

# **Abschlußbericht**

**Zuwendungsempfänger:**

Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung

**Förderkennzeichen:**

**01 LA 9876/0**

**Vorhabenbezeichnung:**

**Abschätzung der regionalen Kohlenstoffbilanz von mitteleuropäischen Wäldern unter dem Aspekt des Globalen Wandels**

**Laufzeit des Vorhabens:**

01.07.1999 - 30.06.2001

**Projektleiter:**

Dr. Felicitas Suckow

**Projektbearbeiter:**

Dipl.-Math. Petra Lasch

Dr. Beate Klöcking

Dipl.-Geol. Ylva Hauf

Dr. Franz Badeck

<b>1</b>	<b>ÜBERBLICK</b>	<b>4</b>
<b>1.1</b>	<b>AUFGABENSTELLUNG</b>	<b>4</b>
<b>1.2</b>	<b>VORAUSSETZUNGEN</b>	<b>4</b>
<b>1.3</b>	<b>PLANUNG UND ABLAUF DES VORHABENS</b>	<b>5</b>
<b>1.4</b>	<b>WISSENSCHAFTLICHER STAND</b>	<b>6</b>
<b>1.5</b>	<b>ZUSAMMENARBEIT MIT ANDEREN STELLEN</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>ERGEBNISSE</b>	<b>10</b>
<b>2.1</b>	<b>DARSTELLUNG DER ERGEBNISSE</b>	<b>10</b>
2.1.1	KONZEPT	10
2.1.2	DAS HYDROLOGISCHE EINZUGSGEBIETSMODELL ARCEGMO	10
2.1.3	DAS WALDWACHSTUMSMODELL 4C	11
2.1.4	KOPPLUNG ARCEGMO – 4C	13
2.1.4.1	Zielstellung	13
2.1.4.2	Modelltechnische Realisierung	14
2.1.4.3	GIS-Modell „Schnellbach-Einzugsgebiet“	16
2.1.4.4	Ergebnisse	16
2.1.5	DATENBASIS	21
2.1.5.1	Voraussetzungen	21
2.1.5.2	Auswahl des Validierungsgebietes	22
2.1.5.3	Datengrundlage und Datenergänzung zur Bestandes-Initialisierung	22
2.1.5.4	Brandenburg	24
2.1.5.5	Deutschland	26
2.1.5.6	Klimadaten und Klimaszenarien	27
2.1.5.7	Bodendaten	30
2.1.6	UNTERSUCHUNG DER C-BILANZEN	30
2.1.6.1	Methodik	30
2.1.6.2	Einzugsgebiet des Schnellbachs	31
2.1.6.3	Brandenburg-Bestände der ÖWK	35
2.1.6.4	Modellbetrieb "Deutschland"	39
2.1.7	SCHLUSSFOLGERUNGEN	42
<b>2.2</b>	<b>VORAUSSICHTLICHER NUTZEN / VERWERTBARKEIT</b>	<b>43</b>
<b>2.3</b>	<b>BEKANNTGEWORDENER FORTSCHRITT</b>	<b>44</b>
<b>2.4</b>	<b>VERÖFFENTLICHUNGEN</b>	<b>44</b>

**ANHANG 1 BESCHREIBUNG DES AUSGEWÄHLTEN VALIDIERUNGSGEBIETS UND DER  
ERSTELLUNG DES GIS-DATENMODELLS "SCHNELLBACH"**

**ANHANG 2 AUFBEREITUNG DES DATENSPEICHERS WALDFONDS FÜR DIE INITIALISIERUNG  
DES WALDWACHSTUMSMODELLS 4C**

# 1 Überblick

## 1.1 Aufgabenstellung

Wälder haben neben der Atmosphäre und den Ozeanen einen wesentlichen Anteil an der Kohlenstoffspeicherung und –freisetzung, da sie den Hauptanteil am terrestrisch gebundenen Kohlenstoff speichern und über schnelle Austauschprozesse wie Photosynthese, Respiration und Transpiration ständig mit der Atmosphäre in Verbindung stehen; sie tragen damit wesentlich zum globalen Wasser- und Kohlenstoffkreislauf bei. Bestandesänderungen führen zu veränderten Kohlenstoffflüssen zwischen Vegetation, Boden und Atmosphäre (Kohlmaier et al., 1997).

Zur Abschätzung der Kohlenstoffbilanz von Wäldern in verschiedenen Regionen Deutschlands unter den Bedingungen des Globalen Wandels werden Simulationsexperimente mit Klimaänderungsszenarien durchgeführt. Dazu wird das Waldwachstumsmodell 4C eingesetzt, das die vertikalen dynamischen Prozesse in einem Waldbestand abbildet. Um C-Bilanzen für Gebiete bzw. Regionen aufzustellen, wird das Modell 4C einerseits an repräsentativen Punkten eingesetzt. Um die lateralen Flüsse zwischen den Flächen zu berücksichtigen, wird in einem zweiten Ansatz 4C mit dem hydrologischen Gebietsmodell ArcEGMO gekoppelt, das dann in der zu untersuchenden Region angewendet wird, wobei die räumlichen Daten durch ein Geographisches Informationssystem (GIS) verwaltet werden.

Die Analysen zur C-Bilanz werden in drei unterschiedlichen Ebenen durchgeführt:

- in einem kleinen Gebiet, das zur Validierung des gekoppelten Modells dient
- für Brandenburg auf den Flächen der Ökologischen Waldzustandskontrolle (ÖWK)
- für Deutschland anhand zwölf repräsentativer Wuchsgebiete (Modellbetrieb 'Deutschland'), in denen je zwei Bestände untersucht werden (vgl. Abschlussbericht: "Wälder und Forstwirtschaft Deutschlands im Globalen Wandel". BMBF-Projekt 01LK 9528)

## 1.2 Voraussetzungen

Die Projektbearbeiter am PIK (Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung) arbeiten seit mehreren Jahren auf dem Gebiet der mathematischen Modellierung von biologischen Prozessen unter Berücksichtigung verschiedener Systemebenen (Populationen, Ökosysteme). Die Arbeitsweise ist durch interdisziplinäre Forschungsansätze und Anwendung von Methoden der angewandten Systemanalyse charakterisiert. Eine langjährige enge Zusammenarbeit existiert mit anderen Fachdisziplinen wie Bodenkunde, Hydrologie, Meteorologie und Agrarwissenschaften, auch bedingt durch die interdisziplinäre Struktur des PIK.

In den vergangenen Jahren wurden u.a. regionale Anwendungen und Vergleichsstudien mit verschiedenen Sukzessionsmodellen realisiert (Badeck et al., 2001; Lasch & Lindner, 1995) und das Simulationsmodell FORSANA für Kiefern-Reinbestände entwickelt (Grote & Suckow, 1998; Grote et al., 1999).

Ein Bestandteil des Forschungsprofils des PIK ist die integrierte Modellierung der Verfügbarkeit und Nutzung der Wasserressourcen auf unterschiedlichen Skalen-

ebenen. Dazu werden komplexe hydrologische Flussgebietsmodelle wie z.B. ArcEGMO entwickelt, welche die ober- und unterirdischen Abflussprozesse sowie deren Wechselbeziehungen in ihrer skalenspezifischen Gebietsausprägung hinreichend genau abbildet und sensibel auf Bewirtschaftungs-, Landnutzungs- und Klimaveränderungen reagieren. Aktuelle Anwendungsbeispiele sind Projekte im Elbegebiet (Becker et al., 2000) und in Brandenburg (LUA, 2000).

Aufbauend auf den bisherigen Forschungen werden die Erfahrungen in der Punkt- und Sukzessions-Modellierung von Waldbeständen mit den Erfahrungen in der räumlichen Modellierung verbunden und für die Regionalanalysen genutzt.

Große Kompetenz besteht am PIK in der Entwicklung von Klimaszenarien, die aus den Abschätzungen der Global Circulation Models (GCM) abgeleitet und regionalisiert werden (Werner & Gerstengarbe, 1997). Dadurch werden die regionalen Klimate voneinander abgegrenzt und der Einsatz dieser Szenarien bewirkt somit eine räumliche Differenzierung der Triebkräfte.

### **1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens**

Die Konzeptionen zur Beschreibung der Wasser- und Stoffflüsse im System Pflanzenbestand - Boden des Waldwachstumsmodells 4C und des hydrologischen Gebietsmodells ArcEGMO wurden aufeinander abgestimmt und ArcEGMO so erweitert, dass bereits existierende Computermodelle (auch in anderen Programmiersprachen) in das Modellsystem implementiert werden können. An dieses räumliche, GIS-basierte Modell der lateralen Wasserflüsse wurde zunächst ein Modell der vertikalen Wasserbewegung gekoppelt. Sukzessive wurden dann das Stoffhaushaltsmodell und das Bodentemperaturmodell eingebaut. Aus dem Modell 4C musste das Vegetationsmodell herausgelöst und vom Bodenmodell getrennt werden, um es in das Modellsystem ArcEGMO zu integrieren und mit den anderen Bodenmodulen zu verbinden.

Gleichzeitig wurde unter Berücksichtigung der speziellen Ansprüche, die durch die Modellierung der Forstdynamik im Kontext mit dem Gebietswasser- und Kohlenstoffhaushalt entstehen, das Validierungsgebiet ausgewählt. Die Datenbeschaffung und -aufbereitung für das Validierungsgebiet hat sich als sehr aufwendig herausgestellt. Die forstlichen Daten aus dem Datenspeicher Waldfonds des Landes Sachsen hatten keine Georeferenzierung, so dass eine Methodik erarbeitet werden musste, um die flächenunscharfen Bestandesdaten aus den Forstämtern geografisch eindeutig zuordnen zu können. Dieser Prozess liess sich nicht gänzlich automatisieren und war mit einem hohen Zeitaufwand verbunden, da die Informationen aus den (handgezeichneten) Karten der Forstämter aufbereitet wurden. Außerdem mussten die Daten für die Anwendung in 4C speziell aufbereitet werden. Die dabei entstandenen Routinen können für Daten mit ähnlichem Informationsgehalt weiterhin genutzt werden, was bei den Modellanwendungen für Brandenburg und Deutschland die Datenaufbereitung beschleunigt hat.

In Zusammenarbeit mit dem BMBF-Projekt „Wälder und Forstwirtschaft Deutschlands im Globalen Wandel (Waldstudie)“ wurden die Daten in zwölf Wuchsgebieten Deutschlands für (hypothetische) Forst-Modellbeständen zusammengetragen. In diesem Fall war es problematisch, für alle in Betracht kommenden Bodenarten die entsprechenden Beispielsprofile zu finden. Die Bodeninformationen für alle Waldstandorte im Bundesmaßstab liegen leider auch bei Projektabschluss noch nicht flächendeckend vor. Von der Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft

Hamburg (BFH) wurde eine Teilmenge von Bodenprofilen für die "Waldstudie" zur Verfügung gestellt, auf deren Grundlage die Berechnungen sowohl in den zwölf Wuchsgebieten Deutschlands als auch an den ÖWK-Punkten in Brandenburg durchgeführt wurden.

## **1.4 Wissenschaftlicher Stand**

Im Rahmen des BMBF-Projektes 01LK9408/2 wurde eine erste Version des Waldwachstumsmodells 4C entwickelt, das auf der Theorie der Gap-Modelle (Shugart, 1984) beruht und besonders für die Untersuchung von Klimaänderungen geeignet ist (Bugmann et al., 1997). Die Wachstumsdynamik eines Bestandes wird im wesentlichen durch detaillierte Kohlenstoff-, Stickstoff- und Wasserflüsse im System Boden - Baum - Atmosphäre modelliert (Schaber et al., 1999). Der Schwerpunkt der Modellvalidierung lag bisher auf der Baumart Kiefer, wobei neben dem Wachstum vor allem die Wasserflüsse untersucht wurden (Suckow et al., 2001). Für Mischbestände wurde das Modell 4C erstmalig in dieser Studie angewendet. Eine Modellbeschreibung ist in Abschnitt 2.1.3 zu finden.

In den letzten Jahren wurden mehrere Untersuchungen der C-Flüsse in Wäldern durchgeführt. Anhand dieser Daten kann das Modell 4C hinsichtlich der C-Speicherung verifiziert werden.

Eine Tabelle mit Messungen zur Bodenrespiration in verschiedenen Gebieten der Erde (Europa, Asien, Nord- und Südamerika) findet sich bei (Raich & Tufekciogul, 2000). Die dort angegebenen Werte streuen von 0.16 g C / m<sup>2</sup> pro Tag während der Vegetationsperiode in Saskatchewan bis zu 4.88 g C / m<sup>2</sup> pro Tag in Costa Rica. Für Wälder in Deutschland sind Werte von 0.8 bis 1.3 g C / m<sup>2</sup> pro Tag angegeben (Beyer, 1991). Tabelle 1 gibt einen Überblick über Messungen und Berechnungen der C-Flüsse auf jährlicher Basis. Aus den bei (Schulze, 2000) abgeschätzten Werten der Bodenrespiration für temperierte Laub- und Nadelwälder lässt sich erkennen, wie groß die Schwankungsbreite (abhängig vom Standort) ist. Ähnlich variieren auch die Brutto-Primärproduktion GPP, die Ökosystem-Respiration RE und die Netto-Ökosystemproduktion NEP, welche die C-Speicherung im Ökosystem beschreibt, wobei für NEP > 0 Kohlenstoff gespeichert wird und für NEP < 0 eine C-Freisetzung erfolgt.

Zur Untersuchung der C-Bilanzen in Forst-Ökosystemen wurden auch Modelle eingesetzt, deren Ergebnisse ebenfalls in Tabelle 1 aufgenommen wurden. Das Edinburgh Forest Model (EFM) ist ein mechanistisches Modell für immergrüne Forst-Ökosysteme mit Kohlenstoff-, Stickstoff- und Wasserhaushalt, das eingesetzt wurde zum Test der Auswirkungen von Management-Szenarien auf die Kohlenstoff-Speicherung für Kiefernwälder in Schottland (Thornley & Cannell, 2000). Die Ergebnisse dieses Modells liegen vor allem für GPP und RE deutlich unter den vorgestellten Messwerten, allerdings muss berücksichtigt werden, dass der Standort relativ kühl und sehr feucht ist.

Dagegen berechnet das Prozessmodell SECRET (Sampson et al., 2001), das auf Bestandesebene Kohlenstoff- und Wasserflüsse beschreibt und auf einen Kiefernbestand in Nordbelgien angewandt wurde, eine sehr hohe GPP, während die Boden-Respiration innerhalb der gemessenen Größenordnung liegt.

Eine Bewertung der Ergebnisse dieser Modellsimulationen kann aber nicht vorgenommen werden, da vergleichbare Messungen aus Kiefernbeständen nicht herangezogen werden konnten. Der große Unterschied der Messwerte der Boden-

Respiration für verschiedene Fichtenstandorte in Deutschland oder die Messungen, die in Tharandt von 1996 bis 1998 vorgenommen wurden, zeigen, wie stark die C-Speicherung von Standort und Klima beeinflusst wird.

**Tabelle 1** Übersicht über Messungen und Berechnungen von C-Flüssen in verschiedenen Waldbeständen  
 GPP – Brutto-Primärproduktion, NEP – Netto-Ökosystemproduktion ( $NEP = GPP - RE$ ),  
 RE – Ökosystem-Respiration, SR – Boden-Respiration

<b>Standort, Baumarten</b>	<b>GPP g/m<sup>2</sup>/year</b>	<b>NEP g/m<sup>2</sup>/year</b>	<b>SR g/m<sup>2</sup>/year</b>	<b>RE g/m<sup>2</sup>/year</b>	<b>Quelle</b>
<b>Modelle</b>					
<b>EFM: Schottland, Kiefer</b>	750	270	230	480	(Thornley & Cannell, 2000)
<b>SECRETS: Belgien 1997, Kiefer</b>	1965		495		(Sampson et al., 2001)
<b>SECRETS: Belgien 1998, Kiefer</b>	1888		505		(Sampson et al., 2001)
<b>Messungen / Berechnungen</b>					
<b>New England, Laubwald</b>	1166	224		962	(Goulden et al., 1996)
<b>Deutschland, Fichte</b>			147		(Trüby, 2000)
<b>Deutschland, Fichte</b>			710		(Buchmann, 2000)
<b>Deutschland , Buche, Eiche</b>			475		(Beyer, 1991)
<b>Deutschland, Fichte</b>			292		(Beyer, 1991)
<b>Deutschland (Tharandt 1996), Fichte</b>	1160	330		830	(Valentini et al., 2000)
<b>Deutschland (Tharandt 1997), Fichte</b>	1430	480		950	(Valentini et al., 2000)
<b>Deutschland (Tharandt 1998), Fichte</b>	1510	540		970	(Valentini et al., 2000)

<b>Standort, Baumarten</b>	<b>GPP g/m<sup>2</sup>/year</b>	<b>NEP g/m<sup>2</sup>/year</b>	<b>SR g/m<sup>2</sup>/year</b>	<b>RE g/m<sup>2</sup>/year</b>	<b>Quelle</b>
<b>Deutschland (Solling 1996), Fichte</b>	1140	310		830	(Valentini et al., 2000)
<b>Frankreich, 1996 Buche</b>	1011	218	575	793	(Granier et al., 2000)
<b>Frankreich, 1997 Buche</b>	1245	257	663	988	(Granier et al., 2000)
<b>Frankreich (Le Bray), Zwergkiefer</b>	~ 2255	1150 ±80 <sup>1</sup>		1680 ± 100 <sup>2</sup>	(Berbigier et al., 2001)
<b>Italien, Buche</b>	1016	472		544	(Granier et al., 2000)
<b>Deutschland (Waldstein), Fichte</b>		560-580	262 <sup>3</sup>	1300	(Schulze, 2000)
<b>Temperierter Nadelwald</b>			250-1300		(Schulze, 2000)
<b>Temperierter Laubwald</b>			300-1414		(Schulze, 2000)

Verschiedene in letzter Zeit erarbeitete Studien zu den Auswirkungen des Globalen Wandels auf den Wasser- und Stoffhaushalt (Bork et al., 1995; Schellnhuber et al., 1994) haben gezeigt, dass großräumig anwendbare Methoden und Instrumentarien zur Analyse der Auswirkungen von Klima- und Landnutzungsänderungen auf den Wasser- und Stoffhaushalt, speziell im Hinblick auf die Minderung des Stoffaustrages aus Ökosystemen weitgehend fehlen und deshalb verstärkt entwickelt werden müssen. Zwar gibt es eine Reihe von hydrologischen Modellen und Simulationssystemen, die physikalisch begründete, flächendetaillierte, dynamische Analysen erlauben, wie SHE (Abbott et al., 1986) und HILLFLOW (Bronstert, 1994), doch sind diese Modelle im allgemeinen nur kleinräumig einsetzbar. Obwohl die Entwicklung großskaliger Modelle im letzten Jahrzehnt einen starken Aufschwung erhalten hat (vgl. (Bronstert & Krysanova, 1998)), gibt es nur wenige mesoskalige hydrologische Modelle, die eine detaillierte Impaktanalyse von Landnutzungs- und Klimaveränderungen im regionalen Maßstab erlauben.

Zur gekoppelten Modellierung des Wasser- und Stoffhaushaltes in kleinen bis mesoskaligen Einzugsgebieten wurden unter Nutzung Geographischer Informationssysteme zeitlich und räumlich differenzierte dynamische Modelle entwickelt, wie z.B. SWAT (Arnold et al., 1998) und SWIM (Krysanova et al., 1999).

---

<sup>1</sup> 2-Jahreswert

<sup>2</sup> Jahreswert

<sup>3</sup> Cmineralisation, root activity excluded



Diese Modelle integrieren Hydrologie, Pflanzenwachstum, Nährstoffe (Stickstoff und Phosphor), und Erosion auf Einzugsgebietsebene. Anwendungsziele sind die Nachbildung des Wasserkreislaufs, der Erosion und der Stickstoff- und Phosphorkreisläufe in mesoskaligen Einzugsgebieten unter Verwendung regional verfügbarer Daten sowie Untersuchungen der Auswirkungen veränderter Klima- und Landnutzungsverhältnisse. Diesen, auf einem festen räumlichen und zeitlichen Aggregationsschema beruhenden, Modellen stehen sogenannte Baukastensysteme (z.B. ECOBAS, (Benz & Hoch, 1997)) oder auch als Toolboxes konzipierte Systeme wie das hydrologische Modellierungssystem ArcEGMO gegenüber. Diese sind streng modular aufgebaut und können mit unterschiedlichster Raum- und Zeitdiskretisierung genutzt werden. ArcEGMO hat seine Eignung für die mesoskalige hydrologische Modellierung in mehreren Forschungsprojekten bewiesen (Becker et al., 2000; Klöcking et al., 1999). Eine Modellbeschreibung ist in Abschnitt 2.1.2 zu finden.

