

Projekt 01 LK 9408, "Wirkung von Klimaänderungen auf Vegetation: Entwicklung eines allgemeinen Modells für die Klimafolgenforschung"

Abschlußbericht

Förderungs- und Berichtszeitraum: 1.7.1995 – 30.10.1998

1) Aufgabenstellung, Voraussetzungen und Ablauf des Projekts

1.1 Aufgabenstellung

Das Projekt hat zum Ziel, die Anwendbarkeit von Waldsukzessionsmodellen unter den Bedingungen des globalen Klimawandels zu verbessern.

Wälder haben eine große Bedeutung als eine der wichtigsten erneuerbaren Ressourcen. Zudem speichern sie einen großen Anteil des in terrestrischen Ökosystemen gebundenen Kohlenstoffs (Ajtay *et al.* 1979) und stehen über schnelle Austauschprozesse wie Photosynthese und Respiration mit der Atmosphäre in Verbindung (Waring and Schlesinger 1985); sie sind somit ein wesentliches Glied im globalen Kohlenstoffkreislauf (Woodwell *et al.* 1978). Aus diesem Grund ist die zukünftige Entwicklung der Wälder eines bestimmten Gebietes nicht nur von lokaler, sondern auch von globaler Bedeutung.

Waldökosysteme entwickeln sich langsam, und ihre Artenzusammensetzung verändert sich nach größeren Störungen über Jahrhunderte hinweg, bis eine Gleichgewichtslage erreicht wird. Aus diesem und anderen Gründen ist es praktisch unmöglich, die Auswirkungen einer Klimaveränderung auf Waldökosysteme experimentell zu untersuchen, und die Forschung muß auf andere Methoden zurückgreifen. Ökologische Modelle bieten eine Möglichkeit dazu, indem sie erlauben, unsere Kenntnisse aus den verschiedensten Fachgebieten zu synthetisieren. Mit Hilfe des Computers lassen sich dann Aussagen auf Massstabsebenen machen, die experimentell nicht direkt zugänglich sind; auch die zukünftige Entwicklung von Waldökosystemen läßt sich so realistisch simulieren.

Eine Klasse von ökologischen Waldmodellen, die sogenannten "Gap-Modelle" (Shugart 1984), wurden vor über zwanzig Jahren erstmals angewendet (Botkin, Janak *et al.* 1972); die Modelle erwiesen sich als überaus erfolgreich für die Wiedergabe der Sukzession in

naturnahen Waldbeständen an den verschiedensten Standorten und auf mehreren Kontinenten. Mittlerweile liegt eine reiche Tradition und große Erfahrung im Umgang mit diesen Modellen vor (Shugart 1984; Botkin 1993). Auch im vorliegenden Projekt wurde dieser Modelltyp verwendet, um die möglichen Auswirkungen einer Klimaveränderung auf Wälder in Mitteleuropa zu untersuchen.

12) Voraussetzungen unter denen das Projekt durchgeführt wurde

In einem Vorläuferprojekt (Lasch and Lindner 1995) war die Anwendbarkeit von Sukzessionsmodellen außerhalb des klimatischen Raumes, für den sie ursprünglich entwickelt worden waren, untersucht worden. Bei der Nutzung der Modelle unter Klimaänderungsszenarien wird die Tatsache, daß sie für wenig variierende Umweltbedingungen entwickelt wurden zum begrenzenden Element (Bugmann 1994). So können durch die außerordentlich hohe Sensitivität des Modells FORECE (Kienast 1987) gegenüber leichten Änderungen des Bodenwasserhaushalts bei der Simulation von Reaktionen auf Umweltänderungen sehr leicht unrealistische Resultate entstehen. Auch die Anwendung der beiden Sukzessionsmodelle FORECE und FORSKA (Prentice et al. 1993) außerhalb des ursprünglichen Entwicklungsraumes in NO-Deutschland hat deutlich gemacht, daß die Gültigkeitsgrenzen der Modelle im trockeneren subkontinentalen Klimaraum offenbar bereits für die gegenwärtigen Klimabedingungen überschritten wurden (Lindner, Lasch et al. 1996).

Die an Standorten in NO-Deutschland dokumentierten Probleme mit Sukzessionsmodellen, Trockenheitsgradienten realistisch abzubilden, verdeutlichten die Notwendigkeit, Modelle für die Klimawirkungsforschung intensiv an unterschiedlichsten Standorten mit dem gesamten Spektrum der heute bekannten Klimabedingungen zu testen. Benötigt werden Modelle, die flexibel und allgemeingültig genug sind, eine realistische Waldentwicklungsdynamik mit den unterschiedlichsten Umweltverhältnissen zu simulieren. Im Rahmen der im Vorläuferprojekt erfolgten Modellanpassungen war es nicht gelungen, einen einheitlichen FORSKA-Parametersatz für realistische Simulationen an den Standorten in NO-Deutschland und in Skandinavien zu finden. Dies ist darauf zurückzuführen, daß die Wirkung der Umweltfaktoren auf das Wachstum der Baumarten in FORSKA noch nicht befriedigend abgebildet wird. Insbesondere die abnehmende Konkurrenzkraft der Buche entlang des Trockenheitsgradienten konnte zunächst nicht realistisch simuliert werden. Die mangelhafte Abbildung des Trockenstresses mußte durch die Anpassung von einigen Parametern der Konkurrenten (insbesondere bei der Eiche) ausgeglichen werden, um diesen auf den Standorten außerhalb der natürlichen Buchenverbreitung Konkurrenzvorteile zu gewähren. Eine solche Veränderung von baumartspezifischen Parametern ist aber in einem auf

unterschiedliche Umweltbedingungen übertragbaren Modell unerwünscht, da sie an Standorten mit abweichender Baumartenzusammensetzung ebenfalls zu verschobenen Konkurrenzverhältnissen führt.

Die Modellanalyse hatte besonders deutlich gemacht, wie schwer es ist, Simulationsergebnisse in Mitteleuropa zu validieren, da fast keine vom Menschen unbeeinflussten Urwaldbestände existieren. Dagegen sind relativ lange Beobachtungs-Zeitreihen von Versuchsflächen der Forstlichen Versuchsanstalten vorhanden. Diese sind zwar nicht geeignet, die vom Menschen unbeeinflussten Konkurrenzverhältnisse zwischen den Arten abzubilden, aber sie könnten genutzt werden, um die Wachstumsdynamik einzelner Baumarten auf unterschiedlichen Standorten zu validieren. Dabei konnten Defizite bei der Berechnung des Höhenwachstums aufgrund von stark vereinfachenden Ansätzen bezüglich der Durchmesser-Höhenbeziehung aufgezeigt werden, die zu unrealistischen simulierten Baumformen führen. Problematisch ist dies vor allem, weil der Höhenzuwachs verschiedener Baumarten ein ganz wesentliches Konkurrenzmerkmal ist. Die Abbildung des Höhenwachstums der Bäume sollte daher durch die Berücksichtigung von Dichteeffekten verbessert werden.

Eine weitere Schlußfolgerung aus den Ergebnissen des Vorläuferprojektes war, daß Dichteeffekte auch aus dem Grund besser erfaßt werden sollten, um nach der Entnahme von Einzelbäumen (durch Durchforstungen oder selektive Störungen - z.B. Sturmbruch) zu realistischeren Prognosen der Wachstumsreaktionen der verbleibenden Individuen zu kommen. Mit der Berücksichtigung von realistisch abgebildeten Bewirtschaftungsmaßnahmen könnten die Modellaussagen für die Forstwirtschaft deutlich an Wert gewinnen, da dann praxisnahe Aussagen über die Anbaufähigkeit unterschiedlicher Baumarten und -Mischungen getroffen werden können.

