

PIK Report

No. 53

Untersuchung der Auswirkungen erhöhter
atmosphärischer CO₂-Konzentrationen
innerhalb des Free-Air Carbon Dioxide
Enrichment-Experimentes:
Ableitung allgemeiner Modellösungen

Thomas Kartschall, Jan Gräfe, Peggy Michaelis,
Klaus Waloszcyk, Susanne Grossman-Clarke

Schlußbericht zum Vorhaben:
BMBF-DLR 01LK9535/5



POTSDAM INSTITUTE
FOR
CLIMATE IMPACT RESEARCH (PIK)

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) unter dem Förderkennzeichen DLR 01LK9535/5 gefördert. Die Verantwortung für den wissenschaftlichen Gehalt des Berichtes liegt bei den Autoren. Aus technischen Gründen mußte bei den Abb. 17 - 23 die interne englische Beschriftung beibehalten werden.

Autoren:

Thomas Kartschall*

Peggy Michaelis

Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e.V., Abt. Globaler Wandel und Natürliche Systeme

PF 60 12 03, D-14412 Potsdam, Tel.: +49-331-288-2680, Fax: +49-331-288-2695

e-mail: Thomas.Kartschall@pik-potsdam.de

URL: <http://www.pik-potsdam.de/~face>

* (Projektleiter/Ansprechpartner)

Jan Gräfe

Klaus Waloszczyk

Professor-Hellriegel-Institut e.V. Bernburg

Susanne Grossman-Clarke

vormals Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e.V.

Herausgeber:

Dr. F.-W. Gerstengarbe

Technische Ausführung:

U. Werner

POTSDAM-INSTITUT
FÜR KLIMAFOLGENFORSCHUNG
Telegrafenberg
Postfach 60 12 03, 14412 Potsdam
GERMANY

Tel.: +49 (331) 288-2500

Fax: +49 (331) 288-2600

E-mail-Adresse: pik@pik-potsdam.de

Abstract

Es wurde eine verbesserte Version des Modells *demeter* mit modularem Aufbau für wichtige und allgemein anwendbare Ökosystemteile

- (i) Lichtverteilung in homogenen geschlossenen bzw. gereihten Beständen;
- (ii) Energie- und Gasaustausch einschließlich Photosynthese;
- (iii) Dynamik von Wasser, Temperatur, Kohlenstoff- und Stickstoffumsatz in Mineralböden; entwickelt.

Durch den generischen Charakter der detaillierten Modellösungen sind qualitative und quantitative Aussagen zu direkten und indirekten Auswirkungen erhöhter atmosphärischer CO₂-Konzentrationen auf *Graminaceae* des C₃-Typs bei Wasser- und Stickstofflimitierung unter breiteren geographischen (33° bis 52° N), Boden- und klimatischen Bedingungen möglich. Das Modell wurde auf einem breiten Spektrum zeitlicher (Taktzeiten von einer Minute bis zu einem Tag, Simulationszeiten von mehreren Stunden bis zu mehreren Jahren) und räumlicher Skalen (Teilmodell Photosynthese auf Blattniveau, Gesamtmodell auf Bestandesniveau, regionale Ertragsstudie für das gesamte Land Brandenburg) getestet.

An improved version of the wheat model *demeter* including modules for important and commonly usable ecosystem compartments

- (i) light interception in homogenous and rowed canopies
 - (ii) energy and gas exchange including photosynthesis
 - (iii) water, temperature, carbon and nitrogen dynamics in mineral soils
- was developed.

Due to the generic properties of the detailed model solutions qualitative and quantitative explanations about direct and indirect impacts of elevated atmospheric CO₂ concentrations on *Graminaceae* (C₃-Type) under limited water and nitrogen supply are possible. These solutions have been tested under a wide range of geographic (33° bis 52° N), soil und climatic conditions. The model was validated on a wide spectrum of temporal (time steps ranging from one minute up to one day, simulation periods ranging from several hours to several years) and spatial scales (Submodel photosynthesis on leaf level, the entire model on canopy level, regional yield studies for the entire State of Brandenburg).

*Die noch kleineren Dinge kennt Gott,
von den Menschen nur die, die er liebt...
...nicht immer, aber immer öfter...*

Albert Einstein
...aus der Werbung...

Inhaltsverzeichnis

Abstract	3
Inhaltsverzeichnis	5
1. Einleitung	7-8
2. Das FACE Weizen Experiment Maricopa 1996-97	9-11
2.1. Experimentelles Design des FACE Experimentes in den Jahren 1995-96 und 1996-97	9
2.2. Die FACE-Runs 1995-1997	11
3. Weiterentwicklungen des Weizenmodells <i>demeter</i>	12-16
3.1. Gas- und Energieaustauschmodul (SVAT_MOD)	12
3.1.1. Flexible dreidimensionale Gauss-Legendre-Integration für wichtige Bestandesflußgrößen	12
3.1.2. Lichtinterzeption	13
3.1.3. Zweischichtkonzept für Boden-Pflanze	13
3.1.4. Modifikation im Photosynthesemodul	13
3.2. Rahmensoftware für Regionalanwendungen (SON_SURF)	15
3.2.1. Softwaremerkmale von SON_SURF	15
3.3.2. Implementierung	16
3.3.3. Anwendung	16
4. Eigene experimentelle Arbeiten zur Modellparametrisierung und -überprüfung	17-25
4.1. <i>In situ</i> -Bestimmung der maximalen Carboxylaseaktivitäten beim FACE 1997	17
4.1.1 Material und Methoden	17
4.1.2. Ergebnisse	18
4.2. Kurzzeitdynamik des Gasaustausches bei der Bernburg Studie 1997 (diurnal run)	19
4.2.1 Material und Methoden	19
4.2.2. Experimentelle Ergebnisse und Simulation	20
4.3. Experimenteller und modellgestützter Beitrag zum LITFASS-Experiment 1998 des DWD (diurnal run)	22
4.3.1. Material und Methoden	22
4.3.2. Experimentelle Ergebnisse und Simulation	23
5. Räumlich hochauflösende Regionalanwendung des Modells <i>demeter</i> für das Land Brandenburg	26-35
5.1. Räumliche Diskretisierung des Klimas	26
5.2. Parametrisierung des Bodens	27
5.3. Abschätzung von des Flächenanteils von Winterweizen	27
5.4. Durchführung der Simulation Winterweizen	28
5.5. Regionale Simulationsergebnisse und Diskussion	29
5.5.1. Validierung des simulierten regionalen Ertrages	29
5.5.2. Entwicklung und Wachstum	30
5.5.3. Regionale Muster von Ertragsänderungen	31
5.5.4. Witterungssensitivität und Ertragsstabilität	33
6. Zusammenfassung	36-37
Literatur	38-40

1. Einleitung

Der Gehalt an atmosphärischen CO_2 (C_A) nimmt seit anderthalb Jahrhunderten kontinuierlich zu. Den Verlauf dieses Anstieges dokumentiert eine seit Ende der 50er Jahre durchgeführte Beobachtung auf Hawaii (Keeling und Whorf 1998, vgl. Abb. 1).

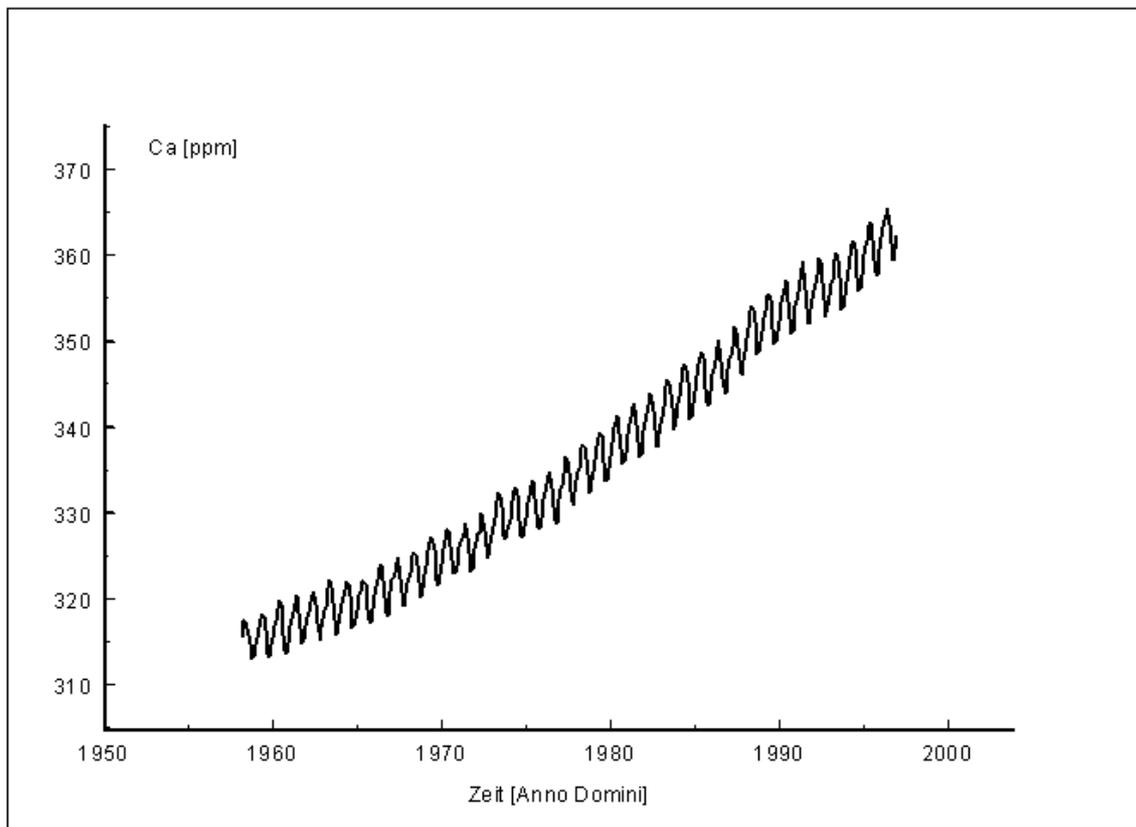


Abb. 1 Zeitlicher Verlauf von C_A am Mauna Loa Observatory ($19^{\circ}31' \text{NB}$, $155^{\circ}33' \text{WL}$), Hawaii USA, im Zeitraum 1958 bis 1997 (Keeling & Whorf 1998).

Der anhaltende Anstieg von C_A ist die bisher einzige experimentell sicher verifizierbare anthropogen induzierte Veränderung globalen Ausmaßes. Als wichtigste indirekte Wirkung eines erhöhten C_A wird eine durch den verstärkten Treibhauseffekt induzierte globale Erwärmung erwartet. In den letzten Jahren wurde neben der Untersuchung diesen Effektes ein international beachtliches Potential zur Aufklärung der direkten Auswirkungen erhöhten C_A eingesetzt. Seit Einführung der Free-Air Carbon Dioxide Enrichment (FACE) Technik zu Anfang der 90-er Jahre wurden eine Vielzahl von Hypothesen über diese Wirkungsmechanismen einer Überprüfung unter praktisch störungsfreien atmosphärischen Bedingungen zugänglich gemacht. Das Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e.V. (PIK) hat sich seit 1992 im Rahmen der durch das BMBF geförderten Projekte DLR-01LK9107, BEO-0339626 und mit dem vorliegenden Vorhaben an diesen Arbeiten beim FACE Weizen Maricopa (Arizona, USA)

beteiligt. Im Rahmen des hier dokumentierten Vorhabens konzentrierten sich die Aktivitäten vor allem auf die

- (i) *in situ* modellgerechte Parameteridentifizierung und -quantifizierung einiger wichtiger Modellteile für den Gas- und Energieaustausch im Rahmen des FACE Weizen Maricopa
- (ii) Überprüfung der gefundenen Modellösungen an einem deutschen Referenzstandort
- (iii) Anwendung des Modellsystems zur Beschreibung von Entwicklung, Gas- und Energieaustausch, Wachstum und Ertragsbildung für Weizen **demeter** auf verschiedenen zeitlichen (1 min bis 10 a) und räumlichen Maßstabsebenen (Photosynthese auf Blattniveau bis bundeslandesweite Erträge)

Mit dem Einsatz der im Rahmen des Vorhabens beschafften und genutzten transportablen Infrarot Gas Analyse-Technik konnten die zu allen drei Teilaufgaben gehörenden experimentellen Untersuchungen realisiert werden. Zur modellseitigen Überprüfung der Ergebnisse wurde das Modellsystem **demeter** in seiner jeweils neuesten Implementierung verwendet.

Nach der hier gegebenen Einführung werden im zweiten Kapitel das Design und die Versuchsdurchführung der Runs 1996 bis 1997 beim FACE-Experiment vorgestellt.

Das dritte Kapitel widmet sich der Beschreibung der Erweiterungen des Weizenmodells **demeter**, fokussiert auf die weiteren Verbesserungen des Energie- und Gasaustauschmoduls sowie den notwendigen Anpassungen und speziellen Lösungen für die unter (iii) genannten Langzeit- und Regionalstudien.

Im vierten Kapitel werden die direkten experimentellen Arbeiten innerhalb des FACE-Experimentes, einer speziellen Vergleichsstudie auf dem deutschen Standort Bernburg (Bernburg-Studie 1997) und der experimentelle Beitrag des PIK im Rahmen des vom Meteorologischen Observatorium Lindenberg (MOL) des Deutschen Wetterdienstes (DWD), durchgeführten **Lindenberg Inhomogeneous Terrain-Fluxes between Atmosphere and Surface 1998**-Experimentes (LITFASS.98) beschrieben. Daneben werden die mit dem Modell **demeter** zu diesen Experimenten durchgeführten Simulationen mit dem im Rahmen des Vorhabens entwickelten zeitlich hochauflösenden Moduls zum Gas- und Energieaustausch vorgestellt und diskutiert.

Die mit dem Modellsystem **demeter** durchgeführte zeitlich und räumlich hochaufgelöste Regionalstudie für das Land Brandenburg ist Gegenstand des fünften Kapitels.

Zum Abschluß erfolgt eine Gesamteinschätzung des Vorhabens aus der Sicht der Bearbeiter. Die zitierte Literatur und Referenzen auf die im Rahmen des Vorhabens publizierten Ergebnisse können dem Literaturverzeichnis entnommen werden.

2. Das FACE Weizen Experiment Maricopa 1995-1997

2.1. Experimentelles Design des FACE Experimentes in den Jahren 1995-96 und 1995/96

Das FACE Weizen Experiment wurde in den Jahren 1995-1997 in der Sonora-Wüste Arizonas, USA, zur Aufklärung der Wechselwirkung von erhöhtem atmosphärischen CO₂ und voller bzw. limitierter Stickstoffversorgung durchgeführt. An dem Vorhaben, das unter der Leitung des U.S. Water Conservation Laboratory Phoenix stand, beteiligten sich 1996 und 1997 ca. 20 Wissenschaftler aus 8 Ländern. Über die ringförmig angeordnete Anreicherungstechnik (Hendrey *et al.* 1993, Lewin *et al.* 1994) wurde die CO₂-Konzentration der Luft innerhalb der Parzellen (kreisförmige Plots mit 22 m Durchmesser) unter Freilandbedingungen um 200±5 ppm gegenüber der Umgebungskonzentration angehoben (vgl. Abb. 2).



Abb. 2 FACE Weizen Experiment Maricopa, 29. März 1997 (© 1997 PIK)

Die Anreicherung der Luft mit CO₂ erfolgte durch Öffnungen aus den vertikalen Röhren, wobei Windrichtung, -geschwindigkeit und die erzielte CO₂-Konzentration im Zentrum jeden Ringes mit einer Samplingfrequenz von 1 Hz gemessen wurden. Diese Daten dienten einer speziellen Steuerungssoftware, um durch Injektion von CO₂ die erhöhte CO₂-Konzentration innerhalb der Ringe einzustellen. Die Anreicherung wurde vor dem Aufgang des Weizenbe-

standes (*Triticum aestivum* L. cv Yecora Rojo) kontinuierlich bis unmittelbar vor der Ernte durchgeführt. Beim Experiment wurden vier FACE- und vier Control-Ringe im Abstand von je 90 m verwendet. Alle Plots wurden in der Mitte in die jeweiligen Stickstoffversorgungsstufen High (volle Versorgung) und Low (stark reduzierte Versorgung) geteilt. Die Anordnung FACE- bzw. Control-Ringe und die Einteilung in Halbringe sind aus Abb. 3 ersichtlich.