Die aktuellen Publikationen wurden ständig über Online-Datenbanken verfolgt (Current Contents, Elsevier - Science Direct, Springer Journals, PROCLIM etc.) und auf ihren Projektbezug ausgewertet. Außerdem wurden Netzwerke zur Informationsgewinnung über projektrelevante Themen (European Spatial and Computational Statistics Network, US Global Change Research Information Office, Informationssystem Elbe-Ökologie, Web-Seiten der Universitäten etc.) genutzt.

## **1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Im Rahmen des BMBF-Förderschwerpunktes „Elbeökologie“ existiert eine Kooperation zwischen dem Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle (UFZ) und dem PIK, deren Ergebnisse vor allem auch bei der Datenaufbereitung für dieses Projekt genutzt wurden. Da das Untersuchungsgebiet eine Mischung von landwirtschaftlicher und forstlicher Nutzung aufweist, werden Synergieeffekte durch diese Kooperation erwartet. Einerseits untersucht das UFZ detailliert die landwirtschaftlich genutzten Flächen, andererseits finden die Ergebnisse der Simulationen mit dem Schwerpunkt Waldentwicklung im Rahmen des vorliegenden Projektes direkten Eingang in die Forschungsarbeiten des UFZ.

Die Bundesanstalt für Holz- und Forstwirtschaft (BFH) stellte im Rahmen des BMBF-Projekts „Wälder und Forstwirtschaft Deutschlands im Globalen Wandel (Waldstudie)“ die erforderlichen Informationen zu den Bodenprofilen an Waldstandorten bereit.

Zu folgenden Projekten, die fachlich in Beziehung zum abgeschlossenen Projekt standen, gab es während der Projektphase Arbeitskontakte:

- Wälder und Forstwirtschaft Deutschlands im Globalen Wandel (Waldstudie)
- Elbe-Ökologie
- Umweltentlastende Landnutzung unter den Bedingungen des Globalen Wandels (Volkswagenstiftung)
- Integrierte Analyse der Auswirkungen des globalen Wandels auf die Umwelt und die Gesellschaft im Elbegebiet (GLOWA Elbe)

## **2 Ergebnisse**

### **2.1 Darstellung der Ergebnisse**

#### **2.1.1 Konzept**

Die Zielstellung des Projekts erfordert eine genaue Beschreibung der Kohlenstoff- und Stickstoffflüsse im System Pflanzenbestand - Boden. Diese Flüsse sind in hohem Maße an die Wasserflüsse gekoppelt bzw. vom im System vorhandenen Wasser beeinflusst. Aus diesem Grund wird auf die Beschreibung des Wasserhaushalts im betrachteten Gebiet besonderen Wert gelegt. Zusätzlich zur bereits modellierten und untersuchten vertikalen Wasserbewegung unter verschiedenen Pflanzenbeständen werden auch die lateralen Wasserflüsse abgebildet, die die Beziehung zwischen den einzelnen Raumelementen und den darauf simulierten vertikalen Flüssen herstellen. Zu diesem Zweck wurden das hydrologische Einzugsgebietsmodell ArcEGMO (s. 2.1.2) und das allgemeine Waldwachstumsmodell 4C (s. 2.1.3) miteinander gekoppelt.

Die Validierung eines solchen Modells stellt spezielle Ansprüche an die Datenbasis, die bei der Auswahl des Testgebiets berücksichtigt werden müssen (s. 2.1.5).

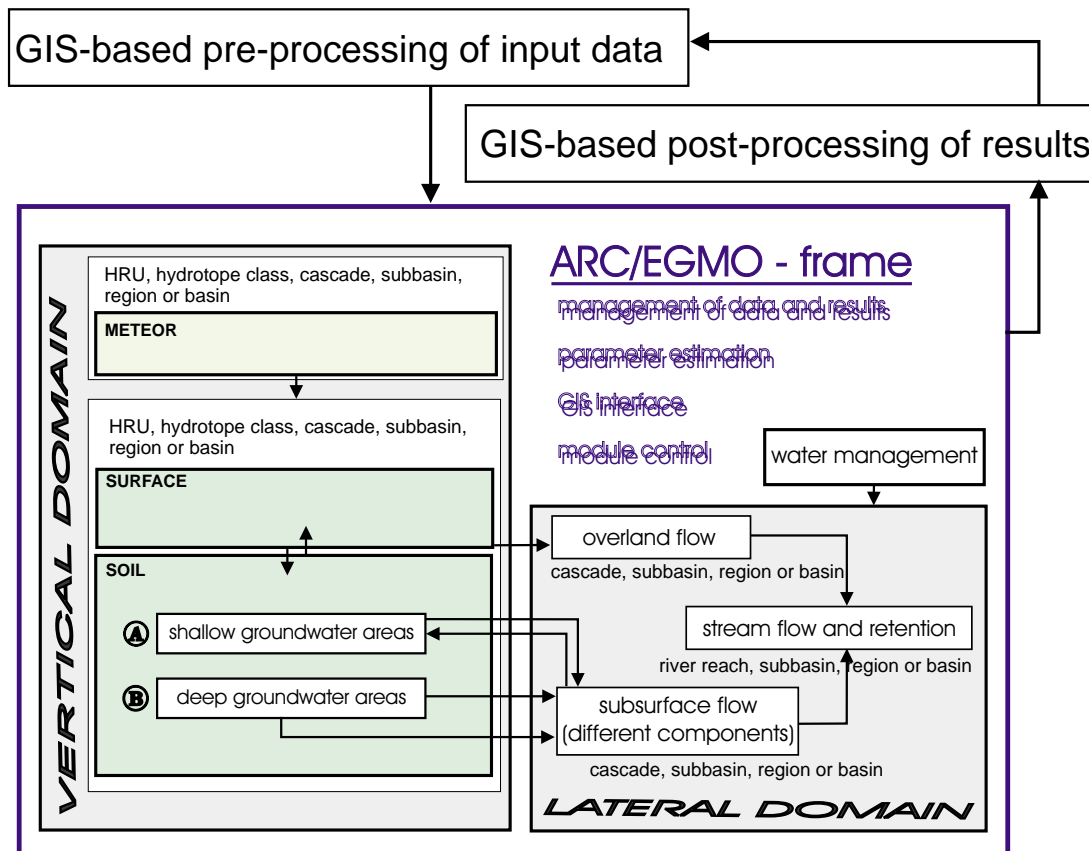
#### **2.1.2 Das hydrologische Einzugsgebietsmodell ArcEGMO**

Das hydrologische Modellsystem ArcEGMO (Becker et al., 2001; Klöcking et al., 1999) ist als Toolbox zur integrativen Modellierung hydrologischer Prozesse auf regionaler Ebene konzipiert. Je nach Aufgabenstellung und Eingangsdatenbasis können über geeignete Kombinationen unterschiedlich detaillierter Teilprozessmodelle verschiedene Formen von Flusseinzugsgebietsmodellen erstellt werden. Die Zeitschrittweite der Simulation kann der Problemstellung angepasst werden, wobei im Standard mit einer täglichen Auflösung modelliert wird. Durch die direkte Kopplung an das GIS ArcInfo können Flächen bestimmter Eigenschaften ausgewiesen werden und somit flächengenau die einzelnen hydrologischen Teilprozesse simuliert werden. Variable räumliche Aggregierungsansätze erlauben die Modellierung auf der Basis von Raumeinheiten unterschiedlicher Größe und Heterogenität. So erfolgt eine unterschiedliche Flächendifferenzierung bei der Simulation der vertikalen und der lateralen Prozesse.

Durch die Variabilität des Modellsystems ArcEGMO ist eine Anwendung auf unterschiedlichsten Skalenebenen möglich, vom Kleinst-einzugsgebiet mit ca. 1 km<sup>2</sup> über mesoskalige Einzugsgebiete bis hin zu makroskaligen Einzugsgebieten (z.B. Saale mit 24.000 km<sup>2</sup>).

Abbildung 1 verdeutlicht die prinzipielle Modellstruktur: In den Modellrahmen, der die Modellorganisation, die Zeitreihenverwaltung und Parameterermittlung sowie die Ergebnisaufbereitung übernimmt, ist das eigentliche hydrologische Modell eingebettet. Dieses untergliedert sich in eine Vertikal- und eine Lateral-domäne. Die beiden Domänen sind wiederum in streng gekapselte Kompartimente unterteilt. Innerhalb dieser erfolgt die Simulation der einzelnen Teilprozesse. Jedem Kompartiment kann eine spezifische Raumauflösung zugeordnet werden. Kleinste zu simulierende Raumeinheit ist dabei in der Vertikal-domäne die Elementarfläche HRU mit homogenen Systemeigenschaften und in der Lateral-domäne das Abflusskaskaden-

segment oder der Fließgewässerabschnitt. Zwischen den Kompartimenten und Domänen existieren definierte Schnittstellen mit einem Minimum an Übergabeparametern.



**Abbildung 1** Struktur des Modellsystems ArcEGMO mit der möglichen Raumauflösung für die einzelnen Kompartimente

ArcEGMO ist auf PC's unter Windows und auf Unix-Plattformen lauffähig. Um den Einsatz auf verschiedenen Plattformen zu gewährleisten, besitzt ArcEGMO keine Benutzeroberfläche. Der Nutzerdialog findet über Steuerdateien im ASCII-Format statt. Eine ausführliche Beschreibung ist in (Becker et al., 2001) enthalten.

### 2.1.3 Das Waldwachstumsmodell 4C

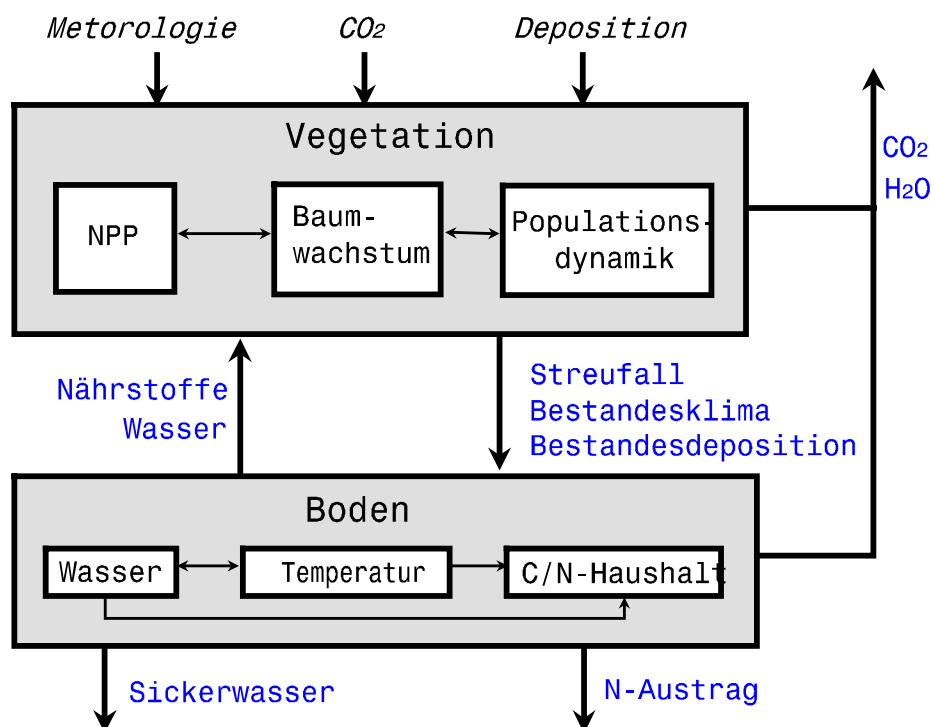
Das Simulationsmodell 4C (**FORESEE** - **FORESt** Ecosystems in a changing **Envi**ronment) ist ein physiologisch basiertes Waldsukzessionsmodell, das die Etablierung, das Wachstum und die Mortalität von Baumkohorten beschreibt (Bugmann et al., 1997; Schaber et al., 1999; Suckow et al., 2001). Der Anfangszustand wird entweder durch eine Forstinventur definiert oder auf der Basis natürlicher Regeneration simuliert.

Die Baumindividuen einer jeden Art sind in Kohorten gleichen Alters und gleicher Baumdimensionen 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. Für jede Kohorte wird horizontale Homogenität angenommen, d.h. die Position des einzelnen

Baumes wird nicht berücksichtigt. Es werden keine Unterschiede in den Wachstumsbedingungen einzelner Individuen derselben Kohorte berücksichtigt.

In der Vertikalen ist der Kronenraum des Bestandes und mit ihm jeder einzelnen Kohorte in 0.5 m mächtige Schichten diskretisiert. Das Blattwerk ist auf die Kronenschichten zwischen Kronenansatzhöhe und Baumhöhe verteilt. Artenzusammensetzung und Bestandesstruktur können auf der Basis von Inventurdaten initialisiert werden. Die Kohorten werden dann entsprechend der gemessenen Verteilungen von Brusthöhendurchmesser und soweit gemessen Baumhöhe und Kronenansatzhöhe definiert.

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. Zur Initialisierung des Bodenmodells werden Daten zu Bodenstruktur, sowie Kohlenstoff- und Stickstoffgehalten benötigt.



**Abbildung 2** Struktur des Modells 4C

Abbildung 2 zeigt das prinzipielle Zusammenwirken der Teilmodelle zur Vegetations- und Bodendynamik innerhalb von 4C.

Die Mortalität der Individuen innerhalb der Kohorten kann aus der Kohlenstoffbilanz bestimmt werden (stressbedingte Mortalität) oder nach einer vorgegebenen intrin-

sischen Mortalitätsrate. Beide Ansätze können auch kombiniert werden. Stressbedingte Mortalität tritt auf, wenn die Kohlenstoffbilanz dauerhaft negativ wird – nach einer baumartenspezifischen Latenzzeit führt fortwährend negative Bilanz zur Verringerung der Individuenzahl der Kohorte bzw. zum vollständigen Absterben der Kohorte. Die intrinsische artenspezifische Mortalität wird über ein maximales Alter der Baumart definiert (Botkin & Nisbet, 1992).

Waldbaumaßnahmen können als vorgeschriebene Reduktion der Individuenzahl zu einem bestimmten Zeitpunkt berücksichtigt werden, dazu gehören Durchforstungsmaßnahmen, Erntemethoden und Verjüngung durch Säen und Pflanzen.

Die numerische Simulation berechnet die Flüsse und Änderungen der Zustandsvariablen mit prozessabhängig unterschiedlichen zeitlichen Schrittweiten. 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 und die demographischen Prozesse im Jahrestakt berechnet werden. Als treibende klimatische Größen werden Tagesdurchschnittstemperatur, Niederschlag, Luftdruck, Luftfeuchte und Strahlung benötigt.

Das Modell ist für 5 Baumarten parametrisiert (Buche, Kiefer, Fichte, Eiche, Birke).

## **2.1.4 Kopplung ArcEGMO – 4C**

### **2.1.4.1 Zielstellung**

Die Beschreibung des Wasserhaushaltes einer Landschaft oder eines Flussgebietes erfolgt zunehmend anhand hydrologischer Einzugsgebietsmodelle. Diese versuchen, alle für den Gebietswasserhaushalt relevanten Prozesse mehr oder weniger flächenspezifisch zu erfassen. Auf Grund der Größe des Untersuchungsobjektes (wenige bis hin zu mehreren Tausend Quadratkilometern) erfolgt dies jedoch zumeist mit stark vereinfachenden Ansätzen. So umfasst z.B. das Einzugsgebietsmodell ArcEGMO vorrangig konzeptionelle Modellansätze für die Beschreibung von Evapotranspiration, Interzeption, Schneedeckendynamik, Bodenwasserspeicherung, Oberflächen- und Grundwasserneubildung sowie zur Simulation der lateralen Konzentration der einzelnen Abflusskomponenten. Die nötigen Modellparameter werden GIS-gestützt aus Karten der Landnutzung, des Bodens, des Grundwasserflurabstandes und der Topographie des Untersuchungsgebietes sowie Literaturangaben abgeleitet. Eine detaillierte Pflanzenmodellierung erfolgte bisher nicht.

Demgegenüber beschreiben Standortmodelle wie z.B. 4C die einzelnen Prozesse im System Boden-Pflanze wesentlich detaillierter auf Basis umfangreicherer Eingangsdaten, vernachlässigen aber zumeist die lateralen Prozesse und Wechselbeziehungen zwischen benachbarten Standorten.

Mit der Kopplung des Waldwachstumsmodells 4C mit dem Einzugsgebietsmodell ArcEGMO sollten folgende Ziele erreicht werden:

- Berücksichtigung der lateralen Flüsse und Wechselbeziehungen bei der Forstmodellierung
- Validierung der Simulation der Wasserdynamik in einem Forstbestand anhand der Gebietsabflüsse

- Verbesserung des hydrologischen Einzugsgebietsmodells hinsichtlich seiner Eignung zur Untersuchung des Einflusses der Landnutzung auf den Gebietswasser und Stoffhaushalt durch die Implementierung detaillierter Vegetationsmodelle.

#### **2.1.4.2 Modelltechnische Realisierung**

Die Kopplung von komplexen Modellen kann über die folgenden Systemarchitekturen erreicht werden (vgl.(Kofalk, 2001)):

- a) Zugang zu unverknüpften, räumlich verteilten Modellen,
- b) Umprogrammierung bestehender Modelle zu einem einzigen Systemmodell,
- c) Verbindung von existierenden Modellen zu einem einzigen System,
- d) Systemmodell mit Zugang zu detaillierten Teilmodellen.

Die Methode a) ist für die Aufgabenstellung nicht anwendbar, da die zu koppelnden Prozesse in engen Wechselbeziehungen stehen, die einen hohen Integrationsgrad erfordern. Methode b) ist bei der Komplexität der beiden Modelle mit einem nicht vertretbaren Arbeits- und Zeitaufwand verbunden. Systemarchitektur c) bietet sich insbesondere für Modelle an, die unterschiedliche Bereiche beschreiben. Da sowohl ein hydrologischen Einzugsgebietsmodell, als auch das Bestandesmodell 4C z.T. die gleichen Teilprozesse im System Atmosphäre-Pflanze-Boden simulieren, bot sich die letzte Variante an. Diese Systemarchitektur verbindet die Vorteile eines „stand-alone“ Systems (integriertes Modell mit Submodellen, die auf einem Rechner installiert sind) mit denen der räumlich verteilten Modelle.

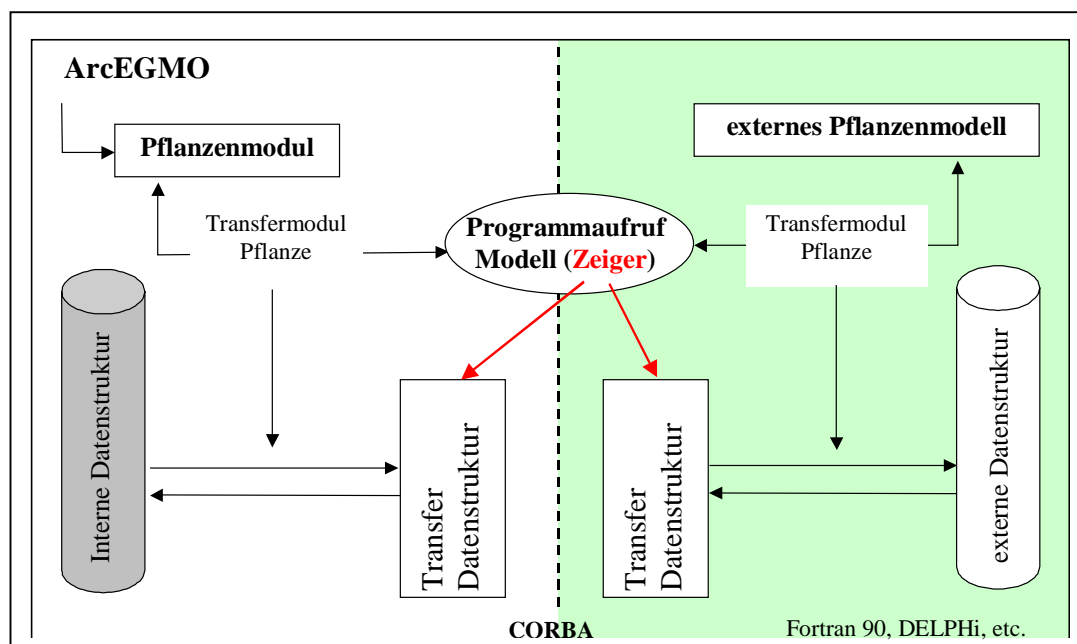
Als Einzugsgebietsmodell wurde das Modell ArcEGMO gewählt. Dieses ist als Toolbox zur hydrologischen Simulation mit einem streng modularen Aufbau konzipiert und unterstützt unterschiedlichste räumliche und zeitliche Diskretisierungen. Damit ist es besonders geeignet, als Systemmodell im Sinne der Variante d) zu dienen.