Zur regional höher auflösenden Simulation der Waldentwicklung in Abhängigkeit der differenzierten Standortsbedingungen ist vorrangig die Abbildung unterschiedlicher Nährstoffversorgung in die Modelle einzubeziehen. Fortschritte in der regionalen Modellanwendung werden aber auch durch eine verbesserte Abbildung der Wasserbilanz und des Trockenstresses an unterschiedlichen Standorten erwartet. Dadurch könnten besonders auch realistischere Risikoanalysen für unterschiedliche Standortstypen durchgeführt werden.

Die Aufgabenstellung für das vorliegende Projekt resultiert aus den hier kurz umrissenen Ergebnissen des Vorläuferprojektes. Durch die Einstellung von Dr. H. Bugmann als Mitarbeiter im Projekt konnten schweizerische Erfahrungen aus ähnlichen parallelen Arbeiten zur Allgemeingültigkeit von Sukzessionsmodellen in das Projekt direkt einfließen. Die im

Institut vorhandenen Kapazitäten zur Generierung von Klimaänderungsszenarien (Gerstengarbe and Werner 1995) bildeten eine weitere wesentliche Voraussetzung für die Projektdurchführung.

I3) Planung und Ablauf des Vorhabens

Der ursprüngliche Projektplan sah die folgenden Arbeitsschritte vor:

4/1994 - 6/1994	Projektorganisation (Evaluation verfügbarer Daten, Definition des Transekts im subkontinentalen Europa)
7/1994 - 10/1994	Analyse und Vergleich des Verhaltens von FORSKA und FORCLIM entlang des Transekts
11/1994 - 8/1995	Modellentwicklung (Verbesserung der Formulierungen von Trockenheits- und Nährstoffeffekten auf das Wachstum von Bäumen; Waldbewirtschaftungs-Untermmodell)
9/1995 - 6/1996	Modellvalidation (Skandinavien & Alpenraum; Dauerbeobachtungsflächen; Gitter in Europa; Transekt unter anderen klimatischen Verhältnissen, z.B. östliche USA)
7/1996 - 10/1996	Modellanwendung, Interpretation der Resultate
11/1996 - 3/1997	Präsentation & Verbreitung der Resultate, Evaluation des gesamten Projektes

Wegen Projektbeginn am 1.7.1995 verschoben sich die einzelnen Projektabschnitte um jeweils ca. 15 Monate. Wie aus den folgenden Kapiteln zu entnehmen ist, wurde die Planung weitestgehend realisiert. Zum Projektablauf im Einzelnen: Entwicklung von Funktionen zur Verbesserung des Modellverhaltens von FORSKA und FORCLIM (Bodenwassermodell, Stickstofflimitierung, Dichteabhängigkeit des Höhenwachstums und Bewirtschaftungsroutinen) sowie die Datenbeschaffung für Validierung sowie Tests in Klimagradienten und außerhalb von Gebieten für die Modelle parametrisiert wurden im Zeitplan und zum Teil früher als vorgesehen realisiert. Ein großer Teil der Ergebnisse ist publiziert (siehe Abschnitte II1 bis II7, und die Liste der Projektpublikationen). Die Entwicklung eines neuen Modells mit größerem Gültigkeitsbereich wurde, wie vorgesehen, parallel vorangetrieben. Eine erste konzeptionelle Planung und Anwendung auf Einzelbaumwachstum wurde Ende 1996 auf einem internationalen Kongress vorgestellt. Die Entwicklung der technischen Voraussetzungen für Modellierung auf räumlichem Gitter war behindert durch die Schwierigkeit, die IVa-Stelle mit einer geeigneten Person (GIS, DV-Kenntnisse) zu besetzen. Regionale Modellrechnungen wurden trotz dieser Schwierigkeiten planmäßig realisiert, aber begrenzt auf einen kleineren Raum – das Land Brandenburg. Die Besetzung der Stelle im Jahr 1997 erlaubte es, diese Arbeiten abzuschließen und eine nutzerfreundliche Softwareplattform zu realisieren. Die Wissenschaftler-Stellen wurden mit Dr. H. Bugmann und Dipl. Forstwirt

M. Lindner besetzt. Für die letzten vier Monate der Projektdauer wurde die Stelle von Dr. H. Bugmann durch Dr. F. Badeck übernommen. Aus PIK-Mitteln wurde die Mitarbeit von weiteren Wissenschaftlern finanziert: Dr. W. Cramer, Dipl. Geoökologe M. Erhard, Dr. R. Grote, Dipl. Mathematikerin P. Lasch und Dr. F. Suckow. Die Dissertation von M. Lindner wurde zu großen Teilen im Zusammenhang mit diesen Projektarbeiten realisiert. Im letzten Projektjahr wurde eine weitere Dissertation im Zusammenhang der Projektarbeiten begonnen. Dipl. Systemwissenschaftler J. Schaber wird aus Landesmitteln finanziert.

14) Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Viele Studien haben gezeigt, daß Gap-Modelle (Botkin, Janak et al. 1972; Shugart & West 1977; Shugart 1984) in der Lage sind, an einem bestimmten Standort und unter Annahme eines konstanten Klimas die Dynamik der Artenzusammensetzung eines Waldökosystems realistisch zu simulieren (Shugart 1984; Botkin 1993). Zudem arbeiten diese Modelle auf einer zeitlichen und räumlichen Ebene, welche für die Klimafolgenforschung von unmittelbarem Interesse ist. Aus diesem Grund wurden die Modelle bereits früh angewendet, um auch die Auswirkungen von Klimaänderungen zu studieren (Solomon, West et al. 1981; Solomon 1986; Solomon & West 1987; Pastor & Post 1988; Overpeck, Rind et al. 1990; Kienast 1991). Allerdings wurden Gap-Modelle ursprünglich nicht für diesen Zweck entwickelt (Botkin, Janak et al. 1972), und die meisten dieser Modelle enthalten deshalb die implizite Annahme, daß das Klima konstant bleibt. Werden sie nun angewendet, um die Auswirkungen von Klimaänderungen zu untersuchen, so ist es leicht möglich, daß die Resultate in sich selber inkonsistent sind, wie z.B. von (Fischlin, Bugmann et al. 1995) gezeigt wurde.

Für europäische Verhältnisse lagen bereits einige Gap-Modelle vor, so z.B. FORECE (Kienast 1987), das vor allem für Wälder im Alpenraum entwickelt wurde, und FORSKA (Leemans & Prentice 1989), ein Modell für die borealen und laubabwerfenden Wälder Skandinaviens. Beide Modelle liefern plausible Resultate in den relativ humiden, kühlen Klimaten, für welche sie entwickelt wurden; es liegt nahe, diese Modelle auch in den trockeneren subkontinentalen Gebieten Mitteleuropas anzuwenden. Dies wurde bisher allerdings nicht gemacht.

Während der vergangenen Jahre wurden sowohl FORSKA wie auch FORECE eingehend untersucht und verbessert. Diese Anstrengungen haben zu einer neuen Version von FORSKA geführt (Prentice, Sykes et al. 1991; Prentice, Sykes et al. 1993); FORSKA-2 basiert auf kausaleren physiologischen Formulierungen bezüglich des Einflusses von Klimagrößen auf die Waldentwicklung; außerdem werden in FORSKA einige Aspekte der Baumgeometrie explizite modelliert, was besonders in borealen Wäldern wesentlich ist. Die Analyse von FORECE führte zur Formulierung eines neuen Modells, FORCLIM (Bugmann & Fischlin 1992; Bugmann &

Fischlin 1994; Bugmann 1994); spezielles Gewicht wurde darauf gelegt, daß FORCLIM entlang Klimagradienten, d.h. bei Klimaveränderungen konsistente und realistische Resultate liefert. FORCLIM enthält außerdem ein Untermodell für die Dynamik des organischen Kohlenstoffs und die Verfügbarkeit von anorganischem Stickstoff im Boden.

