilt für die Transferrate aus einer Schicht in die nächsthöhere:

$$n_i = 0 \quad (5.18), \text{ falls } d_i^d > 0 \text{ und}$$

$$n_i = n_i^{\text{pot}} \quad (5.19), \text{ sonst}$$

$$[n_i] = \frac{\text{Baum}}{\text{ha} \cdot \text{Jahr}}$$

dabei: n_i = Baum-Transferrate aus der Schicht i in die nächsthöhere Schicht $i+1$

n_i^{pot} = Zahl der Bäume pro ha und Jahr, welche aus der Schicht i in die nächsthöhere Schicht $i+1$ hineinwachsen können (potentielle Baumtransferrate)

Die potentielle Baumtransferrate n_i^{pot} läßt sich aus dem Produkt der Stammzahl pro ha und der spezifischen Baum-Transferrate der entsprechenden Schichten bestimmen.

$$n_i^{\text{pot}} = N_i \cdot n_i^{\text{spez}} \quad (5.20),$$

$$[n_i^{\text{pot}}] = \frac{\text{Baum}}{\text{ha} \cdot \text{Jahr}}$$

dabei: n_i^{spez} = spez. Baum-Transferrate in der Schicht i

Ähnlich wie bei der Bestimmung der Biomassen-Verluste aufgrund von Mortalität kann die entsprechende Biomasse pro ha b_i , die in die nächste

Entwicklung des Buchenwaldmodells

Schicht transferiert wird, unter Verwendung der spezifischen Baum-Biomasse (= Biomasse pro Baum) b_i^{spez} bestimmt werden.

$$b_i = b_i^{spez} \cdot n_i \quad (5.21),$$

$$[b_i] = \frac{t_{ODM}}{\text{ha} \cdot \text{Jahr}}$$

dabei: b_i = Biomassentransferrate aus der Schicht i in die (nächsthöhere) Schicht $i+1$

b_i^{spez} = Biomasse pro Baum in der i -ten Schicht

Baum-Geometrie

Um Prozesse wie z.B. Abschattung oder Übervölkerung abschätzen zu können, sind Informationen darüber nötig, wie ein „typischer Baum“ in einer Schicht aussieht. Indem man Baumhöhe-Stammdurchmesser-Verhältnisse HD_i (Abb.6) und sog. Form-Faktoren FF_i (Abb.7) für jede Schicht, die als Tabellen-Funktionen in Abhängigkeit der Biomasse pro Baum gegeben sind, verwendet, kann man den aktuellen Baum-Durchmesser d_i wie folgt abschätzen:

$$d_i = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot b_i^{spez} \cdot SB_i}{\pi \cdot G \cdot FF_i \cdot HD_i}} \quad (5.22),$$

$$[d_i] = \text{m}$$

dabei: d_i = Durchmesser eines Baumes in Brusthöhe in der i -ten Schicht

b_i^{spez} = Holz-Biomasse pro Baum in der i -ten Schicht

SB_i = Stammholz-Bruchteil der ges. Holz-Biomasse der i -ten Schicht

G = spezifisches Holzgewicht

FF_i = Form-Faktor

HD_i = Höhe-Stammdurchmesser-Verhältnis eines Baumes in der i -ten Schicht

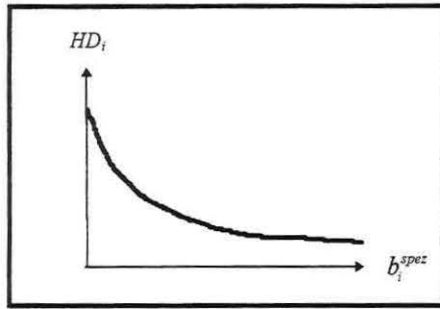


Abb.6 Schematische Darstellung der Abhängigkeit des Höhenstammdurchmesser-Verhältnisses HD_i von der spez. Biomasse b_i^{spez} .

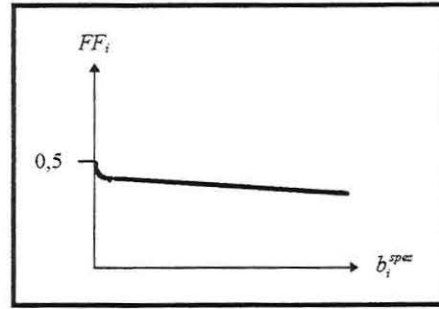


Abb.7 Schematische Darstellung der Abhängigkeit des Form-Faktors FF_i von der spez. Biomasse b_i^{spez} .

Über HD_i und d_i lässt sich die Baum-Höhe h_i abschätzen:

$$h_i = d_i \cdot HD_i \quad (5.23),$$

$$[h_i] = \text{m}$$

Für jede Schicht bestimmt ein konstantes Kronen-Stamm-Durchmesser-Verhältnis KD_i den Kronendurchmesser $KD_i \cdot d_i$. Damit ergibt sich für die Kronenprojektionsfläche eines Baumes in der i -ten Schicht:

$$KP_i = \frac{\pi}{4} (KD_i \cdot d_i)^2 \quad (5.24),$$

$$[KP_i] = \text{m}^2$$

dabei: KP_i = Kronenprojektionsfläche (in m^2) eines Baumes in der Schicht i

KD_i = Kronen-Stamm-Durchmesser-Verhältnis eines Baumes in der Schicht i

d_i = aktueller Durchmesser eines Baumes in Brusthöhe in der Schicht i

Die maximale relative Kronenprojektionsfläche $P_i^{\max}$ einer Kronenschicht ist gegeben durch:

Entwicklung des Buchenwaldmodells

$$P_i^{\max} = KP_i \cdot \frac{N_i}{10000} \quad (5.25),$$

$$\left[P_i^{\max} \right] = \frac{\text{ha}}{\text{ha}} = 1$$

dabei: $P_i^{\max}$ = max. rel. Kronenprojektionsfläche der Kronenschicht i

Für die gesamte relative Kronenprojektionsfläche gilt:

$$P_i = P_i^{\max} \quad (5.26), \text{ wenn Lücken in der Kronenschicht vorhanden sind}$$

und

$$P_i = 1 \quad (5.27), \text{ sonst}$$

$$\left[P_i \right] = 1$$

dabei: P_i = gesamte relative Kronenprojektionsfläche der Schicht i

Samenproduktion

Es wird davon ausgegangen, daß sich fruchtreife und damit Samen produzierende Bäume nur in den oberen beiden Schichten befinden. Die jährliche Samenproduktionsrate s_i pro ha ergibt sich aus dem Produkt der Stammzahl pro ha und der diesem Jahr entsprechenden Samenproduktion SP pro Baum und Jahr, welche einer geeigneten Tabellenfunktion entnommen werden muß:

$$s_i = N_i \cdot SP \quad (5.28), \text{ für } i = 3, 4$$

$$\left[s_i \right] = \frac{\text{Samen}}{\text{ha} \cdot \text{Jahr}}$$

dabei: s_i = Samenproduktionsrate pro ha in der Schicht i
 SP = Samenmenge pro Baum und Jahr

Die gesamte Samenproduktionsrate s berechnet sich demnach zu

$$s = s_3 + s_4 \quad (5.29),$$

$$[s] = \frac{\text{Samen}}{\text{ha} \cdot \text{Jahr}}$$

Unter der Annahme einer durchschnittlichen jährlichen Überlebenswahrscheinlichkeit der Samen sw läßt sich der endgültige Sameneintrag n_0 in die Sämlingsschicht bestimmen zu

$$n_0 = sw \cdot s \quad (5.30),$$

$$[n_0] = \frac{\text{Samen}}{\text{ha} \cdot \text{Jahr}}$$

dabei: sw = Überlebenswahrscheinlichkeit der Samen

Durch Berücksichtigung einer spezifischen Samenbiomasse B_s^{spez} lassen sich dann Rückschlüsse auf den Biomasseneintrag in der untersten Schicht geben.

$$b_0 = B_s^{spez} \cdot n_0 \quad (5.31),$$

$$[b_0] = \frac{t_{ODM}}{\text{ha} \cdot \text{Jahr}}$$

Anhand dieser auf den letzten Seiten dargestellten Überlegungen, sollte es im Prinzip möglich sein, das Tropenurwaldmodell FORMIX2 auf einen Buchenurwald erfolgreich zu übertragen. Warum dieses dennoch nicht geschah, wird kurz im folgenden Kapitel erläutert.

V.1.2 Auftretende Probleme

Im vorherigen Abschnitt wurden die theoretischen Grundlagen für eine mögliche Übertragung von FORMIX2 auf einen Buchenurwald dargestellt. Dennoch wurde kein konkreter Versuch der Übertragung unternommen. Dieses hatte vor allem folgende Gründe.

Ein Grund war, daß sich während des Versuchs der erwähnten Übertragung auch nach sehr reichlichem Literaturstudium herausstellte, daß zur Parametrisierung eines auf FORMIX2 beruhenden Buchenwaldmodells viele (zu viele!) der benötigten Parameter quantitativ oder sogar qualitativ bisher noch nicht empirisch erfaßt worden sind. Diese hätten deshalb nur sehr schwer bzw. nur äußerst ungenau abgeschätzt werden können. D.h.: Zur genaueren Parametrisierung wären zwangsläufig viele weitere kostspielige, zeitaufwendige und im Rahmen dieser Arbeit nicht durchführbare empirische Untersuchungen nötig gewesen. Tab.1 gibt einen Überblick darüber, welche der notwendigen Parameter nach meinem Wissen bisher empirisch erfaßt oder zumindest andeutungsweise beschrieben worden sind, und welche man hätte ohne ausreichende empirische Datengrundlage abschätzen müssen. Diese ungenügende Datenbasis hätte — selbst unter der Annahme einer gelungenen theoretischen Übertragung von FORMIX2 auf einen Buchenwald — zur Folge gehabt, daß es nicht möglich gewesen wäre, wissenschaftlich fundierte Aussagen und Antworten auf die bereits mehrfach erwähnten Fragestellungen bezüglich des Systems Buchenurwald zu geben.

Ein weiterer Grund, der zur Verwerfung dieses ersten Ansatzes führte, war der, daß sich mit der Zeit herausstellte, daß sich die Entwicklung von Urwaldbuchen bzw. Buchenurwäldern scheinbar auch auf eine andere Art und Weise adäquat beschreiben läßt, ohne auf diese große Zahl der oben erwähnten physiologischen und physikalischen Parameter angewiesen zu sein. Diese mehr phänomenologische Beschreibung fußt dabei auf biologisch begründbaren und damit empirisch untermauerten Regeln über die funktionalen Zusammenhänge im Buchenwaldsystem. Erste ungemein

wertvolle Hinweise darauf, daß eine solche Vorgehensweise bei der Modellierung eines Buchenwaldes überhaupt möglich und auch von Erfolg gekrönt sein könnte, entstanden in Gesprächen mit Herrn Dr. GRUNDMANN. Durch seine Schilderungen über die entscheidenden Zusammenhänge und (bei FORMIX2 überhaupt nicht berücksichtigten) Wechselwirkungen im Buchenwaldsystem, lieferte er den Ausgangspunkt für einige der grundlegenden Regeln, welche später durch entsprechende Beschreibungen und Daten aus der Fachliteratur zusätzlich belegt werden konnten.

Nun erst erschien es möglich, ein erfolgsversprechendes, neuartiges, nicht auf FORMIX2 fußendes, eigenes Modell zu entwickeln, welches optimal an diese Expertenkenntnisse angepaßt war. Dennoch war der „Umweg“ über FORMIX2 ein äußerst wichtiger Schritt hin zur Entwicklung dieses neuen Buchenwaldmodells.

Parameter	Wert	Einheit	Bedeutung	Quelle
$\hat{I}$	298	W/m ²	Strahlung oberhalb des Hauptkronendaches	MAYER 1980
k_1		1	Licht-Extinktions-Koeffizient in der Sämlingsschicht	
k_2		1	Licht-Extinktions-Koeffizient in der Jungbuchenschicht	
k_3		1	Licht-Extinktions-Koeffizient in der unteren Kronenschicht	
k_4		1	Licht-Extinktions-Koeffizient im Hauptkronendach	
F_1		ha/ha	Blattfläche pro ha in der Sämlingsschicht	
F_2		ha/ha	Blattfläche pro ha in der Jungbuchenschicht	
F_3	5,9	ha/ha	Blattfläche pro ha in der unteren Kronenschicht	ASSMANN 1961
F_4		ha/ha	Blattfläche pro ha im Hauptkronendach	
C	2,39	$\frac{1 \text{ mg CO}_2 \cdot (\text{dm}^2 \cdot \text{h})}{2,39 \cdot t_{\text{ODM}} (\text{ha} \cdot \text{Jahr})}$	Umrechnungsfaktor der Photoproduktion in Einheiten von Tonnen org. Trockenmasse pro ha und Jahr	BOSSEL 1991
$P_{\text{max}}^{\text{brutto}}$	Schattenblatt: 2,4 Lichtblatt: 6,2	$\frac{\text{mgCO}_2}{\text{dm}^2 \cdot \text{h}}$	max. Brutto-Photoproduktionsrate bei Licht-Sättigung	ASSMANN 1961

Tab.1 Parameter, die bei einem auf FORMIX2 beruhenden Buchenwaldmodell Verwendung finden würden.

Entwicklung des Buchenwaldmodells

Para- meter	Wert	Einheit	Bedeutung	Quelle
m	1,4	$\frac{\text{mgCO}_2 \cdot \text{m}^2}{\text{dm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{W}}$	Anfangs-Photoproduktionsanstieg mit ansteigender Strahlung	ASSMANN 1961
G	0,6	$\text{t}_{\text{ODM}}/\text{m}^3$	spez. Gewicht von Buchen-Holz	BOSSHARD 1984
SB_1		1	Stammholz-Bruchteil in der Sämlingsschicht	
SB_2		1	Stammholz-Bruchteil in der Jungbuchenschicht	
SB_3		1	Stammholz-Bruchteil in der unteren Kronenschicht	
SB_4		1	Stammholz-Bruchteil im Hauptkronendach	
KD_1		m/m	Kronen-Stamm-Durchmesser-Verhältnis in der Sämlingsschicht	
KD_2	30	m/m	Kronen-Stamm-Durchmesser-Verhältnis in der Jungbuchenschicht	ASSMANN 1961
KD_3	20	m/m	Kronen-Stamm-Durchmesser-Verhältnis in der unteren Kronenschicht	ASSMANN 1961
KD_4	17	m/m	Kronen-Stamm-Durchmesser-Verhältnis im Hauptkronendach	ASSMANN 1961
V_1	0,25	1	blattflächenproportionaler Energie-Verlust-Anteil in der Sämlingsschicht	ASSMANN 1961
V_2	0,20	1	blattflächenproportionaler Energie-Verlust-Anteil in der Jungbuchenschicht	ASSMANN 1961
V_3	0,23	1	blattflächenproportionaler Energie-Verlust-Anteil in der unteren Kronenschicht	ASSMANN 1961
V_4		1	blattflächenproportionaler Energie-Verlust-Anteil im Hauptkronendach	
v_1	0,03	1/Jahr	biomassenproportionale Energie-Verlust-Rate in der Sämlingsschicht	ASSMANN 1961
v_2	0,05	1/Jahr	biomassenproportionale Energie-Verlust-Rate in der Jungbuchenschicht	ASSMANN 1961
v_3	0,06	1/Jahr	biomassenproportionale Energie-Verlust-Rate in der unteren Kronenschicht	ASSMANN 1961
v_4		1/Jahr	biomassenproportionale Energie-Verlust-Rate im Hauptkronendach	
mn_1		1/Jahr	normale spez. Mortalitätsrate in der Sämlingsschicht	
mn_2		1/Jahr	normale spez. Mortalitätsrate in der Jungbuchenschicht	
mn_3		1/Jahr	normale spez. Mortalitätsrate in der unteren Kronenschicht	
mn_4		1/Jahr	normale spez. Mortalitätsrate im Hauptkronendach	
me_1	0,5	1/Jahr	spez. Mortalitätsrate aufgrund Übervölkerung in der Sämlingsschicht	ASSMANN 1961
me_2	0,2	1/Jahr	spez. Mortalitätsrate aufgrund Übervölkerung in der Jungbuchenschicht	ASSMANN 1961
me_3	0,02	1/Jahr	spez. Mortalitätsrate aufgrund Übervölkerung in der unteren Kronenschicht	ASSMANN 1961
me_4		1/Jahr	spez. Mortalitätsrate aufgrund Übervölkerung im Hauptkronendach	

Tab.1 (Fortsetzung 1) Parameter, die bei einem auf FORMIX2 beruhenden Buchenwaldmodell Verwendung finden würden.

Parameter	Wert	Einheit	Bedeutung	Quelle
η_1^{pez}		1/Jahr	spez. Baum-Transferrate aus der Sämlings- in die Jungbuchenschicht	
η_2^{pez}		1/Jahr	spez. Baum-Transferrate aus der Jungbuchen- in die untere Kronenschicht	
η_3^{pez}		1/Jahr	spez. Baum-Transferrate aus der unteren Kronenschicht in das Hauptkronendach	
d_1^{max}	0,01	m	Schwellendurchmesser Jungbuchenschicht	LEIBUNDGUT 1993
d_2^{max}	0,2	m	Schwellendurchmesser untere Kronenschicht	LEIBUNDGUT 1993
d_3^{max}	0,3	m	Schwellendurchmesser Hauptkronendach	LEIBUNDGUT 1993
SP		$\frac{\text{Samen}}{\text{Baum} \cdot \text{Jahr}}$	Samenproduktionsrate pro Baum	
SW		1	Samen-Überlebenswahrscheinlichkeit	
B_s^{pez}		$\frac{t_{ODM}}{\text{Samen}}$	spez. Samenbiomasse	

Tab.1 (Fortsetzung 2) Parameter, die bei einem auf FORMIX2 beruhenden Buchenwaldmodell Verwendung finden würden.

V.2 Dreidimensionales gitterbasiertes Modell

Dem neuen, mehr phänomenologischen Buchenwaldmodell liegt eine Vielzahl empirischer Beobachtungen über elementare funktionale Zusammenhänge im Buchenwaldsystem zugrunde. Diese Beobachtungen werden im Modell in Form von Regeln berücksichtigt, die jeweils die direkten Auswirkungen bzw. Resultate auf bestimmte Prozesse oder Ereignisse beschreiben. Die Regeln sind von der Form „Wenn $\Rightarrow$ Dann“: *Wenn* dieses oder jenes eintritt, *dann* passiert folgendes. Sie basieren dabei so weit wie möglich auf Expertenwissen, welches sich nicht ohne weiteres direkt durch mathematische Formeln erfassen läßt. Oftmals erfordert die Umsetzung plausibel klingender genereller Regeln noch weitere zusätzliche Annahmen. Erst das Verifizieren und Modifizieren dieser Regeln bzw. Annahmen bei der Auswertung erlaubt schließlich deren Beurteilung. Die Summe aller Regeln schließlich ergibt eine vereinfachte und modellhafte Beschreibung des Ökosystems „Buchenwald“. Dabei wird nicht der Anspruch erhoben, das Ökosystem Buchenwald bis in alle Einzelheiten hinein detailliert zu

Entwicklung des Buchenwaldmodells

beschreiben. Primäres Ziel ist es, durch das Herausarbeiten der entscheidenden Prozesse und Mechanismen und deren Integration in das Modell Antworten auf die in Kapitel III gestellten Fragen zu erhalten.

Das hier geschilderte sogenannte „regelbasierte Modellieren“ wurde bereits an anderen biologischen Systemen erfolgreich angewandt (z.B. NEUERT 1994, NEUERT et al. 1995).

Es sei an dieser Stelle ausdrücklich darauf hingewiesen, daß die nun folgende Darstellung des Buchenwaldmodells eine komprimierte ist. Um den Lesefluß nicht unnötig zu erschweren, wurde der vollständige Regelsatz des Modells sowie eine Übersicht über die im Modell verwendeten Parameter in den Anhang verlagert.

V.2.1 Übersicht über die Modellstruktur, grundlegende biologische Prozesse und Wechselwirkungen

Zunächst soll hier eine Übersicht über die Modellstruktur, die grundlegenden biologischen Prozesse und Mechanismen sowie entscheidende Nachbarschaftswechselwirkungen gegeben werden.

Der simulierte Wald wird dargestellt als eine Menge quaderförmiger Zellen mit quadratischer Grundfläche, welche an einem Gitter ausgerichtet sind.⁴ Das Ausmaß einer Zelle richtet sich dabei in etwa nach der Größe einer sehr großen Urwaldbuche. Da diese Größe nicht exakt bestimmbar ist und nur zu ungefähr 40 m Höhe und mehr als 14 m Kronendurchmesser abgeschätzt werden kann, wird der Einfachheit halber davon ausgegangen, daß gleichzeitig linear auf einer Länge von 100 m maximal genau sieben dieser sehr großen Buchen unmittelbar nebeneinander existieren können. Daraus ergibt sich für den Kronendurchmesser einer sehr großen Buche und damit auch für die

⁴ vgl. Kapitel A1. Regel 1), 4), 5)

horizontale Kantenlänge einer Zelle ein Wert von $14,29 \text{ m}^5$ $7 \cdot 7$ Zellen = 49 Zellen beanspruchen somit eine Grundfläche von genau 1 ha. Eine einzelne Zelle ist in vier vertikal übereinanderliegende Schichten aufgeteilt⁵ (Abb. 8), da auch in einem realen Buchenwald typischerweise eine deutlich erkennbare vertikale Schichtung feststellbar ist. So lassen sich unterhalb des dominierenden und alles überschirmenden Hauptkronendaches Buchen, die in etwa in einer Höhe von 20 m bis 30 m anzusiedeln sind, beobachten, welche in „Lauerstellung“ nur auf eine für sie günstige Gelegenheit warten, um selbst in das Hauptkronendach hineinzuwachsen. Noch tiefer gelegen decken schließlich Jungbuchen unterschiedlichen Alters den Bereich zwischen knöchelhohen Sämlingen und der unteren Kronenschicht ab.

Jede Schicht wird charakterisiert durch eine Reihe von Zustandsvariablen, bekannte, dort ablaufende biologische Prozesse und Mechanismen sowie den Einfluß verschiedener Nachbarschaftswchselwirkungen auf Buchen in den jeweiligen Schichten. Tab.2 gibt eine entsprechende Übersicht.

Die Gesamtheit aller Zellen stellt den simulierten Urwaldbestand dar.

Als ein Zeitschritt in der Simulation werden 15 Jahre gewählt⁷, da sich größere merkbare Veränderungen im Buchenwald nur langsam offenbaren. Alle realen Änderungen innerhalb einer Zeitspanne von 15 Jahren werden im Modell somit summarisch zusammengefaßt.

Wichtig erscheint es, noch einmal ausdrücklich festzuhalten, daß dieses neue Buchenwaldmodell konzeptionell als wesentlich einfacher einzustufen ist als ein mögliches Buchenwaldmodell auf der Grundlage von FORMIX2. Während bei einem auf FORMIX2 beruhenden Modell versucht wurde, die einzelnen biologischen Prozesse (z.B. Photosynthese) zu modellieren, werden nun nicht mehr die Prozesse als solche, sondern vielmehr nur die Konsequenzen aus diesen Prozessen beschrieben. Die scheinbare Komplexität des neuen Modells (relativ hohe Anzahl an Regeln (vgl. Anhang)) rührt daher,

⁵ vgl. Kapitel A1. Regel 2)

⁶ vgl. Kapitel A1. Regel 3)

⁷ vgl. Kapitel A1. Regel 6)

Entwicklung des Buchenwaldmodells

daß für jede einzelne Schicht und vorhandene Wechselwirkung Regeln formuliert werden müssen. Dennoch ist das Modell konzeptionell einfach (4 Schichten + wenige grundlegende biologische Prozesse + Nachbarschaftswechselwirkung: Licht + Nachbarschaftswechselwirkung: Wind).

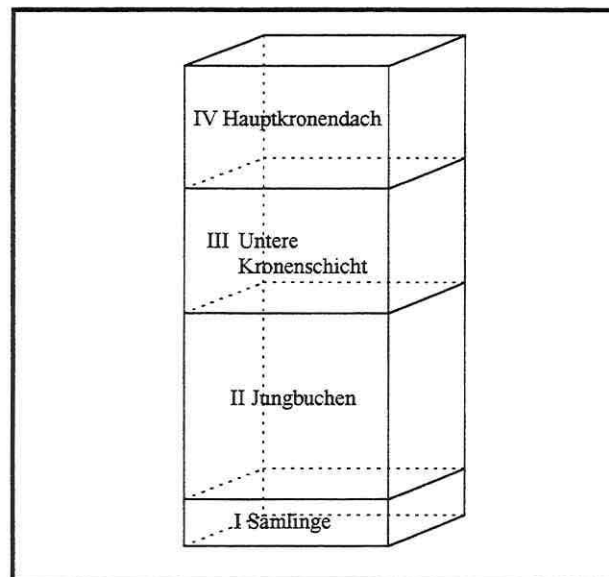


Abb.8 Aufbau einer Einzelzelle

V.2.2 Übersicht über den Simulationsablauf

Abb.9 gibt einen stark vereinfachten, schematischen Überblick über den Simulationsablauf. Die Abarbeitung der einzelnen Prozeduren⁸ geschieht in der in der Abbildung dargestellten Reihenfolge und endet, wenn die abgelaufene Simulationszeit den zu Beginn festgelegten Endwert der Simulationslänge *SL* erreicht.

⁸ für nähere Details zu den einzelnen Prozeduren vgl. Kapitel V.2.3 bis V.2.6 und Kapitel A1.

<i>Schicht</i>	<i>Zustandsvariable</i>	<i>Prozesse</i>	<i>Nachbarschafts- wechselwirkung: Licht</i>	<i>Nachbarschafts- wechselwirkung: Wind</i>
Hauptkronendach	• Individuen • Höhe: 30 m - 40 m • Alter: 90 Jahre - über 300 Jahre • Kronenschirmfläche: 1/8 bis 8/8 der Zellengrundfläche • Maximale Individuenzahl pro Zelle: 8	• Schließen von Hauptkronendachlücken • Herauskonkurrieren kleiner Buchen durch größere • Ab Alter von 300 Jahren: Starker Anstieg der Mortalität	• keine	• Umkippen aufgrund von Stürmen mit evtl. weiterer Schädigung in Kipprichtung
Untere Kronenschicht	• Individuen • Höhe: 20 m - 30 m • Alter: 60 Jahre - 210 Jahre • Kronenschirmfläche: 1/8 der Zellengrundfläche • Maximale Individuenzahl pro Zelle: 8 • Maximale Verweildauer: 90 Jahre	• Lauerstellung: Überdauern einer gewissen Zeit ohne nennenswertes Wachstum • Hineinwachsen in höhere Schicht, falls sich eine Möglichkeit bietet	• Beschattung von oben und von der Seite	• Schädigung durch umfallende Hauptkronendachbuchen
Jungbuchen	• Bedeckungsgrad (0% - 100%) • Höhe: etwa 0,3 m - 20 m	• Überdauern einer gewissen Zeit selbst unter relativ ungünstigen Verhältnissen teilweise möglich • Hineinwachsen in höhere Schicht, falls günstige Voraussetzungen vorliegen	• Beschattung von oben und von der Seite	• keine
Sämlinge	• Bedeckungsgrad (0% - 100%) • Höhe: bis etwa 0,3 m	• Entstehen immer wieder mal • Nur kurzes Überdauern • Hineinwachsen in höhere Schicht bei ausreichend Raum und günstigen Lichtverhältnissen	• Beschattung von oben und von der Seite	• keine

Tab.2 Übersicht über die Modellstruktur, zentrale biologische Prozesse und Nachbarschaftswechselwirkungen des Modells

Entwicklung des Buchenwaldmodells

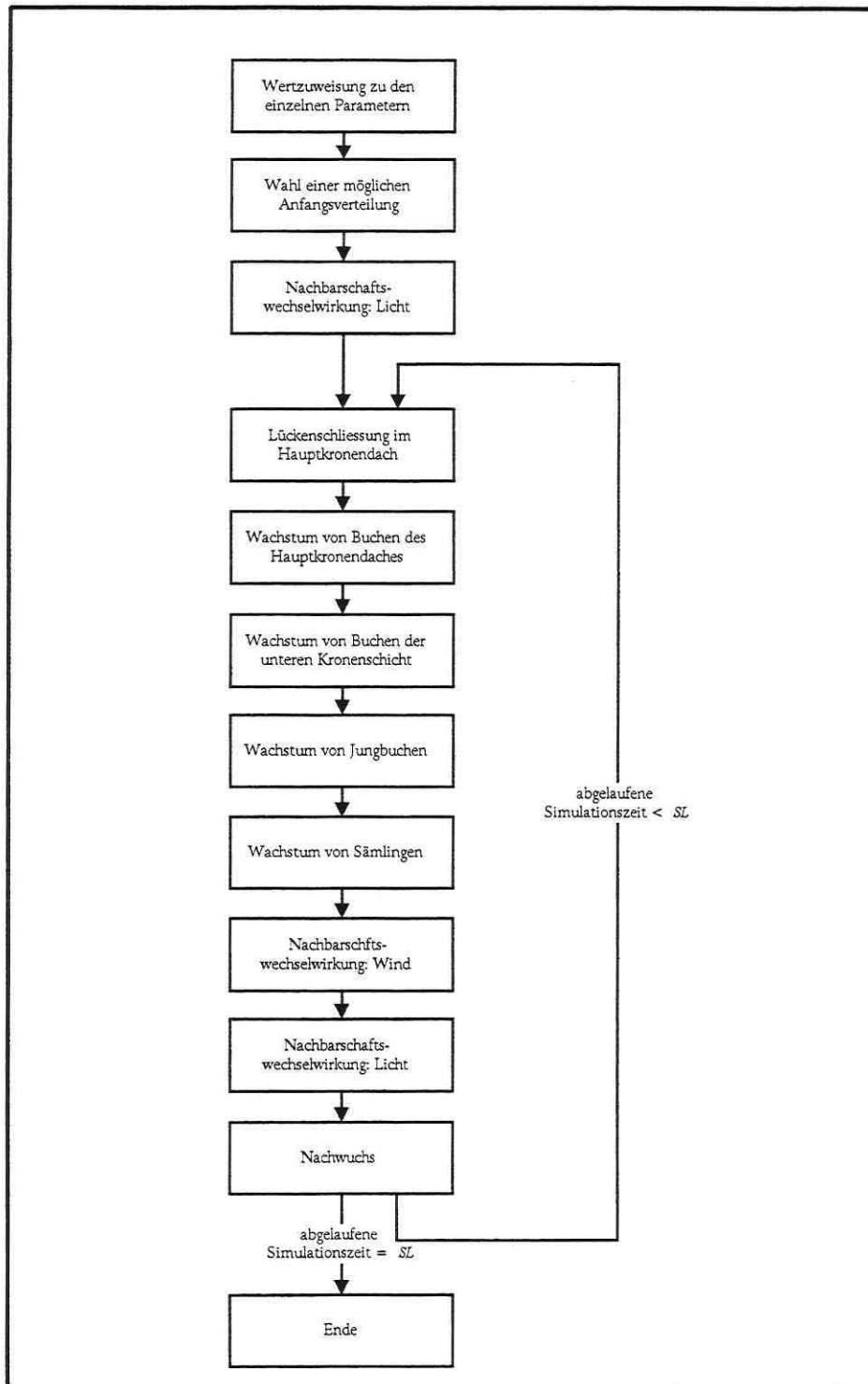


Abb.9 Schematische Darstellung des Simulationsablaufs

V.2.3 Wachstum von Buchen in einer einzelnen Zelle ohne Nachbarschaftswechselwirkungen

Die Beschreibung der Konkurrenz-, Wachstums- und Sterbevorgänge innerhalb einer einzelnen Zelle ohne Berücksichtigung des Einflusses benachbarter Zellen auf diese Prozesse geschieht schichtweise.⁹ Diese schichtweise Abarbeitung erfolgt im Modell nacheinander von den höher- zu den tiefergelegenen Schichten.¹⁰

V.2.3.1 Wachstum von Sämlingen

Aufgrund der mitunter beobachteten sehr großen Zahl von Sämlingen pro Flächeneinheit (z.T. mehrere Millionen pro ha, ASSMANN 1961) wurde in dieser Schicht aus rechentechnischen Gründen auf eine individuenbasierte Modellierung des Wachstums der Sämlinge verzichtet. Statt dessen wird in der Sämlingsschicht der Flächenbedeckungsgrad der Grundfläche durch Sämlinge als das Maß für die Menge der Sämlinge angesehen¹¹ (MAYER 1991). Von dieser Menge kann im nächsten Zeitschritt ein Teil in die nächsthöhere Schicht der Jungbuchen hineinwachsen. Dieser Teil ist um so größer, je größer der Bedeckungsgrad in der Sämlingsschicht ist, je geringer der entsprechende Bedeckungsgrad in der nächsthöheren Schicht der Jungbuchen ist (ASSMANN 1961), je günstiger die Lichtverhältnisse am Boden sind (BURSCHEL u. HUSS 1964, BURSCHEL u. SCHMALTZ 1965a, 1965b, PETERS 1992) und je geringer die durch diese Faktoren zunächst unbeeinflusste Sämlings-Mortalitätsrate ist.¹²

⁹ vgl. Kapitel A1. Regel 7)

¹⁰ vgl. Kapitel A1. Regel 8)

¹¹ vgl. Kapitel A1. Regel 9)

¹² vgl. Kapitel A1. Regel 10) - 14)

V.2.3.2 Wachstum von Jungbuchen

Ähnlich wie in der Sämlingsschicht ist auch in der Jungbuchenschicht der dieser Schicht entsprechende Flächenbedeckungsgrad das Maß für die Menge an Jungbuchen.¹³ Auf diese Menge der Jungbuchen wirkt in jedem Zeitschritt zunächst eine vorgegebene, durch nicht näher bestimmte äußere Einflüsse (z.B. Wildverbiß) leicht beeinflusste¹⁴, Mortalitätsrate (JENSSEN u. HOFMANN 1996). Günstige Lichtverhältnisse — hervorgerufen durch eine entsprechende Bedeckung in höheren Schichten dieser Zelle und in der näheren Umgebung — führen zu verringerter Mortalität bei den Jungbuchen.¹⁵ Aus der nach Einwirkung der Mortalitätsrate aktuell verbleibenden Menge an Jungbuchen können sich im nächsten Zeitschritt einzelne, individuelle Buchen der nächsthöheren Schicht herausbilden (Übergang von nicht-individuenbasierter zu individuenbasierter Modellierung). Die Wahrscheinlichkeit dafür, daß und wie viele solcher Buchen sich schließlich herausbilden, hängt dabei von mehreren Faktoren ab. Diese sind die von außen vorgegebene maximale Wahrscheinlichkeit für die Herausbildung einer einzelnen, individuellen Buche der unteren Kronenschicht in einem Zeitschritt, die momentan aktuelle Menge an Jungbuchen in der Zelle, der Grad der Bedeckung in der unteren Kronenschicht und im Hauptkronendach und die in der Zelle insgesamt vorherrschenden Lichtverhältnisse.¹⁶ Wahrscheinlichkeitserhöhende Faktoren für die Herausbildung von einzelnen Buchen aus der Jungbuchenschicht sind eine erhöhte Vorgabe der maximalen Wahrscheinlichkeit für die Herausbildung einer Buche der unteren Kronenschicht, eine erhöhte Menge an Jungbuchen, ein verminderter Anteil von Buchen in der unteren Kronenschicht (ASSMANN 1961), ein verminderter Bedeckungsgrad im Hauptkronendach (ASSMANN 1961), sowie durch Lücken in den oberen

¹³ vgl. Kapitel A1. Regel 15)

¹⁴ vgl. Kapitel A1. Regel 17)

¹⁵ vgl. Kapitel A1. Regel 18)

¹⁶ vgl. Kapitel A1. Regel 16), 20) - 23)

Schichten benachbarter Zellen hervorgerufene günstige Lichtverhältnisse in der betrachteten Zelle (MAYER 1984, PETERS 1992).

Diese hier nur kurz geschilderte Herausbildung einzelner, individueller Buchen aus der noch undifferenzierten Menge der Jungbuchen entspricht dem Übergang von einer nicht-individuenbasierten zu einer individuenbasierten Modellierung. Dieser Ansatz ist meines Wissens gänzlich neu. In den unteren beiden Schichten wird der diesen Schichten entsprechende Bedeckungsgrad als ein Maß für die Menge an Buchen angesehen. Hier liegen der Simulation somit keine einzelnen Individuen als kleinste Basiseinheiten zugrunde, sondern nur eine relativ undifferenzierte Masse bzw. Menge an Bäumen. Trotzdem läßt diese Masse aber auch Rückschlüsse auf die Waldstruktur in den unteren Schichten des Waldes zu. Anders dann die Modellierung in den oberen Schichten: Hier bilden einzelne Individuen mit ganz individuellen Merkmalen die kleinste Basiseinheit und die Entwicklung des Waldes in den höheren Schichten wird beschrieben durch die fortlaufende Veränderung einzelner Merkmale der Individuen.

V.2.3.3 Wachstum von Buchen der unteren Kronenschicht

Die untere Kronenschicht wird gebildet aus einzelnen individuellen Buchen. Diese Buchen sind charakterisiert durch einen Satz an Merkmalen. Dieses sind ihr Alter, ihre Verweildauer in dieser Schicht und ihre Kronenschirmfläche.¹⁷ Ihre Position innerhalb einer Zelle dagegen wird nicht näher spezifiziert. Gerade aus der Jungbuchenschicht in das untere Kronendach hineingewachsene Buchen besitzen ein Alter von mindestens 60 Jahren und höchstens 120 Jahren.¹⁸ Auf jede dieser Buchen wirkt eine durch die in der Zelle herrschenden Lichtverhältnisse beeinflusste Mortalitätsrate.¹⁹

¹⁷ vgl. Kapitel A1. Regel 24) - 26)

¹⁸ vgl. Kapitel A1. Regel 27)

¹⁹ vgl. Kapitel A1. Regel 28)

Entwicklung des Buchenwaldmodells

Als extrem schattentolerante Baumart ist die Buche in der Lage, relativ lange Zeit ohne nennenswertes Wachstum unterhalb des dicht geschlossenen Kronendaches zu überdauern, um auf für sie günstigere Wachstumsbedingungen zu „warten“. Die „Wartezeit“, d.h. Verweildauer einer Buche in der unteren Kronenschicht, beträgt bis zu 90 Jahren (KORPEL´ 1995, ZUKRIGL 1991).²⁰ Innerhalb dieser Zeit besteht für eine solche Buche die Möglichkeit in das Hauptkronendach hineinzuwachsen, wenn es die dortigen räumlichen Gegebenheiten erlauben (KENNEL 1966, ZUKRIGL 1991).²¹ Geschieht dieses nicht innerhalb dieser Zeitspanne, dann stirbt sie (KORPEL´ 1995).²²

V.2.3.4 Wachstum von Buchen des Hauptkronendaches

Buchen des Hauptkronendaches sind durch ihr Alter und ihre Kronenschirmfläche charakterisiert.²³ Auf jede dieser Buchen wirkt eine Mortalitätsrate²⁴, die sich ab dem Erreichen eines ungefähr als Höchstalter für Buchen angenommenen Wertes stark erhöht²⁵ (FRÖHLICH 1954, HOLM 1995, REMMERT 1988). Buchen dieser Schicht können unterschiedlich große Kronenschirmflächen annehmen²⁶, die sich von Zeitschritt zu Zeitschritt so lange vergrößern, bis das Hauptkronendach vollständig geschlossen ist²⁷ (KENNEL 1966, KORPEL´ 1995). Bei vollständig geschlossenem Kronendach verdrängt dann mit der Zeit die größte und sich am längsten im Hauptkronendach befindende Buche nach und nach die kleinsten und sich am kürzesten in dieser Schicht befindenden Buchen.²⁸

²⁰ vgl. Kapitel A1. Regel 29) - 31)

²¹ vgl. Kapitel A1. Regel 32)

²² vgl. Kapitel A1. Regel 31)

²³ vgl. Kapitel A1. Regel 34)-36)

²⁴ vgl. Kapitel A1. Regel 37)

²⁵ vgl. Kapitel A1. Regel 38)

²⁶ vgl. Kapitel A1. Regel 35), 39)

²⁷ vgl. Kapitel A1. Regel 40)

²⁸ vgl. Kapitel A1. Regel 41) - 43)

V.2.3.5 Lückenschließung im Hauptkronendach

Die immer wieder im Hauptkronendach auftretenden Lücken können durch die Vergrößerung der Kronenschirmfläche von sich bereits im Hauptkronendach befindenden Buchen oder durch das Hineinwachsen von Buchen der unteren Kronenschicht in das Hauptkronendach geschlossen werden (ASSMANN 1961, KORPEL' 1992).²⁹ Dabei vergrößern in einem Zeitschritt zunächst so viele der bereits vorhandenen Buchen des Hauptkronendaches wie möglich ihre Kronenschirmfläche um einen bestimmten Betrag.³⁰ Falls danach das Hauptkronendach noch immer nicht vollständig geschlossen ist, können die noch vorhandenen Lücken durch das Hineinwachsen von Buchen aus der tiefergelegenen unteren Kronenschicht geschlossen werden (KENNEL 1966).³¹ Dabei werden als erstes diejenigen Buchen der unteren Kronenschicht in die Lücken hineinwachsen, welche die längste Verweildauer in dieser Schicht aufzuweisen haben.³² Je nach vorhandenem Platz im Hauptkronendach besitzen die gerade in das Hauptkronendach hineinwachsenden Buchen unterschiedlich große Kronenschirmflächen.³³

V.2.3.6 Nachwuchs

Nachwuchs kann nur durch Buchen der oberen beiden Schichten produziert werden (WATT 1925).³⁴ Die sich in der Sämlingsschicht etablierende Menge des Nachwuchses in einer Zelle hängt dabei von verschiedenen Faktoren ab: Von der von außen vorgegebenen maximal

²⁹ vgl. Kapitel A1. Regel 45) - 46)

³⁰ vgl. Kapitel A1. Regel 47) - 48)

³¹ vgl. Kapitel A1. Regel 49)

³² vgl. Kapitel A1. Regel 52) - 53)

³³ vgl. Kapitel A1. Regel 50) - 51), 54) - 55)

³⁴ vgl. Kapitel A1. Regel 56) - 57)

möglichen Sämlingsmenge, die sich in der Sämlingsschicht etablieren kann, von den Bedeckungsgraden in den drei höheren Schichten in der Zelle, von den in der Zelle insgesamt herrschenden Lichtverhältnissen und zusätzlich von zufälligen, nicht näher bestimmten äußeren Umständen.³⁵ Geringe Überschirmung durch höhere Schichten in der Zelle und in näherer Umgebung mit daraus resultierenden günstigen Lichtverhältnissen sowie geringe Einflüsse durch nicht näher bestimmte äußere Umstände führen dazu, daß sich ein Großteil der maximal möglichen Sämlingsmenge in der Sämlingsschicht etablieren kann.³⁶ Besonders starke Überschirmung und insgesamt resultierende ungünstige Lichtverhältnisse in der betrachteten Zelle bewirken dagegen, daß sich nur ein kleiner Bruchteil der maximal möglichen Samenmenge in der Sämlingsschicht etabliert.³⁷

V.2.4 Nachbarschaftswchselwirkung „Licht“

Licht hat einen großen Einfluß auf die Mortalität von Buchen. Abhängig von den vorherrschenden Lichtverhältnissen in einer Zelle kann die als maximal für möglich gehaltene Mortalität von Buchen in den verschiedenen Schichten auf einen Bruchteil ihres ursprünglich angenommenen Wertes bis hin zu einem angenommenen Minimalwert absinken.³⁸ Je günstiger die Lichtverhältnisse sind, desto geringer wird die Mortalitätsrate der Buchen in den verschiedenen Schichten sein.³⁹ Eine Ausnahme besteht für Buchen des Hauptkronendaches. Da diese nicht mehr durch andere Buchen überschirmt bzw. abgeschattet werden, herrschen für sie praktisch immer optimale Lichtverhältnisse vor. Eine weitere Verringerung ihrer angenommenen Mortalität aufgrund veränderter Lichtverhältnisse entfällt somit.

³⁵ vgl. Kapitel A1. Regel 57)

³⁶ vgl. Kapitel A1. Regel 58) - 60)

³⁷ vgl. Kapitel A1. Regel 61)

³⁸ vgl. Kapitel A1. Regel 62), 73)

³⁹ vgl. Kapitel A1. Regel 73)

Die Lichtverhältnisse in einer Zelle werden durch die Struktur innerhalb der Zelle, d.h. durch die in den verschiedenen Schichten vorhandenen Bedeckungsgrade und durch Lücken im Hauptkronendach und der unteren Kronenschicht benachbarter Zellen, bestimmt (RUBNER 1934).⁴⁰ Die beiden unteren Schichten der benachbart liegenden Zellen haben aufgrund ihrer geringen Höhe und dem damit verbundenen nicht weitreichenden Schattenwurf einen vernachlässigbaren Einfluß auf sie.⁴¹ Aufgrund der in unseren Breiten nicht vorhandenen direkten Sonnenstrahlung aus nördlichen Richtungen werden die in diesen Richtungen liegenden benachbarten Zellen nur einen indirekten und geringeren Einfluß auf die Lichtverhältnisse in der betrachteten Zelle haben (RUBNER 1934). Berücksichtigt wird dieses dadurch, daß nur der direkt angrenzenden nördlich gelegenen Zelle ein Einfluß eingeräumt wird, nicht mehr aber der nordwestlich und der nordöstlich gelegenen Zelle.⁴²

Der Einfluß, den Lücken in den beiden oberen Schichten einer relevanten Nachbarzelle auf die Lichtverhältnisse und damit auch auf die Mortalitätsraten haben, ist geringer als derjenige, der durch entsprechende Lücken in der betrachteten Zelle selbst hervorgerufen wird.⁴³

Die Nachbarschaftswechselwirkung „Licht“ stellt eine erste *echte* Nachbarschaftswechselwirkung dar. Stirbt z.B. eine Buche der oberen beiden Schichten, dann erhalten entsprechend benachbarte Zellen mehr Licht, was sich dann in einem teilweise längeren Überdauern junger Buchen und einem gehäufteten Hineinwachsen dieser Buchen in höhere Schichten widerspiegelt.

