

# **Nutzung von Level-II-Beobachtungen für Tests und Anwendungen des Sukzessionsmodells FORESEE**

**F. Suckow, F.-W. Badeck, P. Lasch, J. Schaber**

Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e.V.,  
Postfach 601203, D-14412 Potsdam

## **Zusammenfassung**

Realitätsnahe Simulationen der Wachstumsdynamik von Waldökosystemen erfordern Modelle, die diese Dynamik in Abhängigkeit von Klima und Stoffeinträgen beschreiben. Es wird ein neues Sukzessionsmodell (4C, FORESEE, FORESt Ecosystems in a changing Environment) vorgestellt, das diesen Anforderungen gerecht werden soll. Mit einer ersten Ausbaustufe des Modells werden Simulationsrechnungen zu einem bewirtschafteten Kiefernwald durchgeführt. Die Relevanz der auf den Level II Flächen erhobenen Daten für Modelltests und -anwendungen werden an einigen Beispielen erläutert.

## **Einleitung**

Eingebettet in das von EU und UN gemeinsam getragene Programm "Forstliches Umweltmonitoring" ist es das Ziel des Level II Programms, den Zustand und die Entwicklung von Wäldern unter dem Einfluß von Luftverunreinigungen, klimatischen und anderen Streßfaktoren zu erforschen.

Die bei diesen Untersuchungen auf den Dauerbeobachtungsflächen erhobenen Daten können nach unterschiedlichen Gesichtspunkten ausgewertet werden. Eine Möglichkeit besteht darin, aus der Datenanalyse gewonnene Hypothesen durch entsprechende Modelluntersuchungen zu stützen. Ebenso können geeignete Modelle eingesetzt werden, um Wasser- und Stoffbilanzen auf den Beobachtungsflächen zu bestimmen oder unterschiedliche, das Wachstum beeinflussende Faktoren wie Standortbedingungen und Klima voneinander zu trennen. Darüber hinaus ist es möglich, mit Simulationsmodellen Studien der Dynamik des Waldwachstums und der Stabilität von Beständen unter verschiedenen Szenarien für Klima, Stoffeintrag oder Management durchzuführen.

Voraussetzung für solche Untersuchungen sind Modelle, welche die Wachstumsdynamik von Waldökosystemen in Abhängigkeit von Klima, Stoffeinträgen und Management beschreiben. Im folgenden wird das Sukzessionsmodell 4C (**FORESEE - FORESt Ecosystems in a changing Environment**) vorgestellt, das diese Anforderungen erfüllen soll. Zunächst werden die Teilmodelle zu Bodenwasser und Bodentemperatur anhand der Beobachtungsdaten an den sechs Level II Standorten in Brandenburg validiert. Anschließend werden Ergebnisse von Modellsimulationen zum Einfluss des Anstiegs des atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Gehaltes auf das Waldwachstum und für Klimaänderungsszenarien vorgestellt.