Alle drei Gap-Modelle (FORSKA, FORECE und FORCLIM) liefern plausible Resultate unter den klimatischen Bedingungen, für welche die Modelle entwickelt wurden. In einer Vorstudie für den vorliegenden Projektantrag wurden diese drei Modelle zur Simulation der Waldentwicklung im subkontinentalen Gebiet Mitteleuropas eingesetzt. Diese Simulationsstudien haben gezeigt, daß FORSKA, FORECE und FORCLIM völlig divergierende und unrealistische Artenzusammensetzungen produzieren, es sei denn, die Parameterwerte würden stark an die spezifischen Verhältnisse am Standort angepaßt; dann ist aber beispielsweise FORSKA nicht mehr in der Lage, die Waldentwicklung in Skandinavien zu simulieren. Ein wesentlicher Grund dafür scheint darin zu liegen, daß die Modelle Bodenfeuchtigkeit und Nährstoffverfügbarkeit unter warm-trockenen Verhältnissen nicht adäquat wiederzugeben vermögen. Deshalb ist es von grundsätzlicher ökologischer Bedeutung, den Gültigkeitsbereich dieser Modelle auf die trockeneren Gebiete Europas auszudehnen.

15) Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Zur Beschaffung von Validierungsdaten (Dauerbeobachtungsflächen) wurde mit dem Lehrstuhl für Waldwachstumskunde, Prof. Dr. Hans Pretzsch, an der Forstwissenschaftlichen Fakultät in Freising sowie Forschern des Finnish Forest Research Institute, Dr. R. Sievänen, Helsinki, Finnland und der Faculty of Agriculture and Forestry, Dr. A. Mäkelä, University of Helsinki, Finland zusammengearbeitet. Die Daten zu Klima und Bodeneigenschaften sind aus den am PIK vorhandenen Datenbanken entnommen worden.

Zur Entwicklung von Validierungsverfahren wurde mit den schon erwähnten finnischen Kollegen R. Sievänen und A. Mäkelä kooperiert. Auch die Entwicklung einer dichteabhängigen Höhenwachstumsfunktion wurde in Zusammenarbeit mit diesen finnischen Kollegen realisiert.

Validierungsexperimente außerhalb Europas wurden in Zusammenarbeit mit Dr. Solomon, United States Environmental Protection Agency, Western Ecology Division, Corvallis, Oregon, durchgeführt.

Daten zu gemessenen Austauschflüssen von CO₂ und H₂O die zur Validierung der saisonalen Simulation der Flüsse durch das Modell 4C verwendet werden, wurden uns freundlicherweise von Dr. Bernreuther und Dr. Grünewald, Tharandt zur Verfügung gestellt.

Wir danken Dr. F. Mohren, Institute for Forestry and Urban Ecology, Wageningen, Niederlande sowie Dr. M. Sykes und Dr. C. Prentice University of Lund, Schweden für viele fruchtbare Diskussionen über Stand und Perspektiven der Waldsukzessionsmodellierung.

Gemeinsame Publikationen, die aus dem Projekt hervorgegangen sind:

Lindner, Sievänen et al. (1997).

Mäkelä, Sievänen et al. (in press),

Sievänen, Lindner et al. (in press),

Bugmann and Solomon (1999)

II) Ergebnisse

Die Projektarbeiten wurden weitestgehend wie vorgesehen durchgeführt. Studien zum Modellverhalten der Modelle FORSKA und FORCLIM wurden realisiert und sind zum überwiegenden Teil veröffentlicht oder zur Veröffentlichung angenommen (siehe die folgenden Abschnitte). Dabei wurden zum einen Weiterentwicklungen bezüglich Bodenwassermodellierung, Berücksichtigung des Grundwasserabstandes, Nährstoffabhängigkeit, Allometrie des Wachstums von Bäumen verschiedener sozialer Stellung und Abbildung forstwirtschaftlicher Eingriffe vorgenommen, zum anderen flossen die dabei gewonnenen Erkenntnisse in die Entwicklung des Konzeptes eines neuen Sukzessionsmodelles, 4C, ein. Dieses neue Modell ist zu Projektende für drei Arten parametrisiert, also noch nicht als klassisches Gap-Modell anwendbar. Zum Stand der Modellentwicklung im Detail siehe Abschnitt II.7

II1) Untersuchung des Modellverhaltens von FORSKA und FORCLIM entlang von Klimagradienten und daraus abgeleitete Modellmodifikationen

Basierend auf der Arbeit von (Bugmann 1994) wurden Teststandorte entlang eines Transekts im Klimaraum definiert, der von der kalten (alpinen) bis zur trockenen (kontinentalen) Waldgrenze reicht und die subkontinentalen Gebiete Ostdeutschlands einschließt (siehe Bugmann & Cramer 1998). Dieser Transekt wurde ergänzt durch das Testgebiet Brandenburg, in welchem – wie oben beschrieben – die flächenhafte Anwendbarkeit von Sukzessionsmodellen überprüft wurde. Das Verhalten des Modells FORCLIM wurde entlang des europäischen Klimagradienten untersucht. Es zeigte sich, daß das verwendete Untermodell (basierend auf dem in Gap-Modellen oft verwendeten Modell von Thorntwaite und Mather) für den Bodenwasserhaushalt nicht in der Lage ist, entlang

Trockenheitsgradienten plausible Resultate zu liefern. Deshalb wurde ein einfaches alternatives Untermodell formuliert ('simple bucket', Wasserbilanzmodell unter Einschluß eines einfachen Interzeptionsmodells), das keinen wesentlich größeren Datenbedarf aufweist, aber verbesserte Eigenschaften hat. Mit diesem Modell war es möglich, realistische Baumartenzusammensetzungen entlang dem gesamten Gradienten zu simulieren (Bugmann & Cramer 1998). Die Ergebnisse zeigen die Notwendigkeit zumindest einer einfachen Modellmodifikation, aber auch eine große Sensitivität der Resultate zu Artenzusammensetzung gegenüber der Parametrisierung der Trockenheitstoleranz. Es wurde auf die Notwendigkeit verwiesen zu einer Charakterisierung der Trockenheitstoleranz zu kommen, die auf physiologischen Experimenten beruht und darüber hinaus das Bodenwassermodell unabhängigen Tests zu unterwerfen, wozu lange Zeitreihen von Bodenwassermessungen entlang klimatischer Gradienten benötigt werden.

In einem weiteren Schritt wurde im Rahmen einer Zusammenarbeit mit der Environmental Protection Agency, Corvallis, Oregon (USA) das Sukzessionsmodell FORCLIM entlang einem Transekt im pazifischen Nordwesten der USA (PNW) angewendet und vor allem im Hinblick auf die Abbildung von Trockenheitseffekten weiter verbessert. Der PNW zeichnet sich durch ein gemäßigtes Klima aus, das sich aber in seiner Saisonalität sehr stark vom Klima in Europa und in den östlichen USA unterscheidet. Das PNW-Klima ist charakterisiert durch relativ warme Winter, eine sehr hohe jährliche Niederschlagssumme (bis 3000 mm) und trotzdem 3-4 Monate im Sommer, in denen fast kein Niederschlag fällt. Diese klimatischen Bedingungen führen dazu, daß Koniferen gegenüber Laubbäumen einen Konkurrenzvorteil haben, sehr gutes Wachstum zeigen und hohe Biomassenvorräte erreichen. Verschiedene ökologisch motivierte Modellmodifikationen waren notwendig, damit das Modell sowohl im PNW als auch im östlichen Nordamerika und in Mitteleuropa realistische Resultate ergab (Bugmann 1996, EPA-Report). Diese Arbeiten wurden von der Zeitschrift *Ecological Applications* zur Publikation akzeptiert (Bugmann & Solomon 1999).