Abb. 3 Luftaufnahme des FACE-Runs 1996 vom 16. Februar 1996 (© 1996 USWCL Phoenix)

Für die Runs 1995-97 wurden in den Control-Ringen mit analoger Steuerung die gleichen Gebläse benutzt, die in den FACE-Ringen für die Anreicherung sorgten, wobei hier Luft mit der CO_2 -Konzentration der Umgebungsluft und der gleichen Flußrate wie in den FACE-Plots injiziert wurde. Damit sollte für die FACE- und Control-Parzellen ein weitgehend identisches Mikroklima garantiert werden. Eine geringfügige Störung der atmosphärischen Stabilität bewirkte in den Runs 1992-94 bei laufendem Gebläse unter gerade noch stabilen atmosphärischen Bedingungen (nur nachts bei totaler Windstille) eine Erwärmung der FACE-Parzellen um 0.5 bis 1.5 K in Bestandeshöhe. Dadurch wurde das Auftreten von nächtlichem und morgendlichem Tau unterdrückt oder verringert.

Die Düngung und Bewässerung aller Parzellen erfolgte mit einem unterirdischen Schlauchsystem, in einer Tiefe von ca. 0.2 m und mit einem Abstand von 0.5 m. Die Distanz der Auslaßöffnungen betrug ca. 0.3 m. Der Boden in dem zum Versuchstation Maricopa gehörenden Teil der Sonora-Wüste ist als Trix Clay-Loam klassifiziert (Kimball *et al.* 1995).

2.2. Die FACE-Runs 1995-97

Die FACE-Experimentes 1995-1997 wurden zur Aufklärung der Wechselwirkungen von erhöhtem atmosphärischen CO₂ und verschiedener Stickstoffversorgung durchgeführt. Die Düngung betrug 350 kg N/ha (High-N 1996) bzw. 393 kg N/ha (High-N 1997) unter unlimitierten und 70 kg N/ha (Low-N 1996) bzw. 53 kg N/ha (Low-N 1997) unter limitierten Bedingungen bei einer einheitlichen Bewässerung von ca. 650 mm. Die CO₂-Konzentration der FACE-Plots wurde um 200 ppm gegenüber den Control-Plots angehoben. Aussaat und Ernte waren am 15. Dezember 1995/1996 bzw. 21. Mai 1996/28. Mai 1997. Es gab im FACE-Run 1996 keine experimentelle Beteiligung des PIK. Beim FACE Run 1997 wurden seitens des PIK und des Professor Hellriegel Institutes e.V. Bernburg (HI) *in situ*-Bestimmungen der maximalen Carboxylierungskapazität der Rubisco zu sechs verschiedenen Entwicklungsstadien in allen CO₂- und Düngungsvarianten durchgeführt (vgl. Kap. 4.1).

Neben diesem eigenen Datenmaterial standen der Bearbeitergruppe auch die meteorologischen sowie biologisch-mesoskaligen Ergebnisse des Experimentbetreibers (Entwicklungsstadien, Biomassen, Ernteerträge, Wasserverbrauch) zur Verfügung.

Insgesamt zeigte sich **unter Stickstoffmangel** eine **Verringerung der CO₂-Wirkung** in beiden Runs sowohl für mikroskalig bestimmte Photosyntheseaktivitäten als auch für die auf Bestandesebene erhobenen Biomasse- und Ertragsdaten. Dagegen traten in den Runs 1992-1994 **unter limitierter Wasserversorgung** generell **stärkere CO₂-Wirkungen** auf (Grossman *et al.* 1995, Hunsaker *et al.* 1996, Kartschall *et al.* 1995, Pinter *et al.* 1995, Wechsung *et al.* 1995, Wechsung *et al.* 1999)

Auf die jeweiligen Wirkungen erhöhten CO₂'s und limitierter Stickstoffversorgung wird detaillierter in den Kapiteln 3 bis 5 eingegangen.

3. Weiterentwicklungen des Weizenmodells *demeter*

Das Weizenmodell *demeter*, dessen grundlegende Version in den vom BMBF geförderten Vorhaben 01LK9107 und 0339626 entwickelt wurde, besteht aus folgenden Teilmodellen:

- (i) Pflanzenwachstum (Kartschall *et al.* 1990)
- (ii) Bodenwasser-, Bodentemperatur- und Bodenstickstoffdynamik (Kartschall *et al.* 1989, Grossman *et al.* 1995)
- (iii) Wurzelmodell (Asseng 1990)
- (iv) Strahlungstransfermodul (Spitters *et al.* 1986; Goudriaan 1986)
- (v) Boden-Pflanzen-Atmosphäre-Transfer-Modul (Grossman *et al.* 1995, Grossman-Clarke *et al.* 1999)
- (vi) C₃-Photosynthese-Modul (Kartschall *et al.* 1995).

Eine detaillierte Darstellung des gesamten Modells ist in Kartschall *et al.* (1996, 1998) enthalten. Der Simulationszeitschritt für die Modellanwendungen im bearbeiteten Vorhaben variierte zwischen minimal 1 min und maximal 1 d. Als Eingangsdaten dienen die entsprechend zeitlich aufgelösten Wetterdaten (Temperatur, Luftfeuchte, Strahlung, Niederschlag, Windgeschwindigkeit) sowie Boden- und standortspezifische Parameter (u.a. Feldkapazität, Welkepunkt, Sättigungsleitfähigkeit, Wärmekapazität).

3.1. Gas- und Energieaustauschmodul (SVAT_MOD, SYNTHESE)

3.1.1. Flexible dreidimensionale Gauss-Legendere-Integration für wichtige Bestandesflußgrößen

In der aktuellen *demeter*-Version wird zur Verbesserung der Genauigkeit (bes. im Tages-schrittmodus) eine flexible Gauss-Legendre-Integration ([GLI] Bronstein *et al.* 1999) zur Berechnung der Lichtverteilung und der Photosynthese im Bestand verwendet (s. Tab. 1 und 2). Die GLI erfolgt über die Bestandestiefe, die Blatt- sowie die Himmelsphärenwinkel, verschiedene Lichtklassen und die Zeit. Für geringe Bestandestiefen werden dabei kleine Stützzahlen (1 bis 3) und für dichtere Bestände höhere Stützzahlen (5 bis 9) verwendet.

Index i	1	2	3	4	5	6	7	8	9
X _{1,1-4}					0.5				
X _{3,1-3}				0.1127017	0.5	0.8872983			
X _{5,1-2}			0.0469101	0.2307653	0.5	0.7692347	0.9530900		
X _{7,1-1}		0.02544604	0.1292344	0.2970774	0.5	0.7029226	0.8707656	0.9745539	
X _{9,1}	0.01591988	0.08198445	0.1933143	0.3378733	0.5	0.6621267	0.8066857	0.9180155	0.9840801

Tabelle 1 Relative Stützstellenkoordinaten $x_{j,i}$ für Gauss-Legendre-Integration mit 1 bis 9 Stützstellen im Intervall $[0, 1]$.

Index i	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$W_{1,1-4}$					1.0				
$W_{3,1-3}$				0.2777778	0.4444444	0.2777778			
$W_{5,1-2}$			0.1184634	0.2393143	0.2844445	0.2393143	0.1184634		
$W_{7,1-1}$		0.06474248	0.1398527	0.1909150	0.2089796	0.1909150	0.1398527	0.06474248	
$W_{9,1}$	0.04063720	0.09032408	0.1303053	0.1561735	0.1651197	0.1561735	0.1303053	0.09032408	0.04063720

Tabelle 2 Integrationsgewichte $w_{j,i}$ für Gauss-Legendre-Integration mit 1 bis 9 Stützstellen.

3.1.2. Lichtinterzeption

Durch Nutzung der GLI für eine Integration über verschiedene Himmelsphären wird bei der Berechnung der Lichtinterzeption und Energiebilanz von Boden und Bestand nunmehr der Einfluß nicht vollständig geschlossener Reihen berücksichtigt. Als Parameter sind dazu der Reihenabstand r_r [m] und die Drillrichtung als Azimutwinkel σ_D in $[0, \pi/2]$ anzugeben.

3.1.3. Zweischichtkonzept für Boden-Pflanze

Die Berechnung der Lichtverteilung sowie des Energie- und Wasseraustausches erfolgt jetzt in zwei miteinander gekoppelten Schichten für die Bodenoberfläche und den Bestand.

3.1.4. Modifikation im Photosynthesemodul

Der Photosynthesemodul wurde an das neue Zweischichtkonzept sowie die Veränderung der Integrationsverfahren angepaßt. Daneben wurde der biochemische Teil entsprechend dem aktuellen Stand internationaler und eigener experimenteller Arbeiten in Bezug auf Parametergenauigkeit und umfassenderen Gültigkeitsbereich für limitierte Stickstoffversorgung und einen breiteren Bereich der Umgebungstemperatur erweitert. Weiterhin wurde die minimale Schrittweite des Photosynthesemoduls auf 1 min verkürzt, um die jetzt durch moderne Gasaustauschmeßtechnik zugängliche Kurzzeitdynamik der Photosynthese mit Auflösungen im Minutenbereich durch Simulationen nachvollziehen zu können.

Im Modell wird die **Photosyntheserate** (A)

$$A = V_c \cdot \left(1 - 0.5 \cdot \frac{V_o}{V_c} \right) = V_c \cdot \left(1 - \frac{\Gamma^*}{C_i} \right) \quad (1)$$

mit

V_C ... Carboxylierungsrate [$\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$]

V_O ... Oxygenierungsrate [$\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$]

Γ^* ... CO_2 -Kompensationspunkt [$\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$]

nach Farquhar *et al.* (1980, 1982) für die verschiedenen Schichten des Bestandes

entsprechend der absorbierten Strahlung und schichtspezifischer Parameter berechnet. Die gesamte Assimilationsrate des Bestandes zu einem Zeitpunkt ergab sich aus der Integration der Raten über die einzelnen Schichten und Himmelsphären. Ebenfalls unter Nutzung der GLI erfolgte die Integration zu Tageswerten, soweit das Modell nicht im Stundentaktmodus betrieben wird, bei dem die Zeitintegration der stündlich berechneten Assimilationswerte durch eine einfache Summation erfolgt. Für die Anwendungen im Minutentaktmodus wurde auf eine weitere zeitliche Integration der Assimilationsdaten verzichtet, da hier direkte Untersuchungen der Kurzzeitdynamik zur detaillierten Überprüfung dieser Modellteile an einzelnen beobachteten Tagesverläufen in zeitlich hoher Auflösung erfolgten.

Im folgenden sollen hier noch kurz die wichtigsten biochemischen Variablen der Photosyntheseberechnung angegeben werden

Carboxylierungsrate V_C

$$V_C = \min\{W_C, W_J\} . \quad (2)$$

Rubisco-limitierte Carboxylierungsrate W_C

$$W_C = \frac{V_{C\max} \cdot C_i}{C_i + K_C \cdot (1 + O_i \cdot K_O^{-1})} \quad (3)$$

mit

O_i ... blattinterne O_2 -Konzentration [$\text{mmol}\cdot\text{mol}^{-1}$]

$V_{C\max}$... Carboxylierungsrate bei Licht- und CO_2 -Sättigung in Abwesenheit von blattinternem Sauerstoff ($O_i = 0$) [$\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$]

K_C ... Michaelis-Menten-Konstante für CO_2 [$\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$]

K_O ... Michaelis-Menten-Konstante für O_2 [$\text{mmol}\cdot\text{mol}^{-1}$].

Ribulose-1,5-bisphosphate-regenerationslimitierte Carboxylierungsrate

$$W_J = \frac{C_i \cdot J}{4 \cdot C_i + 8 \cdot \Gamma^*} \quad (4)$$

mit

J ... potentieller Elektronentransport [$\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$].

Temperaturabhängigkeit

Die Temperaturabhängigkeit aller Reaktionskoeffizienten wird mittels einer einheitlichen Funktion k_T zur Beschreibung miteinander konkurrierenden Aktivierung bzw. Deaktivierung mit unterschiedlichen Energien beschrieben, welche für die festgelegte Referenztemperatur den Wert 1 annimmt.

$$k_T = \exp\left[\frac{(T - T_0) \cdot E_A}{R \cdot T}\right] \cdot \frac{1 + \exp\left[\frac{S}{R} - \frac{H}{R \cdot T_0}\right]}{1 + \exp\left[\frac{S}{R} - \frac{H}{R \cdot T}\right]} \quad (5)$$

mit

E_A ... Aktivierungsenergie [$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$]

H ... Deaktivierungsenergie-Enthalpieterm [$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$]

S ... Deaktivierungsenergie-Entropieterm [$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$]

R ... universelle Gaskonstante [$8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

T_0 ... Referenztemperatur [hier $T_0 = 25 \text{ °C} = 298.16 \text{ K}$]

Die Werte der einzelnen Reaktionskonstanten und Aktivierungs- bzw. Deaktivierungsenergien können Tab. 3 entnommen werden.

Variable	Einheit	Wert bei T_0	Aktivierungsenergie E_A [$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$]	Deaktivierung (Enthalpie) H [$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$]	Deaktivierung (Entropie) S [$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$]
$V_{C_{\max}}$	$\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	Variabel	116 300.0	202 900.0	650.0
$V_{O_{\max}}$	$\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	Variabel	116 300.0	202 900.0	650.0
K_C	$\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$	398.81	59 430.0	0.0	0.0
K_O	$\text{mmol} \cdot \text{mol}^{-1}$	244817.0	36 000.0	0.0	0.0
J_{\max}	$\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$	255.8	34 000.0	201 000.0	650.0

Tabelle 3 Numerische Werte, Aktivierungs- und Deaktivierungsenergien der wichtigsten Reaktionskoeffizienten der Ribulose-1,5-bisphosphate Carboxylase-Oxygenase

3.2. Rahmensoftware für Regionalanwendungen (SON_SURF)

3.2.1. Softwaremerkmale von SON_SURF

Eine breite Anwendung des ursprünglich für Forschungszwecke entwickelten Modells **demeter** ist bei der Anzahl durchzuführender Simulationen für zeitlich dichte Anwendun-

gen (Zeitschritt 1d) in räumlich hochaufgelösten (Gitterweite 1km) größeren Regionen (z.B. die Mark Brandenburg) nicht mehr im **offline**-Betrieb realisierbar. Für die in Kapitel 5. vorgestellten flächendeckenden Regionalsimulationen der Mark Brandenburg mußten dazu trotz Clusterung von Elementarzellen mit identischer Witterung und Bodengüte für jedes Erntejahr über 100 Einzelsimulationen durchgeführt werden. Zur Realisierung derartig umfangreicher Rechnungen müssen Datenorganisation, Simulationsvorbereitung, Simulationsablauf und Auswertung automatisiert ablaufen. Die im Rahmen des Vorhabens dazu entwickelte Software SON_SURF stellt als modellunabhängiger Rahmen folgende neue Funktionen bereit:

- (i) über eine graphische Nutzerschnittstelle (GUI) werden der Aufbau und die Pflege einer Datenbank mit Informationen zu Modellen, Böden, Standorten, Arten (Sorten), Agrotechnik, Szenarioinputs und -outputs realisiert
- (ii) die Organisation umfangreicher Arbeiten in Projekten
- (iii) vollautomatische Simulation von Projekten unter Nutzung von SONCHES als Simulations-Server

3.2.2. Implementierung

Die GUI- und Datenbankfunktionen wurden in einer Xbase-compatiblen Sprache programmiert. Die in Kap. 5. vorgestellten regionalen Modellanwendungen wurden mit einer 16-bit DOS-Version (dbase 4.0) durchgeführt. Zur Zeit befindet sich eine leistungsfähigere 32-Bit-Version (Microsoft FoxPro 6.0) in der Erprobung. Zur Nutzung graphischer Funktionen wurde die SAS-GRAPH-Prozedur über Menüs innerhalb der Xbase-Umgebung eingebunden. Darüber hinaus sind Interfaces zu der GREPLAY-Prozedur und dem SAS-DATA-Step realisiert.

3.2.3. Anwendung

Die erstellte Umgebung eignet sich besonders zur Modellevaluierung von multiplen Szenarien. Typische Anwendungsgebiete sind daher umfassende Modellvalidierungen und die räumlich explizite Simulation von Regionen mit Punktmodellen. Im Rahmen des vorliegenden Vorhabens erfolgten Vorbereitung, Organisation, Realisierung und Auswertung der Regionalstudie für das Land Brandenburg unter Nutzung dieses Tools.