⁴⁰ vgl. Kapitel A1. Regel 63)

⁴¹ vgl. Kapitel A1. Regel 65)

⁴² vgl. Kapitel A1. Regel 64)

⁴³ vgl. Kapitel A1. Regel 66) - 72)

V.2.5 Nachbarschaftswechselwirkung „Wind“

Eine zweite echte Nachbarschaftswechselwirkung ist im Wald in Form von durch Sturm bedingte Schäden gegeben.

Mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit tritt in einem Zeitschritt ein Sturm auf, der dem Wald Schaden zufügen kann (PETERS 1992, RUNKLE 1985). Die Schädigung erfolgt durch Umwerfen oder Abbrechen von Bäumen des Hauptkronendaches (BREWER u. MERRIT 1978, PETERS 1992, WAGNER 1907).⁴⁴ Abhängig von der Sturmstärke unterliegen diese Bäume unterschiedlich großen Umkip- bzw. Abbrechwahrscheinlichkeiten (WAGNER 1907).⁴⁵ Bäume tieferer Schichten bieten wegen ihrer geschützten Stellung im Bestand keine direkte Angiffsfläche für Stürme und sind somit vor direkten Sturmeinwirkungen geschützt (BREWER u. MERRIT 1978, PETERS 1992, WAGNER 1907). Schädigende Stürme können ihren Ursprung in verschiedenen Himmelsrichtungen haben, kommen in unseren Breiten aber hauptsächlich aus west-, südwestlicher oder aber östlicher Richtung (WAGNER 1907).⁴⁶ Die Umkip- oder Abbrechwahrscheinlichkeit für einen Hauptkronendachbaum erhöht sich dann, wenn sich in der benachbarten Zelle in der Richtung, aus der der Wind kommt, Lücken im Hauptkronendach befinden und der Wind an den Hauptkronendachbäumen der betrachteten Zelle gut angreifen kann (BREWER u. MERRIT 1978, FOSTER 1988, PETERS 1992, WAGNER 1907).⁴⁷ Falls dies der Fall ist, dann führt das Fehlen von Bäumen bzw. das Vorhandensein von Hauptkronendach-Lücken in der in Windrichtung abgewandten Zelle zu einer zusätzlichen Erhöhung der Abbrech- oder Umkipprawahrscheinlichkeit, da der stützende Charakter durch Bäume dieser Nachbarzelle bei Windeinflüssen nicht mehr oder nur noch teilweise gewährleistet ist (BREWER u. MERRIT

⁴⁴ vgl. Kapitel A1. Regel 75) - 76)

⁴⁵ vgl. Kapitel A1. Regel 79) - 80)

⁴⁶ vgl. Kapitel A1. Regel 77)

⁴⁷ vgl. Kapitel A1. Regel 81)

1978, FOSTER 1988, PETERS 1992, WAGNER 1907).⁴⁸ Die den Trauf, d.h. äußeren Waldrand bildenden Bäume dagegen sind auch gegenüber stärkeren Sturmereignissen relativ unempfindlich (PETERS 1992, RUBNER 1934, WAGNER 1907).⁴⁹ Umkippende Bäume verursachen mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit in den sich in Kipprichtung (BREWER u. MERRIT 1978, EIFERT 1903, WAGNER 1907) befindenden nächstgelegenen drei Zellen Schädigungen im Hauptkronendach und in der unteren Kronenschicht (BREWER u. MERRIT 1978, WAGNER 1907).⁵⁰ Falls das Hauptkronendach geschädigt wird, dann können entweder ganze Bäume ausgeschlagen werden oder aber auch nur Teilkronen abbrechen (BREWER u. MERRIT 1978).⁵¹ Bei Schädigung der unteren Kronenschicht dagegen werden immer ein oder mehrere Buchen dieser Schicht ganz ausgeschlagen.⁵²

V.2.6 Mögliche Anfangsverteilungen

Zu Beginn der Simulation kann sich das simulierte Waldgebiet in einem von vier möglichen Grundzuständen befinden, welcher vom Benutzer frei gewählt werden kann. Diese Zustände wären „Urwald“, „Aufgeforsteter Wald“, „Wirtschaftswald“ und eine „Zufallsverteilung“.⁵³

Wodurch ist nun ein Grundzustand charakterisiert? Jede Zelle weist zu Beginn der Simulation eine ganz bestimmte Struktur auf, die durch die Bedeckungsgrade in den vier Schichten und durch individuelle Merkmale einzelner Buchen in den oberen beiden Schichten bestimmt ist.⁵⁴ Je nach

⁴⁸ vgl. Kapitel A1. Regel 82)

⁴⁹ vgl. Kapitel A1. Regel 83)

⁵⁰ vgl. Kapitel A1. Regel 85) - 88)

⁵¹ vgl. Kapitel A1. Regel 89)

⁵² vgl. Kapitel A1. Regel 90)

⁵³ vgl. Kapitel A1. Regel 92)

⁵⁴ vgl. Kapitel A1. Regel 91)

vorgegebenem Grundzustand unterscheidet sich die Struktur in den einzelnen Zellen und auch die Anordnung der Zellen erheblich.

So richtet sich die Anfangsverteilung „Urwald“ nach der Häufigkeit des Vorkommens verschiedener Entwicklungsstadien in natürlichen Buchenwäldern.⁵⁵ Jede einzelne Zelle befindet sich daher zu Beginn mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit⁵⁶ in einem den drei möglichen Entwicklungsstadien⁵⁷ entsprechenden Zustand. Die Zuordnung zu einem Stadium erfolgt dabei unter Berücksichtigung der Struktur innerhalb der betrachteten Zelle selbst⁵⁸ und der ihrer nächsten Umgebung⁵⁹. Die Zelle erhält schließlich jenes Stadium, welches durch die Struktur der sie einschließenden Raumeinheit (= betrachtete Zelle plus nächste Umgebung) am ehesten repräsentiert wird, d.h. die in der Raumeinheit vorherrschende Gesamtstruktur definiert das Entwicklungsstadium der zentral in dieser Raumeinheit gelegenen Zelle.

Bei der Zuordnung einer Zelle zu einem Entwicklungsstadium wurde die nähere Zellumgebung deswegen mitberücksichtigt, da es unmöglich erscheint, eine entsprechende Zuordnung allein auf Grundlage der relativ geringen räumlichen Ausdehnung nur einer einzelnen Zelle zu gewährleisten. Denn auch in der Natur treten in recht homogen erscheinenden Waldteilbereichen, die eindeutig nur einem Entwicklungsstadium zugeordnet werden können, auf sehr kleinräumiger, der Größe einer Zelle vergleichbarer Skala immer wieder Strukturen auf, die stark von der Struktur der ansonsten homogenen Umgebung abweichen, die aber dennoch dem in der Umgebung vorherrschenden dominierenden Stadium eindeutig einverleibt werden müssen.

Die Anfangsverteilung „Aufgeforsteter Wald“ ist dadurch charakterisiert, daß sich zu Beginn der Simulation nur Buchen in der untersten Schicht

⁵⁵ vgl. Kapitel A1. Regel 93)

⁵⁶ vgl. Kapitel A1. Regel 104)

⁵⁷ vgl. Kapitel A1. Regel 94)

⁵⁸ vgl. Kapitel A1. Regel 95) - 103)

⁵⁹ vgl. Kapitel A1. Regel 116) - 119)

befinden und diese in jeder Zelle jeweils 50% der Zellengrundfläche bedecken.⁶⁰

Bei der Anfangsverteilung „Wirtschaftswald“ ist die Struktur in jeder Zelle in etwa gleich und richtet sich sowohl hinsichtlich der Bedeckung in den verschiedenen Schichten als auch bezüglich des Alters einzelner Buchen nach durch waldbauliche Maßnahmen herbeigeführten als typisch anzusehenden Werten.⁶¹

Falls zu Beginn der Simulation dem Wald eine „Zufallsverteilung“ zugrunde liegt, dann erhält jede einzelne Zelle mit gleich großer Wahrscheinlichkeit eine Struktur zugewiesen, die auf dieser kleinräumigen Skala entweder an das Stadium des Heranwachsens, das Optimalstadium oder aber das Zerfallsstadium angelehnt ist.⁶² Diese Anfangsverteilung ist als einzige an kein real existierendes räumliches Muster angelehnt.

V.3 Zusammenfassung

Erste konkrete Versuche der Entwicklung eines Buchenurwaldmodells beruhten auf der Übertragung eines für den tropischen Urwald entwickelten Modells auf den Buchenwald. Basis dieses physiologisch und stark mathematisch orientierten Modells ist das Wachstum von Tropenbäumen auf Grundlage der Photosynthesereproduktion in unterschiedlichen Kronenschichten. Dieser Ansatz wurde jedoch schließlich aufgrund einer sich für einen Buchenurwald als unzureichend herausstellenden Datenbasis bezüglich der Parametrisierung des Modells wieder verworfen.

Durch das Vorhandensein einer großen Menge empirischer Beobachtungen über die funktionalen Zusammenhänge im Buchenwaldsystem war es statt dessen möglich, ein mehr phänomenologisches Buchenwaldmodell zu

⁶⁰ vgl. Kapitel A1. Regel 106)

⁶¹ vgl. Kapitel A1. Regel 107) - 115)

⁶² vgl. Kapitel A1. Regel 105)

Entwicklung des Buchenwaldmodells

entwickeln. In diesem Modell setzt sich das simulierte Waldgebiet aus einer großen Zahl von gleich großen Unterbereichen, sogenannten Zellen, zusammen, deren momentaner Zustand durch ihre eigene, teilweise auf Individuenbasis fußende, innere Struktur und durch die Struktur und Einflüsse ihrer Nachbarzellen im vorherigen Zeitschritt bestimmt wird. Die im Modell ablaufenden Wachstums-, Sterbe-, Konkurrenz- und Wechselwirkungsprozesse basieren auf empirisch untermauerten Regeln.

VI Ergebnisse mit Diskussionen

Dieses Kapitel widmet sich den Resultaten, die das dreidimensionale gitterbasierte Modell liefert. Neben möglichen Antworten zu den in Kapitel III.2 gestellten Fragen ergeben sich zusätzlich noch etliche andere interessante Erkenntnisse bezüglich natürlicher Buchenwälder, welche zu einer Vertiefung des Verständnisses über dieses Ökosystem beitragen. Eine Interpretation und kritische Diskussion der erhaltenen Ergebnisse erfolgt bereits an Ort und Stelle, um auf umständliche, die Lesbarkeit erschweringe Querverweise zwischen einem gesonderten Kapitel „Diskussion“ und einem Kapitel „Ergebnisse“ zu verzichten. Den Abschluß dieses Kapitels und damit auch der gesamten Arbeit bildet schließlich eine ausführliche zusammenfassende Diskussion, die u.a. auch eine Zusammenfassung des im folgenden diskutierten Ergebnisteils beinhaltet.

VI.1 Referenz-Fall

Zunächst soll der sogenannte Referenz-Fall betrachtet werden. Dieser zeichnet sich dadurch aus, daß sowohl die Modellannahmen als auch die in der Simulation verwendeten Werte der einzelnen Parameter wie auch die durch die Simulation erhaltenen Modellergebnisse so gut wie nur möglich empirischen Untersuchungen, Erkenntnissen und Beobachtungen entsprechen. An dieser Stelle erfolgt somit ein Abgleich zwischen Modellwald und natürlichem Wald, d.h. es erfolgt eine Überprüfung des Modells und seiner Ergebnisse sowie eine Abschätzung seines Gültigkeitsbereichs. Hier geht es also vor allem darum, zu untersuchen und zu beurteilen, ob das Modell mit seiner zwar relativ großen, aber dennoch beschränkten Anzahl an Modellannahmen und einer empirisch sinnvoll erscheinenden Kombination von Parameterwerten, tatsächlich in der Lage ist, einen Buchenwald

Ergebnisse mit Diskussionen

hinsichtlich seiner Entwicklung, seines Wachstums und auch der Entstehung ihm innewohnender Strukturen — zumindest in seinen Grundzügen — hinreichend genau zu beschreiben. Wenn dies der Fall ist, dann ist es gelungen, eine unabdingbare Grundvoraussetzung für ein weiteres Arbeiten mit dem Modell zu erfüllen: Vertrauen zu schaffen in das Modell und in seine Ergebnisse.

Parameter	theoretisch sinnvoll erscheinender Werte- bereich	Quelle
x	≥ 10	KORPEL' 1982, 1995, LEIBUNDGUT 1970, NIEMANN 1968, SCAMONI 1953, SEIBERT u. HAGEN 1974
y	≥ 10	KORPEL' 1982, 1995, LEIBUNDGUT 1970, NIEMANN 1968, SCAMONI 1953, SEIBERT u. HAGEN 1974
m_I	1.000	BURSCHEL u. SCHMALTZ 1965a, PETERS 1992, WATT 1923
m_{II}	0.400 - 1.000	geschätzt
m_{III}	0.000 - 0.400	geschätzt
m_{IV}	0.000 - 0.002	geschätzt nach JENSSEN u. HOFMANN 1997
age_{max}	150 - 350	ASSMANN 1961, FRÖHLICH 1954, HOLM 1995, PETERS 1992, REMMERT 1988
L_{IV}	0.001 - 0.020	geschätzt
L_{III}	0.000 - 0.003	geschätzt
HWR	6	WAGNER 1907
p_{Wind}	1.000	WAGNER 1907
p_{Kipp1}	0.000 - 0.002	geschätzt nach WAGNER 1907
p_{Kipp2}	0.002 - 0.020	geschätzt nach FAILLE et al. 1984
p_{Kipp3}	0.003 - 1.000	geschätzt
E_{pKipp}	0.001 - 50.000	geschätzt
w_{max}	0.700 - 1.000	geschätzt nach ASSMANN 1961, KENNEL 1966, KORPEL' 1992
s_{max}	1.000	ASSMANN 1961, KNAPP u. JESCHKE 1991

Tab.3 Theoretisch sinnvoll erscheinender Parameterwertebereich. Eine Übersicht über die genaue Bedeutung der einzelnen Parameter wird im Anhang A.2 gegeben.

Parameter	Referenzwert	Quelle
x	40	KORPEL' 1982, 1995, SCAMONI 1953
y	40	KORPEL' 1982, 1995, SCAMONI 1953
m_I	1.000	BURSCHEL u. SCHMALTZ 1965a, PETERS 1992, WATT 1923
m_{II}	1.000	geschätzt
m_{III}	0.030	geschätzt
m_{IV}	0.001	geschätzt nach JENSSEN u. HOFMANN 1997
age_{max}	300	HOLM 1995, PETERS 1992, REMMERT 1988
L_{IV}	0.008	geschätzt
L_{III}	0.002	geschätzt
HWR	6	WAGNER 1907
p_{Wind}	1.000	WAGNER 1907
p_{Kipp1}	0.001	geschätzt nach WAGNER 1907
p_{Kipp2}	0.002	geschätzt nach FAILLE et al. 1984
p_{Kipp3}	0.004	geschätzt
E_{pKipp}	12.000	geschätzt
w_{max}	1.000	geschätzt nach ASSMANN 1961, KENNEL 1966, KORPEL' 1992
s_{max}	1.000	ASSMANN 1961, KNAPP u. JESCHKE 1991

Tab.4 Im folgenden verwendeter Referenz-Parametersatz. Eine Übersicht über die genaue Bedeutung der einzelnen Parameter wird im Anhang A.2 gegeben.

Streng genommen kann es mehr als nur einen Referenz-Fall geben, der durch eine exakt vorgegebene Kombination einzelner Parameterwerte und Modellannahmen als beste Anpassung an einen in der Natur gewählten Referenzfall gedeutet werden kann. Denn auch bei diesem Modellansatz gibt es einzelne Parameter, deren Werte aufgrund mangelhaftem empirischen Wissen bzw. starker Variation in der Natur nur innerhalb gewisser Grenzen abgeschätzt werden konnten. So können größere sinnvoll erscheinende Parameterwertbereiche existieren, innerhalb deren Grenzen sich die Modellergebnisse sowohl qualitativ als auch quantitativ kaum unterscheiden. D.h. es gibt praktisch nicht nur einen einzigen Referenz-Parametersatz, sondern einen ganzen Referenz-Parameterbereich. Tab.3 gibt für jeden Parameter einen Überblick darüber, innerhalb welcher sinnvoll erscheinender

Ergebnisse mit Diskussionen

Grenzen sich seine Werte theoretisch bewegen könnten. Die dort von mir geschätzten Wertebereiche beruhen dabei so weit wie möglich auf empirischen Aussagen qualitativer Art. Tab.4 zeigt den im folgenden verwendeten Referenz-Parametersatz, der den Ausgangspunkt der Untersuchungen bildet.

VI.1.1 Typische Raumstrukturen

Zunächst sollen global typische, sich im Verlauf der Simulation einstellende Raumstrukturen näher betrachtet werden.

VI.1.1.1 Erscheinungsbild

Abb.10 zeigt ein typisches räumliches Bild. Oben ist die detaillierte Darstellung eines 7x7 Zellen umfassenden Untergebietes, d.h. eines 1 ha großen Waldausschnitts eines insgesamt 32,7 ha großen, darunter dargestellten, simulierten Waldes zu erkennen. Dargestellt sind für jede einzelne dieser 49 Zellen die Bedeckungsgrade (Sämlingsschicht unten, ..., Hauptkronendach oben) bzw. zusätzlich die Anzahl der Buchen in der unteren Kronenschicht (= Anzahl der Striche in der unteren Kronenschicht) sowie die Anzahl als auch die Kronengrößen der Buchen im Hauptkronendach (= Anzahl und Länge der Striche im Hauptkronendach). Basierend auf dieser detaillierten Kenntnis erfolgt die Zuordnung einer jeden Zelle zu einem der drei möglichen Entwicklungsstadien.

In Abb.10 unten links beruht die Zuordnung dabei ganz allein auf der Kenntnis der Struktur in der entsprechenden Einzelzelle. Strukturen benachbarter Zellen wurden hierbei nicht mitberücksichtigt.

Eine solch mikroskopische Betrachtungsweise erscheint aber unrealistisch, da auch Forstleute bei einer visuell im Wald vorgenommenen Zuordnung

eines kleinen Gebietes zu einem Stadium zumindest die nähere Umgebung mitberücksichtigen. Daher soll in allen folgenden Auswertungen und Untersuchungen grundsätzlich eine Zuordnung der einzelnen Zellen zu den verschiedenen Entwicklungsstadien unter Berücksichtigung ihrer unmittelbaren Zellumgebung und eventuell — falls dadurch noch keine eindeutige Zuordnung möglich erscheint — den Zustand der Zelle einen Zeitschritt vorher, erfolgen⁶³. Abb.10 unten rechts zeigt für denselben Waldausschnitt die auf diese Art und Weise erfolgte Zuordnung.

Jeweils gut zu erkennen sind in Abb.10 unten links bzw. rechts die unterschiedlich großen, teilweise recht ausgedehnten, eine einheitliche bzw. ähnliche Struktur und damit ein einheitliches Stadium aufweisenden Mosaikflächen. Die etwas einheitlicher und geglätteter erscheinenden Mosaikflächen ergeben sich für den Fall der Zuordnung der einzelnen Zellen zu den Entwicklungsstadien unter Berücksichtigung ihrer unmittelbaren Umgebung (Abb.10 unten rechts).

VI.1.1.2 Größe der Mosaik

Eine Abschätzung der Größe der verschiedenen Mosaikflächen ist aufgrund ihrer oft nicht eindeutigen Abgrenzbarkeit nicht trivial. Als Maß für die Größe einer Mosaikfläche wird hier ihre Ost-West- bzw. Nord-Süd-Ausdehnung angesehen, genauer gesagt: Es wird die Breite bzw. Länge von zusammenhängenden Entwicklungsstadien in jeder Reihe bzw. Spalte von Zellen betrachtet. Dazu werden über einen ganzen Simulationslauf diese unterschiedlich großen Ausdehnungen für jedes Entwicklungsstadium gesondert aufsummiert und bezüglich ihrer relativen Häufigkeit betrachtet. Die Histogramme in Abb.11 geben Aufschluß darüber, welchen prozentualen Anteil verschieden „breite“ Mosaik am Heranwachs-, Optimal- und

⁶³ nähere Details vgl. Anhang A1. Regel 116) - 121)

Ergebnisse mit Diskussionen

Zerfallsstadium haben. Abb.12 stellt dieselben Betrachtungen hinsichtlich der Nord-Süd-Ausdehnung, d.h. hinsichtlich der „Länge“ der verschiedenen Stadien an.

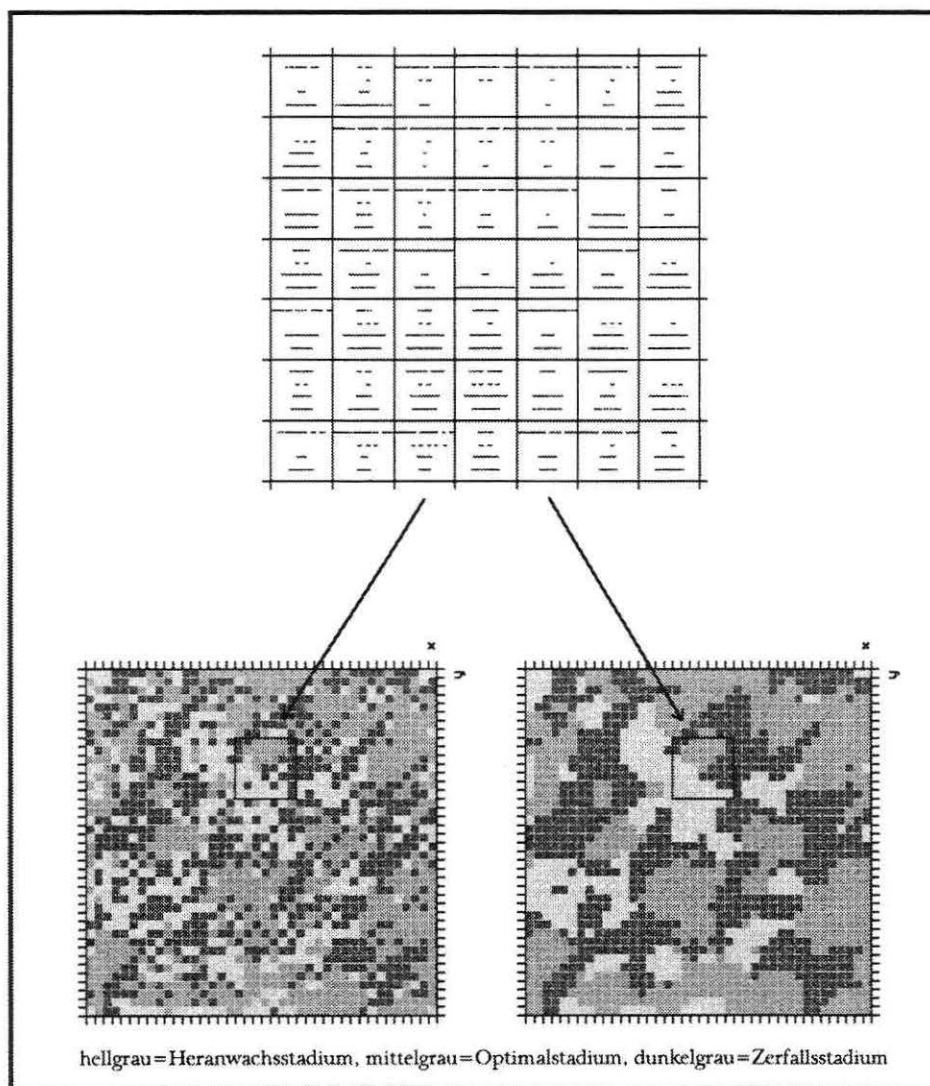


Abb.10 Detaillierte Darstellung eines 7·7 Zellen = 1 ha großen Untergebietes (oben) eines insgesamt 32,7 ha großen simulierten Buchenwaldes mit schematischer Darstellung der Bedeckungsgrade in den einzelnen Hörschichten jeder Zelle (Sämlingsschicht unten, ..., Hauptkronendach oben) sowie Anzahl der Buchen in der unteren Kronenschicht und Anzahl und Kronengröße der Buchen im Hauptkronendach. Unten dargestellt ist der Vergleich der erfolgten Zuordnung der einzelnen Zellen zu den drei möglichen Entwicklungsstadien ohne (unten links) und mit Berücksichtigung (unten rechts) der unmittelbaren Zellumgebung. Nähere Erläuterungen dazu vgl. Text. Parameterwerte nach Tab.4.

Auffallend ist zunächst sowohl in Abb.11 als auch in Abb.12, daß der prozentuale Anteil von gleichartig erscheinenden Entwicklungsstadien, die nur ein, zwei oder drei Zellen breit bzw. lang sind, bei weitem überwiegt. Auf sie zusammen verteilen sich unabhängig vom Entwicklungsstadium und von ihrer Ausrichtung jeweils mehr als die Hälfte aller vorhandenen verschieden „breiten“ bzw. „langen“ Mosaike. Zusätzlich ist dann noch jeweils ein nicht unbedeutender Anteil zusammenhängender Mosaikflächen vorhanden, der zehn oder mehr Zellen umfaßt. Das bedeutet zunächst, daß größere einheitliche Mosaikflächen bezüglich der betrachteten beiden Ausrichtungen im simulierten Wald durchaus vorkommen, aber nicht die Regel sind.

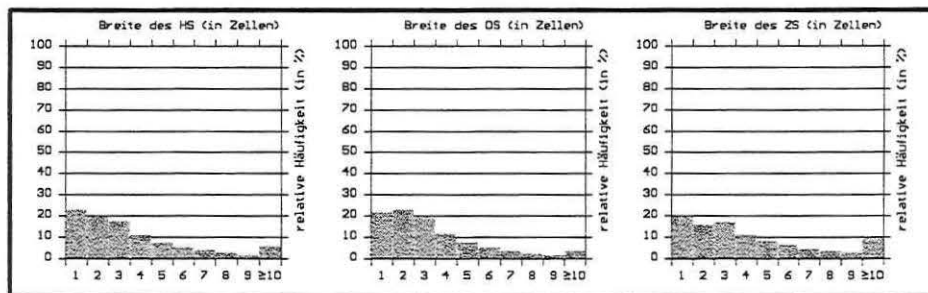


Abb.11 Relative Häufigkeit unterschiedlich großer Ost-West-Ausdehnung (in Zellen) des Heranwuchsstadiums (HS), des Optimalstadiums (OS) und des Zerfallsstadiums (ZS) (gemittelt über 1000 Zeitschritte). Der Ost-West-Ausdehnung einer Zelle entsprechen 14,29 m. Parameterwerte nach Tab.4.

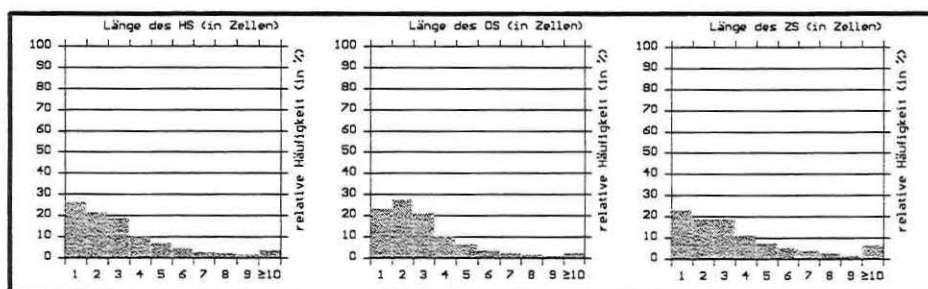


Abb.12 Relative Häufigkeit unterschiedlich großer Nord-Süd-Ausdehnung (in Zellen) des Heranwuchsstadiums (HS), des Optimalstadiums (OS) und des Zerfallsstadiums (ZS) (gemittelt über 1000 Zeitschritte). Der Nord-Süd-Ausdehnung einer Zelle entsprechen 14,29 m. Parameterwerte nach Tab.4.

Ergebnisse mit Diskussionen

Die Tab.5 und Tab.6 geben einen quantitativen Überblick über die mittlere Ost-West- bzw. Nord-Süd-Ausdehnung der verschiedenen Stadien zuzüglich ihrer Standardabweichung und die entsprechenden Ausdehnungen in der der Simulation zugrundeliegenden Anfangsverteilung „Urwald“. Hierbei fällt zunächst auf, daß für jedes Entwicklungsstadium die mittlere Ost-West-Ausdehnung der Mosaikflächen und auch ihre Standardabweichung grundsätzlich um etwa die Breite bzw. Länge einer halben Zelle größer ist als die entsprechende Nord-Süd-Ausdehnung und deren Standardabweichung. Warum dieses so ist, wird später deutlich werden⁶⁴.

	Mittlere Ost-West-Ausdehnung in Zellen	Mittlere Ost-West-Ausdehnung in der Anfangsverteilung „Urwald“ in Zellen
Heranwachsstadium	$3,8 \pm 3,3$	$2,7 \pm 1,8$
Optimalstadium	$3,5 \pm 2,8$	$2,4 \pm 1,6$
Zerfallsstadium	$4,5 \pm 4,2$	$3,1 \pm 2,1$

Tab.5 Mittlere Ost-West-Ausdehnung des Heranwachsstadiums, des Optimalstadiums und des Zerfallsstadiums in Zellen (gemittelt über 1000 Zeitschritte) und entsprechende Ausdehnung der verschiedenen Stadien in der Anfangsverteilung „Urwald“. Parameterwerte nach Tab.4.

	Mittlere Nord-Süd-Ausdehnung in Zellen	Mittlere Nord-Süd-Ausdehnung in der Anfangsverteilung „Urwald“ in Zellen
Heranwachsstadium	$3,3 \pm 2,8$	$2,7 \pm 1,8$
Optimalstadium	$3,1 \pm 2,4$	$2,4 \pm 1,6$
Zerfallsstadium	$3,9 \pm 3,6$	$3,1 \pm 2,1$

Tab.6 Mittlere Nord-Süd-Ausdehnung des Heranwachsstadiums, des Optimalstadiums und des Zerfallsstadiums in Zellen (gemittelt über 1000 Zeitschritte) und entsprechende Ausdehnung der verschiedenen Stadien in der Anfangsverteilung „Urwald“. Parameterwerte nach Tab.4.

⁶⁴ vgl. Kapitel VI.4 Einfluß der Hauptwindrichtung

Legt man in einer nur sehr groben Näherung das Produkt von mittlerer Nord-Süd- mal mittlerer Ost-West-Ausdehnung als ein Maß für die flächenhafte Ausdehnung der verschiedenen Stadien zugrunde, ergeben sich mittlere Werte von in etwa um 0,3 ha. Diese Werte stimmen größenordnungsmäßig recht gut mit den in der Literatur beschriebenen überein. So spricht z.B. REMMERT (1991) von Mosaikflächen, die in etwa 0,1 ha bis 2 ha betragen. Nach eigenen Schätzungen auf Grundlage von AUGUSTIN (1987) ergeben sich Flächenmosaike bis etwa 1 ha.

Zwischen der mittleren Ost-West- und Nord-Süd-Ausdehnung der verschiedenen Stadien in der Anfangsverteilung „Urwald“ treten — wie nicht anders zu erwarten war — wegen keines ausgezeichneten Gradienten der Ausdehnung der verschiedenen Stadien bzgl. einer Himmelsrichtung keine signifikanten Unterschiede auf.

Festzustellen ist weiterhin, daß die verschiedenen Ausdehnungen der Entwicklungsstadien in der Anfangsverteilung „Urwald“ in ihrer Größe deutlich geringer ausfallen als die, die sich im Laufe der Simulation einstellen. Dies erscheint nicht näher verwunderlich, wenn man bedenkt, daß bei der Anfangsverteilung „Urwald“ noch keinerlei mögliche räumliche Strukturierungen berücksichtigt wurden. Diese Anfangsverteilung entspricht lediglich einer Situation, bei der durch ein zufälliges Nebeneinander einzelner kleinflächiger urwaldtypischer Strukturen bei Mittelung über den gesamten Wald die relative Häufigkeit der typischerweise in einem Urwald vorkommenden Stadien in etwa der entspricht, wie sie in einem natürlichen Buchenwald zu erwarten wäre.

VI.1.1.3 Relative Häufigkeit verschiedenartiger Mosaikflächen

Tab.7 gibt einen Überblick darüber, welchen Anteil die verschiedenen Entwicklungsstadien an der Gesamtfläche des Modellwaldes haben. Das Optimalstadium ist mit im Mittel etwa 20% am wenigsten vertreten, wogegen das Heranwachsstadium mit ca. 36% und das Zerfallsstadium mit etwa 44% einen wesentlich größeren Anteil an der Gesamtwaldfläche einnehmen.

Auch diese mittleren Werte stimmen gut mit beobachteten Werten überein. Nach KORPEL' (1995) beträgt der Flächenanteil des Heranwachsstadiums in größeren Urwäldern in etwa 34% - 43%, der des Optimalstadiums ungefähr zwischen 20% und 22% und der des Zerfallsstadiums ca. 42% - 45%.

	relative Häufigkeit in %
Heranwachsstadium	35,7 ± 11,9
Optimalstadium	20,3 ± 9,3
Zerfallsstadium	44,1 ± 11,8

Tab.7 Relativer Anteil der verschiedenen Entwicklungsstadien an der Gesamtfläche des Modellwaldes (gemittelt über 1000 Zeitschritte). Parameterwerte nach Tab.4.

VI.1.2 Typische Zeitstrukturen

Neben diesen ersten globalen räumlichen Betrachtungen sollen nun typische sich einstellende Zeitstrukturen im Mittelpunkt des Interesses stehen.

VI.1.2.1 Flächenbedeckung in den unterschiedlichen Schichten

Als erstes soll ein näherer Blick auf die zeitliche Entwicklung der Bedeckung in den verschiedenen Höhenschichten geworfen werden. In Abb.13 a) bis s) ist diese zeitliche Entwicklung für einen Waldausschnitt von 1 ha in 15-Jahresschritten über einen Zeitraum von 270 Jahren detailliert dargestellt. Während dieses Zeitraums traten keine außergewöhnlichen exogenen Störungen (d.h. starke oder stärkste Stürme) auf. Das Augenmerk soll dabei auf das markierte, drei mal drei Zellen große, Teilgebiet der Abb. 13 gerichtet sein. Zum Ausgangszeitpunkt (Abb. 13 a)) liegt in dem betrachteten Untergebiet ein Zustand vor, der dadurch gekennzeichnet ist, daß das Hauptkronendach nur noch sehr schwach ausgebildet ist und große Lücken aufweist. Bäume unterer Schichten sind dagegen schon verstärkt vertreten. Vom Erscheinungsbild her entspricht dieser Zustand in etwa einem, den man zum Ende des Zerfallsstadiums erwarten würde (vgl. KORPEL' 1995). Im Laufe der Zeit wachsen dann die Bäume der unteren Schichten langsam heran (Abb. 13 b) - d)) und nehmen schließlich auch von den höheren Schichten Besitz. Letztendlich sind Bäume praktisch aller Höhenstufen vertreten (Abb. 13 e) - h)). Dieser Entwicklungsverlauf wird als typisch für das Heranwachsstadium angesehen (vgl. KORPEL' 1995). Durch das sich nun fortan immer stärker schließende Kronendach werden die Lichtverhältnisse für die Bäume in den tieferliegenden Schichten immer ungünstiger, so daß ein Verkümmern und Absterben der Bäume dieser Schichten zu beobachten ist (vgl. KORPEL' 1995). Der Wald nimmt auf dieser Teilfläche schließlich einen einschichtig dominierten Bestandsaufbau an und erhält dank seines dicht geschlossenen Kronendaches das Aussehen eines Hallenwaldes (Abb. 13 i) - k)). Hier ist somit ein Zustand erreicht, der als typisch für das Optimalstadium angesehen wird (vgl. KNAPP u. JESCHKE 1991, KORPEL' 1995). Nach und nach sterben zunächst vereinzelt (Abb. 13 l) - p)), später dann auch vermehrt (Abb. 13 q) - s)), die das Hauptkronendach bildenden Baumriesen ab. Durch die dadurch veränderten Lichtverhältnisse am

Ergebnisse mit Diskussionen

Waldboden kann Buchenjungwuchs erneut Fuß fassen, und es entsteht auf dieser Teilfläche nach etwa 270 Jahren eine Waldstruktur, die der Ausgangssituation sehr ähnelt. D.h.: Für diese kleine Teilfläche konnte mit Hilfe des Modells ein Entwicklungszyklus mit einer Dauer von ca. 270 Jahren nachgewiesen werden. Diese Länge stimmt relativ gut mit der in der Literatur angegebenen überein. KORPEL' (1995) berichtet für die Buchenwälder der Westkarpaten von einer Zyklusdauer von in etwa 230 bis 250 Jahren. Neben der chronologischen als richtig angesehenen Abfolge der verschiedenen Entwicklungsstadien (→ Heranwachstadium → Optimalstadium → Zerfallsstadium → Heranwachstadium → u.s.w.) kann zusätzlich aus den Modellergebnissen auch die Zeitdauer der verschiedenen Entwicklungsstadien abgeschätzt werden. So beträgt nach dieser Untersuchung bei ca. 270-jähriger Zyklusdauer das Heranwachstadium in etwa 105 Jahre, das Optimalstadium ca. 45 Jahre und das Zerfallsstadium ungefähr um 120 Jahre. Auch diese Werte stimmen qualitativ und quantitativ gut mit den in der Literatur angegebenen überein. KORPEL' (1995) veranschlagt für das Heranwachstadium 85 bis 100 Jahre, für das Optimalstadium 40 bis 50 Jahre und für das Zerfallsstadium 95 bis 110 Jahre bei einer von ihm angenommenen Zyklusdauer von in etwa 230 bis 250 Jahren.

Dennoch muß an dieser Stelle aber darauf hingewiesen werden, daß die Entwicklungsdynamik auf anderen Teilgebieten des simulierten Waldes teilweise nicht ganz so deutlich ausgeprägt ist, wie es hier auf dieser kleinen Teilfläche der Fall ist. Qualitativ ist der Verlauf zwar meist sehr ähnlich, aber durch unvorhersagbare Zufallseinflüsse (z.B. plötzliches Absterben von Bäumen in noch jungen Jahren) kann er variieren (vgl. dazu Teilgebiete außerhalb des markierten Bereichs in Abb.13). So läßt sich als ein Zwischenergebnis festhalten, daß eine Entwicklungsdynamik, wie sie u.a. KORPEL' für den Buchenwald beschreibt, auf Kleinflächen durchaus existieren kann, aber aufgrund der Unvorhersagbarkeit von Zufallseinflüssen in dieser starren Form nicht existieren muß.

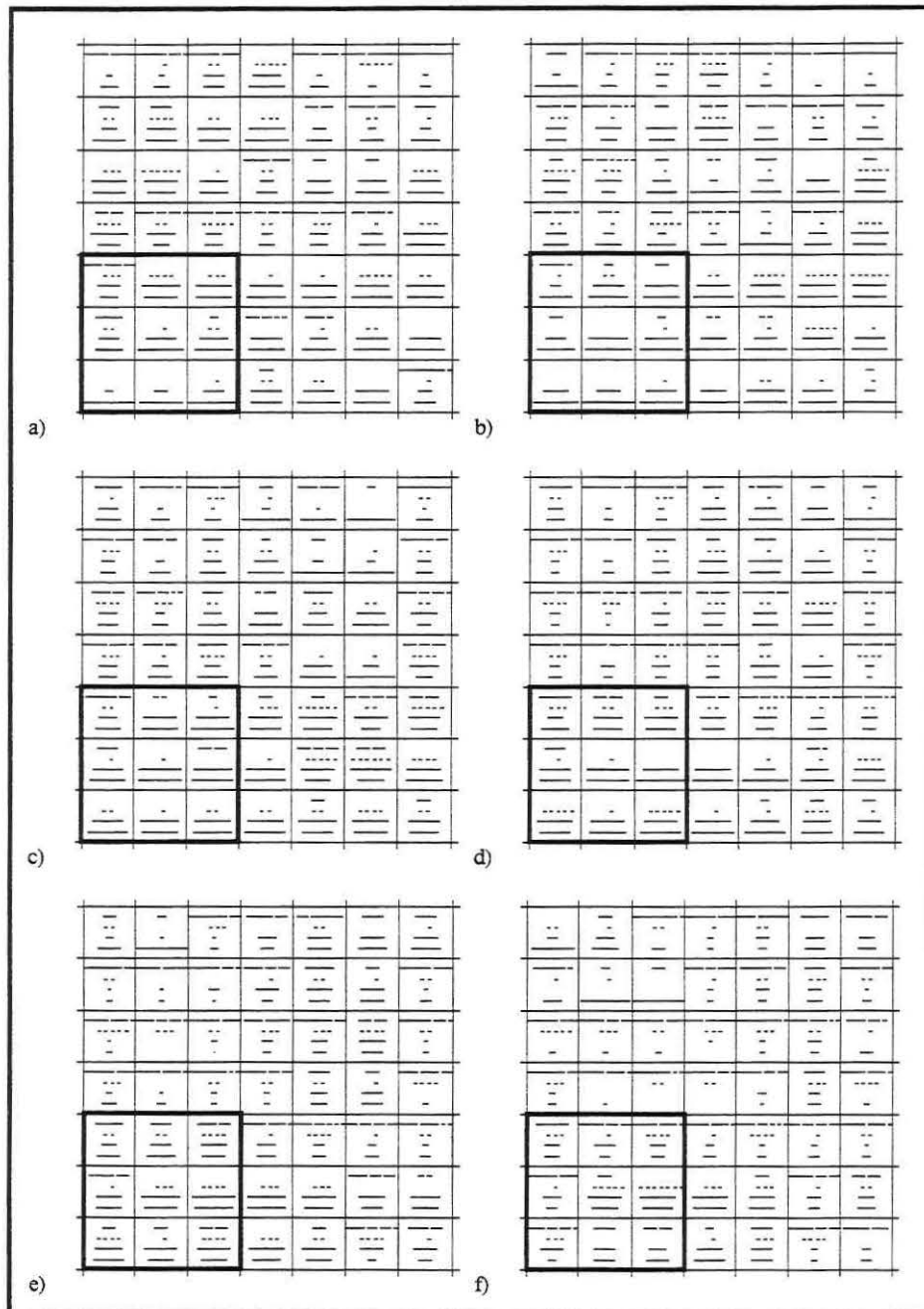


Abb.13 Zeitliche Entwicklung des Buchenwaldes auf einem 1 ha großen Gebiet. Ein Zeitschritt entspricht 15 Jahren. Parameterwerte nach Tab.4.

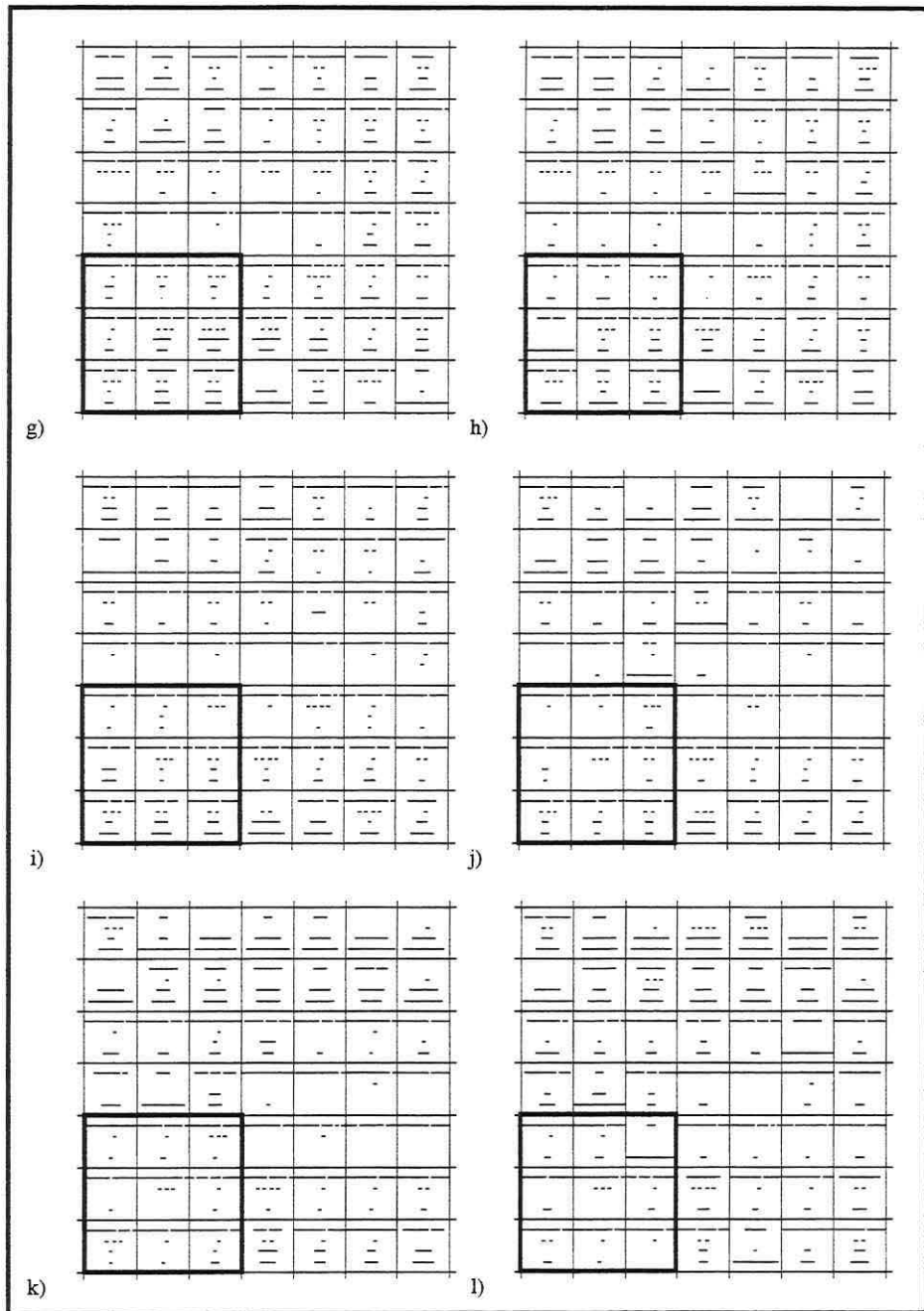


Abb.13 (Fortsetzung 1) Zeitliche Entwicklung des Buchenwaldes auf einem 1 ha großen Gebiet. Ein Zeitschritt entspricht 15 Jahren. Parameterwerte nach Tab.4.