Ein regional wichtiger Standortsfaktor ist der Grundwasserflurabstand. In Brandenburg z.B. liegen über 20% der Fläche in Niederungen und Flußtälern mit natürlicher Weise hoch anstehendem Grundwasser. Auf solchen Standorten können Arten dominieren, die Staunässe tolerieren aber ansonsten unter den gegebenen klimatischen Bedingungen nicht konkurrenzfähig sind gegenüber Klimaxbaumarten der grundwasserfernen Standorte. Es wurde in Anlehnung an eine Funktion des Modells JABOWA II (Botkin 1993) eine einfache Wirkungsfunktion entwickelt, die Wachstumsreduktion bei sensitiven Arten in Abhängigkeit

vom mittleren Grundwasserabstand berechnet (Lasch, Lindner et al. in press) und in FORSKA und FORCLIM implementiert.

II2) Nährstofflimitierung

Die Untersuchungen konzentrierten sich hier auf das Modell FORSKA, das in der bisherigen Version keine Funktion enthielt, welche erlaubt hätte, den Einfluß verschiedener Nährstoffangebote auf die Walddynamik zu simulieren. Aus diesem Grund wurde aufgrund einer Literatur-Analyse eine auf Aber et al. (1979) basierende, aber entscheidend modifizierte Funktion entwickelt, welche die Verfügbarkeit von Stickstoff (gemessen als Mineralisierungsrate in $\text{kg N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{Jahr}^{-1}$) in eine Wachstumsreaktion umsetzt (gemessen in Form eines wachstumsreduzierenden Faktors mit dem Wertebereich [0...1]). Es wurden fünf funktionale Reaktionstypen unterschieden, und dementsprechend mußten die im Modell betrachteten Baumarten jeweils einem Typ zugeordnet werden. Dies geschah aufgrund ökologischer und waldbaulicher Literatur, vornehmlich (Ellenberg 1986) und (Dengler, Röhrig et al. 1992). Diese Funktion wurde mit zufriedenstellendem Ergebnis ins Modell FORSKA eingefügt. Erste Simulationsstudien mit der neuen Funktion im Modell FORCLIM zeigten, daß sie der ursprünglichen Formulierung von (Aber, Botkin et al. 1979) überlegen war. Sie wurde deshalb auch im Modell FORCLIM übernommen. Für Rechnungen an Standorten, an denen keine Messungen der Mineralisierungsrate vorliegen, wurden Pedotransferfunktionen hergeleitet, die es erlauben, die Mineralisierungsrate aus den Informationen der Bodenkarten (BÜK 1000) der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (Außenstelle Berlin) herzuleiten. Aufbauend auf den Arbeiten von (Kopp & Schwanecke 1994; Ellenberg 1977; Heinsdorf & Tölle 1991; Zöttl 1960) wurden den Bodentypen Standortsnährkraftstufen und durchschnittliche Mineralisierungsraten zugewiesen. (Lindner, Bugmann et al. 1997)

Die Daten werden für Pilotstudien genutzt, um die flächenhafte Anwendbarkeit von Sukzessionsmodellen zu überprüfen und Schwächen aufzudecken, bevor großmaßstäbliche Simulationsexperimente in Mitteleuropa angegangen werden. Dieses Vorgehen ist deshalb von besonderem Interesse, weil abgeklärt werden muß, ob die Modelle in der Lage sind, kleinräumliche Unterschiede der Standortparameter (wie z.B. unterschiedliche Nährstoffverfügbarkeit) adäquat abzubilden, oder ob sie bloß die großräumigen, klimatisch bedingten Gradienten in der Vegetation wiedergeben können (Lindner, Bugmann et al. 1997).

II3) Dichteabhängiges Höhenwachstum

Durchforstungen und Einzelbaumverluste durch natürliche Störungen beeinflussen die Bestandesstruktur und die Wachstumsbedingungen für die verbleibenden Bäume. In den bisherigen Modellansätzen wirkten sich solche Strukturänderungen lediglich über eine Änderung der Ressourcenverfügbarkeit (insbesondere von Licht) auf das Produktionspotential der verbliebenen Bäume aus. Das Wachstum der Bäume erfolgte aber nach dem gleichen Allokationsschema wie zuvor, unabhängig von der Änderung der Bestandesstruktur. Es ist in der Waldwachstumskunde aber bekannt, daß Einzelbäume ihr Höhen- und Dickenwachstum relativ stark modifizieren können in Abhängigkeit von der Bestandesdichte. Bei großer Dichte wird das Höhenwachstum stärker gefördert, um im Konkurrenzkampf eine bestmögliche Position zu erhalten (möglichst nahe am Licht). Auf eine Freistellung (z. B. nach Durchforstung) reagieren Einzelbäume mit einer Förderung des Dickenwachstums, um die Einzelbaumstabilität zu erhöhen und einen möglichst großen Wachstumsraum im Bestand mit der Krone auszufüllen. Sensitivitätsuntersuchungen mit dem Modell FORSKA hatten gezeigt, daß bei geringer Bestandesdichte das Einzelbaumwachstum das Höhenwachstum stark überschätzt wurde (Lasch & Lindner 1995).

In Kooperation mit Risto Sievänen von der Finnischen Forstlichen Versuchsanstalt in Helsinki wurden verschiedene dichteabhängige Wachstumsfunktionen entworfen und mit Daten der 120 Jahre lang beobachteten Buchenversuchsflächen in Fabrikschleichach (siehe Abschnitt zu Validierungsverfahren, II.6) getestet. Während das originale FORSKA-Modell immer gleichbleibende Höhen-Durchmesser-Beziehungen der Einzelbäume simuliert, werden auf der Versuchsfläche die Bestandeshöhenkurven mit dem Alter immer flacher. Dies ist dadurch zu erklären, daß schwächere Einzelbäume mehr Ressourcen in das Höhenwachstum investieren und daher wesentlich größere H/D Quotienten aufweisen. Diese Anpassungsreaktion der unter Konkurrenzstreß stehenden schwächeren Bäume kann mit der Wachstumsfunktion in dem originalen FORSKA-Modell nicht abgebildet werden. Dadurch werden auch die simulierten Bestandesstrukturen mit zunehmender Simulationsdauer immer unrealistischer. Durch die Verwendung einer dichteabhängigen Wachstumsfunktion werden die simulierten Bestandeshöhenkurven deutlich realistischer, und auch die Durchmesserverteilungen stimmen besser mit den Beobachtungswerten überein. Es konnte in diesen ersten Simulationsstudien mit modifizierten Wachstumsfunktionen gezeigt werden, daß wesentlich realistischere Wachstumsreaktionen nach Durchforstungseingriffen simuliert werden können als zuvor. Dies ist eine wichtige Voraussetzung für die Modellierung der Bewirtschaftung und der den Einzelbaum treffenden natürlichen Störungen.

Die hier kurz zusammengefaßten Simulationsstudien sind in (Lindner, Sievänen et al. 1997) veröffentlicht. Die gewonnenen Erkenntnisse sind auch in die Wachstumsalgorithmen von 4C integriert worden.

II4) Modellierung von Wirtschaftswäldern, Bewirtschaftungsroutinen

Im Wirtschaftswald wird die Zusammensetzung des Kollektivs aus Individuen in verschiedenen Höhen- und Durchmesserklassen durch Durchforstungsmaßnahmen beeinflusst. Die Anwendung von Gap-Modellansätzen auf Wirtschaftswälder setzt deshalb die Bereitstellung von Modulen zur Simulation von Durchforstungsmaßnahmen voraus. Für das Modell FORSKA wurde ein solches Modul aufbauend auf den Arbeiten von (Gerold 1990; Gerold 1991; Wenk & Gerold 1996) entwickelt (siehe Dissertation Lindner, veröffentlicht als PIK-Report: Lindner 1998; Lindner 1999; Lindner & Lasch 1999; Lindner 1999; Lindner in press). Die Routinen wurden mit Daten von Dauerbeobachtungsflächen, auf denen unterschiedliche Durchforstungsstrategien angewendet wurden, für Buche, Fichte und Eiche mit zufriedenstellenden Ergebnissen getestet (Lindner 1998).