Die Umsetzung der gewählten Systemarchitektur erforderte, dass die Konzeptionen zur Beschreibung der Wasser- und Stoffflüsse im System Pflanzenbestand - Boden des Waldwachstumsmodells 4C und des hydrologischen Gebietsmodells ArcEGMO aufeinander abgestimmt wurden. Auf Seiten des Forstmodells erfolgte außerdem eine komplette Modularisierung der einzelnen Teilprozessmodelle, die in dieser Strenge für ein „stand-alone“ Modell wie 4C bislang nicht erforderlich war. Andererseits wurde die hydrologische Toolbox ArcEGMO so erweitert, dass bereits existierende Computermodelle (auch in anderen Programmiersprachen) in das Modellsystem implementiert werden können.

Das Einzugsgebietsmodell ArcEGMO war bisher für die Lösung hydrologischer Fragestellungen konzipiert, ohne Nährstoffflüsse zu berücksichtigen. Deshalb mussten im Rahmen der Modellkopplung die Schnittstellen zwischen den Modulen „Meteorologie“, „Abflussbildung“ und „Abflusskonzentration“ (vgl. Abbildung 1, Kap. 2.1.2) um Systemvariablen zur Beschreibung der C- und N-Flüsse erweitert werden. Für die eigentliche Kopplung wurde ein neues Abflussbildungsmodul (ABM2000) entwickelt, welches im Rahmen der ArcEGMO-Simulation die erforderlichen Teilmodelle aus 4C aufruft. Dieses, im folgenden als ABM2000 bezeichnete Modul, umfasst acht Submodule zur Simulation folgender Prozesse:

- **Potentielle Evapotranspiration** (wahlweiser Aufruf der Verfahren nach Turc/Ivanov, Haude oder Penman),
- **Interzeption / Interzeptionsverdunstung** (Speicheransatz analog EGMO),
- **Vegetationsdynamik** (je nach Landnutzung wird das Waldwachstumsmodell 4C, ein Zeitfunktionsansatz für Acker- oder unspezifizierte Forstflächen oder ein statischer Ansatz analog EGMO aufgerufen),
- **Schneedynamik** (wahlweiser Aufruf der Verfahren nach Weise/Wendling oder Koitzsch),
- **Infiltration, Muldenspeicherung und Generierung von oberirdischem Abfluss**,
- **vertikale und laterale Bodenwasserdynamik** (Koitzsch/Glugla-Verfahren wie in 4C mit Erweiterung um hypodermischen und Drainageabfluss),
- **Bodentemperaturdynamik** (Aufruf des Bodentemperaturmodells aus 4C),
- **C/N-Dynamik im Boden** (Aufruf des Boden-C/N-Modells aus 4C),.

Aus den einzelnen Submodulen werden Teilprozessmodelle aus der Modellbibliothek von ArcEGMO bzw. aus externen Modellen aufgerufen. Abbildung 3 beschreibt am Beispiel des Vegetationsmoduls den Aufruf des Vegetationsmodells aus 4C für Forstflächen.



**Abbildung 3** Schnittstelle zwischen einem ArcEGMO-Modul und einem externen Modell

Der Aufruf von externen Teilprozessmodellen in den Submodulen Bodentemperaturdynamik und C/N-Dynamik im Boden erfolgt analog. Vor jedem Aufruf des externen Modells werden die benötigten Systemvariablen auf eine für den Teilprozess spezifische Transferstruktur umgespeichert, diese über einen Zeiger dem externen Modell übergeben, und nach der Abarbeitung wieder aktualisiert. Somit können Teilmodelle

in unterschiedlichen Programmiersprachen und unabhängig von ihrer internen Datenstruktur angesteuert werden.

Die Arbeiten zur Weiterentwicklung des Modellsystems ArcEGMO erfolgten in enger Zusammenarbeit mit dem Büro für Angewandte Hydrologie.

#### **2.1.4.3 GIS-Modell „Schnellbach-Einzugsgebiet“**

Die Anwendung des Modells ArcEGMO setzt die Erstellung eines GIS-Modells für das zu untersuchende Gebiet voraus. Für die Simulation der Teilprozesse des Gebietswasser- und –stoffhaushaltes ist die Ausweisung von Hydrotopen (Flächen gleicher Landnutzung und mit dem gleichen Boden sowie mit ähnlichen hydrologisch wirksamen Gebietseigenschaften wie Grundwasserflurabstand und Oberflächenneigung) und oberirdischen Teileinzugsgebieten, sowie die Hierarchisierung des Gewässernetzes erforderlich.

Insgesamt wurde das 8,7 km<sup>2</sup> große Einzugsgebiet des Schnellbachs in 519 Hydrotopen untergliedert, die 12 oberirdischen Teileinzugsgebieten zugeordnet wurden. Das Grundwassereinzugsgebiet wurde nicht weiter unterteilt.

Im Anhang 1 wird detailliert auf die Gebietseigenschaften, die verfügbare Datenbasis und die einzelnen Bearbeitungsschritte für den Aufbau und die Parametrisierung des GIS-Modells „Schnellbach-Einzugsgebiet“ eingegangen.

#### **2.1.4.4 Ergebnisse**

Die Modellanwendung erfolgte für den Simulationszeitraum 1.1.1981 bis 31.12.1994. Für den Zeitraum 11/1981-12/1993 lagen Pegelmessungen der täglichen Durchflüsse am Gebietsauslass (Pegel Großbadau) zu Modellvalidierung vor.

Es wurde in Tagesschritten gerechnet und folgende räumliche Diskretisierung für die einzelnen ArcEGMO-Module gewählt:

Meteorologie:	Gesamtgebiet
Abflussbildung:	Hydrotopen
Abflusskonzentration (Grundwasser):	Gesamtgebiet
Abflusskonzentration (oberirdischer und hypodermischer Abfluss):	Teileinzugsgebiete
Abflusskonzentration im Gewässer:	Fließgewässerabschnitte

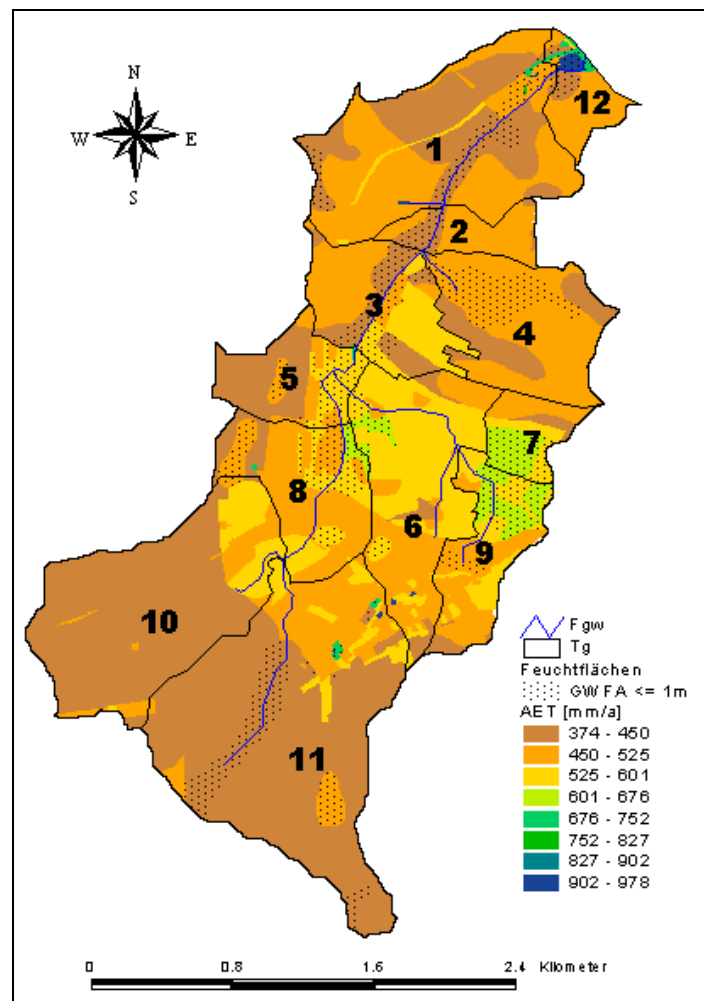
Als Anfangswerte für die Systemvariablen wurden mittlere Zustände angenommen und insbesondere für die Bodenfeuchte eine Auffüllung des Bodens auf Feldkapazität vorausgesetzt. Die Bestände der Forstflächen wurden entsprechend den Angaben aus dem Datenspeicher Waldfonds initialisiert.

In die Auswertung der Simulationsergebnisse wurden die Wasserhaushaltskomponenten Verdunstung, Perkolation und Gebietsabfluss einbezogen.

Abbildung 4 zeigt die mittlere jährliche Verdunstung der einzelnen Hydrotopen für die Jahre 1982-1991. Das Jahr 1981 wurde als Startjahr nicht berücksichtigt, um den Einfluss der Anfangswertbelegung auszuschließen. Es zeigt sich, dass die Waldflächen eine deutlich höhere Verdunstung realisieren, als die übrigen Flächen mit Ausnahme der Wasserflächen. Besonders hohe Verdunstungsraten können auf



den Feuchtflächen mit einem Grundwasserflurabstand (GWFA) von weniger als einem Meter realisiert werden.

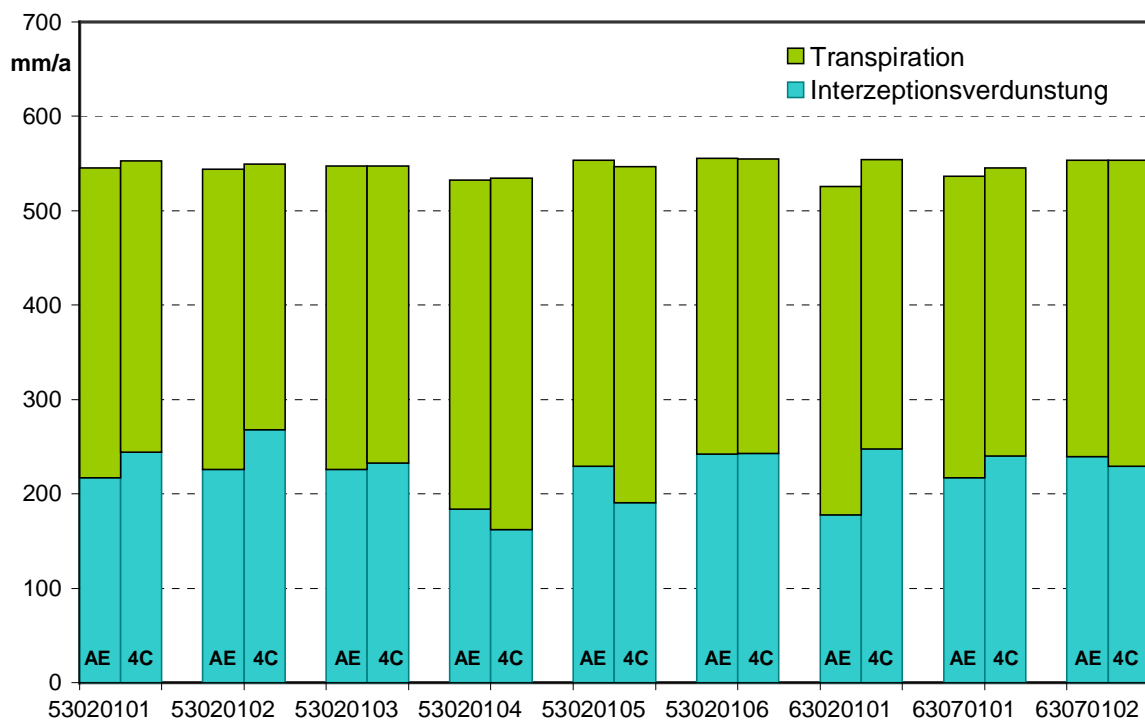


**Abbildung 4** Räumliche Verteilung der mittleren Jahresverdunstung AET [mm/a] im Einzugsgebiet des Schnellbachs (1982-1991)

Entsprechend der Zielstellung des Teilprojektes wurden die mit dem gekoppelten Modell simulierten Verdunstungsanteile mit den Simulationsergebnissen von 4C im „stand-alone“ Betrieb verglichen. In Abbildung 5 sind die für den Zeitraum 1981-94 simulierten Jahresmittel der Verdunstungsanteile Interzeptionsverdunstung und Transpiration beispielhaft für neun Waldflächen gegenübergestellt.

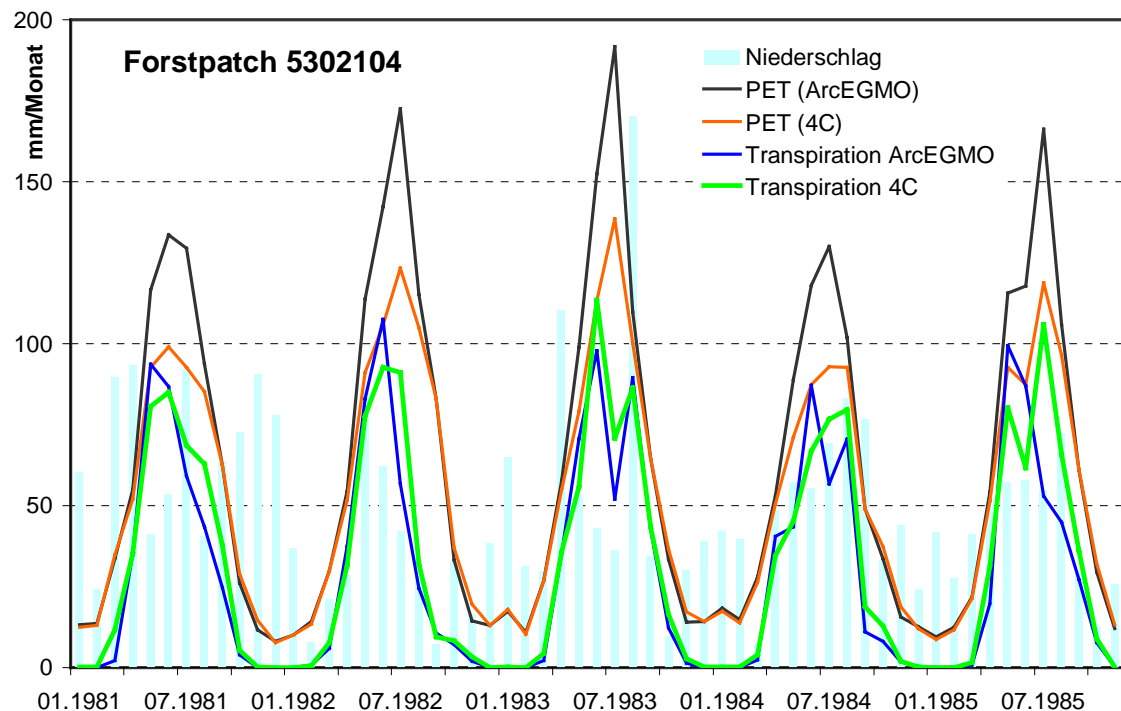
Obwohl die Summe aus beiden Anteilen für die einzelnen Forstbestände recht gut übereinstimmt, ergeben sich doch Unterschiede in dem Verhältnis der beiden Komponenten zueinander. Die Ursachen hierfür liegen zum einen in der Berücksichtigung der lateralen Flüsse im gekoppelten Modell, als zum anderen auch in den unterschiedlichen Modellansätzen für z.B. die Berechnung der Potentiellen Evapotranspiration (PET) als steuernde Größe und für die Berechnung der Interzeption und der Verdunstung des interzeptierten Wassers. Das soll im folgenden am Beispiel des Kiefernreinbestandes 5302104 näher untersucht werden. Abbildung 6 zeigt die Monatssummen der steuernden Größen Niederschlag, PET und der berechneten Transpiration dieses Bestandes. Die mit ABM2000 simulierte PET liegt

deutlich über der in 4C berechneten, da im Einzugsgebietsmodell eine allgemeine Vegetationskorrektur nach (Dyck & Peschke, 1995) angenommen wird. Die PET steuert zwar den Transpirationsbedarf, wird aber durch den stomatären Widerstand, bedingt durch die strahlungsabhängige Photosynthese, modifiziert. Somit legt die reale Transpiration für beide Modellvarianten auf einem vergleichbaren Niveau. Der simulierte erhöhte Verdunstungsbedarf in ABM2000 bewirkt jedoch eine erhöhte Evaporation, die sich aus der Interzeptions- und Muldenspeicherverdunstung sowie der Sublimation der Schneedecke zusammensetzt.



**Abbildung 5** Gegenüberstellung der mittleren Transpiration und Interzeptionsverdunstung, berechnet mittels ArcEGMO (AE) und 4C für 8 Forstbestände im Zeitraum 1981-94

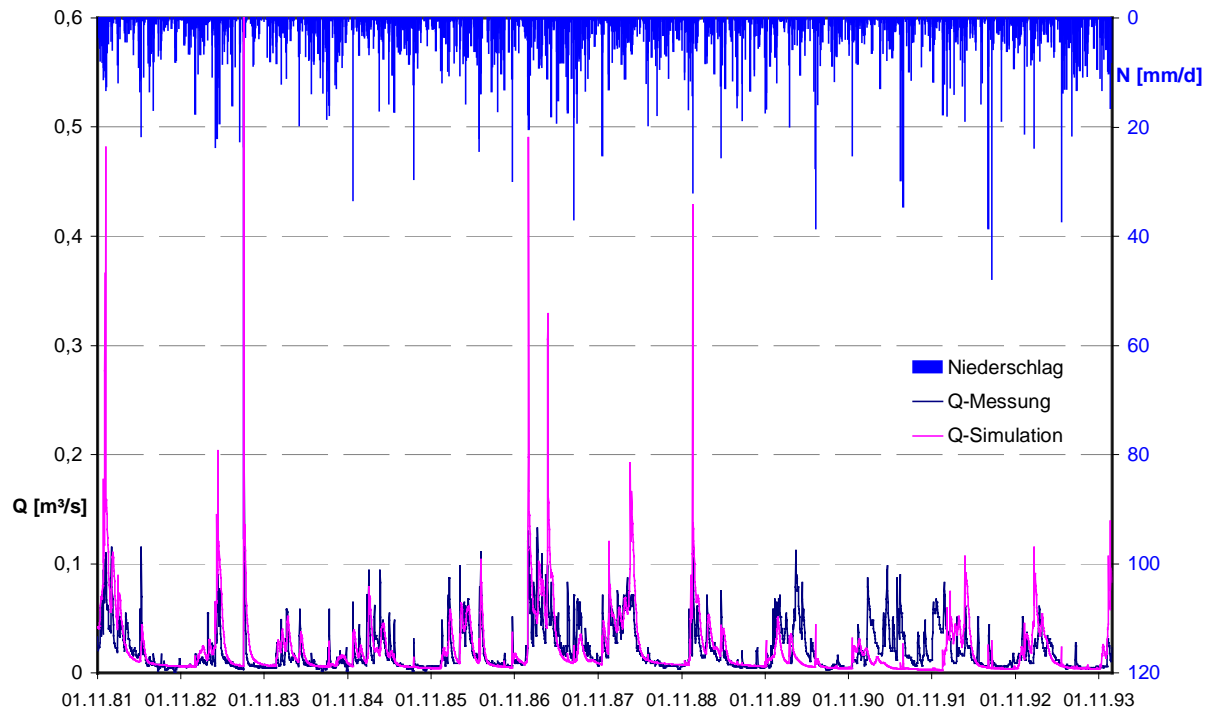
Im Gegensatz dazu ist das stärkere Absinken der realisierten Transpiration in der zweiten Sommerhälfte, die mit dem gekoppelten Modell berechnet wird, in erster Linie auf die Berücksichtigung des Oberflächen- und hypodermischen Abflusses zurückzuführen. Dieses Wasser steht nicht mehr zur Deckung des Transpirationsbedarfs zur Verfügung.