4. Experimentelle Arbeiten zur Modellparametrisierung und -überprüfung

4.1. *In situ*-Bestimmung der maximalen Carboxylaseaktivitäten beim FACE 1997

4.1.1. Material und Methoden

Das Modell *demeter* berechnet den Gas- und Energieaustausches mittels einer multikriteriellen Iteration der Energiebilanz des Bestandes. Die Aufnahme von CO₂ durch die Stomata für die Photosynthese läuft im Modell in Analogie zu den realen Prozessen *gleichzeitig* mit der Abgabe von Wasserdampf für Transpiration ab. Eine der entscheidenden physiologischen Limitierungen für die Intensität der Photosynthese stellt $V_{C_{max}}$ dar. Die Größe $V_{C_{max}}$ kann als eng korreliert zum Rubiscopegehalt (und damit zum N-Gehalt der Blätter) gesehen werden. Simulationsstudien mit teilweise nur gering variierenden $V_{C_{max}}$ -Verläufen (Grossman-Clarke *et al.* 1999) machten die Wechselwirkung von Transpiration und Photosynthese deutlich. Diese Untersuchungen wurden durch experimentelle Befunde anderer am FACE beteiligter Gruppen während des Runs 1996 bestätigt. Ziel der eigenen experimentellen Arbeiten war daher die Erarbeitung von modellrelevanten Informationen über mögliche Wechselwirkungen einer N-Limitierung unter verschiedenem C_A mit $V_{C_{max}}$, der Transpiration und der Photosyntheseleistung auf den zeitlich verschiedenen Skalen im Verlaufe eines Tages und der gesamten Saison. Nach Wullschlaeger (1993) kann $V_{C_{max}}$ aus dem initialen Anstieg von $A(C_p)$ -Responsekurven ermittelt werden. Voraussetzung dafür sind ausreichend genaue Messungen unter sicher reproduzierbaren Bedingungen, die mittels der durch die Fa. LiCor Inc. entwickelten Freilandmeßtechnik LI 6400P (Abb. 4 u. 5), bei denen eine Kontrolle der wichtigsten Bedingungen (Luftfluß, CO₂-Konzentration, Blatt- bzw. Lufttemperatur, Luftfeuchte, Strahlung) gewährleistet ist, durchgeführt wurden.

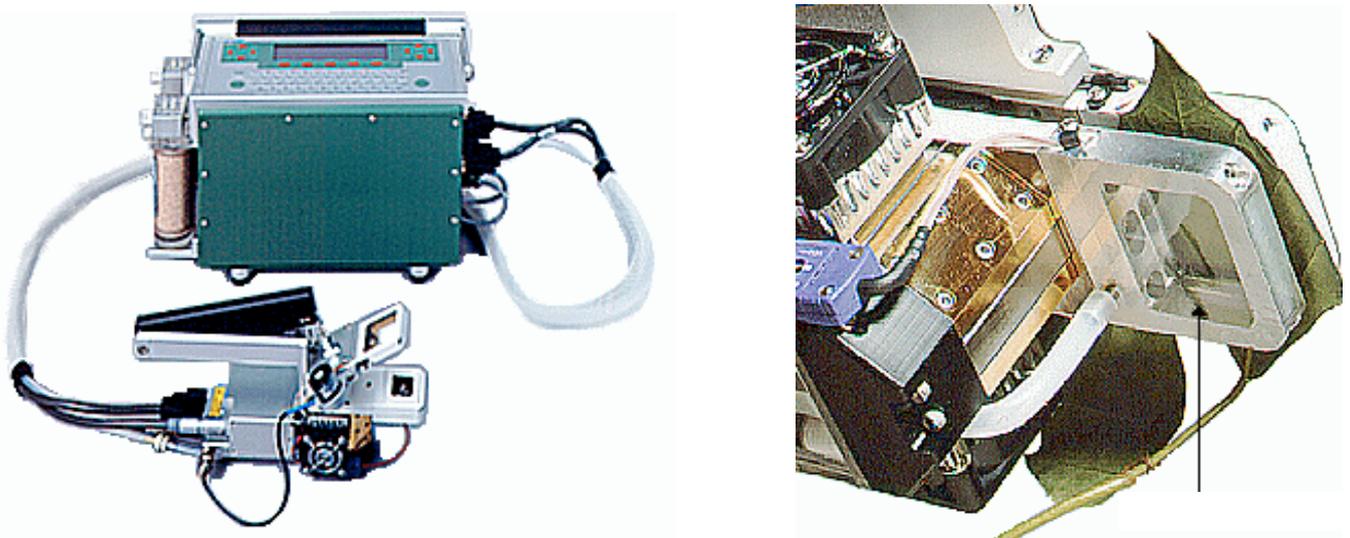


Abb. 4 Photosynthesemeßsystem LI 6400P (links: Gesamtgerät; rechts: Blattkammer; Photos: ©1998 LICOR)

4.1.2. Ergebnisse

Die maximale Photosynthesekapazität ($V_{C_{max}}$) wurde beim FACE-Run 1997 unter Freilandbedingungen zu 6 verschiedenen Entwicklungsstadien in allen CO_2 - und Düngungsvarianten über Gasaustauschmessungen bestimmt. $V_{C_{max}}$ wird dabei aus dem relativ sicher ermittelbaren initialen Anstieg der $A(C_i)$ -Kurven bestimmt, wobei sich evtl. systematische Meßfehler der Sensoren durch den Geradenausgleich kompensieren. Zur Abklärung möglicher diurnal auftretender Hemmungen der Photosynthese erfolgte die Untersuchungen getrennt vormittags und nachmittags mit je 4 Wiederholungen. Es wurden deutliche Effekte der Stickstoffversorgung und der phänologischen Entwicklung auf $V_{C_{max}}$ nachgewiesen. Ein hemmender Effekt erhöhten CO_2 's auf $V_{C_{max}}$ und evtl. diurnale Hemmungen waren jedoch nicht nachweisbar.

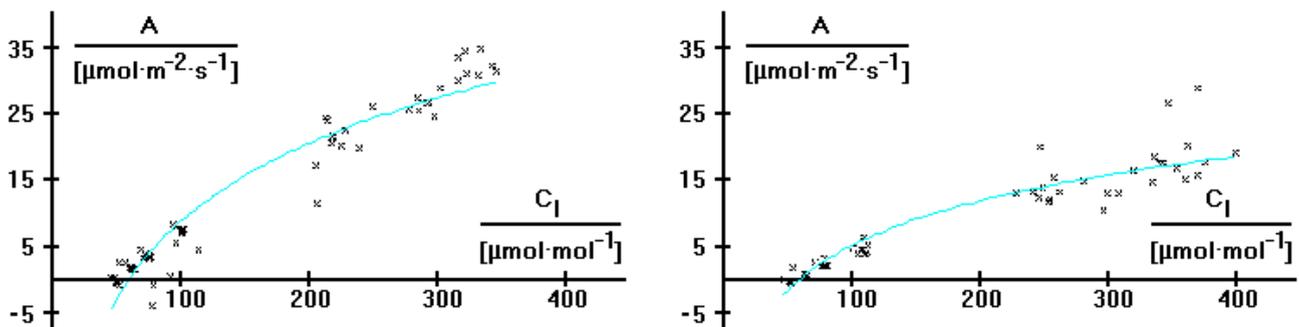


Abb. 5 Beim FACE 1997 gemessene $A(C_i)$ -Kurven (FACE-LOW) mit dem linearen Initialanstieg am 12. März (links) bzw. 14. April (rechts) verdeutlichen den saisonal abfallenden Trend.

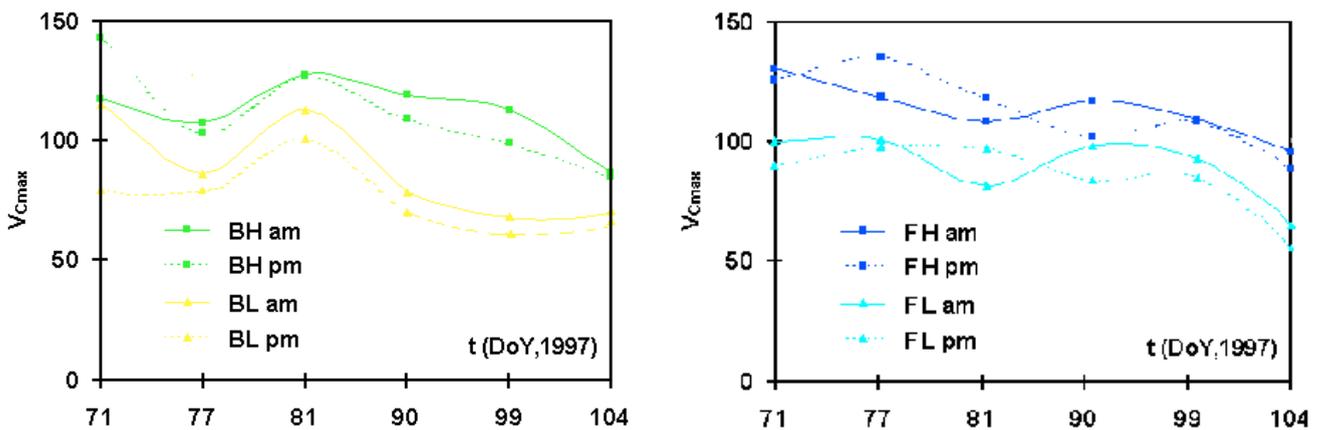


Abb. 6 Beobachtete Saisonale und diurnale Trends von $V_{C_{max}}$ (vor-/nachmittags: am/pm) für die Varianten Ambient ($C_A \approx 370$ ppm; links: B·) bzw. FACE ($C_A \approx 550$ ppm; rechts: F·) mit limitierter (·L) bzw. hoher Stickstoffversorgung (·H) beim FACE Run 1997

Die detaillierten Informationen über den saisonalen Verlauf vom $V_{C_{max}}$ gingen in das Teilmodell der Photosynthese von **demeter** ein und führten zusammen mit den in Kapitel 3 beschriebenen Modellerweiterungen zu einem verbesserten Modellverhalten auf allen Zeitskalen.

4.2. Kurzzeitdynamik des Gasaustausches bei der Bernburg Studie 1997 (diurnal run)

4.2.1. Material und Methoden

Innerhalb des vorliegenden Vorhabens wurden die Teilmodelle zur Berechnung des Energie- und Wasseraustausches (SVAT_MOD) und der Photosynthese (SYNTHESE) von *demeter* weiterentwickelt, um sie für weitergehende Untersuchungen und zur Nutzung in anderen Modellen verfügbar zu machen. Aus dem Anspruch der Verallgemeinerungsfähigkeit der Modellösungen leitete sich die Anforderung nach deren räumlicher und zeitlicher *Skalierbarkeit* ab. Die Nachweisführung für das dabei durchgeführte zeitliche (Gesamtsimulationszeiträume von 8 aufeinanderfolgenden Jahren) und räumliche Up-Scaling (Flächendeckung für die gesamte Mark Brandenburg mit einem 1kmx1km Raster) ist Gegenstand des Kapitels 5. An dieser Stelle soll die Ausdehnung des Gültigkeitsbereiches der o.g. Teilmodelle vom bisher betrachteten Bestandesniveau mit Zeitschrittweiten von 1h bis 1d zu Schrittweiten von 1 min auf Blattniveau mit an Messungen evaluierbaren Ergebnissen gezeigt werden. Dazu wurden im Rahmen der Bernburg-Studie 1997 Messungen des Tagesverlaufes des CO₂-Gasaustausches (Nettophotosynthese oder kurz Photosynthese) vorgenommen.



Abb. 7 Das Meßfeld der vergleichenden Bernburg-Studie beim „diurnal run“ am 19. Juni 1997 (links: Blick nach Nordosten mit den eingesetzten LI6400P, rechts: Blick nach Südwesten mit mikrometeorologischer Station; Photos: ©1997 PIK)

Verwendung fand der bei den FACE-Experimenten 1992-1997 untersuchte halbwüchsige Sommerweizen (*Triticum aestivum* L. cv. Yecora Rojo). Bedingt durch den extremen technischen und personellen Aufwand wurde für die Photosynthesemessungen nur die Variante mit voller Beregnung und Stickstoffdüngung (120 kgN·ha⁻¹) ausgewählt. Die Messungen erfolgten

- (i) an horizontal eingespannten Fahnenblättern des Haupttriebes
- (ii) mit einer Temperatur- und Feuchtesteuerung über externen Sensor (vgl. Abb. 12)
- (iii) unter Verwendung von drei LI6400P- Systemen (PIK: PIK1, Hellriegel Institut: FHA1/2) im parallelen Modus (interne Uhren mit ± 1 sec synchronisiert)

- (iv) mit einem mittleren Meßbeginnabstand zwischen den einzelnen Systemem ca. 20 min
- (v) mit „gleitendem“ Blattwechsel zwischen den drei Geräten (vgl. Abb. 11)
- (vi) zur Vermeidung von Störungen der physiologischen Funktion für maximal 1h je Blatt
- (vii) punktweise alle 60 Sekunden unter dem Betriebssystem LiCOR-Open 2.5
- (viii) über die gesamte Lichtperiode der Untersuchungstage 19. Juni, 10. und 11. Juli 1997 (Meßbeginn vor Sonnenaufgang; Meßende nach Sonnenuntergang)

4.2.2. Experimentelle Ergebnisse und Simulation

Von den drei für 1997 realisierten drei „diurnal runs“ seien hier die Ergebnisse des Runs vom 10. Juli 1997 detaillierter vorgestellt. Die durchgeführten Kurzzeitphotosynthesemessungen ergaben eine gute Übereinstimmung der Photosyntheseraten und stomatären Leitfähigkeiten für die unabhängig betriebenen Systeme (PIK: \circ ; FHA1: \circ ; FHA2: \circ ; Abb. 8 ff.) untereinander.