## **Methodik**

### *Grundlagen*

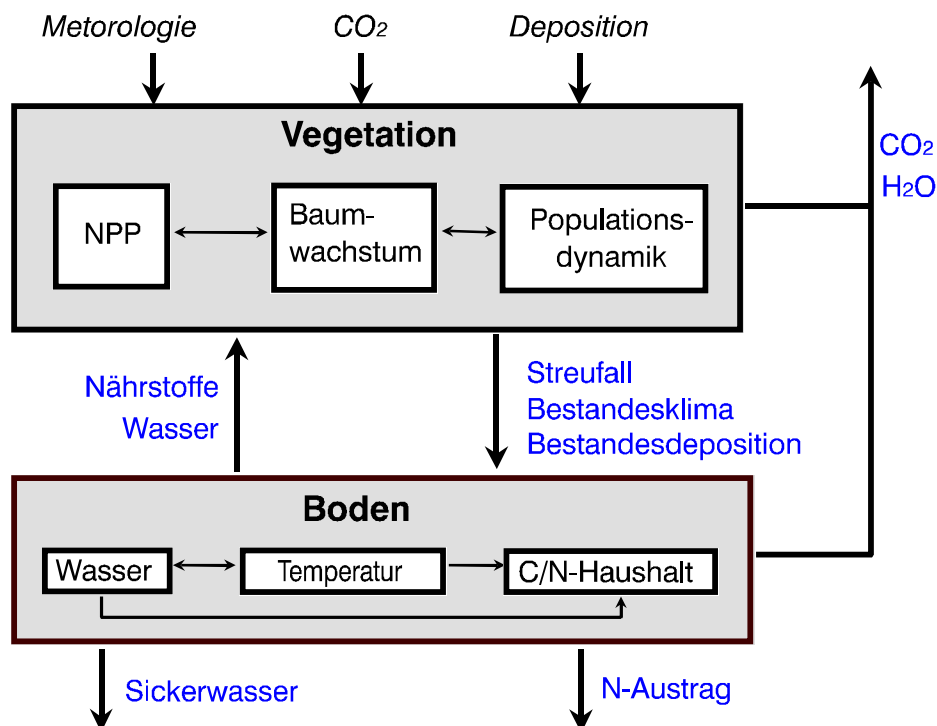
Das Simulationsmodell 4C beschreibt die Sukzessionsdynamik von Waldbeständen, die entweder auf Basis von simulierter natürlicher Regeneration oder ausgehend von einem durch eine Forstinventur definierten Anfangszustand aufwachsen (Schaber et al., 1999). Die Baumindividuen einer Art, die gleiches Alter und identische Baumdimensionen besitzen, sind

in Kohorten zusammengefaßt. Produktion und Wachstum werden für jede Kohorte berechnet. Die Konkurrenz der Kohorten um Licht, Wasser und Nährstoffe beeinflusst ihr Wachstum, ihre Mortalität und die Verjüngung im Bestand. Die Positionen der Individuen der Kohorten im Bestand ist nicht bekannt, es wird angenommen, daß die Bäume gleichmäßig auf der Patchfläche verteilt sind. Der Kronenraum des Bestandes ist in 0.5 m hohe Schichten eingeteilt.

### Wasser- und Nährstoffbilanzierung

Abbildung 1 beschreibt das prinzipielle Zusammenwirken der Teilmodelle zur Vegetations- und Bodendynamik in 4C.

Das Wasser- und Nährstoffangebot wird in Abhängigkeit von Boden, Bestand und Wetter bilanziert (Grote et al., 1999). Dazu wird der Wassergehalt des Bodens nach Abzug der Transpiration und der Bodenevaporation mit Hilfe eines Versickerungsmodells berechnet (Glugla, 1969; Koitzsch, 1977), auf dessen Grundlage dann die aktuelle Bodentemperatur bestimmt wird. Beide Größen steuern die Umsatzgeschwindigkeit der Streu und der organischen Bodensubstanz und damit die Nährstoffverfügbarkeit (Grote & Suckow, 1998; Kartschall et al., 1990; Moorhead et al., 1996). Durch die jährliche Bilanzierung des Streufalls und die Zufuhr zum Bodenkompartment wird der Nährstoffkreislauf im System Pflanze – Boden geschlossen. Zusätzlichen Eintrag erhält das System durch die Deposition, Verluste treten durch Auswaschung auf.



**Abbildung 1** Strukturdiagramm des Modells 4C

### Assimilation und Allokation

Die photosynthetische Nettoassimilationsleistung wird nach einem Ansatz von (Haxeltine & Prentice, 1996) als Funktion von absorbiertes photosynthetisch aktiver Strahlung,