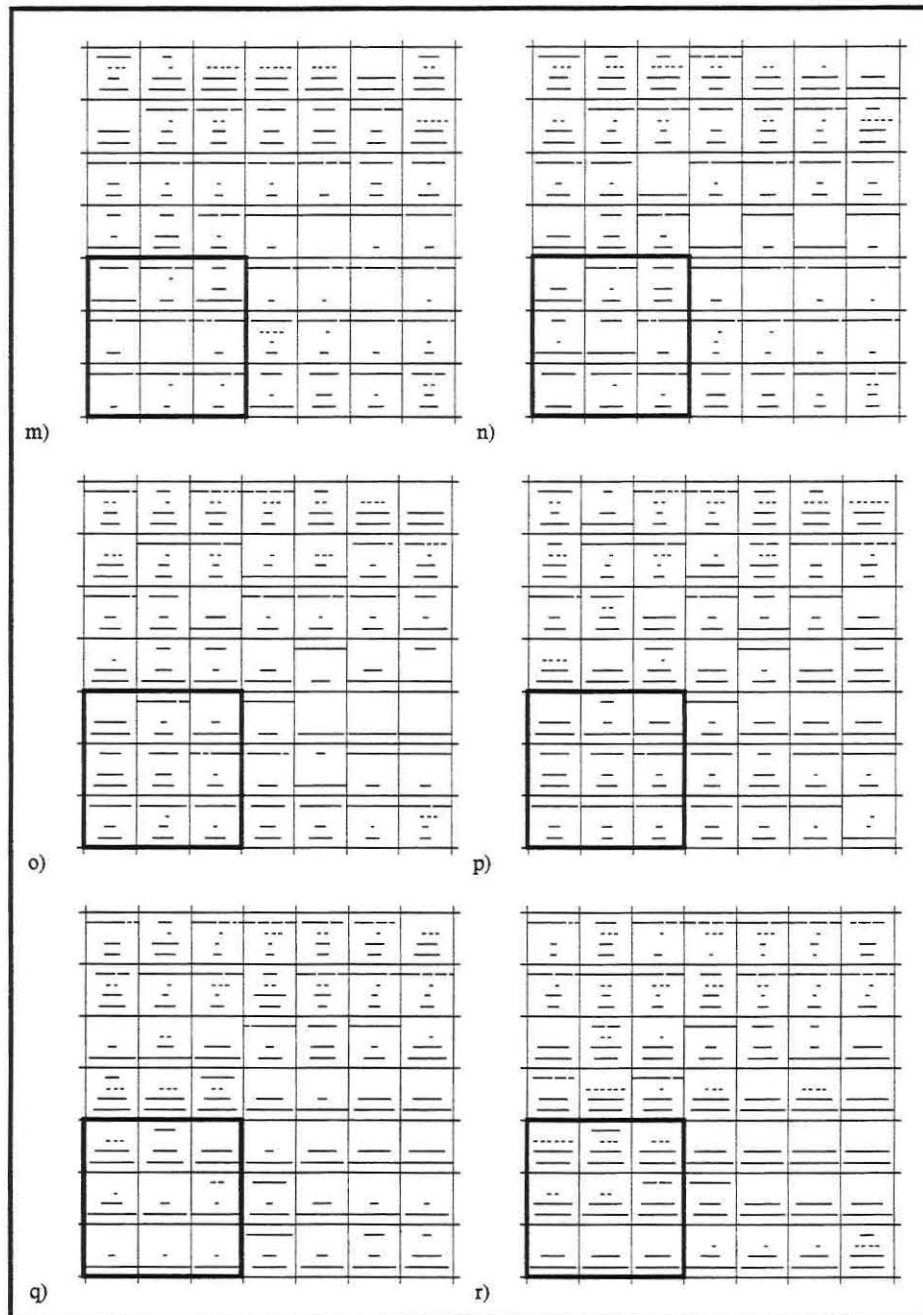


Abb.13 (Fortsetzung 2) Zeitliche Entwicklung des Buchenwaldes auf einem 1 ha großen Gebiet. Ein Zeitschritt entspricht 15 Jahren. Parameterwerte nach Tab.4.

Ergebnisse mit Diskussionen

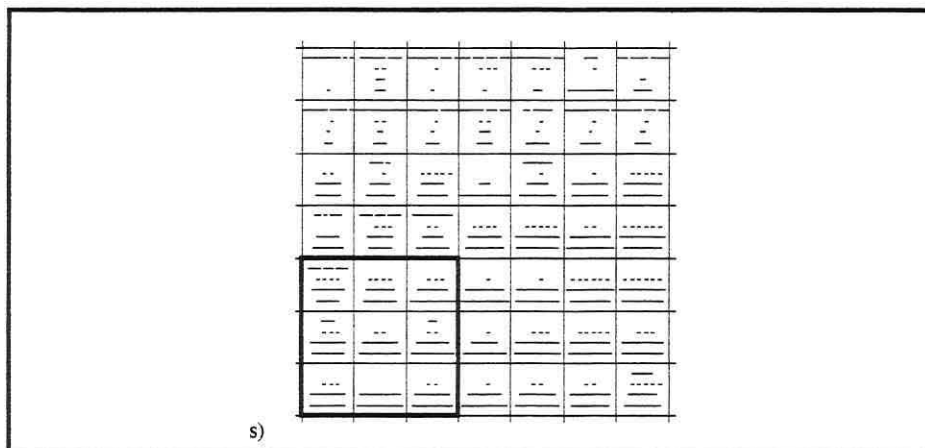


Abb.13 (Fortsetzung 3) Zeitliche Entwicklung des Buchenwaldes auf einem 1 ha großen Gebiet. Ein Zeitschritt entspricht 15 Jahren. Parameterwerte nach Tab.4.

Weitere Aufschlüsse über die zeitliche Veränderung des Flächenbedeckungsgrades in den verschiedenen Schichten gibt Abb.14. Dargestellt ist für jede Schicht F_i ($i = I$ (Jungbuchenschicht), ..., IV (Hauptkronendach)) der Bedeckungsgrad an der Gesamtwaldfläche über einen Zeitraum von 3000 Jahren hinweg. Für alle vier Schichten gilt, daß die jeweiligen Bedeckungsgrade mehr oder weniger starken Schwankungen um einen für jede Schicht unterschiedlich großen mittleren Wert unterliegen. Besonders auffällig sind die durch Stürme verursachten unmittelbaren Auswirkungen auf die Flächenbedeckungsgrade.⁶⁵ Extreme Sturmereignisse sind in Abb.14 und sämtlichen folgenden Abbildungen durch Kreuze (starke Stürme) und ausgefüllte Kreise (stärkste Stürme) auf der oberen horizontalen Achse dargestellt. Zunächst ist durch das Auftreten extremer Sturmereignisse ein starker Rückgang des Flächenbedeckungsgrades im Hauptkronendach und eine geringfügige Abnahme des Bedeckungsgrades in der unteren Kronenschicht zu beobachten (vgl. Sturmereignis, welches durch den Pfeil in Abb.14 markiert ist). Dieses scheint nicht weiter verwunderlich, da Stürme nur Schäden in den oberen beiden Schichten anrichten können. Durch die

⁶⁵ vgl. dazu auch Kapitel VI.3 Einfluß von Sturmereignissen

verminderten Bedeckungsgrade in den beiden oberen Schichten und dem daraus resultierenden erhöhten Lichteinfall in tieferliegende Schichten folgt unmittelbar ein verstärktes Aufkommen an Jungwuchs, d.h. die Bedeckungsgrade in den unteren Schichten steigen zunächst an. Zeitverzögert ergibt sich daraus schließlich auch ein starkes Ansteigen des Anteils an Buchen der unteren Kronenschicht und kurze Zeit später dann auch im Hauptkronendach, wodurch als Folge darauf (Abschattung tieferliegender Schichten) der Anteil der Buchen in den unteren Schichten wieder reduziert wird. Der auf einen Sturm folgende Anstieg fällt wegen des dadurch verursachten synchronisierten und ungefähr zeitgleichen Heranwachsens von Buchen teilweise so stark aus, daß ein deutliches Überschießen der Flächenbedeckungen über ihre jeweiligen langjährigen Mittelwerte erkennbar wird. Durch diese Synchronisation bezüglich des Heranwachsens von Buchen auf Teilflächen des Waldes erfolgt dann später, als Resultat darauf, ein gehäuftes Absterben der Buchen des Hauptkronendaches innerhalb nur kurzer Zeit, was zu einer erneuten Reduktion des Flächenbedeckungsgrades im Hauptkronendach führt. Die Auswirkungen darauf sind aufgrund des nicht exakt zeitgleichen Absterbens der Hauptkronendachbäume zwar geringer als die durch die Sturmereignisse hervorgerufenen, aber dennoch ähnlich derer, die durch Stürme verursacht werden.

In Abb.15 ist explizit die zeitliche Entwicklung der prozentualen Lückenfläche im Hauptkronendach, d.h. des relativen Anteils der von Hauptkronendachbuchen nicht eingenommenen Fläche im Hauptkronendach des Buchenwaldes, dargestellt, wobei noch einmal die starken Einflüsse von Sturmereignissen auf die Struktur in dieser Schicht sichtbar werden.

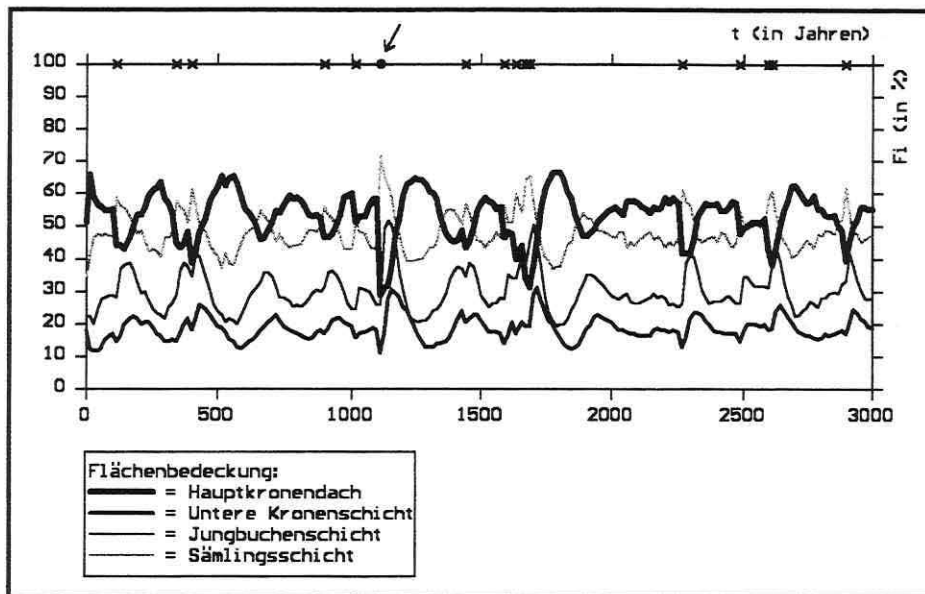


Abb.14 Zeitliche Entwicklung des Flächenbedeckungsgrades in den verschiedenen Hörschichten des Buchenwaldes. Kreuze auf der oberen horizontalen Achse markieren exogene Störungen durch starke Stürme, ausgefüllte Kreise exogene Störungen durch stärkste Stürme. Parameterwerte nach Tab.4.

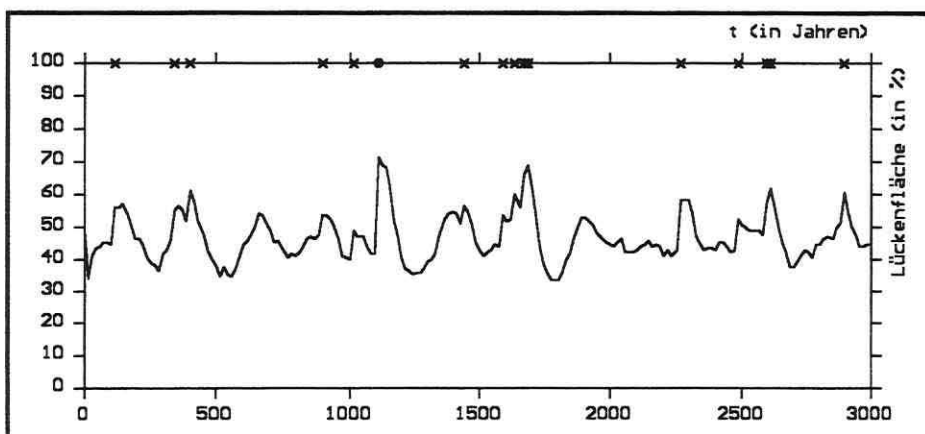


Abb.15 Zeitliche Entwicklung der prozentualen Lückenfläche, d.h. des relativen Anteils der von Hauptkronendachbuchen nicht eingenommenen Fläche im Hauptkronendach des Buchenwaldes. Kreuze auf der oberen horizontalen Achse markieren exogene Störungen durch starke Stürme, ausgefüllte Kreise exogene Störungen durch stärkste Stürme. Parameterwerte nach Tab.4.

Tab.8 gibt Aufschluß darüber, wieviel Prozent der Gesamtwaldfläche durchschnittlich durch Buchen der verschiedenen Schichten bedeckt werden. Dabei wird ein Vergleich zwischen den sich im langjährigen Mittel in der Simulation einstellenden Bedeckungsgraden und einer entsprechenden empirisch abgeleiteten Schätzung angestellt. Empirisch ergeben sich nach eigenen Auswertungen auf Grundlage verschiedener Quellen (KNAPP u. JESCHKE 1991, KORPEL' 1992, 1995, MAYER 1971) bei einem angenommenen Flächenanteil am Gesamtwald von 35% - 38% für das Heranwachsstadium, 20% - 22% für das Optimalstadium und 42% - 45% für das Zerfallsstadium folgende minimale bzw. maximale Flächenbedeckungsgrade: Etwa 12% - 64% in der Sämlingsschicht, 7% - 43% in der Jungbuchenschicht, 7% - 30% in der unteren Kronenschicht und 24% - 72% im Hauptkronendach. Diese minimalen bzw. maximalen Werte stellen allerdings Extremwerte dar und sind im Gesamtwald höchstens kurzzeitig zu erwarten. Als grober Anhaltspunkt für die durchschnittlich insgesamt im Wald vorherrschenden Flächenbedeckungsgrade bieten sich statt dessen eher die entsprechenden Mittelwerte an. Betrachtet man nur diese, so ergeben sich mittlere Bedeckungsgrade von ca. 38,0% in der Sämlingsschicht, 25,0% in der Jungbuchenschicht, 18,5% in der unteren Kronenschicht und 48,0% im Hauptkronendach. Diese, aus empirischen Beobachtungen abgeleiteten Ergebnisse stimmen tendentiell somit recht gut mit denen überein, die das Modell liefert.

	Mittlerer prozentualer Anteil des Flächenbedeckungsgrades	
	<i>Simulation</i> (gemittelt über 1000 Zeitschritte)	<i>Empirisch abgeleitete Schätzung</i>
Sämlingsschicht	48,9 ± 6,3	38,0 ± 26,0
Jungbuchenschicht	30,9 ± 6,7	25,0 ± 18,0
Untere Kronenschicht	19,1 ± 3,7	18,5 ± 11,5
Hauptkronendach	52,4 ± 7,8	48,0 ± 24,0

Tab.8 Mittlerer prozentualer Anteil des Flächenbedeckungsgrades durch die verschiedenen Schichten.

VI.1.2.2 Lichtverhältnisse im Gesamtwald und in Waldausschnitten

Als nächstes soll die zeitliche Veränderung der Lichtverhältnisse im gesamten Modellwald und in kleineren Waldausschnitten (Subsystemen) näher untersucht werden. Abb.16 zeigt die Lage zweier knapp 0,2 ha großer Waldausschnitte innerhalb des Gesamtsystems. Als Indikator für die jeweiligen Lichtverhältnisse wird der durchschnittliche Lichteinflußwert⁶⁶ pro Zelle im Subsystem 1, im Subsystem 2 bzw. im Gesamtsystem angesehen. Je größer diese durchschnittlichen Lichteinflußwerte pro Zelle ausfallen, desto stärker ist der durchschnittliche Lichteinfall in das betrachtete System anzusehen. Für die Bestimmung der durchschnittlichen Lichteinflußwerte pro Zelle werden für jedes der Systeme jeweils nur die Zellen berücksichtigt, aus denen sich das entsprechende System zusammensetzt. In unserem Fall wird der durchschnittliche Lichteinflußwert pro Zelle im Subsystem 1 und im Subsystem 2 in jedem Zeitschritt als Mittelwert der jeweiligen Lichteinflußwerte der $3 \cdot 3$ Zellen = 9 Zellen der entsprechenden Subsysteme bestimmt. Derjenige des Gesamtsystems berechnet sich in jedem Zeitschritt als Mittelwert der Lichteinflußwerte aller $40 \cdot 40$ Zellen = 1600 Zellen.

Abb.17 gibt Aufschluß über den zeitlichen Verlauf der durchschnittlichen Lichteinflußwerte pro Zelle in den drei Systemen. Zu erkennen ist, daß alle drei Kurven um etwa denselben mittleren Wert schwanken, wobei auffällt, daß die Schwankungen im Gesamtsystem wesentlich geringer ausgeprägt sind als die innerhalb der beiden Subsysteme. Dieses läßt sich darauf zurückführen, daß die Waldstruktur innerhalb der Subsysteme zeitweise Formen annehmen kann, die einen extrem starken (hoher durchschnittlicher Lichteinflußwert pro Zelle (z.B. Zerfallsstadium)) oder schwachen (niedriger durchschnittlicher Lichteinflußwert pro Zelle (z.B. Optimalstadium)) Lichteinfall zulassen. Da solche Waldstrukturen gewöhnlich aber nicht in allen Teilgebieten des Waldes zeitgleich auftreten, herrschen zum selben

⁶⁶ vgl. Anhang A1. Nachbarschaftswechselwirkung: Licht

Zeitpunkt im Gesamtsystem sowohl Gebiete mit starkem als auch Gebiete mit extrem schwachen Lichteinfall vor. Dieses läßt sich auch in Abb.17 gut erkennen. So weist das Subsystem 1 des öfteren hohe Durchschnittswerte des Lichteinflußwertes pro Zelle auf, während Subsystem 2 zum selben Zeitpunkt eher geringe Durchschnittswerte aufzuweisen hat und umgekehrt. Bei der Betrachtung des durchschnittlichen Lichteinfalls im Gesamtwald werden diese kleinräumigen Extremzustände zum großen Teil herausgemittelt, und es ergibt sich als Resultat für den Gesamtwald ein Zustand, der — von extremen Störungen durch besonders starke Stürme einmal abgesehen — im Mittel betrachtet zu keinem Zeitpunkt weder durch besonders starken oder schwachen Lichteinfall geprägt ist, so wie dieses zeitweise in den Subsystemen der Fall ist.

Diese Feststellung ist von entscheidender Bedeutung insbesondere in Bezug auf Fragestellungen bzgl. der Biodiversität im Urwald. Zum einen entstehen offenbar kleinflächig innerhalb des Gesamtwaldes immer wieder Strukturen, die ein Höchstmaß oder aber auch nur ein Mindestmaß an Lichteinfall zulassen. Dieses bedeutet, daß Arten, welche speziell an diese Extremzustände gebunden sind, auf Kleinflächen immer wieder die für sie zum Überleben notwendigen Bedingungen vorfinden. Andererseits ergibt sich durch eine ausreichend große Waldfläche⁶⁷ aber auch die Sicherheit, daß solche Extremzustände nicht das gesamte Waldgebiet erfassen. D.h. in einem genügend großen Wald herrschen somit ständig Teilgebiete mit gänzlich unterschiedlichen Lichtverhältnissen vor, wodurch eine Voraussetzung für die Etablierung und das Überleben von an verschiedene Lichtverhältnisse und damit auch Umweltbedingungen angepaßte Arten gegeben ist.

Zusätzlich ist festzustellen, daß Stürme einen insgesamt synchronisierenden Einfluß in bezug auf einen erhöhten Lichteinfall im Wald haben. Bei Sturmereignissen ist ausnahmslos ein Ansteigen des durchschnittlichen Lichteinflußwertes pro Zelle im Gesamtsystem

⁶⁷ zur Abschätzung der ausreichenden Größe der Waldfläche vgl. Kapitel VI.2.1 Waldgröße

Ergebnisse mit Diskussionen

festzustellen. Der Grund hierfür ist, daß das Kronendach zu diesen Zeitpunkten auf vielen kleineren Teilgebieten des Waldes gleichzeitig gelichtet wird, wodurch ein sofortiges Ansteigen der durchschnittlichen Lichteinflußwerte pro Zelle in diesen Teilgebieten und damit auch im Gesamtsystem die Folge ist.

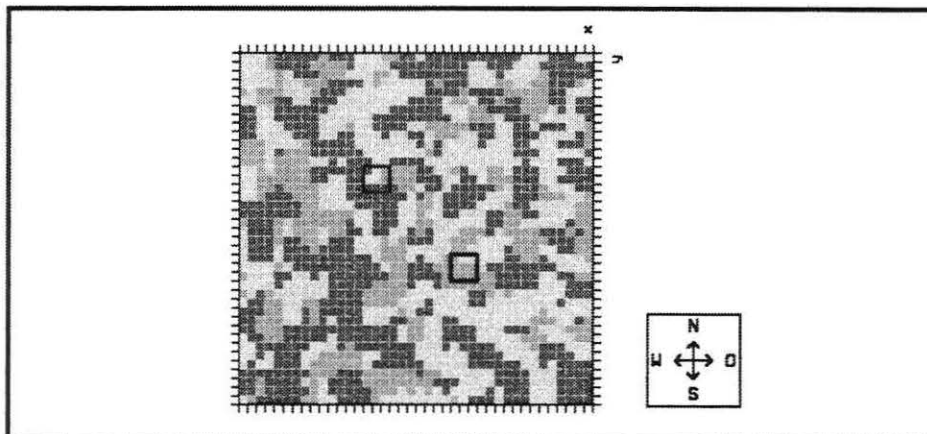


Abb.16 Lage der Subsysteme 1 (dünnwandiges Quadrat) und 2 (dickwandiges Quadrat) innerhalb des Modellwaldes.

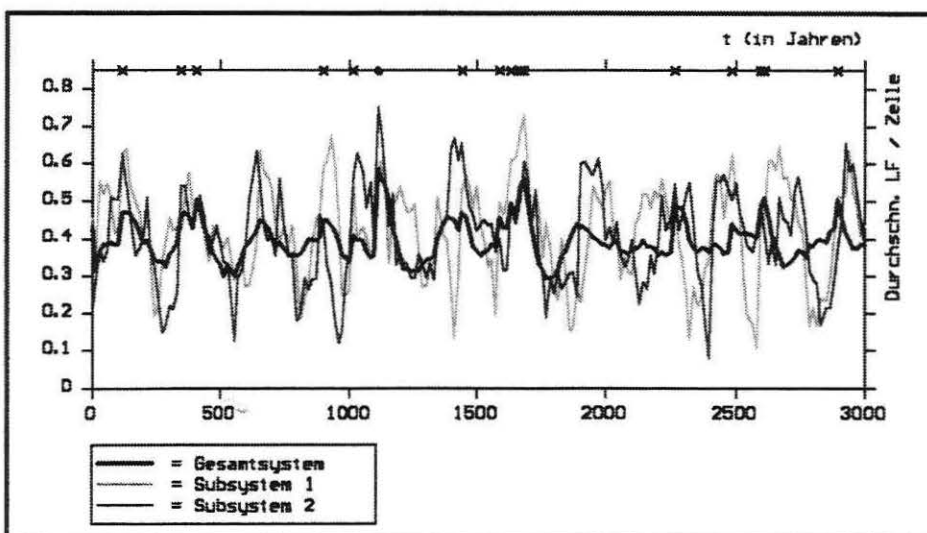


Abb.17 Zeitliche Entwicklung des durchschnittlichen Lichteinflußwertes pro Zelle im Subsystem 1, im Subsystem 2 und im Gesamtsystem nach Abb.16. Kreuze auf der oberen horizontalen Achse markieren exogene Störungen durch starke Stürme, ausgefüllte Kreise exogene Störungen durch stärkste Stürme. Parameterwerte nach Tab.4.

Tab.9 gibt einen quantitativen Überblick über den mittleren durchschnittlichen Lichteinflußwert pro Zelle im Gesamtsystem und in den Teilsystemen nach Abb.16 und über deren entsprechende Standardabweichung. Diese quantitativen Werte bestätigen die zu Abb.17 gemachten Aussagen bzgl. der Stärke der Schwankungen. Auffällig ist jedoch, daß der mittlere durchschnittliche Lichteinflußwert pro Zelle im Gesamtsystem etwas geringer ausfällt als in den Teilsystemen.

	Mittlerer durchschnittlicher Lichteinflußwert pro Zelle
Gesamtsystem	$0,40 \pm 0,06$
Subsystem 1	$0,42 \pm 0,13$
Subsystem 2	$0,42 \pm 0,13$

Tab.9 Mittlerer durchschnittlicher Lichteinflußwert pro Zelle (gemittelt über 1000 Zeitschritte). Subsysteme und Gesamtsystem nach Abb.16. Parameterwerte nach Tab.4.

Worin könnten die Ursachen hierfür liegen? Da die Subsysteme 1 und 2 sich im Innern des Waldes befinden und trotz des unterschiedlichen individuellen zeitlichen Verlaufs ihres durchschnittlichen Lichteinflußwertes pro Zelle für diesen im Mittel identische Werte ausweisen, welche insgesamt höher liegen als die entsprechenden des Gesamtwaldes, liegt die Vermutung nahe, daß Randeinflüsse — hervorgerufen durch die Lage des Modellwaldes innerhalb einer von hoher Vegetation freien Umgebung — hierfür verantwortlich sein könnten. Zur Untersuchung von möglicherweise vorhandenen Randeinflüssen wird der gesamte Wald in insgesamt 25 gleich große, quadratische Subsysteme aufgeteilt, welche hinsichtlich der in ihnen vorherrschenden Lichtverhältnisse näher betrachtet werden (vgl. Abb. 18). Dabei fällt auf, daß sich das Waldgebiet in sieben — hinsichtlich des Wertes des mittleren durchschnittlichen Lichteinflußwertes pro Zelle — zusammenhängende Zonen untergliedern läßt:

Ergebnisse mit Diskussionen

- 1) Die am westlichen Waldrand gelegenen Subsysteme 1, 6, 11, 16 und 21 weisen die durchschnittlich niedrigsten mittleren Lichteinflußwerte pro Zelle auf.
- 2) Ein geringfügig höherer Wert ergibt sich im an der südöstlichen Ecke des Waldes gelegenen Subsystem 5.
- 3) Wiederum nur geringfügig höher fällt der Wert im nordöstlich gelegenen Subsystem 25 aus.
- 4) Danach folgen die im Süden gelegenen Subsysteme 2, 3 und 4 sowie
- 5) die sich am östlichen Waldrand befindenden Subsysteme 10, 15 und 20.
- 6) Noch etwas höhere Werte des durchschnittlichen Lichteinflußwertes pro Zelle weisen die am nördlichen Rand gelegenen Subsysteme 22, 23 und 24 auf.
- 7) Die höchsten Werte ergeben sich schließlich im Waldkerngebiet, welches von den Subsystemen 7, 8, 9, 12, 13, 14, 17, 18 und 19 gebildet wird.

Abb. 19 verdeutlicht dieses Ergebnis noch einmal graphisch.

Ganz offensichtlich sind Randeinflüsse vorhanden, die zu dem Ergebnis führen, daß nahe des äußeren Randes des Modellwaldes ein (von der Himmelsrichtung abhängiger) im Mittel geringerer Lichteinfall als im Waldesinnern vorherrscht. Dieses überrascht zunächst ein wenig, da gerade Waldränder als Grenze zwischen sehr unterschiedlichen Lebensräumen von licht- und wärmeliebenden Arten gewöhnlich als besonders attraktiv empfunden werden (SCHERZINGER 1996). Bedacht werden muß dabei allerdings, daß der in heutiger Form als naturnah angesehene Waldrand mit tief gestaffeltem und besonders artenreichem Waldsaum ursprünglich praktisch nicht vorkam (KÜSTER 1992). Relativ scharf abgegrenzte Waldränder erscheinen daher von Natur aus durchaus möglich, wenn man bedenkt, daß die Bäume bis unmittelbar an ihre möglichen Ausbreitungsgrenzen (z.B. Flußufer oder Felsbereiche) vordringen können.

21	22	23	24	25
$0,37 \pm 0,10$	$0,41 \pm 0,09$	$0,41 \pm 0,09$	$0,41 \pm 0,09$	$0,39 \pm 0,09$
16	17	18	19	20
$0,37 \pm 0,10$	$0,42 \pm 0,09$	$0,42 \pm 0,09$	$0,42 \pm 0,09$	$0,40 \pm 0,09$
11	12	13	14	15
$0,37 \pm 0,10$	$0,42 \pm 0,09$	$0,42 \pm 0,09$	$0,42 \pm 0,09$	$0,40 \pm 0,09$
6	7	8	9	10
$0,37 \pm 0,10$	$0,42 \pm 0,09$	$0,42 \pm 0,09$	$0,42 \pm 0,09$	$0,40 \pm 0,09$
1	2	3	4	5
$0,37 \pm 0,10$	$0,40 \pm 0,10$	$0,40 \pm 0,10$	$0,40 \pm 0,10$	$0,38 \pm 0,09$



Abb.18 Unterteilung des Modellwaldes nach Abb. 16 in 25 gleich große Subsysteme von jeweils etwa 1,3 ha Größe und Angabe des mittleren durchschnittlichen Lichteinflußwertes pro Zelle in den Subsystemen zuzüglich Standardabweichung (gemittelt über 1000 Zeitschritte). Parameterwerte nach Tab.4.

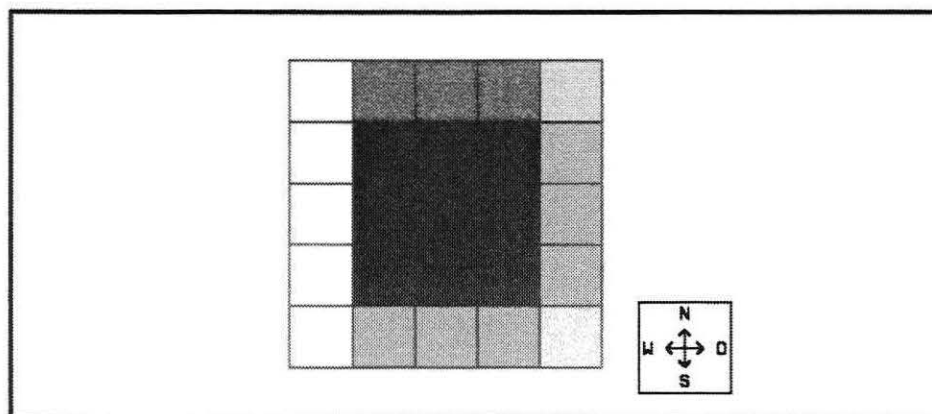


Abb.19 Lichtverhältnisse in Waldteilausschnitten. Je dunkler der Grauton eines Subsystems, desto größer ist der mittlere durchschnittliche Lichteinflußwert pro Zelle innerhalb dieses Systems.

Ergebnisse mit Diskussionen

Daß die Simulation gerade am äußeren Waldrand einen durchschnittlich geringeren Lichteinfall in untere Schichten liefert, liegt vor allem an folgenden Dingen: Zum einen sind Bäume des äußeren Waldrandes besonders unanfällig Sturmereignissen gegenüber⁶⁸, so daß sie diesen nur selten zum Opfer fallen. Zum anderen wird durch das stetige Vorhandensein seitlichen Lichteinfalls dafür gesorgt, daß am äußeren Waldrand praktisch zu jedem Zeitpunkt Unterwuchs anzutreffen ist, der entstehende Lücken rasch wieder schließt. Durch das dementsprechend resultierende Ausbleiben längerer Zeitabschnitte eines fehlenden Kronendaches fallen die Zeiten, in denen ein besonders hoher Lichteinfall in untere Schichten festzustellen ist, verhältnismäßig kurz aus. So resultiert dort schließlich ein im langjährigen Mittel geringerer Lichteinfall.

Die Größe der Verringerung des durchschnittlichen Lichteinfalls am Waldrand hängt von der Lage des jeweiligen Randgebietes ab und wird direkt durch die dortige horizontale Waldstruktur bestimmt. Indirekt müssen jedoch die nach Himmelsrichtung unterschiedlich ausfallenden Lichteinflüsse durch die nächste Umgebung⁶⁹ sowie die aus unterschiedlichen Himmelsrichtungen kommenden schädigenden Stürme, welche die Entstehung länglicher, ähnlich erscheinender Waldstrukturen begünstigen⁷⁰, für die je nach Lage des Waldrandes etwas unterschiedlich ausfallenden durchschnittlichen Strukturveränderungen verantwortlich gemacht werden.

Da an den jeweiligen Waldrändern teilweise unterschiedliche durchschnittliche Strukturänderungen zu erwarten sind, die mit durchschnittlich veränderten Lichtverhältnissen (zwangsläufig auch in der näheren Umgebung des Waldes) einhergehen, ist es vorstellbar, daß gerade im Grenzbereich zwischen dem Ökosystem Buchenwald und einem angrenzenden Ökosystem sich je nach Lage des angrenzenden Systems speziell an die jeweils etwas unterschiedlichen Bedingungen angepasste Arten etablieren werden. D.h. es ist davon auszugehen, daß der östliche

⁶⁸ vgl. Anhang A1. Regel 83)

⁶⁹ vgl. Anhang A1. Nachbarschaftswechselwirkung: Licht

⁷⁰ vgl. Kapitel VI.4 Einfluß der Hauptwindrichtung

Grenzbereich für anderen Arten attraktiver erscheint als der westliche, der südliche wiederum für andere als der nördliche.

Nähere Untersuchungen zeigen, daß Randeinflüsse, welche sich bzgl. der Lichtverhältnisse im Wald bemerkbar machen, in einer Entfernung von 8 Zellen (d.h. etwa 114 m) vom äußeren Waldrand praktisch ausgeschlossen werden können. In einer Entfernung von 4 Zellen (d.h. etwa 57m) vom Waldrand sind diese Einflüsse gerade noch nachweisbar und nehmen dann zum Waldrand hin zu.

Alle bisher präsentierten Ergebnisse (und auch alle folgenden) beziehen sich auf einen simulierten Buchenurwald unter Einbeziehung seiner Randbereiche; was sinnvoll erscheint, wenn man davon ausgeht, daß unser Modellwald einen fiktiven Buchenwald darstellt, der sich nicht innerhalb eines wie auch immer gearteten größeren Waldkomplexes befindet, sondern von flachem Gelände, frei von hoher Vegetation, umgeben ist.

VI.1.2.3 Entwicklungsstadien

In der Abb.20 a) bis s) ist für den Modellwald die zeitliche Entwicklung hinsichtlich seiner ihm innewohnenden Strukturen (repräsentiert durch das Heranwachs-, Optimal- und Zerfallsstadium) über einen Zeitraum von 270 Jahren dargestellt, in denen keine außergewöhnlich starken Störungen durch Stürme auftraten. Gut zu erkennen ist der fortlaufende Wechsel der Strukturen bzw. der Entwicklungsstadien auf eng begrenzten Flächen und die sich von Zeitschritt zu Zeitschritt unregelmäßig verändernden Kleinflächentexturen. Auch dieses sind Modellergebnisse, die in Einklang mit empirischen Beobachtungen (KORPEL' 1992, 1995) stehen und somit einen weiteren Beitrag in Richtung Vertrauenswürdigkeit des Modells liefern.

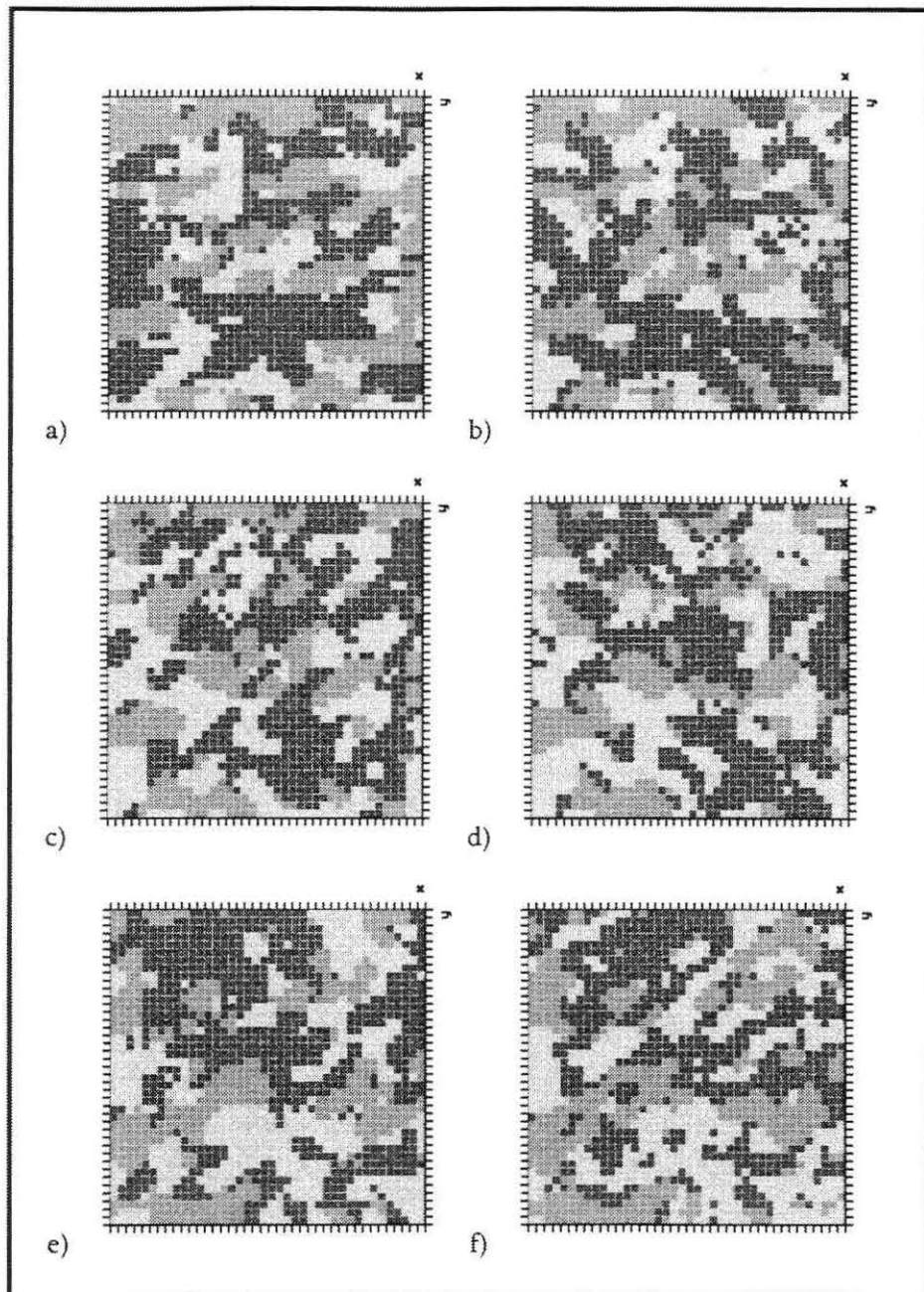


Abb.20 Zeitliche Entwicklung des Buchenwaldes (hellgrau = Heranwachsstadium, mittelgrau = Optimalstadium, dunkelgrau = Zerfallsstadium). Ein Zeitschritt entspricht 15 Jahren. Parameterwerte nach Tab.4.

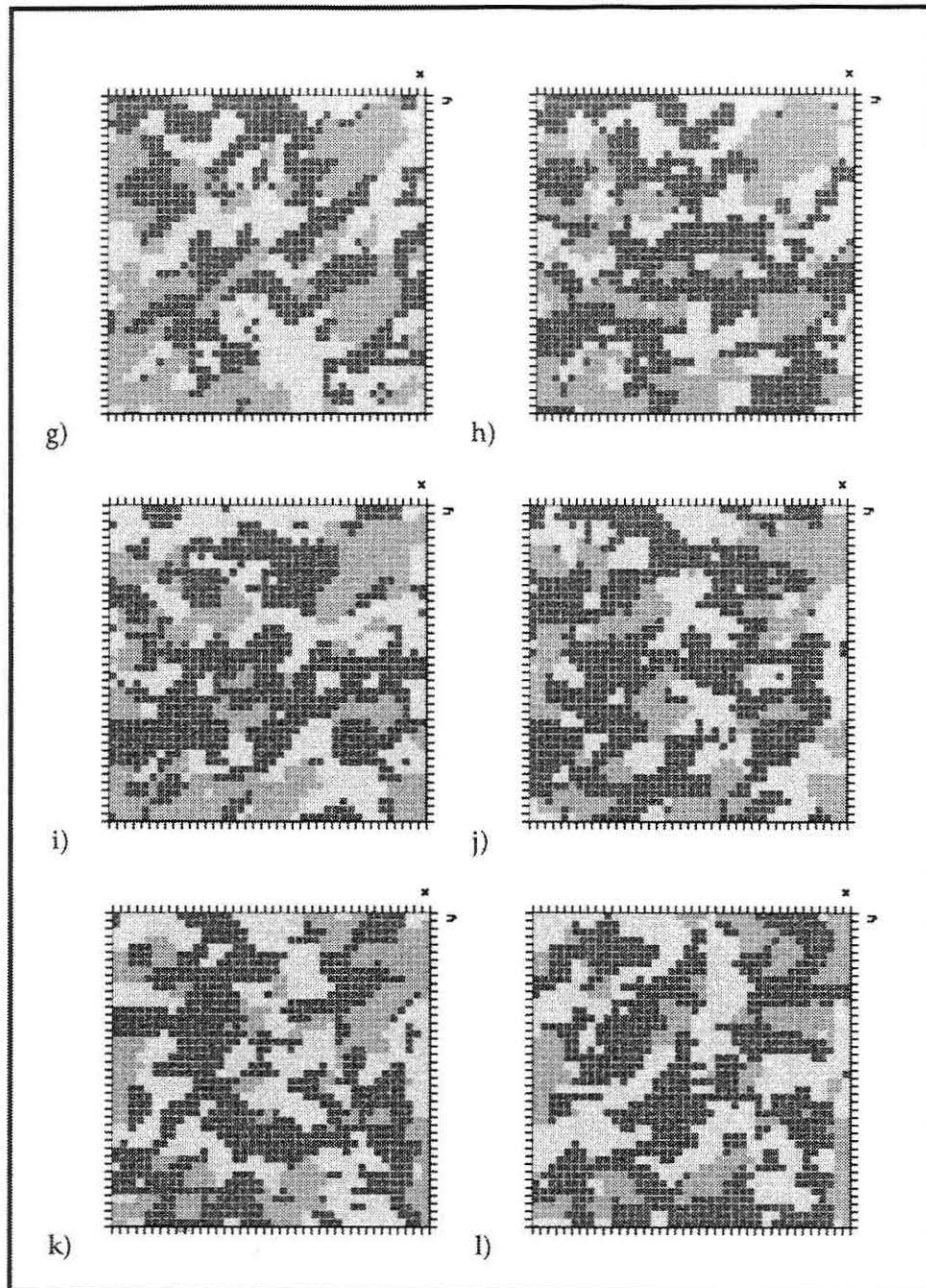


Abb.20 (Fortsetzung 1) Zeitliche Entwicklung des Buchenwaldes (hellgrau = Heranwachsstadium, mittelgrau = Optimalstadium, dunkelgrau = Zerfallsstadium). Ein Zeitschritt entspricht 15 Jahren. Parameterwerte nach Tab.4.