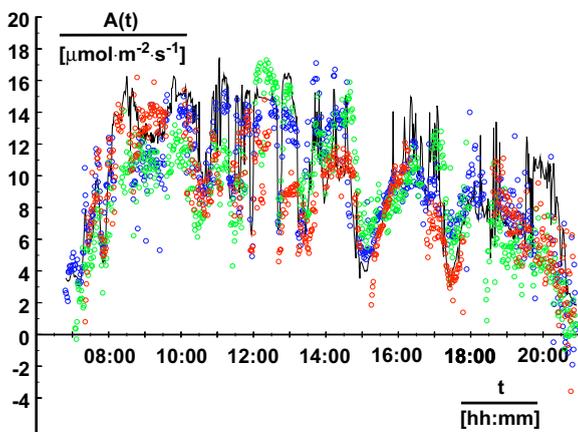


Abb. 8 Beobachteter (3 Fahnenblätter: \circ , \circ , \circ) und simulierter Verlauf (—) der Photosynthese am 10. Juli 1997

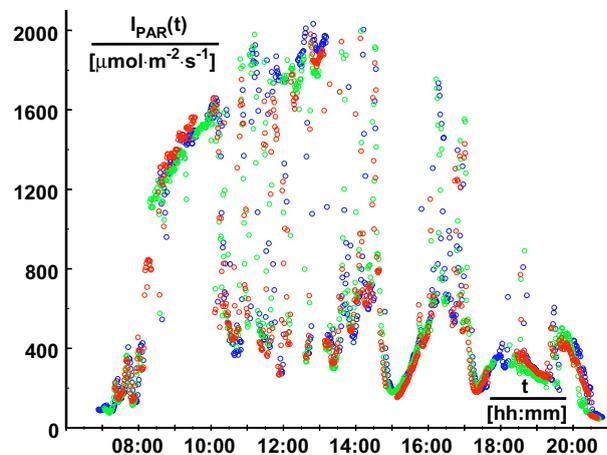


Abb. 9 Beobachteter Verlauf der incidenten photosynthetisch aktiven Strahlung (3 Sensoren: \circ , \circ , \circ) am 10. Juli 1997

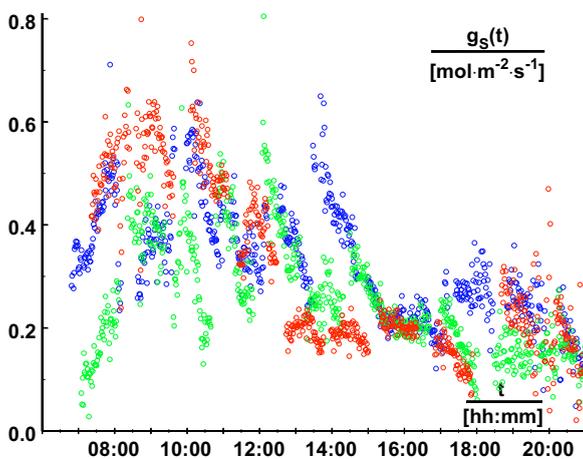


Abb. 10 Beobachteter Verlauf der stomatären Leitfähigkeit (\circ , \circ , \circ) am 10. Juli 1997

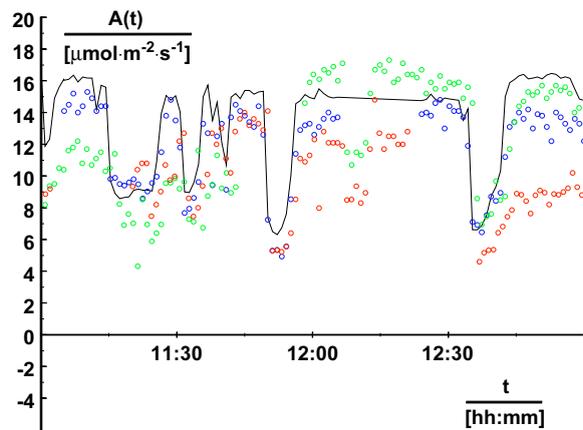


Abb. 11 Beobachteter (\circ , \circ , \circ) und simulierter Photosyntheseverlauf (—) am 10. Juli 1997 zwischen 11⁰⁰ Uhr und 13⁰⁰ Uhr MESZ in hoher zeitlicher Auflösung

Deutlich sichtbar ist die enge Korrelation der beobachteten physiologischen Größen mit der einfallenden Strahlung (Abb. 8 bis 11). Nach einem bedeckungsfreien Vormittag kam es unter leichter Südwestanströmung zu Quellbewölkung. Der Durchzug der jeweiligen Wolkenpakete spiegelt sich als deutlicher Abfall der einfallenden Strahlung (Abb. 9) und im Zusammenbrechen der sonst höheren Photosyntheseaktivitäten (Abb. 8 und 11) wider. Mit einer geringen Zeitverzögerung sank dabei auch die stomatäre Leitfähigkeit (Abb. 10), womit analoge Kurzzeituntersuchungen unter Laborbedingungen (Cardon *et al.* 1994) bestätigt werden konnten. Das Modell **demeter** wurde zur Simulation zeitlich hochaufgelöster Ereignisse um einen speziellen Modus mit einer minimalen Schrittweite von 1 min erweitert. Die grundlegenden Relationen und Parameterwerte des Modells blieben dabei unverändert. Als einzige direkt einzugebende Parameter des Modells wurden dem phänologischen Entwicklungsstand (Teigreife: DC 81) entsprechende numerischen Werte für

- (i) $V_{C_{max}}$ mit $80 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (Standardwert bei DC 31: $120 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
- (ii) J_{max} mit $140 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (Standardwert bei DC 31: $205 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)

in Analogie zu dem beim FACE beobachteten Verhalten dieser Größen festgelegt.

Die mit dem Modell dabei erzielten Ergebnisse und die durchaus bemerkenswerte qualitative und quantitative Kongruenz zu den Beobachtungsgrößen bestätigen das Vorgehen der Bearbeiter, die unter den Bedingungen des FACE erarbeiteten Modellösungen in eine übertragbare Form für deutlich verschiedene Standort- (Boden) und meteorologische Bedingungen (Deutschland) zu bringen. Verschwiegen werden sollen an dieser Stelle jedoch nicht die noch vorhandenen und sichtbaren Abweichungen des Modells vom realen Verhalten auf der Kurzzeitebene (Abb. 11). Als mögliche Ursachen dafür seien hier adressiert:

- (i) der Punktcharakter der Messungen (ca. 1 s Samplingfrequenz, ca. 1 min Relaxationszeit)
- (ii) die naturgegebenen Inhomogenitäten einzelner Organe gleicher Rangordnung lebender Organismen (hier: jeweils Fahnenblätter an drei verschiedenen Pflanzen)
- (iii) mögliche Modellungenauigkeiten der biochemischen Zusammenhänge des Calvin-Zyklus.

Ein deutliches Überschätzen der Photosynthese durch die Simulation trat während des Sonnenunterganges (ca. 19³⁰ Uhr bis 20³⁰ Uhr MESZ) auf. Auch hierfür seien mögliche Ursachen der aufgetretenen Abweichungen angegeben, die noch nicht im Modell erfaßte Detailprozesse betreffen:

- (i) Akkumulation von Assimilationsstärke in den Plastiden mit Behinderung des Elektronentransfers
- (ii) mögliche beginnende Blockade der Rubisco durch 2-Carboxyarabinitol-1-phosphat als Schutz des wertvollen Karboxylaseenzym vor störenden Einflüssen während der nächtlichen Metabolik zur Assimilatumspeicherung (Held 1996)

- (iii) von der üblichen Wirksamkeit abweichender stärkerer Effekt des Trockenstresses durch den tagsüber erfolgten Wasserverbrauch und dabei evtl. eingetretene Schäden

Die bei diesen Untersuchungen gewonnenen Daten und die zugehörigen zeitlich hochaufgelösten Simulationen dienten als eine unabhängige Validierungsbasis des Energieaustausch- und Photosynthesemoduls von *demeter*.

4.3. Experimenteller und modellgestützter Beitrag zum LITFASS-Experiment 1998 des DWD (diurnal run)

4.3.1. Material und Methoden

Das MOL des DWD führte 1998 ein großflächiges Energieaustausch- und Flußmeßprogramm, das LITFASS-Experiment 1998 (LITFASS.98) durch. Das PIK beteiligte sich an diesem Meßprogramm mit Messungen der Photosynthese und der Leitfähigkeit auf Blattebene in einem *Triticale*-Bestand mit hoher zeitlicher Auflösung (Meßschrittweite: 1min). Einen essentiellen Vorteil gegenüber dem Jahr 1997 bot das dabei eingesetzte Betriebssystem Open 3.1 mit der jetzt verfügbaren internen Mittelung aller Meßgrößen innerhalb der gewählten Zeitbasis für die durchgeführten Kurzzeitmessungen. Daneben war eine sehr stabile Kontrolle von Temperatur (T) und Feuchte (rH) in der Blattkammer über den externen Sensor und eine gleitende Mittelung seiner Charakteristika (T, rH) möglich, die störende selbsterregte Schwingungen bei

der Steuerung, welche unter dem Betriebssystem Open 2.5 noch auftraten, vermied.

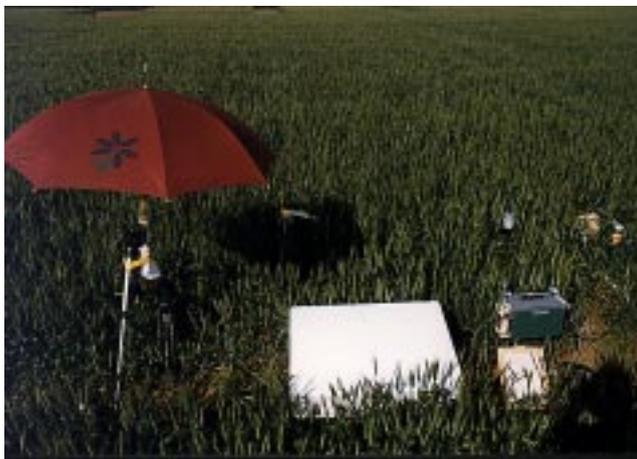


Abb. 12 Meßsystem LI6400P beim LITFASS.98 (18. Juni 1998) mit abgeschatteten externem Temperatur- und Feuchtesensor (gelbe Markierung Bildmitte) für die Steuerung von Temperatur und Feuchte (Photo: ©1998 PIK)

Beim LITFASS.98 waren die pflanzenphysiologischen Messungen des PIK auf Blattebene in ein Gesamtmeßprogramm des MOL-DWD als kleinscaligstes Teilprogramm eingeordnet. Im LITFASS.98 wurden u. a. die folgenden Standardmessungen (i-iii, vi-viii) ausgewertet bzw. es fanden folgende spezielle Messungen (iv-v, ix) statt (Auswahl):

- (i) Auswertungen von Satellitenaufnahmen (METEOSAT, Landsat, NOAA),
- (ii) Ballongestützte Radiosondenaufstiege des MOL (02⁰⁰ Uhr, 08⁰⁰ Uhr 14⁰⁰ Uhr und 20⁰⁰ Uhr MESZ) bis max. 30 km Höhe

- (iii) bodengestützte Feuchte- und Windprofilmessungen bis 15 km Höhe des MOL mit verschiedenen Methoden
- (iv) luftgestützte Messungen mit Dornier Do-128 und Falcon F-60 aus ca. 3.000 m Höhe
- (v) Helikopterüberflüge in 300 m und 70 m Höhe (Helipot) mit Mil Mi-8
- (vi) Fesselballonmessungen bis 500 m Höhe
- (vii) Profilmessungen am 99 m und am 12 m Mast des MOL
- (viii) bodennahe Profilmessungen bis 2 m mit verschiedenen Methoden (aerodynamische Methode, Eddy-Korrelation) durch verschiedenen Teilnehmer
- (ix) bodengestützte Messungen von Blattflächenindex (LAI) des Bestandes (MOL und PIK) und Gasaustauschmessungen auf Blattniveau (PIK)

Erschwerend für die Einordnung wirkte sich aus, daß die blattgebundenen Messungen nur an niederschlagsfreien und höchstens mäßig bewölkten Tagen durchführbar sind. Diese Bedingungen waren nur bei den beiden Meßphasen 1 (3./4. Juni 1998) und 5 (17./18. Juni 1998) gegeben. Während der beim LITFASS.98 durchgeführten „diurnal runs“ (4. und 18. Juni 1998) wurden die Messungen in weitgehender Analogie zu den Messungen des Jahres 1997 realisiert. Verwendet wurden wiederum drei Systeme (PIK: o; FHA1: o; und ein Gerät des MOL: DWD1: o) im Parallelbetrieb. Die Messungen erfolgten

- (i) auf einem Praxisschlag mit einem relativ inhomogenen ***Triticale***-Bestand
- (ii) an horizontal eingespannten Fahnenblättern des Haupttriebes
- (iii) mit einer Temperatur- und Feuchtesteuerung über externen Sensor (vgl. Abb. 12)
- (iv) parallel mit drei LI-6400P-Systemen (interne Uhren mit ± 1 sec synchronisiert)
- (v) mit einem mittleren Meßbeginnabstand zwischen den einzelnen Systemem ca. 20 min
- (vi) mit „gleitendem“ Blattwechsel zwischen den drei Geräten
- (vii) zur Vermeidung von Störungen der physiologischen Funktion für maximal 1h je Blatt
- (viii) alle Meßwerte gemittelt über jeweils 1 Minute unter dem Betriebssystem LiCOR-Open 3.1
- (ix) über die gesamte verfügbare Lichtperiode des Untersuchungstages 18. Juni 1998 (Meßbeginn am 18. Juni durch Tau bis ca. 08⁰⁰ MESZ verzögert; Meßende nach Sonnenuntergang)

4.3.2. Experimentelle Ergebnisse und Simulation

Die am 18. Juni erhaltenen blattgebundenen Meßergebnisse zeigen im wesentlichen ein ähnliches Verhalten wie die Ergebnisse der Bernburg-Studie 1997. Durch die insgesamt verbesserte Methodik (interne Mittelung aller Werte und verbesserte T- und rH-Steuerung) kann von einer geringeren Fluktuation der Meßwerte für die einzelnen Systeme ausgegangen werden. Es werden wiederum alle durch die drei Systeme ermittelten Photosyntheseraten, stomatären Leitfähigkeiten und die zugehörigen incidenten photosynthetisch aktiven Strahlungen gegenübergestellt. Daneben wird auch der Vergleich beobachteter mit den berechneten Photosyntheseraten im Überblick und detailliert für eine etwa 1 h währende Niederschlagsepisode (ca. 14³⁰ Uhr bis 15³⁰ Uhr MESZ) durchgeführt. Die durchgeführten

Messungen erfolgten wie o.g. auf einer nahe dem MOL gelegenen Praxisfläche, die im Vergleich zu der bei der Bernburg-Studie verwendeten Versuchsfläche ein deutlich ausgeprägte Inhomogenität des Bodens (anlehmiger Sand mit einer Ackerzahl von 35), des Entwicklungsstadiums (hier um das Stadium Beginn Milchreife [DC 71]), der Bestandesdichte (niedrige LAI zwischen 2.8 und 4.3) und der Biomassen je Grundfläche aufwies.

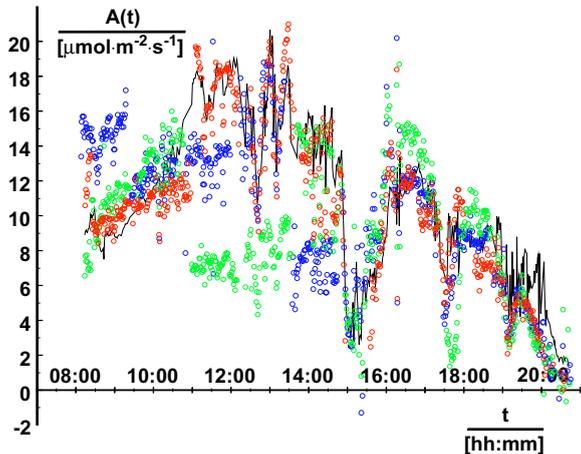


Abb. 13 Beobachteter (3 Fahnenblätter: o, o, o) und simulierter Verlauf (–) der Photosynthese am 18. Juni 1998

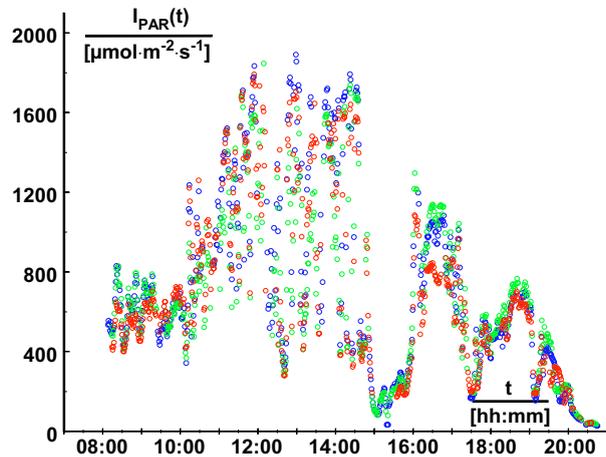


Abb. 14 Beobachter Verlauf der incidenten photosynthetisch aktiven Strahlung (3 Sensoren: o, o, o) am 18. Juni 1998

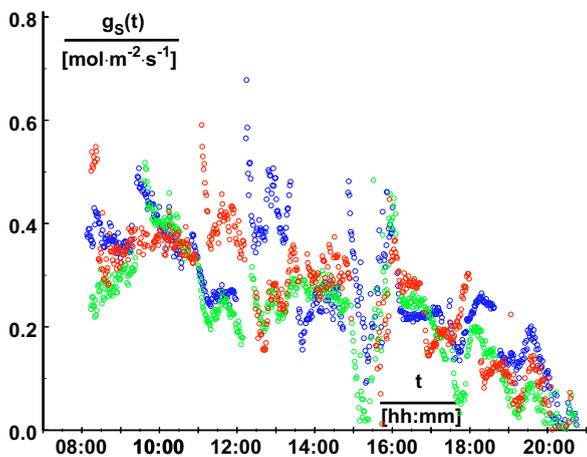


Abb. 15 Beobachteter Verlauf der stomatären Leitfähigkeit (o, o, o) am 18. Juni 1998

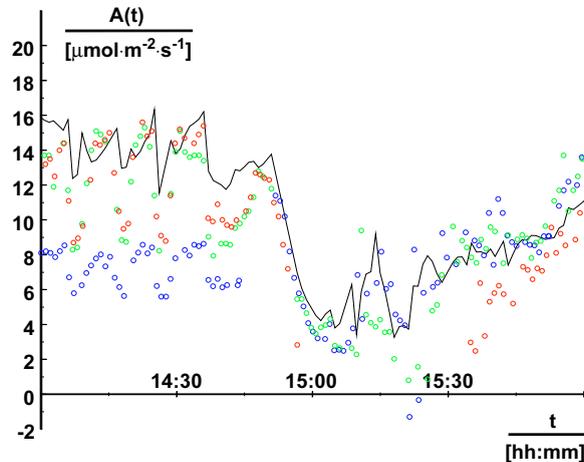


Abb. 16 Beobachter (o, o, o) und simulierter Photosyntheseverlauf (–) am 18. Juni 1998 zwischen 14⁰⁰ Uhr und 16⁰⁰ Uhr MESZ in hoher zeitlicher Auflösung

Für derartig inhomogene Praxis schläge ist weiterhin mit mehr oder weniger stark ausgeprägter „nichtoptimaler“ Agrikultur (Düngung, Pflanzenschutz usw.) zu rechnen, während bei Versuchsflächen durch den deutlich höheren Einsatz personeller und materieller Mittel von „quasioptimaler“ Agrikultur ausgegangen werden kann. Die bei den Messungen zu Tage

getreten Differenzen zwischen den einzelnen Meßsystemen sollten in diesen zwei genannten Problemkreisen ihre wesentlichen Ursachen haben.