Lufttemperatur sowie Bodenwasser- und Nährstoffverfügbarkeit berechnet. Die Produktion der einzelnen Kohorten ist artenspezifisch und abhängig vom Anteil der Kohorte an der vom Bestand absorbierten Strahlung. Aus der jährlichen Bruttoassimilationsleistung wird nach Abzug der Respiration das Wachstum der Kompartimente Feinwurzeln, Stamm, Blattwerk, sowie Äste und Grobwurzeln berechnet. Die Allokationskoeffizienten für die einzelnen Kompartimente werden dabei so bestimmt, daß sie einem vorgeschriebenen Verhältnis des Querschnitts der leitenden Gewebe im Holz zu den zu versorgenden Blattmassen und einer ausgewogenen Leistung des Aufnahmevermögens der Feinwurzeln und der Produktionskapazität der Blätter entsprechen (functional balance und pipe model theory, siehe z.B. (Mäkelä, 1986)). Zusätzlich gehen in die Bestimmung der Allokationskoeffizienten eine Höhenwachstumsfunktion ein, die vom relativen Lichtgenuß und dem Blattmassenzuwachs abhängig ist, sowie die zu ersetzenden Streuproduktionsflüsse. Die Kronenansatzhöhe wächst, wenn die Nettoproduktion der untersten Kronenschicht negativ wird. Damit sind die Baumdimensionen Höhe, Brusthöhendurchmesser und Kronenansatzhöhe im Modell berechenbar.

### *Phänologie*

Das Datum des Blattaustriebs wird anhand eines einfachen Temperatursummenmodells berechnet. Ab dem 1. Januar werden mittlere Tagestemperaturen aufsummiert. Ist ein bestimmter Schwellwert erreicht, markiert dies den Tag des Austriebs. Der Blattwurf wird anhand eines festen durchschnittlichen Datums bestimmt. Für die laubwerfenden Baumarten wurden die erforderlichen Parameter an Daten des DWD angepaßt. Für die immergrünen Baumarten werden gegenwärtig im Modell noch keine phänologischen Stadien unterschieden.

### *Mortalität*

Die Mortalität der Individuen innerhalb der Kohorten wird aus der Kohlenstoffbilanz bestimmt (streßbedingte Mortalität) oder nach einer vorgegebenen altersbedingten Mortalitätsrate. Beide Ansätze können auch kombiniert werden. Streßbedingte Mortalität tritt auf, wenn die Kohlenstoffbilanz über einen bestimmten Zeitraum negativ wird und daher z.B. die Blattmasse der Individuen einer Kohorte eines Jahres geringer ist als die des Vorjahres. Sie führt damit zur Verringerung der Individuenzahl bzw. zum vollständigen Absterben der Kohorte. Die intrinsische artenspezifische Mortalität wird über ein maximales Alter der Baumart definiert (Botkin & Nisbet, 1992).

### *Regeneration und Management*

Auf Bestandesebene können Verjüngungs- und Bewirtschaftungsmaßnahmen simuliert werden. Die Verjüngung beschreibt das Aufwachsen von gepflanzten Setzlingen oder von Sämlingen, die jährlich in Abhängigkeit von Umweltbedingungen im Bestand aufkeimen können, in die Baumschicht.

Bewirtschaftung kann als vorgeschriebene Reduktion der Individuenzahl zu einem bestimmten Zeitpunkt berücksichtigt werden (Lindner, 1998).

### *Zeitregime*

Die Berechnung der Flüsse und die Änderung der Zustandsvariablen wird prozeßabhängig mit unterschiedlichen zeitlichen Schrittweiten berechnet. Die Wasser- und Wärmeflüsse und die Phänologie werden im Tagestakt berechnet, Bodenkohlenstoff- und Stickstoffdynamik, sowie

die photosynthetische Produktion mit Schrittweiten zwischen wahlweise einem Tag bis zu einer Woche, während Allokation, Wachstum, Mortalität und Regeneration im Jahrestakt berechnet werden.

### *Parameter, Initialisierung und Triebkräfte*

Die Artenzusammensetzung und die Bestandesstruktur können auf der Basis von Inventurdaten initialisiert werden. Die Kohorten werden dann entsprechend der gemessenen Verteilungen von Brusthöhendurchmesser sowie, falls vorhanden, Baumhöhe und Kronenansatzhöhe definiert. Weiterhin werden zur Initialisierung Daten zu Bodenstruktur, Kohlenstoff- und Stickstoffgehalten benötigt. Die Modellparameter für den Boden werden, soweit sie nicht explizit bestimmt wurden, über die Textur zugeordnet; alle anderen Parameter, im Prinzip immer artenabhängig, werden aus der Literatur bestimmt.