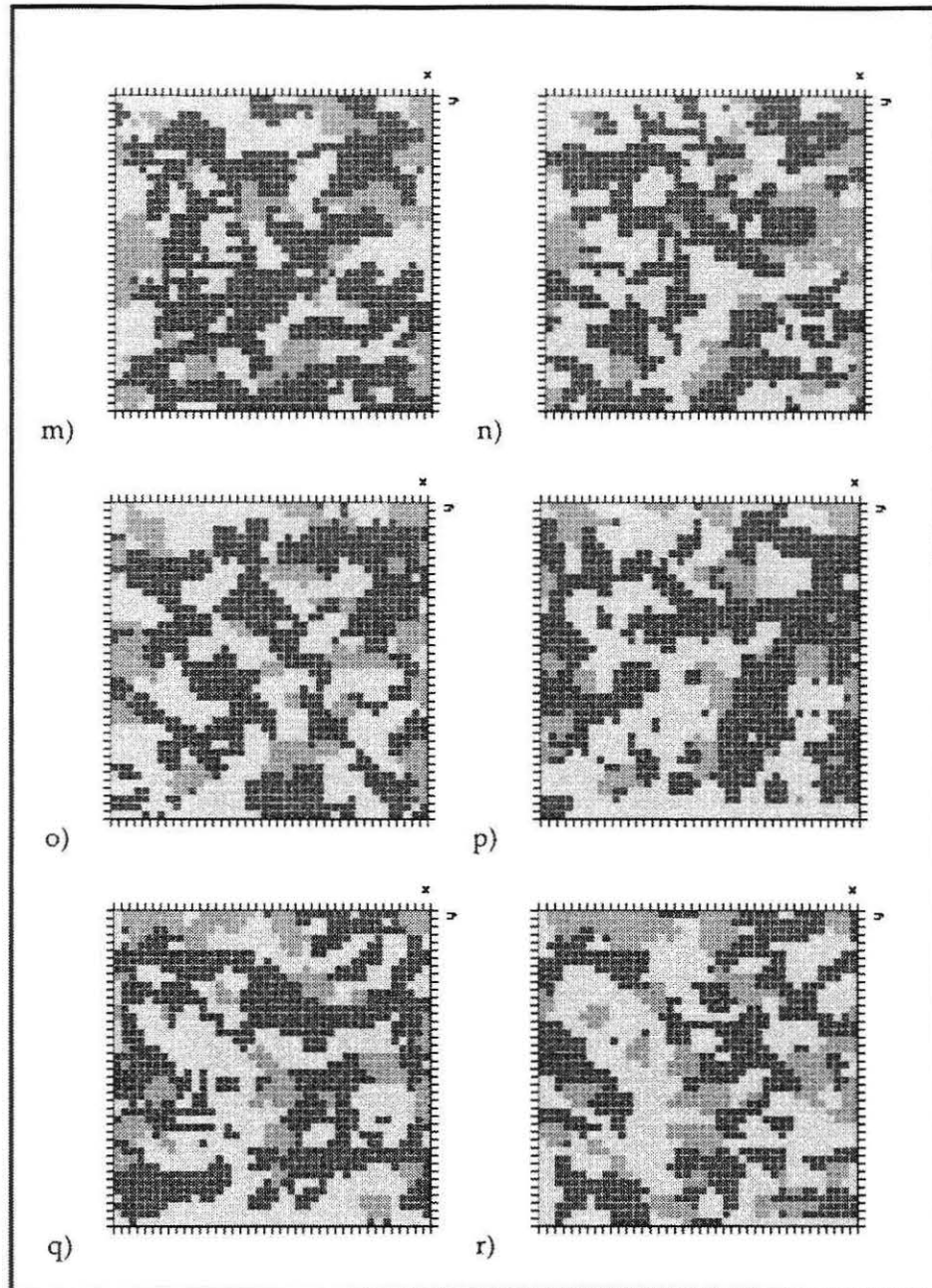


Abb.20 (Fortsetzung 2) Zeitliche Entwicklung des Buchenwaldes (hellgrau = Heranwachsstadium, mittelgrau = Optimalstadium, dunkelgrau = Zerfallsstadium). Ein Zeitschritt entspricht 15 Jahren. Parameterwerte nach Tab.4.

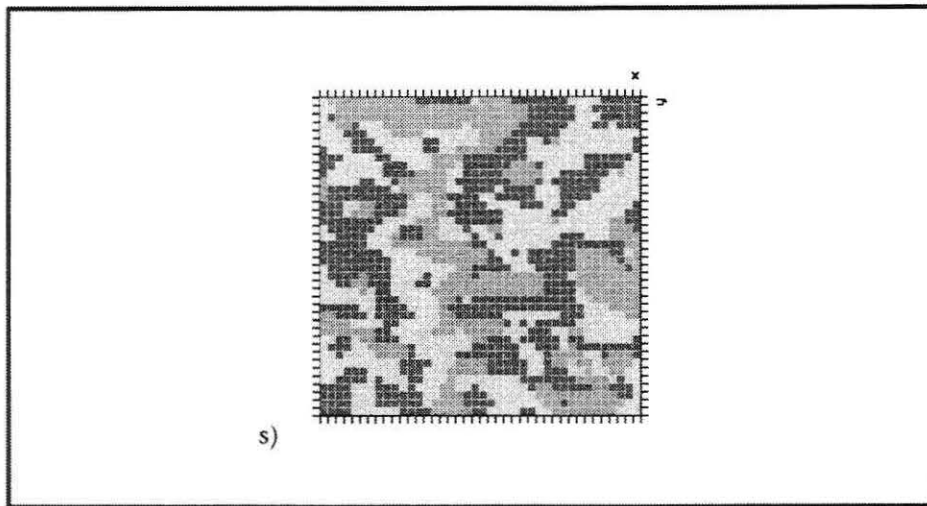


Abb.20 (Fortsetzung 3) Zeitliche Entwicklung des Buchenwaldes (hellgrau = Heranwachsstadium, mittelgrau = Optimalstadium, dunkelgrau = Zerfallsstadium). Ein Zeitschritt entspricht 15 Jahren. Parameterwerte nach Tab.4.

In Abb.21 ist der zeitliche Verlauf des prozentualen Anteils der drei verschiedenen Entwicklungsstadien an der Gesamtwaldfläche für ein Zeitintervall von 200 Zeitschritten dargestellt. Gut zu erkennen sind die phasenweise relativ starken Schwankungen um die bereits in Tab.7 angegebenen Mittelwerte. Es fällt auf, daß vor allem stärkere Stürme für einen kurzfristig erhöhten Anteil des Zerfallsstadiums bei einer gleichzeitigen Abnahme des Heranwachs- und des Optimalstadiums an der Gesamtwaldfläche sorgen. Dieses Phänomen wird auch in der Empirie beschrieben. So äußert sich MAYER (1976) dahingehend, daß der vermutete, autogen im Wald ablaufende, Entwicklungszyklus durch stärkere Stürme insofern beeinflußt werde, daß ein solcher Sturm auf Wald-Teilgebieten einen Sprung von einem noch nicht im Zerfall begriffenen Stadium hin zum Zerfallsstadium bewirken könne.

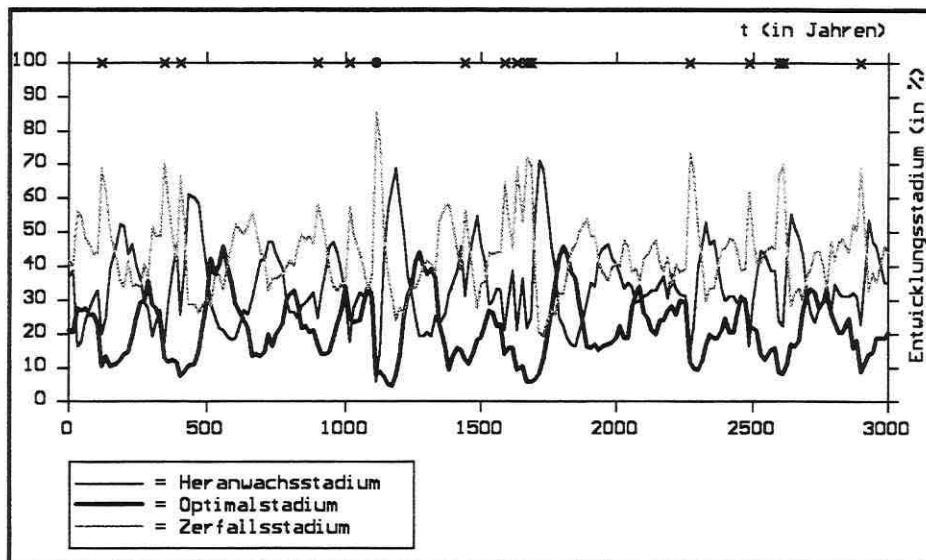


Abb.21 Typischer Verlauf des relativen Anteils der verschiedenen Entwicklungsstadien an der Gesamtwaldfläche gegen die Zeit t bei angenommener Anfangsverteilung „Urwald“ für den Referenz-Parametersatz nach Tab.4.

VI.1.3 Weitere typische Merkmale

VI.1.3.1 Kronengrößen

Abb.22 gibt Aufschluß darüber, welchen relativen Anteil im langjährigen Mittel Buchen des Hauptkronendaches mit einer Kronenschirmfläche von $1/8$, $2/8$, ..., $8/8$ der Grundfläche einer Zelle jeweils an der Gesamtzahl der Buchen dieser Schicht aufweisen. Dabei stellt sich heraus, daß der relative Anteil der Buchen, die $2/8$ der Grundfläche einer Zelle überschirmen, am größten ist. Deutlich kleiner fällt der Anteil an Buchen mit noch kleineren Kronen aus und auch der Anteil an Buchen mit größeren Kronenschirmflächen nimmt mit zunehmender Kronenschirmfläche kontinuierlich ab, um wiederum geringfügig bei maximal erreichbarer Größe anzusteigen.

Dieses Ergebnis dürfte insgesamt darauf zurückzuführen sein, daß beim Hereinwachsen von Buchen aus der unteren Kronenschicht häufig noch so viel Platz im Hauptkronendach vorhanden ist, daß viele der Buchen beim Erreichen dieser Schicht nicht nur eine Kronenschirmfläche von nur $1/8$ der Zellengrundfläche, sondern bereits die doppelte Größe aufweisen.

Eine Abnahme des relativen Anteils an Buchen mit größeren Kronenschirmflächen als $2/8$ der Zellengrundfläche wird dann unter anderem darin begründet liegen, daß für Buchen des Hauptkronendaches eine jeweils schrittweise Zunahme der Kronenschirmfläche automatisch mit einer Zunahme der Verweildauer im Hauptkronendach einhergeht. Mit zunehmender Verweildauer aber nimmt für eine individuelle Buche auch die Sterbewahrscheinlichkeit zu, so daß der Anteil an Buchen mit zunehmend größeren Kronenschirmflächen als $2/8$ der Zellengrundfläche stetig abnimmt. Zusätzlich werden aber auch einzelne konkurrenzschwache Buchen des Hauptkronendaches durch die vorhandene intraspezifische Konkurrenz daran gehindert größere Kronenschirmflächen anzunehmen, indem sie von konkurrenzstarken Buchen langsam aus dem Hauptkronendach verdrängt werden.

Der vorhandene geringfügige Anstieg des Anteils an Buchen mit maximaler Kronengröße läßt sich darauf zurückführen, daß, wenn eine Buche erst einmal ihre maximale Größe erreicht hat, sie sich dann natürlich nicht mehr weiter vergrößern kann und somit oftmals noch eine zeitlang mit unveränderter maximaler Größe weiterlebt.

Sturmeinflüsse, die einen weiteren Beitrag bezüglich der Reduzierung der Kronenschirmfläche liefern können, betreffen alle Buchen des Hauptkronendaches und haben keinen Einfluß auf die Qualität des Ergebnisses.

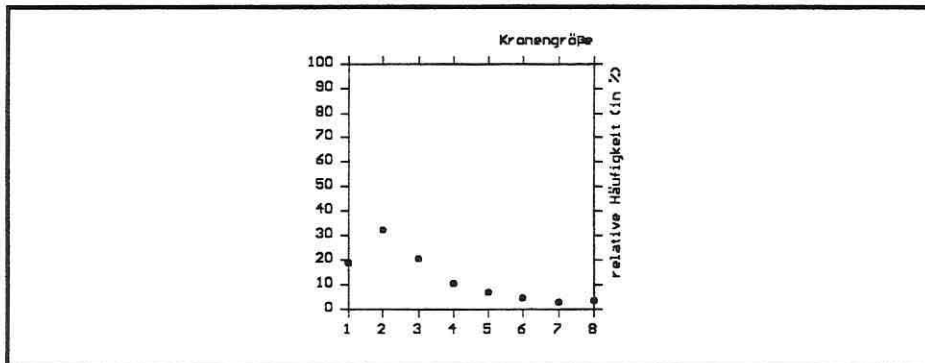


Abb.22 Relative Häufigkeit unterschiedlich großer Kronen von Buchen des Hauptkronendaches. Angaben in 1/8 der Grundfläche einer Zelle. Gemittelt über 1000 Zeitschritte. Parameterwerte nach Tab.4.

VI.1.3.2 Stammzahlen

Als nächstes soll der Versuch unternommen werden, die sich im langjährigen Mittel einstellenden durchschnittlichen Stammzahlen pro ha in den verschiedenen Entwicklungsstadien und (Baum-) Stärkeklassen abzuschätzen. Aufgrund der vorhandenen Hauptzielrichtung des Modells und der damit verbundenen speziell entwickelten Modellstruktur ist es allerdings kaum möglich, zu einer genauen Abschätzung dieser Größe zu gelangen. So ist das Modell z.B. überhaupt nicht darauf ausgerichtet, auf direktem Wege mit Bäumen unterschiedlicher Stärkeklassen zu arbeiten. Dennoch kann auf indirekte Weise eine — allerdings nur sehr grobe — Abschätzung der Stammzahldichten erfolgen, wodurch sich zusätzliche Hinweise darauf ergeben, inwieweit die Modellergebnisse zumindest qualitativ natürlichen Gegebenheiten entsprechen.

Grundlage dieser Abschätzung ist die Tatsache, daß, auch wenn es nicht aufgrund der Kronengröße und/oder Schichtzugehörigkeit eines einzelnen Baumes möglich ist, eine eindeutige Zuordnung dieses Baumes zu einer von sechs möglichen Stärkeklassen zu gewährleisten, die Schichtzugehörigkeit und Kronengröße dennoch zumindest einen Anhaltspunkt dafür liefern, in welche

Stärkeklasse ein solcher Baum aller Voraussicht nach fällt. Diese Abschätzung erfolgt dabei auf Datengrundlage verschiedener von KORPEL' (1995) und LEIBUNDGUT (1993) aufgenommener Buchenwald-Probeflächen. So berichtet LEIBUNDGUT, daß schon ab Brusthöhendurchmessern (DBH) von etwa 20 cm die Unterschiede im Schlankheitsgrad (= Verhältnis von Baumhöhe zum Brusthöhendurchmesser) der Buchen zwischen den einzelnen Bäumen der gleichen Durchmesserstufe verhältnismäßig gering werden. Dieses ist gleichbedeutend damit, daß für Buchen der gleichen Durchmesserstufe ähnlich ausfallende Baumhöhen zu erwarten sind. In einem ersten Schritt kann nun somit Buchen einer bestimmten Durchmesserstufe bei bekanntem Schlankheitsgrad eine als typisch anzusehende Baumhöhe und damit Schichtzugehörigkeit zugeordnet werden. Dabei ergibt sich auf der Datengrundlage LEIBUNDGUTs, daß Buchen mit einem Brusthöhendurchmesser von etwa 20 cm als typische Baumhöhe knapp 20 m erreichen und sich somit in einer Höhe befinden, die wiederum als eine typische (Anfangs-) Höhe für die untere Kronenschicht angesehen werden darf. Bäume mit einem Brusthöhendurchmesser von 40 cm und mehr besitzen dagegen schon in etwa 30 Meter und mehr als typischen Wert für ihre Baumhöhe. Sie befinden sich damit in einer Höhe, die als typisch für das Hauptkronendach angesehen werden darf. Somit läßt sich als ein erstes Zwischenergebnis zur Beschreibung typischer Werte festhalten:

- (Derbholz-) Bäume deren Brusthöhendurchmesser deutlich weniger als 20 cm beträgt, befinden sich typischerweise in der Jungbuchenschicht
- Bäume mit einem Brusthöhendurchmesser von in etwa 20 cm bis 40 cm befinden sich typischerweise in der unteren Kronenschicht
- Bäume ab einem Brusthöhendurchmesser von etwa 40 cm an befinden sich typischerweise im Hauptkronendach

Mit Hilfe dieser Erkenntnisse läßt sich nun in grober Näherung eine Zuordnung der Modellbuchen zu einer ganz speziellen Stärkeklasse

Ergebnisse mit Diskussionen

durchführen. So werden aufgrund der für die verschiedenen Schichten anzunehmenden typischen Brusthöhendurchmesser sämtliche Buchen der Jungbuchenschicht der Stärkeklasse I., Buchen der unteren Kronenschicht je nach Länge ihrer bisherigen Verweildauer in dieser Schicht und der eventuell damit verbundenen Möglichkeit, im nächsten Zeitschritt in die nächsthöhere Schicht hineinzuwachsen, den Stärkeklassen II. oder III. und Buchen des Hauptkronendaches je nach Kronengröße den Stärkeklassen IV. bis VI. zugeordnet. Wie bekannt werden im Modell in der Jungbuchenschicht nun aber keine einzelnen individuellen Bäume, sondern statt dessen alternativ der Flächenbedeckungsgrad dieser Schicht betrachtet. Um dennoch zu Aussagen über die Stammzahldichte in der Jungbuchenschicht zu gelangen, wird davon ausgegangen, daß ein bestimmter Grad der Flächenbedeckung in der Jungbuchenschicht im Mittel durch eine bestimmte Anzahl an entsprechenden Buchen dieser Schicht pro Zelle hervorgerufen wird. Es wird davon ausgegangen, daß für eine vollständige Überschirmung der Grundfläche einer Zelle allein durch Buchen der Jungbuchenschicht sechzehn entsprechende Buchen pro Zelle benötigt werden. Für einen geringeren Grad der Überschirmung zeigen sich entsprechend weniger Buchen verantwortlich. Mit Hilfe dieser einfachen und nur sehr groben Näherung läßt sich somit die Zahl der Buchen der Stärkeklasse I. für jeden Zeitschritt und im langjährigen Mittel abschätzen. Die als dünn anzusehenden Bäume der unteren Kronenschicht werden der nächstgrößeren Stärkeklasse II. zugeordnet. Darunter fallen die Bäume, die noch nicht in der Lage sind, im nächsten Zeitschritt in das Hauptkronendach hineinzuwachsen.⁷¹ Wenn sie jedoch bereit sein sollten, im nächsten Zeitschritt in das Hauptkronendach hineinzuwachsen, dann wird davon ausgegangen, daß diese Buchen aufgrund ihrer erhöhten Verweildauer und bereits fortgeschrittenen Entwicklung in der unteren Kronenschicht schon in die dritte Stärkeklasse fallen. Eine Zuordnung der Buchen des Hauptkronendaches zu den restlichen drei

⁷¹ vgl. Anhang A.1 Regel 29) - 30), 32)

Stärkeklassen beruht auf einem u.a. von KÄTSCH (1998) beschriebenen engen Zusammenhang zwischen zunehmendem Brusthöhendurchmesser mit steigender Kronengröße. Dabei weist er auf die stets vorhandene erhebliche Streuung der Einzelwerte hin und darauf, daß dieser Zusammenhang nur eine Beschreibung für das mittlere Verhalten liefert. Dieses erscheint für unsere Abschätzung allerdings völlig ausreichend. Auf Grundlage seiner Daten werden Buchen des Hauptkronendaches, die eine Kronenschirmfläche von $1/8$ oder $2/8$ der Zellengrundfläche aufweisen, der Stärkeklasse IV., Buchen mit einer Kronenschirmfläche von $3/8$ bis $5/8$ der Zellengrundfläche der Stärkeklasse V. und Buchen mit noch größerer Kronenschirmfläche der Stärkeklasse VI. zugeordnet.

Tab.10 gibt noch einmal einen vollständigen Überblick über die angenommenen Zusammenhänge zwischen Schichtzugehörigkeit, Baummerkmalen und Stärkeklasse.

Stärkeklasse (DBH in cm)	Bäume, die in die entsprechende Stärkeklasse fallen
I. (8-14)	Bäume der Jungbuchenschicht (Schicht II)
II. (16-24)	Bäume der unteren Kronenschicht (Schicht III), die aufgrund ihrer Verweildauer innerhalb dieser Schicht noch nicht in der Lage sind, im nächsten Zeitschritt in das Hauptkronendach (Schicht IV) hineinzuwachsen.
III. (26-36)	Bäume der unteren Kronenschicht, die aufgrund ihrer Verweildauer innerhalb dieser Schicht theoretisch in der Lage sind, im nächsten Zeitschritt in das Hauptkronendach hineinzuwachsen.
IV. (38-50)	Bäume des Hauptkronendaches, die eine Kronenschirmfläche von $1/8$ oder $2/8$ der Zellengrundfläche besitzen.
V. (52-70)	Bäume des Hauptkronendaches, die eine Kronenschirmfläche von $3/8$, $4/8$ oder $5/8$ der Zellengrundfläche besitzen.
VI. (≥ 72)	Bäume des Hauptkronendaches, die eine Kronenschirmfläche von $6/8$, $7/8$ oder $8/8$ der Zellengrundfläche besitzen.

Tab.10 Übersicht über die angenommenen Zusammenhänge zwischen Schichtzugehörigkeit, Baummerkmalen und Stärkeklasse.

Es ist nun möglich auf Grundlage der oben geschilderten Näherungen die sich im langjährigen Mittel einstellenden durchschnittlichen Stammzahlen pro ha in den verschiedenen Entwicklungsstadien und Stärkeklassen

Ergebnisse mit Diskussionen

abzuschätzen. Abb. 23 gibt einen graphischen Überblick über die Ergebnisse. Demnach läßt sich für das Heranwachsstadium ein stetiger Abfall der Stammzahldichten mit größer werdender Stärkeklasse beobachten. Ähnliche Verhältnisse wie für das Heranwachsstadium lassen sich mit Ausnahme eines geringfügig abgesunkenen Anteils der Stammdichte in der II. und III. Stärkeklasse auch für das Zerfallsstadium feststellen. Für das Optimalstadium fällt vor allem die insgesamt vorhandene relativ geringe Stammdichte in der Stärkeklasse I. und ihr im Vergleich zu den nächsthöheren Stärkeklassen deutlich verminderter Anteil in den Stärkeklassen II. und III. auf.

Vergleicht man diese Modellergebnisse mit empirischen Beobachtungen, so lassen sich vom qualitativen Verlauf her recht gute Übereinstimmungen feststellen. So beschreibt auch KORPEL' (1995) für die Buchenwälder der Westkarpaten, daß die Verteilung der Zahl der Bäume in Stärkestufen während der ganzen Zeit des Stadiums des Zerfalls und des Heranwachsens überwiegend durch eine absinkende Kurve charakterisiert ist. Für das Optimalstadium dagegen weist er auf eine im Vergleich zu den anderen Stadien insgesamt verminderte Stammdichte und eine im Vergleich zu den anderen Stärkeklassen auffallend gering ausfallende Stammdichte in den von der Existenz von Bäumen der unteren Kronenschicht profitieren Stärkeklassen (d.h. den Stärkeklassen II. und III.) hin.

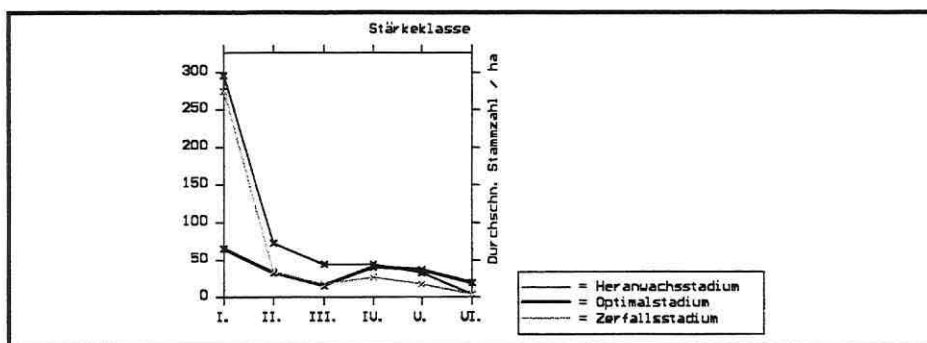


Abb.23 Durchschnittliche Stammzahl pro ha in den verschiedenen Stärkeklassen und Entwicklungsstadien. Gemittelt über 1000 Zeitschritte. Parameterwerte nach Tab.4.

<i>Stärkeklasse</i>	<i>Durchschnittliche Stammzahl pro ha im Heranwachsstadium</i>	<i>Durchschnittliche Stammzahl pro ha im Optimalstadium</i>	<i>Durchschnittliche Stammzahl pro ha im Zerfallsstadium</i>
I.	297 ± 39	66 ± 10	275 ± 47
II.	73 ± 7	33 ± 8	35 ± 6
III.	44 ± 5	16 ± 4	18 ± 3
IV.	44 ± 5	40 ± 6	26 ± 5
V.	32 ± 4	37 ± 6	17 ± 3
VI.	5 ± 1	20 ± 3	5 ± 1
Gesamt	495 ± 41	213 ± 19	375 ± 49

Tab.11 Durchschnittliche Stammzahl pro ha in den verschiedenen Entwicklungsstadien nach Stärkeklassen sowie insgesamt. Gemittelt über 1000 Zeitschritte. Parameterwerte nach Tab.4.

Auf einen genaueren Vergleich bezüglich quantitativer Übereinstimmungen soll hier allerdings verzichtet werden, da einerseits diese hier vorliegenden Modellergebnisse bezüglich der Stammzahldichten bedingt durch die vorhandene Modellstruktur bestenfalls qualitativen Wert besitzen und nur als sehr grobe Anhaltspunkte bezüglich der tatsächlichen Stammzahldichten in den verschiedenen Stadien und Stärkestufen dienen können. Genauere Aussagen diesbezüglich würden eine völlig andersartige Modellstruktur und Herangehensweise voraussetzen. Ferner wird auch von Experten wie KORPEL' (1995) angegeben, daß die Zahl der Derbholzbäume pro ha in reinen Buchenwäldern in weiter Amplitude — z.B. in den Westkarpaten von 350 bis 550 pro ha — schwankt und somit schon aus diesem Grunde nur schwerlich genauere Vergleiche mit den Modellergebnissen zuläßt.

VI.1.3.3 Derbholzvolumen

Nach der näheren Betrachtung der Stammzahldichten in reinen Buchenwäldern soll nun der Blick auf das diesen Stammzahldichten entsprechende Derbholzvolumen gerichtet werden. Dazu wird einer jeden Buche der unterschiedlichen Stärkeklassen ein mittleres Derbholzvolumen unterstellt. Die Abschätzung dieser Größe beruht dabei auf der Auswertung einer Vielzahl von KORPEL' (1995) nach Stärkeklassen aufgenommener

Ergebnisse mit Diskussionen

Probeflächen bezüglich Stammzahl als auch Derbholzvolumen. Tab.12 gibt einen Überblick über das im folgenden nach Stärkeklassen angenommene mittlere Derbholzvolumen pro Buche.

Stärkeklasse	Angenommenes mittleres Derbholzvolumen pro Buche (in fm)
I.	0,068
II.	0,28
III.	0,85
IV.	2,4
V.	5,4
VI.	10,4

Tab.12 Übersicht über das angenommene mittlere Derbholzvolumen pro Buche in Abhängigkeit von der Stärkeklasse.

Um zu einer Abschätzung des Derbholzvolumens in den verschiedenen Stärkeklassen zu gelangen, muß auf die im vorherigen Kapitel gemachten Aussagen bezüglich der entsprechenden Stammdichten zurückgegriffen werden. Da diese Aussagen wie oben erwähnt aber bestenfalls qualitativen Wert besitzen, kann auch den hier folgenden Aussagen bezüglich der Abschätzung des Derbholzvolumens nur qualitative Bedeutung zugemessen werden.

Abb.24 stellt das mittlere Derbholzvolumen in fm/ha in Abhängigkeit von den verschiedenen Entwicklungsstadien und Stärkeklassen dar. Augenfällig ist der stetige Anstieg des im Mittel zu erwartenden Derbholzvolumens mit zunehmender Stärkeklasse im Optimalstadium. Auf den im Vergleich zu den anderen Entwicklungsstadien hohen Anteil besonders in der größten Stärkeklasse läßt sich der insgesamt maximale Holzvorrat dieses Stadiums zurückführen (vgl. Tab.13). Das Derbholzvolumen des Heranwachsstadiums weist in den unteren beiden Stärkeklassen die im Vergleich zu den anderen Stadien höchsten Werte auf, steigt dann kontinuierlich bis zur V. Stärkeklasse an, um dann wieder auf deutlich geringere Werte in der VI. Stärkeklasse abzufallen. Ähnlich ist der Verlauf im Zerfallsstadium. Hier liegen die Werte für das Derbholzvolumen in den Stärkeklassen I. und VI. in

etwa auf dem des Niveaus des Heranwachsstadiums. In sämtlichen anderen Stärkekassen fallen diese im Vergleich zum Heranwachsstadium jedoch geringer aus. Dabei ergeben sich die im Zerfallsstadium insgesamt niedrigsten Werte für die II. und III. Stärkeklasse. Als Resultat ergibt sich somit das im Mittel insgesamt geringste Derbholzvolumen für das Zerfallsstadium, ein mittleres für das Heranwachsstadium und das größte für das Optimalstadium (vgl. auch Tab.13).

Vergleicht man diese qualitativen Modellergebnisse mit in der Empirie durchgeführten Untersuchungen, dann stellt sich heraus, daß die Modellergebnisse auch bezüglich der Derbholzbetrachtungen relativ gute qualitative Übereinstimmungen liefern. So wird für das Optimalstadium von einem Maximum des Holzvorrats als Folge eines überdurchschnittlich großen Anteils von Buchen der größten Stärkekassen berichtet, wogegen von Durchschnittswerten für das Heranwachsstadium berichtet wird (KORPEL' 1995). Gemein ist allen Entwicklungsstadien — unabhängig von der jeweiligen Größe des Derbholzvorrats in Abhängigkeit von der Stärkeklasse — eine Konzentration des Vorrats auf die größeren Stärkekassen.

Genauere quantitative Betrachtungen bezüglich der Übereinstimmung zwischen Modellergebnissen und empirischen Befunden bieten sich aufgrund der bereits mehrfach erwähnten speziellen Modellstruktur auch an dieser Stelle nicht an.

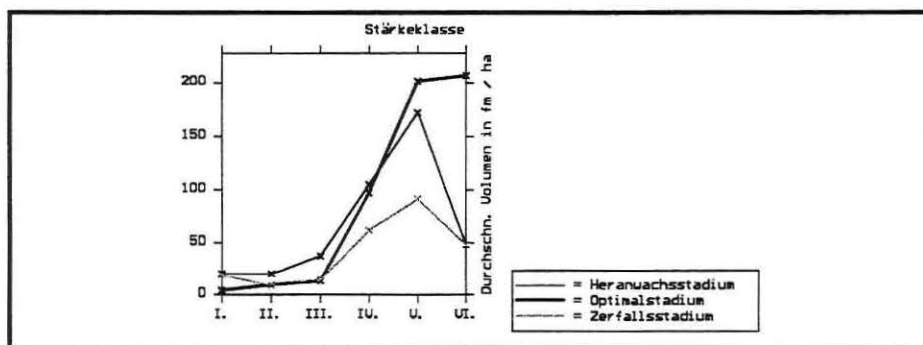


Abb.24 Durchschnittliches Derbholzvolumen in fm pro ha in den verschiedenen Stärkekassen und Entwicklungsstadien. Gemittelt über 1000 Zeitschritte. Parameterwerte nach Tab.4.

Ergebnisse mit Diskussionen

<i>Stärkeklasse</i>	<i>Durchschnittliches Derbholzvolumen in fm pro ha im Heranwachsstadium</i>	<i>Durchschnittliches Derbholzvolumen in fm pro ha im Optimalstadium</i>	<i>Durchschnittliches Derbholzvolumen in fm pro ha im Zerfallsstadium</i>
I.	20 ± 3	4 ± 1	19 ± 3
II.	20 ± 2	9 ± 2	10 ± 2
III.	38 ± 4	13 ± 4	15 ± 3
IV.	105 ± 13	97 ± 14	62 ± 11
V.	172 ± 21	202 ± 30	91 ± 15
VI.	48 ± 12	208 ± 33	48 ± 13
Gesamt	404 ± 37	533 ± 42	245 ± 35

Tab.13 Durchschnittliches Derbholzvolumen in fm pro ha in den verschiedenen Entwicklungsstadien nach Stärkeklassen sowie insgesamt. Gemittelt über 1000 Zeitschritte. Parameterwerte nach Tab.4.

Es sei hier noch einmal ausdrücklich darauf hingewiesen, daß es nicht die Zielrichtung dieses Modells ist und sein kann, exakte forstwirtschaftlich verwertbare Wertangaben bezüglich Stammzahldichten oder Derbholzvorrat eines (Modell-)Buchenwaldes zu ermitteln, da gänzlich anders geartete Fragen im Mittelpunkt der Untersuchungen dieser Arbeit stehen. Die hier gemachten Aussagen dienen lediglich dem Vergleich von Modell und Realität.

VI.1.3.4 Diverses

Als eine letzte Referenzfall-Betrachtung soll nun noch ein kurzer Blick auf die relative Häufigkeit der Anzahl von Buchen pro Zelle in den obersten beiden Schichten geworfen werden. Abb.25 links stellt die Verhältnisse für Buchen des Hauptkronendaches dar, Abb.25 rechts diejenigen für die untere Kronenschicht.

Für die untere Kronenschicht läßt sich feststellen, daß diese relative Häufigkeit mit steigender Zahl entsprechender Buchen pro Zelle abnimmt. So sind durchschnittlich in etwa 35% aller Fälle und damit Zellen gar keine Buchen aus der unteren Kronenschicht vorhanden. In durchschnittlich etwa 22% der Zellen befinden sich jeweils nur eine und in ca. 16% der Zellen je

zwei Buchen. D.h., daß im Mittel nur etwa $\frac{1}{4}$ aller Zellen mehr als zwei solcher Buchen beherbergen.

Etwas andere Verhältnisse liegen im Hauptkronendach vor. Hier besitzen durchschnittlich nur gut 25% aller Zellen gar keine Buchen aus dieser Schicht, wogegen jeweils knapp 30% der Zellen genau eine bzw. zwei Hauptkronendach-Buchen beherbergen. Deutlich geringer fällt der durchschnittliche Anteil der Zellen aus, in denen sich drei oder vier solcher Buchen befinden. Fünf oder mehr Hauptkronendachbuchen pro Zelle kommen schließlich nur äußerst selten vor. Dieses Ergebnis erscheint verständlich, wenn man bedenkt, daß Hauptkronendachbuchen mit einer Kronenschirmfläche von $\frac{2}{8}$ oder $\frac{3}{8}$ der Grundfläche einer Zelle zusammen im Mittel mit über 50% den Großteil aller vorhandenen Hauptkronendachbuchen stellen⁷², eine sich der maximal möglichen Anzahl nähernde Zahl an Hauptkronendachbuchen pro Zelle jedoch nur möglich wird, wenn die oberste Schicht von möglichst vielen noch kleineren Buchen möglichst dicht geschlossen wird. Dieses ist offensichtlich nur sehr selten der Fall. Das Vorhandensein sehr großer Buchen bedingt, daß wegen des nur begrenzten Platzangebots in einer Zelle viele der Zellen nur eine oder zwei Buchen der obersten Schicht aufnehmen können.

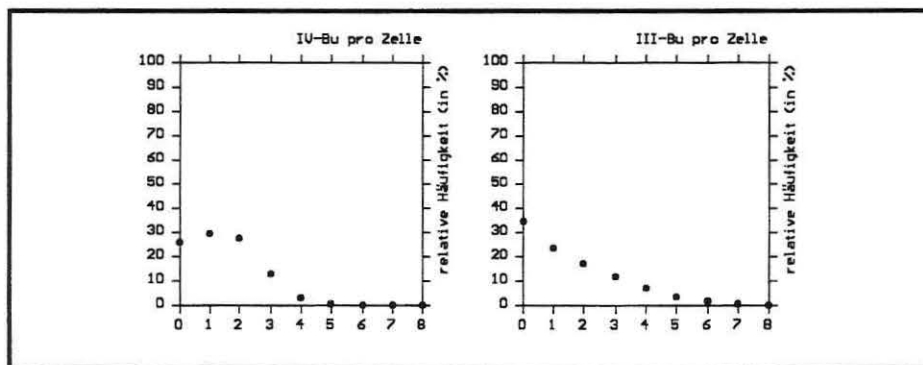


Abb.25 Relative Häufigkeit der Anzahl von Buchen des Hauptkronendaches (IV-Bu) und der unteren Kronenschicht (III-Bu) pro Zelle. Gemittelt über 1000 Zeitschritte. Parameterwerte nach Tab.4.

⁷² vgl. Kapitel VI.1.3.1

VI.1.4 Zwischenresümee

In Kapitel VI.1 wurde der Referenz-Fall ausführlich behandelt. Anhand dieses Referenz-Falls konnte gezeigt werden, daß man mit Hilfe des Buchenwaldmodells in der Lage ist, einen Buchenwald bezüglich seiner Entwicklung, seines Wachstums und auch hinsichtlich der Entstehung ihm innewohnender Strukturen in seinen Grundzügen hinreichend genau zu beschreiben. Damit ist es gelungen, ein ausreichendes Maß an Vertrauen in das Modell und in seine Ergebnisse zu schaffen.

Aufbauend darauf soll nun im folgenden näher untersucht werden, ob und wie sich die im Referenz-Fall erhaltenen Ergebnisse ändern, wenn sich einzelne Bedingungen ändern, welchen Einfluß die Variation der Werte verschiedener Parameter auf diese Ergebnisse hat und welche als die entscheidenden Einflußgrößen angesehen werden können.

Anhand solcher Untersuchungen und Betrachtungen soll nun versucht werden, zu neuen Erkenntnissen über das Ökosystem "Buchenwald" zu gelangen und Hinweise auf die Beantwortung der dieser Arbeit zugrundeliegenden Fragen zu erhalten.

VI.2 Einfluß der Waldgröße und -form

VI.2.1 Waldgröße

In einer ersten Untersuchung soll die Fläche des Modellwaldes verändert werden. Die im Referenzfall angenommene quadratische Grundflächenform soll dabei zwecks besserer Vergleichsmöglichkeiten zunächst beibehalten werden. Vergrößert man die Ost-West- sowie die Nord-Süd-Ausdehnung des Waldes über die dem Referenzfall zugrundeliegenden Werte von $x = 40$ und $y = 40$, d.h. über eine Fläche von 32,7 ha hinaus, so lassen sich keinerlei

qualitative und nur sehr minimale quantitative Abweichungen von den in Kapitel VI.1 beschriebenen Ergebnissen des Referenz-Falls feststellen. Diese Abweichungen sind dabei jedoch so gering, daß es keinerlei Sinn macht hier näher darauf einzugehen. Festzuhalten bleibt, daß eine Vergrößerung der Waldfläche keine weitere Vergrößerung der Tiefe des Randeinflußgebietes⁷³ beinhaltet. Dadurch gewinnt das innerhalb des Randeinflußgebietes liegende Waldkerngebiet in zunehmend größer werdenden Wäldern immer mehr an Bedeutung, wogegen die die Waldstruktur beeinflussenden Randeinflüsse insgesamt gesehen immer stärker in den Hintergrund treten.

Genau anders herum liegen die Verhältnisse, wenn die Waldfläche ausgehend vom Referenzfall verkleinert wird. Bei zunehmender Abnahme der Ost-West- sowie der Nord-Süd-Ausdehnung des Waldes gewinnt das Randeinflußgebiet bezogen auf den Gesamtwald immer mehr an Bedeutung. Ab einer Waldgröße von in etwa 30 mal 30 Zellen, d.h. ca. 18,3 ha lassen sich erste größere strukturelle Veränderungen sowohl qualitativ als auch quantitativ nachweisen. So läßt sich feststellen, daß der über den gesamten Wald betrachtete Bedeckungsgrad im Hauptkronendach im langjährigen Mittel um ca. 3% — bei gleichzeitig auftretenden Verlusten der durchschnittlichen Bedeckungsgrade in den tieferliegenden Schichten — ansteigt. Bedingt dadurch steigt der relative Anteil des Optimalstadiums an der Gesamtfläche des Modellwaldes im langjährigen Mittel um gut 10% auf nunmehr etwa 22% an und zwar vornehmlich auf Kosten des relativen Anteils des Zerfallsstadiums an der Waldfläche. Diese Entwicklung macht sich auch bei der Betrachtung des durchschnittlichen Lichteinflußwerts pro Zelle bemerkbar. Dieser sinkt aufgrund der insgesamt verstärkten Anwesenheit von Bäumen der obersten Schicht insgesamt auf einen Wert von $0,39 \pm 0,06$.

Wird die Waldfläche weiter verkleinert, dann kommen die oben aufgezeigten Tendenzen immer deutlicher zum Vorschein. Bei einem nur noch aus 10 mal 10 Zellen ($\approx 2,0$ ha) bestehenden Wald ist ein im Vergleich

⁷³ zur Tiefe des Randeinflußgebiets vgl. Kapitel VI.1.2.2

Ergebnisse mit Diskussionen

zum Referenzfall um etwa 20% gesteigener Anteil des Bedeckungsgrades im Hauptkronendach bei ebenfalls deutlichem Abfall vor allem in den unteren beiden Schichten, festzustellen. Daraus resultiert ein im Vergleich zum Referenzfall starker Anstieg des durchschnittlichen relativen Anteils des Optimalstadiums an der Gesamtwaldfläche von etwa 20% auf nunmehr gut 34%. Dieser Anstieg geht dabei fast vollständig zu Lasten des Zerfallsstadiums. Ebenso festzustellen bleibt ein deutlicher Abfall des durchschnittlichen Lichteinflußwerts pro Zelle auf jetzt $0,35 \pm 0,06$. Vom Referenzfall mehr oder weniger deutlich abweichende Ergebnisse lassen sich bei dieser Waldflächengröße schließlich auch bei sämtlichen anderen Größen feststellen, sollen hier aber nicht näher erläutert werden.

Als knappes Resultat dieses Abschnitts bleibt somit festzuhalten, daß bei quadratisch angenommener Grundfläche eines Buchenwaldes, welcher scharfe Waldränder aufweist, ab einer nicht exakt festzulegenden minimalen Flächengröße von in etwa 20 ha bis 30 ha an keine qualitativen und keine gravierenden quantitativen Veränderungen mehr bezüglich für die Charakteristik eines Buchenwaldes wichtig erscheinender Größen zu erwarten sind. Somit kann für einen solchen Modellwald diese Flächengröße auch als eine Mindestgröße dafür angesehen werden, welche er besitzen muß, so daß er zumindest in seinen Grundzügen einem echten natürlichen Buchenwald ähnelt. Im Umkehrschluß bedeutet dieses aber auch, daß ein real unter ähnlichen wie im Modell beschriebenen Bedingungen existierender Buchenwald erst dann überhaupt die für einen natürlichen Buchenwald als grundlegend und typisch anzusehenden Charakteristika und Eigenschaften aufweisen kann, wenn seine Flächengröße mindestens etwa 20 ha bis 30 ha beträgt.

Offen bleibt an dieser Stelle jedoch noch die Frage, welchen Einfluß unterschiedliche geformte Waldflächen bei gleichen Flächenausdehnungen auf

die oben diskutierten Größen haben. Dieser Frage soll nun im folgenden Kapitel kurz nachgegangen werden.

VI.2.2 Waldform

Um den Einfluß der Waldform auf die als typisch anzusehenden Charakteristika und Eigenschaften des Buchenwaldes zu untersuchen, ist es notwendig, die Grundflächenform des Modellwaldes unter Beibehaltung der Flächengröße des Referenzfalls zu verändern. So beträgt z.B. auch für Wälder, welche eine rechteckige Grundflächenform mit einer Ost-West- und Nord-Süd-Ausdehnung von $x = 25$ und $y = 64$ bzw. $x = 64$ und $y = 25$ Zellen besitzen, die Flächengröße analog dem Referenzfall 32,7 ha.

Vergleicht man nun die sich aus diesen beiden Fällen ergebenden Ergebnisse, dann läßt sich feststellen, daß die meisten jeweils sehr gut mit denen des Referenzfalls übereinstimmen. Auf diese soll deshalb auch nicht näher eingegangen werden. Geringfügige Abweichungen lassen sich allerdings bei näherer Betrachtung der mittleren prozentualen Anteile der Flächenbedeckungsgrade in den verschiedenen Schichten erkennen. So ist sowohl im ersten Fall des ausgeprägt nord-südlich orientierten Waldes als auch im zweiten Fall des deutlich ost-westlich orientiert verlaufenden Waldes jeweils ein Anstieg des mittleren Flächenbedeckungsgrades im Hauptkronendachs um etwa 2% festzustellen bei gleichzeitiger, im Vergleich zum Referenzfall in ähnlicher Größenordnung verlaufender, Abnahme der Bedeckungsgrade in den tiefergelegenen Schichten. Die veränderten Anteile der Bedeckungsgrade in den vier Schichten machen sich dann an einem geringfügig veränderten relativen Anteil der drei Entwicklungsstadien an der Gesamtwaldfläche bemerkbar. So ist in beiden Fällen ein als Ursache dieser insgesamt geringfügig veränderten Waldstruktur zu deutender kleiner, aber dennoch erkennbarer Anstieg des Anteils an Optimalstadium bei gleichzeitiger Abnahme der Anteile an den beiden anderen Stadien zu

Ergebnisse mit Diskussionen

erkennen. Diese Veränderungen bewegen sich jedoch in einem solchen Rahmen, der es nicht erlaubt, hier bereits von Fällen zu sprechen, welche in der Natur vorkommenden Gegebenheiten widersprechen, sondern befinden sich durchaus noch in einem Bereich, der es gestattet, von guten Übereinstimmungen mit realen Ergebnissen und Beobachtungen zu sprechen.

Weitere Abweichungen lassen sich auch bei einer näheren Betrachtung der jeweiligen Ost-West- bzw. Nord-Süd-Ausdehnungen zusammenhängender Stadien feststellen. Diese Ergebnisse sind für den Fall $x = 25$ und $y = 64$ in Tab.14 und für den Fall $x = 64$ und $y = 25$ in Tab.15 dargestellt. Es fällt auf, daß es im Vergleich zum Referenz-Fall im ersten Fall vor allem zu einer geringfügigen Abnahme der mittleren Ost-West- und einem geringfügigen Zuwachs der mittleren Nord-Süd-Ausdehnung sämtlicher Stadien kommt. Umgekehrt liegen hingegen die Verhältnisse im zweiten Fall. Hier fällt eine schwache Zunahme der mittleren Ost-West- und eine geringfügige Abnahme der mittleren Nord-Süd-Ausdehnung auf. Die jeweils beobachtbaren Abnahmen der Ausdehnung lassen sich größtenteils auf die in sämtlichen Fällen verminderten Anteile von in einer Richtung aus mehr als aus 10 zusammenhängenden Zellen bestehenden einheitlichen Gebieten bei gleichzeitiger Zunahme des Anteils von aus nur ein oder zwei Zellen breiten bzw. langen ausgedehnten Gebieten der entsprechenden Stadien in den jeweiligen Ausrichtungen zurückführen. Begünstigt wird dieses offenbar vor allem dadurch, daß ein nur auf 25 Zellenlängen bzw. -breiten beschränktes Gebiet aufgrund seiner Begrenzung oftmals keine extrem ausgedehnten Patches zuläßt bzw. diese frühzeitig beschneidet, wodurch im Mittel betrachtet eine Abnahme der entsprechenden Ausdehnungen erfolgt. Der geringe Anstieg der mittleren Ausdehnungen in der jeweils gestreckten Richtung beruht dagegen auf der Existenz einiger in dieser Richtung besonders stark ausgedehnter zusammenhängender Patches. Diese Annahme wird dadurch gestützt, daß analog zu Abb.11 und Abb.12 durchgeführte Betrachtungen bzgl. der relativen Häufigkeit unterschiedlich großer Ausdehnungen der verschiedenen Stadien für die jeweils gestreckte Richtung

praktisch identische Ergebnisse liefern. Somit können nur extrem ausgedehnte Gebiete, die insgesamt zu keinem zusätzlichen Anstieg des relativen Anteils von aus mindestens zehn zusammenhängenden Zellen bestehenden Gebieten führen, den geringen Anstieg der mittleren Werte der Ausdehnung bewirken.