Im Gegensatz zur Berechnung der Regenerationsdynamik in natürlichen Wäldern, die in der Generierung von Bäumen/Kohorten verschiedener Arten und Baumdimensionen durch die Etablierungsmodule resultiert, muß bei der Simulation von konkreten Beständen im Wirtschaftswald eine gegebene Bestandesstruktur als Ausgangspunkt der Simulation berücksichtigt werden können. Es wurden deshalb Routinen entwickelt, die für das Modell FORSKA die Initialisierungsvariablen aus Inventurdaten errechnen. Da in vielen Fällen nicht der volle Satz an Informationen vorliegt, der zu einer eindeutigen Definition der Bestandesstruktur vonnöten ist, wurden auch Module entwickelt, die es erlauben, die fehlenden Daten zu abzuschätzen. Dazu wurde auf den Arbeiten von (Gerold 1990) und (Nagel 1996) aufgebaut (siehe Lindner 1998).

Die Initialisierungsroutinen für Wirtschaftswälder wurden im Berichtszeitraum für das neue Sukzessionsmodell 4C angepaßt. Die Arbeiten zur Übertragung der Bewirtschaftungsroutinen werden noch nach Projektende abgeschlossen werden.

II5) Regionale flächenhafte Anwendung – die Brandenburg-Studie

Die Modelle FORSKA und FORCLIM (V2.9) wurden angewendet, um die natürliche Artenzusammensetzung im Land Brandenburg unter heutigem Klima und unter einer Reihe von Klimaänderungsszenarien zu berechnen. Die Bereitstellung der von den Modellen benötigten Eingangsdaten und auch für die Darstellung der Ergebnisse wurde mit Hilfe des Geografischen Informationssystems (ARC/INFO) realisiert. Die Klimaszenarien wurden mit

Hilfe von im Institut entwickelten Verfahren zum Generieren von Klimaänderungsszenarien (Gerstengarbe & Werner 1995) erstellt.

Die Resultate zeigen, daß die beiden Modelle in den Details unterschiedliche Artenzusammensetzungen simulieren; insbesondere tendiert FORSKA dazu, Reinbestände resp. Bestände, die nur aus sehr wenigen Arten bestehen, vorherzusagen, während FORCLIM fast nie Reinbestände ergibt, sondern eher zu artenreiche Mischbestände simuliert. Es gibt in Brandenburg eine wichtige Verbreitungsgrenze der Buche: Sie verläuft von Südwesten nach Nordosten und trennt die kontinentalen, größtenteils buchenfreien Gebiete im Südosten des Landes von den Buchenwäldern im Nordwesten. Weil FORSKA die interannuelle Variabilität des Wetters nicht berücksichtigt, ist dieses Modell nicht in der Lage, die Verbreitungsgrenze der Buche in Brandenburg korrekt zu simulieren, was dem Modell FORCLIM besser gelingt, obwohl auch dieses Modell im Süden des Landes zu hohe Anteile an Buche simuliert.

Unter Klimaänderungsszenarien zeigt sich, daß die beiden Modelle gleichgerichtete Verschiebungen der Verbreitungsgrenzen der Arten und auch ähnliche Vegetationstypen simulieren. Nach diesen Modellrechnungen ist damit zu rechnen, dass bei einem leichten Rückgang des Niederschlags, insbesondere, wenn dieser mit einer geringen Erhöhung der Mitteltemperatur verbunden ist, die Buche aus Brandenburg verdrängt werden könnte. Andererseits können auch unter den extremsten der untersuchten Szenarien immer noch einige der heute in Brandenburg vorhandenen Baumarten wachsen; allerdings würde sich das Bild der Wälder u.U. stark verändern. Aufgrund der in der Richtung und Grössenordnung übereinstimmenden Resultate der beiden Gap-Modelle sind wir zuversichtlich, daß die Modelle robuste Aussagen bezüglich der Wirkungen von Klimaänderungen auf Vegetation abzugeben vermögen.

Die Resultate der Studien sind veröffentlicht in (Bugmann, Grote et al. 1996), (Lindner, Bugmann et al. 1997), (Lindner, Bugmann et al. 1997)

II6) Validierungsverfahren

Für die Entwicklung wie auch für die Überprüfung des vegetationsdynamischen Modells werden unabhängige Daten benötigt. Die folgenden Daten wurden beschafft und technisch so aufbereitet, dass sie für die Modellierungsarbeiten verwendet werden können: a) Daten aus Langzeitbeobachtungsflächen, b) flächenhafte Daten für das Land Brandenburg, c) Daten aus dem EUROFLUX - Flußmeßnetz.

Zu a) Daten aus Langzeit-Beobachtungsflächen (1870-1990) des Lehrstuhls für Waldertragskunde der Universität München, Freising. Diese Daten werden zur Weiterentwicklung (Kalibrierung) der Sukzessionsmodelle sowie im Zusammenhang der

Entwicklung neuer Validierungsverfahren genutzt. Die letztgenannte Forschungsaktivität wurde in Zusammenarbeit mit finnischen Partnern durchgeführt. Zusatzmittel für Reisekosten wurden vom DAAD bereitgestellt. (Reisemittel DAAD) Die Ergebnisse dieser Arbeiten sind zur Publikation in der Zeitschrift *Tree Physiology* eingereicht. Das Verfahren wird von (Sievänen, Lindner et al. in press) dargestellt, eine Anwendung zum Test des neuen Sukzessionsmodells 4C findet sich in (Mäkelä, Sievänen et al. in press). Die letztgenannte Forschungsaktivität wurde in Zusammenarbeit mit finnischen Partnern durchgeführt. Zusatzmittel für Reisekosten wurden vom DAAD bereitgestellt. (Reisemittel DAAD) Die Kooperation mit den finnischen Partnern beinhaltet auch die Bereitstellung von Daten zu finnischen Langzeitbeobachtungsflächen, die im Projekt genutzt werden konnten (Mäkelä, Sievänen et al. in press; Schaber, Badeck et al. 1999).

Zu b) Flächenhafte Daten im 10x10 km-Raster für das Bundesland Brandenburg über Klima, Wasser- und Nährstoffverfügbarkeit. Die Klimadaten auf diesem Raster basieren auf der neusten Version der CLIMATE-Datenbank (Leemans & Cramer 1991), während die bodengebundenen Daten aus einer digital vorliegenden Bodenkarte der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (Außenstelle Berlin) mittels einfacher Pedotransferfunktionen hergeleitet wurden. Die Daten werden für Pilotstudien genutzt, um die flächenhafte Anwendbarkeit von Sukzessionsmodellen zu überprüfen und Schwächen aufzudecken, bevor großmaßstäbliche Simulationsexperimente in Mitteleuropa angegangen werden.

Zu c) Im Zusammenhang mit der Beteiligung der Abteilung natürliche Systeme des PIK an dem europäischen Forschungsprojekt LTEEF wurden uns Daten zu den mit der Eddy-Kovarianzmethode gemessenen Wasser- und CO₂-Flüsse zur Verfügung gestellt, die zur Validierung des Modells 4C verwendet werden können. Erste Rechnungen wurden zur Simulation der Austauschflüsse eines Fichtenbestands in Tharandt durchgeführt. Die Saisonalität der Austauschflüsse wird befriedigend wiedergegeben. Detailliertere Analysen stehen noch aus.