In **demeter** wurden wiederum dem phänonologischen Entwicklungsstand (Milchreife: DC 71) entsprechende numerische Werte für

- (i) $V_{C_{max}}$ mit $105 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (Standardwert bei DC 31: $120 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
- (ii) J_{max} mit $175 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (Standardwert bei DC 31: $205 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)

festgelegt. Trotz der. o.g. Probleme und Schwierigkeiten ist es gelungen eine gute Übereinstimmung des beobachteten und des mittels **demeter** simulierten qualitativen und quantitativen Verhaltens (Abb. 13 und 16) zu erzielen. Verwiesen sei hier auf den zeitlich hochaufgelösten Vergleich des realen und simulierten Verhaltens während des o.g. Schauerereignisses (Abb. 16). Der Durchzug der dichten Wolkengruppe und die damit

- (i) verminderte Einstrahlung (14³⁷Uhr: $I=1440 \mu\cdot\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$; 14³⁸Uhr: $I=495 \mu\cdot\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$),
- (ii) einsetzenden Niederschläge (14⁵⁵ Uhr MESZ) und
- (iii) verbundene Abkühlung um ca. 5 K (14⁵⁴Uhr: $T_A=20.9^\circ\text{C}$; 14⁵⁶Uhr: $T_A= 16.2^\circ\text{C}$)

brachten die Photosynthese fast völlig zum Erliegen. Etwa gegen 15²⁰ Uhr MESZ lockerte sich die Bewölkung wieder auf, der Niederschlag endete und mit einer geringen Verzögerung erhöhte sich bei gleichzeitiger Abtrocknung und Erwärmung des Bestandes die Photosynthese wieder. Die in den Kammern verbliebenen Blätter (o, o) erwärmten sich schneller und erreichten eher wieder das vorherige Photosyntheseniveau. Die ursprünglichen Raten wurden erst 20 (o, o) bis 40 min (neu eingespanntes Blatt: o) nach Niederschlagsende wieder erreicht. Naturgemäß war die Streuung der beobachteten Photosynthese während der Niederschlagsepisode hoch.

Auch beim LITFASS.98 überschätzte **demeter** die Photosyntheseraten während des Sonnenunterganges (zwischen 19³⁰ Uhr und 20³⁰ Uhr MESZ). Die Abweichungen waren geringer ausgeprägt als in der Bernburg-Studie 1997. Es können dennoch alle drei dazu genannten Hypothesen (S. 21 ff) aufrechterhalten werden. Die reduzierenden Einflüsse sollten durch

- (i) den jüngeren Entwicklungsstand des Bestandes
- (ii) den niederschlagsbedingten Assimilations- und Transpirationsausfall

nicht so stark wirksam sein, wie im deutlich reiferen Bestand bei der Bernburg-Studie 1997.

Insgesamt bewies das Modell **demeter** bei allen aufgetretenen Problemen auch unter den für Modell-Meßwert-Vergleiche ungünstigen Boden-, Bestandes- und Witterungsbedingungen des LITFASS.98 seine Gültigkeit. Die hier vorgestellten experimentell erarbeiteten Daten stellen damit eine weitere unabhängige Validierungsbasis des Modells **demeter** dar.

5. Räumlich hochauflösende Regionalanwendung des Modells *demeter* für das Land Brandenburg

Im Rahmen dieser Modellanwendung wurde eine Simulationsstudie des Wachstums von Winterweizen unter gegenwärtigen und projizierten klimatischen Bedingungen für die Mark Brandenburg durchgeführt. Dabei sollten ausgehend vom gegenwärtigen Stand der Weizen- und (regionalen) Klimamodellierung weitere Aufschlüsse über Trends und Variabilität des von simulierten Weizenenerträgen gewonnen werden. Unter dem Aspekt der Datenverfügbarkeit wurde das Bundesland Brandenburg als Pilotregion identifiziert. Dazu wurden von der Aussenstelle Berlin der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) bereitgestellte Informationen in die deutschlandweite Bodenübersichtskarte (BÜK 1000) eingearbeitet. Daneben konnte auf die von der Abteilung Klimasysteme des PIK bereitgestellten regionalisierten Klimaszenarien zurückgegriffen werden.

5.1. Räumliche Diskretisierung des Klimas

Brandenburg zeichnet sich durch eine offene und flache Orographie aus, so daß kaum deutliche Separierungen des kontinental geprägten Klimas zu erwarten sind. In Bezug auf die langfristige Niederschlagverteilung innerhalb des Landes wurden aber gewisse Unterschiede durch die Klima-Arbeitsgruppe des PIK herausgearbeitet. Das langfristige Niederschlagsmittel im Zeitraum von 1951 bis 1990 betrug 566 mm mit zwei abnehmenden Trendkorridoren vom Nord-Westen in Richtung Süd-Osten als auch vom zentralen zum nordöstlichen Landesteil. Diese klimatische Differenzierung wurde durch Nutzung von erhobenen und projizierten Daten von 9 Klimastationen und der sukzessiven Zuordnung von entsprechenden Subregionen mittels des Thiessen-Polygon-Verfahrens realisiert. Verfügbare meteorologische Größen waren minimale und maximale Tagestemperatur, Globalstrahlung, Windgeschwindigkeit, Niederschlag und relative Luftfeuchte. Zu berücksichtigen war, daß direkt beobachtete Strahlungsdaten ausschließlich für die meteorologische Station Potsdam vorlagen. Zur Simulation der künftigen Zeitperioden wurde ein regional down-skaliertes transientes Klimaszenario genutzt, welches einen Anstieg um 1.5 K bis zum Jahr 2050 aufweist. Die grundsätzlichen Prinzipien der Szenario-Konstruktion stellen sich nach Werner und Gerstengarbe (1997) wie folgt dar:

- (i) Simulation eines intra- und interannuellen Temperaturverlaufes mit langfristigem linearem Trend, der den wesentlichen statistischen Charakteristiken der observierten Zeitreihen an den entsprechenden Standorten Brandenburgs entspricht.

- (ii) Cluster-Analyse der originalen und synthetischen Klimareihen hinsichtlich verschiedener Temperaturindizes und Tageslängen mit dem Ziel der Gruppierung von klimatischen Tages-Ereignissen
- (iii) Zuordnung von Clustern in realen und synthetischen Datensätzen und der Übernahme der nicht-simulierten meteorologischen Größen in den synthetischen Datensatz.

Das resultierende Klimaszenario zeichnet sich nach Werner und Gerstengarbe (1997) durch eine allgemeine Zunahme von Temperaturen mit verlängerten Hitzeperioden ($T_{\max} > 30^{\circ}\text{C}$) und verkürzten Kälteperioden ($T_{\min} < -10^{\circ}\text{C}$) aus. Das langfristige Niederschlagsmuster bleibt für die Mark Brandenburg mit örtlich abweichenden Trends von ± 30 mm im wesentlichen erhalten. Die Dauer von niederschlagsfreien Perioden verkürzt sich (13%) und die Andauer von extrem trockenen Tagen (Sättigungsdampfdruckdefizit > 2.0 kPa) verlängert sich (8.3%).

5.2. Parametrisierung des Bodens

Die primäre Informationen wurden aus der BÜK1000 gewonnen, die bei einem Maßstab von 1:1.000.000 insgesamt 72 Bodenkategorien unterscheidet (Hartwich *et al.* 1995). Dabei sind jeder Bodenkategorie eine gewisse Anzahl von Bodentypen zugeordnet, die durch das BGR mit dem Datenspeicher PRODAT (ZALF: Datenspeicher Boden 1976) für die Mark Brandenburg weiter spezifiziert wurden. So konnte in fast allen Fällen auf **gemessene** Bodenparameter wie Ton-, Schluff- und Sand- sowie Kohlen- und Stickstoffgehalt in mindestens 4 Horizonten zurückgegriffen werden. Parameter wie Feldkapazität, permanenter Welkepunkt und Lagerungsdichte wurden dagegen aus den o.g. Größen nach Vorgabe der Deutschen Boden-Kartieranleitung abgeleitet (AG Bodenkunde 1982). Es erfolgte eine heuristische Zuordnung eines charakteristischen Bodentyps zu den Kartierungseinheiten unter der Maßgabe möglichst häufiger Beprobung und mittlerer Repräsentanz der verfügbaren Wasserkapazität. Unter Nutzung einer Transferoutine wurden modellspezifische Parametersätze abgeleitet. Dabei wurde eine vertikale Schichtung bis zur Tiefe von 1.90 m mit Schichtmächtigkeiten der Stufen von 15cm, 15cm, 15cm, 15cm, 20cm, 20cm, 25cm, 25cm, 40cm und 40cm angestrebt.

5.3. Abschätzung von des Flächenanteils von Winterweizen

Es lagen keine detaillierten Informationen über den Anbauumfang für einzelne Subregionen des Landes Brandenburgs in den 80-er Jahren vor. Grundlage für eine Abschätzung bildeten daher Anbauflächeninformationen des Jahres 1991 für einzelne neue Landkreise sowie verschiedene digitale Karten zur Bodengüte, in den alten und neuen administrativen Grenzen

der Mark Brandenburg und der zugehörigen landwirtschaftlichen Nutzung. Bezüglich der Bodengüte wurde ein Bedienungsalgorithmus konzipiert, der unter Berücksichtigung verschiedener Randbedingungen die Verwendung der geeigneten Flächen auswies und mit ihren Bodenparametern für die Simulation bereitstellte. Dabei fanden nur Böden mit Ackerzahlen größer 27 Berücksichtigung.

5.4. Durchführung der Simulation

Die gegenwärtig übliche Agrikultur wurde für die retrospektiven und künftigen Untersuchungszeiträume vorausgesetzt. Winterweizen wird in der Mark Brandenburg Mitte Oktober mit einer mittleren Aussaatdichte (ca. 400 Körner·m⁻²) gedrillt und geht etwa Ende Oktober auf (DC 11). Alle Simulationen wurden einheitlich zum 28. Oktober (DC 11) initialisiert. Diese Annahmen sind konsistent mit Bonituren der freiwilligen phänologischen Beobachter des Deutschen Wetterdienstes für die Mark Brandenburg. Es erfolgte eine N-Düngung in üblicher Höhe von 120 kg N·ha⁻¹, welche in zwei Gaben zu Beginn der Vegetation und zum Entwicklungsstadium Schoßbeginn (DC 31) ausgebracht wurde. Als für Getreide nicht praktizierte produktionstechnische Option wurden evtl. Berechnungsgaben negiert. Die simulierten Zeiträume umfassten die Perioden von 1982-90, 2023-30, 2043-50. Eventuelle Sortenentwicklungen fanden keine Berücksichtigung, da sie eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse unmöglich machen bzw. ihnen einen weitgehend spekulativen Charakter aufprägen würden. Folgende atmosphärische CO₂-Konzentrationen wurden auf die verschiedenen Zeiträume projiziert und resultieren aus einer linearen Extrapolation der gegenwärtigen Trends:

Zeitraum	Erntejahre	C _A (ppm)
I	1983-1990	346
II	2023-2030	406
III	2043-2050	436

Tab. 4 Für die Regionalstudie (Mark Brandenburg) verwendete Zeiträume mit retrospektiven beobachteten Wetterdaten (I) mit regionalisiertem GCM-Szenario D (II-III) sowie zugehörige atmosphärische CO₂-Konzentrationen

Eine GIS-basierte Analyse lieferte unter Verschneidung von Klimaregionen und Bodenkarte unter Berücksichtigung der abgeschätzten Flächennutzung alle vorkommenden Boden-

Klima-Aggregationen. Jede Boden-Klima-Aggregation (Elementarzelle) wurde für die oben ausgewiesenen Perioden simuliert. Dabei kam das für diese Analysen entwickelte Tool SON_SURF zum Einsatz (vgl. Kap. 3.2.). Die wichtigsten Ausgabegrößen waren der Korn-ertrag, die oberirdische Biomasse, der zeitliche Verlauf der Entwicklung (Ontogenese) und die kumulative Evapotranspiration während der gesamten Vegetationsperiode.

5.5. Regionale Simulationsergebnisse und Diskussion

5.5.1. Validierung des simulierten regionalen Ertrages

Eine Gegenüberstellung der simulierten und erhobenen Landeserträge wird in Abb. 17 dargestellt.

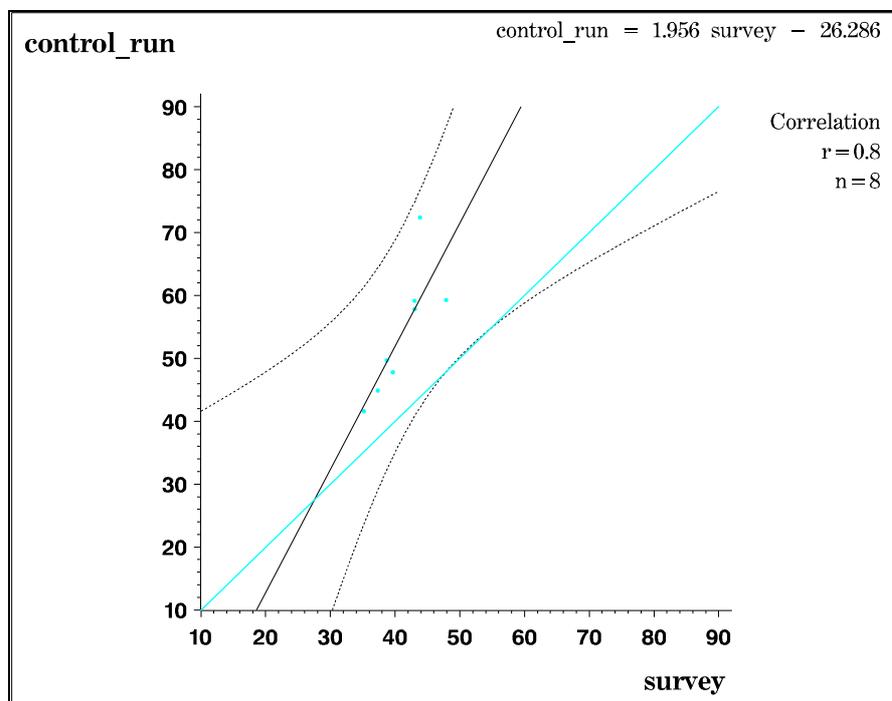


Abb. 17 Vergleich von simulierten und erhobenen Erträgen von 1983-1990 (ohne 1987) für Winterweizen im Land Brandenburg

Zur Evaluierung der Performance regionaler Simulationen wurde durch Verschneiden der Boden-Klimatyp-Ertragskarte mit der politisch-administrativen Karte der mittlere Ertrag für jeden einzelnen Landkreis ermittelt. Das Erntejahr 1987 wurde aufgrund der erheblichen Ernteverluste durch Lagerung aus diesem Vergleich eliminiert, da dieser Prozeß im Modell noch nicht berücksichtigt wird. Neben einer guten Korrelation der Landeserträge von 0.8 (n=8) sieht man eine mit steigenden Ertragsniveau zunehmende Tendenz der Überschätzung der simulierten im Vergleich zu den erhobenen Erträgen. Für den gleichen Zeitraum wurde ein Vergleich zu den erfaßten Erträgen auf Landkreisebene durchgeführt (Abb. 18).