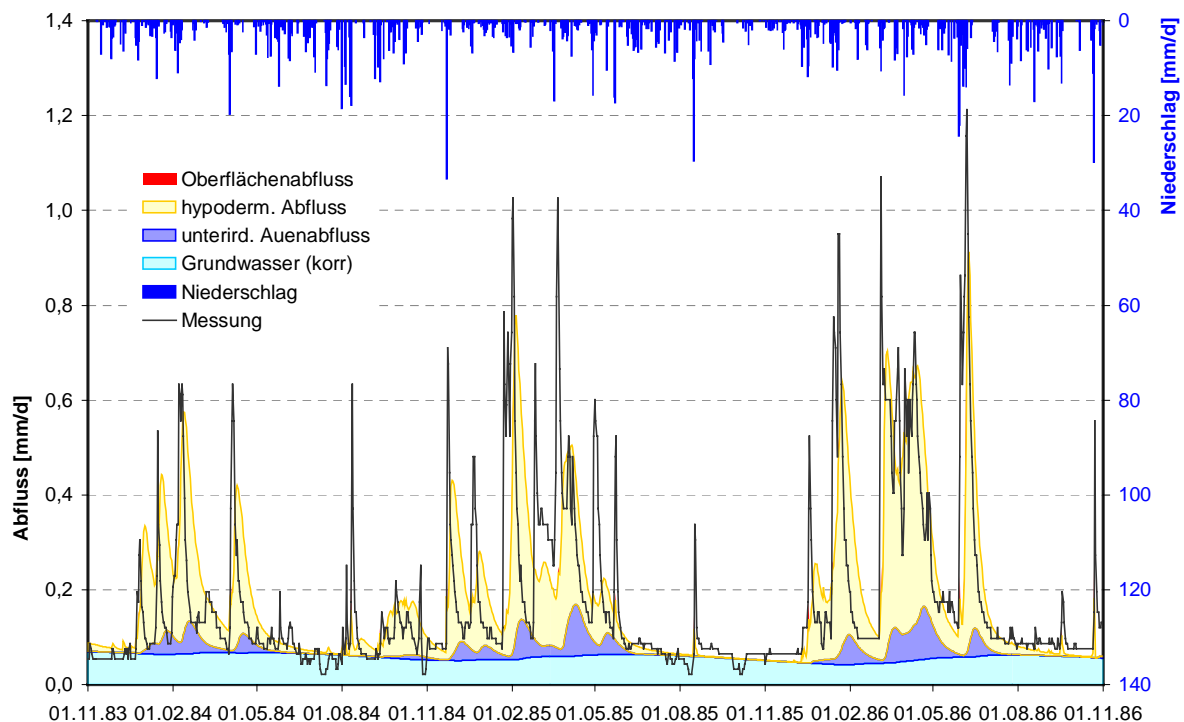
**Abbildung 6** Gegenüberstellung der Monatssummen der Potentiellen Evapotranspiration (PET) und der Transpiration, berechnet mittels ArcEGMO und 4C für 8 Forstbestände im Zeitraum 1981-85 für den Kiefernreinbestand 5302104

Abbildung 7 zeigt den simulierten Durchfluss am Pegel Großbadau im Vergleich zu den beobachteten Werten. Obwohl mit dem gekoppelten Modell die Abflussdynamik insgesamt wiedergegeben wurde, verdeutlicht der Vergleich der Ganglinien jedoch auch Probleme. So kommt es immer wieder zu einer starken Überschätzung der Abflussspitzen nach ergiebigen bzw. lang anhaltenden Niederschlägen. Neben den Grenzen des Modells wird als eine Ursache, warum diese Spitzen nicht beobachtet werden, das Vorhandensein eines kleinen Sees direkt vor dem Pegel, der bei Hochwasser als Polder fungiert, vermutet. Die starken Abweichungen 1990/91 können nicht erklärt werden, da die beobachteten Niederschläge nicht den Verlauf der beobachteten Ganglinie erklären.

Insgesamt ist bei der Analyse der Ganglinien zu beachten, dass das Einzugsgebiet des Schnellbachs ein Teileinzugsgebiet der Parthe ist. Eine Abgrenzung ihres Grundwassereinzugsgebietes ist in diesem Flachlandgebiet kaum möglich. So gibt es unterirdische Zu- und Abflüsse aus den und in die benachbarten Gebiete, die bei einer alleinigen Simulation des Gebietes nicht erfasst werden können.



**Abbildung 7** Gegenüberstellung von simulierten und beobachteten Durchflüssen  $Q$  [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] am Pegel Großbadau sowie dem Gebietsniederschlag  $N$  [ $\text{mm}$ ] in täglicher Auflösung



**Abbildung 8** Simulierte Abflusskomponenten in Gegenüberstellung zum beobachteten Abfluss [ $\text{mm}/\text{d}$ ] am Pegel Großbadau sowie dem Gebietsniederschlag [ $\text{mm}/\text{d}$ ]

Abbildung 8 zeigt für den Zeitraum 1.11.1983 bis 1.11.1986 die Zusammensetzung des simulierten Abflusses aus den einzelnen Abflusskomponenten. Dabei wird

deutlich, dass die Beschreibung der schnellen Abflusskomponenten Oberflächen- und hypodermischer Abfluss noch nicht befriedigend ist. Als Hauptursache wird die noch nicht ausreichende Abbildung der Drainageabflüsse auf den landwirtschaftlichen Flächen, die einen Gebietsanteil von 66 % einnehmen, angesehen. Im Projektzeitraum standen jedoch noch keine ausreichenden Untersuchungen zur Verfügung, um diesen Modellteil zu verbessern. Da das Ziel dieses Projektes auch nicht auf der Untersuchungen der schnellen Abflusskomponenten, sondern primär auf den Untersuchungen des Einflusses der lateralen Flüsse auf einen Forstbestand lag, müssen diese Fragestellungen bzgl. der Güte der Ganglinienanpassung in weiterführenden Untersuchungen geklärt werden.

Insgesamt konnte gezeigt werden, dass die realisierte Systemarchitektur der Kopplung von Teilen des Waldwachstumsmodells 4C mit einem hydrologischen Einzugsgebietsmodell ein geeigneter Weg hin zu komplexen 3-dimensionalen Modellen ist. Durch die Nutzung der detaillierten Modellansätze aus 4C konnte einerseits die Simulationsgüte dieser Modellansätze auch hinsichtlich der Abbildung des Gebietswasserhaushaltes nachgewiesen werden, und zum anderen die Genauigkeit des Flusseinzugsgebietsmodells bzgl. der Abbildung dieser Prozesse wesentlich verbessert werden.

## **2.1.5 Datenbasis**

### **2.1.5.1 Voraussetzungen**

In dieser Studie wird, ausgehend vom Ist-Zustand, die Entwicklung von Wäldern unter möglichen Klima-Änderungen untersucht. Deshalb startet das Waldwachstumsmodell 4C nicht mit einem simulierten Anfangszustand, sondern von einem definierten Bestand, der durch Anzahl der Bäume, Alter, Höhe und Brusthöhendurchmesser beschrieben ist (vgl. Abschnitt 2.1.3). Die erforderlichen Daten werden in der Regel durch die jeweiligen Revierförstereien erhoben und können teilweise genutzt werden. Leider liegen die Daten nur selten als Karte vor, deren Informationen direkt in ein GIS eingebunden werden können, so dass eine Anwendung in der Fläche problematisch wird, da eine eindeutige Zuordnung der Informationen zu den im gekoppelten Modell verwendeten Flächen nicht mehr möglich ist.

Die Modell-Flächen (kleinste, als homogen bzgl. Boden, Bedeckung/Vegetation und Klima betrachtete Flächen) durch die Verschneidung von Bodenkarten, Landnutzungskarten und, sofern vorhanden, Forsteinrichtungskarten bestimmt.

Die Anwendungsgebiete für diese Studie sind das Gebiet des Schnellbachs (Validierungsgebiet, s. Abschnitt 2.1.5.2) und das Land Brandenburg. Analog zum Vorgehen in dem Projekt „Wälder und Forstwirtschaft Deutschlands im Globalen Wandel“ (Projekt 01 LK 9528) werden Abschätzungen für Deutschland anhand repräsentativer Modellbestände und ihrer Zuordnung zu den Wuchsgebieten durchgeführt.

In allen Anwendungsgebieten werden als Triebkräfte verschiedene regionale Klimaszenarien eingesetzt, ein Basisszenario, welches das gegenwärtige Klima widerspiegelt und vier Klima-Änderungsszenarien (s. 2.1.5.6).

### **2.1.5.2 Auswahl des Validierungsgebietes**

Die Auswahl des Validierungsgebietes ist eng an die Zielstellung des Forschungsprojektes geknüpft. Insbesondere durch den Anspruch, die Modellierung der Forstdynamik im Kontext mit dem Gebietswasser- und Kohlenstoffhaushalt zu betrachten, ergeben sich folgende Anforderungen an die Gebietsauswahl:

- hydrologisch lateral abgegrenztes Gebiet (Einzugsgebiet eines Gewässers bzw. Gewässerabschnittes),
- Vorhandensein größerer Forstflächen,
- gut untersucht, d.h. es liegen die wesentlichen Eingangsdaten sowohl für das hydrologische als auch das Forstmodell vor,
- kontinuierlich beobachtet,

Diese Forderung bezieht sich insbesondere auf den Gebietswasser- und -stoffhaushalt. Es sollten möglichst langjährige Messungen des Gebietsabflusses und der Wasserqualität im Gewässer vorliegen.

Gebietsgröße ist der Aufgabenstellung adäquat,

Daten müssen für das Forschungsprojekt verfügbar sein.

Die Gebietsgröße sollte der geplanten mesoskaligen Anwendung des Modells angemessen sein. Da insbesondere die Teilmodelle auf dieser Raumskala schlecht bzw. gar nicht validiert werden können, bietet sich eine genestete Vorgehensweise an. Ideal wäre dafür ein kleineres mesoskaliges Flusseinzugsgebiet, das einerseits ein oder mehrere gut beobachtete Teileinzugsgebiete unterschiedlicher Charakteristika umfasst, und in dem andererseits auch standortbezogenes Monitoring stattfindet.

Entsprechend obiger Vorgaben wurde für die Modellentwicklung und Erstvalidierung das Einzugsgebiet des Schnellbachs ausgewählt. Dieses 315 km<sup>2</sup> große Gebiet wird durch das Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle (UFZ) und seine Partnereinrichtungen wie die Staatliche Umweltbetriebsgesellschaft, FB 31 Lysimeterstation Brandis, untersucht (Keese et al., 1996). Durch die Kooperation zwischen UFZ und PIK im Rahmen des BMBF-Förderschwerpunktes „Elbeökologie“ sind diese Untersuchungsergebnisse zugänglich. Eine detaillierte Beschreibung des Gebiets ist im Anhang zu finden.

### **2.1.5.3 Datengrundlage und Datenergänzung zur Bestandes-Initialisierung**

Die Bestandesinitialisierung für das Waldwachstumsmodell 4C erfolgt auf der Grundlage der Datenspeicher Waldfonds (DSW) in den Versionen der Länder Sachsen und Brandenburg.

Die Sächsische Landesanstalt für Forsten (LAF) in Graupa hat mit Stand vom 1.1.2000 einen Auszug aus dem Datenspeicher mit den folgenden Daten zur Verfügung gestellt:

- Forstadresse,
- Baumart,
- Bestandes-Schicht,
- Alter,

- Höhe,
- Bruthöhendurchmesser,
- Volumen und
- Grundfläche.

Dabei ist die kleinste zusammenhängende Dateneinheit die Baumartenzeile. Eine forstliche Teilfläche als Bewirtschaftungseinheit der Praxis kann bis zu drei Bestandesgruppierungen (Bestände) aufweisen, die ihrerseits wiederum durch eine oder mehrere Datenzeilen charakterisiert werden können. Die maximale Zeilenanzahl pro Teilfläche ist jedoch auf neun beschränkt. Nähere und ausführliche Beschreibungen der Datenstruktur des Datenspeichers einschließlich der Definitionen der zugeordneten Begriffe und Klassifizierungen und der Verzeichnisse der verwendeten Codierungen enthalten die Forsteinrichtungsanweisungen der Bundesländer.

Die Daten des Datenspeichers Waldfonds basieren auf der Forsteinrichtung von 1988 und wurden in den Folgejahren mit Hilfe der Datenspeicher-Algorithmen bis zum Jahr 1993 fortgeschrieben unter Berücksichtigung der zwischenzeitlich zu verzeichnenden Naturalvollzüge. Sie entsprechen demzufolge dem Zustand der Wälder zu Beginn des Jahres 1993. Mit diesen bestandes- und schichtenspezifisch vorliegenden Daten werden die Zustandsgrößen der Baumkohorten für den Beginn des ersten Simulationsjahres bestimmt.

Zur Initialisierung von ganzen Beständen mit dem Waldsukzessionsmodell 4C bedarf es aufgrund der Zielsetzung der möglichst vollständigen Abbildung komplexer Ökosysteme und ihrer Rückwirkungen auf die Umwelt vollständiger Dimensionsdaten der Zeilen des Datenspeichers. Es treten jedoch forsteinrichtungstechnisch bedingt Fälle auf, in denen einzelne Datenzeilen keine oder nur teilweise Dimensionsdaten aus der forstlichen Taxation (Höhe, Durchmesser, evtl. Grundfläche) enthalten. Außerdem kann die Altersangabe unter bestimmten Umständen fehlen.

Diese Fälle unvollständiger und daher für die Anwendung des Modells 4C zu ergänzender Datenzeilen des DSW sind im einzelnen:

1. **Zu junge Bestände,**  
für die nach den Forsteinrichtungsanweisungen noch
  - kein BHD (da unter der Derbholzgrenze von 7 cm),
  - keine Höhe (da unter 2m) bzw.
  - keine Bestandesgrundfläche (da mittlerer Bestandesdurchmesser unter ca. 12-15 cm; verfahrensbedingt) erhoben wird.
2. **Jüngere und ältere Bestände ganz normaler Datenstruktur,**  
die aus unterschiedlichen Gründen Datenlücken (unvollständige Aktualisierung etc.) aufweisen. Es fehlen dann die Werte für BHD und/oder Höhe.
3. **Überhälter in den Beständen,**  
d.h. flächig verteilte Altbäume (Vorbestandsreste) mit einem Grundflächenschlussgrad (Bestockungsgrad) unter 0.4. Diese Datensätze enthalten keine Werte für Alter und Höhe, sondern lediglich für Durchmesser( $d_{1.3}$ ) und Volumen.
4. **Plenterartige Bestände,**  
deren Definition nach der Betriebsregelungsanweisung Brandenburg lautet:  
stufige Bestände = einzelne Bestandesschichten sind nicht erkennbar (z.B. bei

Plenterstruktur oder bei ungleichaltrigen Beständen).

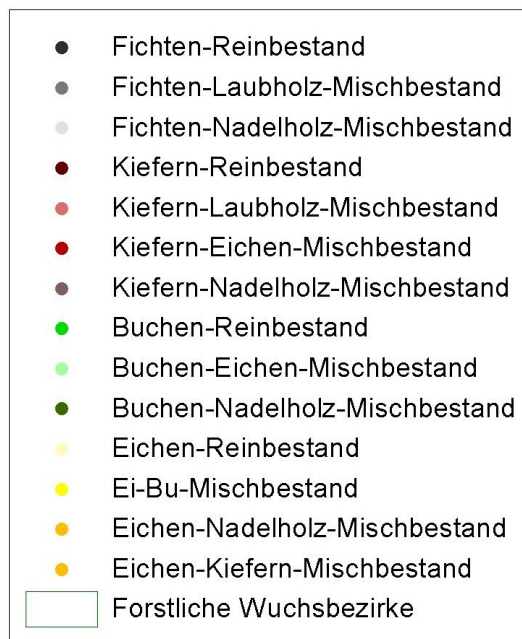
Die Datensätze (Baumarten-Zeilen) der plenterartigen Bestände enthalten nur noch Werte zum mittleren BHD, zur (Anteils-)Flächengröße und zum Volumen. Es fehlt eine Altersangabe.

Die Datenaufbereitung einschließlich der Auffüllung der Datenlücken ist im Anhang 2 detailliert beschrieben.

#### **2.1.5.4 Brandenburg**

Das Institut für Forstökologie und Walderfassung der Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft Hamburg stellte für Modellrechnungen im Rahmen des Projektverbundes „Wälder und Forstwirtschaft Deutschlands im Globalen Wandel“ bundesweite Waldinventurdaten als Eingangsdaten zur Verfügung. Für die neuen Bundesländer wurde das Rasternetz der Ökologischen Waldzustandskontrolle (ÖWK) der DDR mit dem Datenspeicher Waldfonds (DSW), der Forsteinrichtungsdatenbank mit Angaben zu Bestandes- und Standortverhältnissen, verknüpft. Die bestandesbezogenen Bestockungsdaten wurden generiert, indem die ÖWK -Flächen (Stand 1986) mittels Flächenübergangstabellen (von 1986 nach 1993) über die Bestandesadressen mit dem DSW-Datensatz der Bodenverwertungs- und Verwaltungs- GmbH Berlin (Stand 1993) verknüpft wurden. Die Verknüpfung war aufgrund von vereinigungsbedingten Zuordnungsproblemen nicht in allen Fällen erfolgreich, so dass nur 85% der 2600 ÖWK Standorte mit Bestandesinventurdaten versehen werden konnten. Aus diesem Datensatz wurden für das Bundesland Brandenburg 488 Standorte ausgelesen, aus denen für die Untersuchungen in diesem Projekt wiederum eine Auswahl (bedingt durch fehlende Bodenparametrisierung) von 439 Flächen getroffen wurde. Für diese Flächen liegt aufgrund einer GIS- Verschneidung neben der Bestandesinformation auch die Bodeninformation (s. Abschnitt 2.1.5.7) und die Zuordnung zu einem der 40 Klimaszenarienstandorte Brandenburgs vor ( s. Abschnitt 2.1.5.6). Abbildung 9 zeigt die ausgewählten ÖWK-Flächen und ihren Waldtyp.