II7) Entwicklung des neuen Modells 4C

Parallel zu den Modifikationen, die an den Modellen FORSKA und FORCLIM vorgenommen wurden, wurde das Konzept für ein neues Sukzessionsmodell entwickelt. Eine erste Version dieses Konzepts (s.a. Abb. 1) wurde auf einer internationalen Tagung in Wageningen (Niederlande) Ende 1996 vorgestellt (Bugmann, Grote et al. 1997) zusammen mit einer ersten Anwendung auf das Wachstum einzelner Bäume. Ziel ist ein Modell mittlerer Komplexität, das prozeßnahe Beschreibung der Klimasensitivität bei Minimierung des Datenbedarfs zur

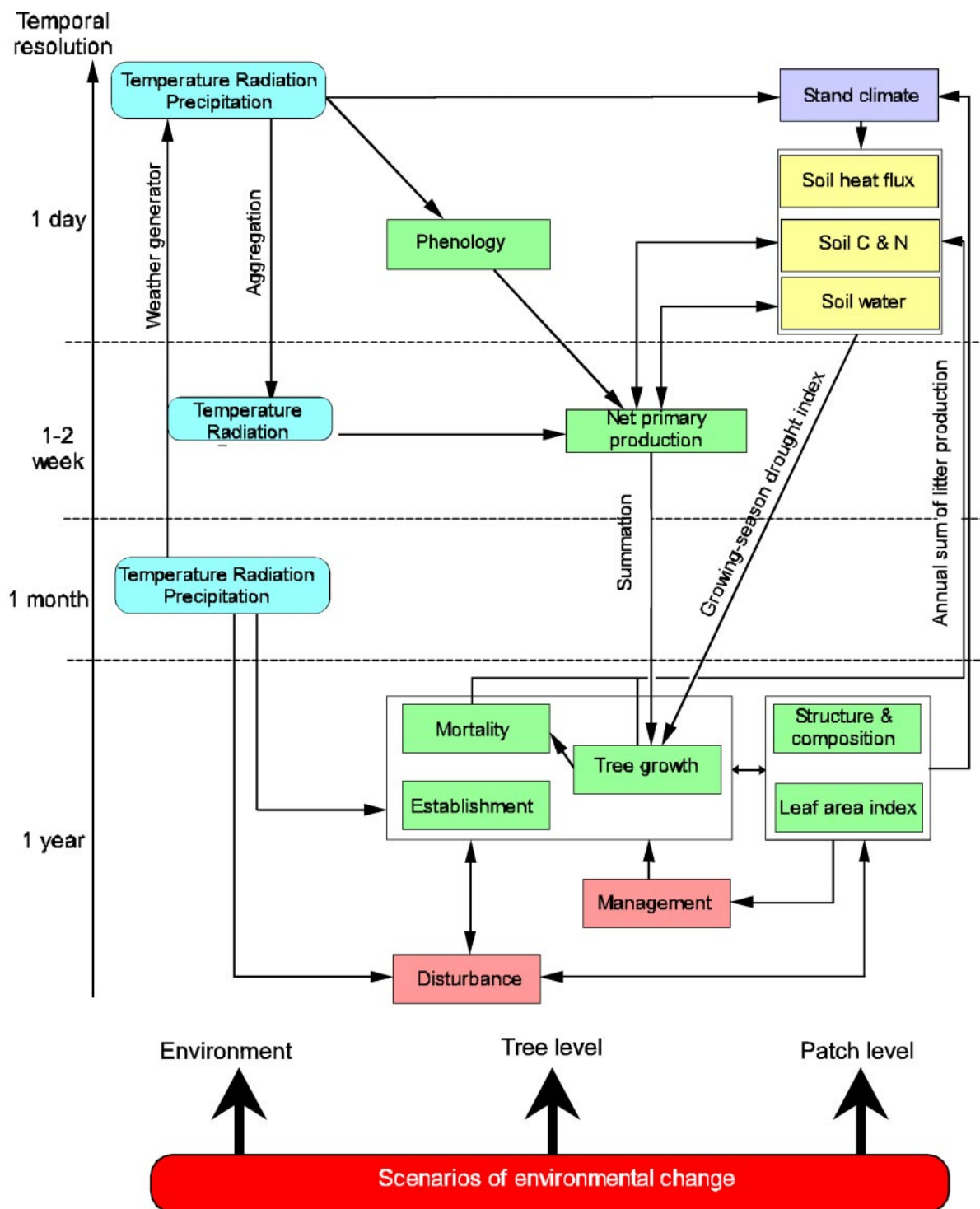


Abb. 1 Strukturschema des Modells 4C

Parametrisierung und des Rechenzeitaufwandes realisieren soll. Dazu wird die photosynthetische Produktion in einem eigenen Modul berechnet und der Zuwachs verschiedener Baumorgane durch eine davon getrennte Routine bestimmt, welche die Allokation der zum Wachstum zur Verfügung stehenden Assimilate nach einem Satz von Regeln zu funktionellen Abhängigkeiten zwischen den Organen bestimmt. Für die

photosynthetische Produktion kann somit auf die Tradition der Modelle zur Beschreibung des Bestandesgasaustausches zurückgegriffen werden. Das Allokationsmodul baut auf drei Komponenten auf: (1) auf der sogenannten 'pipe model theory', (2) auf der Theorie über das funktionelle Gleichgewicht zwischen Feinwurzeln und Blattwerk (functional balance), und (3) auf einigen allometrischen Überlegungen zum Wachstum unter verschiedener Ressourcenlimitierung. Ein detailliertes Bodenmodell, das am PIK im Zusammenhang eines Projektes zu den Effekten von Immissionsbelastung in Kiefernwäldern entwickelt worden war (Grote and Suckow 1998), wurde integriert. Es berechnet Wärme- und Bodenwasserflüsse sowie die Mineralisierung der organischen Substanz. Die Kopplungsstellen zum Pflanzenmodell sind durch die Streuproduktion und den Einfluß von Nährstoff- und Wasserverfügbarkeit auf das Produktionspotential gegeben. Ein weiteres Modul baut auf den in der Literatur beschriebenen Modellen zur Simulation der Blatt-Phänologie auf (Blattaustrieb und -fall).

Die Arbeiten zur Initialisierung der Bestandesstruktur auf Basis von Waldinventurdaten, die für das Modell FORSKA durchgeführt worden sind, wurden auf 4C übertragen. Die Übertragung der Durchforstungsroutinen wurde nach Ende der Projektdauer begonnen und steht kurz vor dem Abschluß. Im Jahr 1997 war das neue Modell auf die Beschreibung der Bestandesdynamik von Reinbestände in einer ersten testreifen Variante anwendbar. Ergebnisse zu den Tests, die mit Hilfe der unter II.6 beschriebenen Validierungsdaten durchgeführt wurden sind zur Publikation in Tree Physiology akzeptiert. (Mäkelä, Sievänen et al. in press). Sie wurden auf einem Workshop der IUFRO vorgestellt.

Das Ergebnis dieser und weiterer Entwicklungs- und Testvorhaben kann dahingehend zusammengefaßt werden, daß in der Modellierung des Höhenwachstums und der Kronendimensionen noch konzeptioneller Entwicklungsbedarf besteht. Auch die Tests von ersten Ansätzen zur Beschreibung der Position von unterständigen Bäumen im Vergleich zu herrschenden Bäumen in der Konkurrenz um die Ressource Licht haben weitergehenden Entwicklungsbedarf zur Repräsentation der Variabilität der Ressourcenverfügbarkeit im Rahmen eines horizontal homogenen Modells aufgezeigt. Die diesbezüglichen Arbeiten werden nach Projektende weitergeführt. Wegen der Notwendigkeit in der Beschreibung von Wachstum und Lichtkonkurrenz in die Tiefe zu gehen, mußte die Entwicklung der Routinen zur Regeneration und altersbedingten Sterblichkeit zurückgestellt werden. Nach Ende des Projekts wird zur Zeit das Regenerationsmodul entwickelt.