Neben einer genügenden Korrelation ist weiterhin ein deutlicher Trend zur Überschätzung des realen Ertragsniveaus zu verzeichnen.

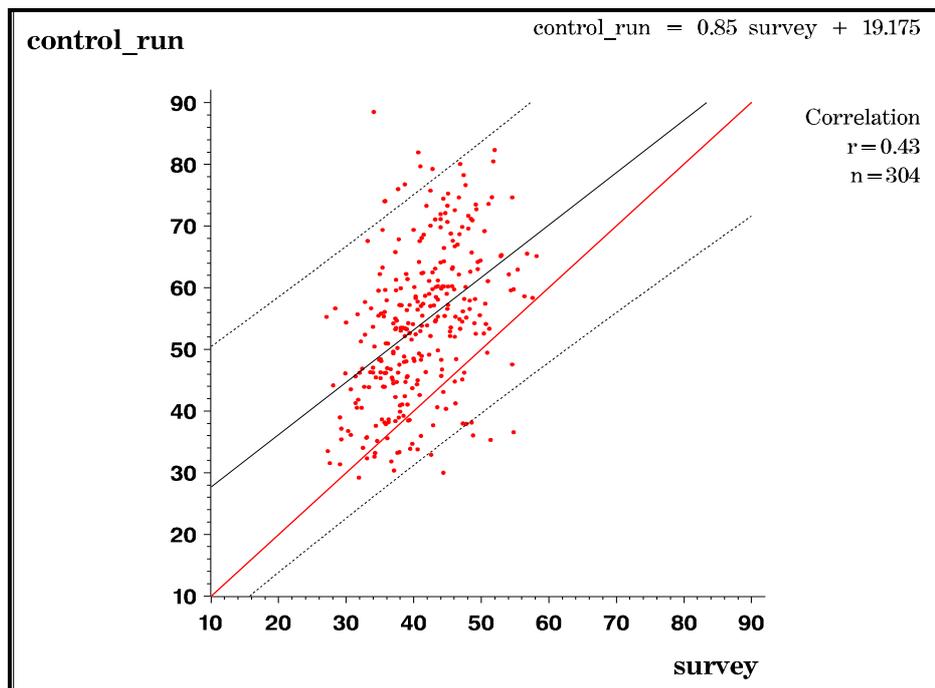


Abb. 18 Vergleich von simulierten und erhobenen Erträgen von 1983-1990 (ohne 1987) für Winterweizen der alten Landkreise im Land Brandenburg

5.5.2. Entwicklung und Wachstum

Für die Szenario-Perioden (II und III) war aufgrund der erhöhten Luft- und Bestandes-temperaturen eine allgemeine Entwicklungsbeschleunigung zu verzeichnen (Abb 19).

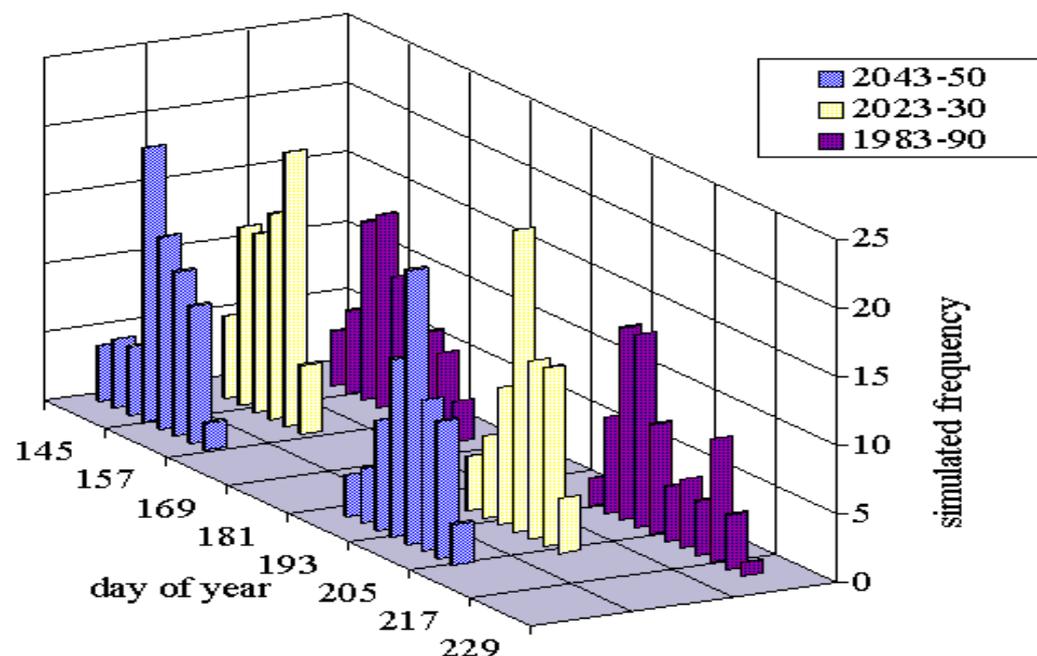


Abb. 19 Häufigkeitverteilung der simulierten Eintrittstage des Blüte- und Reifestadiums von Winterweizen im Land Brandenburg für verschiedene simulierte Perioden (Blüte: links DoY=130..165; Reife: rechts DoY=180..221)

Im Mittel kam es zu einer Verkürzung der Kornfüllungsphase um ca. 3 Tage. Die mittleren (räumlichen und zeitlichen Domain-) Trajektorien des oberirdischen Biomassewachstums und der Kornfüllung sind in Abb. 20 dargestellt. Der Trend zur allgemeinen Verfrüfung und Verkürzung der Wachstumsperiode wird auch hier deutlich, aber nur für die Periode der 40-er Jahre des 21. Jahrhunderts werden die dadurch entstehenden Defizite kompensiert. Die Ursachen der Depression in der Periode II (-10.6 % Ertrag) sind vor allem in der ungünstigen episodenhaften Konstellation des Klimas zu suchen, wobei hier insbesondere die Strahlungs- und Niederschlagsverteilung während der Hauptwachstumsperiode zu nennen sind. Dieser Fakt unterstreicht die Notwendigkeit der Untersuchung von größeren zeitlichen Fenstern, da sonst leicht wenig repräsentative Schlußfolgerungen gezogen werden können.

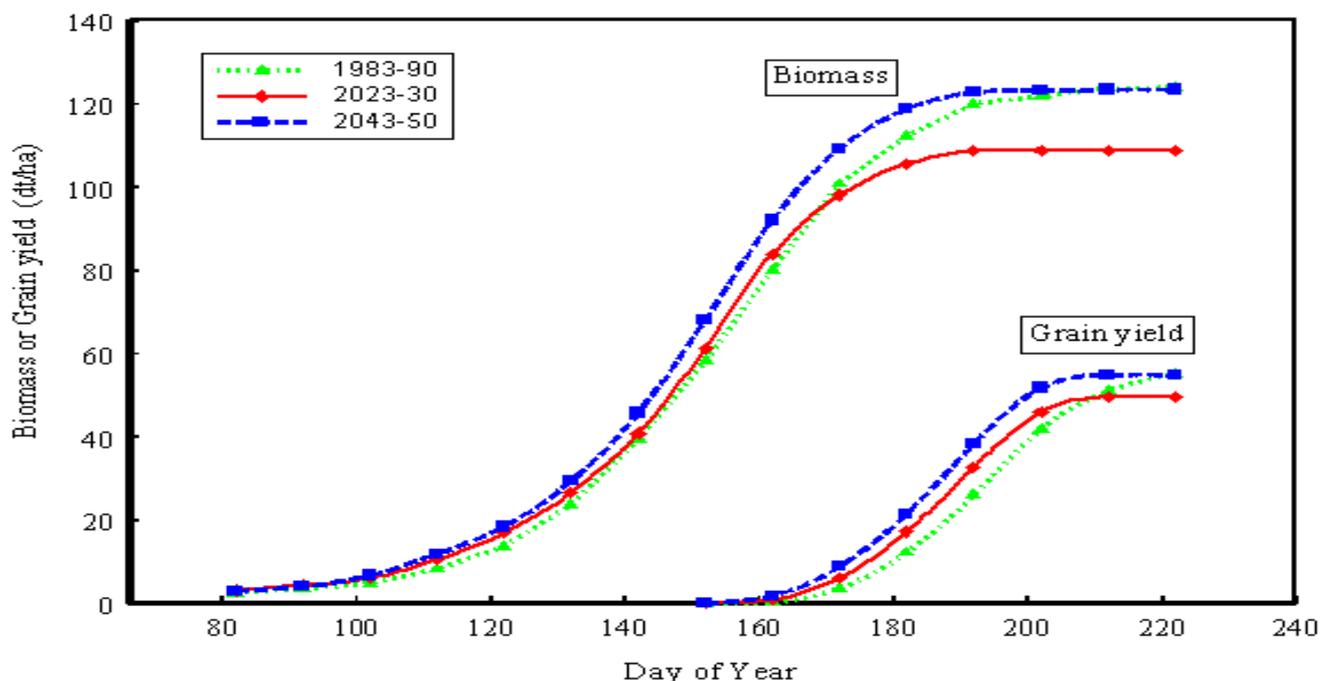


Abb. 20 Simulierte Domaintrajektorien für das Biomassewachstum und die Kornfüllung von Winterweizen im Land Brandenburg für die gewählten drei Perioden

5.5.3. Regionale Muster von Ertragsänderungen

Die Tendenz zur Kompensation und Überkompensation von Ertragsverlusten (Abb. 21) läßt sich vor allem im südlichen Teil Brandenburgs und teilweise im Nordosten der Uckermark-Region ausmachen. Dieses Muster ist konsistent mit den o.g. Tendenzen in der räumlichen Verteilung des Niederschlages, da Regionen mit etwas geringeren Niederschlag stärker vom

CO₂- Düngungseffekt profitieren. Als Regionen, die keine oder nur leichte Ertragseinbußen zu verzeichnen haben, können die nördlichen Landesteile wie die Uckermark und die Prignitz identifiziert werden.

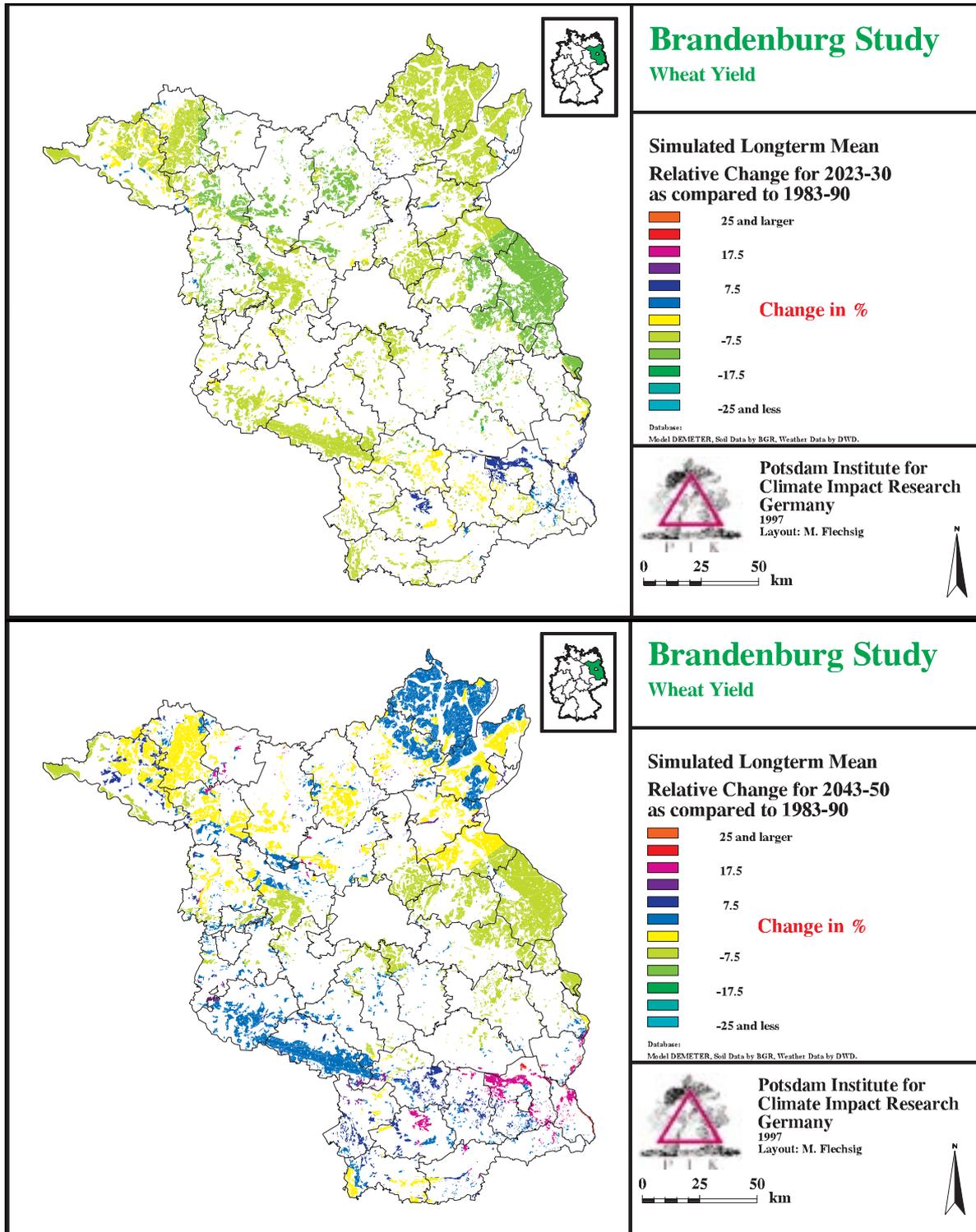


Abb. 21 Regionales Muster von Änderungen des Ertragsmittels im Vergleich zur Referenz-Simulation für Winterweizen im Land Brandenburg

Im Mittel wurde für das Land Brandenburg ein Ertragsrückgang von 10.6 % und von 1% für die Perioden II und III ermittelt. Der kompensatorische Effekt der steigenden CO₂-Konzentration betrug dabei 5 bzw. 7 %, d.h. ohne erhöhte CO₂-Konzentration der Atmosphäre hätten die simulierten Ertragsverluste 15.6 bzw. 8% betragen.

5.5.4. Witterungssensitivität und Ertragsstabilität

Neben dem allgemeinen Ertragsniveau ist die Witterungssensitivität des Ertrages von praktischem Interesse. Sie wird gewöhnlich über die Varianz des langfristigen Ertrages an einem bestimmten Standort quantifiziert und steht im direkten Zusammenhang zum Risiko von Mißernten. In der vorliegenden Studie wurde das Risiko berechnet, an einem expliziten Standort eine Ertragsdepression von mindestens 20 % zu erhalten. Konsistent zeigt sich in den Perioden II und III für das gesamte Land Brandenburg eine mittlere Abnahme des Ertragsrisikos um 4% bzw. 7%. Die Abb. 22 (retrospektive Periode I) und Abb. 23 (Szenario-Perioden II und III) zeigen das in Auswertung der regionalen Simulationen ermittelte räumliche Muster von Ertragsrisiken für die Mark Brandenburg.