	Mittlere Ost-West-Ausdehnung in Zellen		Mittlere Nord-Süd-Ausdehnung in Zellen	
	$x = 25, y = 64$	(Referenzfall)	$x = 25, y = 64$	(Referenzfall)
Heranwachsstadium	$3,6 \pm 3,0$	$3,8 \pm 3,3$	$3,5 \pm 3,0$	$3,3 \pm 2,8$
Optimalstadium	$3,4 \pm 2,7$	$3,5 \pm 2,8$	$3,3 \pm 2,9$	$3,1 \pm 2,4$
Zerfallsstadium	$4,4 \pm 3,8$	$4,5 \pm 4,2$	$4,1 \pm 3,8$	$3,9 \pm 3,6$

Tab.14 Mittlere Ost-West- und Nord-Süd-Ausdehnung des Heranwachsstadiums, des Optimalstadiums und des Zerfallsstadiums in Zellen (gemittelt über 1000 Zeitschritte) bei angenommener Anfangsverteilung „Urwald“ für $x = 25$ und $y = 64$ im Vergleich zum Referenzfall.

	Mittlere Ost-West-Ausdehnung in Zellen		Mittlere Nord-Süd-Ausdehnung in Zellen	
	$x = 64, y = 25$	(Referenzfall)	$x = 64, y = 25$	(Referenzfall)
Heranwachsstadium	$3,9 \pm 3,5$	$3,8 \pm 3,3$	$3,2 \pm 2,6$	$3,3 \pm 2,8$
Optimalstadium	$3,8 \pm 3,3$	$3,5 \pm 2,8$	$3,0 \pm 2,3$	$3,1 \pm 2,4$
Zerfallsstadium	$4,6 \pm 4,5$	$4,5 \pm 4,2$	$3,7 \pm 3,2$	$3,9 \pm 3,6$

Tab.15 Mittlere Ost-West- und Nord-Süd-Ausdehnung des Heranwachsstadiums, des Optimalstadiums und des Zerfallsstadiums in Zellen (gemittelt über 1000 Zeitschritte) bei angenommener Anfangsverteilung „Urwald“ für $x = 64$ und $y = 25$ im Vergleich zum Referenzfall.

Betrachtet man nun noch den durchschnittlichen Lichteinflußwert pro Zelle bezogen auf das Gesamtsystem, so lassen sich auch hier Tendenzen feststellen, die darauf hindeuten, daß für zunehmend extremer werdende Waldformen eine Veränderung, d.h. Abnahme dieses Wertes, zu erwarten ist. So liegt dieser Wert für die in Abb.26 a) und b) dargestellten Fälle im Mittel jeweils um 0,01 unter dem entsprechenden des Referenzfalles. Abb.26 deutet darauf hin, daß eine bei gleichbleibender Flächengröße noch stärkere

Ergebnisse mit Diskussionen

Streckung des Waldgebietes in Nord-Süd- bzw. Ost-West-Richtung zu einer weiteren Verkleinerung des Waldkerngebietes führt. Durch den dann immer dominierender werdenden Einfluß der Randgebiete, in denen ein im Vergleich zum Waldkerngebiet geringerer Lichteinflußwert pro Zelle anzutreffen ist, läßt sich insgesamt eine fortschreitende Abnahme des durchschnittlichen Lichteinflußwerts pro Zelle für das Gesamtsystem annehmen. Ferner ist zu vermuten, daß sowohl quantitativer als auch qualitativer Verlauf dieser Abnahme bei Streckung des Waldgebietes in Nord-Süd-Richtung etwas von dem bei Streckung in Ost-West-Richtung abweicht, da Wind- und Lichteinflüsse aufgrund des jeweils unterschiedlich verlaufenden Waldrandes in ihrer Wirkung unterschiedlich ausfallen können.

Leider ist es aufgrund programmtechnischer Grenzen nur möglich Wälder bis zu einer Ausdehnung von maximal 64 Zellen in Nord-Süd- bzw. Ost-West-Richtung zu untersuchen. Um zu genaueren und zuverlässigeren Aussagen bezüglich der Auswirkung noch extremer gestreckter Waldgebiete auf die oben angesprochenen Ergebnisse und naheliegenden Vermutungen zu gelangen, wäre eine zukünftige Erweiterung des Modells hinsichtlich eines vergrößerten Untersuchungsbereichs über $64 \cdot 64 = 4096$ Zellen hinaus wünschenswert.

Trotz dieser Einschränkungen des Modells lassen sich aber dennoch bereits eindeutige Tendenzen erkennen, in welche Richtung sich die Waldstruktur insgesamt verändern wird, wenn der Wald noch extremere (langgestrecktere) Formen annimmt. Festzuhalten bleibt, daß neben der Größe eines Waldes zusätzlich auch seine Form von Bedeutung sein kann, wenn es um die Abschätzung der minimal benötigten Flächengröße für ein Urwaldreservat geht.

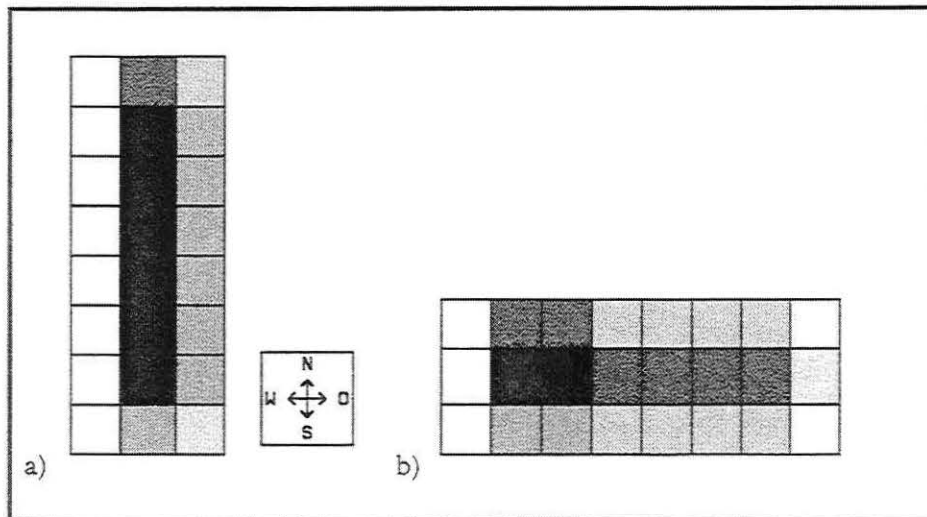


Abb. 26 Lichtverhältnisse in Waldteilausschnitten (gemittelt über 1000 Zeitschritte). Je dunkler der Grauton eines Subsystems, desto größer der durchschnittliche Lichteinflußwert pro Zelle innerhalb dieses Systems (Grauabstufungen analog Abb. 20). Der schwarze Teil markiert das Waldkerngebiet. a) $x = 25, y = 64$, b) $x = 64, y = 25$.

VI.3 Einfluß von Sturmereignissen

Bereits an einigen Stellen der vorherigen Kapitel wurde die große Bedeutung von Sturmereignissen auf die Walddynamik und -struktur in Ansätzen ersichtlich. Hier sollen nun genauere Untersuchungen vor allem in Hinsicht auf die Auswirkungen einer veränderten Sturmhäufigkeit und Sturmstärke auf das Ökosystem Buchenwald erfolgen.

VI.3.1 Sturmhäufigkeit

Da im Referenzfall bereits davon ausgegangen wird, daß innerhalb eines Zeitschrittes ein schädigender Sturm auftritt, d.h. $p_{Wind} = 1,000$ ist, werden hier die Auswirkungen bei verringerter Sturmhäufigkeit $p_{Wind} < 1,000$

Ergebnisse mit Diskussionen

untersucht. Dabei stellt sich heraus, daß mit zunehmend verringertem Auftreten von schädigenden Stürmen auch zunehmend mehr Hauptkronendachbuchen ihre maximale Kronengröße erreichen und beibehalten und zu einem zunehmend erhöhten Anteil des Flächenbedeckungsgrades im Hauptkronendach und einer entsprechenden Abnahme desselben vor allem in den unteren beiden Schichten beitragen. Einhergehend damit erklärt sich auch die bis weit über 40% reichende Abnahme des durchschnittlichen Lichteinflußwertes pro Zelle für den windfreien Extremfall $p_{Wind} = 0,000$. Zeitweise entstehen hierbei hallenwaldartige Strukturen, die die gesamte Waldfläche bedecken. Das Optimalstadium nimmt für den windfreien Fall im langjährigen Mittel weit über 60% der Gesamtwaldfläche ein, wobei es phasenweise praktisch auf der gesamten zur Verfügung stehenden Fläche anzutreffen ist, dann aber auch immer wieder in regelmäßigen Abständen parallel zum Zusammenbruch des Hauptkronendaches auf einen nur noch sehr geringen Flächenanteil absinkt (vgl. Abb.27 und Abb.28). Die Waldstruktur unterliegt großflächig auch über ausgedehnte Zeiträume hinweg periodischen Schwankungen, wobei sich ähnlich entwickelte Waldstrukturen in einem Zeitabstand von in etwa 280 Jahren wiederholen. Diese Zeitspanne entspricht ungefähr dem maximal erreichbaren Alter einer Buche. Somit ergibt sich auch für diesen speziellen Fall ein Hinweis darauf, daß die Dauer eines vollständigen Entwicklungszyklus tatsächlich in etwa durch das Höchstalter der dominierenden Baumart vorgegeben ist (vgl. KORPEL' 1995, REMMERT 1988, 1989). Betrachtet man weiter die mittlere lineare Ausdehnung der unterschiedlichen Entwicklungsstadien, so läßt sich feststellen, daß mit abnehmender Sturmhäufigkeit alle Stadien, aber vor allem das Optimalstadium im Vergleich zum Referenzfall linear deutlich ausgedehntere Gebiete in Anspruch nehmen. Tab.16 stellt dieses beispielhaft für den Fall $p_{Wind} = 0,000$ im direkten Vergleich zum Referenzfall dar. Zurückführen läßt sich diese Beobachtung für das Optimalstadium vor allem auf die Tatsache einer zeitlich sehr ausgedehnten Existenz dieses Stadiums auf fast der

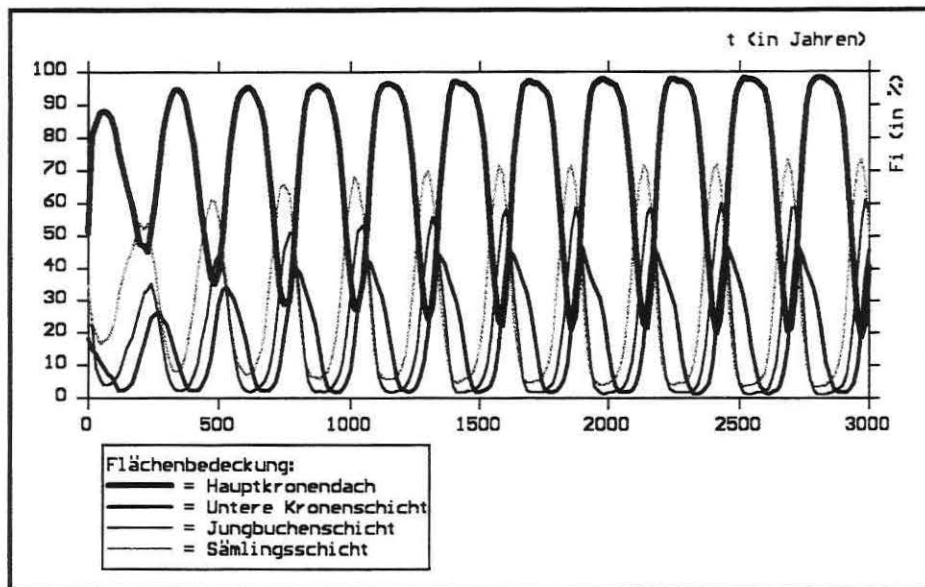


Abb.27 Zeitliche Entwicklung des Flächenbedeckungsgrades in den verschiedenen Hörschichten des Buchenwaldes für $p_{Wind} = 0,000$. Restliche Parameterwerte nach Tab.4.

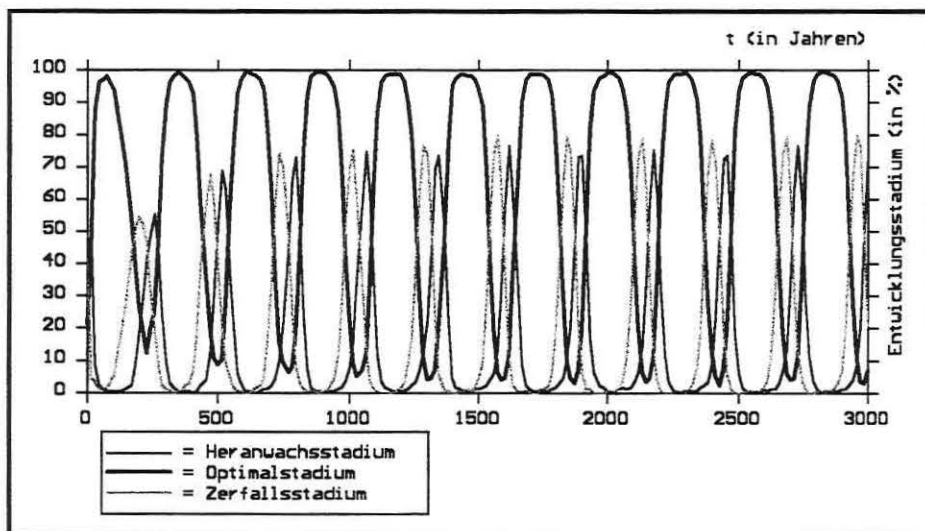


Abb.28 Zeitliche Entwicklung des relativen Anteils der verschiedenen Entwicklungsstadien an der Gesamtwaldfläche für $p_{Wind} = 0,000$. Restliche Parameterwerte nach Tab.4.

Ergebnisse mit Diskussionen

gesamten Waldfläche. In dieser relativ langen Zeitspanne ist zwangsläufig auch die flächenhafte und lineare Ausbreitung dieses Stadiums enorm, so daß die relativ kurzen Zeitspannen, in denen nur wenig dem Optimalstadium vergleichbare Strukturen zu beobachten sind, der Tendenz einer im Mittel enorm großen linearen Ausdehnung nur bedingt entgegenwirken können und lediglich zur Konsequenz haben, daß sich die Werte der mittleren Ausdehnungen auf einem etwas geringfügigeren, weiterhin jedoch sehr hohen Wert, einstellen. Daß die mittleren Ausdehnungen des Heranwachsstadiums und des Zerfallsstadiums ebenfalls über den Werten des Referenzfalls liegen, beruht auf ihrem jeweils zeitlich zwar nur kurzen, dann aber um so stärkeren und damit auch flächig und linear stark ausgedehnten Vorkommen im Waldgebiet.

	Mittlere Ost-West-Ausdehnung in Zellen für $p_{Wind} = 0,000$	Vergleich zum Referenzfall ($p_{Wind} = 1,000$)	Mittlere Nord-Süd-Ausdehnung in Zellen für $p_{Wind} = 0,000$	Vergleich zum Referenzfall ($p_{Wind} = 1,000$)
Heranwachsstadium	$5,3 \pm 5,7$	$3,8 \pm 3,3$	$5,1 \pm 5,2$	$3,3 \pm 2,8$
Optimalstadium	$14,4 \pm 14,9$	$3,5 \pm 2,8$	$14,5 \pm 14,4$	$3,1 \pm 2,4$
Zerfallsstadium	$6,2 \pm 6,7$	$4,5 \pm 4,2$	$6,0 \pm 6,3$	$3,9 \pm 3,6$

Tab.16 Mittlere Ost-West- sowie Nord-Süd-Ausdehnung des Heranwachsstadiums, des Optimalstadiums und des Zerfallsstadiums in Zellen (gemittelt über 1000 Zeitschritte) für $p_{Wind} = 0,000$ im Vergleich zum Referenzfall.

VI.3.2 Sturmstärke

Hier soll nun untersucht werden, welche Auswirkungen sich ergeben, wenn die Stärke schwacher, starker und stärkster Stürme von den im Referenzfall angenommenen Werten abweicht. Berücksichtigt wird dies indirekt durch eine entsprechende Variation in den Umkipprawrscheinlichkeiten p_{Kipp1} bis p_{Kipp3} , also den Wahrscheinlichkeiten für einen Hauptkronendachbaum bei entweder schwachem, starkem oder stärkstem Sturm abzubrechen bzw. umzufallen. Dies erscheint sinnvoll, da davon ausgegangen werden kann, daß

eine Zu- bzw. Abnahme der drei möglichen Sturmstärken mit einer der Sturmstärke entsprechend erhöhten bzw. erniedrigten Umkippwahrscheinlichkeit einhergeht.

Die Untersuchungen ergeben, daß vor allem eine Variation von p_{KippI} große Auswirkungen auf die resultierende Waldstruktur und -dynamik hat. Daß ausgerechnet dieser Parameter eine so entscheidende Bedeutung hat, liegt darin begründet, daß gerade die zwar als schwach geltenden, jedoch bereits das Hauptkronendach schädigenden Stürme, den Großteil (89%) der schädigenden Sturmereignisse insgesamt stellen. Abb.29a) zeigt die zeitliche Entwicklung des Flächenbedeckungsgrades in den verschiedenen Höenschichten des Buchenwaldes für den Fall $p_{KippI} = 0,002$. Auffällig ist, daß eine Erhöhung der Umkippwahrscheinlichkeit p_{KippI} um nur 0,001 auf nunmehr 0,002 sehr deutliche Effekte in bezug auf die Walddynamik und -struktur hat. Aufgrund einer im Vergleich zum Referenzfall verminderten durchschnittlichen Zahl an Hauptkronendachbäumen pro Zelle sowie einer gehäuften Zahl solcher Bäume mit kleinen Kronen bei gleichzeitig verminderter Zahl solcher mit großen Kronen läßt sich die starke Abnahme des sich durchschnittlich einstellenden Flächenbedeckungsgrades im Hauptkronendach erklären. Als Resultat ergibt sich ein im Durchschnitt deutlich erhöhter Lichteinfall in tieferliegende Schichten, wodurch eine starke Zunahme der entsprechenden Flächenbedeckungsgrade erkennbar wird. Diese strukturellen Änderungen machen sich auch an den jeweils im Vergleich zum Referenzfall veränderten Anteilen der drei möglichen Entwicklungsstadien an der Gesamtwaldfläche bemerkbar. So lassen sich z.B. dem Optimalstadium vergleichbare Strukturen — wenn überhaupt — nur sehr geringfügig ausgedehnt feststellen, wogegen vor allem Strukturen, die dem Zerfallsstadium zuordbar sind, nun weitaus häufiger und in Nord-Süd- als auch Ost-West-Richtung deutlich stärker ausgeprägt anzutreffen sind. Weiterhin fällt auf, daß eine Zunahme der Sturmstärke schwacher Stürme insgesamt einen glättenden Einfluß auf die zeitliche Entwicklung sowohl der verschiedenen

Ergebnisse mit Diskussionen

Flächenbedeckungsgrade als auch der Anteile der verschiedenen Entwicklungsstadien an der Gesamtwaldfläche sowie des durchschnittlichen Lichteinflußwertes pro Zelle hat.

Ganz anders hingegen präsentiert sich die Dynamik bei Abnahme von p_{Kipp1} auf 0,000. Dadurch, daß die Buchen nun von schwachen Stürmen verschont bleiben, gelingt es vielen von ihnen, eine im Vergleich zum Referenzfall entscheidend längere Zeit im Hauptkronendach zu überdauern und ihre maximal mögliche Kronengröße anzunehmen. Resultat ist ein im langjährigen Mittel deutlich dichteres Hauptkronendach. Dies ist auch der entscheidende Grund dafür, warum der durchschnittliche Lichteinflußwert pro Zelle um etwa gut 1/3 unterhalb des Wertes des Referenzfalles bleibt. Das durchschnittlich stark ausgebildete Hauptkronendach begründet auch die gehäufte Herausbildung einer dem Optimalstadium ähnelnden Struktur, welche im zeitlichen Durchschnitt auf knapp 60% der Waldfläche anzutreffen ist. Hierbei beherrscht sie vergleichbar dem im vorherigen Kapitel geschilderten Fall mit $p_{Wind} = 0,000$ auch phasenweise praktisch fast das gesamte Waldgebiet, dann aber ist sie wieder so gut wie gar nicht vorhanden und macht den anderen Entwicklungsstadien Platz. Ebenso unterliegt die Waldstruktur insgesamt auch hier über ausgedehnte Zeiträume hinweg periodischen Schwankungen, die allerdings durch starke und stärkste Stürme kurzfristig immer wieder Störungen erfahren. Sieht man einmal von diesen Störungen ab, dann wiederholen sich ähnlich erscheinende und entwickelte Waldstrukturen auf größeren Flächen ungefähr alle 280 Jahre. Auch hier läßt sich feststellen, daß vor allem das Optimalstadium im Vergleich zum Referenzfall im Mittel deutlich ausgedehnter ist. Abb.29b) verdeutlicht noch einmal beispielhaft die zeitliche Entwicklung des Flächenbedeckungsgrades in den verschiedenen Höenschichten des Buchenwaldes für den Fall $p_{Kipp1} = 0,000$.

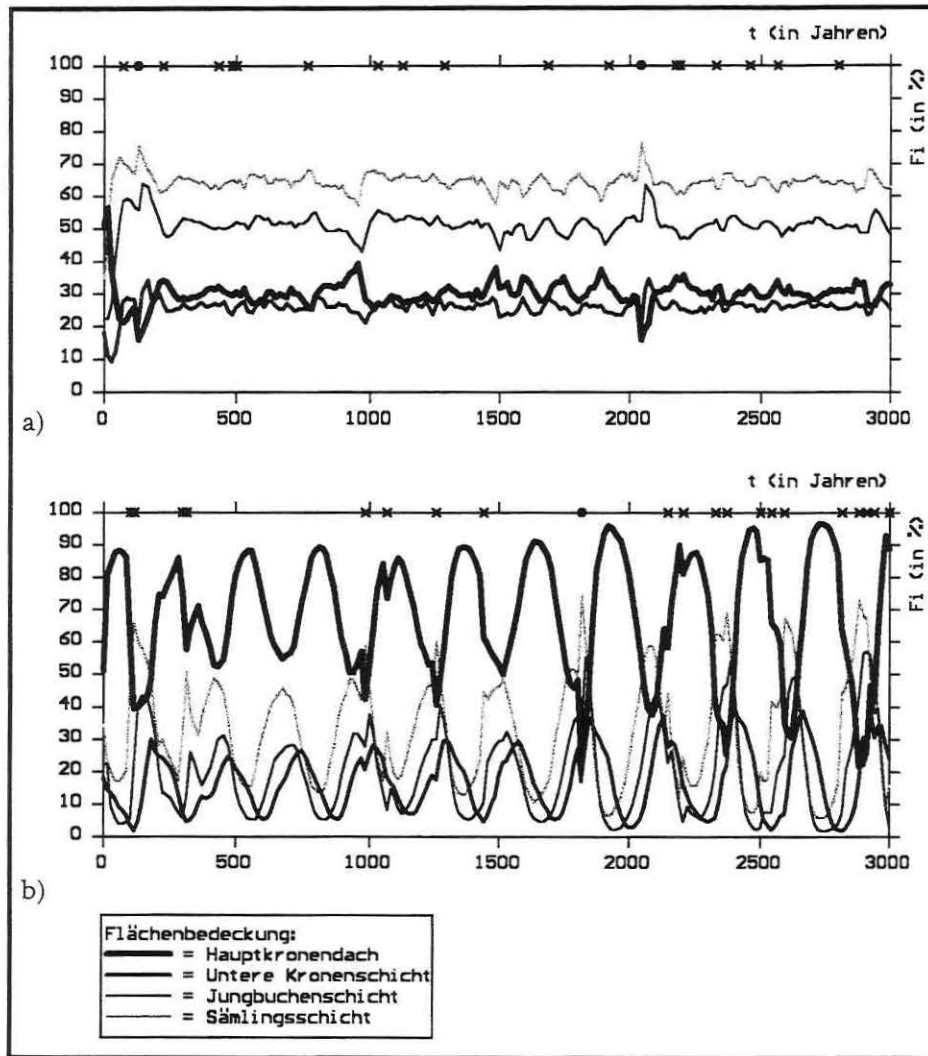


Abb.29 Zeitliche Entwicklung des Flächenbedeckungsgrades in den verschiedenen Höhengschichten des Buchenwaldes für $p_{Kipp1} = 0,002$ (a)) und $p_{Kipp1} = 0,000$ (b)). Kreuze auf der oberen horizontalen Achse markieren starke Stürme, ausgefüllte Kreise stärkste Stürme. Restliche Parameterwerte nach Tab.4.

Eine Erhöhung von p_{Kipp2} , d.h. eine Zunahme hinsichtlich der Stärke starker Stürme führt zum großen Teil zu qualitativ ähnlichen Ergebnissen wie eine Erhöhung von p_{Kipp1} . Allerdings fallen die Veränderungen bei prozentual gleich starker Erhöhung deutlich geringer als im vorherigen Fall aus. Dies läßt sich vor allem auf das im Vergleich zu schwachen Stürmen wesentlich geringere

Ergebnisse mit Diskussionen

Vorkommen starker Sturmereignisse zurückführen. Qualitative Unterschiede lassen sich in bezug auf die mittlere Ausdehnung des Optimalstadiums feststellen. So ist bei einer Verdoppelung von p_{Kipp2} auf 0,004 eine geringfügige Zunahme der mittleren linearen Ausdehnung des Optimalstadiums um etwa 10% zu beobachten, wogegen eine prozentual gleich große Erhöhung von p_{Kipp1} noch zu einer Abnahme dieser Ausdehnungen führte. Dieser Unterschied wird verständlich, wenn man bedenkt, daß in letzterem Fall das Hauptkronendach stärker als im Referenzfall praktisch kontinuierlich immer wieder kleinflächig geschädigt wird, und dadurch die Herausbildung großflächiger hallenwaldartiger Strukturen erschwert wird. Im anderen Fall hingegen finden zwar seltenere, dafür aber stärkere Schädigungen des Hauptkronendaches statt. Aufgrund der Stärke der Schädigungen werden nun aber bereits kleinere zusammenhängende Bereiche des Hauptkronendaches flächig geworfen. Diese Sturmereignisse haben somit einen zusätzlich synchronisierenden Einfluß auf die Herausbildung großflächiger einheitlicher Strukturen. Ebenfalls lassen sich qualitative Unterschiede bei Betrachtung der zeitlichen Entwicklung des Flächenbedeckungsgrades in den verschiedenen Höschichten des Buchenwaldes als auch bei der zeitlichen Entwicklung der Anteile der Entwicklungsstadien an der Gesamtwaldfläche feststellen. Hatte eine geringfügige Erhöhung der Sturmstärke schwacher Stürme noch einen insgesamt glättenden Einfluß auf diese zeitlichen Entwicklungen, so bewirkt eine Erhöhung der Sturmstärke starker Stürme statt dessen genau das Gegenteil und führt immer wieder zu kurzfristigen, deutlich sichtbaren Veränderungen bzw. Störungen in der Waldstruktur.

Eine Abnahme in der Stärke starker Stürme führt ähnlich wie eine Abnahme in der Stärke schwacher Stürme zu einem im Vergleich zum Referenzfall (hier allerdings nur geringfügig) erhöhten Anteil des Flächenbedeckungsgrades im Hauptkronendach auf Kosten der anderen Schichten und einem immerhin um etwa 50% erhöhten durchschnittlichen Anteil des Optimalstadiums auf nunmehr durchschnittlich knapp 30% an der Gesamtwaldfläche. Ebenfalls ist eine geringfügige Zunahme der Ausdehnung

des Optimalstadiums und eine schwache Abnahme des durchschnittlichen Lichteinflußwertes pro Zelle festzustellen.

Bei einer Erhöhung von p_{Kipp3} , d.h. einer noch weiteren Zunahme der Stärke stärkster Stürme, lassen sich praktisch nur noch minimale Unterschiede zum Referenzfall feststellen. Dies liegt vor allem darin begründet, daß der Wald bereits bei der im Referenzfall angenommenen Stärke der stärksten Sturmergebnisse kurzfristig äußerst starke und großflächige Schäden erfährt, die auch durch eine nochmalige Erhöhung der entsprechenden Umkippwahrscheinlichkeit in ihren Auswirkungen kaum noch stärker ausfallen können.

Auch eine weitere Verringerung von p_{Kipp3} führt bis auf das letztendliche Ausbleiben der durch die entsprechenden Stürme verursachten sehr seltenen und kurzzeitig auftretenden extrem starken Störeinflüsse zu dem Referenzfall analogen Ergebnissen.

Verdoppelt man gleichzeitig die im Referenzfall angenommenen Werte von p_{Kipp1} bis p_{Kipp3} , ergibt sich ein Verhalten, das im Mittel sehr gut dem entspricht, welches sich bei einer alleinigen vergleichbaren Erhöhung von p_{Kipp1} beobachten läßt (vgl. oben). Auffällig ist allerdings, daß neben dieser guten Übereinstimmung bezüglich des langjährigen mittleren Verhaltens, kurzfristig immer wieder deutlich stärkere Abweichungen von diesen mittleren Werten auftreten, was u.a. in einer Zunahme der Standardabweichungen bei den Flächenbedeckungsgraden, den Anteilen der verschiedenen Entwicklungsstadien an der Gesamtwaldfläche und des durchschnittlichen Lichteinflußwertes pro Zelle auf einen im Schnitt etwa doppelt so hohen Wert deutlich wird. Die Erklärung für diese Tatsache liegt darin begründet, daß nun bereits auch schon die relativ häufig auftretenden als schwer eingestuften Stürme als extrem starke Störereignisse aufzufassen sind. Sie führen so kurzzeitig immer wieder zu erheblichen Abweichungen in den Flächenbedeckungsgraden und damit auch in den Anteilen der verschiedenen

Ergebnisse mit Diskussionen

Entwicklungsstadien an der Gesamtwaldfläche sowie in den Werten für den durchschnittlichen Lichteinflußwert pro Zelle. Dennoch haben sie aber praktisch keinerlei Auswirkungen auf die entsprechenden sich einstellenden mittleren Werte.

Verringert man dagegen die im Referenzfall angenommenen Werte von p_{Kipp1} bis p_{Kipp3} gemeinsam, so kommen die bereits oben für die Abnahme von nur jeweils einer dieser Umkipprawahrscheinlichkeiten p_{Kipp1} bis p_{Kipp3} gemachten Aussagen in ihrer Summe zu tragen. Werden die entsprechenden Umkipprawahrscheinlichkeiten schließlich sogar so weit abgesenkt, daß sie alle den Wert Null besitzen, ergeben sich analoge Ergebnisse zu dem in Kapitel VI.3.1 geschilderten Fall $p_{Wind} = 0,000$.

VI.3.3 Bedeutung des Kippwahrscheinlichkeitserhöhungsmaßes E_{pKipp} für die Walddynamik

Betrachtet man die Auswirkungen von Stürmen auf die Walddynamik, muß neben der Häufigkeit und der Stärke von Stürmen als ein zusätzlicher Faktor das Kippwahrscheinlichkeitserhöhungsmaß E_{pKipp} berücksichtigt werden. Noch einmal zur Erinnerung: Ein von null verschiedener Wert von E_{pKipp} bewirkt, daß Hauptkronendachbuchen, die aufgrund von Lücken in der obersten Schicht der benachbarten und in Windrichtung liegenden Zelle stärker dem Sturm ausgesetzt sind, mit erhöhter Wahrscheinlichkeit von diesem Sturm umgeworfen werden, und zwar um so wahrscheinlicher, je größer diese Lückenfläche sowie E_{pKipp} sind und je größer die zusätzlich vorhandene Lückenfläche in der obersten Schicht der benachbarten und entgegengesetzt der Windrichtung liegenden Zelle ist.

Was geschieht aber nun genau, wenn E_{pKipp} größer bzw. kleiner als im Referenzfall angenommen angesetzt wird?

Für den ersten Fall besteht für Buchen nun eine im Vergleich zum Referenzfall erhöhte Wahrscheinlichkeit, einem Sturm zum Opfer zu fallen. Die sich dabei ergebenden Ergebnisse sind mit denen, welche sich bei einer gemeinsamen Zunahme der Umkipprawahrscheinlichkeiten p_{Kipp1} bis p_{Kipp3} (vgl. Kapitel VI.3.2) ergeben, qualitativ vergleichbar, so daß hier nicht noch einmal näher darauf eingegangen werden soll.

Wird E_{pKipp} dagegen kleiner als im Referenzfall angenommen, lassen sich Ergebnisse feststellen, welche qualitativ zunächst sehr gut mit denen der gemeinsamen (moderaten) Abnahme der Umkipprawahrscheinlichkeiten p_{Kipp1} bis p_{Kipp3} übereinstimmen (vgl. Kapitel VI.3.2). Sichtbare Unterschiede zu jenem Fall ergeben sich schließlich erst bei sehr kleinen, im Extremfall gegen null gehenden Werten von E_{pKipp} , da auch für $E_{pKipp} = 0,000$ noch immer ein (durch die entsprechenden Umkipprawahrscheinlichkeiten bestimmter) zwar im Vergleich zum Referenzfall weitaus geringerer, aber dennoch prozentual konstanter Teil von Buchen des Hauptkronendaches einem Sturm zum Opfer fällt, so daß sich quantitativ minimal unterschiedliche Ergebnisse im Vergleich zum Fall der verschwindenden Umkipprawahrscheinlichkeiten (vgl. Kapitel VI.3.2) ergeben.

VI.4 Einfluß der Hauptwindrichtung

Neben den Auswirkungen auf die Walddynamik und -struktur — hervorgerufen durch eine veränderte Sturmhäufigkeit und Sturmstärke — lassen sich entsprechende Auswirkungen bei einer Variation der Hauptwindrichtung nicht ohne weiteres vorhersehen. Dieses liegt insbesondere daran, daß diejenigen Wechselwirkungen, die durch Lichteinflüsse bedingt sind, ihre von der jeweiligen Himmelsrichtung abhängige Wirkung weiterhin in ursprünglicher Art und Weise entfalten — und zwar unabhängig von der Veränderung der Hauptwindrichtung. Die

Ergebnisse mit Diskussionen

Untersuchungen zeigen, daß bei Drehung der gesamten Sturmwindrose⁷⁴ in jede weitere der nach dem Modell neben SW noch möglichen Hauptwindrichtungen W, NW, N, NO, O, SO oder S lediglich Veränderungen in bezug auf die durchschnittliche lineare Ost-West- bzw. Nord-Süd-Ausdehnung der Entwicklungsstadien zu bemerken sind. Die durchschnittlich größten Werte für die Ost-West-Ausdehnung aller Stadien ergeben sich neben den Werten des Referenzfalles für $HWR = NO$, die kleinsten für $HWR = SO$ und NW. Die sich im langjährigen Mittel einstellenden kleinsten bzw. größten linearen Ost-West-Ausdehnungen betragen dabei für das Heranwachsstadium 3,4 bzw. 3,9, für das Optimalstadium 3,1 bzw. 3,6 und für das Zerfallsstadium 3,9 bzw. 4,6 Zellen. Genau umgekehrte Verhältnisse liegen für die entsprechenden Nord-Süd-Ausdehnungen vor. Hier ergeben sich neben dem Referenzfall die jeweils durchschnittlich geringsten Werte für $HWR = NO$, die jeweils größten dagegen für $HWR = SO$ und NW. Die sich in diesem Fall im langjährigen Mittel einstellenden kleinsten bzw. größten linearen Nord-Süd-Ausdehnungen betragen hierbei für das Heranwachsstadium 3,3 bzw. 3,7, für das Optimalstadium 3,1 bzw. 3,5 und für das Zerfallsstadium 3,9 bzw. 4,6 Zellen.

Die geschilderten Veränderungen in den linearen Ausdehnungen der unterschiedlichen Stadien in Abhängigkeit von der Hauptwindrichtung werden verständlich, wenn man zwei Dinge berücksichtigt.

Zum einen werden Bäume grundsätzlich in Windrichtung geworfen, wodurch schließlich auch weitere in dieser Richtung liegende Buchen zusätzlich geschädigt oder umgeworfen werden, so daß sich als Resultat langgestreckte und in Windrichtung weisende Windwurfflächen ergeben, die eine entsprechende Synchronisation der Waldstruktur, d.h. der Entwicklungsstadien auf diesen Flächen begünstigen. Empirische Beobachtungen stehen in Einklang mit diesen vom Modell produzierten Ergebnissen. So wird davon berichtet, daß schwere Stürme Buchen in

⁷⁴ nähere Erläuterungen zur Sturmwindrose vgl. Anhang Regel 77) und 78)

Windrichtung umwerfen (BREWER u. MERRIT 1978) und aufgrund der dadurch entstandenen Kronendach-Lücken fortschreitend weitere diesen Lücken benachbarte Buchen in Windrichtung werfen (PETERS 1992, WAGNER 1907), wodurch die spontane Entstehung relativ homogen erscheinender Waldstrukturen auf diesen Windwurfflächen begünstigt wird (SCHERZINGER 1996).

Zum anderen muß bedacht werden, daß der größte Teil aller schädigenden Stürme zwar aus der Hauptwindrichtung kommt, jedoch Stürme, die um 45° bzw. um -135° versetzt zu dieser Hauptwindrichtung auftreten, in der Summe einen weitaus größeren Teil der Sturmereignisse stellen als solche, die in der Summe aus der Hauptwindrichtung und entgegengesetzt zu ihr auftreten. Folge ist schließlich ein gehäuftes Auftreten länglicher, in zur Hauptwindrichtung versetzter Richtung auftretender Windwurfflächen mit entsprechender Ausrichtung der Entwicklungsstadien.

VI.5 Einfluß unterschiedlich starker Samenproduktion

Im Referenzfall wird davon ausgegangen, daß Buchen innerhalb eines Zeitschrittes so viele Samen produzieren, daß die sich entwickelnden Sämlinge unter günstigsten Bedingungen die gesamte Bodenfläche bedecken. Der Referenzfall entspricht damit dem Fall maximal möglicher Samenproduktion. Eine Verringerung in der Samenproduktion wird durch einen entsprechend verringerten Wert $s_{\max}$ des maximal möglichen durch Sämlinge verursachten Bedeckungsgrades am Boden repräsentiert. Es läßt sich feststellen, daß eine kontinuierliche Verringerung von $s_{\max}$ erwartungsgemäß zu einem entsprechend verringerten Anteil des durchschnittlichen Flächenbedeckungsgrades in der Sämlingsschicht führt. Daraus resultiert schließlich auch eine Abnahme der Flächenbedeckungsgrade in den höheren Schichten. Diese Abnahme verläuft zunächst jedoch noch äußerst moderat

Ergebnisse mit Diskussionen

und gewinnt erst für $s_{\max} \leq 0,900$ langsam an Deutlichkeit. Für den theoretischen Fall $s_{\max} = 0$ werden schließlich gar keine Samen mehr produziert, und der Buchen-Waldbestand kann nicht überdauern. Entsprechend der Abnahme der Bedeckungsgrade in allen Schichten des Waldes kommt es kontinuierlich zu einem stärkeren Lichteinfall in tiefere Waldschichten und einem Anstieg des durchschnittlichen Lichteinflußwertes pro Zelle.

Als Fazit bleibt festzuhalten, daß eine stärkere Abnahme in der Samenproduktion primär zu einer veränderten vertikalen Waldstruktur mit daraus resultierenden veränderten Lichtverhältnissen im Wald führt. Sekundär schaffen diese veränderten Bedingungen im Wald dann die Voraussetzung dafür, daß sich andere, an diese veränderten Bedingungen gut angepasste Arten im Ökosystem Buchenwald etablieren können, wodurch eine Veränderung dieses Ökosystems möglich erscheint.

VI.6 Mortalität und intraspezifische Konkurrenz

Im Modell wird davon ausgegangen, daß am angenommenen Buchenwaldstandort die für das Pflanzenwachstum notwendigen Ressourcen Wasser und Nährstoffe in ausreichender Menge zur Verfügung stehen, so daß keine Konkurrenz um diese Ressourcen berücksichtigt zu werden braucht. Explizit berücksichtigt wird dagegen die innerartliche (intraspezifische) Konkurrenz um die zur Entwicklung der Buchen notwendige Ressource Licht.

Konkurrenz um Licht spielt in allen vier horizontalen Schichten des Buchenwaldes eine Rolle. Die zugrundeliegenden Mechanismen unterscheiden sich dabei jedoch teilweise erheblich. So erhalten sämtliche Buchen des Hauptkronendaches prinzipiell wegen ihrer von nun an nicht mehr überschattenbaren Stellung stets eine für ihr gesundes Gedeihen ausreichende

Menge an Licht. Dennoch werden sich auf Dauer auch in dieser Schicht im Laufe der Zeit nur die fittesten und stärksten Individuen durchsetzen und die kleineren und schwächeren immer stärker seitlich be- und schließlich sogar komplett verdrängen. In den tiefer liegenden Schichten einer Zelle führt dagegen vor allem eine hohe Abschattung zu einer hohen Mortalität und einem gehemmten Wachstum. Zusätzlich wird in der unteren Kronenschicht die Konkurrenz um Licht dadurch berücksichtigt, indem eine einzelne Buche dieser Schicht nur eine maximale Verweildauer von sechs Zeitschritten unter dem dicht geschlossenen Schirm des Hauptkronendaches überdauern kann, um dann schließlich aufgrund des zu lange andauernden Lichtmangels abzusterben. Ferner repräsentiert die Größe der maximalen Wahrscheinlichkeit je Zeitschritt für die Herausbildung einer Buche des unteren Kronendachs aus der Jungbuchenschicht $w_{\max}$ ein weiteres Maß für die Konkurrenz um Licht. Je geringer diese angesetzt wird, um so stärker ist die entsprechende Konkurrenz zwischen diesen Schichten anzusehen.

Nähere Untersuchungen hinsichtlich der Konkurrenz um Licht beruhen demnach auf einer Variation in den Werten der Mortalitätsratenerniedrigung durch Lücken im Hauptkronendach und in der unteren Kronenschicht (L_{IV} und L_{III}), einer Veränderung in der Stärke der asymmetrischen Konkurrenz zwischen Hauptkronendachbuchen, einer veränderten maximalen III-Buchen-Herausbildungswahrscheinlichkeit $w_{\max}$ sowie auf einer Variation der Dauer der maximal möglich erscheinenden Überschirmungszeit von Buchen der unteren Kronenschicht durch Buchen des Hauptkronendaches.

Neben diesen Konkurrenzprozessen ist weiter davon auszugehen, daß insbesondere die Größen der zunächst ohne Beeinflussung durch mögliche Wechselwirkungen und Einflußgrößen vorgegebenen Mortalitätsraten m_I bis m_{IV} einen wichtigen Faktor bezüglich der sich einstellenden Buchenwalddynamik darstellen.

Ergebnisse mit Diskussionen

Ausgewählte Ergebnisse dieser Untersuchungen sollen im folgenden dargestellt werden.

Im Referenzfall wird davon ausgegangen, daß in den unteren beiden Schichten des Buchenwaldes ohne zusätzlich positiv wirkende Einflüsse maximale unbeeinflusste Mortalitätsraten ($m_I, m_{II} = 1,000$) vorherrschen.

In der Sämlingsschicht führt eine angenommene zunehmende Abnahme zu dem überraschenden Ergebnis, daß der Flächenbedeckungsgrad in dieser Schicht mit kleiner werdendem m_I stetig abnimmt (für den Fall des rein theoretischen Minimalwertes von $m_I = 0,000$ um maximal bis zu etwa 14%), wovon vor allem die Jungbuchenschicht (Zunahme des Flächenbedeckungsgrades um maximal etwa 50% auf dann knapp 47%), aber auch die restlichen anderen beiden Schichten (Zunahmen um etwa maximal 25% (Untere Kronenschicht) bzw. 10% (Hauptkronendach)) profitieren. Gleichzeitig läßt sich auch eine entsprechende Veränderung der Anteile der verschiedenen Entwicklungsstadien an der Gesamtwaldfläche feststellen (Zunahme des Anteils des Heranwachsstadiums, Abnahme der Anteile der anderen Stadien). Resultat einer Verringerung von m_I ist auch — beruhend auf den dann durchweg erhöhten durchschnittlichen Flächenbedeckungsgraden in den oberen Schichten — eine zunehmende Verringerung des Wertes des mittleren durchschnittlichen Lichteinflußwertes pro Zelle. An dieser Tatsache liegt es letztendlich auch, daß eine Abnahme von m_I zu der Verringerung des Flächenbedeckungsgrades in der Sämlingsschicht führt. Eine verringerte Sämlings-Mortalitätsrate führt nämlich in der Regel zunächst dazu, daß innerhalb nur eines Zeitschrittes ein im Vergleich zum Referenzfall größerer Anteil der vorhandenen Sämlinge in die Jungbuchenschicht und später schließlich auch in noch höhere Schichten hineinwächst, was insgesamt zu einer Zunahme der Flächenbedeckungsgrade in den oberen drei Schichten und zu einer Abnahme des Maßes für die durch die Schichten II bis IV insgesamt nicht überschirmte Fläche⁷⁵ führt. Fällt

⁷⁵ vgl. Anhang A1. Regel 61)

dieses Maß unter einen bestimmten Schwellenwert, dann bedingt die Abschattung am Boden eine zusätzliche Abhängigkeit der „Menge“ des Nachwuchses auch von den in der Zelle insgesamt vorherrschenden Lichtverhältnissen. Diese Menge sinkt dann mit zunehmender Abnahme des durchschnittlichen Lichteinflußwertes pro Zelle immer weiter ab, wodurch die Verringerung des Flächenbedeckungsgrades in der Sämlingsschicht erklärbar wird. D.h.: Für die Sämlingsschicht gibt es eine Regulation in Form einer negativen Rückkopplung.