Als treibende klimatische Größen werden Tagesmittel bzw. -summen der Temperatur, des Niederschlags, der Luftfeuchte und der Strahlung benötigt, die wahlweise aus Meßreihen eingelesen oder aus Monatswerten mit Hilfe eines Wettergenerators hergeleitet werden können.

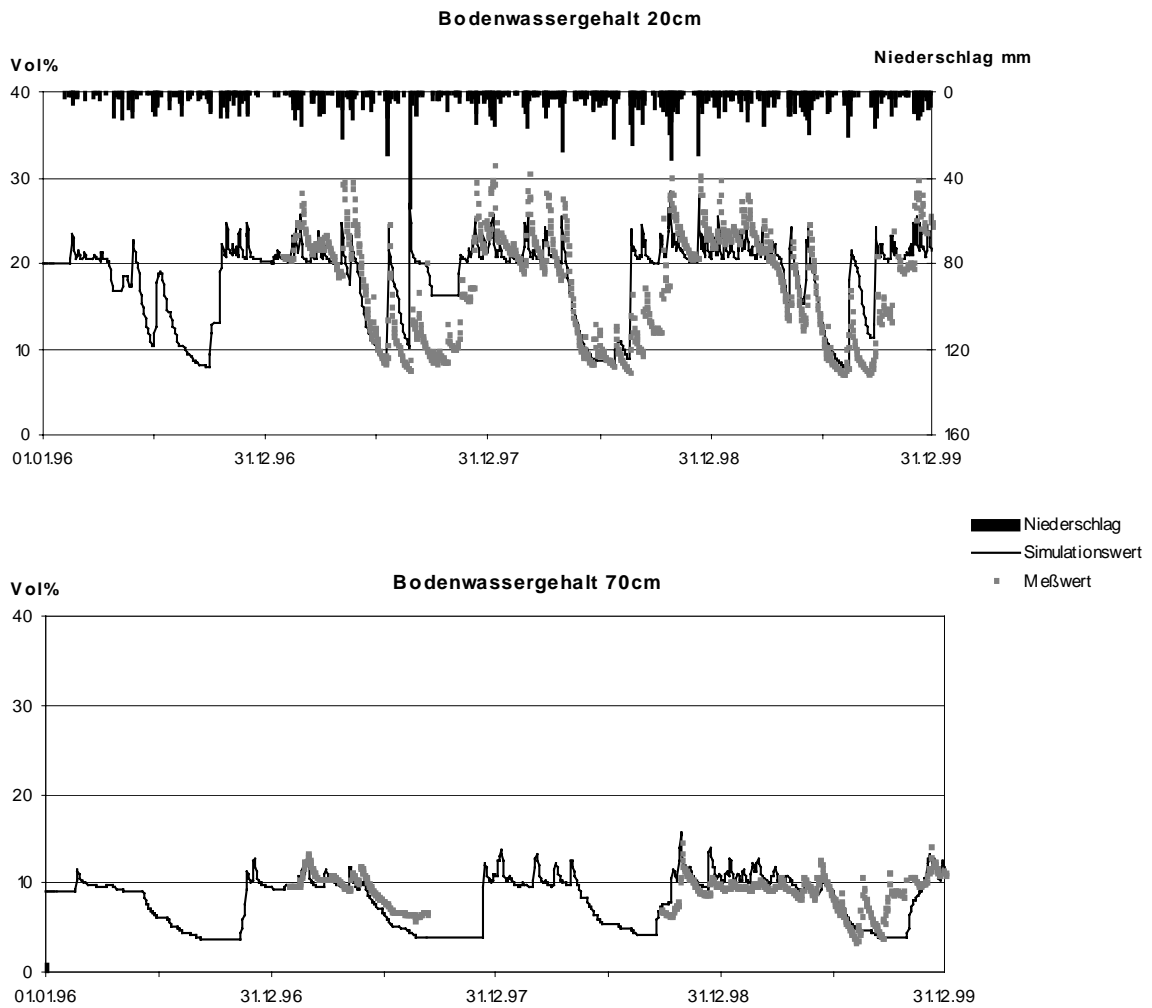
Das Modell liegt in einer ersten, hier umrissenen Ausbaustufe vor und wird an langen Zeitreihen von Dauerbeobachtungsflächen hinsichtlich der Bestandesdynamik getestet (Mäkelä et al., 2000; Schaber et al., 1999). Es ist gegenwärtig für die Baumarten Buche (*Fagus sylvatica*), Fichte (*Picea abies*), Kiefer (*Pinus sylvestris*) und Eiche (*Quercus robur*) parametrisiert - eine Parametrisierung der Birke ist in Vorbereitung. Mit der Eddy-Kovarianztechnik durchgeführte Messungen der CO<sub>2</sub>- und Wasseraustauschflüsse werden zum Testen der Flussmodellierung herangezogen. Die an den Level II-Standorten erhobenen Daten bilden eine weitere wichtige Grundlage der Modellvalidierung, vor allem bezüglich der Bodenwasserdynamik, des Einflusses der Bodenfruchtbarkeit auf die Produktion und der Bestandesstruktur.