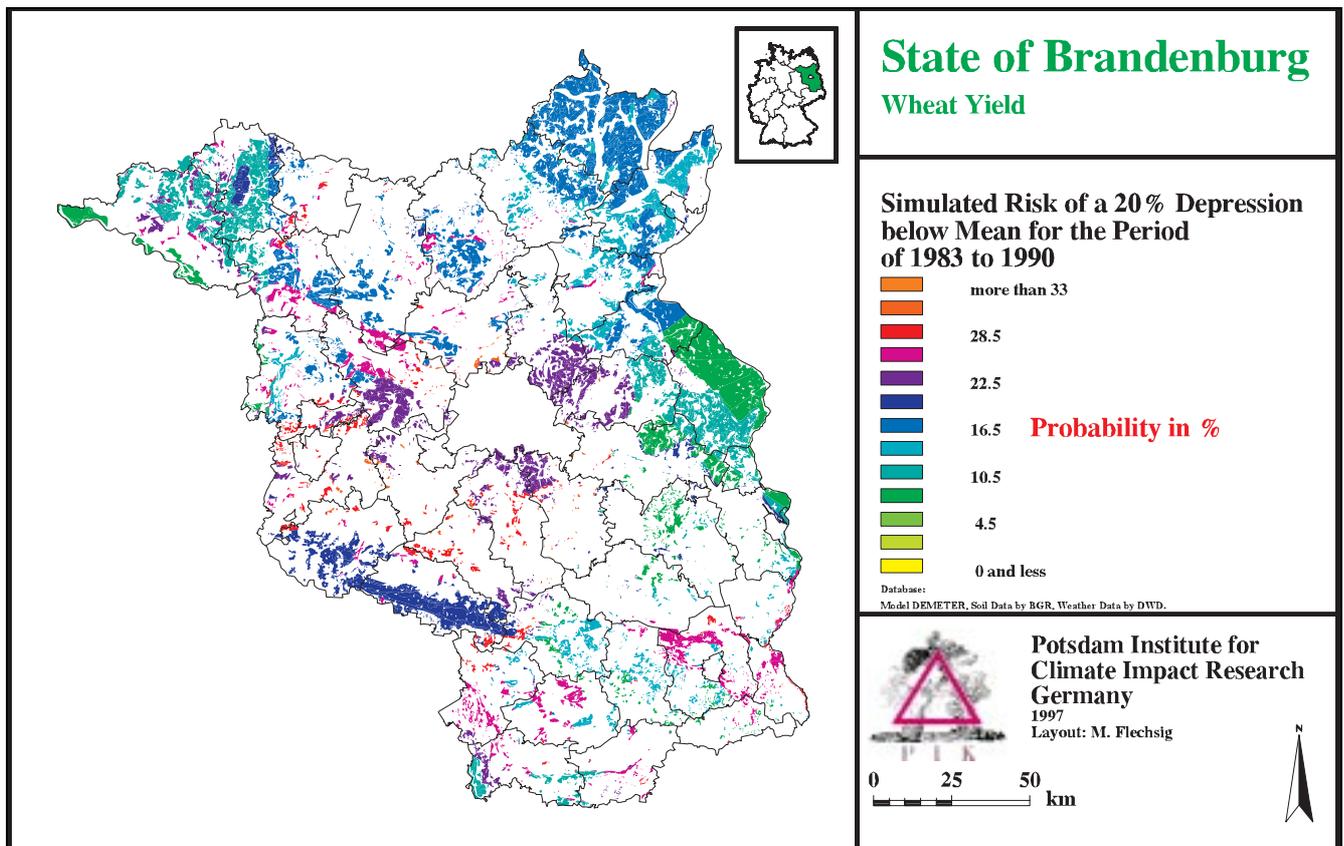


Abb. 22 Räumliche Verteilung des simuliertes Risikos einer 20%-igen örtlichen Ertragsdepression im Land Brandenburg für die Periode 1983-90

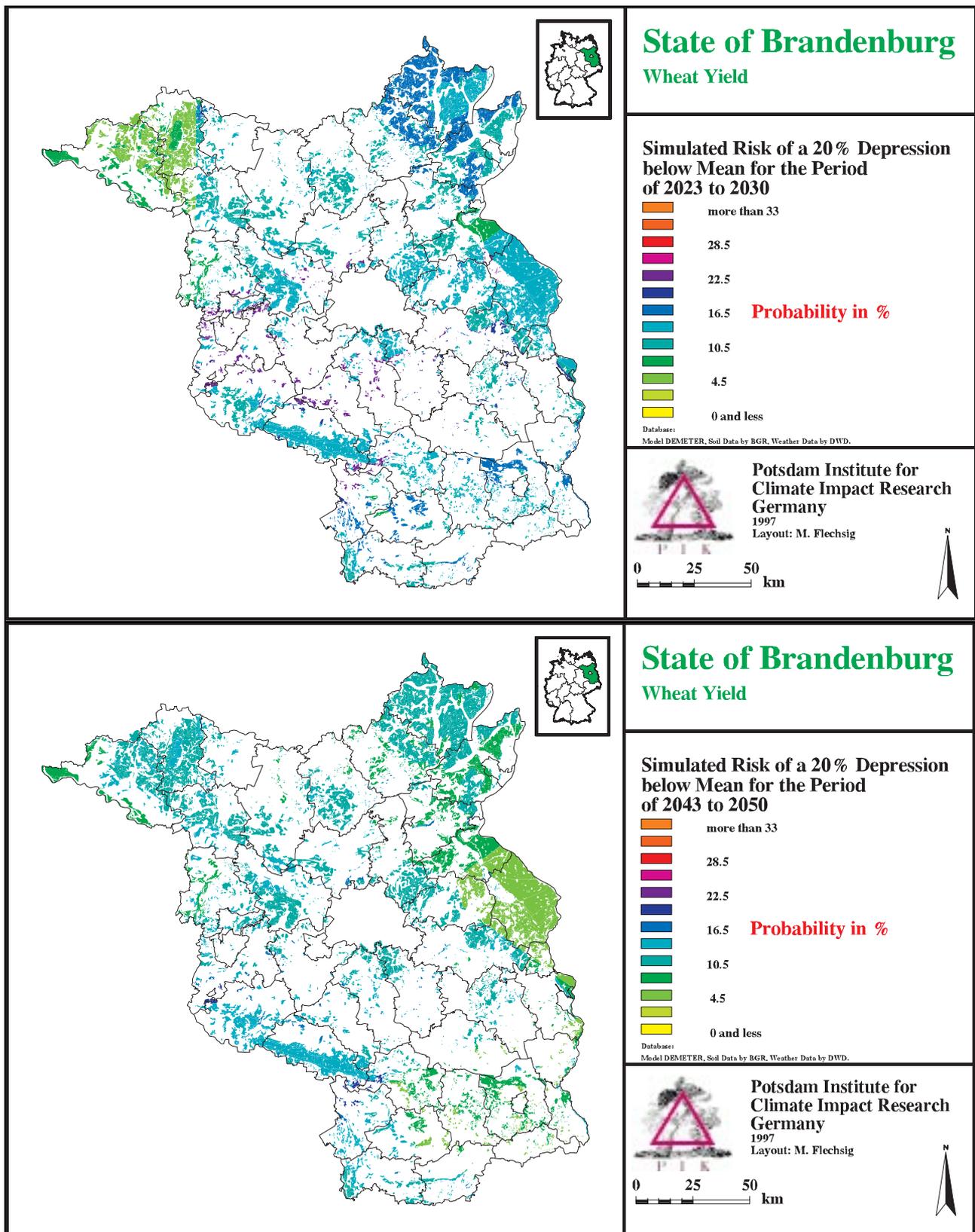


Abb. 23 Räumliche Verteilung des simuliertes Risikos einer 20%-en örtlichen Ertragsdepression im Land Brandenburg für die Perioden 2023-30 (oben) und 2043-50 (unten)

Damit lassen sich aus den umfangreichen Simulationen einige Schlußfolgerungen über zu erwartende **Tendenzen** der bisher vorausgesagten Klimaänderung in Bezug auf die Höhe

und die Stabilität der Weizenenerträge des Landes Brandenburg ableiten. Unter der Voraussetzung einer weiteren CO₂-Freisetzung nach dem optimistischen IPCC-Szenario D ist in den ersten Jahrzehnten des 3. Jahrtausends im Landesmittel für die Mark Brandenburg mit geringen bis mittleren Ertragseinbußen (<10%) durch verstärkte Trockenheit und höhere Temperaturen zu rechnen. Etwa ab 2035 bis 2045 AD kann von einem stärker wirksamen CO₂-Effekt (höhere Photosynthese und höhere Wassernutzungseffizienz) ausgegangen werden. Trotz weiter erhöhter Temperaturen aber moderaterer Trockenheit wird nach zwischenzeitlichen Ertragsdepressionen etwa ab diesem Zeitraum das gegenwärtige Ertragsniveau wieder erreicht. Durch den Effekt erhöhten CO₂'s werden für alle betrachteten Zukunftsszenarien die Erträge stabiler. Dies trifft flächendeckend für die gesamte Mark Brandenburg zu. Besondere Verbesserungen der Ertragsstabilität weist das Modell für die bisher mit relativ hohen Ertragsrisiken bewirtschafteten Teilregionen niedrigerer Bodengüte (Niederlausitz, Prignitz, Havelland) aus.

Abschließend sei zu den Angaben über **zu erwartende Tendenzen** nochmals auf die für die Simulationen und darauf basierenden Ertrags- und Risikoabschätzungen postulierten Voraussetzungen hingewiesen:

- (i) die weitere Emissionsentwicklung und daraus resultierende Anreicherung von CO₂ verläuft entsprechend des IPCC-Szenarios D (*optimistische Annahme*)
- (ii) die darauf basierenden durch Global Circulation Models und Down-Scaling-Methoden ausgewiesenen Klimaänderungen entsprechen den realen Verläufen in den nächsten Jahrzehnten (eine wahrscheinlich *optimistische Annahme*)
- (iii) es gibt keine wesentlichen Änderungen in der Landnutzung (*pessimistische Annahme*)
- (iv) die Berechnungen erfolgen unter Zugrundelegung heutiger Sorten, Agrikultur und Agrotechnik (*pessimistische Annahme*).

Derzeit laufende Untersuchungen mit weiter verbesserten Szenarien zeigen, daß die in diesem Kapitel erreichten Ergebnisse und die daraus abgeleiteten Schlußfolgerungen mit großer Wahrscheinlichkeit als zu optimistisch einzuschätzen sind, da die o.g. Annahmen (i) und (ii) wahrscheinlich nicht der Realität entsprechen werden. Eine extrem pessimistische Einschätzung zu erwartender Ernteeinbußen im Sinne eines **worst-case Szenarios** ergäbe sich aus einer Extrapolation der 1992 in Norddeutschland aufgetretenen extremen Ernteverluste, die in weiten Teilen der Böden mittlerer Qualität über 20% erreichte und für einige trockenstreißgefährdeten Getreidekulturen (Hafer: *Avena sativa* L.) bis zu totalen Ernteausfällen führte (Kartschall & Flechsig 1998).

6. Zusammenfassung

Mit dem vorgelegten Abschlußbericht des Vorhabens 01LK9535 wurde aufbauend auf den Ergebnissen der Vorhaben 01LK9107 bzw. 0339626 ein weiterer Fortschritt in der Entwicklung allgemein verwendbarer Modellösungen am Beispiel von Winter- und Sommerweizen (*Triticum aestivum* L.) bzw. *Triticale* erreicht. Das Vorhaben konnte damit erfolgreich bearbeitet werden. Wie geplant wurde eine verbesserte Version des Modells *demeter* mit modularem Aufbau für wichtige und allgemein anwendbare Ökosystemteile wie

(i) Lichtverteilung in homogenen geschlossenen bzw. gereihten Beständen;
(ii) Energie- und Gasaustausch einschließlich Photosynthese;
(iii) Dynamik von Wasser, Temperatur, Kohlenstoff- und Stickstoffumsatz in Mineralböden;
entwickelt. Durch den generischen Character der relativ detaillierten Modellösungen sind qualitative und quantitative Aussagen zu direkten und indirekten Auswirkungen erhöhter atmosphärischer CO₂ Konzentrationen auf *Graminaceae* des C₃-Typs bei Wasser- und Stickstofflimitierung unter breiteren geographischen (33° bis 52° N), Boden- und klimatischen Bedingungen möglich.

Die Arbeiten im Vorhaben konzentrierten sich zunehmend auf den Nachweis der Übertragbarkeit der beim FACE-Experiment in Arizona erarbeiteten Modellösungen auf europäische bzw. deutsche Boden- und Klimaverhältnisse. Dabei bildeten die Arbeiten zur Verbesserung und dem Nachweis der zeitlichen und räumlichen Skalierbarkeit der entwickelten Modellösungen einen wesentlichen Schwerpunkt. Dazu wurden neben begrenzten eigenen experimentellen Arbeiten zur Parameterquantifizierung und Evaluation des Modells *demeter* umfangreiche Simulationen mit dem Modell auf verschiedenen zeitlichen und räumlichen Skalen realisiert. Zusätzlich zu den zeitlich hochauflösenden Berechnungen des Tagesverlaufes der Photosynthese unter typisch mitteleuropäischen Bedingungen an Beispielen der Jahre 1997 und 1998 wurden erstmals umfangreiche flächendeckende Regionalanwendungen für die Mark Brandenburg an retrospektiven und prognostizierten Klimaszenarien realisiert.

Bei diesen durchgeführten Simulationen konnte die prinzipielle Gültigkeit des Modells *demeter* nachgewiesen werden.

Im Rahmen der Arbeiten zur flächendeckenden Regionalstudie wurde festgestellt, daß sich existierende GCM-Szenarien für den Raum Deutschland mit den nunmehr vorliegenden Methoden des down-scalings für Klimafolgenabschätzungen mit detaillierten Impactmodel-

len eignen. Dieses Ergebnis stellt einen wesentlichen Fortschritt gegenüber den in den bisher bearbeiteten Projekten (01LK9107 und 0339626) gemachten Erfahrungen dar, welcher insbesondere durch eine enge Zusammenarbeit mit der Abteilung Klimasysteme des PIK, der BGR und die Einbeziehung der Bearbeitergruppe in laufende experimentelle Studien (FACE 1996 und 1997, Bernburg-Studie 1997, LITFASS.98) erreicht werden konnte. Die zur Regionalstudie verwendeten Daten wurden den interessierten Mitgliedern des Wheat Network im internationalen Global Change of Terrestrial Ecosystems (GCTE)-Kernprojekt zur Verfügung gestellt und waren ein wichtiger Gegenstand des von der Bearbeitergruppe ausgerichteten 5. GCTE- Wheat Network Meetings (Potsdam, 16.-19. November 1998).

Die Nutzung einiger Modellteile für andere Ökosysteme ist bereits im Gange (das Bodenmodell wird u.a. in der AG Forstökosysteme am PIK genutzt) bzw. wird in naher Zukunft (Strahlungstransfer, Energiebilanz, Photosynthese) erfolgen.

Eine Weiterführung der auf regionaler Ebene durchgeführten Arbeiten für weitere europäische Regionen entlang eines deutlichen Klimagradienten (Großbritannien, Holland, Spanien) und die Überprüfung bzw. Nutzung des Modells *demeter* in Praxisbetrieben unter den Bedingungen des *Precision Farming* in den genannten Regionen soll in einem vom PIK zu koordinierenden Vorhaben innerhalb des 5. Rahmenprogramms der Kommission der Europäischen Union (Teilprogramm LIFE) erfolgen.