Eine zusammenfassende Darstellung des Modellierungsansatzes von 4C und die Illustration einiger Ergebnisse, die mit dem Modell erzielt werden können, wenn es in der gegenwärtigen Ausbaustufe auf die Wachstumsdynamik von Wirtschaftswäldern angewendet wird, wurden

bei einer Tagung des deutschen Verbands forstlicher Versuchsanstalten - Sektion forstliche Biometrie und Informatik vorgestellt (Schaber, Badeck et al. 1999).

Mit Bezug auf das Projektziel der Erarbeitung eines allgemeingültigen Modells der Wirkungen von Klimaänderungen auf die Waldvegetation kann zusammenfassend festgehalten werden: Ein Modellkonzept, das die Integration von wesentlichen Wechselwirkungen zwischen Klimaelementen und Baumindividuen erlaubt, konnte entwickelt werden. Bis zum Projektende wurden ein überwiegender Teil der vorgesehenen Module in einer ersten Version erarbeitet. Das Modell kann zur Zeit zur Simulation von Wirtschaftswäldern genutzt werden und ist für drei Arten parametrisiert. Intensive Tests des Modellverhaltens sind im Gange. Die noch fehlenden Module zur Regeneration und altersbedingten Sterblichkeit in natürlichen oder naturnahen Wäldern werden nach Projektende entwickelt, wie auch die für FORSKA entwickelten Bewirtschaftungsroutinen übertragen werden.

Die programmtechnische Realisierung von 4C wurde von Frau Dipl. Math. B. Ebert aufbauend auf den Modulen zu den Einzelprozessen umgesetzt. Das Modell kann sowohl menuegesteuert in einer Grafikversion als auch über Eingabesteuerdateien oder Kommandozeileingaben bedient werden und läuft unter UNIX. Mehrfach-Simulationsläufe mit unterschiedlichen Eingabedaten oder variierenden Parametern können ohne weiteren Programmierungsaufwand realisiert werden (s.a. Abb. 2). Damit können Simulationen auf mehreren Standorten, Läufe zur Parametersensitivität und zur Sensitivität gegenüber den Initialisierungswerten durchgeführt werden.

Weitergehender Forschungsbedarf besteht mit Bezug auf die Parametrisierung und Detaillierung der Klimawirkungsfunktionen, sowie zur Repräsentation des Wachstums unter Limitation durch unterschiedliche Ressourcen. Eine Kopplung des Waldmodells mit hydrologischen Modellen ist in Arbeit.

III) Literaturliste

- Aber, J. D., D. B. Botkin, et al. (1979). "Predicting the effects of different harvesting regimes on productivity and yield in northern hardwoods." Canadian Journal of Forest Research **9**: 10-14.
- Botkin, D. (1993). Forest Dynamics: An Ecological Model. Oxford & New York, Oxford University Press.
- Botkin, D. B., J. Janak, et al. (1972). "Some ecological consequences of a computer model of forest growth." J. Ecol. **60**: 849-872.

- Bugmann, H. (1994). On the ecology of mountainous forests in a changing climate: A simulation study, ETH Zürich, Switzerland.
- Bugmann, H. (1996). A forest stand model in the mountains of Oregon: Development and computer code. Report to the U.S. Environmental Protection Agency, Corvallis, Oregon, Potsdam Institute for Climate Impact Research, Potsdam, Germany: 24.
- Bugmann, H. and W. Cramer (1998). "Improving the behaviour of forest gap models along drought gradients." Forest Ecology & Management **103**(2-3): 247-263.
- Bugmann, H. and A. Fischlin (1992). Ecological processes in forest gap models - analysis and improvement. Responses of forest ecosystems to environmental changes. A. Teller, P. Mathy and J. N. R. Jeffers. London, Elsevier: 953-954.
- Bugmann, H. and A. Fischlin (1994). Comparing the behaviour of mountainous forest succession models in a changing climate. Mountainous environments in changing climate. M. Beniston. London, Routledge: 204-219.
- Bugmann, H., R. Grote, et al. (1996). Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Wälder in Brandenburg. Mögliche Auswirkungen von Klimaänderungen auf das Land Brandenburg - Pilotstudie. M. Stock and F. Toth. Potsdam, Potsdam Institut für Klimafolgenforschung: 56-79.
- Bugmann, H., R. Grote, et al. (1997). A new forest gap model to study the effects of environmental change on forest structure and functioning. Impacts of Global Change on Tree Physiology and Forest Ecosystems. G. M. J. Mohren, K. Kramer and S. Sabaté. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers. **52**: 255-261.
- Bugmann, H. and A. M. Solomon (1999). "Explaining forest composition and biomass across multiple biogeographical regions." Ecol. Applications **9**: in press.
- Dengler, A., E. Röhrig, et al. (1992). Waldbau auf ökologischer Grundlage: I. Der Wald als Vegetationsform und seine Bedeutung für den Menschen. Hamburg, Parey.
- Ellenberg, H. (1977). "Stickstoff als Standortsfaktor, insbesondere für mitteleuropäische Pflanzengesellschaften." Oecol. Plant. **12**: 1-22.
- Ellenberg, H. (1986). Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen in ökologischer Sicht. Stuttgart, Ulmer Verlag.
- Fischlin, A., H. Bugmann, et al. (1995). "Sensitivity of a forest ecosystem model to climate parametrization schemes." Env. Pollution **87**: 267-282.
- Gerold, D. (1990). Modellierung des Wachstums von Waldbeständen auf der Basis der Durchmesserstruktur. Fakultät für Bau-, Wasser- und Forstwesen. Dresden, Technische Universität Dresden: 174.

- Gerold, D. (1991). "Modellierung der Entwicklung von Waldbeständen auf der Basis der Durchmesserstruktur." Wiss. Z. Techn. Univers. Dresden **40**(5/6): 279-2?
- Gerstengarbe, F. W. and P. Werner (1995). Szenarien zur Klimaentwicklung im Land Brandenburg bis zum Jahr 2050. Mögliche Auswirkungen von Klimaänderungen auf das Land Brandenburg. Pilotstudie. M. Stock and F. Toth. Potsdam, Potsdam Institute for Climate Impact Research: (in prep).
- Grote, R. and F. Suckow (1998). "Integrating dynamic morphological properties into forest growth modelling. I. Effects on water balance and gas exchange." Forest Ecology and Management **112**: 101-119.
- Heinsdorf, D. and H. Tölle (1991). Bodennährstoffe und Ernährung der Kiefer im nordostdeutschen Tiefland. Berichte aus Forschung und Entwicklung, Forschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft Eberswalde: 20-35.
- Kienast, F. (1987). FORECE - a forest succession model for southern Central Europe, Oak Ridge Nat. Lab.
- Kienast, F. (1991). "Simulated effects of increasing atmospheric CO₂ and changing climate on the successional characteristics of Alpine forest ecosystems." Landscape Ecology **5**: 225-238.
- Kopp, D. and W. Schwanecke (1994). Standörtlich-naturräumliche Grundlagen ökologiegerechter Forstwirtschaft. Berlin, DLV.
- Lasch, P. and M. Lindner (1995). Wirkung von Klimaveränderungen auf Waldökosysteme. Abschlußbericht zum BMBF-Forschungsvorhaben DLR 01 LK 9109. PIK-Report, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung.
- Lasch, P., M. Lindner, et al. (in press). "Regional impact analysis of climate change on natural and managed forests in the Federal state of Brandenburg, Germany." Environmental Modelling and Assessment.
- Leemans, R. and W. P. Cramer (1991). The IIASA database for mean monthly values of temperature, precipitation, and cloudiness on a global terrestrial grid, IIASA.
- Leemans, R. and I. C. Prentice (1989). FORSKA, A General Forest Succession Model. Meddelanden från Växtbiologiska Institutionen, Uppsala Universitet, Department of Plant Ecology, Uppsala University, Uppsala, Sweden.
- Lindner, M. (1998). Wirkung von Klimaveränderungen in mitteleuropäischen Wirtschaftswäldern. Potsdam, Potsdam Institute for Climate Impact Research: 109.
- Lindner, M. (1999). "Klimaeinflüsse auf Wachstum, Produktivität und Verbreitung von Waldbäumen." AFZ/Der Wald **in press**.