## **Ergebnisse**

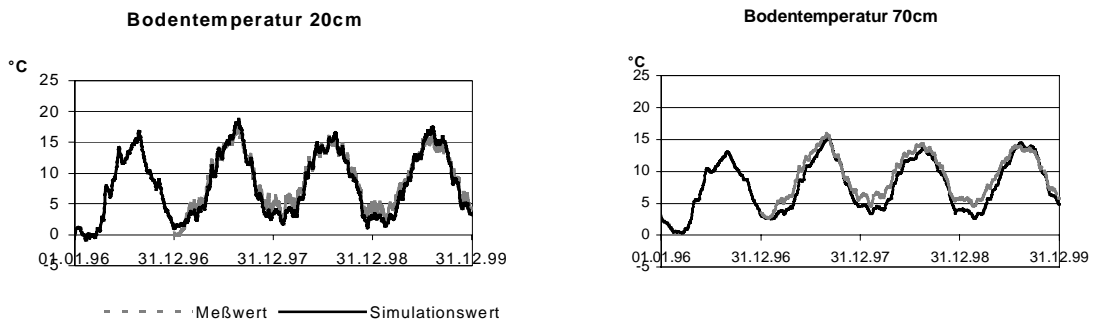
### ***a) Validierung***

An den sechs Level II Standorten in Brandenburg wurden die Teilmodelle Bodenwasser und Bodentemperatur mit den entsprechenden Meßwerten im Bestand für die Jahre 1997 bis 1999 validiert. Die standortspezifischen Parameter wurden aus den Bodenprofilen abgeleitet, initialisiert wurde das Modell mit den 1994 erhobenen Bestandesdaten. Es wurden keine Modellanpassungen für die einzelnen Standorte vorgenommen. Als Triebkräfte dienten die auf der Freifläche täglich gemessenen meteorologischen Daten (Lufttemperatur, Niederschlag, relative Luftfeuchte, Globalstrahlung). Da die meteorologischen Daten im Gegensatz zu den Bodenmeßwerten bereits ab 1996 vorlagen, wurde die Simulation für den Zeitraum 1996 bis 1999 durchgeführt. Gestartet wurde das Modell mit geschätzten Anfangswerten des Bodenwassers und der Bodentemperatur. Damit konnte das Modell verifiziert und seine Sensitivität bezüglich der Startwertbelegung überprüft werden.

Die Abbildungen 2 und 3 zeigen exemplarisch den Vergleich der Simulationsergebnisse der Bodentemperatur und des Bodenwassers, jeweils in 20 und 70 cm Tiefe, mit den Meßwerten für den Standort Natteheide.



