

# PIK Report

---

No. 37

Untersuchung der Auswirkungen erhöhter  
atmosphärischer CO<sub>2</sub>Konzentrationen  
auf Weizenbestände  
des Free-Air Carbondioxid Enrichment  
(FACE) - Experimentes Maricopa (USA)

Thomas Kartschall, Susanne Grossman, Peggy Michaelis,  
Frank Wechsung, Jan Gräfe, Klaus Waloszczyk,  
Gabriele Wechsung, Eike Blum, Meike Blum

Abschlußbericht zum Vorhaben:  
BMBF-BEO 0339626



---

POTSDAM INSTITUTE  
FOR  
CLIMATE IMPACT RESEARCH (PIK)

---

**Abstract**

A version of the *demeter* model was developed which describes both the quantitative and qualitative effects of elevated atmospheric CO<sub>2</sub> on a wheat crop under conditions of limited water and/or nitrogen supply. In the model's photosynthesis and energy balance modules, first versions of components were developed which it should be possible to apply in further ecosystem models (starting with the cereals models of the *demeter* family). Experimental data from the Maricopa FACE wheat experiments 1992-1996, in which scientists from PIK were involved, were used for the development and testing of the model. Model solutions obtained were applied for the first time for central European climatic and site conditions as part of a regional yield study for the Federal State of Brandenburg.

**Untersuchung der Auswirkungen erhöhter atmosphärischer CO<sub>2</sub> -  
Konzentrationen auf Weizenbestände des Free-Air Carbondioxid Enrichment  
(FACE) - Experimentes Maricopa (USA)**

Abschlußbericht zum Vorhaben:  
BMBF-BEO 0339626

Bearbeiter:

Thomas Kartschall (Projektleiter)  
Susanne Grossman  
Peggy Michaelis  
Frank Wechsung  
Jan Gräfe <sup>a)</sup>

Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e.V.  
Abteilung Globaler Wandel und Natürliche Systeme  
Telegrafenberg C4  
D-14412 Potsdam

unter Mitwirkung von

Klaus Waloszczyk <sup>a)</sup>  
Gabriele Wechsung <sup>b)</sup>  
Eike Blum <sup>c)</sup>  
Meike Blum <sup>c)</sup>

<sup>a)</sup> Professor-Hellriegel-Institut e.V. Bernburg

<sup>b)</sup> U.S. Water Conservation Laboratory Phoenix, AZ, USA

<sup>c)</sup> vormals Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e.V.

**Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des  
Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF) unter  
dem Förderkennzeichen BEO 0339626 gefördert. Die Verantwortung für den  
wissenschaftlichen Gehalt des Berichtes liegt bei den Autoren**

<b>1. Einleitung</b>	<b>1-3</b>
<b>2. Das Face Weizen Experiment Maricopa</b>	<b>4-9</b>
2.1. Experimentelles Design des FACE Experimentes in den Jahren 1992-94 und 1995/96	4
2.2. Die FACE-Runs 1992-1994	6
2.3. Der FACE-Run 1995-96	8
<b>3. Weiterentwicklungen am Weizenmodell <i>demeter</i></b>	<b>10-16</b>
3.1. CO <sub>2</sub> -Wirkung und Wassertverfügbarkeit	10
3.2. Abbildung der CO <sub>2</sub> -Wirkung unter Stickstofflimitierung	14
<b>4. Simulationsergebnisse</b>	<b>17-26</b>
<b>5. Zusammenfassung</b>	<b>27-28</b>
<b>Literatur</b>	<b>29-31</b>

## 1. Einleitung

Mit Beginn der Industrialisierung vor etwa 150 Jahren und der seitdem andauernden exzessiven Nutzung fossiler Brennstoffe hat der Mensch den Prozeß des kontinuierlichen Anstieges der atmosphärischen  $\text{CO}_2$  Konzentration ( $C_A$ ) in Gang gesetzt. Dieser Anstieg verläuft insbesondere in den letzten Jahrzehnten in dramatischer Weise. Seit Ende der 50er Jahre wird er durch Beobachtungen auf Hawaii (Keeling und Whorf 1997) dokumentiert. Dieser Datensatz fand mit freundlicher Genehmigung des Autors in Abb. 1 Verwendung.