- Lindner, M. (1999). "Waldbaustrategien im Kontext möglicher Klimaänderungen." Forstwissenschaftliches Centralblatt **118**(1): 1-13.
- Lindner, M. (in press). "Developing adaptive forest management strategies to cope with climatic change." Tree Physiology.
- Lindner, M., H. Bugmann, et al. (1997). "Regional impacts of climatic change on forests in the state of Brandenburg, Germany." Agriculture and Forest Meteorology **84**: 123-135.
- Lindner, M., H. Bugmann, et al. (1997). "Wie sind Ergebnisse der Klimawirkungsforschung zu interpretieren?" AFZ/ Der Wald **52**(11): 587-589.
- Lindner, M. and P. Lasch (1999). "Klimawirkungsstudien in Wirtschaftswäldern mit dem Modell FORSKA." AFZ/Der Wald **in press**.
- Lindner, M., P. Lasch, et al. (1996). "Application of a forest succession model to a continentality gradient through Central Europe." Climatic Change **34**: 191-199.
- Lindner, M., R. Sievänen, et al. (1997). "Improving the simulation of stand structure in a forest gap model." For. Ecol. Manage. **95**: 183-195.
- Mäkelä, A., R. Sievänen, et al. (in press). "Application of volume growth and survival graphs in the evaluation of four process-based forest growth models." Tree Physiology.
- Nagel, J. (1996). "Anwendungsprogramm zur Bestandesbewertung und zur Prognose der Bestandesentwicklung." Forst und Holz **51**: 76-78.
- Overpeck, J. T., D. Rind, et al. (1990). "Climate induced changes in forest disturbance and vegetation." Nature **343**: 51-53.
- Pastor, J. and W. M. Post (1988). "Response of northern forests to CO₂-induced climate change." Nature **334**: 55-58.
- Prentice, I. C., M. T. Sykes, et al. (1991). "The possible dynamic response of northern forests to greenhouse warming." Global Ecology and Biogeography Letters **1**: 129-135.
- Prentice, I. C., M. T. Sykes, et al. (1993). "A simulation model for the transient effects of climate change on forest landscapes." Ecol. Modelling **65**: 51-70.
- Schaber, J., F.-W. Badeck, et al. (1999). Ein Modell der Sukzessionsdynamik europäischer Wälder - Forest Ecosystems in a changing Environment (4C). Deutscher Verband forstlicher Versuchsanstalten - Sektion forstliche Biometrie und Informatik. 11. Jahrestagung: in press.
- Shugart, H. H. (1984). A Theory of Forest Dynamics. New York, Springer-Verlag.
- Shugart, H. H. and D. C. West (1977). "Development of an Appalachian deciduous forest succession model and its application to assessment of the impact of the chestnut blight." J. Env. Manage. **5**: 161-179.

- Sievänen, R., M. Lindner, et al. (in press). "Volume growth and survival graphs: A method for evaluating process-based forest growth models." Tree Physiology.
- Solomon, A. M. (1986). "Transient response to CO₂-induced climate change: simulation modeling experiments in eastern North America." Oecologia **68**: 567-579.
- Solomon, A. M. and D. C. West (1987). Simulating forest ecosystem responses to expected climate change in Eastern North America: application to decision making in the forest industry. The Greenhouse Effect, Climate Change, and U.S. Forests. W. E. Shands and J. S. Hoffman. Washington, The Conservation Foundation: 157-187.
- Solomon, A. M., D. C. West, et al. (1981). Simulating the role of climate change and species immigration on forest succession. Forest Succession. Concepts and application. D. C. West, H. H. Shugart and D. B. Botkin. New York, Heidelberg, Berlin, Springer-Verlag: 154-177.
- Waring, R. H. and W. H. Schlesinger (1985). Forest ecosystems. Concepts and management. Orlando, u.a., Academic Press.
- Wenk, G. and D. Gerold (1996). Dynamics of the diameter distribution. Conference on effects of environmental factors on tree and stand growth, Berggießhübel/Dresden, IUFRO S4.01.
- Zöttl, H. (1960). "Die Mineralstoffanlieferung in Fichten- und Kiefernbeständen Bayerns." Forstwiss. Centralblatt **79**: 221-236.

IV) Veröffentlichungen, die im Rahmen des Projektes entstanden sind:

- Bugmann, H. (1996). A forest stand model in the mountains of Oregon: Development and computer code. Report to the U.S. Environmental Protection Agency, Corvallis, Oregon, Potsdam Institute for Climate Impact Research, Potsdam, Germany: 24.
- Bugmann, H. and W. Cramer (1998). "Improving the behaviour of forest gap models along drought gradients." Forest Ecology & Management **103**(2-3): 247-263.
- Bugmann, H., R. Grote, et al. (1996). Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Wälder in Brandenburg. Mögliche Auswirkungen von Klimaänderungen auf das Land Brandenburg - Pilotstudie. M. Stock and F. Toth. Potsdam, Potsdam Institut für Klimafolgenforschung: 56-79.
- Bugmann, H., R. Grote, et al. (1997). A new forest gap model to study the effects of environmental change on forest structure and functioning. Impacts of Global Change on

- Tree Physiology and Forest Ecosystems. G. M. J. Mohren, K. Kramer and S. Sabaté. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers. **52**: 255-261.
- Bugmann, H. and A. M. Solomon (1999). "Explaining forest composition and biomass across multiple biogeographical regions." Ecol. Applications **9**: in press.
- Lasch, P., M. Lindner, et al. (in press). "Regional impact analysis of climate change on natural and managed forests in the Federal state of Brandenburg, Germany." Environmental Modelling and Assessment.
- Lindner, M. (1998). Wirkung von Klimaveränderungen in mitteleuropäischen Wirtschaftswäldern. Potsdam, Potsdam Institute for Climate Impact Research: 109.
- Lindner, M. (1999). "Klimaeinflüsse auf Wachstum, Produktivität und Verbreitung von Waldbäumen." AFZ/Der Wald **in press**.
- Lindner, M. (1999). "Waldbaustrategien im Kontext möglicher Klimaänderungen." Forstwissenschaftliches Centralblatt **118**(1): 1-13.
- Lindner, M. (in press). "Developing adaptive forest management strategies to cope with climatic change." Tree Physiology.
- Lindner, M., H. Bugmann, et al. (1997). "Regional impacts of climatic change on forests in the state of Brandenburg, Germany." Agriculture and Forest Meteorology **84**: 123-135.
- Lindner, M., H. Bugmann, et al. (1997). "Wie sind Ergebnisse der Klimawirkungsforschung zu interpretieren?" AFZ/ Der Wald **52**(11): 587-589.
- Lindner, M. and P. Lasch (1999). "Klimawirkungsstudien in Wirtschaftswäldern mit dem Modell FORSKA." AFZ/Der Wald **in press**.
- Lindner, M., R. Sievänen, et al. (1997). "Improving the simulation of stand structure in a forest gap model." For. Ecol. Manage. **95**: 183-195.
- Mäkelä, A., R. Sievänen, et al. (in press). "Application of volume growth and survival graphs in the evaluation of four process-based forest growth models." Tree Physiology.
- Schaber, J., F.-W. Badeck, et al. (1999). Ein Modell der Sukzessionsdynamik europäischer Wälder - Forest Ecosystems in a changing Environment (4C). Deutscher Verband forstlicher Versuchsanstalten - Sektion forstliche Biometrie und Informatik. **11. Jahrestagung**: in press.
- Sievänen, R., M. Lindner, et al. (in press). "Volume growth and survival graphs: A method for evaluating process-based forest growth models." Tree Physiology.