Eine Verringerung von m_{II} führt zu dem vorherigen Fall vergleichbaren und qualitativ identischen Ergebnissen, denen eine analoge Argumentation zugrunde liegt. Deshalb soll hier nicht näher darauf eingegangen werden.

Wird dagegen m_{III} als noch kleiner als im Referenzfall angenommen, dann ergeben sich praktisch keine Unterschiede zu den dortigen Ergebnissen. Dies erscheint auch nicht sonderlich überraschend, da die Mortalitätsrate m_{III} im Referenzfall mit nur 0,030 pro Zeitschritt bereits als sehr klein einzustufen ist und eine weitere Verkleinerung daher nur noch geringfügige Verbesserungen für das Überleben einzelner Buchen in der unteren Kronenschicht bieten kann. Vergrößert man m_{III} jedoch deutlich über seinen im Referenzfall angenommenen Wert hinaus, dann lassen sich ab etwa $m_{III} = 0,100$ erste geringfügige strukturelle Veränderungen feststellen. Die weitere Erhöhung von m_{III} bis hin zum theoretisch sinnvoll erscheinenden Wert von $m_{III} = 0,400$ führt zu einer schwachen Verringerung der durchschnittlichen Zahl an Buchen in der unteren Kronenschicht und zu einer ebenfalls schwachen Abnahme der mittleren Anzahl an Hauptkronendachbuchen. Verbunden damit ergibt sich in den beiden oberen Schichten ein im Mittel geringfügig verminderter Flächenbedeckungsgrad, von dem aufgrund des dann etwas geringfügig erhöhten Lichteinfalls in tiefer liegende Waldschichten die unteren beiden Schichten profitieren. Beruhend auf dieser kleinen Veränderung in der vertikalen Waldstruktur läßt sich auch eine von diesen Strukturen abhängige schwache Veränderung bezüglich der durchschnittlichen relativen Anteile der Entwicklungsstadien an der

Ergebnisse mit Diskussionen

Gesamtwaldfläche beobachten. Dabei bleibt der relative Anteil des Optimalstadiums an der Gesamtwaldfläche konstant, wogegen der des Heranwachsstadiums zugunsten des Zerfallsstadiums ein wenig verringert in Erscheinung tritt. Sämtliche anderen Auswertegrößen weichen nur so geringfügig von den Ergebnissen des Referenzfalls ab, daß ich es nicht für nötig halte, hier näher darauf einzugehen.

Festhalten läßt sich damit, daß eine in relativ weitem Rahmen veränderte (unbeeinflusste) Mortalitätsrate m_{III} nur sehr schwache Auswirkungen auf die zukünftige Buchenwalddynamik erwarten läßt. Offenbar reicht das Vorhandensein der im Mittel relativ geringen Anzahl an Buchen der unteren Kronenschicht aus, eine Walddynamik aufrecht zu erhalten, wie sie für einen natürlichen Buchenwald als typisch angesehen wird.

Auch eine Veränderung des Wertes von m_{IV} führt in dem als empirisch sinnvoll einzustufenden Bereich zu keinerlei Veränderungen in der Walddynamik und -struktur. Dies läßt sich auf die Kleinheit des Parameters in diesem Bereich zurückführen.

Nach der Betrachtung der Auswirkungen veränderter Werte der unbeeinflussten Mortalitätsraten m_I bis m_{IV} auf die Buchenwalddynamik, sollen nun die Auswirkungen eines veränderten Lichteinfalls auf das Buchenwachstum und die Konkurrenz im Blickpunkt stehen. Genauer: Es soll untersucht werden, inwieweit eine durch Lücken im Hauptkronendach und in der unteren Kronenschicht hervorgerufene unterschiedlich starke Beeinflussung der vorher unbeeinflussten Mortalitätsraten das Konkurrenzverhalten der Buchen untereinander beeinträchtigt und welche Auswirkungen sich damit für den Buchenwald ergeben.

Zunächst sollen die Auswirkungen bei veränderten Werten von L_{IV} , d.h. bei Veränderung des Maßes für die Erniedrigung der noch unbeeinflussten Mortalitätsraten in der Sämlings-, Jungbuchen- und unteren Kronenschicht

verursacht je Hauptkronendachlücke von jeweils 1/8 der Zellengrundfläche in den in Frage kommenden Zellen, betrachtet werden.

Dabei stellt sich heraus, daß eine zunehmende Abnahme des im Referenzfall angenommenen Wertes von L_{IV} , d.h. eine steigende Verringerung des positiven Lichteinflusses auf die Mortalität der Bäume in den unteren drei Schichten, dazu führt, daß es pro Zelle zu einer im Vergleich zum Referenzfall deutlichen Abnahme sowohl des Anteils der Buchen in der unteren Kronenschicht als auch im Hauptkronendach kommt (vgl. Abb.30). Demgegenüber steht eine — allerdings deutlich geringfügiger ausfallende — Zunahme in der durchschnittlichen Kronengröße einer Hauptkronendachbuche (vgl. Abb.31). Diese Zunahme läßt sich auf die insgesamt im Durchschnitt verringerte Zahl entsprechender Buchen pro Zelle zurückführen, so daß verhältnismäßig viele das Hauptkronendach erreichenden Buchen aufgrund der dort verringerten Konkurrenz schnell ihre maximale Ausdehnung annehmen können.

Einhergehend mit diesen Ergebnissen läßt sich feststellen, daß eine zunehmende Abnahme des im Referenzfall angenommenen Wertes von L_{IV} auch dazu führt, daß nun sowohl die Jungbuchen-, als auch die untere Kronenschicht sowie das Hauptkronendach im Mittel zunehmend deutlich weniger stark ausgeprägt erscheinen, wohingegen der Anteil des Bedeckungsgrades in der Sämlingsschicht stark ansteigt. Daß jener Anteil so verstärkt ausgeprägt erscheint, liegt darin begründet, daß sich aufgrund eines insgesamt wesentlich geringeren Überschirmungsgrades am Boden kurzfristig immer wieder sehr viele Sämlinge ansiedeln können, der Großteil dieser dann aber wegen der relativ hohen resultierenden Mortalitätsrate sehr schnell wieder abstirbt und erst gar nicht in die nächsthöhere Schicht hineinwächst. Abb.32 zeigt den zeitlichen Verlauf des prozentualen Anteils der Flächenbedeckungsgrade in den verschiedenen Schichten für den Fall $L_{IV} = 0,001$.

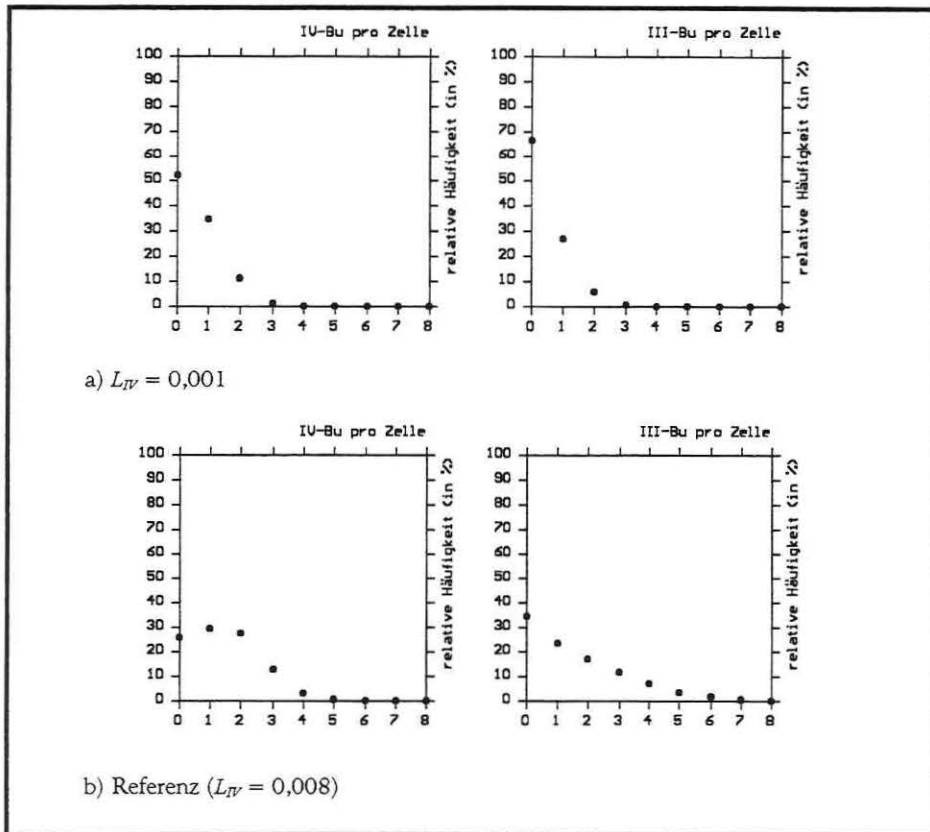


Abb.30 Relative Häufigkeit der Anzahl von Buchen des Hauptkronendaches (IV-Bu) und der unteren Kronenschicht (III-Bu) pro Zelle. Gemittelt über 1000 Zeitschritte. a) $L_{IV} = 0,001$, sonstige Parameterwerte nach Tab.4, b) Parameterwerte nach Tab.4.

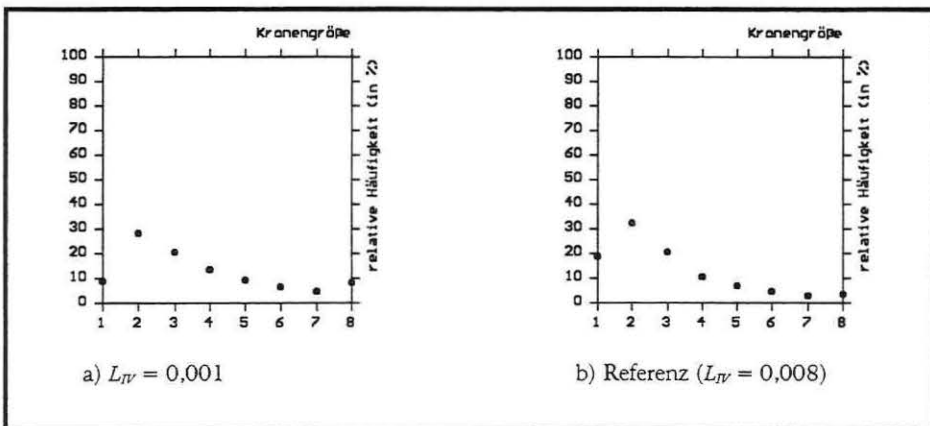


Abb.31 Relative Häufigkeit unterschiedlich großer Kronen von Buchen des Hauptkronendaches. Angaben in 1/8 der Grundfläche einer Zelle. Gemittelt über 1000 Zeitschritte. a) $L_{IV} = 0,001$, sonstige Parameterwerte nach Tab.4, b) Parameterwerte nach Tab.4.

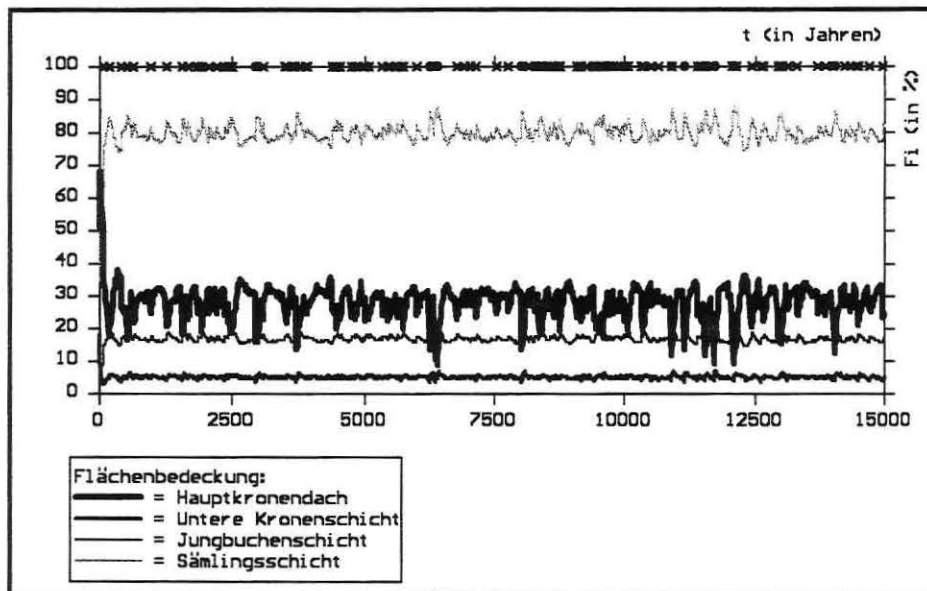


Abb.32 Zeitliche Entwicklung des Flächenbedeckungsgrades in den verschiedenen Höhengschichten des Buchenwaldes für $L_{IV} = 0,001$. Restliche Parameterwerte nach Tab.4.

Es stellt sich heraus, daß hallenwaldartige, dem Optimalstadium ähnelnde Strukturen nun praktisch nicht mehr vorhanden sind und die Waldstruktur fast ausschließlich von Strukturen beherrscht wird, die dem Zerfallsstadium ähneln.

Eine prozentual gleich große Abnahme des im Referenzfall angenommenen Wertes von L_{III} , d.h. des Maßes für die Erniedrigung der noch unbeeinflussten Mortalitätsraten in der Sämlings-, Jungbuchen- und unteren Kronenschicht verursacht je Lücke in der unteren Kronenschicht von jeweils 1/8 der Zellengrundfläche in den in Frage kommenden Zellen, führt zu qualitativ identischen, quantitativ jedoch geringfügiger ausgeprägten Ergebnissen als bei den entsprechenden L_{IV} -Betrachtungen. Dies läßt sich vor allem auf den nicht so deutlich ausgeprägten Einfluß von Lücken in der unteren Kronenschicht auf die Erniedrigung der Wertes der unbeeinflussten Mortalitätsraten in tiefer liegenden Schichten zurückführen.

Ergebnisse mit Diskussionen

Eine Zunahme über die im Referenzfall angenommenen Werte von L_{III} und L_{IV} hinaus, d.h. eine weitere Steigerung des positiven Lichteinflusses auf die Mortalität der Bäume in tieferliegenden Schichten und damit eine Entspannung bezüglich der intraspezifischen Konkurrenz um Licht führt in beiden Fällen zu Ergebnissen, die erwartungsgemäß durchweg entgegen den oben geschilderten sind.

Betrachtet man nun einmal nur das Hauptkronendach für sich allein, dann läßt sich feststellen, daß dort Konkurrenz um Licht nun nicht mehr in Form des gegenseitigen Überwachsens von Buchen verschiedener Höhen stattfinden kann. Buchen des Hauptkronendachs befinden sich alle in der obersten Höhenstufe des Buchenwaldes und können damit praktisch nicht mehr an zusätzlicher Höhe gewinnen. Diese Buchen können natürlich auch nicht mehr von anderen Buchen überschattet werden. Damit erhalten sie anhand ihrer exponierten Stellung zunächst grundsätzlich eine für ihr Wachstum ausreichende Menge an Licht. An dieser Stelle tritt nun die intraspezifische Konkurrenz in der Form in Erscheinung, daß die sich im Hauptkronendach befindenden größten und fittesten Buchen einen für ihr Gedeihen überproportionalen Anteil an Licht für sich beanspruchen (asymmetrische Konkurrenz) und diesen Vorteil in eine verstärkte Kronenbildung umsetzen. Darunter zu leiden haben schließlich die kleinsten und schwächsten Hauptkronendachbuchen, welche immer stärker von den stärkeren bedrängt und schließlich sogar verdrängt werden. Im Referenzfall wurde diese Konkurrenz im Hauptkronendach dadurch berücksichtigt, daß die größten und stärksten Buchen einer Zelle innerhalb eines Zeitschritts mit 50-prozentiger Wahrscheinlichkeit ihre Kronen auf Kosten der kleinsten und schwächsten Buchen vergrößern. Was passiert nun aber, wenn diese Wahrscheinlichkeit größer bzw. kleiner anzusehen ist? Nähere Untersuchungen, in denen diese je Zeitschritt zwischen 25% und 100% variiert wurde, ergaben keine Veränderungen bezüglich der raum-zeitlichen Walddynamik. Es konnte für den Fall einer stark erhöhten

Wahrscheinlichkeit lediglich eine Abnahme der durchschnittlichen Anzahl an Hauptkronendachbuchen pro Zelle und eine Zunahme in der Größe der durchschnittlichen Kronenschirmfläche dieser Buchen festgestellt werden. Dieses Resultat entspricht dabei den Erwartungen, da die sich bei gleichen Rahmenbedingungen durchschnittlich schneller ausbreitenden fittesten Hauptkronendachbuchen in schnellstmöglicher Zeit ihre maximale Kronenschirmfläche erreichen und mit dieser maximalen Schirmfläche eine im Vergleich zum Referenzfall durchschnittlich längere Zeit im Hauptkronendach verweilen. Dagegen werden schwächere Hauptkronendachbuchen mit kleiner Kronenschirmfläche so schnell wie möglich wieder verdrängt. Daß es zu keiner weiteren Veränderung in der Walddynamik kommt, läßt sich darauf zurückführen, daß es für das Wachstum in den unteren Schichten unerheblich ist, ob das Hauptkronendach aus vielen etwas kleineren oder wenigen, dafür aber größeren, Buchen gebildet wird. In der Regel wird auch für den Fall nicht zu klein gewählter Vergrößerungswahrscheinlichkeit der Kronenschirmflächen nach gewisser Zeit wie im Referenzfall nur eine große Buche pro Zelle dominieren. So kommt es für den Fall des Ablebens dieser großen Buchen dann zu dem Referenzfall vergleichbaren Regenerationsmustern.

$w_{\max}$, d.h. die maximale Wahrscheinlichkeit je Zeitschritt für die Herausbildung einer Buche der unteren Kronenschicht aus der Jungbuchenschicht, stellt ein weiteres Maß für die Konkurrenz um Licht dar. Ein Wert von $w_{\max} < 1,000$ entspricht dabei einem im Vergleich zum Referenzfall erhöhten Maß an intraspezifischer Konkurrenz zwischen der Jungbuchenschicht und der unteren Kronenschicht. Die Untersuchungen zeigen, daß innerhalb des als theoretisch sinnvoll erachteten Wertebereichs von $w_{\max}$ (vgl. Tab.3) zunächst nur relativ geringe Veränderungen in sämtlichen Auswertegrößen und in der raum-zeitlichen Dynamik zu beobachten sind. Verläßt man diesen Bereich jedoch und vermindert $w_{\max}$ weiter, so ist insbesondere eine verstärkte Abnahme sowohl der

Ergebnisse mit Diskussionen

durchschnittlichen Anzahl der Buchen der oberen beiden Schichten als auch eine Abnahme der entsprechenden Bedeckungsgrade mit den daraus folgenden strukturellen Veränderungen (deutliche Zunahme der Flächenbedeckungsgrade in den tiefer liegenden Schichten, stark veränderte relative Anteile der verschiedenen Entwicklungsstadien an der Gesamtwaldfläche) die Folge.

Die intraspezifische Konkurrenz um Licht kommt zusätzlich in der Variation der Dauer der maximal erduldbar erscheinenden Überschirmungszeit von Buchen aus der unteren Kronenschicht durch Buchen des Hauptkronendaches zum Tragen. Verstärkte Konkurrenz muß eine Verkürzung, verringerte Konkurrenz dagegen eine Verlängerung dieser Zeit zur Folge haben.

Hier zeigen die Untersuchungen, daß eine Verlängerung der maximal möglich erscheinbaren Unterdrückungszeit über sechs Zeitschritte hinaus praktisch keinen Einfluß auf die raum-zeitliche Dynamik des Waldgefüges und seine ihm innewohnenden Strukturen hat.

Auch eine Verkürzung dieser Unterdrückungszeit auf einen Zeitraum von nur drei Zeitschritten bewirkt keine gravierenden Veränderungen. Lediglich ein um wenige Prozentpunkte geschrumpfter Anteil des durchschnittlichen Flächenbedeckungsgrades in den oberen beiden Schichten und ein jeweils ähnlich stark gestiegener Anteil dieses Bedeckungsgrades in den beiden unteren Schichten mit einem daraus resultierenden geringfügig verringerten Anteil des Heranwachsstadiums zugunsten der beiden anderen Stadien an der Gesamtwaldfläche sind die Folge.

Insgesamt bedeutet dies also, daß eine Veränderung in der Dauer der maximal möglich erscheinenden Unterdrückungszeit nur einen sehr geringfügigen Einfluß auf die Walddynamik ausübt, solange diese Zeit nicht zu kurz ist. Dies scheint verständlich, wenn man bedenkt, daß eine empirisch noch sinnvoll erscheinende Verkürzung kurzfristig zwar durchaus zu einer geringen Abnahme der mittleren Zahl an Buchen der unteren Kronenschicht

und des entsprechenden Flächenbedeckungsgrades führt, dabei jedoch berücksichtigt, daß durch den aus diesem Grunde zusätzlich entstehenden freien Raum in dieser Schicht die Wahrscheinlichkeit für das Hereinwachsen von Buchen aus der Jungbuchenschicht in die untere Kronenschicht ansteigt, so daß dadurch zumindest ein größerer Verlust an Buchen in der unteren Kronenschicht und resultierend daraus auch im Hauptkronendach weitestgehend ausbleibt. Der ausbleibende Einfluß einer Verlängerung der maximal möglich erscheinenden Unterdrückungszeit auf die Walddynamik läßt sich dahingegen deuten, daß bereits bei der im Referenzfall angenommenen maximal erduldbaren Unterdrückungszeit von bis zu sechs Zeitschritten den meisten Buchen der unteren Kronenschicht diese Zeitspanne offensichtlich ausreicht, um mögliche, für sie günstige Bedingungen für das Hineinwachsen in das Hauptkronendach wahrzunehmen.

VI.7 Verschiedene Ausgangssituationen

In allen vorangegangenen Betrachtungen wurde davon ausgegangen, daß sich der Wald zu Beginn der Simulation bereits in einem urwaldähnlichen Zustand befunden hat. Hier soll nun darauf eingegangen werden, welche Unterschiede sich in der raum-zeitlichen Walddynamik ergeben, wenn ein anderer Ausgangszustand des Waldes zu Beginn der Simulation vorliegt. Als mögliche alternative Anfangszustände werden Szenarien gewählt, die je an einen aufgeforsteten Wald, einen Wirtschaftswald und an eine Zufallsstruktur angelehnt sind.⁷⁶

Nähere Untersuchungen zeigen, daß sich unabhängig vom Ausgangszustand nach einer gewissen „Einschwingphase“ im Laufe der Zeit für alle Ausgangsszenarien eine dem Referenzfall entsprechende

⁷⁶ zur detaillierten Beschreibung dieser Szenarien vgl. Anhang A1. Mögliche Anfangsverteilungen.

Ergebnisse mit Diskussionen

Walddynamik einstellt. Die sich im langjährigen Mittel einstellenden Werte sämtlicher Untersuchungsgrößen zeigen dann weder qualitative noch quantitative Unterschiede. Auf das nach der oben erwähnten Einschwingphase folgende Verhalten soll deshalb auch nicht näher eingegangen werden, da kein zusätzlicher Erkenntnisgewinn in Aussicht steht. Interessant ist dagegen aber der Zeitraum der Einschwingphase. Dazu sollen beispielhaft die Zeitreihen für die Flächenbedeckungsgrade bei oben erwähnten alternativen Anfangszuständen betrachtet werden. Abb.33 zeigt die zeitliche Entwicklung der Flächenbedeckungsgrade in den verschiedenen Höenschichten des Buchenwaldes für die Anfangszustände „Zufällige Waldstruktur“ (Abb.33a)), „Aufgeforsteter Wald“ (Abb.33b)) und „Wirtschaftswald“ (Abb.33c)) über einen Zeitraum von 3000 Jahren.

Dabei läßt sich feststellen, daß für den ersten Fall der zufällig gewählten Waldstruktur nur eine äußerst kurzfristige, kaum wahrnehmbare Einschwingphase existiert. Nach nur wenigen Zeitschritten verläuft diese Zeitreihe qualitativ (und im Mittel auch quantitativ) identisch mit der des Referenzfalls. Dies erstaunt nicht, da in dieser Anfangsverteilung nur die Zuweisung der dem Optimal-, Zerfalls- oder Heranwachstadium entsprechenden Strukturen auf die einzelnen Zellen des Waldes rein zufällig geschieht. Insofern besitzt jede einzelne Zelle für sich bereits zu Beginn der Simulation eine dem Referenzfall entsprechende „urwaldgemäße“ Struktur. Anscheinend stellt die zufällige Zuweisung der verschiedenen Strukturen auf die einzelnen Zellen als Ganzes betrachtet bereits ein System dar, welches trotz seiner zunächst noch fehlenden räumlich horizontalen Strukturierung einem Urwald, so wie er sich in der Simulation darstellt, bereits recht nahe kommt.

Andere Ergebnisse ergeben sich jedoch für die Anfangsverteilung „Aufgeforsteter Wald“. Charakteristikum diese Anfangsverteilung ist in allen Zellen das Vorhandensein einer bestimmten Menge (Flächenbedeckungsgrad = 50%) an Sämlingen und das Fehlen von Bäumen höherer Schichten. Feststellen läßt sich hier eine deutlich erkennbare Einschwingphase, welche in

der Simulation — nicht exakt bestimmbar — frühestens nach gut 500 Jahren, ganz sicher aber erst nach etwa 1000 Jahren abgeklungen ist. Auch dieses Ergebnis ist insbesondere durch die Heranziehung einiger bereits vorher erfolgter Betrachtungen erklärbar. Zunächst durchwachsen die der Sämlingsschicht entstammenden Buchen die verschiedenen Höhenstufen des Buchenwaldes. Dabei fällt der Bedeckungsgrad in der Sämlingsschicht für den gesamten Wald zunächst kurzzeitig auf 0% ab, solange sich im Wald noch keine regenerationsfähigen Buchen herausbilden konnten. Nach nur wenigen Zeitschritten kann jedoch eine Regeneration einsetzen, wenn die ersten Buchen in die untere Kronenschicht hineinwachsen. Im Anschluß daran entsteht dann eine Situation, welche in ihren wesentlichen Grundzügen der Situation, wie sie sich nach einem extrem starken Sturmereignis darstellt, gleicht.⁷⁷ Dort werden nach einer solchen Störung teilweise großflächig Bäume der oberen Schichten geworfen, worauf sich durch den erhöhten Lichteinfall in tieferliegende Schichten dann gehäuft Sämlinge ansiedeln. D.h.: Starke Bedeckung am Boden, nur geringe in höheren Schichten. Analog der Walddynamik nach einer solchen Störung wachsen auch bei der Anfangsverteilung „Aufgeforsteter Wald“ aufgrund der Aufgelockertheit des Kronendaches die nun wieder verstärkt vorhandenen Sämlinge heran und bedingen dadurch ein ebenso verstärktes Aufkommen an Jungwuchs. Zeitverzögert ergibt sich daraus schließlich auch ein starkes Ansteigen des Anteils an Buchen in der unteren Kronenschicht und kurze Zeit später dann auch im Hauptkronendach. Durch die folgende erhöhte Abschattung tieferliegender Schichten wird der Anteil der Buchen in den unteren Schichten schließlich wieder stark reduziert. Aufgrund des gehäuften und großflächigen Absterbens der am Ende ihrer natürlichen Lebensspanne angekommenen Altbuchen und den damit einhergehenden veränderten Lichtverhältnissen nimmt dann aber insbesondere der Anteil der Sämlinge wieder deutlich zu, von dem im anschließenden Zeitschritt wieder ein großer

⁷⁷ vgl. Kapitel VI.1.2.1

Ergebnisse mit Diskussionen

Teil in die Jungbuchenschicht hineinwachsen kann u.s.w.. Diese durch die Ausgangssituation hervorgerufene wiederkehrende großflächige Synchronisation des Buchenwachstums ruft ein Überschießen der Flächenbedeckungsgrade über ihre jeweiligen langjährigen Mittelwerte hervor. Die dem Modell innewohnende Stochastik bedingt schließlich die Dämpfung dieser zu Beginn der Simulation beobachtbaren Schwingungen.

Noch andere Ergebnisse bezüglich der Walddynamik zu Beginn der Simulation ergeben sich aus der Anfangsverteilung „Wirtschaftswald“. Dieser Anfangsverteilung liegt die simplifizierte Annahme zugrunde, daß als Ausgangspunkt der Simulation durch waldwirtschaftliche Maßnahmen in jeder einzelnen Zelle des Waldes eine Struktur herbeigeführt werden konnte, die zu einem im Hauptkronendach verstärkten und in den restlichen Höhenschichten etwas schwächeren und annähernd gleich starken Bedeckungsgrad an Buchen führte. Betrachtet man die zeitliche Entwicklung der Flächenbedeckungsgrade in den verschiedenen Höhenschichten, dann läßt sich auch für diesen Fall eine im Vergleich zum aufgeforsteten Wald in etwa gleich lang anhaltende Einschwingphase von ungefähr 500 Jahren bis 1000 Jahren feststellen. Auffallend ist jedoch der qualitativ abweichende Verlauf zum vorherigen Fall. Die Einschwingphase ist in diesem Fall geprägt von einem zunächst starken Anstieg des Flächenbedeckungsgrades im Hauptkronendach. Nach nur wenigen Zeitschritten führt dieser zu einer hallenwaldartigen Struktur, welche sich praktisch über den gesamten Wald erstreckt.⁷⁸ Zurückführen läßt sich dieses Verhalten darauf, daß der Großteil der in jeder einzelnen Zelle vorhandenen und regelmäßig über den gesamten Wald verteilten Hauptkronendachbuchen innerhalb kürzester Zeit ihre Vormachtstellung im Waldgefüge zu ihren Gunsten nutzt, d.h. ihre Kronenschirmfläche so weit vergrößert, daß es zu einem fast vollständig geschlossenen Kronendach kommt. Die dann ablaufenden Mechanismen

⁷⁸ Naturwaldstudien im Naturschutzgebiet Heilige Hallen bei Feldberg (Mecklenburg) unterstreichen dieses Ergebnis für den Buchenwald. In dem seit etwa 160 Jahren nicht mehr forstlich genutzten Buchenwald bildeten sich bereits kurze Zeit nach Beendigung der Nutzung großflächig hallenwaldartige Strukturen heraus (vgl. KNAPP u. JESCHKE 1991).

(Abschattung und Absterben von Buchen tieferliegender Schichten → Zusammenbruch des Altbestandes → verstärktes Aufkommen und Heranwachsen von Sämlingen → ...) entsprechen denen, die im Falle der Anfangsverteilung „Aufgeforsteter Wald“ bereits angesprochen wurden. Auch hier führt die dem Modell innewohnende Stochastik zur Dämpfung der zu Beginn der Simulation beobachtbaren Schwingungen.

Zusammenfassend läßt sich damit festhalten, daß die Modelluntersuchungen und -ergebnisse konkrete Hinweise bezüglich der in Kapitel III gestellten Frage, ob und wenn, nach welcher Zeit, sich aus einem Buchen-Wirtschaftswald oder anderen, nicht urwaldgemäßen Waldstrukturen, ein sekundärer Buchenurwald mit urwaldtypischen Eigenschaften entwickeln könnte, liefern. So erscheint es grundsätzlich möglich, daß sich auch aus bewirtschafteten oder neu aufgeforsteten und damit völlig urwalduntypischen Waldstrukturen im Laufe der Zeit ein „Urwald von morgen“ entwickeln kann, der dann eine für einen Buchenurwald als typisch anzusehende raum-zeitliche Dynamik entwickelt. Dabei erweist es sich für die beispielhaft untersuchten Fälle eines aufgeforsteten und eines nach einer bestimmten Methode bewirtschafteten Waldes in bezug auf die Fragestellung allerdings als mehr oder weniger unerheblich, von welcher Ausgangssituation ausgegangen wird. In beiden Fällen muß nach den Modelluntersuchungen eine Zeitspanne von etwa 500 Jahren bis 1000 Jahren eingeplant werden, bis man zum ersten Mal von einem sekundären Urwald sprechen kann. Berücksichtigt werden muß bei all diesen Aussagen, daß im Modell idealisiert eine konstante, sich im Laufe der Zeit nicht ändernde Umwelt vorausgesetzt wird, d.h. es wird eine Randbedingung geschaffen, die sehr starr ist und möglicherweise zu sehr idealisiert. Das folgende Kapitel beschäftigt sich aus diesem Grund in einem Unterpunkt noch einmal beispielhaft mit der Annahme einer in bestimmten Punkten variierenden Umwelt.

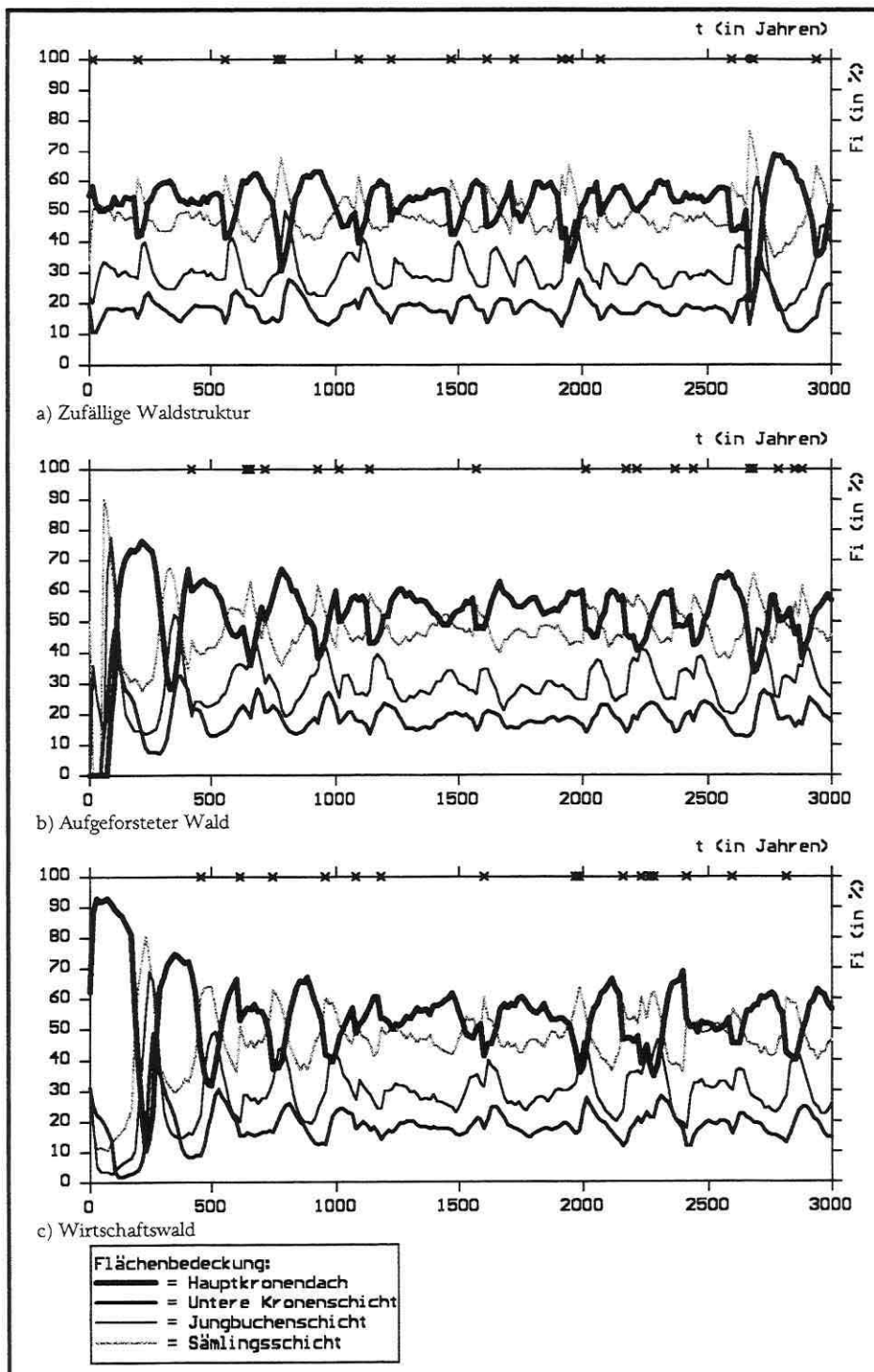


Abb.33 Zeitliche Entwicklung des Flächenbedeckungsgrades in den verschiedenen Höhengschichten des Buchenwaldes für die Anfangsverteilungen „Zufällige Waldstruktur“ (a)), „Aufgeforsteter Wald“ (b)) und „Wirtschaftswald“ (c)). Parameterwerte nach Tab.4.

VI.8 Kurze Betrachtung spezieller Fragestellungen

In diesem Kapitel soll das Augenmerk auf einige weitere ganz spezielle Fragestellungen gerichtet werden. Diese werden aufgrund ihrer Komplexität jedoch nicht umfassend, sondern nur beispielhaft behandelt, da eine ausführliche Behandlung den Rahmen dieser Arbeit bei weitem sprengen würde. Statt dessen soll angedeutet werden, welches weitere Potential noch im Modell steckt und in welche Richtung zukünftige Untersuchungen gehen könnten.

VI.8.1 Waldmanagement

Anhand des Modells ist es möglich, einige für das Forstwesen wichtig erscheinende Fragestellungen zu näher zu untersuchen. So ließen sich z.B. unterschiedliche Waldmanagementmaßnahmen hinsichtlich ihrer zu erwartenden Auswirkungen auf die Walddynamik simulieren. Dabei wäre u.a. die Simulation eines weiten Spektrums an Verjüngungsformen (z.B. großflächiger Kahlschlag, Schirmschlag, ...) denkbar.

Beispielhaft soll hier kurz der Fall des großflächigen Kahlschlagbetriebs mit Kunstverjüngung betrachtet werden. Bei dieser Verjüngungsform wird der Waldbestand durch gleichzeitige Nutzung aller Bäume in einem Hieb kahlgeschlagen. Der danach künstlich gesäte oder gepflanzte Jungwuchs wächst dann ohne einen noch vorhandenen Altbestand auf.

Simuliert wurde der Fall eines 750 Jahre nach Simulationsbeginn durchgeführten großflächigen Kahlschlags, bei dem sämtliche Buchen der oberen drei Schichten innerhalb nur eines Zeitschrittes aus dem Wald entfernt wurden. Zur Gewährleistung der Regeneration des Waldes wird davon ausgegangen, daß künstlich durch Saat oder Bepflanzung eine $s_{\max}$ (= 1,000) entsprechende Menge an Sämlingen zur Verjüngung des Waldes

Ergebnisse mit Diskussionen

beiträgt. Abb.34 stellt die entsprechende zeitliche Entwicklung des Flächenbedeckungsgrades in den verschiedenen Höhengschichten des Buchenwaldes über einen Zeitraum von 3000 Jahren dar. Nach 750 Jahren werden durch den Kahlschlag ökologische Verhältnisse geschaffen, die denen vergleichbar sind, die sich bei Aufforstung eines entsprechend großen Gebietes ergeben. Die darauffolgende zeitliche Entwicklung des Buchenbestandes entspricht dann der des bereits im letzten Kapitel VI.7 geschilderten Falls des als Ausgangssituation aufgeforsteten Waldes. Einzig der im Moment des Kahlschlags angenommene vergleichsweise größere Flächenbedeckungsgrad in der Sämlingsschicht führt kurzfristig zu etwas veränderten quantitativen Anteilen der Flächenbedeckungsgrade in den Höhengschichten. Qualitativ — und nach einigen Zeitschritten auch quantitativ — ergeben sich jedoch keine Unterschiede.⁷⁹

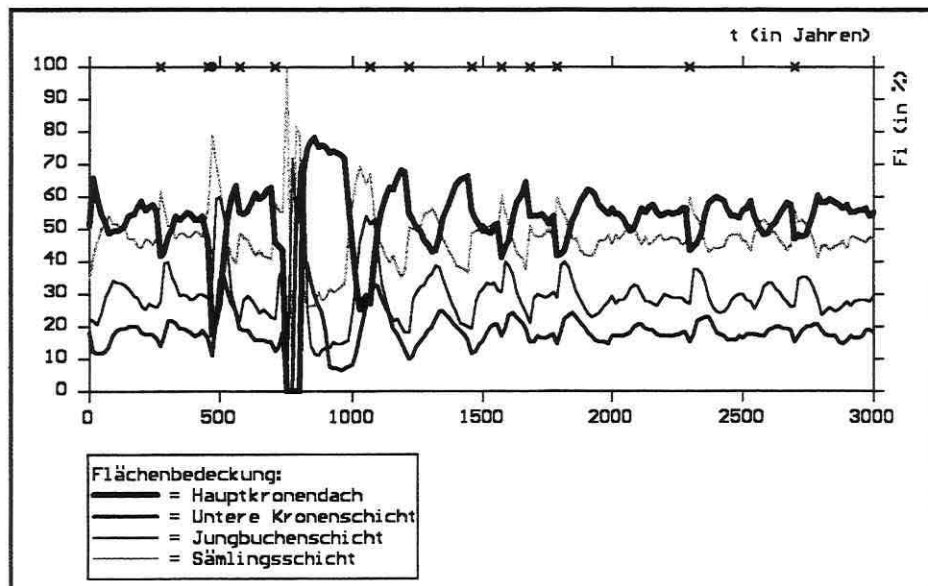


Abb.34 Zeitliche Entwicklung des Flächenbedeckungsgrades in den verschiedenen Höhengschichten des Buchenwaldes vor und nach großflächigem Kahlschlag im Jahre 750 nach Simulationsbeginn. Parameterwerte nach Tab.4.

⁷⁹ für weitere Erläuterungen vgl. Kapitel VI.7

VI.8.2 Klimateinflüsse

Grundsätzlich bietet das Buchenwaldmodell die Gelegenheit, in gewissen Grenzen mögliche Auswirkungen veränderter Klimafaktoren auf die zukünftige Walddynamik abzuschätzen. So erscheint u.a. eine Anpassung des Modells an klimatisch bedingte veränderte Temperatur- oder Windverhältnisse möglich. Die Anpassung an veränderte Temperaturverhältnisse könnte dabei z.B. in Form einer den neuen Verhältnissen entsprechend angepaßten Änderung der dem Referenzfall zugrundeliegenden Werte von m_l bis m_{IV} , $w_{\max}$ und $s_{\max}$ erfolgen.

Als Demonstrationsbeispiel soll hier jedoch ein spezieller Fall klimatisch bedingter veränderter Windverhältnisse aufgegriffen werden. Diesem Fall liegt die Annahme zugrunde, daß eine zukünftige Klimaänderung sich durch eine deutliche Zunahme der Häufigkeit der beiden stärksten Sturmstärken bemerkbar macht. Realisiert wird diese Annahme im Modell durch eine Verdoppelung der jeweiligen Wahrscheinlichkeit, mit der starke und stärkste Stürme auftreten.⁸⁰ Abb.35 zeigt die Auswirkungen auf die zeitliche Entwicklung der Flächenbedeckungsgrade in den verschiedenen Höenschichten des Buchenwaldes über einen Zeitraum von 3000 Jahren hinweg. Neben einer Abnahme des durchschnittlichen Bedeckungsgrades im Hauptkronendach von gut 52% auf etwa 49% und einer in etwa in derselben Größenordnung liegenden Zunahme der durchschnittlichen Bedeckungsgrade in den anderen Schichten, fällt vor allem eine deutliche Zunahme der jeweiligen Standardabweichungen um jeweils etwa 50% auf. Zurückführen läßt sich dies darauf, daß die nun im Mittel doppelt so häufig auftretenden starken und stärksten Stürme zwangsläufig auch doppelt so häufig zu einer deutlichen Schädigung in den oberen Schichten beitragen, wodurch sich kurzfristig immer wieder starke Veränderungen in der Waldstruktur und in den Flächenbedeckungsgraden ergeben. Die Fluktuationen um die

⁸⁰ vgl. dazu Anhang A1. Regel 80)

Ergebnisse mit Diskussionen

Mittelwerte der Flächenbedeckungsgrade herum sind im Vergleich zum Referenzfall wesentlich stärker ausgeprägt und deuten darauf hin, daß - gerade auch aufgrund der Vielzahl der Störereignisse - dem Wald kaum einmal die Chance gegeben wird, einen durch Störereignisse ungestörten Entwicklungszyklus zu durchlaufen. Zu häufig beeinflussen extreme Sturmereignisse die ungestörte lokale Waldentwicklung.