**Abbildung 9** Karte der verwendeten ÖWK-Bestände in Brandenburg, angegeben ist der Waldtyp

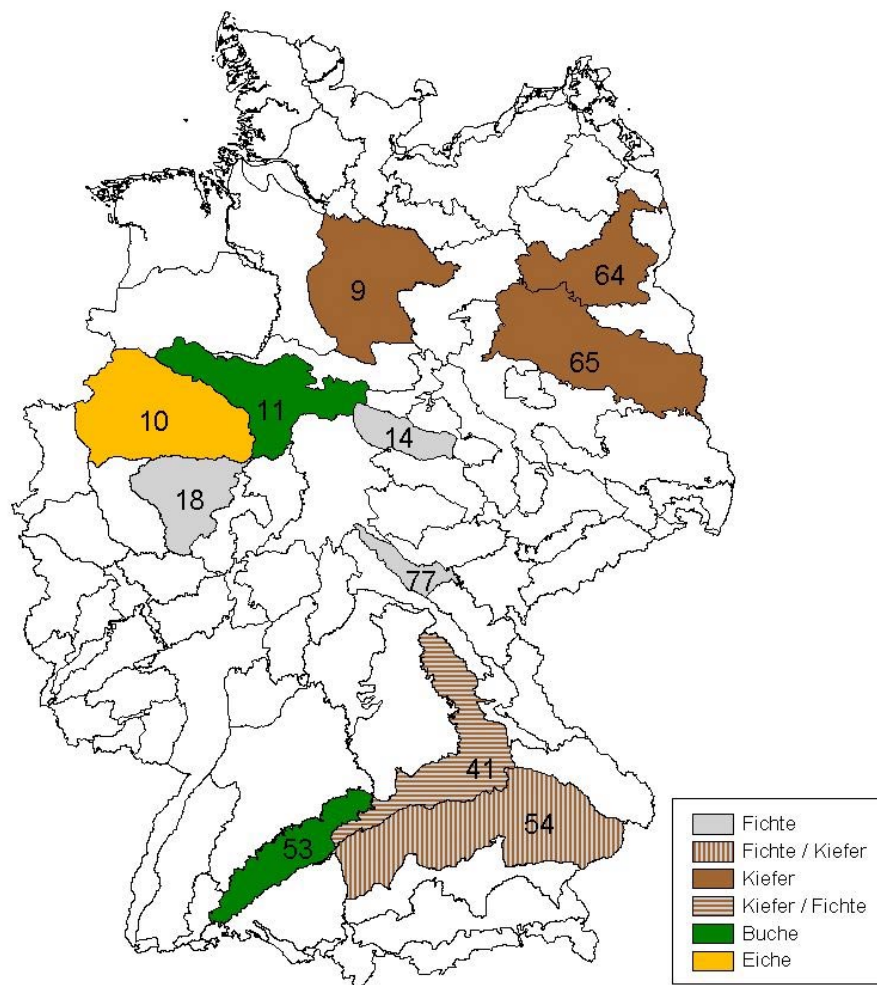
### 2.1.5.5 Deutschland

Im Rahmen des Projektes „Wälder und Forstwirtschaft Deutschlands im Globalen Wandel“ wurde das Forstbetriebsmodell "Deutschland" entwickelt, das an Hand von 200 Modellbeständen in 12 forstlichen Wuchsgebieten der Bundesrepublik Deutschland die gesamte Waldfläche Deutschlands beschreibt (Duschl & Suda, 2001). Aus diesen 200 Beständen wurden pro Wuchsgebiet ein bis zwei Bestände ausgewählt (die beiden häufigsten Altersklassen oder bei Mischbeständen je einer jeder Art) und über Ertragstafelwerte beschrieben, siehe Tabelle 2. In Abbildung 10 sind die Wuchsgebiete, in denen die Modellbestände liegen, dargestellt.

**Tabelle 2** Überblick über die Modellbestände des forstlichen Betriebsmodells "Deutschland", die mit 4C simuliert wurden

No.	Waldtyp	forstliches Wuchsgebiet	Alterklasse	Bonität
1/2	Fichte - -	14 ('Niedersächsischer Harz')	2/4	II
3/4	Fichte - -	18 ('Sauerland')	2/4	III
5/6	Fichte - -	54 ('Tertiäres Hügelland')	2/4	I
7/8	Fichte - -	77 ('Thüringer Gebirge')	2/4	II
9/10	Kiefer - -	9 ('Ostniedersächsisches Tiefland')	2/4	III
11/12	Kiefer - -	64 ('Nordbrandenburger Jungmoränenland')	2/4	II
13/14	Kiefer - -	65 ('Mittelbrandenburger Talsand- und Moränenland')	2/4	II
15/16	Buche - -	11 ('Weserbergland')	4/6	II
17/18	Buche - -	53 ('Schwäbische Alp')	4/6	III
19/20	Eiche- -	10 ('Westfälische Bucht')	5/3	II
	Fichte- Kiefer -	54 ('Tertiäres Hügelland')		
21	Fichte		2	I
22	Kiefer		2	I
	Kiefer-Fichte -	41 ('Frankenalb und Oberpfälzer Jura')		
23	Kiefer		4	II
24	Fichte		4	III

## Forstliche Wuchsgebiete Deutschlands



**Abbildung 10** Karte der forstlichen Wuchsgebiete Deutschlands; farblich hervorgehoben die Wuchsgebiete, in denen die betrachteten Modellbestände liegen.

### 2.1.5.6 Klimadaten und Klimaszenarien

Die Abteilung "Klimasystem" des PIK entwickelte fünf Klimaszenarien, die für 40 meteorologische Stationen in Brandenburg vorliegen. Das Basisszenario repräsentiert das Klima des Zeitraums 1951-1990. Um die Unsicherheiten der gegenwärtigen GCMs (Global Circulation Model) widerzuspiegeln, wurden 2 Klimaerwärmungsszenarien entwickelt. Sie wurden für einen Zeitraum von 55 Jahren erzeugt auf der Basis einer Temperaturerhöhung von 1.5 K (nach Szenarienrechnungen des GCM ECHAMT21 des MPI für Meteorologie Hamburg (Cubasch et al., 1992) und der Annahme einer extremen Erwärmung von 3K. Zusätzlich gibt es noch 2 Abkühlungsszenarien, -1.5 K und -3.0 K, in Anlehnung an eine mögliche Klimaänderung in Folge einer geänderten thermohalinen Zirkulation (Rahmstorf & Ganopolski, 1999). Die Szenarien sind sogenannte Gleichgewichtsszenarien, dass heißt sie wurden nach

der angenommenen Temperaturänderung generiert und repräsentieren im langjährigen Mittel diese Temperaturänderung. Zur Erzeugung wurde eine Methode von (Werner & Gerstengarbe, 1997) eingesetzt, die statistische Methoden nutzt, um die Information aus globalen Klimamodellen in eine kleinräumigere Auflösung zu übersetzen. Die Klimaänderungsszenarien wurden bereits erfolgreich für andere Untersuchungen eingesetzt (Krysanova et al., 1999; Lasch et al., 1999)

Eine vergleichende Analyse aller Klimaszenarien zeigt, dass die beiden Abkühlungsszenarien im Mittel aller Stationen mit einer Niederschlagserhöhung verbunden sind, während die beiden Erwärmungsszenarien vorwiegend Niederschlagsreduktionen beinhalten (s. Tabelle 4). Die Änderung der Jahresmitteltemperatur ist in Tabelle 3 dargestellt. Es wird deutlich, dass die aufgeprägte Temperaturänderung näherungsweise im Mittel der Stationen realisiert wird.

**Tabelle 3** 40-jährige Mittel, Minima und Maxima der Jahrestemperatur, gemittelt für alle 40 meteorologischen Stationen der Klimaszenarien

Temperatur °C	-3.0 K	-1.5 K	Basis	+1.5 K	+3.0 K
<b>Mittel</b>	6.1	7.7	8.8	10.8	12.3
<b>Min.</b>	5.5	7.0	8.2	10.1	11.7
<b>Max</b>	6.6	8.2	9.3	11.3	12.8

**Tabelle 4** 40-jährige Mittel, Minima und Maxima der Jahresniederschlagssumme, gemittelt für alle 40 meteorologischen Stationen der Klimaszenarien

Niederschlags-summe (mm)	-3.0 K	-1.5 K	Basis	+1.5 K	+3.0 K
<b>Mittel</b>	607.0	618.2	578.7	495.6	515.8
<b>Min.</b>	489.2	500.2	514.2	416.3	414.5
<b>Max</b>	708.8	711.2	673.6	572.4	631.1

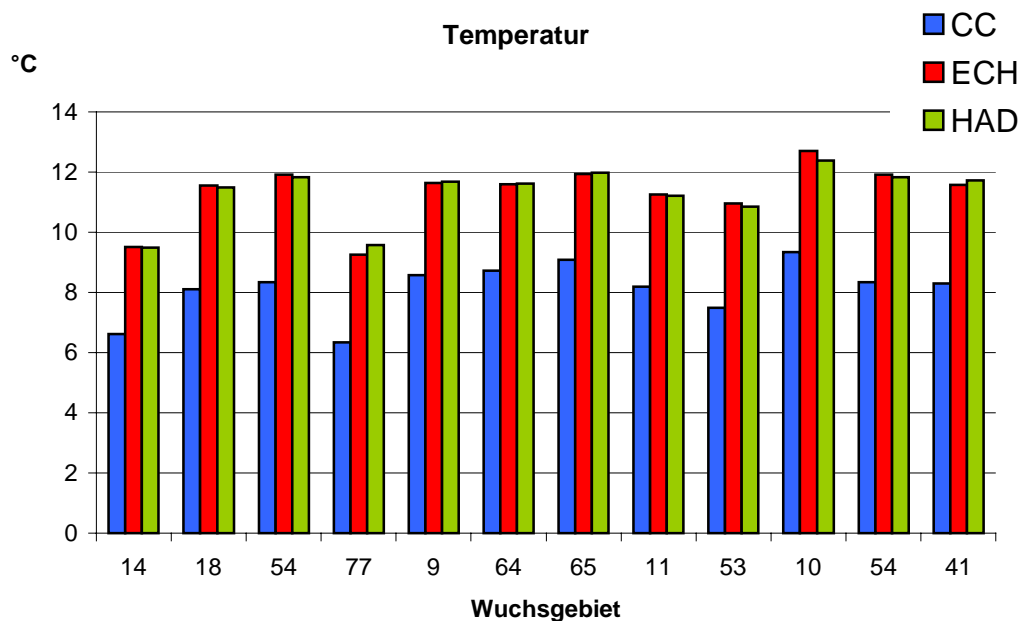
Eine Analyse der Änderung der Niederschlagsverhältnisse der 40 Stationen unter den Klimaszenarien zeigt, dass regional unterschiedliche Veränderungen von den Szenarien realisiert werden.

**Tabelle 5** Minima und Maxima der Abweichungen der langjährigen Mittel der Jahresniederschlagssumme der Klimaszenarien vom Basisszenario

[mm]	-3.0 K	-1.5 K	+1.5 K	+3.0 K
<b>Maxima</b>	107.1	109.8	-35.0	27.9
<b>Minima</b>	-58.0	-26.7	-145.4	-143.5

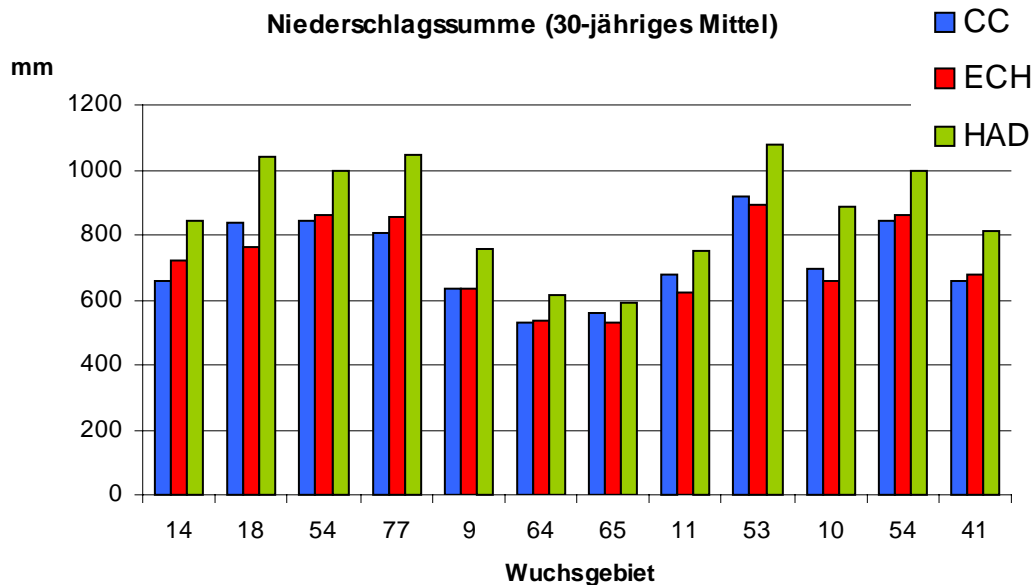
Das Klimaszenario +1.5 K führt zu Niederschlagsreduktionen an allen 40 Stationen zwischen 35 und 145 mm im langjährigen Mittel, im Szenario -1.5 K dagegen variiert die Niederschlagsänderung zwischen einer Zunahme des Niederschlags um 109 mm und einer Abnahme um 26 mm (Tabelle 5).

In Rahmen des Projektes „Wälder und Forstwirtschaft Deutschlands im Globalen Wandel“ wurden 2 Klimaänderungsszenarien genutzt, (Lindner & Cramer, 2001), die in diesem Projekt für die Untersuchungen der Bestände des Modellbetriebs Deutschlands (Duschl & Suda, 2001) eingesetzt wurden. Die Klimaszenarien basieren auf den GCM-Simulationen HADCM2-SUL (HAD-Szenario) und ECHAM4/OPYC3 (ECH-Szenario) und zeigen einen Temperaturanstieg für den Zeitraum 2041-2070 von 2.9 - 3.6 K. Die genaue Ableitung der Szenarien für Standorte von Inventurpunkten, an denen das Modell 4C simuliert wurde, ist in (Lasch et al., 2001; Lindner & Cramer, 2001) beschrieben. Abbildung 11. zeigt, dass die Temperaturänderung für beide Klimaszenarien in allen Wuchsgebieten (Nummern siehe Tabelle 1) fast gleich erfolgt.



**Abbildung 11** Langjährige Mittel der Jahresmitteltemperatur für Basis (CC)-, HAD- und ECH-Szenario.

Die Niederschlagsänderungen dieser beiden Szenarien fallen verschieden aus: beim HAD-Szenario ist für alle betrachteten Wuchsgebiete der Niederschlag erhöht, beim ECH-Szenario gibt es sowohl höhere als auch niedrigere Niederschläge (siehe Abbildung 12).



**Abbildung 12** Langjährige Mittel der Jahresniederschlagssumme für Basis (CC)-, HAD- und ECH-Szenario.

### 2.1.5.7 Bodendaten

Das Modell 4C benötigt eine detaillierte Bodenbeschreibung der Standorte, an denen Bestände gerechnet werden. Diese Information kommt in allen Anwendungsfällen aus der BÜK 1000 der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR, Hannover). Die dort angegebenen typischen Bodenprofile beziehen sich auf landwirtschaftlich genutzte Standorte. Abgesehen davon, dass in der gleichen Region der Wald u.U. auf einem ganz anderen „typischen“ Boden steht, ergeben sich bei den C- und N-Vorräten zwischen Acker- und Waldböden erhebliche Unterschiede. Für einen Teil der BÜK-Böden sind von der BFH bereits charakteristische Bodenprofile an Waldstandorten bereitgestellt worden. Diese Informationen liegen leider nicht flächendeckend vor, so dass in jedem Fall konkret geprüft wurde, ob das landwirtschaftliche Bodenprofil auf den Waldstandort übertragen werden konnte. Im Zweifelsfall wurde der Standort aus der Berechnung ausgeschlossen.

## 2.1.6 Untersuchung der C-Bilanzen

### 2.1.6.1 Methodik

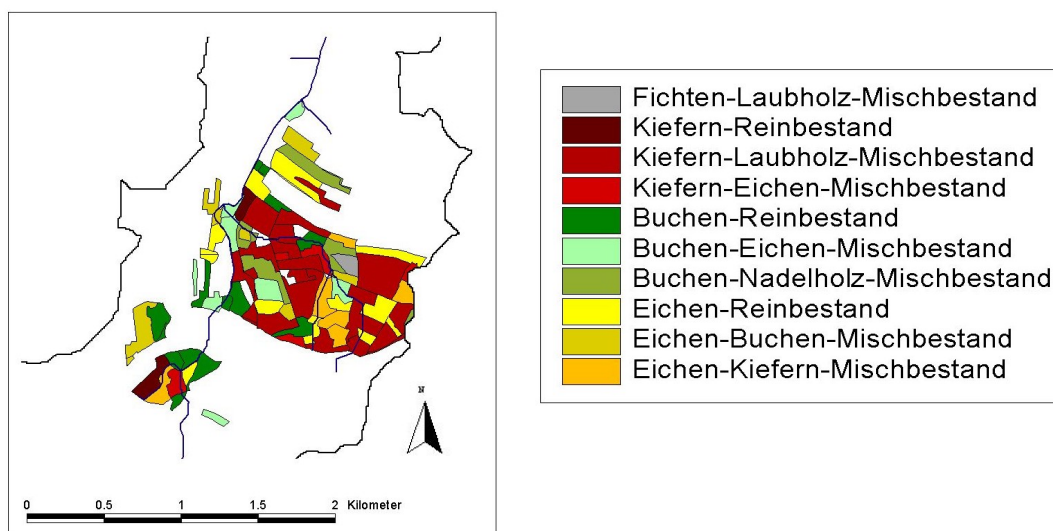
Diese Studie konzentriert sich darauf, Änderungen in der Kohlenstoffspeicherung von Waldökosystemen (Kohlenstoff des Waldbestands einschließlich des im Boden gespeicherten Kohlenstoffs) unter sich verändernden klimatischen Bedingungen sowie unterschiedlichen Bewirtschaftungsstrategien zu untersuchen. Dazu werden für die simulierten Bestände Kohlenstoffbilanzen unter allen fünf Klimaszenarien errechnet und die Änderungen der C-Speicherung unter den vier Klimaänderungsszenarien in Relation zum Basisszenario abgeschätzt. Die Simulationszeit beträgt 40 Jahre.

Zur Bestimmung der C-Bilanz werden verschiedene C-Speicher berechnet. Zunächst werden im Simulationszeitraum alle durch Mortalität ausscheidenden Stämme erfasst

und deren C-Gehalt im separaten C-Speicher  $C_{\text{mort}}$  aufsummiert. Weiterhin wird die totale C-Speicherung  $C_{\text{sum}}$  pro Bestand am Ende des Simulationszeitraums bilanziert als Summe des C-Speichers im Bestand  $C_{\text{bio}}$  (C-Gehalt der Biomasse des Bestandes einschließlich Wurzeln), des C-Speichers im Boden  $C_{\text{bod}}$  (organischer Kohlenstoff in der Auflage und im Mineralboden) des letzten Jahres und der kumulativen Größe  $C_{\text{mort}}$ . Weiterhin wird die NEP (gemittelt über den Simulationszeitraum) zur Einschätzung der jährlichen C-Speicherungsrate herangezogen.

#### 2.1.6.2 Einzugsgebiet des Schnellbachs

Die Waldflächen des Schnellbach-Einzugsgebiets sind etwa zur Hälfte mit Kiefern-Reinbeständen bestockt, neben einigen Buchen- und Eichen-Reinbeständen besteht der Rest überwiegend aus Laubholz-Mischbeständen (s. Abbildung 13).



**Abbildung 13** Waldtypen des Schnellbach-Einzugsgebietes

Da das gesamte Einzugsgebiet klimatisch keine Differenzierung aufweist, wurden auf alle ausgewiesenen Waldflächen des Gebietes dieselben fünf Klimaszenarien angewendet (vgl. 2.1.5.6). Für jeden Bestand wurden der Kohlenstoffpool  $C_{\text{sum}}$  (siehe 2.1.6.1) und der Kohlenstofffluss NEP (siehe 1.4) bestimmt. Abbildung 14 gibt einen Überblick über den im Gesamtsystem (Bestand und Boden) gespeicherten Kohlenstoff nach 40 Jahren Entwicklung unter dem Basisszenario. Die Unterschiede sind nur auf den Waldtyp zurückzuführen, da für alle Waldbestände eine einheitliche Bodenparametrisierung angenommen wurde.