**Abbildung 2** Bodenwassergehalt in 20 und 70 cm Tiefe, Natteheide, 1996-1999



**Abbildung 3** Bodentemperatur in 20 und 70 cm Tiefe, Natteheide, 1996-1999

Die Modellvalidierung an den anderen fünf Standorten ergab ähnliche Ergebnisse. Die Dynamik des Bodenwasser- und Temperaturhaushalts wird an jedem der Standorte in den Grundzügen richtig wiedergegeben. Bei der Temperatur treten die größeren Fehler vor allem im Winterhalbjahr auf. Hier kann durch einen verbesserten Ansatz der

Bodenoberflächentemperaturberechnung noch eine höhere Genauigkeit erzielt werden. Das Bodenwassermodell unterschätzt im Frühjahr und Frühsommer teilweise den Wassergehalt in 20 cm Tiefe, während er Ende des Sommers und im Herbst in einigen Fällen deutlich überschätzt wird. Der Grund dafür liegt vor allem in der Berechnung des Pflanzenentzugs. Durch eine verbesserte Berechnung des Transpirationsbedarfs und ein geändertes Wurzelmodell soll dieser Fehler minimiert werden.

### **b) CO<sub>2</sub>-Szenarien**

Zur Untersuchung der Zuwachsleistung über 40 Jahre in Abhängigkeit von der atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration wurden drei verschiedene Szenarien entwickelt, die in Tabelle 1 zusammengestellt sind. Im ersten Fall wird eine konstante CO<sub>2</sub>-Konzentration angenommen, die dem Wert von 1950 entspricht; im dritten Szenario wird ebenfalls eine konstante CO<sub>2</sub>-Konzentration angenommen, auf dem deutlich höheren Niveau von 1990. Das zweite Szenario beschreibt einen kontinuierlichen Anstieg der CO<sub>2</sub>-Konzentration ausgehend vom Wert für 1950 auf das Niveau von 1990. Damit haben die drei Szenarien in der Reihenfolge ihrer Numerierung als Summe über die 40 Jahre aufsteigende CO<sub>2</sub>-Konzentrationen. Die Berechnung erfolgte in allen drei Fällen mit den Daten des Level II - Bestandes Kienhorst unter Verwendung der meteorologischen Daten der DWD-Klimastation Eberswalde (1951-1990).

**Tabelle 1** Mittlere jährliche Zuwachsleistung in Abhängigkeit von drei verschiedenen CO<sub>2</sub>-Szenarien

Szenario	CO <sub>2</sub> -Konzentration ( $\mu\text{mol mol}^{-1}$ )	mittlere jährliche Zuwachsleistung (t TM ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> )
1	314	2.73
2	314 - 354	2.85
3	354	3.10

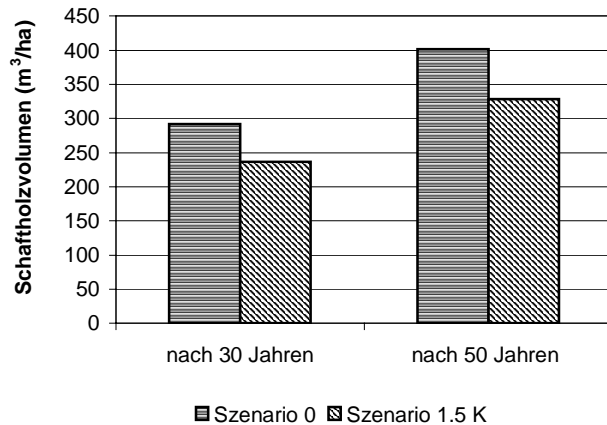
Im Mittel der 40 Jahre zeigt sich ein Anstieg der Zuwachsleistung um 4.4 %, der auf den steigenden atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Gehalt zurückzuführen ist. Dieser Produktionszuwachs setzt sich aus der direkten Wirkung der erhöhten CO<sub>2</sub>-Konzentration auf die Photosynthese und Wassernutzungseffizienz sowie indirekten Wirkungen auf den Blattflächenindex und die Bestandesdynamik zusammen. Die zu erwartenden Wirkungen des weiter steigenden atmosphärischen CO<sub>2</sub> müßten durch weitere Untersuchungen abgeschätzt werden, die zusätzlich zur steigenden CO<sub>2</sub>-Konzentration auch Szenarien der zukünftigen Klimaentwicklung beinhalten.