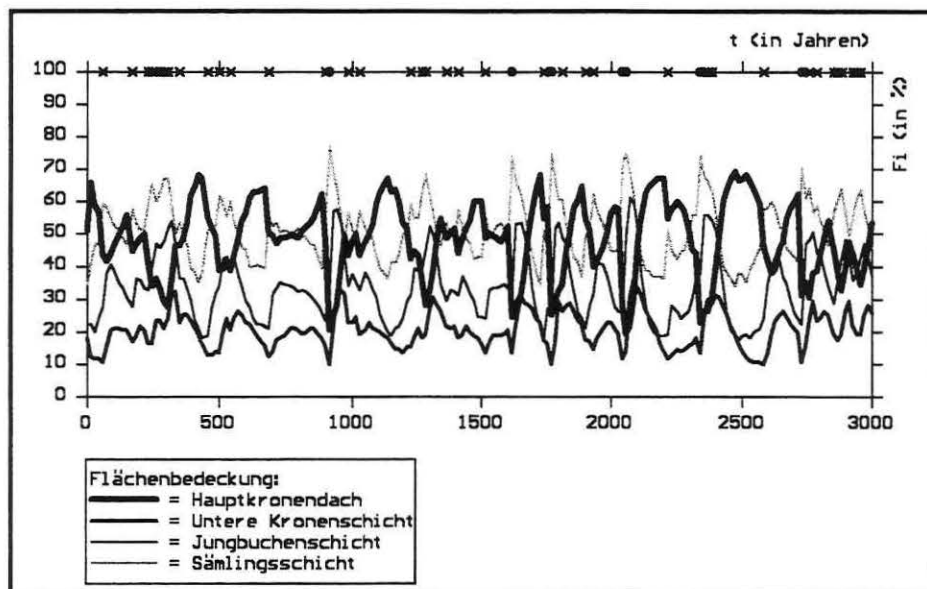


Abb.35 Zeitliche Entwicklung des Flächenbedeckungsgrades in den verschiedenen Hörschichten des Buchenwalde bei Verdoppelung der relativen Häufigkeit starker und stärkster Stürme. Parameterwerte nach Tab.4.

Ausdrücklich soll an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, daß die hier gemachten Aussagen bezüglich der zukünftigen Entwicklung des Buchenwaldes als mögliche Auswirkung auf eine klimabedingte veränderte Windsituation nicht mehr als grobe Abschätzungen sein können für das, was eventuell passieren könnte. Zu bedenken bleibt nämlich immer, daß eine veränderte Klimasituation natürlich nicht nur einen Einfluß auf die Buchenentwicklung hat, sondern auch die Entwicklung anderer, eventuell an eine solche Situation besser angepaßter Arten entscheidend zu deren Vorteil

verändern kann. Dadurch könnten sich dramatische Veränderungen im Ökosystem Buchenwald ergeben. Nähere Untersuchungen diesbezüglich verlangen allerdings nach ergänzenden, hier nicht vorhandenen Modellstrukturen.

VI.8.3 Umwelteinflüsse

Angedeutet werden soll des weiteren die Möglichkeit, mit Hilfe des Modells zu einer Abschätzung der auf veränderten Umweltverhältnissen beruhenden Auswirkungen auf die Walddynamik zu gelangen. Als Beispiel soll hier kurz eine mögliche Abhängigkeit des Buchenwachstums vom Standort betrachtet werden. Widerspiegeln könnte sich eine solche Standortabhängigkeit z.B. in einer Veränderung des möglich erscheinenden Höchstalters age_{max} einer Buche. Je nach Standort erscheint ein Höchstalter zwischen etwa 150 Jahren und 350 Jahren als realistisch. Betrachtet werden soll hier nun der Fall eines im Vergleich zum Referenzfall deutlich geringer angenommenen Höchstalters von $age_{max} = 180$. Die Untersuchungen zeigen, daß durch dieses angenommene verringerte Höchstalter nur sehr wenige Buchen zu Baumriesen der größten Stärkeklasse heranwachsen (vgl. dazu Abb.36). Statt dessen sterben die meisten frühzeitig ab, so daß sich immer wieder Lücken im Hauptkronendach auftun, und die Herausbildung einer dem Optimalstadium ähnelnden Struktur weitestgehend unterdrückt wird. Insofern ist es in diesem Fall praktisch auch unmöglich, selbst auf Kleinstflächen einen vollständigen Entwicklungszyklus zu beobachten. Verbessern sich jedoch die Standortverhältnisse, d.h. werden für age_{max} steigende Werte angenommen, dann läßt sich eine stetige Zunahme des Anteils des Optimalstadiums an der Gesamtwaldfläche beobachten. Zusätzlich tritt auf Kleinflächen die Herausbildung des in Kapitel VI.1.2.1 beschriebenen Entwicklungszyklus, dessen Dauer in etwa durch das erreichbare Höchstalter einer Buche bestimmt wird, immer deutlicher zum

Ergebnisse mit Diskussionen

Vorschein. Diese theoretischen Untersuchungen deuten darauf hin, daß die für einen Buchenwald in ihrem Ablauf von Natur aus als innewohnend angenommene Dynamik hinsichtlich der Abfolge der Entwicklungsstadien erst ab einem minimalen Höchstalter der Buche von etwa 200 Jahren beobachtet werden kann, da sich scheinbar erst dann kleinflächig hallenwaldartige, dem Optimalstadium ähnelnde Strukturen herausbilden. Auf Standorten, auf denen die Buche nur ein geringeres Höchstalter erreicht, scheint dies praktisch unmöglich. Dort ist ein in stärkerem Maße ausgeprägtes Kommen und Vergehen von Buchen zu beobachten, d.h. ein stärkerer Wechsel zwischen Heranwachsen und Zerfall.

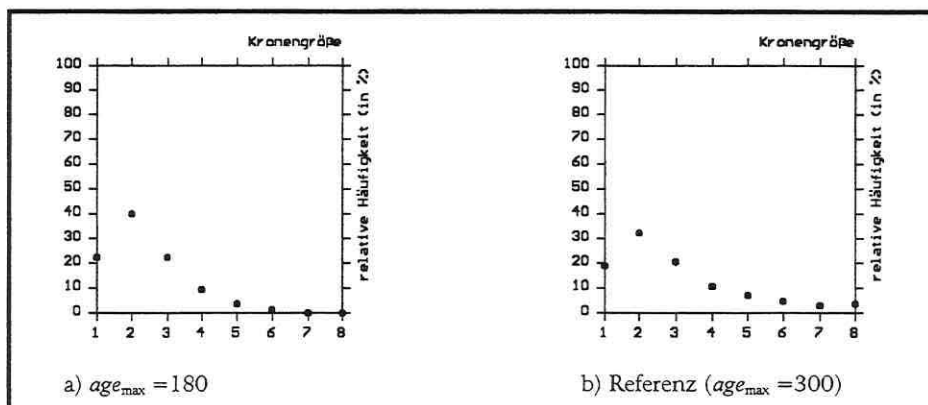


Abb.36 Relative Häufigkeit unterschiedlich großer Kronen von Buchen des Hauptkronendaches. Angaben in 1/8 der Grundfläche einer Zelle. Gemittelt über 1000 Zeitschritte. a) $age_{max} = 180$, Restliche Parameterwerte nach Tab.4, b) Referenzfall.

VI.9 Referenz-Parameterbereich und sensitive Parameter

Tab.17 gibt einen Überblick über den Referenz-Parameterbereich, d.h. den theoretisch sinnvoll erscheinenden Wertebereich, dem die jeweiligen einzelnen Parameterwerte entstammen dürfen und in dem sie noch zu Ergebnissen führen, die dem Referenzfall vergleichbar sind. Wie zu erkennen ist, fallen die jeweiligen Wertebereiche für die verschiedenen Parameter sehr unterschiedlich groß aus. Einige Parameter (z.B. m_{III} , p_{Kipp3} , ...) sind relativ

unsensitiv bezüglich einer zahlenmäßigen Änderung ihres Wertes und führen praktisch zu keinen erkennbaren qualitativen und quantitativen Änderungen in der raum-zeitlichen Dynamik des Buchenwaldsystems, solange sich ihre Werte innerhalb ihres Referenz-Parameterwertebereichs bewegen, andere dagegen (z.B. L_{IV} , p_{Kipp2} , ...) sind diesbezüglich als sehr sensitiv einzustufen und haben einen entsprechenden kleinen, oftmals punktuellen Referenz-Parameterwertebereich.

Parameter	Referenz-Parameterwertebereich
x	≥ 35
y	≥ 35
m_I	1.000
m_{II}	0.970 - 1.000
m_{III}	0.000 - 0.100
m_{IV}	0.000 - 0.002
age_{max}	300
L_{IV}	0.008
L_{III}	0.002
HWR	6
p_{Wind}	1.000
p_{Kipp1}	0.001
p_{Kipp2}	0.002
p_{Kipp3}	0.003 - 1.000
E_{pKipp}	11.800 - 12.200
w_{max}	0.980 - 1.000
s_{max}	1.000

Tab.17 Referenz-Parameterbereich

Es bietet sich an, einige Parameter gesondert hervorzuheben, da sie von ganz entscheidender Bedeutung sind für einige der zentralen Resultate. Dies wären:

Ergebnisse mit Diskussionen

- x und y in bezug auf die Abschätzung der als ausreichend anzusehenden Mindestgröße für ein Buchen-Naturwaldreservat
- p_{Wind} und p_{Kipp1} in bezug auf die Stärke der Glättung in der raum-zeitlichen Walddynamik
- p_{Kipp2} als zusätzlich synchronisierender Einflußfaktor für die Herausbildung großflächiger einheitlich erscheinender Waldstrukturen
- p_{Kipp3} als entscheidender Faktor für die Existenz großflächiger Katastrophen
- age_{max} in bezug auf eine möglich erscheinende Modifizierung des als typisch angesehenen Entwicklungszyklus
- m_I , m_{II} , L_{IV} , L_{III} , w_{max} und s_{max} in bezug auf das Sicheinstellen der als typisch anzusehenden vertikalen und horizontalen Waldstrukturen

VI.10 Zusammenfassende Diskussion

An dieser Stelle bietet es sich an, die Arbeit als Ganzes noch einmal rückblickend zu betrachten. Dabei soll zum einen nochmals explizit herausgestellt werden, was das Modell leistet und welches Potential noch in ihm steckt. Zum anderen sollen aber auch ganz klar seine Grenzen aufgezeigt sowie vorhandene Kritikpunkte benannt werden. Ferner werden Vorschläge zu einer weiteren Verbesserung des Modells gemacht und es wird eine Einordnung des Modells bezüglich anderer Buchenwaldmodelle vorgenommen.

In Europa ist die Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.) aufgrund ihrer breitgefächerten standörtlichen und klimatischen Ansprüche weit verbreitet. Dabei konnten sich in einigen entlegenen Gebieten praktisch reine Buchenwälder entwickeln, die auch noch heute existent sind. Es wird davon ausgegangen, daß sich der Aufbau bzw. die Struktur dieser Wälder sowie deren Entwicklungs- und Wachstumsdynamik in ganz typischer Art und

Weise verändern. Demnach durchläuft ein Buchenwald in seiner Entwicklung verschiedene Stadien, die sich zyklisch wiederholen und jeweils durch eine für dieses Stadium typisch erscheinende Struktur gekennzeichnet sind (vgl. Kapitel II). Tatsächlich konnte aber bis heute aufgrund unzureichender bzw. fehlender Aufzeichnungen noch kein einziger Entwicklungszyklus des Buchenwaldes vollständig dokumentiert werden. Der postulierte Entwicklungszyklus resultiert vielmehr aus Schlußfolgerungen, die auf der mehr oder weniger gleichzeitig durchgeführten Untersuchung vieler verschiedener Probestellen beruhen, d.h. er stellt im Resultat nichts anderes dar als ein verbales Modell über Waldentwicklung und Walddynamik. Offen bleibt weiterhin, ob die Dynamik des Buchenwaldes tatsächlich auf diese angenommene Art und Weise abläuft, oder aber ob grundlegend andere Prozesse für die Herausbildung der im Buchenwald beobachtbaren Strukturen verantwortlich gemacht werden müssen.

Neben dieser grundlagenorientierten Fragestellung werden aber auch andere, sehr viel konkretere und anwendungsbezogenere Fragestellungen zum Teil äußerst kontrovers diskutiert. So herrscht gerade auch in Hinblick auf die Ausweisung von Naturwaldreservaten unter Fachleuten u.a. große Uneinigkeit und Unsicherheit darüber, was als eine ausreichende Mindestgröße für ein (Buchen-)Naturwaldreservat angesehen werden kann und wenn überhaupt, wie lange es aller Voraussicht nach dauern würde, bis sich aus einem bewirtschafteten oder aufgeforsteten und damit völlig urwalduntypischen Wald ein „Urwald von morgen“ entwickeln könnte. Eng verbunden mit der Frage nach der Mindestgröße eines Urwalds bleibt schließlich auch die nach der zu erwartenden Biodiversität in unterschiedlich großen Wäldern und Waldteilbereichen (vgl. Kapitel III.2).

Zur Beantwortung dieser Fragestellungen wurde zunächst der Versuch unternommen, das bereits für einen tropischen Urwald entwickelte und erfolgreich angewandte, physiologisch und stark mathematisch orientierte Modell FORMIX2 (vgl. Kapitel V.1.1) auf einen natürlichen Buchenwald zu

Ergebnisse mit Diskussionen

übertragen. FORMIX2 beschreibt das Wachstum von Tropenbäumen auf Grundlage der Photosynthese. Der Versuch wurde jedoch schließlich aufgrund der insgesamt zu ungünstig erscheinenden Datenbasis bezüglich der Parametrisierung eines entsprechend auf einen Buchenwald übertragenen Modells (vgl. Kapitel V.1.2) zugunsten eines anderen, mehr phänomenologisch orientierten Ansatzes aufgegeben. Dieser Schritt war notwendig, da sich eine vollständige und erst damit erfolgsversprechende Durchführung des „FORMIX2-Ansatzes für einen Buchenwald“ im Rahmen einer Dissertation nicht hätte realisieren lassen. Das neue gitterbasierte und konzeptionell einfachere Modell fußt auf empirischen Beobachtungen über funktionale Zusammenhänge im Buchenwaldsystem, die die Grundlage für einen Satz an Modellregeln liefern. Es werden anhand von empirisch untermauerten Regeln die (für die Beantwortung der gestellten Fragen) elementar erscheinenden Wachstums-, Sterbe-, Konkurrenz- und Wechselwirkungsprozesse im Ökosystem Buchenwald beschrieben (vgl. Kapitel V.2). Mit Hilfe des Modells konnten für einen empirisch sinnvoll erscheinenden Parametersatz grundlegende Annahmen über natürliche Buchenwalddynamik bestätigt sowie zusätzliche Erkenntnisse über dieses Ökosystem gewonnen werden. Hier noch einmal eine kurze Zusammenstellung der wichtigsten Modellergebnisse:

- Es kommt im Buchenwald kleinräumig zur Bildung strukturell relativ homogen erscheinender Mosaikflächen, welche von ihrer Struktur her den in der Literatur beschriebenen Entwicklungsstadien ähneln (vgl. Kapitel VI.1.1.1).
- Die durchschnittliche Größe einer solchen Mosaikfläche beträgt weniger als 1 ha (vgl. Kapitel VI.1.1.2).
- Der angenommene autogen ablaufende Entwicklungszyklus konnte für Kleinflächen nachgewiesen werden. Dabei wurde eine Übereinstimmung sowohl bezüglich der Gesamtzyklusdauer als auch der zeitlichen Anteile der verschiedenen Stadien an der Gesamtzyklusdauer mit den angenommenen

Werten sowie der als chronologisch richtig angesehenen Abfolge der Stadien festgestellt (vgl. Kapitel VI.1.2.1).

- Für die Aufrechterhaltung einer für einen Urwald als typisch anzusehenden Dynamik reichen im Mittel bereits relativ wenige die untere Kronenschicht erreichende Buchen aus, weil diese aufgrund ihrer hohen Schattentoleranz ausreichend lange auch unterhalb des geschlossenen Hauptkronendachs überleben und deshalb auch noch in hohem Alter in das Hauptkronendach hineinwachsen können. Unterschiedlich starke Konkurrenz der Buchen im Hauptkronendach untereinander spielt für die Buchenwalddynamik offenbar nur eine untergeordnete Rolle (vgl. Kapitel VI.6).
- Für Buchenstandorte, auf denen die Buche nur ein relativ geringes Höchstalter erreicht, wird die Bildung eines für einen Buchenurwald als typisch angesehenen Hallenwaldes erschwert bzw. ist gar nicht möglich. Dort wechseln hauptsächlich Strukturen, die das Heranwachsen des Buchenwaldes mit solchen, die den Zerfall beschreiben, ab. Das bedeutet, daß in solchen Fällen mit einem modifizierten Entwicklungszyklus zu rechnen ist, in denen dem Optimalstadium ähnelnde Strukturen — wenn überhaupt vorhanden — räumlich und zeitlich stark unterrepräsentiert sind (vgl. Kapitel VI.8.3).
- Erst für gleichmäßig ausgedehnte Waldgebiete ab etwa 20 ha bis 30 ha kann mit einer für einen natürlichen Buchenwald als typisch anzusehenden raum-zeitlichen Dynamik gerechnet werden. Diese Flächengröße stellt damit auch die benötigte Mindestgröße für Buchen-Naturwaldreservate dar (vgl. Kapitel VI.2.1).
- Es gibt Hinweise darauf, daß für stärker unregelmäßig geformte Waldgebiete diese Mindestgröße erhöht werden muß (vgl. Kapitel VI.2.2).
- Unterhalb der Mindestgröße liegende Schutzgebiete erhöhen die Gefahr, daß einige der typischen Waldstrukturelemente zeitweise nicht anzutreffen sind. Dadurch werden auch speziell an diese Gegebenheiten angepaßte Arten in ihrem Überleben gefährdet (vgl. Kapitel VI.1.2.2).

Ergebnisse mit Diskussionen

- Somit haben zu klein gewählte Schutzgebiete einen negativen Einfluß auf die Biodiversität im Wald (vgl. Kapitel VI.1.2.2).
- Die sich ca. 100 m in den Wald hinein auswirkenden Waldrandbereiche weisen eine von der Himmelsrichtung abhängige, im Durchschnitt etwas andere Struktur auf als das Waldkerngebiet und bieten damit speziell an diese Bedingungen angepaßten Arten optimale Lebensbedingungen (vgl. Kapitel VI.1.2.2).
- Die häufig vorkommenden und als schwach einzustufenden Stürme haben einen insgesamt stark glättenden Einfluß auf die raum-zeitliche Walddynamik (vgl. Kapitel VI.3.2).
- Grundsätzlich erscheint es möglich, daß sich aus einem urwalduntypischen bewirtschafteten oder aufgeforsteten Wald in ferner Zukunft ein sekundärer Urwald mit urwaldtypischen Eigenschaften herausbildet. Damit zu rechnen ist aber frühestens nach gut 500 Jahren bis 1000 Jahren, d.h. nach Ablauf der Zeitspanne einiger Entwicklungszyklen (vgl. Kapitel VI.7).

Das Buchenwaldmodell stellt trotz seiner Vielzahl an Regel das Ökosystem Buchenwald in einer sehr vereinfachten und simplifizierten Form dar. Es wurde so einfach wie möglich, jedoch — in Hinblick auf die Fragestellung — so ausführlich wie nötig gestaltet und erhebt keinerlei Anspruch darauf, die in der Natur beobachtbaren Prozesse bis ins Detail hinein exakt zu beschreiben. Das Modell dient als ein Hilfsmittel zur Untersuchung ökosystemarer Fragen bezüglich des Ökosystems „Buchenwald“. Es hilft aufzuzeigen, welche Prozesse als entscheidend und elementar für die raum-zeitliche Struktur dieses Ökosystems angesehen werden müssen und welche eher nebensächlich sind. In diesem Sinne läßt sich das Modell als Werkzeug zur Grundlagenforschung einsetzen. Es unterstützt uns dabei, bekannte Prozesse besser zu verstehen und weniger oder gar unbekannte Prozesse hinsichtlich ihrer Wirkung auf das Buchenwaldsystem aufzuzeigen, zu beurteilen und zu begreifen. Erst die Auswertung und Verifizierung der Modellergebnisse ermöglichte es

schließlich, zu entscheiden, ob tatsächlich alle für das Buchenwaldökosystem für entscheidend gehaltenen Prozesse berücksichtigt wurden, oder ob noch andere, bisher noch nicht berücksichtigte Prozesse zusätzlich wichtig erschienen.

Das Modell läßt sich (in gewissen Grenzen) aber auch als Instrument zur Vorhersage über zukünftig zu erwartende Entwicklungen benutzen. In diesem Sinne kann es planerisch eingesetzt werden. Dabei sind seine Grenzen jedoch relativ schnell erreicht. Dies liegt an mehreren Gründen:

Zum einen dürfen die mit dem Modell gemachten quantitativen Aussagen nur grob als Anhaltspunkte für tatsächlich zu erwartende reale Werte angesehen werden. Viele der Auswertegrößen (z.B. Entwicklungsstadien, Stammzahl, Derbholzvolumen), die auch gerade in Hinblick auf planerische Aussagen bedeutsam sind, müssen im Modell bereits vom Ansatz her als fehlerbehaftet angesehen werden, weil sie nach nicht exakt meßbaren Maßstäben beurteilt werden. So stellt schließlich auch der Algorithmus, der die Zuordnung einer Zelle zu einem Stadium festlegt, nichts anderes als ein Modell dar, und auch die Abschätzung der Stammzahl oder des Derbholzvolumens kann nur relativ grob auf der Basis von Schätzwerten erfolgen. Dennoch können diese Auswertegrößen zum Vergleich und zur Beurteilung verschiedener Modellannahmen und Einflußfaktoren herangezogen werden.

Zum anderen ist das Modell von seiner Grundstruktur her so konzipiert, daß es die idealisierte Annahme einer zeitlich konstanten Umwelt und eines zeitlich konstanten Klimas voraussetzt. Es muß jedoch davon ausgegangen werden, daß eine solche Konstanz in den Klima- und Umweltbedingungen nicht zu erwarten ist. Zwar wurden bereits in den Kap. VI.8.2 und VI.8.3 Beispiele dafür angegeben, wie sich die Dynamik des Buchenwaldes unter veränderten Klima- bzw. Umweltbedingungen präsentieren könnte, jedoch wurde dabei lediglich ein konstantes Klima- bzw. Umweltszenario durch ein anderes, ebenfalls konstantes Szenario ersetzt. Genauere Untersuchungen diesbezüglich würden nach zusätzlichen, detaillierteren Klima- und

Ergebnisse mit Diskussionen

Umweltmodellen verlangen, welche in der Lage sind, die sich im Laufe der Zeit verändernden Klima- und Umweltbedingungen hinreichend genau zu beschreiben. Theoretisch erscheint eine Kopplung dieser Art von Modellen an das Buchenwaldmodell durchaus möglich. Inwieweit eine solche Kopplung jedoch tatsächlich sinnvoll sein mag und auch praktischen Wert besitzt, läßt sich nur schwer abschätzen, da die Aussagekraft solcher Klima- und Umweltmodelle bis jetzt kaum zu beurteilen ist.

Möglich und durchaus sinnvoll erscheint eine Anpassung des Modells an ganz spezielle, auch kleinflächig auftretende, standörtliche Besonderheiten (z.B. kleinflächig unterschiedliche Bodenbeschaffenheit), wie sie in jedem realen Wald anzutreffen sind. Realisiert werden könnte dieses z.B. durch eine veränderte Mortalität oder eine veränderte Sturmanfälligkeit der Buchen auf unterschiedlichen Waldteilbereichen.

Des weiteren wäre eine „Aufweichung“ der starren rechteckigen Form des Modellwaldes wünschenswert. Durch einen von der Form her variablen Rand und die Anpassung des Modells an kleinräumige standörtliche Gegebenheiten wäre es dann möglich, einen ganz speziellen, real existierenden Wald als Grundlage für die Simulation zu wählen, um zukünftige dortige Entwicklungen und existierende Wechselwirkungsbeziehungen — so gut wie es das Modell erlaubt — abzuschätzen.

Für weitere theoretische Untersuchungen könnte sich die Annahme sog. „periodischer Randbedingungen“ als nützlich erweisen. Bei diesen künstlich geschaffenen Randbedingungen wird der Zustand einer am Rand liegenden Zelle durch die Zustände der Nachbarzellen sowie durch die Zustände der entsprechend am gegenüberliegenden Rand liegenden Zellen mitbestimmt, so als ob sich diese direkt neben der betrachteten Zelle befände. Auf diese Art und Weise wird quasi das Modell eines unendlich großen und randlosen „Waldes“ geschaffen, das es dann auszuwerten gilt.

Verschiedene weitere Faktoren, die einen zusätzlichen Einfluß auf die Waldentwicklung haben könnten, wurden im Modell nicht berücksichtigt. So wurde bei der Modellentwicklung davon ausgegangen, daß z.B. die beiden für das Buchenwachstum wichtigen Ressourcen Nährstoffe und Wasser immer in ausreichender Menge verfügbar sind. Würde es zu einer Verknappung im Angebot dieser Ressourcen kommen, würde sich dies sicherlich auch in einer veränderten Waldentwicklung widerspiegeln.

Völlig ausgeklammert wurden im Modell Konkurrenzprozesse interspezifischer Art. Ohne Zweifel ist die Buche in der Lage, großflächig praktisch reine Buchenwälder zu bilden, indem sie andere vereinzelt eingestreut vorkommende (Baum-)Arten bereits in jungen Jahren sehr schnell herauskonkurriert, wodurch diese keinerlei Einfluß auf die ablaufende Walddynamik erlangen. Dennoch besteht — gerade wenn man zukünftig eine sich ändernde Umwelt und ein sich änderndes Klima voraussetzt — die Möglichkeit, daß sich im Laufe der Zeit andere Baumarten erfolgreich an diese veränderten Gegebenheiten anpassen und sich im ursprünglich reinen Buchenwald etablieren könnten. So erscheint z.B. eine Veränderung des Ökosystems „Buchenwald“ hin zum „Tannen-Fichten-Buchenwald“ oder anderen Mischwaldsystemen, im Extremfall sogar zu völlig anders gearteten Ökosystemen, nicht gänzlich unmöglich. Eine entsprechende Erweiterung des Modells bezüglich des Vorhandenseins anderer Baumarten und einer explizit modellierten Konkurrenz zwischen Buche und diesen anderen Baumarten, wäre ein nächster logischer Schritt in Hinblick auf eine Weiterentwicklung des Modells.

Kritisiert werden kann das Modell auch in bezug auf seine quantitative Verifizierung. Dies liegt daran, daß zwar relativ viel qualitatives Wissen über natürliche Buchenwälder existiert, quantitatives Wissen sich jedoch bis heute hauptsächlich auf bewirtschaftete und damit urwalduntypische Buchenwälder bezieht. So mußten schließlich auch bei diesem Modellansatz eine Reihe von Parametern grob abgeschätzt und letztendlich gefittet werden. Auch müssen

Ergebnisse mit Diskussionen

viele der empirisch erhobenen quantitativen Aussagen über natürliche Buchenwälder mit Vorsicht genossen werden. So wird — um hier nur ein Beispiel zu geben — davon gesprochen, daß sich durchschnittlich ein bestimmter Prozentsatz an der Gesamtwaldfläche in diesem oder jenem Stadium der Entwicklung befindet. Bedacht werden muß dabei jedoch immer, daß auch die empirisch erfolgte Zuordnung eines bestimmten Waldgebietes zu einem Stadium nur mit Hilfe von verbalen Modellen bzw. optisch im Wald vorgenommenen Abschätzungen erfolgen konnte, wodurch bereits Unsicherheitsfaktoren vorgegeben sind.

Es fällt nicht leicht, das Modell in die Reihe bereits existierender Buchenwaldmodelle einzuordnen, da es Aspekte verschiedener Modellansätze miteinander vereint und auch völlig neue Gedanken zugrunde legt. Sicherlich steht das Modell zum einen in gewisser Weise in der Tradition der gitterbasierten Modelle, bei denen die Zustandsänderung einer Gitterzelle von den Zuständen benachbarter Zellen und dem der Zelle selbst abhängt, die diese im vorherigen Zeitschritt besaßen. Dies ist durchaus auch hier der Fall. Wichtig erscheint es jedoch festzuhalten, daß ein hier benannter Zustand als ein übergeordneter Begriff für eine sehr differenzierte und ganz individuelle Struktur einer Zelle anzusehen ist. Diese individuelle Struktur wiederum ist Resultat eines Modellansatzes, dem zwei grundlegend unterschiedliche, aber dennoch zu vereinbarende Konzepte zugrunde liegen: eine Beschreibung der Buchenwalddynamik anhand der Veränderung von Bedeckungsgraden in den unteren Schichten und eine individuenbasierten Modellierung in den höheren Schichten.

Ein großer Vorteil des Modells ist es, daß es durchweg regelbasiert gestaltet, dabei konzeptionell aber relativ einfach gehalten wurde. Erst dadurch wurde es möglich, modelltheoretische Untersuchungen über den Buchenurwald in einer noch angemessenen Zeit im Rahmen einer Dissertation durchzuführen, die Beziehungen zwischen Modellannahmen und sich einstellenden

Ergebnissen einfach und klar zu diskutieren sowie zu einem vertieften Verständnis über das Ökosystem Buchenwald zu gelangen.

Da mir kein Modell bekannt ist, welches derart unterschiedliche Modellkonzepte (gitterbasiert, nicht-individuenbasiert, individuenbasiert) erfolgreich miteinander vereint, dient es gleichzeitig auch als Musterbeispiel für eine gelungene Verbindung verschiedener, kaum zu vereinbaren für möglich gehaltener Modellkonzepte. Zudem ist es das erste konsequent regelbasierte Buchenwaldmodell, welches auf der Umsetzung empirischen Wissens beruht. Insofern wurde mit der Entwicklung des Modells auch erfolgreich „methodisches Neuland“ betreten.

Ergebnisse mit Diskussionen

A. Anhang

A1. Vollständiger Regelsatz des Modells

Der im folgenden verwendete Regelsatz beruht so weit wie möglich auf empirischem Wissen (vgl. dazu auch Kapitel V.2 samt aller Unterpunkte sowie Tab.3 und Tab.4 in Kapitel VI.1). Da dieses Wissen oftmals jedoch „nur“ qualitativer Art ist, mußten bei seiner Umsetzung in handhabbare Modellregeln teilweise weitere zusätzliche Annahmen gemacht werden. Dies sei im folgenden zu bedenken.

Wald- und Zellstruktur

- 1) Der Wald setzt sich zusammen aus einer Vielzahl von einzelnen Zellen, die an einem rechteckigen Gitter entlang ausgerichtet sind.
- 2) Die Größe einer Zelle lehnt sich an die Dimensionen einer Buche an, die diese in einem Urwald maximal erreichen kann.
 Zellengröße: Höhe: 40,00 m
 Breite: 14,29 m
 Tiefe: 14,29 m
- 3) Eine einzelne Zelle ist vertikal in vier übereinanderliegende Schichten unterteilt. Dieses wären (von unten nach oben): Schicht I: Sämlinge
 Schicht II: Jungbuchen
 Schicht III: Unteres Kronendach
 Schicht IV: Hauptkronendach
- 4) x gibt die Zahl der Zellen in Ost-West-Richtung an.
- 5) y gibt die Zahl der Zellen in Nord-Süd-Richtung an.

Zeitskala

- 6) Einem Zeitschritt in der Simulation entsprechen 15 Jahre.

Wachstum und Konkurrenz von Buchen in einer einzelnen Zelle

- 7) Die Konkurrenz-, Wachstums-, und Sterbeprozesse innerhalb einer Zelle werden schichtweise untersucht und abgearbeitet.
- 8) Diese Abarbeitung geschieht nacheinander in der Reihenfolge Schicht IV → Schicht III → Schicht II → Schicht I.

Wachstum und Konkurrenz von Sämlingen (Schicht I)

- 9) Die Grundfläche einer Zelle kann zwischen 0% und 100% von Sämlingen bedeckt sein. Der Bedeckungsgrad F_I in Schicht I ist damit das Maß für die Menge von Sämlingen.
- 10) Von diesen Sämlingen kann im nächsten Zeitschritt ein Teil in die nächsthöhere Schicht der Jungbuchen (Schicht II) hineinwachsen. Die Größe dieses Teils hängt von der (zunächst unbeeinflussten) Mortalitätsrate⁸¹ m_I in Schicht I, von den in der Zelle

⁸¹ nähere Details siehe auch Abschnitt „Nachbarschaftswchselwirkung: Licht“

Anhang

herrschenden Lichtverhältnissen, vom Bedeckungsgrad F_I in Schicht I, vom bereits vorhandenen Bedeckungsgrad F_{II}' in Schicht II und von zufällig auftretenden, nicht näher bestimmten, äußeren Umständen ab (vgl. Regel 11)-14)).

- 11) Allein durch die zufällig auftretenden, nicht näher bestimmten, äußeren Umstände wird der in Schicht I vorhandene Bedeckungsgrad F_I von Zelle zu Zelle um einen zufälligen Wert zwischen 0% und 20% verringert werden.
- 12) Zu einer zusätzlichen Verringerung führt die auf die Buchen der Schicht I wirkende Mortalitätsrate⁸² m_I' . Diese Mortalitätsrate ist durch m_I und durch die in der Zelle herrschenden Lichtverhältnisse bestimmt.
- 13) Zusätzlich zu dem bereits in Schicht II vorhandenen Bedeckungsgrad F_{II}' wird im nächsten Zeitschritt der Teil $F_{II}^h = (1 - F_{II}') \cdot F_I'$ in Schicht II hineinwachsen. F_I' bezeichnet dabei den Teil von F_I , der nach Einwirkung der zufälligen äußeren Umstände und der Einwirkung der für die Zelle momentan gültigen Mortalitätsrate m_I' überlebt.
- 14) Der verbleibende Anteil der Schicht I, der innerhalb eines Zeitschritts nicht in Schicht II hineinwächst, stirbt noch in demselben Zeitschritt.

Wachstum und Konkurrenz von Jungbuchen (Schicht II)

- 15) Die Schicht II einer Zelle kann zwischen 0% und 100% von Jungbuchen bedeckt sein. Der Bedeckungsgrad F_{II} in Schicht II ist damit das Maß für die Menge von Jungbuchen.
- 16) Aus dieser Jungbuchenschicht können sich im nächsten Zeitschritt einzelne Buchen der nächsthöheren Schicht (Schicht III) herausbilden, wenn der Bedeckungsgrad F_{II} auch schon vor einem und vor zwei Zeitschritten größer als 0% war. Die Menge dieser Buchen hängt von den Bedeckungsgraden in den Schichten II, III und IV, von der maximalen Wahrscheinlichkeit $w_{\max}$, mit der sich aus Schicht II eine Buche der unteren Kronenschicht (Schicht III) herausbilden kann und von den in der Zelle vorherrschenden Lichtverhältnissen ab (vgl. Regel 17)-23)).
- 17) Zufällig auftretende, nicht näher bestimmte, äußere Umstände führen dazu, daß der aktuelle Bedeckungsgrad F_{II} in Schicht II von Zelle zu Zelle zunächst um einen zufälligen Wert zwischen 0% und 20% verringert wird.
- 18) Zu einer zusätzlichen Verringerung führt die auf die Buchen der Schicht II wirkende Mortalitätsrate⁸³ m_{II}' . Diese Mortalitätsrate ist durch m_{II} und durch die in der Zelle herrschenden Lichtverhältnisse bestimmt.
- 19) Falls der Bedeckungsgrad F_{II} in Schicht II unter den Schwellenwert von 2,5% absinkt, wird jener gleich null gesetzt.
- 20) F_{III} und F_{IV} seien die Bedeckungsgrade in den Schichten III und IV. $(1 - F_{III}) \cdot (1 - F_{IV})$ sei dann das Maß für die durch die Schichten III und IV insgesamt nicht überschirmte Fläche.
- 21) Wenn das Maß $(1 - F_{III}) \cdot (1 - F_{IV})$ für die durch die Schichten III und IV insgesamt nicht überschirmte Fläche 50% oder mehr beträgt, dann ist die Wahrscheinlichkeit w für die Herausbildung einer III-Buche aus Schicht II unabhängig vom den in der Zelle insgesamt vorherrschenden Lichtverhältnissen.
Für $(1 - F_{III}) \cdot (1 - F_{IV}) \geq 0,5$ ist
$$w = F_{II} \cdot w_{\max}.$$
- 22) Wenn dagegen das Maß $(1 - F_{III}) \cdot (1 - F_{IV})$ für die durch die Schichten III und IV insgesamt nicht überschirmte Fläche weniger als 50% beträgt, dann ist die

⁸² nähere Details siehe auch Abschnitt „Nachbarschaftswchselwirkung: Licht“

⁸³ nähere Details siehe auch Abschnitt „Nachbarschaftswchselwirkung: Licht“

Wahrscheinlichkeit w für die Herausbildung einer III-Buche aus Schicht II zusätzlich abhängig von den in der Zelle insgesamt vorherrschenden Lichtverhältnissen.

Für $(1 - F_{III}) \cdot (1 - F_{IV}) < 0,5$ ist

$$w = \frac{LF}{LF_{\max}} \cdot F_{II} \cdot w_{\max} \quad \text{für } LF_{\max} \neq 0,$$

$$w = 0 \quad \text{für } LF_{\max} = 0.$$

Dabei: LF = Lichteinflußwert in betrachteter Zelle⁸⁴

$LF_{\max}$ = max. möglicher Lichteinflußwert⁸⁵

- 23) Aus Schicht II können sich in einem Zeitschritt zwischen 0 und 8 III-Buchen herausbilden. Dazu wird in jedem Zeitschritt so oft eine Zufallszahl zwischen 0 und 1 gezogen, wie noch maximal zusätzliche III-Buchen zu den bereits in Schicht III vorhandenen hineinwachsen könnten. Für jede Zufallszahl, die kleiner als w ist, entsteht eine neue III-Buche.

Wachstum und Konkurrenz von Buchen der unteren Kronenschicht (Schicht III)

- 24) Eine III-Buche ist durch ihr Alter und ihre Verweildauer in Schicht III charakterisiert.
- 25) Eine III-Buche besitzt eine Kronenfläche, die 1/8 der Grundfläche einer Zelle bedeckt. Der Bedeckungsgrad, der durch eine III-Buche hervorgerufen wird, beträgt somit 0,125. Der in einer Zelle insgesamt in Schicht III vorhandene Bedeckungsgrad F_{III} berechnet sich damit als Produkt aus der Anzahl der in dieser Zelle vorhandenen III-Buchen mal 0,125.
- 26) Schicht III ist mit acht Buchen vollständig besetzt und kann dann keine weiteren mehr aufnehmen.
- 27) Eine gerade in Schicht III hineingewachsene Buche besitzt ein zufällig zugewiesenes Alter zwischen 60 und 120 Jahren.
- 28) Auf eine jede III-Buche wirkt eine durch m_{III} und durch die in der Zelle herrschenden Lichtverhältnisse bestimmte Mortalitätsrate⁸⁶ m_{III}' .
- 29) Die minimale Verweildauer einer Buche in Schicht III beträgt zwei Zeitschritte.
- 30) Die minimale Verweildauer einer Buche in Schicht III erhöht sich dann, wenn das Hauptkronendach (Schicht IV) im Zeitschritt nach ihrem Hineinwachsen in Schicht III komplett geschlossen ist. Sie erhöht sich um die Anzahl an Zeitschritten bis hin zu einer maximalen Verweildauer, wie das Hauptkronendach direkt nach dem Hineinwachsen der Buche in Schicht III ununterbrochen lang keine Lücken aufweist.
- 31) Die maximale Verweildauer einer Buche in Schicht III beträgt sechs Zeitschritte. Wenn sie innerhalb dieser Zeitdauer nicht in das Hauptkronendach (Schicht IV) hineinwächst, dann stirbt sie.
- 32) Falls Schicht IV einer Zelle Lücken aufweist, dann besteht für III-Buchen, die ihre minimale Verweildauer in der unteren Kronenschicht verbracht haben, die Möglichkeit, in diese Lücken hineinzuwachsen.⁸⁷
- 33) Innerhalb eines Zeitschrittes erhöht sich das Alter einer III-Buche um 15 Jahre.

Wachstum und Konkurrenz von Buchen des Hauptkronendaches (Schicht IV)

- 34) Eine Buche des Hauptkronendaches (kurz: IV-Buche) ist durch ihr Alter und durch ihre Kronenschirmfläche charakterisiert.

⁸⁴ vgl. auch Abschnitt „Nachbarschaftswchselwirkung: Licht“

⁸⁵ vgl. auch Abschnitt „Nachbarschaftswchselwirkung: Licht“

⁸⁶ nähere Details siehe auch Abschnitt „Nachbarschaftswchselwirkung: Licht“

⁸⁷ nähere Details siehe auch Abschnitt „Lückenschließung im Hauptkronendach“

Anhang

- 35) Die Kronenschirmfläche einer IV-Buche kann $1/8, 2/8, 3/8, \dots, 8/8$ der Grundfläche einer Zelle überschirmen.
- 36) Der in einer Zelle insgesamt in Schicht IV vorhandene Bedeckungsgrad F_{IV} berechnet sich als Summe der Kronenschirmflächen aller in Schicht IV vorhandenen Buchen.
- 37) Auf eine Buche des Hauptkronendaches wirkt eine Mortalitätsrate m_{IV} .
- 38) Für eine IV-Buche erhöht sich ab ihrem „Höchstalter“ age_{max} ihre Mortalitätsrate m_{IV} in jedem Zeitschritt zusätzlich um 0,3.
- 39) In Schicht IV können sich zwischen 0 und 8 Buchen befinden.
- 40) Wenn im Hauptkronendach Platz vorhanden ist, dann vergrößert eine IV-Buche ihre Kronenschirmfläche in einem Zeitschritt um $1/8$ der Zellengrundfläche.⁸⁸
- 41) Befinden sich in einer Zelle bei vollständig geschlossenem Kronendach zwei oder mehr Buchen in Schicht IV, dann wird die Buche mit der größten Kronenschirmfläche im Laufe der Zeit zunächst die kleinsten und danach die nächstgrößeren IV-Buchen verdrängen. Dabei vergrößert sie mit der Wahrscheinlichkeit von 50% im nächsten Zeitschritt ihre Kronenschirmfläche um $1/8$ der Grundfläche einer Zelle. Die kleinste Buche „verkleinert“ ihre Kronenschirmfläche in demselben Zeitschritt entsprechend und kann auf diese Weise somit ganz verdrängt werden, wenn ihre Kronenschirmfläche den Wert 0 erreicht.
- 42) Gibt es mehrere gleich große Buchen, dann wird diejenige als größte angesehen, die sich am längsten im Hauptkronendach befindet. Kann auch nach diesem Unterscheidungskriterium keine größte Buche bestimmt werden, wird zufällig ausgewählt, welche IV-Buche als größte angesehen wird.
- 43) Gibt es mehrere gleich kleinste Buchen, dann wird diejenige als kleinste angesehen, die sich die kürzeste Zeit im Hauptkronendach befindet. Kann auch nach diesem Unterscheidungskriterium keine kleinste Buche bestimmt werden, wird zufällig ausgewählt, welche IV-Buche als kleinste angesehen wird.
- 44) Innerhalb eines Zeitschrittes erhöht sich das Alter einer IV-Buche um 15 Jahre.

Lückenschließung im Hauptkronendach

- 45) Lücken im Hauptkronendach können in einer Zelle die Größe von $1/8, 2/8, 3/8, \dots, 8/8$ der Grundfläche einer Zelle haben.
- 46) Die Schließung dieser Lücken kann durch das Vergrößern der Kronenschirmfläche von sich bereits im Hauptkronendach befindenden IV-Buchen und durch das Hineinwachsen von III-Buchen in die Schicht IV geschehen.
- 47) Die Lückenschließung durch IV-Buchen ist vorrangig vor der Lückenschließung durch in Schicht IV hineinwachsende III-Buchen.
- 48) Falls eine Lücke im Hauptkronendach existiert, dann vergrößern zunächst so viele IV-Buchen wie möglich ihre Kronenschirmfläche um $1/8$ der Zellengrundfläche. Können aus Platzmangel im Hauptkronendach nicht alle IV-Buchen ihre Kronenschirmfläche vergrößern, dann wird zufällig ausgewählt, welche IV-Buchen sie vergrößern.
- 49) Ist nach der Vergrößerung der Kronenschirmfläche aller sich im Hauptkronendach befindenden IV-Buchen das Kronendach noch immer nicht vollständig geschlossen, dann können in Frage kommende III-Buchen in die noch existierende Lücke hineinwachsen.
- 50) Diese neu in Schicht IV hineinwachsenden Buchen haben zunächst immer nur eine Kronenschirmfläche, die — je nach vorhandenem Platzangebot — entweder $1/8$ oder $2/8$ der Grundfläche einer Zelle überschirmt.
- 51) Falls die restliche, durch IV-Buchen nicht geschlossene Lückenfläche im Hauptkronendach nur so groß ist, daß alle zum Hineinwachsen in Schicht IV in Frage kommenden III-Buchen bereits mit ihrer minimalen Kronenschirmfläche von $1/8$ der Zellengrundfläche die Lücke in Schicht IV schließen könnten oder sogar noch einzelne der in Frage kommenden III-Buchen aufgrund fehlenden Platzes im Hauptkronendach gar nicht erst in Schicht IV hineinwachsen können, dann werden so viele der entsprechenden

⁸⁸ nähere Details siehe auch Abschnitt „Lückenschließung im Hauptkronendach“

- III-Buchen wie möglich mit ihrer minimalen Kronenschirmfläche in Schicht IV hineinwachsen.
- 52) Es werden zunächst diejenigen in Frage kommenden III-Buchen in Schicht IV hineinwachsen, welche sich schon am längsten in Schicht III befinden.
- 53) Befinden sich mehrere der in Frage kommenden III-Buche schon gleich lange in Schicht III und können nicht alle von ihnen in Schicht IV hineinwachsen, dann wird nach dem Zufallsprinzip ausgewählt, welche von ihnen ins Hauptkronendach hineinwachsen.
- 54) Ist die Lückenfläche im Hauptkronendach allerdings so groß, daß alle der in Frage kommenden III-Buchen in Schicht IV hineinwachsen können und sogar eine Kronenschirmfläche von $2/8$ der Zellengrundfläche annehmen können, dann werden sie auch alle diese Kronenschirmfläche annehmen.
- 55) Falls aus Platzmangel im Hauptkronendach nicht alle der neu hineingewachsenen IV-Buchen eine Kronenschirmfläche von $2/8$ der Zellengrundfläche besitzen können, dann werden so viele der entsprechenden IV-Buchen wie möglich eine Kronenschirmfläche dieser Größe annehmen. Dabei werden der Reihe nach zunächst diejenigen neuen IV-Buchen diese Kronenschirmfläche annehmen, welche sich die längste Zeit in Schicht III befunden haben. Falls mehrere der in Frage kommenden IV-Buchen gleich lange in Schicht III verweilen, aber nicht mehr alle von ihnen eine Kronenschirmfläche von $2/8$ der Zellengrundfläche in Schicht IV annehmen können, dann wird nach dem Zufallsprinzip ausgewählt, welche von ihnen eine Kronenschirmfläche dieser Größe annehmen.