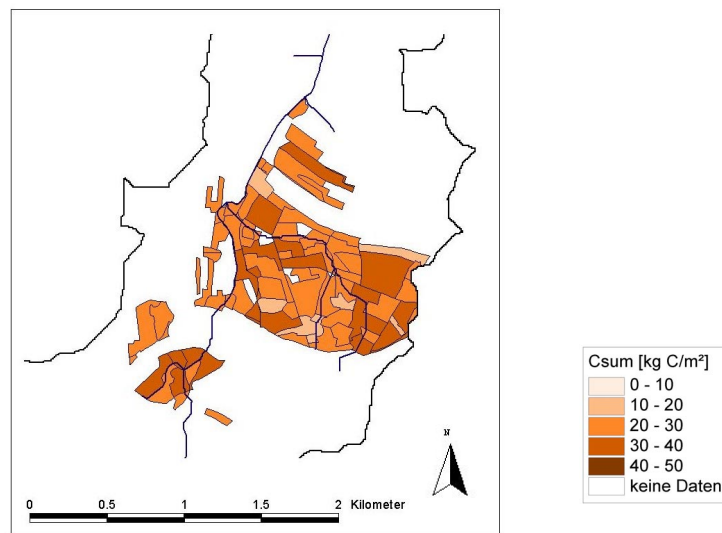
Das gleiche gilt auch für die relativen Änderungen der C-Speicherung unter den vier Klimaänderungsszenarien im Verhältnis zum Basisszenario (Abbildung 14), die (bis auf wenige Ausnahmen) für fast alle Bestände zu einer Reduzierung der C-Speicherung führen. Das Abkühlungsszenario  $-1.5\text{ K}$  bewirkt die geringsten Änderungen in der C-Speicherung im Vergleich zum Basisszenario; die größten Verluste zeigen sich hier bei den Eichen-Beständen, die als wärmeliebende Art auf den Temperaturrückgang in diesem Szenario (s. Tabelle 6) stärker reagieren als die anderen Bestände. Der Rückgang in der C-Speicherung ist für das Erwärmungsszenario  $+1.5\text{ K}$ , das mit einer drastischen Niederschlagsreduktion verbunden ist, am deutlichsten. Lediglich einige Eichenbestände zeigen hier, wie auch beim  $+3.0\text{ K}$ -Szenario, nur



eine geringe Abnahme bzw. sogar eine leichte Zunahme der C-Speicherung. Deutlicher werden diese Unterschiede in der relativen Änderung der NEP (s. Abbildung 16), die für alle anderen Bestände (mit Ausnahme des –1.5 K-Szenarios) einen kräftigen Rückgang aufweist. Dass die C-Speicherung unter dem +3.0 K-Szenario günstiger ausfällt als unter dem +1.5 K-Szenario liegt an der besseren Wasserversorgung (s. Tabelle 6) des +3.0 K-Szenarios.

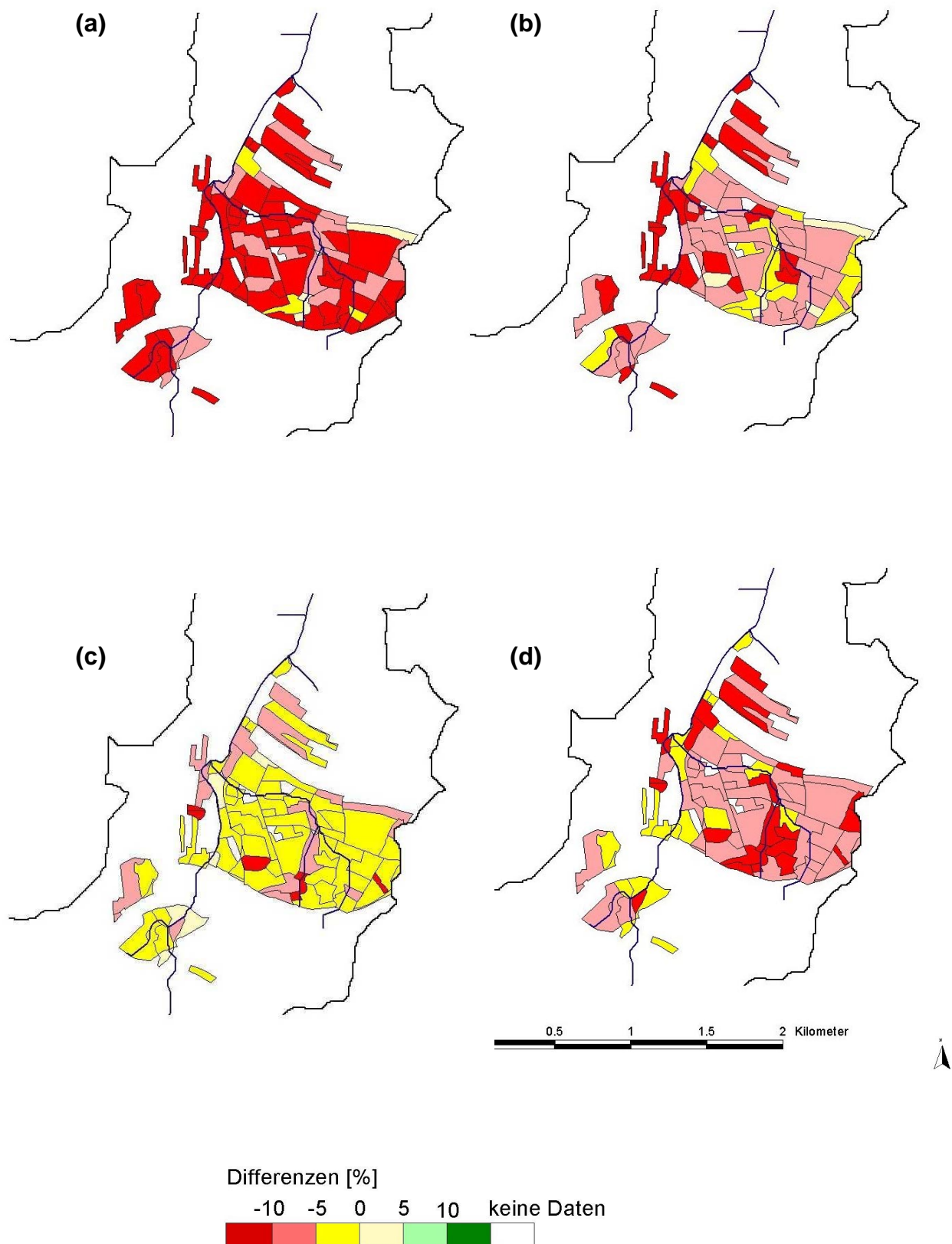
**Tabelle 6** 40-jährige Mittel der Jahrestemperatur und der Jahresniederschlagssumme der Klimaszenarien für das Schnellbach-Einzugsgebiet

	-3.0 K	-1.5 K	Basis	+1.5 K	+ 3.0 K
<b>Temperatur °C</b>	6.4	7.9	9.1	11.0	12.6
<b>Niederschlag [mm]</b>	628	642	583	470	513

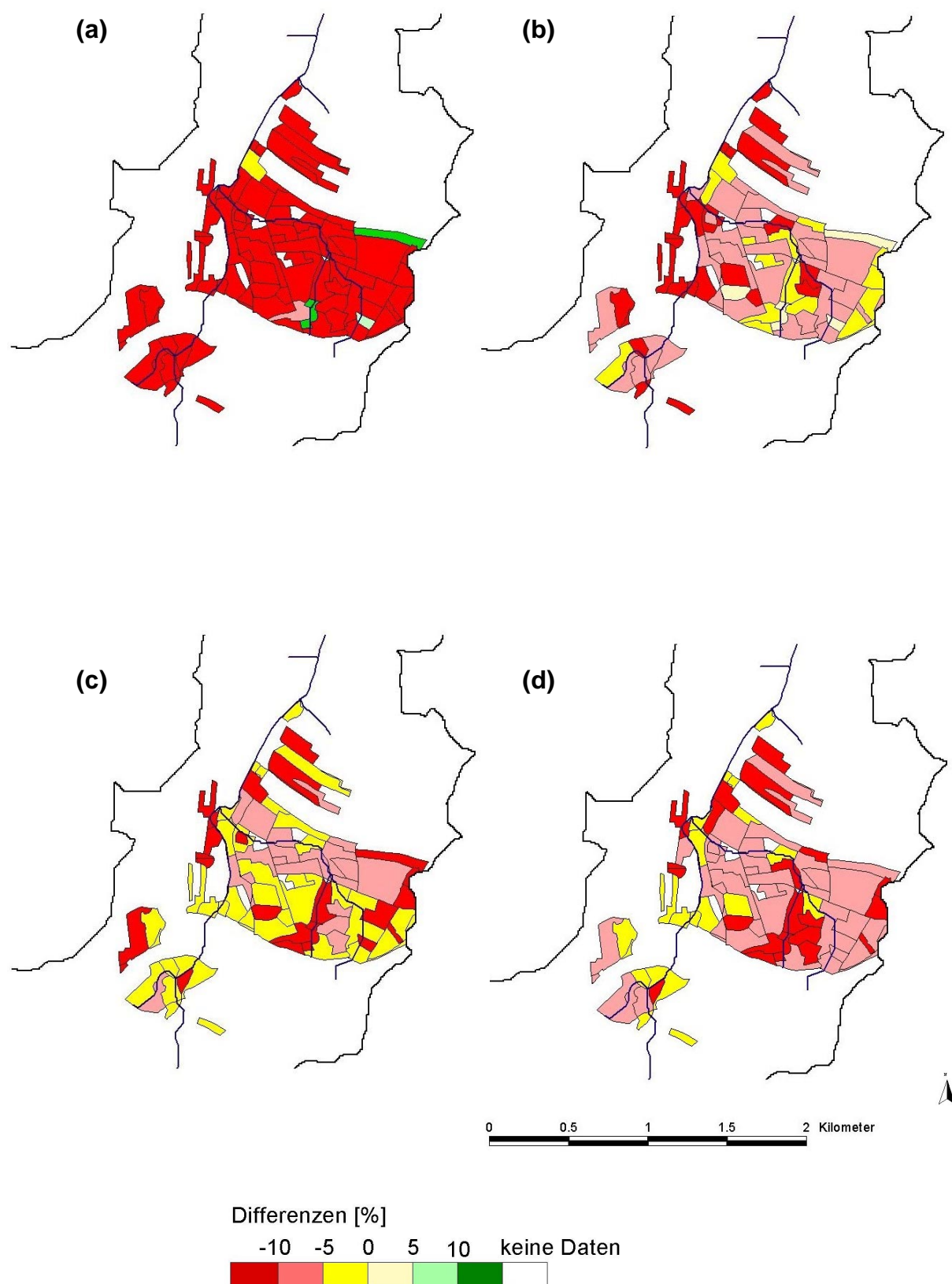


**Abbildung 14** Gesamtkohlenstoff  $C_{\text{sum}}$  der Waldbestände des Schnellbach-Einzugsgebiets und nach 40 Jahren Entwicklung unter Basisszenario





**Abbildung 15** Relative Änderungen der totalen C-Speicherung über 40 Jahre im Schnellbach-Einzugsgebiet für die vier Klimaszenarien +1.5 K (a), +3.0 K (b), -1.5 K (c), -3.0 K (d) im Verhältnis zum Basisszenario



**Abbildung 16** Relative Änderung der jährlichen Kohlenstoffspeicherung (NEP) gemittelt über 40 Jahre im Schnellbach-Einzugsgebiet für die vier Klimaszenarien +1.5 K (a), +3.0 K (b), -1.5 K (c), -3.0 K (d)

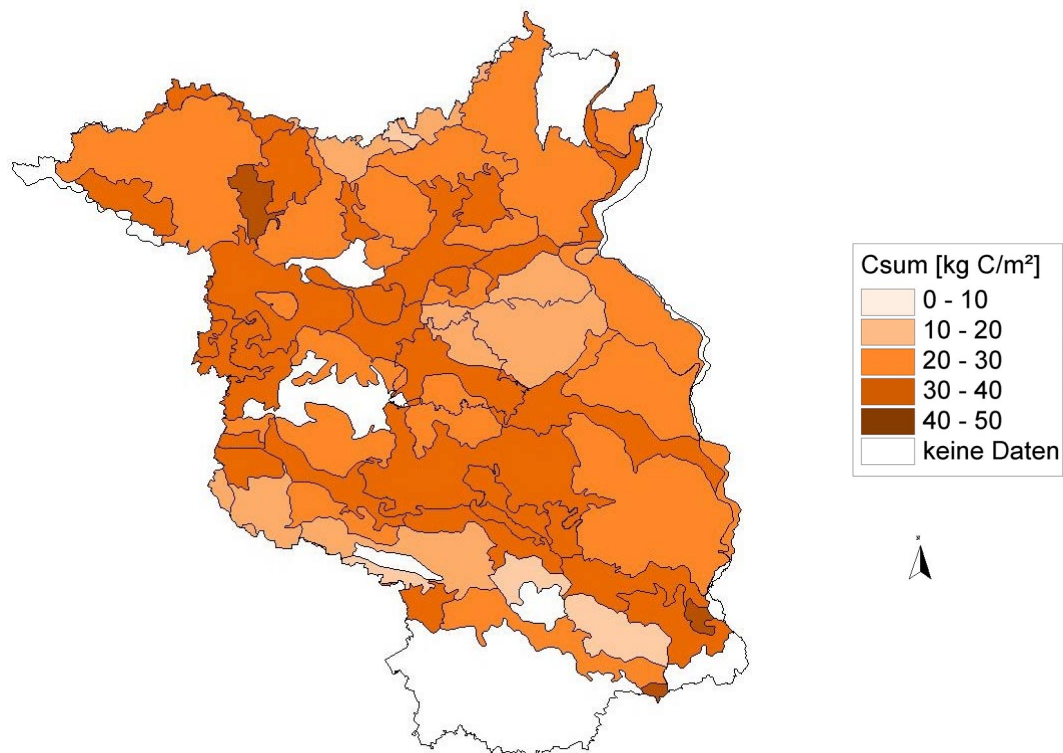
### 2.1.6.3 Brandenburg-Bestände der ÖWK

An allen 439 ÖWK-Standorten in Brandenburg wurden jeweils fünf Modellsimulationen mit den im Kapitel 2.1.5.6 beschriebenen Klimaszenarien über 40 Jahre durchgeführt. Dabei wurden keine forstlichen Eingriffe simuliert. Die Ergebnisse der Einzelsimulationen wurden pro Wuchsbezirk aggregiert, wobei hier der Waldtyp außer Acht gelassen wurde. Dazu wurde eine Wuchsbezirkkarte Brandenburgs benutzt (Wolff, 2001). Zur Aggregation wurden alle Werte der betreffenden darzustellenden Größen (NEP,  $C_{\text{sum}}$ ) für die ÖWK-Bestände gemittelt, die in dem betreffenden Wuchsbezirk liegen. Daher ist der berechnete Wert nicht repräsentativ für **alle** Waldbestände eines Wuchsgebietes, sondern nur für die Bestände der ÖWK-Flächen. In diese Mittelung gehen daher nur aufwachsende Bestände verschiedenen Alters ein, die im Simulationszeitraum weder kahl geschlagen, umgebaut noch neu aufgepflanzt werden. Betrachtet werden die Kohlenstoffpools  $C_{\text{bod}}$  und  $C_{\text{sum}}$  (siehe 2.1.6.1), und der Kohlenstofffluss NEP (siehe 1.4). In Abbildung 17 wird der Kohlenstoffgehalt  $C_{\text{bod}}$ , der bei der Initialisierung der Bestände vorlag, dargestellt. Die räumliche Differenzierung des Werte  $C_{\text{bod}}$  ist bedingt durch die Bodenbeschreibung der Standorte der ÖWK-Flächen.

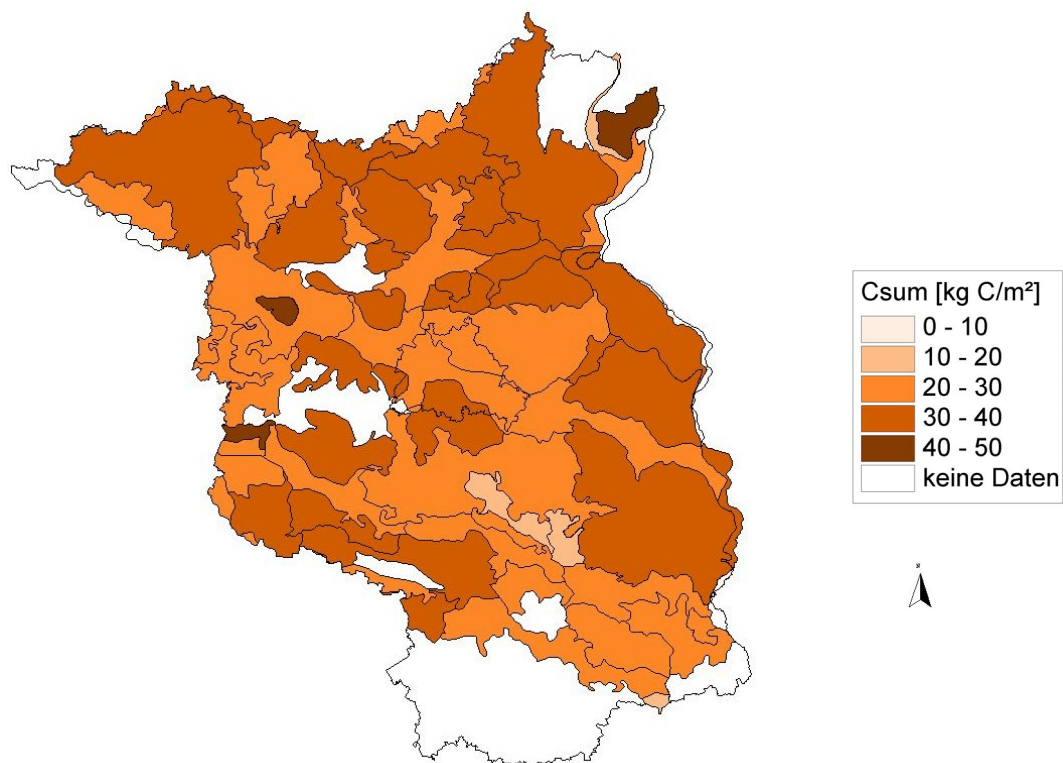
Für die Simulation mit dem Basisszenario ist in Abbildung 18 die totale C-Speicherung  $C_{\text{sum}}$  nach 40 Jahren dargestellt. Weiß eingefärbte Flächen zeigen an, dass in diesen Wuchsbezirken keine ausreichenden Informationen über die dort liegenden ÖWK-Bestände vorlagen und daher dort nicht simuliert wurde.

In Abbildung 19 sind für die betrachteten Wuchsbezirke die relativen Änderungen der totalen C-Speicherung unter den 4 Klimaänderungsszenarien im Vergleich zum Basisszenario dargestellt. Die deutlichen Unterschiede zwischen den relativen Änderungen für die Klimaszenarien sind durch die Temperatur- **und** Niederschlagsänderungen zu erklären. Unter den beiden Erwärmungsszenarien (Abbildung 19 (a) und (b)) wird eine räumliche Differenzierung deutlich mit starken Verlusten der C-Speicherung (bis zu über 10% Reduktion) im südlichen Brandenburg und geringeren Verlusten und teilweisen Gewinnen im nördlichen Brandenburg. In beiden Szenarien führt die Klimaänderung zu einem Rückgang des Jahresniederschlags, der im Süden wesentlich stärker ist als im Norden (siehe 2.1.5.6). Niederschlag ist unter diesen Szenarien offensichtlich der limitierende Faktor für das Wachstum der Bestände. Die etwas geringere Niederschlagsreduktion des Szenarios +3.0 K gegenüber dem Szenario +1.5 K macht sich in höheren C-Speicherungen im Norden Brandenburgs im Vergleich zum Basisszenario bemerkbar.

Die beiden Abkühlungsszenarien, die mit einer leichten Niederschlagserhöhung verbunden sind, führen relativ gleichmäßig für alle Wuchsbezirke zu einer Abnahme der C-Speicherung, allerdings kann es im Fall des -1.5 K Szenarios auch zu leichten Gewinnen in der C Speicherung (bis zu 5%) kommen. Die Temperatur limitiert unter diesen Szenarien das Wachstum der Waldbestände am stärksten. Das Szenario -3.0 K führt zu der stärksten Reduktion der totalen C-Speicherung unter allen Klimaszenarien gegenüber dem Basisszenario.