Literatur

- AG Bodenkunde (1982) *Bodenkundliche Kartieranleitung*. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.
- Asseng, S. (1990) Entwicklung und Erprobung eines Wurzelmodells als Erweiterung des Winterweizenmodells TRITSIM. Beitrag zum Workshop "Agrarökosystemmodellierung und Parameteradaptation", Goehren-Lebbin, 11.-14.11.1990.
- Bronstein, I.N., Semedjajew, K.A., Musiol, G. & Mühling, H. (1999) Taschenbuch der Mathematik, Verlag Harri Deutsch, Frankfurt/M., Thun, 1151 S.
- Cardon, Z.G., Berry, J.A. & Woodrow I.A. (1994) Dependence of the Extent and Direction of Average Stomatal Response in *Zea mays* L. and *Phaseolus vulgaris* L. on the Frequency of Fluctuations in Environmental Stimuli. *Plant Physiology* **105**, 1007-1013.
- Farquhar, G.D., von Caemmerer, S. & Berry, B.A. (1980) A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C₃ species. *Planta* **149**, 78-90.
- Farquhar, G.D. & von Caemmerer, S. (1982) Modelling of Photosynthetic Response to Environmental Conditions. In: *Physiological Plant Ecology, Encyclopedia of Plant Physiology* **12B** (NS) (eds Lange, O.L., Noble, P.S., Osmond, C.B. & Ziegler, H.) 549-587. Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York.
- Goudriaan, J. (1986) A simple and fast numerical method for the computation of daily totals of crop photosynthesis. *Agricultural and Forest Meteorology* **38**, 249-254.
- Grossman, S., Kartschall, Th., Kimball, B.A., LaMorte, R.L., Garcia, R.L., Wall, G.W., Hunsaker, D.J. & Pinter Jr., P.J. (1995) Simulated Responses of Energy and Water Fluxes to Ambient Atmosphere and Free-Air Carbon Dioxide Enrichment in Wheat. *Journal of Biogeography* **22**, 601-610.
- Grossman-Clarke, S., Kimball, B.A., Hunsaker, D.J., Long, S.P., Garcia, R.L., Kartschall, Th., Wall, G.W., Pinter Jr., P.J., Wechsung, F. & LaMorte, R.L. (1999) Effects of elevated atmospheric CO₂ on canopy transpiration in senescent spring wheat. *Agricultural and Forest Meteorology* **93**, 95-109.
- Hartwich, R., Behrens, J., Haase, G., Richter, A., Roeschmann, G., Schmidt, R. & Schulz, P. N. (1995) Das Fachinformationssystem Bodenkunde der BGR. IV. Bodeneuebersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland im Maßstab von 1:1 000 000.-*Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft* **72-II**, 9199-9222.
- Held, H.W. (1996) *Pflanzenbiochemie*. Heidelberg, Berlin, Oxford, Spektrum Akademischer Verlag. 583 S.
- Hendrey, G.R., Lewin, K. & Nagy, J. (1993) Control of carbon dioxide in unconfined field plots. In (eds Schulze, E.D. & Mooney, H.A.) *Design and Execution of Experiments on CO₂ Enrichment*. Commission of the European Communities, Environmental Research Programme, Ecosystem Research Report Series **6**, Brussels.
- Hunsaker, D.J., Kimbal, B.A., Pinter Jr, P.J., LaMorte, R.L. & Wall, G.W. (1996) Effects of CO₂ enrichment and irrigation on soil water balance evapotranspiration of wheat grown under open-air field conditions. *Transactions of the ASAE*. **39**, 1345-1355.
- Kartschall, Th., Döring, P. & Suckow, F. (1989) Simulation of Nitrogen, Water and Temperature Dynamics in Soil. *Systems Analysis, Modelling and Simulation* **6**, 117-123.

- Kartschall, Th., Matthäus, E. & Asseng, S. (1990) Simulation Experiments with the Agroecosystem Model DEMETER using SONCHES. *Systems Analysis, Modelling and Simulation* 7, 429-438.
- Kartschall, Th., Grossman, S., Kimball, B.A., Garcia, R.L., LaMorte, R.L., Pinter Jr., P.J. & Wall, G.W. (1995) A Simulation of Phenology, Growth, Water and Gas Exchange under Ambient Atmosphere and Free-Air Carbon Dioxide Enrichment (FACE) Maricopa, AZ, for Wheat. *Journal of Biogeography* 22, 611-622.
- Kartschall, Th., Grossman, S., Wechsung, F., Gräfe, J. & Poschenrieder, W. (1996) *Untersuchung der Auswirkungen von Klimaänderungen auf Agrarökosysteme*. Abschlußbericht zum BMBF-Vorhaben 01LK9107-5. Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e.V., Potsdam, 115 S.
- Kartschall, Th., Grossman, S., Michaelis, P., Wechsung, F., Gräfe, J., Waloszczuk, K., Wechsung, G., Blum, E. & Blum, M. (1998) Untersuchung der Auswirkungen erhöhter atmosphärischer CO₂-Konzentrationen auf Weizenbestände des Free-Air Carbon Dioxide Enrichment (FACE) – Experimentes Maricopa (USA). *PIK Report No. 37 und Abschlußbericht zum BMBF-Vorhaben 0339626*. Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e.V., Potsdam, 37 S.
- Kartschall, Th. & Flechsig, M. (1998) Das Beispiel: Die Auswirkungen des extrem heißen und trockenen Sommers 1992 im Norden Deutschlands. In: Lozan, J.L., Graßl, H. & Hupfer P. (Hrsg.) *Klima des 21. Jahrhunderts: Warnsignal Klima*. Büro wissenschaftliche Auswertungen und Geo Verlag; Hamburg, 254-259.
- Keeling, C.D. & Whorf, T.P. (1998) Atmospheric CO₂ records from sites in the SIO air sampling network. In *Trends: A Compendium of Data on Global Change*. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tenn., U.S.A.
- Kimball, B.A., Pinter Jr, P.J., Garcia, R.L., LaMorte, R.L., Wall, G.W., Hunsaker, D.J., Wechsung, G., Wechsung, F. & Kartschall, Th. (1995) Productivity and water use of wheat under free-air CO₂ enrichment. *Global Change Biology*, 1, 429-442.
- Lewin, K.F., Hendrey, G.R. & Kolber, Z. (1994) Brookhaven national laboratory free-air carbon dioxide enrichment facility. In: *FACE: Free-Air Carbon Dioxide Enrichment for Plant Research in the Field* (ed Hendrey, G.K.), CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 135-141.
- Pinter Jr, P.J., Kimball, B.A., Garcia, R.L., Wall, G.W., Hunsaker, D.J. & LaMorte, R.L. (1995) Free-Air CO₂ Enrichment: Responses of Cotton and Wheat Crops. In: Mooney, H.A. and Koch, G.W. (Editors), *Terrestrial Ecosystem Response to Elevated Carbon Dioxide*. Academic Press, Orlando, FL, USA, 215-264.
- Spitters, C.J.T., Toussaint, H.A.J.M. & Goudriaan, J. (1986) Separating the diffuse and direct component of global radiation and its implications for modelling canopy photosynthesis, Part I. Components of incoming radiation. *Agricultural and Forest Meteorology* 38, 217-229.
- Wechsung, G., Wechsung, F., Wall, G.W., Adamsen, F.J., Kimball, B.A., Garcia, R.L., Pinter Jr, P.J. & Kartschall, Th. (1995) Biomass and Growth rate of a Spring Wheat Root System grown in Free-Air CO₂ Enrichment (FACE) and ample soil moisture. *Journal of Biogeography* 22, 623-634.
- Wechsung, G., Wechsung, F., Wall, G.W., Adamsen, F.J., Kimball, B.A., Pinter Jr, P.J., LaMorte, R.L., Garcia, R.L., & Kartschall, Th. (1999) The effects of free-air CO₂B enrichment and soil water availability on spatial and seasonal patterns of wheat root growth. *Global Change Biology* 5, 519-529.

Kartschall, Gräfe, Michaelis, Waloszczyk, Grossman-Clarke

Werner, P.C. & Gerstengarbe, F.W. (1997) Proposal for the development of climate scenarios. *Climate Research* **8**, 171-182.

Wullschleger, S.D. (1993) Biochemical limitations to carbon assimilation in C₃ plants - a retrospective analysis of the A/C_i curves from 109 species. *Journal of Experimental Botany* **44**, 907-920.

Zentrum für Agrarlandschafts- und Landnutzungsforschung, Institut für Bodenforschung, Forschungsgruppe Eberswalde: *Datenspeicher Boden* (1976) Profildatei 'Prodat'.

PIK Report-Reference:

- No. 1 3. Deutsche Klimatagung, Potsdam 11.-14. April 1994, Tagungsband der Vorträge und Poster (April 1994)
- No. 2 Extremer Nordsommer '92
Meteorologische Ausprägung, Wirkungen auf naturnahe und vom Menschen beeinflusste Ökosysteme, gesellschaftliche Perzeption und situationsbezogene politisch-administrative bzw. individuelle Maßnahmen (Vol. 1 - Vol. 4)
H.-J. Schellnhuber, W. Enke, M. Flechsig (Mai 1994)
- No. 3 Using Plant Functional Types in a Global Vegetation Model
W. Cramer (September 1994)
- No. 4 Interannual variability of Central European climate parameters and their relation to the large-scale circulation
P. C. Werner (Oktober 1994)
- No. 5 Coupling Global Models of Vegetation Structure and Ecosystem Processes - An Example from Arctic and Boreal Ecosystems
M. Plöchl, W. Cramer (Oktober 1994)
- No. 6 The use of a European forest model in North America: A study of ecosystem response to climate gradients
H. Bugmann, A. Solomon (Mai 1995)
- No. 7 A comparison of forest gap models: Model structure and behaviour
H. Bugmann, Y. Xiaodong, M. T. Sykes, Ph. Martin, M. Lindner, P. V. Desanker, S. G. Cumming (Mai 1995)
- No. 8 Simulating forest dynamics in complex topography using gridded climatic data
H. Bugmann, A. Fischlin (Mai 1995)
- No. 9 Application of two forest succession models at sites in Northeast Germany
P. Lasch, M. Lindner (Juni 1995)
- No. 10 Application of a forest succession model to a continentality gradient through Central Europe
M. Lindner, P. Lasch, W. Cramer (Juni 1995)
- No. 11 Possible Impacts of global warming on tundra and boreal forest ecosystems - Comparison of some biogeochemical models
M. Plöchl, W. Cramer (Juni 1995)
- No. 12 Wirkung von Klimaveränderungen auf Waldökosysteme
P. Lasch, M. Lindner (August 1995)
- No. 13 MOSES - Modellierung und Simulation ökologischer Systeme - Eine Sprachbeschreibung mit Anwendungsbeispielen
V. Wenzel, M. Kücken, M. Flechsig (Dezember 1995)
- No. 14 TOYS - Materials to the Brandenburg biosphere model / GAIA
Part 1 - Simple models of the "Climate + Biosphere" system
Yu. Svirezhev (ed.), A. Block, W. v. Bloh, V. Brovkin, A. Ganopolski, V. Petoukhov, V. Razzhevaikin (Januar 1996)
- No. 15 Änderung von Hochwassercharakteristiken im Zusammenhang mit Klimaänderungen - Stand der Forschung
A. Bronstert (April 1996)
- No. 16 Entwicklung eines Instruments zur Unterstützung der klimapolitischen Entscheidungsfindung
M. Leimbach (Mai 1996)
- No. 17 Hochwasser in Deutschland unter Aspekten globaler Veränderungen - Bericht über das DFG-Rundgespräch am 9. Oktober 1995 in Potsdam
A. Bronstert (ed.) (Juni 1996)
- No. 18 Integrated modelling of hydrology and water quality in mesoscale watersheds
V. Krysanova, D.-I. Müller-Wohlfeil, A. Becker (Juli 1996)
- No. 19 Identification of vulnerable subregions in the Elbe drainage basin under global change impact
V. Krysanova, D.-I. Müller-Wohlfeil, W. Cramer, A. Becker (Juli 1996)
- No. 20 Simulation of soil moisture patterns using a topography-based model at different scales
D.-I. Müller-Wohlfeil, W. Lahmer, W. Cramer, V. Krysanova (Juli 1996)
- No. 21 International relations and global climate change
D. Sprinz, U. Luterbacher (1st ed. July, 2nd ed. December 1996)
- No. 22 Modelling the possible impact of climate change on broad-scale vegetation structure - examples from Northern Europe
W. Cramer (August 1996)

- No. 23 A methode to estimate the statistical security for cluster separation
F.-W. Gerstengarbe, P.C. Werner (Oktober 1996)
- No. 24 Improving the behaviour of forest gap models along drought gradients
H. Bugmann, W. Cramer (Januar 1997)
- No. 25 The development of climate scenarios
P.C. Werner, F.-W. Gerstengarbe (Januar 1997)
- No. 26 On the Influence of Southern Hemisphere Winds on North Atlantic Deep Water Flow
S. Rahmstorf, M. H. England (Januar 1977)
- No. 27 Integrated systems analysis at PIK: A brief epistemology
A. Bronstert, V. Brovkin, M. Krol, M. Lüdeke, G. Petschel-Held, Yu. Svirezhev, V. Wenzel (März 1997)
- No. 28 Implementing carbon mitigation measures in the forestry sector - A review
M. Lindner (Mai 1997)
- No. 29 Implementation of a Parallel Version of a Regional Climate Model
M. Kücken, U. Schättler (Oktober 1997)
- No. 30 Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): Overview and key results
W. Cramer, D. W. Kicklighter, A. Bondeau, B. Moore III, G. Churkina, A. Ruimy, A. Schloss, participants of "Potsdam '95" (Oktober 1997)
- No. 31 Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): Analysis of the seasonal behaviour of NPP, LAI, FPAR along climatic gradients across ecotones
A. Bondeau, J. Kaduk, D. W. Kicklighter, participants of "Potsdam '95" (Oktober 1997)
- No. 32 Evaluation of the physiologically-based forest growth model FORSANA
R. Grote, M. Erhard, F. Suckow (November 1997)
- No. 33 Modelling the Global Carbon Cycle for the Past and Future Evolution of the Earth System
S. Franck, K. Kossacki, Ch. Bounama (Dezember 1997)
- No. 34 Simulation of the global bio-geophysical interactions during the Last Glacial Maximum
C. Kubatzki, M. Claussen (Januar 1998)
- No. 35 CLIMBER-2: A climate system model of intermediate complexity. Part I: Model description and performance for present climate
V. Petoukhov, A. Ganopolski, V. Brovkin, M. Claussen, A. Eliseev, C. Kubatzki, S. Rahmstorf (Februar 1998)
- No. 36 Geocybernetics: Controlling a rather complex dynamical system under uncertainty
H.-J. Schellnhuber, J. Kropp (Februar 1998)
- No. 37 Untersuchung der Auswirkungen erhöhter atmosphärischer CO₂-Konzentrationen auf Weizenbestände des Free-Air Carbondioxid Enrichment (FACE) - Experimentes Maricopa (USA)
Th. Kartschall, S. Grossman, P. Michaelis, F. Wechsung, J. Gräfe, K. Waloszcyk, G. Wechsung, E. Blum, M. Blum (Februar 1998)
- No. 38 Die Berücksichtigung natürlicher Störungen in der Vegetationsdynamik verschiedener Klimagebiete
K. Thonicke (Februar 1998)
- No. 39 Decadal Variability of the Thermohaline Ocean Circulation
S. Rahmstorf (März 1998)
- No. 40 SANA-Project results and PIK contributions
K. Bellmann, M. Erhard, M. Flechsig, R. Grote, F. Suckow (März 1998)
- No. 41 Umwelt und Sicherheit: Die Rolle von Umweltschwellenwerten in der empirisch-quantitativen Modellierung
D. F. Sprinz (März 1998)
- No. 42 Reversing Course: Germany's Response to the Challenge of Transboundary Air Pollution
D. F. Sprinz, A. Wahl (März 1998)
- No. 43 Modellierung des Wasser- und Stofftransportes in großen Einzugsgebieten. Zusammenstellung der Beiträge des Workshops am 15. Dezember 1997 in Potsdam
A. Bronstert, V. Krysanova, A. Schröder, A. Becker, H.-R. Bork (eds.) (April 1998)
- No. 44 Capabilities and Limitations of Physically Based Hydrological Modelling on the Hillslope Scale
A. Bronstert (April 1998)
- No. 45 Sensitivity Analysis of a Forest Gap Model Concerning Current and Future Climate Variability
P. Lasch, F. Suckow, G. Bürger, M. Lindner (Juli 1998)
- No. 46 Wirkung von Klimaveränderungen in mitteleuropäischen Wirtschaftswäldern
M. Lindner (Juli 1998)
- No. 47 SPRINT-S: A Parallelization Tool for Experiments with Simulation Models
M. Flechsig (Juli 1998)

- No. 48 The Odra/Oder Flood in Summer 1997: Proceedings of the European Expert Meeting in Potsdam, 18 May 1998
A. Bronstert, A. Ghazi, J. Hladny, Z. Kundzewicz, L. Menzel (eds.) (September 1998)
- No. 49 Struktur, Aufbau und statistische Programmbibliothek der meteorologischen Datenbank am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung
H. Österle, J. Glauer, M. Denhard (Januar 1999)
- No. 50 The complete non-hierarchical cluster analysis
F.-W. Gerstengarbe, P. C. Werner (Januar 1999)
- No. 51 Struktur der Amplitudengleichung des Klimas
A. Hauschild (April 1999)
- No. 52 Measuring the Effectiveness of International Environmental Regimes
C. Helm, D. F. Sprinz (Mai 1999)
- No. 53 Untersuchung der Auswirkungen erhöhter atmosphärischer CO₂-Konzentrationen innerhalb des Free-Air Carbon Dioxide Enrichment-Experimentes: Ableitung allgemeiner Modellösungen
Th. Kartschall, J. Gräfe, P. Michaelis, K. Waloszczyk, S. Grossman-Clarke (Juni 1999)