Nachwuchs

- 56) Wenn sich im gesamten Wald keine Buchen in Schicht III oder Schicht IV befinden, dann werden keine Samen produziert. Der Bedeckungsgrad F_I in Schicht I ist dann in jeder Zelle gleich null.
- 57) Wenn sich im Wald Buchen in Schicht III oder Schicht IV befinden, dann werden Samen produziert. Der Bedeckungsgrad F_I in Schicht I kann dann maximal den Wert $s_{\max}$ annehmen. Der tatsächlich sich etablierende Bedeckungsgrad F_I hängt vom Bedeckungsgrad höherer Schichten, von den in der Zelle insgesamt herrschenden Lichtverhältnissen und zufällig auftretenden äußeren Umständen ab.
- 58) Allein die zufällig auftretenden, nicht näher bestimmten, äußeren Umstände führen dazu, daß der maximal mögliche Bedeckungsgrad $F_{I_{\max}} = s_{\max}$ in Schicht I von Zelle zu Zelle um einen zufälligen Wert zwischen 0 und 20% verringert wird. Dieser resultierende Bedeckungsgrad F_I^a nimmt damit einen Wert zwischen 80% und 100% von $s_{\max}$ an.
- 59) F_{II} , F_{III} und F_{IV} seien die Bedeckungsgrade in den Schichten II, III und IV. $(1 - F_{II}) \cdot (1 - F_{III}) \cdot (1 - F_{IV})$ sei dann das Maß für die durch die Schichten II bis IV insgesamt nicht überschirmte Fläche.
- 60) Wenn in einer Zelle das Maß $(1 - F_{II}) \cdot (1 - F_{III}) \cdot (1 - F_{IV})$ für die durch die Schichten II bis IV insgesamt nicht überschirmte Fläche 50% oder mehr beträgt, dann ist die „Menge“ des Nachwuchses in der Zelle unabhängig von den in der Zelle insgesamt herrschenden Lichtverhältnissen. Es wird sich der für diese Zelle gültige maximal mögliche Bedeckungsgrad in Schicht I etablieren.
Für $(1 - F_{II}) \cdot (1 - F_{III}) \cdot (1 - F_{IV}) \geq 0,5$ ist also
$$F_I = F_I^a$$
- 61) Wenn in einer Zelle das Maß $(1 - F_{II}) \cdot (1 - F_{III}) \cdot (1 - F_{IV})$ für die durch die Schichten II bis IV insgesamt nicht überschirmte Fläche dagegen weniger als 50% beträgt, dann ist die „Menge“ des Nachwuchses in der Zelle zusätzlich abhängig von den in der Zelle insgesamt vorherrschenden Lichtverhältnissen.

Anhang

Für $0 \leq (1 - F_{II}) \cdot (1 - F_{III}) \cdot (1 - F_{IV}) < 0,5$ berechnet sich der Bedeckungsgrad in Schicht I gemäß

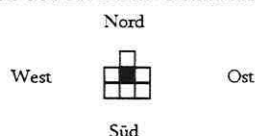
$$F_I = \frac{LF}{LF_{\max}} \cdot F_I^a \quad \text{für } LF_{\max} \neq 0,$$

$$F_I = 0 \quad \text{für } LF_{\max} = 0.$$

mit: LF = Lichteinflußwert in betrachteter Zelle⁸⁹
 $LF_{\max}$ = max. möglicher Lichteinflußwert⁹⁰

Nachbarschaftswchselwirkung: Licht

- 62) Durch die in der Zelle vorherrschenden Lichtverhältnisse werden die Mortalitätsraten m_I bis m_{III} in den Schichten I bis III in einer Zelle verändert. Diese veränderten Werte werden mit m'_I bis m'_{III} bezeichnet.
- 63) Die Lichtverhältnisse in einer Zelle werden durch die Struktur innerhalb der Zelle, d.h. durch die Bedeckungsgrade in den verschiedenen Schichten der Zelle, und durch Lücken im Hauptkronendach oder in der unteren Kronenschicht von benachbarten Zellen bestimmt.
- 64) Nur die betrachtete Zelle ■ selbst und die eingezeichneten Nachbarzellen □ haben einen Einfluß auf die Lichtverhältnisse in ■.



- 65) Die Schichten I und II in den Nachbarzellen □ haben keinen Einfluß auf die Lichtverhältnisse in ■.
- 66) Der Lichteinflußwert LF für eine jede Zelle ist ein Maß für die Beeinflussung des Wachstums und der Mortalitätsraten m_I bis m_{III} von Buchen in dieser Zelle durch die Nachbarzellen und durch die Struktur in der betrachteten Zelle hervorgerufene veränderte Lichtverhältnisse.
- 67) Wenn der Bedeckungsgrad in den Schichten III und IV in der betrachteten Zelle und in sämtlichen relevanten Nachbarzellen (vgl. Regel 64)) 100% beträgt, dann ist der Lichteinflußwert $LF = 0$.
- 68) Für jede Lücke von der Größe von 1/8 der Grundfläche einer Zelle (kurz: 1/8-Lücke) im Hauptkronendach einer Zelle □ erhöht sich der Lichteinflußwert LF um L_{IV} .
- 69) Für jede 1/8-Lücke im Hauptkronendach der betrachteten Zelle ■ erhöht sich der Lichteinflußwert LF um $4 \cdot L_{IV}$.
- 70) Für jede 1/8-Lücke in der unteren Kronenschicht einer Zelle □, deren Hauptkronendach Lücken aufweist, erhöht sich der Lichteinflußwert LF um L_{III} .
- 71) Für jede 1/8-Lücke in der unteren Kronenschicht der betrachteten Zelle ■ erhöht sich der Lichteinflußwert LF um $4 \cdot L_{III}$, falls das Hauptkronendach dieser Zelle Lücken aufweist.
- 72) Der maximal mögliche Lichteinflußwert für eine Zelle beträgt demnach $LF_{\max} = 80 \cdot (L_{IV} + L_{III})$.
- 73) Die durch die in der Zelle vorherrschenden Lichtverhältnisse veränderten Mortalitätsraten m'_I bis m'_{III} nehmen folgende Werte an:

⁸⁹ vgl. auch Abschnitt „Nachbarschaftswchselwirkung: Licht“

⁹⁰ vgl. auch Abschnitt „Nachbarschaftswchselwirkung: Licht“

Für $0 \leq LF \leq 0,8$ gilt:

$$m_I' = m_I \cdot (1 - LF),$$

$$m_{II}' = m_{II} \cdot (1 - LF),$$

$$m_{III}' = m_{III} \cdot (1 - LF).$$

Für $LF > 0,8$ gilt:

$$m_I' = 0,2 \cdot m_I,$$

$$m_{II}' = 0,2 \cdot m_{II},$$

$$m_{III}' = 0,2 \cdot m_{III}.$$

- 74) Zellen, die außerhalb des modellierten Waldgebietes liegen würden, werden als frei von Bäumen angesehen.

Nachbarschaftswechselwirkung: Wind

- 75) Für Bäume aus dem Hauptkronendach, d.h. IV-Buchen besteht die Gefahr, durch Stürme geworfen oder abgebrochen zu werden.
- 76) Die Wahrscheinlichkeit, daß in einem Zeitschritt ein Sturm auftritt, der in der Lage ist IV-Buchen umzuwerfen (oder abzubrechen), beträgt p_{Wind} .
- 77) Ein schädigender Sturm kann aus einer von acht möglichen Himmelsrichtungen kommen. Bei angenommener Hauptwindrichtung $HWR=SW$ ist die Wahrscheinlichkeit für einen Sturm aus $SW=29\%$, $W=26\%$, $NW=11\%$, $N=1\%$, $NO=1\%$, $O=26\%$, $SO=3\%$ und $S=3\%$.
- 78) Eine Veränderung der Hauptwindrichtung HWR führt zu einer entsprechenden Drehung der gesamten (vgl. Regel 77) „Sturm-Windrose“.
- 79) Wenn in einem Zeitschritt ein dem Wald gefährlich werden könnender Sturm auftritt, dann sei die Wahrscheinlichkeit für einen Hauptkronendachbaum, vom Wind umgeworfen zu werden, abhängig von der Windstärke. Je nach Windstärke lassen sich 3 verschiedene Umkipprawahrscheinlichkeiten $p_{Kipp1} < p_{Kipp2} < p_{Kipp3}$ unterscheiden.
- 80) Schwache (p_{Kipp1}), starke (p_{Kipp2}) und stärkste Stürme (p_{Kipp3}) treten auf wie 89 : 10 : 1.
- 81) Befinden sich in benachbarten Zellen in der Richtung, aus der der Wind kommt, Lücken im Hauptkronendach, dann erhöht sich die Umkipprawahrscheinlichkeit einer IV-Buche. Jede 1/8-Lücke in der in Windrichtung unmittelbar benachbart liegenden Zelle führt zu einer Erhöhung der momentan gültigen Umkipprawahrscheinlichkeit um das Produkt aus der entsprechenden Umkipprawahrscheinlichkeit mal eines Kippwahrscheinlichkeits-Erhöhungsmasses E_{pKipp} . Dabei darf die maximale Umkipprawahrscheinlichkeit nicht größer als eins werden.
- 82) Diese Umkipprawahrscheinlichkeit erhöht sich zusätzlich nur für einen solchen Hauptkronendachbaum (d.h. für einen durch Regel 81) betroffenen Hauptkronendachbaum), wenn auch noch in benachbarten, dem Wind abgewandten Zellen Lücken in Schicht IV vorhanden sind. Jede 1/8-Lücke in der nächstgelegenen, dem Wind abgewandt liegenden Zelle führt dann für eine solche Buche zu einer zusätzlichen Erhöhung ihrer bereits vorhandenen Umkipprawahrscheinlichkeit um das Produkt aus der entsprechenden Umkipprawahrscheinlichkeit mal E_{pKipp} . Dabei darf die maximale Umkipprawahrscheinlichkeit nicht größer als eins werden.
- 83) Für IV-Buchen, die sich in am Waldrand liegenden Zellen befinden, führen Lücken im Hauptkronendach in entsprechend benachbarten Zellen nicht zu einer Erhöhung der Umkipprawahrscheinlichkeit.
- 84) Wenn ein Hauptkronendachbaum umkippt, dann ist dieses gleichbedeutend mit seinem Tod.

Anhang

- 85) Beim Umkippen einer IV-Buche können sowohl im Hauptkronendach (falls vorhanden) als auch in der unteren Kronenschicht (falls vorhanden) einer betroffenen benachbarten Zelle Schädigungen auftreten.
- 86) Die beiden unteren Schichten I und II einer betroffenen benachbarten Zelle werden beim Umkippen einer IV-Buche nicht geschädigt.
- 87) Die Umkipprichtung einer IV-Buche liegt in Windrichtung.
- 88) Beim Umkippen einer IV-Buche können Schädigungen in den in Umkipprichtung in einer Reihe liegenden, nächstgelegenen drei Zellen erfolgen.
- 89) Bei Schädigung der Schicht IV einer betroffenen Nachbarzelle wird jede sich in dieser Zelle befindenden IV-Buchen ihre Kronenschirmfläche um einen zufällig bestimmten Wert (in 1/8-Schritten) zwischen null und ihrer gesamten Kronenschirmfläche verlieren. Letzteres ist gleichbedeutend mit dem Tod der betroffenen Buchen.
- 90) Bei Schädigung der Schicht III einer betroffenen Nachbarzelle wird jede der sich in dieser Zellen befindenden III-Buchen mit einer Wahrscheinlichkeit von 50% geschädigt. Diese Schädigung ist gleichbedeutend mit dem Tod der betroffenen III-Buchen.

Mögliche Anfangsverteilungen

- 91) Jede Zelle weist zu Simulationsbeginn eine ganz bestimmte Struktur auf. Diese Struktur ist bestimmt durch die Bedeckungsgrade in den verschiedenen vier Schichten und durch die individuellen Merkmale der einzelnen Buchen in Schicht III und IV.
- 92) Zu Beginn der Simulation kann sich der Wald in dem simulierten Gebiet in einem von vier möglichen Grundzuständen befinden. Diese möglichen Grundzustände wären:
 - Urwald
 - Aufgeforsteter Wald
 - Wirtschaftswald
 - Zufällige WaldstrukturJe nach Grundzustand unterscheidet sich die anfängliche Struktur in den einzelnen Zellen bzw. im Gesamtwald erheblich.
- 93) Die Anfangsverteilung „Urwald“ richtet sich nach der Häufigkeit des Vorkommens verschiedener Entwicklungsstadien in Buchen-Urwaldresten.
Folgende Ausgangssituation liegt bei diesem Grundzustand vor:
35%-38% der Zellen befinden sich im Stadium des Heranwachsens.
20%-22% der Zellen befinden sich im Optimalstadium.
42%-45% der Zellen befinden sich im Zerfallsstadium.
- 94) Für die unterschiedlichen Entwicklungsstadien werden bei 4-schichtig angenommenem Bestandsaufbau in den verschiedenen Schichten folgende Bedeckungsgrade zugrunde gelegt:
Heranwachsstadium: $F_{IV} = 20\%-80\%$
 $F_{III} = 20\%-50\%$
 $F_{II} = 20\%-50\%$
 $F_I = 10\%-70\%$
Optimalstadium: $F_{IV} = 85\%-100\%$
 $F_{III} = 0\%-10\%$
 $F_{II} = 0\%-10\%$
 $F_I = 0\%-10\%$
Zerfallsstadium: $F_{IV} = 0\%-50\%$
 $F_{III} = 0\%-20\%$
 $F_{II} = 0\%-50\%$
 $F_I = 20\%-80\%$
- 95) Beim Grundzustand „Urwald“ erhält jede einzelne Zelle in einem ersten Schritt zunächst eine solche Struktur, die durch eines der drei möglichen Entwicklungsstadien vorgegeben ist.

- 96) Die Bedeckungsgrade F_I und F_{II} für die Schichten I und II einer Zelle werden dann so gewählt, daß sie zufällig zwischen der minimal und maximal möglichen erlaubten Bedeckung für die entsprechende Schicht für das entsprechende Stadium zu liegen kommen.
- 97) Der Bedeckungsgrad F_{III} in der Schicht III einer einzelnen Zelle kann nur diskrete Werte vom Vielfachen von 12,5% annehmen. Einer Zelle wird dann diejenige Anzahl von III-Buchen zugeordnet, so daß durch sie zusammen ein Bedeckungsgrad F_{III} erreicht wird, der (in etwa) einem für das entsprechende Stadium erlaubten entspricht. Genauer:
- Falls eine einzelne Zelle in einem ersten Schritt das Heranwachsstadium zugeordnet bekommt, dann erhält sie eine zufällig bestimmte Anzahl zwischen zwei und vier III-Buchen.
 - Falls eine einzelne Zelle in einem ersten Schritt das Optimalstadium zugeordnet bekommt, dann erhält sie eine zufällig bestimmte Anzahl zwischen null und einer III-Buche.
 - Falls eine einzelne Zelle in einem ersten Schritt das Zerfallsstadium zugeordnet bekommt, dann erhält sie eine zufällig bestimmte Anzahl zwischen null und zwei III-Buche.
- 98) Jede dieser III-Buchen besitzt zu Beginn ein zufällig zugewiesenes Alter zwischen 60 und 210 Jahren
- 99) Es wird davon ausgegangen, daß sich zu Beginn jede III-Buche bereits eine gewisse Zeit in Schicht III befunden haben muß. Die Länge dieser Verweildauer wird durch das Alter der betrachteten III-Buche mitbestimmt. Genauer:
- Eine III-Buche, die maximal 120 Jahre alt ist, bekommt eine zufällig bestimmte Verweildauer zwischen 0 Jahren und (Baumalter-60 Jahren) zugeordnet.
 - Eine III-Buche, die älter als 120 Jahre, aber maximal 150 Jahre alt ist, bekommt eine zufällig bestimmte Verweildauer zwischen (Baumalter-120 Jahren) und (Baumalter-120 Jahren) plus einem Zufallswert zwischen 0 Jahren und 60 Jahren zugeordnet.
 - Eine III-Buche, die älter als 150 Jahre ist, bekommt eine zufällige Verweildauer zwischen 90 Jahren minus einer Zufallszahl zwischen 0 Jahren und (210 Jahren-Baumalter) und 90 Jahren zugeordnet.
- 100) Nur III-Buchen, von denen angenommen wird, daß sie sich zu Beginn bereits mindestens 15 Jahre in Schicht III befunden haben, können, falls möglich, bereits im nächsten Zeitschritt in die nächsthöhere Schicht IV hineinwachsen.
- 101) Auch der Bedeckungsgrad F_{IV} in der Schicht IV einer einzelnen Zelle kann nur diskrete Werte vom Vielfachen von 12,5% annehmen. Einer Zelle wird dann derjenige Bedeckungsgrad F_{IV} zugeordnet, welcher (in etwa) einem für das entsprechende Stadium erlaubten entspricht. Genauer:
- Falls eine einzelne Zelle in einem ersten Schritt das Heranwachsstadium zugeordnet bekommt, dann nimmt der Bedeckungsgrad F_{IV} dieser Zelle einen Wert von 25%, 37,5%, 50%, 62,5% oder 75% an.
 - Falls eine einzelne Zelle in einem ersten Schritt das Optimalstadium zugeordnet bekommt, dann nimmt F_{IV} einen Wert von 87,5% oder 100% an.
 - Falls eine einzelne Zelle in einem ersten Schritt das Zerfallsstadium zugeordnet bekommt, dann nimmt F_{IV} einen Wert von 0%, 12,5%, 25%, 37,5% oder 50% an.
- 102) Dieser in Schicht IV vorhandene Bedeckungsgrad kann durch eine oder mehrere IV-Buchen hervorgerufen werden. Sowohl die Anzahl als auch die möglichen Kronengrößen der anfangs vorhandenen IV-Buchen werden entsprechend dem in Schicht IV vorhandenen Bedeckungsgrad zufällig bestimmt.
- 103) Das Alter einer IV-Buche beträgt zu Beginn zwischen 90 Jahren und age_{max} Jahren.
- 104) Bei der Anfangsverteilung „Urwald“ werden im ersten Schritt der Zuordnung von einzelnen Zellen zu Entwicklungsstadien die diesen Entwicklungsstadien entsprechenden Strukturen zufällig, aber unterschiedlich stark gewichtet, auf die einzelnen Zellen verteilt. Diese Verteilung erfolgt so, daß unter zusätzlicher Berücksichtigung aller einer einzelnen Zelle direkt benachbarten Zellen und daraus resultierender endgültiger Zuordnung einer

Anhang

- einzelnen Zelle zu einem Entwicklungsstadium⁹¹, eine flächenmäßige Verteilung der unterschiedlichen Entwicklungsstadien im Modellwald resultiert, die der in einem Urwald entspricht.
- 105) Bei der Anfangsverteilung „Zufällige Waldstruktur“ erhält jede einzelne Zelle im ersten Schritt der Zuordnung mit einer Wahrscheinlichkeit von 1/3 eine Struktur, die entweder an das Heranwachstadium, das Optimalstadium oder das Zerfallsstadium angelehnt ist.
- 106) Der Anfangsverteilung „Aufgeforsteter Wald“ liegen in jeder Zelle folgende Werte zugrunde:
- $F_{IV} = 0\%$
 - $F_{III} = 0\%$
 - $F_{II} = 0\%$
 - $F_I = 50\%$
- 107) Die Anfangsverteilung „Wirtschaftswald“ richtet sich in jeder Zelle nach folgenden Werten:
- $F_{IV} = 50\%-75\%$
 - $F_{III} = 20\%-35\%$
 - $F_{II} = 10\%-30\%$
 - $F_I = 20\%-40\%$
- 108) Auch bei dieser Anfangsverteilung werden die Bedeckungsgrade F_I und F_{II} für die Schichten I und II einer Zelle so gewählt, daß sie zufällig zwischen der minimal und maximal möglichen erlaubten Bedeckung für die entsprechende Schicht zu liegen kommen.
- 109) Bei dieser Anfangsverteilung sind in jeder Zelle eine zufällig bestimmte Anzahl zwischen zwei und drei III-Buchen vorhanden.
- 110) Jede dieser III-Buchen besitzt ein zufällig zugewiesenes Alter zwischen 60 und 120 Jahren.
- 111) Jeder dieser III-Buchen wird eine zufällig bestimmte Verweildauer in Schicht III zwischen 0 Jahren und (Baumalter-60 Jahren) zugeordnet.
- 112) Nur III-Buchen, von denen angenommen wird, daß sie sich zu Beginn bereits mindestens 15 Jahre in Schicht III befunden haben, können, falls möglich, bereits im nächsten Zeitschritt in die nächsthöhere Schicht IV hineinwachsen.
- 113) Der Bedeckungsgrad F_{IV} einer Zelle kann bei der Anfangsverteilung „Wirtschaftswald“ einen Wert von 50%, 62,5% oder 75% annehmen.
- 114) Dieser in Schicht IV vorhandene Bedeckungsgrad kann durch eine oder mehrere IV-Buchen hervorgerufen werden. Sowohl die Anzahl als auch die möglichen Kronengrößen der anfangs vorhandenen IV-Buchen werden entsprechend dem in Schicht IV vorhandenen Bedeckungsgrad zufällig bestimmt. Die Kronenschirmfläche einer IV-Buche darf dabei nicht weniger als 2/8 der Zellengrundfläche betragen.
- 115) Das Alter einer jeden IV-Buche beträgt zwischen 90 Jahren und 150 Jahren.

Endgültige Zuordnung einer Zelle zu einem Entwicklungsstadium

- Die folgenden Regeln beziehen sich mehr auf die Darstellung bzw. Auswertung der sich in der Simulation ergebenden Raumstrukturen.
- 116) Bei der endgültigen Zuordnung einer Zelle zu einem Entwicklungsstadium werden einerseits die Bedeckungsgrade in den Schichten I bis IV in der gerade betrachteten Zelle, andererseits aber auch die Bedeckungsgrade aller (max. acht, für Randzellen entsprechend weniger) direkt benachbarten Zellen, mitberücksichtigt. Der gerade betrachteten Zelle wird dann das Stadium zugeordnet, welches dem der aus bis zu 3-3 Zellen bestehenden Großeinheit (am ehesten) entspricht.
- 117) Für jede einzelne Zelle solch einer Großeinheit wird sowohl zu Beginn als auch in jedem Zeitschritt der Simulation für jede Schicht die Abweichung zwischen des in ihr

⁹¹ nähere Details siehe Abschnitt „Endgültige Zuordnung einer Zelle zu einem Entwicklungsstadium“

bestimmten Bedeckungsgrades und des für ein jeweiliges Stadium erlaubten Bedeckungsgrades⁹² bestimmt. So kann jeder Zelle der Großeinheit vorläufig das Stadium zugeordnet werden, für welches die Summe der Abweichungen am geringsten ausfällt.

- 118) Bei der endgültigen Zuordnung bekommt die betrachtete Zelle dann das Stadium zugeordnet, welches in den meisten einzeln betrachteten Zellen der Großeinheit vertreten ist.
- 119) Sind von zwei oder drei Stadien am gleichmeisten viele Zellen in einer Großeinheit vorhanden, dann bekommt die betrachtete Einzelzelle das Stadium zugeordnet, welches sie selbst aufweist, falls sie zu einer der am meisten vertretenen Gruppen gehört.
- 120) Falls die betrachtete Einzelzelle ein anderes Stadium besitzt als eine der am meisten vertretenen Gruppen in der Großeinheit, dann bekommt sie zufällig eines dieser am meisten vertretenen Stadien zugeordnet, wenn sie sich im Zeitschritt vorher nicht in einem Stadium befand, welches nun zu den am meisten vertretenen zählt.
- 121) Falls die betrachtete Einzelzelle im Zeitschritt vorher zu einer der nun am gleichmeisten vertretenen Gruppen gehörte, nun aber zu keiner dieser beiden gehört, dann bekommt sie das Stadium zugeordnet, welches sie einen Zeitschritt vorher besaß.

⁹² siehe Abschnitt „Mögliche Anfangsverteilungen“

A2. Kurze Übersicht über die im Modell verwendeten Parameter⁹³

Größe der Waldfläche

Zellen in x-Richtung ($3 \leq x \leq 64$): x gibt die Ausdehnung des Modellwaldes in Ost-West-Richtung in Zellen an.

Zellen in y-Richtung ($3 \leq y \leq 64$): y gibt die Ausdehnung des Modellwaldes in Nord-Süd-Richtung in Zellen an.

Simulationsdauer

Simulationsdauer in Zeitschritten ($1 \leq SL \leq 1000$): Die Simulationsdauer SL kann zwischen 1 und 1000 Zeitschritten zu je 15 Jahren betragen.

Unbeeinflusste Mortalitätsraten und Höchstalter

Sämlings-Mortalitätsrate ($0 \leq m_I \leq 1$): m_I gibt die Mortalitätsrate in der Schicht I innerhalb eines Zeitschritts ohne Beeinflussung durch mögliche Wechselwirkungen und Einflußgrößen an.

Jungbuchen-Mortalitätsrate ($0 \leq m_{II} \leq 1$): m_{II} gibt die Mortalitätsrate in der Schicht II innerhalb eines Zeitschritts ohne Beeinflussung durch mögliche Wechselwirkungen und Einflußgrößen an.

III-Buchen-Mortalitätsrate ($0 \leq m_{III} \leq 1$): m_{III} gibt die Mortalitätsrate in der Schicht III innerhalb eines Zeitschritts ohne Beeinflussung durch mögliche Wechselwirkungen und Einflußgrößen an.

IV-Buchen-Mortalitätsrate ($0 \leq m_{IV} \leq 1$): m_{IV} gibt die Mortalitätsrate in der Schicht IV innerhalb eines Zeitschritts ohne Beeinflussung durch mögliche Wechselwirkungen und Einflußgrößen an.

Höchstalter ($150 \leq age_{max} \leq 500$): age_{max} gibt das Alter einer IV-Buche an, ab dem sich ihre unbeeinflusste Mortalitätsrate m_{IV} in jedem Zeitschritt zusätzlich um 0,3 erhöht.

Wechselwirkung „Licht“

Mortalitätsratenerniedrigung durch Hauptkronendachlücke: ($0 \leq L_{IV} \leq 1$): L_{IV} ist das Maß für die Erniedrigung der noch unbeeinflussten Mortalitätsraten in den Schichten I bis III verursacht durch eine 1/8-Lücke im Hauptkronendach bestimmter Zellen.

Mortalitätsratenerniedrigung durch Lücke in der unteren Kronenschicht ($0 \leq L_{III} \leq 1$): L_{III} ist das Maß für die Erniedrigung der noch unbeeinflussten Mortalitätsraten in den Schichten I bis III, verursacht durch eine 1/8-Lücke in der unteren Kronenschicht bestimmter Zellen.

Wechselwirkung „Wind“

Hauptwindrichtung ($HWR=1, \dots, 8$; $1=N, 2=NO, \dots, 8=NW$): Der größte Prozentsatz aller waldschädigenden Stürme kommt aus der Hauptwindrichtung HWR . Für $HWR=6$ sei die Wahrscheinlichkeit für einen Sturm aus dieser und einer anderen Richtung als der Hauptwindrichtung an empirische Daten für Deutschland angelehnt. Ein anderer Wert für HWR führt zu einer entsprechenden Drehung der gesamten „Windrose“.

Sturmwahrscheinlichkeit ($0 \leq p_{Wind} \leq 1$): Die Wahrscheinlichkeit für einen Sturm, der in der Lage ist, Bäume aus dem Hauptkronendach abzubrechen oder umzuwerfen, beträgt je Zeitschritt p_{Wind} .

⁹³ nähere Details zu allen Parametern vgl. Anhang A1. Vollständiger Regelsatz des Modells

- Kippwahrscheinlichkeit bei schwachem Sturm ($0 \leq p_{Kipp1} \leq 1$): p_{Kipp1} gibt die Wahrscheinlichkeit für einen Hauptkronendachbaum an, bei einem schwachen Sturm abzubrechen oder umzufallen.
- Kippwahrscheinlichkeit bei starkem Sturm ($0 \leq p_{Kipp2} \leq 1$): p_{Kipp2} gibt die Wahrscheinlichkeit für einen Hauptkronendachbaum an, bei einem starken Sturm abzubrechen oder umzufallen.
- Kippwahrscheinlichkeit bei stärkstem Sturm ($0 \leq p_{Kipp3} \leq 1$): p_{Kipp3} gibt die Wahrscheinlichkeit für einen Hauptkronendachbaum an, bei stärkstem Sturm abzubrechen oder umzufallen.
- Kippwahrscheinlichkeit-Erhöhungsmäß ($0 \leq E_{pKipp} \leq 1$): E_{pKipp} ist das Maß für die Erhöhung der entsprechenden Kippwahrscheinlichkeit je 1/8-Lücke in direkt benachbarter, in Windrichtung und entgegengesetzter Richtung liegender Zelle.

Sonstiges

- Maximale III-Buchen-Herausbildungswahrscheinlichkeit ($0 \leq w_{max} \leq 1$): w_{max} gibt die maximale Wahrscheinlichkeit für die Herausbildung einer III-Buche aus Schicht II pro Zeitschritt an.
- Maximaler Samenmengen-Bedeckungsgrad ($0 \leq s_{max} \leq 1$): s_{max} beschreibt den maximalen Bedeckungsgrad in Schicht I, der pro Zeitschritt durch die Produktion von Samen hervorgerufen werden kann.

Anhang

Literatur:

- Aas, G. u. Riedmiller, A., 1987:* GU Naturführer Bäume. Gräfe und Unzer Verlag GmbH, München, 258 S.
- Assmann, E., 1961:* Waldertragskunde. BLV Verlagsgesellschaft, München Bonn Wien, 490 S.
- Becker, M., 1981:* Caractérisation climatique de la hêtraie. In: Teissier du Cros u.a. (Hrsg.): Le hêtre, INRA, Paris, S. 71-77.
- Bossel, H. u. Krieger, H., 1991:* Simulation model of natural tropical forest dynamics. Ecological Modelling 59, S. 37-71.
- Bossel, H. u. Krieger, H., 1994:* Simulation of multi-species tropical forest dynamics using a vertically and horizontally structured model. Forest Ecology and Management 69, S. 123-144.
- Bosshard, H.H., 1984:* Holzkunde. Band 2. Zur Biologie, Physik und Chemie des Holzes. Birkhäuser Verlag, Basel Boston Stuttgart, 312 S.
- Botkin, D.B., Janak, J.F. u. Wallis, J.R., 1972:* Some ecological consequences of a computer model of forest growth. Journal of Ecology 60, S. 849-872.
- Brewer, R. u. Meritt, P.G., 1978:* Wind throw and tree replacement in a climax beech-maple forest. Oikos 30, S. 149-152.
- Burschel, P. u. Huss, J., 1964:* Die Reaktion von Buchensämlingen auf Beschattung. Forstarchiv 35 (11), S.225-233.
- Burschel, P. u. Schmaltz, J., 1965a:* Die Bedeutung des Lichtes für die Entwicklung junger Buchen. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung, S. 193-210.
- Burschel, P. u. Schmaltz, J., 1965b:* Untersuchungen über die Bedeutung von Unkraut- und Altholzkonkurrenz für junge Buchen. Forstwissenschaftliches Centralblatt 84, S.230-243.
- Dengler, A., 1972:* Waldbau auf ökologischer Grundlage. Zweiter Band. Baumartenwahl, Bestandesbegründung und Bestandespflege. 4. Auflage. Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin, 264 S.
- Dengler, A., 1980:* Waldbau auf ökologischer Grundlage. Erster Band. Der Wald als Vegetationstyp und seine Bedeutung für den Menschen. Fünfte Auflage. Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin. 284 S.
- Eifert, 1903:* Forstliche Sturmbeobachtungen im Mittelgebirge. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung, 79. Jg., S. 323-341, 369-381, 413-444.
- Foster, D.R., 1988:* Species and stand response to catastrophic wind in central New England, U.S.A.. Journal of Ecology 76, S.135-151.
- Fröhlich, J., 1925:* Aus dem südosteuropäischen Urwalde. Forstwissenschaftliches Centralblatt, S. 199-206.
- Fröhlich, J., 1954:* Urwaldpraxis. Neumann Verlag, Radebeul und Berlin, 200 S.
- Gehrhardt, E., 1930:* Ertragstafeln für reine und gleichartige Hochwaldbestände von Eiche, Buche, Tanne, Fichte, Kiefer, grüner Douglasie und Lärche. Verlag Julius Springer, Berlin, 73 S.

Literatur

- Hessisches Ministerium für Landesentwicklung, Wohnen, Landwirtschaft, Forsten und Naturschutz (Hrsg.), 1991: Naturwaldreservate in Hessen. Ein Überblick. Mitteilungen der Hessischen Landesforstverwaltung, Band 24, Wiesbaden, 62 S.*
- Holm, M., 1995: Naturnahe Buchenwirtschaft. Allgemeine Forstzeitschrift 8, S.408-410.*
- Huth, A., Hahn-Schilling, B. u. Bossel, H., 1994: Untersuchung der Auswirkungen von verschiedenen Nutzungsstrategien auf das Wachstum von Moorregenwald - Simulation mit FORMIX. Zeitschrift für Ökologie und Naturschutz 3, S. 217-225.*
- Jeník, J., 1979: Ecological meaning of stability. In: Stability of spruce forest ecosystem. Symposium MAB, Brno, S. 7-15.*
- Jenssen, M. u. Hofmann, G., 1996: Der natürliche Entwicklungszyklus des baltischen Perlgras-Buchenwaldes (*Melico-Fagetum*) - Anregungen für naturnahes Wirtschaften. Beiträge für Forstwirtschaft und Landschaftsökologie 30, S.114-124.*
- Jenssen, M. u. Hofmann, G., 1997: Entwicklungszyklen des baltischen Buchenwaldes. AFZ/DerWald, S.1012-1014.*
- Kätsch, C., 1998: Starkholzinventur mit Hilfe von Luftbildern. Forst und Holz, 53. Jg., Nr. 8, S. 227-231.*
- Kennel, R., 1966: Soziale Stellung, Nachbarschaft und Zuwachs. Forstwissenschaftliches Centralblatt, 85. Jg., S. 193-204.*
- Kira, T., 1978: Community architecture and organic matter dynamics in tropical lowland rain forests of Southeast Asia with special reference to Pasoh Forest, West Malaysia. In: Tomlinson, P.B. u. Zimmermann M.H. (Hrsg.): Tropical Trees as Living Systems. Proc. 4th Cabot Symp., Harvard Forest, 26-30 April 1976, Petersham, MA. Cambridge University Press, Cambridge, MA, S. 561-590.*
- Knapp, H.D. u. Jeschke, L., 1991: Naturwaldreservate und Naturwaldforschung in den ostdeutschen Bundesländern. In: Bundesforschungsanstalt für Naturschutz und Landschaftsökologie (Hrsg.): Naturwaldreservate. Schriftenreihe für Vegetationskunde 21, Bonn-Bad Godesberg, S.21-54.*
- Korpel', Š., 1992: Ergebnisse der Urwaldforschung für die Waldwirtschaft im Buchen-Ökosystem. Allgemeine Forstzeitschrift, S. 1148-1152.*
- Korpel', Š., 1995: Die Urwälder der Westkarpaten. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart Jena New York, 310 S.*
- Küster, H., 1992: Die Geschichte des Grünlandes aus pollenanalytischer und archäobotanischer Sicht. ANL - Laufener Seminarbeiträge 92/2, S.9-13.*
- Leibundgut, H., 1959: Über Zweck und Methodik der Struktur- und Zuwachsanalyse von Urwäldern. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen, 110. Jg., Nr. 3, S.111-124.*
- Leibundgut, H., 1970: Waldreservate im Kanton Zürich. Vierteljahresschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich, S. 476-468.*
- Leibundgut, H., 1978: Über Zweck und Probleme der Urwaldforschung. Allgemeine Forstzeitschrift, S. 683.*

- Leibundgut, H.**, 1982: Europäische Urwälder der Bergstufe. Verlag Paul Haupt, Bern Stuttgart, 308 S.
- Leibundgut, H.**, 1993: Europäische Urwälder: Wegweiser zur naturnahen Waldwirtschaft. Verlag Paul Haupt, Bern Stuttgart Wien, 260 S.
- Le Tacon, F.**, 1981: Caractérisation edaphique. In: Teissier du Cros u.a. (Hrsg.): Le hêtre, INRA, Paris, S. 77-84.
- Mayer, H.**, 1971: Das Buchen-Naturwaldreservat Dobra/Kampliten im niederösterreichischen Waldviertel. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen, 122. Jg., Nr. 2, S.45-66.
- Mayer, H.**, 1976: Gebirgswaldbau - Schutzwaldpflege: Ein waldbaulicher Beitrag zur Landschaftsökologie und zum Umweltschutz. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, 436 S.
- Mayer, H.**, 1978: Über die Bedeutung der Urwaldforschung für den Gebirgswaldbau. Allgemeine Forstzeitschrift, S. 691-693.
- Mayer, H.**, 1980: Waldbau auf soziologisch-ökologischer Grundlage. 2. Auflage. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart New York, 483 S.
- Mayer, H.**, 1984: Wälder Europas. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart New York, 691 S.
- Mayer, H. u. Ott, E.**, 1991: Gebirgswaldbau - Schutzwaldpflege: Ein waldbaulicher Beitrag zur Landschaftsökologie und zum Umweltschutz. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart New York, 587 S.
- Mlinšek, D.**, 1978: Brauchen wir Urwald? Allgemeine Forstzeitschrift, S.684-686.
- Neuert, C.**, 1994: Ein individuenbasiertes Simulationsmodell zu den komplexen sozialen und räumlichen Strukturen beim Gemeinen Baumhopf (*Phoeniculus purpureus*) in Südafrika. Diplomarbeit, Fachbereich Physik, Philipps-Universität Marburg, 108 S.
- Neuert, C., Du Plessis, M.A., Grimm, V. u. Wissel, C.**, 1995: Welche ökologischen Faktoren bestimmen die Gruppengröße bei *Phoeniculus purpureus* (Gemeiner Baumhopf) in Südafrika? - Ein individuenbasiertes Modell. Verhandlungen der Gesellschaft für Ökologie 24, S.145-149.
- Nikolai, V.**, 1986: The bark of trees: thermal properties, microclimate and fauna. Oecologia 69, S. 148-160.
- Niemann, E.**, 1968: Gedanken zur Problematik von Totalreservaten in Wäldern. Archiv für Naturschutz und Landschaftsforschung 4, S. 213-224.
- Peters, R.**, 1992: Ecology of beech forests in the northern hemisphere. Wageningen, 122 S.
- Pretzsch, H.**: 1992: Konzeption und Konstruktion von Wachstumsmodellen für Rein- und Mischbestände. Forstliche Forschungsberichte München. Schriftenreihe der Forstwissenschaftlichen Fakultät der Universität München und der bayerischen forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt, München, 332 S.
- Reininger, H.**, 1994: Ist ökologische Nachhaltigkeit mit dem Altersklassenwald vereinbar? Allgemeine Forstzeitschrift 25, S. 1380-1381.

Literatur

- Remmert, H., 1985:** Was geschieht im Klimax-Stadium? Ökologisches Gleichgewicht durch Mosaik aus desynchronen Zyklen. *Naturwissenschaften* 72, S. 505-512.
- Remmert, H., 1987:** Sukzessionen im Klimax-System. *Verhandlungen der Gesellschaft für Ökologie* 16, S. 27-34.
- Remmert, H., 1988:** Wie verjüngt sich ein Urwald? *alma mater philippina*, Marburger Universitätsbund 7, S. 4-7.
- Remmert, H., 1989:** Ökologie - Ein Lehrbuch. 4. Auflage. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York Tokyo, 374 S.
- Remmert, H., 1991:** The Mosaic-Cycle Concept of Ecosystems - An Overview. In: *Remmert, H (Hrsg.): The Mosaic-Cycle Concept of Ecosystems. Ecological Studies* 85, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, S. 1-22.
- Rubner, K., 1934:** Die pflanzengeographisch-ökologischen Grundlagen des Waldbaus. 3. Auflage. Verlag J. Neumann, Neudamm, 597 S. und 8 Beilagen.
- Rubner, K., 1968:** Grundlagen des naturnahen Waldbaus in Europa. *Forstwissenschaftliches Zentralblatt* 1, S. 8-36.
- Runkle, J.R., 1985:** Disturbance Regimes in Temperate Forests. In: Pickett, S.T.A. u. White, P.S.: *The Ecology of Natural Disturbance and Patch Dynamics*. Academic Press, Orlando, S. 17-33.
- Scamoni, A., 1953:** Naturwaldzellen. *Natur und Heimat* 6, 176 S.
- Schenk, C.A., 1924:** Der Waldbau des Urwaldes. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 3, S. 377-388.
- Scherzinger, W., 1996:** Naturschutz im Wald: Qualitätsziele einer dynamischen Waldentwicklung. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart, 447 S.
- Schober, R., 1972:** Die Rotbuche 1971. Schriftenreihe der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen und Mitteilungen der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt Band 43/44. J.D. Sauerländer's Verlag, Frankfurt a. Main, 333 S. und 112 S. Anhang.
- Schwappach, A., 1893:** Wachstum und Ertrag normaler Rotbuchenbestände. Springer-Verlag, Berlin, 104 S.
- Seibert, P. u. Hagen, J., 1974:** Zur Auswahl an Waldreservaten in Bayern. *Forstwissenschaftliches Zentralblatt* 5, S.274-284.
- Van Migroet, M., 1996:** Über Waldstabilität. *Beiträge für Forstwirtschaft und Landschaftsökologie* 30, S.49-57.
- Wagner, C., 1907:** Die Grundlagen der räumlichen Ordnung im Walde. Verlag der Laupp'schen Buchhandlung, Tübingen, 320 S.
- Watt, A.S., 1923:** On the Ecology of British Beechwoods with special Reference to their Regeneration. *The Journal of Ecology* 11, S. 1-48.
- Watt, A.S., 1925:** On the Ecology of British Beechwoods with special Reference to their Regeneration. *The Journal of Ecology* 13, S. 27-73.
- Wiedemann, E., 1930:** Über die Weiterentwicklung der Ertragstafeln. *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, 52. Jg., H. 7/8, S. 211-227.
- Wiedemann, E., 1932:** Die Rotbuche 1931. *Mitteilungen aus Forstwirtschaft und Forstwissenschaft*, 3. Jg., H. 1, 189 S.

- Wissel, C.*, 1989: Theoretische Ökologie - Eine Einführung. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 299 S.
- Wissel, C.*, 1991: A Model for the Mosaic-Cycle Concept. In: Remmert, H. (Hrsg.): The Mosaic-Cycle Concept of Ecosystems. Ecological Studies 85, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, S. 22-45.
- Wissel, C.*, 1992: Modelling the mosaic-cycle of a Middle European beech forest. Ecological Modelling 63, S. 29-43.
- Zukrigl, K.*, 1991: Succession and Regeneration in the Natural Forests in Central Europe. Geobios 18, S. 202-208.

Literatur

Danksagung

Herrn Prof. Dr. Christian Wissel danke ich für das schöne und interessante Thema, seine große Hilfsbereitschaft, seine Betreuung sowie für sein Vertrauen in mich und seine Geduld.

Herrn Dr. Volker Grundmann danke ich für seine Bereitschaft, einem Theoretiker sein fundiertes praktisches Wissen zur Verfügung gestellt zu haben. Durch gemeinsame Gespräche und Diskussionen wurden ganz entscheidende Anstöße für die Entwicklung des Buchenwaldmodells gegeben. Ferner danke ich ihm für die freundliche Zurverfügungstellung der Buchenwald-Photos (Abb.2 bis Abb.4), die hier leider nur in schwarz-weiß abgedruckt werden konnten.

Herrn Dr. Andreas Huth danke ich für seine Kooperations- und Hilfsbereitschaft und die Zurverfügungstellung des FORMIX2-Modells als Grundlage für ein mögliches Buchenwaldmodell, welches ein wichtiger Zwischenschritt hin zur Entwicklung des späteren Buchenwaldmodells war.

Herrn Dr. Volker Grimm danke ich für seine allzeitige Hilfsbereitschaft, die zahlreichen fruchtbaren fachlichen Diskussionen, Kommentare und Anregungen sowie für seine gleichsam kritische und humorvolle Durchsicht der Arbeit.

Hanno Hildenbrandt danke ich für die Bereitstellung seiner Grafik- und Numerik-Routinen, sowie seine stets schnelle und zuverlässige Hilfe bei so allerlei EDV-Problemen.

Frau Dr. Christine Rademacher danke ich für einige fachliche Tips und Hinweise.

Kirsti Ohr danke ich für die schnelle Durchsicht dieser Arbeit.

Meinen Eltern Elfi Neuert und Leo Neuert danke ich für ihren unerschütterlichen Glauben an mich, ihre Geduld sowie ihre finanzielle Unterstützung.

Meiner Freundin Ulla danke ich für die Durchsicht einiger Kapitel dieser Arbeit, ganz besonders aber für ihre unerschöpfliche Toleranz, sich immer 'mal wieder mein Gejammer anhören zu müssen sowie für all ihre aufbauenden Worte und Taten.

Meiner kürzlich verstorbenen Großmutter Hedwig Neuert danke ich für ihre finanzielle Unterstützung.

Außerdem danke ich Waldo und Raffi.

UFZ-Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH
Sektion Ökosystemanalyse
Permoserstraße 15
D-04318 Leipzig
Telefon 0341/235-3245
Telefax 0341/235-3500