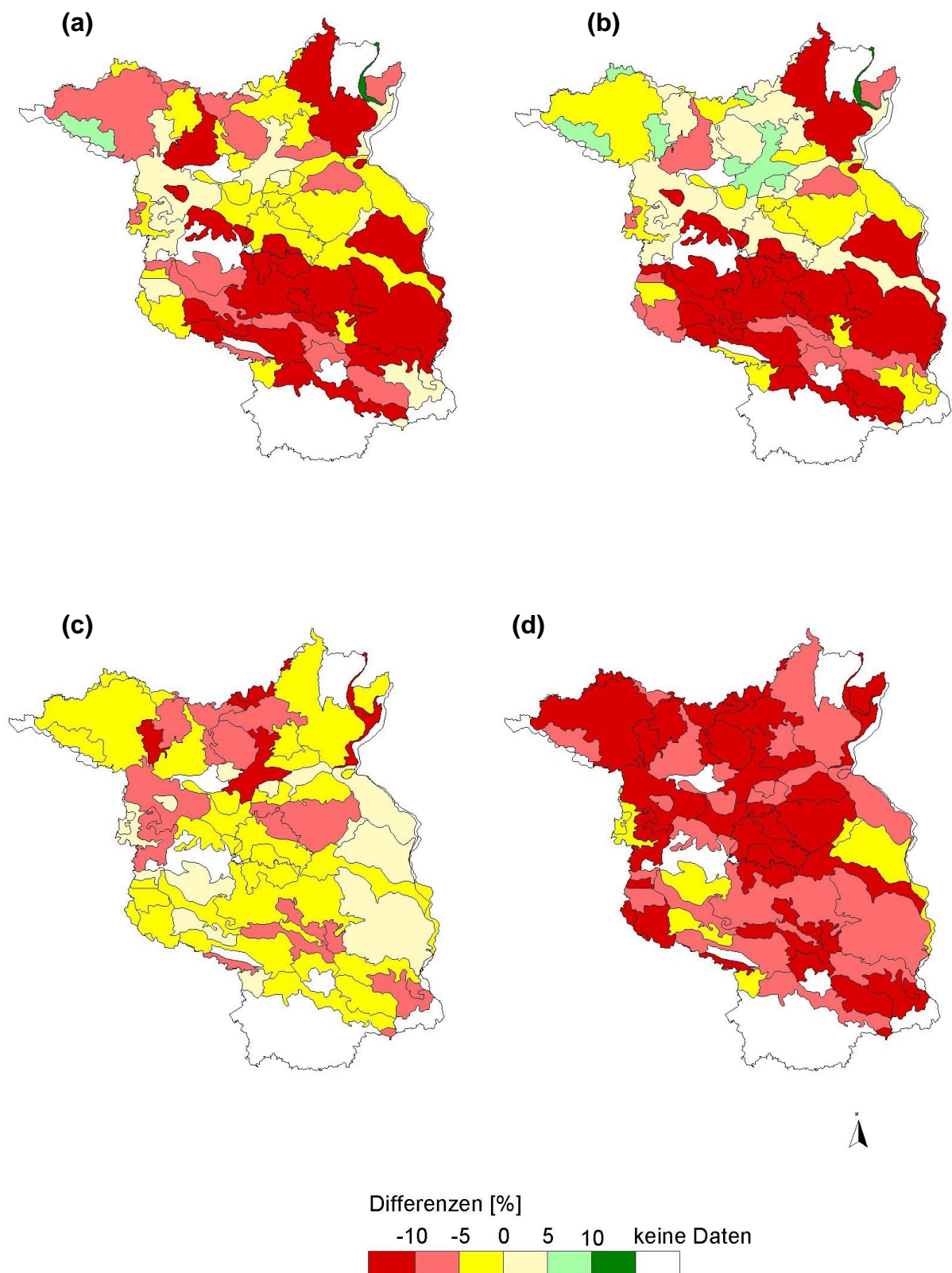


**Abbildung 17** Gesamte C-Speicherung des Bodens zum Zeitpunkt der Initialisierung der ÖWK-Bestände, gemittelt für die Wuchsbezirke.

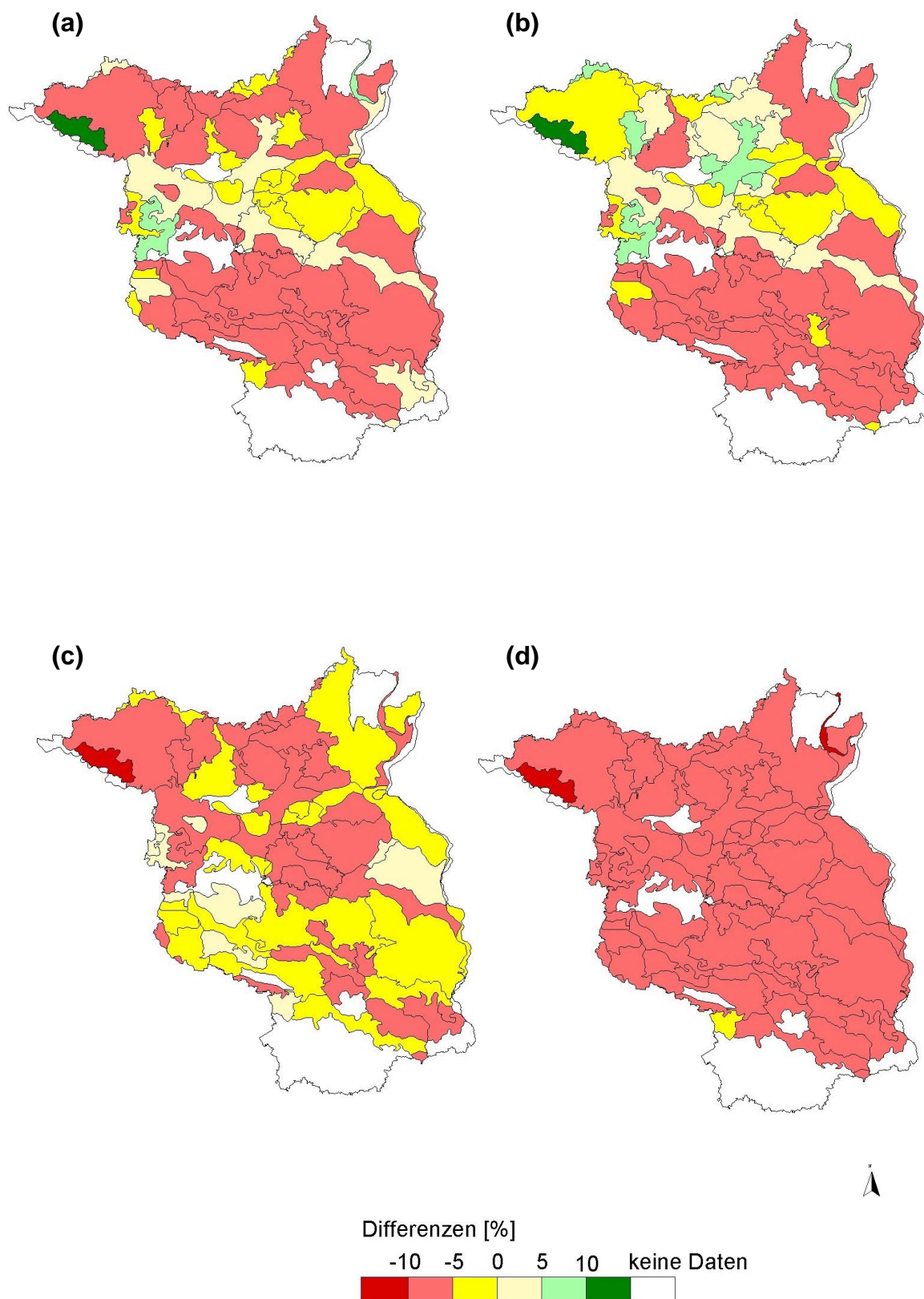


**Abbildung 18** Gesamte C-Speicherung der simulierten ÖWK-Bestände, gemittelt für die Wuchsbezirke, unter dem Basisklimaszenario nach 40 Jahren.





**Abbildung 19** Relative Änderung der gesamten C-Speicherung über 40 Jahre, simuliert für alle ÖWK-Bestände und gemittelt für die Wuchsbezirke, für die Klima-szenarien +1.5 K (a), +3.0 K (b), -1.5 K (c), -3.0 K (d) im Vergleich zum Basisszenario.



**Abbildung 20** Relative Änderung der jährlichen Kohlenstoffspeicherung (NEP), gemittelt über 40 Jahre und simuliert für alle ÖWK-Bestände für die vier Klimaszenarien +1.5 K (a), +3.0 K (b), -1.5 K (c), -3.0 K (d) im Verhältnis zum Basisszenario

In Abbildung 20 ist die Änderung der langjährig gemittelten jährlichen Kohlenstoffspeicherung (NEP) unter den vier Klimaänderungsszenarien im Vergleich zum Basisszenario abgebildet. Hier sind analoge Aussagen wie über die Gesamtkohlenstoffspeicherung möglich, es zeigen sich dieselben räumlichen Differenzierungen und Unterschiede zwischen den Klimaszenarien, da die jährliche NEP Basis für die Kohlenstoffspeicherung im Gesamtzeitraum ist. Eine zusammenfassende Darstellung für alle 365 Kiefernreinbestände der ÖWK-Flächen ist in Tabelle 7 gegeben. Zusätzlich werden die mittlere Ökosystem-Respiration RE und die Boden-Respiration SR aufgeführt. Vergleicht man die Mittelwerte von NEP, RE und SR mit den aus der Literatur bekannten Werten (Tabelle 1), so liegt die NEP im oberen Bereich des angegebenen Spektrums und dem für die Zwergkiefer in Frankreich (Berbigier et al., 2001) gemessenen Wert noch am nächsten, während die simulierte RE und SR die gemessenen Werte besser treffen. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die Boden-Respiration großen Schwankungen unterliegt. Die in Tabelle 1 aufgeführten Werte geben ohnehin nur eine Orientierung in der Größenordnung der einzelnen Flux-Komponenten, da die Werte stark von der Produktivität des Ökosystems und den klimatischen Bedingungen abhängen.

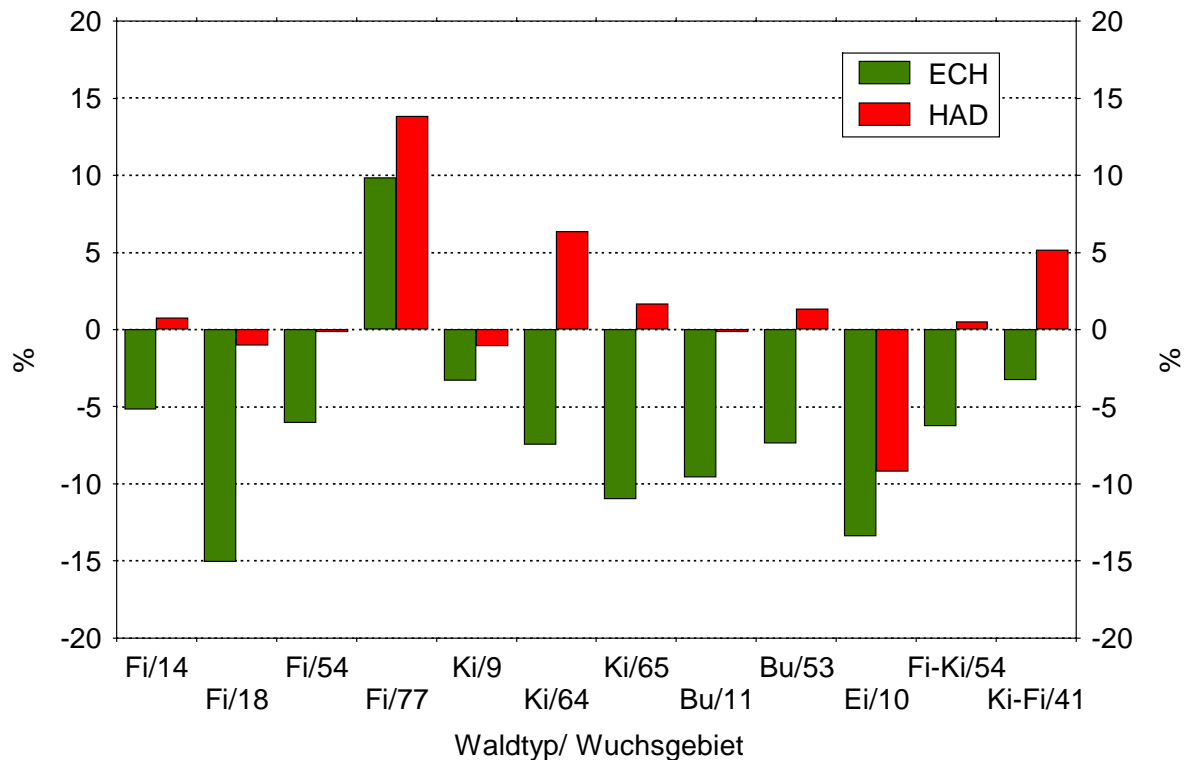
**Tabelle 7** Gemittelte Werte der NEP – Netto-Ökosystemproduktion, RE – Ökosystem-Respiration, SR – Boden-Respiration und  $C_{\text{sum}}$  für alle 365 Kiefernreinbestände der ÖWK- Flächen

	<b>Basisszenario</b>	<b>+1.5 K</b>	<b>+3.0 K</b>	<b>-1.5 K</b>	<b>-3.0 K</b>
<b>mittl. NEP [g C m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>]</b>	697	615	630	692	605
<b>mittl. RE [g C m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>]</b>	981	906	945	947	854
<b>mittl. SR [g C m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>]</b>	351	352	378	338	308
<b>mittl. totale C-Speicherung <math>C_{\text{sum}}</math> [kg C m<sup>-2</sup>]</b>	29.85	27.55	27.94	29.27	27.03

Im Fall des Klimaszenarios -3.0 K wird die größte Reduktion sowohl der NEP (um -13%) als auch der totalen C-Speicherung (-9%) im Vergleich zum Basisszenario berechnet, gefolgt von einer Reduktion der NEP (um -12%) und der totalen C-Speicherung (um -8 %) unter dem +1.5 K Szenario. Die Reduktionen des +3.0 K Szenarios fallen geringer aus als die des +1.5 K-Szenarios, was auf die geringere Niederschlagsreduktion dieses Szenarios und den damit verbundenen besseren Wachstumsbedingungen (geringerer Trockenstress) zurückzuführen ist.

#### 2.1.6.4 Modellbetrieb "Deutschland"

Für die aus dem Modellbetrieb "Deutschland" ausgewählten Bestände wurde die Waldentwicklung unter den Basis-, ECH- und HAD- Szenarien über 60 Jahre simuliert. Es erfolgte die Berechnung der totalen C-Speicherung  $C_{\text{sum}}$ , wie in 2.1.6.1 definiert. Verglichen wurden die relativen Änderungen der Werte  $C_{\text{sum}}$  des Basis-szenarios gegenüber den Werten der beiden Klimaänderungsszenarien. In Abbildung 21 sind diese relativen Änderungen dargestellt.

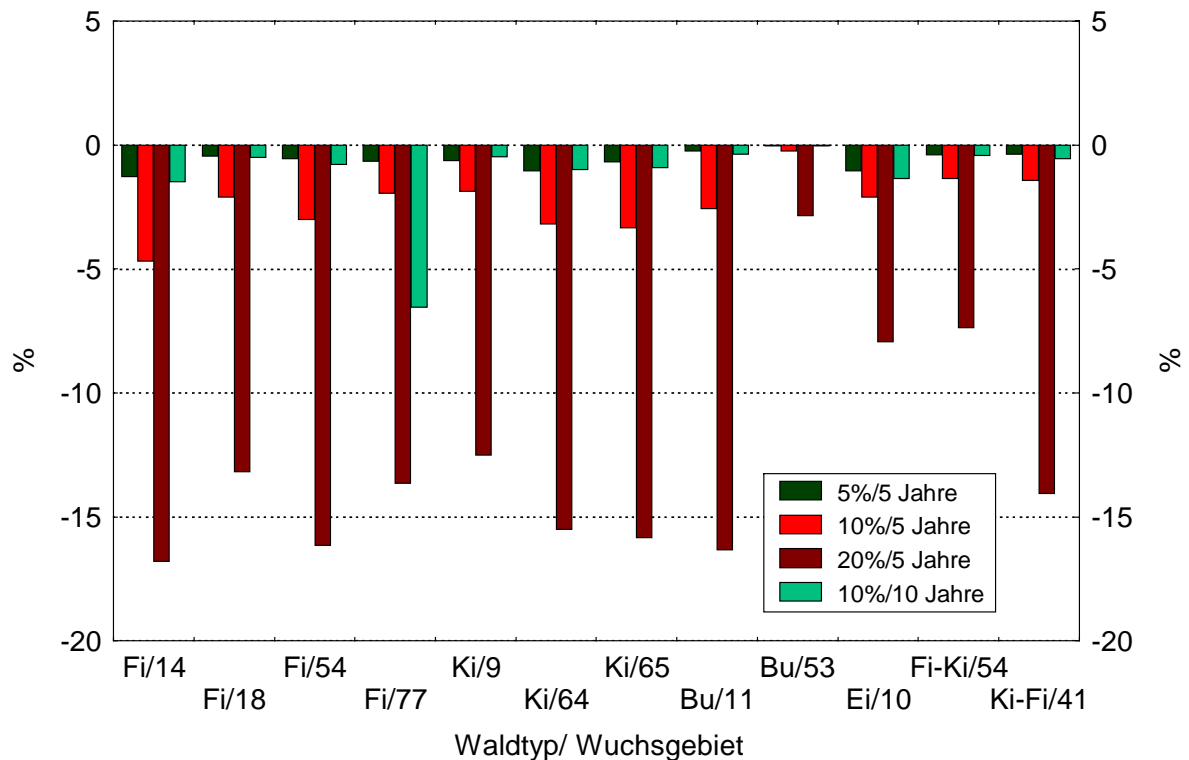


**Abbildung 21** Relative Änderungen der totalen C-Speicherung nach 60 Jahren unter den beiden Klimaänderungsszenarien ECH und HAD, verglichen mit dem Basisszenario.

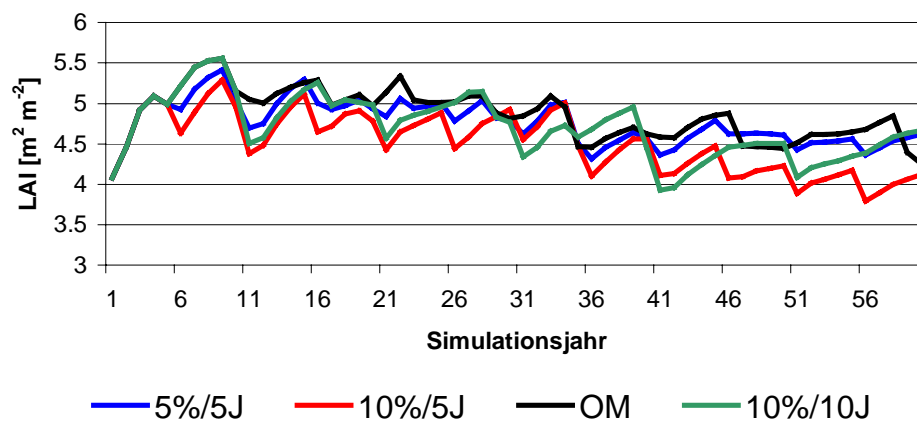
Weiterhin wurden unter dem heutigen Klima (Basisszenario) vier verschiedene Bewirtschaftungseingriffe simuliert. Dabei wurde alle fünf Jahre eine Entnahme von 5%, 10% oder 20% bzw. alle zehn Jahre 10% der Stammbiomasse angenommen. Die Realisierung erfolgte in Form einer mäßigen Niederdurchforstung. Die Änderungen der totalen C-Speicherung  $C_{\text{sum}}$  (zuzüglich des C-Pools aller entnommenen Stämme) unter den verschiedenen Bewirtschaftungen im Vergleich zu einer Simulation ohne Bewirtschaftung sind in Abbildung 22 dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass im Vergleich zum unbewirtschafteten Bestand alle Bewirtschaftungsstärken zu einer geringeren gesamten C-Speicherung führen. Je schonender die Entnahme ist, desto höher ist die C-Speicherung.

Um die Ursachen dafür genauer zu belegen, wurde für einen Kiefernbestand (30 Jahre bei der Initialisierung) im Wuchsgebiet 65 die Entwicklung des Blattflächenindex (LAI) und der Grundfläche unter den 4 Bewirtschaftungsszenarien analysiert. In Abbildung 23 wird deutlich, dass die Bewirtschaftungsszenarien 5% alle fünf Jahre oder 10% alle zehn Jahre nur zu einer geringen Abweichung der LAI-Entwicklung von der Entwicklung in der Variante ohne Bewirtschaftung führt. Die Entwicklung der Grundfläche unter diesen beiden schwachen Bewirtschaftungen (Abbildung 24) liegt im Bereich zwischen der vom Modell simulierten maximalen Grundflächenhaltung (entspricht der Simulation ohne Bewirtschaftung, hier geglättet dargestellt) und der optimalen Grundflächenhaltung (für Kiefer ca. 92% der maximalen Grundfläche nach (Pretzsch, 2001)).