### **c) Klimaszenarien**

Um die Reaktion des Baumwachstums auf veränderte klimatische Bedingungen zu testen, wurde ein Klimaszenario entwickelt, das ausgehend vom heutigen Klima eine allmähliche Erhöhung der durchschnittlichen Jahrestemperatur um 1.5 K in den nächsten 50 Jahren bei gleichbleibendem Niederschlag simuliert (Szenario 1.5K). Als Kontrollszenario wurden die gegenwärtigen klimatischen Bedingungen fortgeschrieben (Szenario 0). Beide Wetterzeitreihen wurden unter Nutzung einer multivariaten statistischen Analyse aus

meteorologischen Langzeitbeobachtungen in Brandenburg entwickelt (Werner & Gerstengarbe, 1997).

Abbildung 4 verdeutlicht das unterschiedliche Wachstumsverhalten für die beiden Szenarien.



**Abbildung 4** Schaftholzvolumen nach 30 und 50 Jahren unter gegenwärtigem Klima (Szenario 0) und Klimaszenario (Szenario 1.5K) mit Temperaturerhöhung um 1.5K

Nach 30 Jahren ist das Schaftholzvolumen unter dem geänderten Klima bereits deutlich geringer als unter dem fortgeschriebenen gegenwärtigen Klima. Dieser Unterschied fällt nach 50 Jahren noch deutlicher aus. Das verringerte Schaftholzvolumen des Bestandes unter Klimaänderung ist neben einer geringeren Wachstumsleistung auf eine erhöhte Mortalität zurückzuführen. Inwieweit durch erhöhte Niederschläge in Kombination mit einer Temperaturerhöhung eine Verbesserung des Zuwachses erreicht werden kann, müssen weitere Untersuchungen mit entsprechenden Klimaszenarien zeigen.

## Ausblick

Die hier vorgestellten Beispiele von Modellvalidierung und -anwendung illustrieren die Bedeutung der Level II Standorte für die Modellierung des Waldwachstums und deren Beitrag zum Verständnis der Ökosystemdynamik.

- Der reiche Datenbestand, der auf den Level II Flächen erhoben wird, kann für die Validierung von mehreren Modellkomponenten genutzt werden. Zur Zeit gilt dies vor allem für die Bodenwasserdynamik, die Streuflüsse und den Blattflächenindex. Es ergeben sich z.B. ausgehend von der Validierung der Teilmodelle für Bodenwasser und –temperatur Ansätze zur Verbesserung einiger Prozeßbeschreibungen, vor allem für den Winterzeitraum. Weitere Validierungen zur Bodenchemie und zur Bestandesdynamik sollen folgen.
- Modellsimulationen, die auf unterschiedlichen Organisationsebenen des Systems Wald gemessene und beschriebene Eigenschaften in ihrer Wechselwirkung zeigen, können zur Ableitung weiterer Größen genutzt werden. So ist z.B. geplant, Interzeption, Tiefenversickerung und Nährstoffaustrag mit 4C für die Brandenburger Level II Flächen zu berechnen.
- Der Vergleich und die Analyse der unterschiedlichen, durch Klima und Boden geprägten Wachstumsbedingungen an den sechs Level II Standorten in Brandenburg kann ebenfalls durch Simulationsexperimente mit dem Modell 4C ergänzt werden.
- Schließlich ist die Durchführung von Simulationsexperimenten mit CO<sub>2</sub>- und Klimaszenarien, die insbesondere verschiedene Annahmen über die Änderung von Lufttemperatur und Niederschlag machen, ein wichtiges Instrument zur Beurteilung der Wachstumsdynamik unter Bedingungen des globalen Wandels. Um die Anpassungsfähigkeit

existierender Waldbestände zu untersuchen, können zusätzlich unterschiedliche Bewirtschaftungsstrategien durch Modellsimulationen getestet werden. Dadurch kann das Modell unterstützend für Fragen des Waldumbaus genutzt werden.

## Danksagung

Bedanken möchten wir uns für die gute Zusammenarbeit mit den Kollegen der Landesforstanstalt Eberswalde, Abt. Waldökologie / Forstliche Umweltkontrolle, die uns vor allem mit der großzügigen Bereitstellung des umfangreichen Datenmaterials einen wesentlichen Schritt in der Modellentwicklung und -validierung vorangebracht haben.

## Literatur

- Botkin, D.B., Nisbet, R.A.**, 1992: Forest response to climatic change: effects of parameter estimation and choice of weather pattern on the reliability of projections. *Climatic Change*, 20: 87-111.
- Glugla, G.**, 1969: Berechnungsverfahren zur Ermittlung des aktuellen Wassergehaltes und Gravitationswasserabflusses im Boden. *Albrecht-Thaer-Archiv*, 13: 371-376.
- Grote, R., Suckow, F.**, 1998: Integrating dynamic morphological properties into forest growth modeling. I. Effects on water balance and gas exchange. *Forest Ecology and Management*, 112: 101-119.
- Grote, R., Suckow, F., Bellmann, K.**, 1999: Modelling of carbon-, nitrogen-, and water balances in pine stands under changing air pollution and deposition. In: **R.F. Hüttl and K. Bellmann** (Editors), *Changes of Atmospheric Chemistry and Effects on Forest Ecosystems. A Roof Experiment Without Roof. Nutrients in Ecosystems*. Kluwer, Dordrecht, pp. 251-281.
- Haxeltine, A., Prentice, I.C.**, 1996: BIOME3: An equilibrium terrestrial biosphere model based on ecophysiological constraints, resource availability and competition among plant functional types. *Global Biogeochemical Cycles*, 10(4): 693-709.
- Kartschall, T., Döring, P., Suckow, F.**, 1990: Simulation of Nitrogen, Water and Temperature Dynamics in Soil. *Soil. Syst. Anal. Model. Simul...*, 7(6): 33-40.
- Koitzsch, R.**, 1977: Schätzung der Bodenfeuchte aus meteorologischen Daten, Boden- und Pflanzenparametern mit einem Mehrschichtmodell. *Z. f. Meteor.*, 27(5): 302-306.
- Lindner**, 1998: Wirkung von Klimaveränderungen in mitteleuropäischen Wirtschaftswäldern. PIK-Report 45, Potsdam Institute for Climate Impact Research, Potsdam.
- Mäkelä, A.**, 1986: Implications of the pipe model theory on dry matter partitioning and height growth trees. *Journal of Theoretical Biology*, 123: 103-120.
- Mäkelä, A., Sievänen, R., Lindner, M., Lasch, P.**, 2000: Application of volume growth and survival graphs in the evaluation of four process-based forest growth models. *Tree Physiology*, 20: 347-355.
- Moorhead, D.L., Sinsabuagh, R.L., Linkins, A.E., Reynolds, J.F.**, 1996: Decomposition processes: modelling approaches and applications. *The Science of the Total Environment*, 183: 137-149.
- Schaber, J., Badeck, F.-W., Lasch, P.**, 1999: Ein Modell der Sukzessionsdynamik europäischer Wälder - Forest Ecosystems in a changing Environment (4C). In: **D.R. Pelz, O. Rau and J. Saborowski** (Editors), *Deutscher Verband forstlicher Versuchsanstalten - Sektion forstliche Biometrie und Informatik. 11. Jahrestagung und Internationale biometrische Gesellschaft. Deutsche Region. Arbeitsgruppe Ökologie, Herbstkolloquium, Freiburg*, pp. 212-217.
- Werner, P.C., Gerstengarbe, F.-W.**, 1997: A proposal for the development of climate scenarios. *Climate Research*, 8(3): 171-182.