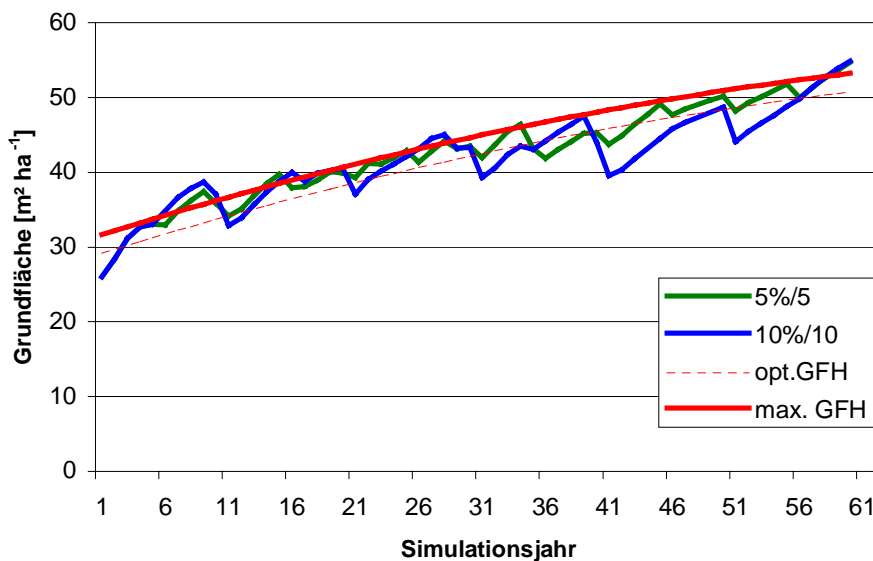




**Abbildung 22** Relative Änderung der Gesamtkohlenstoffspeicherung unter vier Bewirtschaftungs-szenarien (5%, 10%, 20 % alle 5 Jahre, 10% alle 10 Jahre) im Vergleich zur Kohlen-stoffspeicherung der Simulation ohne Bewirtschaftung



**Abbildung 23** Simulation des LAI für eine 30-jährigen Kiefernbestand im Wuchsgebiet 65 für 3 Bewirt-schaftungsszenarien (5%/5 Jahre, 10%/5 Jahre, 10%/10 Jahre) und die Variante ohne Bewirtschaftung (OM)



**Abbildung 24** Simulation der Grundflächenentwicklung für eine 30-jährigen Kiefernbestand im Wuchsgebiet 65 für die beiden Bewirtschaftungsszenarien 5% alle 5 Jahre und 10% alle 10 Jahre im Vergleich mit der maximalen Grundflächenhaltung (max. GFH) und der optimalen Grundflächenhaltung (opt. GFH)

Ähnliche Ergebnisse sind in (Thornley & Cannell, 2000) dargestellt. Damit wird auch dessen Schlussfolgerung bestätigt, dass zur Erreichung einer maximalen C-Speicherung in den betrachteten Beständen eine schwache bzw. gar keine Bewirtschaftung der Bestände zu wählen ist. Die heutige Bewirtschaftung nach Ertragstafel entspricht z.B. bei der Kiefer diesen schwachen Durchforstungen von 5 bzw. 10 %.

### 2.1.7 Schlussfolgerungen

Die vorgestellten Ergebnisse zeigen, dass das physiologisch-basierte Waldwachstumsmodell 4C erfolgreich zur Analyse der Wirkung von Klimaänderungen auf die Kohlenstoffspeicherung von Wald-Ökosystemen eingesetzt werden kann. Die realisierte Kopplung mit dem hydrologischen Einzugsgebietsmodell ArcEGMO dient vor allem der Abbildung der lateralen Wasserflüsse, um so zu einer realistischeren Abschätzung des pflanzenverfügbaren Wassers zu kommen.

In dieser Studie wurden Klimaszenarien eingesetzt, die Temperatur- und Niederschlagsänderungen umfassten. Obwohl das Waldwachstumsmodell 4C explizit auf die CO<sub>2</sub>-Konzentration reagiert, wurden alle Simulationen mit derselben konstanten CO<sub>2</sub>-Konzentration ausgeführt.

Untersucht wurden die relativen Änderungen der gesamten C-Speicherung während des Simulationszeitraums (40 Jahre) und der mittleren jährlichen Netto-Ökosystemproduktion (NEP) für die Änderungsszenarien im Vergleich zum Basisszenario. In Brandenburg gibt es unter dem stärksten Abkühlungsszenario (-3.0 K) auch die stärkste Reduktion in der C-Speicherung. Bei den Erwärmungsszenarien ist neben einem Rückgang in der C-Speicherung im Süden Brandenburgs vor allem im Norden Brandenburgs auch eine verbesserte C-Speicherung im Vergleich zum Basisszenario festzustellen. Die Temperaturerhöhung kann hier ein verbessertes Waldwachstum bewirken, wird aber nur in diesem Sinne wirksam, wenn noch eine ausreichende

Menge Niederschlag fällt. Das Erwärmungsszenario +3.0 K hat für Nord-Brandenburg im Mittel einen höheren Niederschlag als das +1.5 K-Szenario, was sich im verbesserten Wachstum und einer besseren C-Speicherung zeigt.

Generell gilt für alle untersuchten Gebiete, dass bei einer Klimaerwärmung mit einem Rückgang der C-Speicherung im Wald-Ökosystem zu rechnen ist. Wie stark diese Reduktion ausfällt, ist zum einen vom Niederschlag und zum anderen von der Bestandeszusammensetzung abhängig. Eine leichte Klimaabkühlung, verbunden mit einer Niederschlagserhöhung, führt auf Grund des geringeren Trockenstresses überwiegend zu nur geringen Änderungen in der NEP bzw. C-Speicherung. Bei einer stärkeren Abkühlung werden die Wachstumsbedingungen für die hier vorherrschenden Arten zu schlecht, so dass auch in diesem Fall die NEP und damit die C-Speicherung abnimmt.

Um die modellgestützte Bilanzierung der Kohlenstoffspeicherung in Wäldern Brandenburgs zu verbessern, muss in zukünftigen Untersuchungen die Alterstruktur der Bestände in den Wuchsgebieten mit einbezogen sowie längere Simulationszeiträume verwendet werden, um die Wirkungen der Bewirtschaftung (z. B. Waldumbau) und Landnutzungsänderung (z. B. Neuanpflanzungen) mit abzubilden.

Simulationen mit Bewirtschaftungsstrategien zeigen, dass jede der untersuchten Maßnahmen zu einer Reduktion der C-Speicherung führt, die höchste C-Speicherung wird hier für unbewirtschaftete Bestände erzielt. Eine schwache Durchforstung, die eine optimale Entwicklung eines Bestandes nach anderen Kriterien als der C-Speicherung gewährleisten soll, ist mit geringen Verlusten in der Kohlenstoffspeicherung verbunden.

Der Einsatz des prozessbasierten Waldwachstumsmodells 4C (allein oder gekoppelt mit ArcEGMO) erweist sich als sinnvolle Methode, um die Wirkungen von Klimaänderungen und Bewirtschaftungsmethoden auf die Speicherung von Kohlenstoff in Waldökosystemen und insbesondere in bewirtschafteten Waldbeständen zu untersuchen.

Durch die Einbindung des prozessbasierten Waldwachstumsmodells 4C in das hydrologische Flusseinzugsgebietsmodell ArcEGMO konnte die Auswirkung lateraler Flüsse auf die Bestandesdynamik berücksichtigt werden. Es zeigte sich, dass es insbesondere in der zweiten Jahreshälfte zu einer Reduktion der realisierten Transpiration kommen kann, die durch eine eindimensionale Simulation des Bodenwasserhaushaltes nicht erfasst werden kann. Deshalb wird die realisierte Einbindung der Waldwachstumsmodellierung in ein hydrologisches Gebietsmodell als wesentlicher Fortschritt sowohl hinsichtlich der Güte der Kohlenstoff-Bilanz-Modellierung als auch hinsichtlich der Güte der hydrologischen Einzugsgebietsmodellierung angesehen.

## **2.2 Voraussichtlicher Nutzen / Verwertbarkeit**

Im Rahmen des PIK-Projekts „Brandenburg Simulator of Environmental and Socio-economic Transformations (BEST)“ ist ein Einsatz des Modells für verschiedene Studien bezüglich Klima- und Management-Szenarien geplant, um Abschätzungen über die Kohlenstoffbilanz und Grundwasserneubildung sowie Aussagen über Produktivität und Zusammensetzung der Wälder machen zu können.

Weiterhin ist eine Modellnutzung in integrierten Landschaftsmodellen vorgesehen, die in Zusammenarbeit mit anderen Projekten (GLOWA Elbe, Volkswagenstiftung) durchgeführt werden soll.

### **2.3 Bekanntgewordener Fortschritt**

Es gibt gegenwärtig eine Reihe von Untersuchungen zur Kohlenstoff-Speicherung. Dabei kommen auch dynamische Modelle zum Einsatz (s. 1.4).

Für Anwendungen in der Fläche, bei denen Interaktionen zwischen den einzelnen Teilflächen abgebildet werden, gibt es zwar bereits Modelle, die vorrangig die Hydrologie beschreiben. In diesen Modellen wird aber die Vegetation relativ undifferenziert dargestellt und erlaubt damit keine Rückschlüsse auf den im System gespeicherten Kohlenstoff.

### **2.4 Veröffentlichungen**

Geplant sind separate Veröffentlichungen, die sich einerseits mit der Kopplung von 4C und ArcEGMO unter hydrologischen Aspekten befassen und andererseits die C-Bilanzen für Brandenburg und Deutschland unter den oben verwendeten Klimaänderungsszenarien vorstellen.

Die Ergebnisse des Schlussberichts sollen außerdem als PIK-Report veröffentlicht werden.

## **3 Literatur**

- Abbott, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., O'Connell, P.E., Rasmussen, J.**, 1986. An Introduction to the European Hydrological System - Système Hydrologique Européen, "SHE", 1: History and Philosophy of a Physically based Distributed Modelling System. *Journal of Hydrology*, 87: 45-59.
- Arnold, J.G., Srinivasan, R., Muttiah, R.S., Williams, J.R.**, 1998. Large area hydrologic modeling and assessment. Part I: Model development. *Journal of the American Water Resources Association*, 34(1): 73-89.
- Badeck, F.W. et al.**, 2001. Tree species composition in European pristine forests: Comparison of stand data to model predictions. *Climatic Change*, 51(3-4): 307-347.
- Becker, A., Haberlandt, U., Klöcking, B., Krysanova, V., Lahmer, W.**, 2000. Auswirkungen der Landnutzung auf den Wasser- und Stoffhaushalt der Elbe und ihres Einzugsgebietes. 3. Zwischenbericht des PIK zum BMBF-Projekt 0339577.
- Becker, A., Klöcking, B., Lahmer, W., Pfützner, B.**, 2001. The Hydrological Modelling System ArcEGMO. In: **V.P. Singh, D. Frevert and S. Meyer** (Editors), *Mathematical Models of Watershed Hydrology*. Water Resources Publications, Littleton/Colorado.
- Benz, J., Hoch, R.**, 1997. ECOBAS - Dokumentation mathematischer Formulierungen ökologischer Prozesse. In: **A. Kuhn and S. Wenzel** (Editors), *ASIM Simulationstechnik 11. Symposium*. Vieweg Verlag, Braunschweig, Dortmund, pp. 73 - 77.
- Berbigier, P., Bonnefond, J.M., Mellmann, P.**, 2001. CO<sub>2</sub> and water vapour fluxes for 2 years above Euroflux forest site. *Agricultural and Forest Meteorology*, 108(3): 183-197.
- Beyer, L.**, 1991. Intersite Characterization and Variability of Soil Respiration in Different Arable and Forest Soils. *Biology and Fertility of Soils*, 12(2): 122-126.
- Bork, H.-R., Dalchow, C., Kächele, H., Piorr, H.-P., Wenkel, K.-O.**, 1995. Agrarlandschaftswandel in Nordostdeutschland unter veränderten Rahmenbedingungen: ökologische und ökonomische Konsequenzen, Berlin.

- 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.
- Bronstert, A.**, 1994. 1-,2- and 3-dimensional simulation of the water dynamics of agricultural sites using the physically based modeling system "Hillflow". In: **Tsakaris and Santos** (Editors), *Avances in Water Resources Technology and Management*, pp. 77-84.
- Bronstert, A., Krysanova, V.** (Editors), 1998. Ansätze zur großskaligen Simulation der Wasserflüsse und ein Anwendungsbeispiel für das Elbeinzugsgebiet. Modellierung des Wasser- und Stofftransportes in grossen Einzugsgebieten, PIK-Report, No. 43, Potsdam, 5-22 pp.
- Buchmann, N.**, 2000. Biotic and abiotic factors controlling soil respiration rates in *Picea abies* stands. *Soil Biology & Biochemistry*, 32(11-12): 1625-1635.
- Bugmann, H., Grote, R., Lasch, P., Lindner, M., Suckow, F.**, 1997. A new forest gap model to study the effects of environmental change on forest structure and functioning. In: **G.M.J. Mohren, K. Kramer and S. Sabate** (Editors), *Impacts of Global Change of Tree Physiology and Forest Ecosystem. Proceedings of the International Conference on Impacts of Global Change on Tree Physiology and Forest Ecosystems*, held 26-29 November 1996, Wageningen. Forestry Science. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht.
- Cubasch, U. et al.**, 1992. Time-dependent greenhouse warming computations with a coupled ocean-atmosphere model. *Climate Dynamics*, 8: 55-69.
- Duschl, C., Suda, M.**, 2001. Simulation of management strategies in the forest estate model 'Germany'. *Forstwiss. Centralblatt, Supplement*.
- Dyck, S., Peschke, G.**, 1995. *Grundlagen der Hydrologie*. Verlag für Bauwesen GmbH, Berlin.
- Glugla, G.**, 1969. Berechnungsverfahren zur Ermittlung des aktuellen Wassergehaltes und Gravitationswasserabflusses im Boden. *Albrecht-Thaer-Archiv*, 13: 371-376.
- Goulden, M.L., Munger, J.W., Fan, S.-M., Daube, B.C., Wofsy, S.C.**, 1996. Exchange of Carbon Dioxide by a Deciduous Forest: Response to Interannual Climate Variability. *Science*, 271(5255): 1576-1578.
- Granier, A. et al.**, 2000. The carbon balance of a young Beech forest. *Functional Ecology*, 14(3): 312-325.
- 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. Hüttel 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.
- Kartschall, T., Döring, P., Suckow, F.**, 1990. Simulation of Nitrogen, Water and Temperature Dynamics in Soil. *Syst. Anal. Model. Simul.*, 7(6): 33-40.
- Klößing, B., Pfützner, B., Becker, A.**, 1999. Hydrologische Modellierung von meso- und makroskaligen Einzugsgebieten mit ARC/EGMO. In: **N. Fohrer and P. Döll** (Editors), *Modellierung des Wasser- und Stofftransportes in großen Einzugsgebieten*. Kassel University Press, Kassel, pp. 127-134.
- Kofalk, S., Kühlborn, J. Gruber, B., Uebelmann, B. Hüsing, V.**, 2001. Machbarkeitsstudie zum Aufbau eines Decision Support Systems (DSS). Zusammenfassung des im Auftrag der BfG erstellten Berichts "Towards a Generic Tool for River Basin Management - feasibility study". BfG-Mitteilung, 8.
- Kohlmaier, G.H. et al.**, 1997. The Frankfurt Biosphere Model. A Global Process Oriented Model for the Seasonal and Longterm CO<sub>2</sub> Exchange between Terrestrial Ecosystems and the Atmosphere. Part 2: Global results for potential vegetation in an assumed equilibrium. *Climate Research*, 8: 61-87.
- Koitzsch, R.**, 1977. Schätzung der Bodenfeuchte aus meteorologischen Daten, Boden- und Pflanzenparametern mit einem Mehrschichtmodell. *Z. f. Meteor.*, 27(5): 302-306.

- Krysanova, V., Wechsung, F., Becker, A., Poschenrieder, W., Gräfe, J.**, 1999. Mesoscale ecohydrological modelling to analyse regional effects of climate change. *Environmental Modelling and Assessment*, 4(4): 259-271.
- Lasch, P., Badeck, F., Lindner, M., Suckow, F.**, 2001. Sensitivity of simulated forest growth to changes in climate and atmospheric CO<sub>2</sub>. *Forstwiss. Centralblatt*, in prep.
- Lasch, P., Lindner, M.**, 1995. Application of two forest succession models at sites in north east Germany. *Journal of Biogeography*, 22: 485-492.
- Lasch, P. et al.**, 1999. Regional impact analysis of climate change on natural and managed forests in the Federal state of Brandenburg, Germany. *Environmental Modeling and Assessment*, 4(4): 273-286.
- Lindner, M., Cramer, W.**, 2001. German Forest Sector under Global Change: An interdisciplinary impact assessment. *Forstwiss. Centralblatt*, in prep.
- LUA**, 2000. Flächendeckende Modellierung von Wasserhaushaltsgrößen für das Land Brandenburg - Beitrag zum Projekt "Stabilisierung und Verbesserung des Landschaftswasserhaushaltes in Brandenburg" des Landesumweltamtes Brandenburg. *Studien und Tagungsberichte*, 27.
- 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.
- Pretzsch, H.**, 2001. Modellierung des Waldwachstums. Parey Buchverlag, Berlin, 341 pp.
- Rahmstorf, S., Ganopolski, A.**, 1999. Long-term global warming scenarios computed with an efficient coupled climate model. *Climatic Change*, 43(2): 353-367.
- Raich, J.W., Tufekciogul, A.**, 2000. Vegetation and soil respiration: Correlations and controls. *Biogeochemistry*, 48(1): 71-90.
- Sampson, D.A., Janssens, I.A., Ceulemans, R.**, 2001. Simulated soil CO<sub>2</sub> efflux and net ecosystem exchange in a 70- year-old Belgian Scots pine stand using the process model SECRETS. *Annals of Forest Science*, 58(1): 31-46.
- 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.
- Schellnhuber, H.-J., Enke, W., Flechsig, M.**, 1994. Extremer Nordsommer '92. Meteorologische Ausprägung, Wirkungen auf naturnahe und vom Menschen beeinflusste Ökosysteme, gesellschaftliche Perzeption und situationsbezogene politisch-administrative bzw. individuelle Maßnahmen, PIK Potsdam.
- Schulze, E.D.** (Editor), 2000. Carbon and Nitrogen Cycling in European Forest Ecosystems. *Ecological studies*, 142. Springer, Berlin, 500 pp.
- Shugart, H.H.**, 1984. A Theory of Forest Dynamics. Springer-Verlag, New York, 278 pp.
- Suckow, F., Badeck, F.-W., Lasch, P., Schaber, J.**, 2001. Nutzung von Level-II-Beobachtungen für Test und Anwendungen des Sukzessionsmodells FORESEE. *Beitr. Forstwirtsch. u. Landsch.ökol.*, 35(2): 84-87.
- Thornley, J.H.M., Cannell, M.G.R.**, 2000. Managing forests for wood yield and carbon storage: a theoretical study. *Tree Physiology*, 20(7): 477-484.
- Trüby, P.**, 2000. CO<sub>2</sub>-Emission und C-Umsatz im Boden des ARINUS-Standorts Schluchsee. FZKA-BWPLUS, Albert-Ludwigs-Universität; Institut für Bodenkunde und Waldernährungslehre.
- Valentini, R. et al.**, 2000. Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests. *Nature*, 404: 861 - 865.
- Werner, P.C., Gerstengarbe, F.-W.**, 1997. A proposal for the development of climate scenarios. *Climate Research*, 8(3): 171-182.
- Wolff, B.**, 2001. Processing forest inventory data to establish a nationwide database for the estimation of the impacts of climate change on german forest and forestry. *Forstwiss. Centralblatt*, in prep.