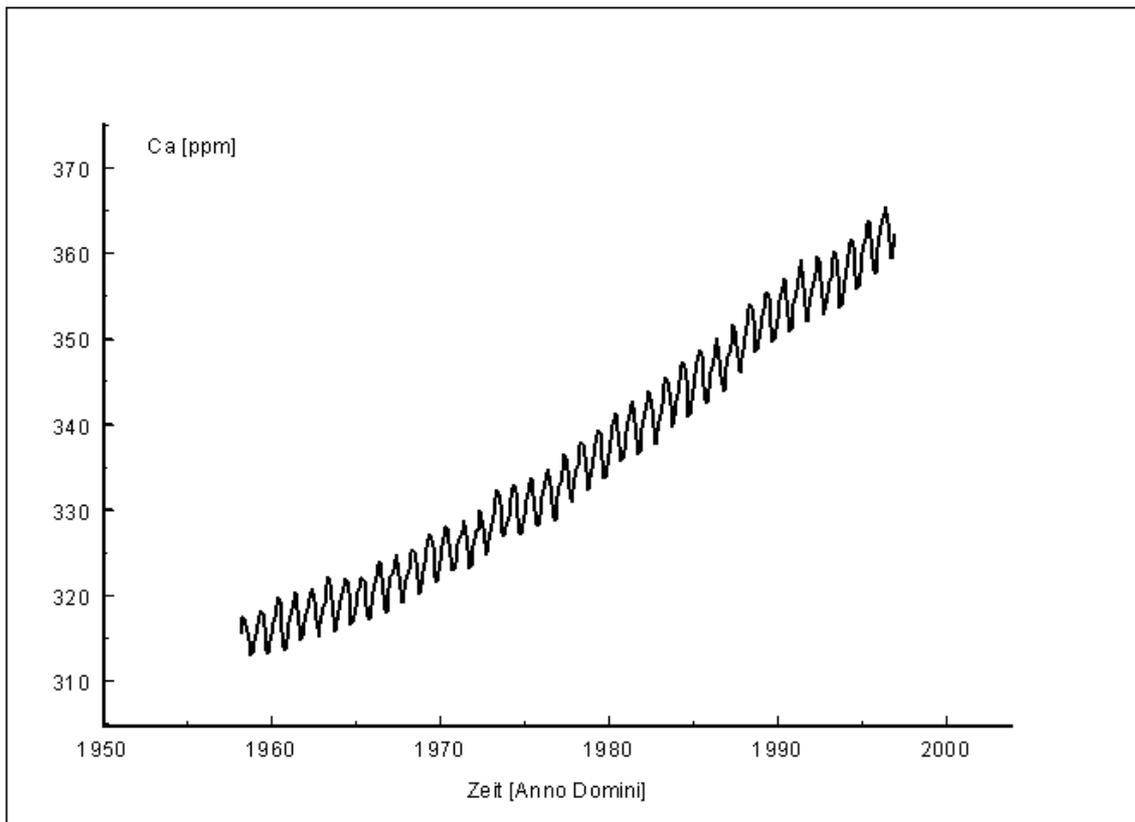
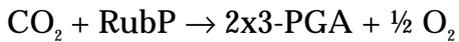


Abb. 1 Zeitlicher Verlauf von  $C_A$  am Mauna Loa Observatory ( $19^{\circ}31' \text{NB}$ ,  $155^{\circ}33' \text{WL}$ ), Hawaii USA, im Zeitraum 1958 bis 1996 (Keeling & Whorf 1997).

Der deutlich ersichtliche und anhaltende Anstieg von  $C_A$  muß als bisher einzig experimentell sicher verifizierbare anthropogen induzierte Veränderung globalen Ausmaßes angesehen werden.

Die Photosynthese in terrestrischen Ökosystemen nutzt als Kohlenstoffquelle ausschließlich atmosphärisches  $\text{CO}_2$ . Dabei wird innerhalb des Calvin-Zyklus die Bindung von  $\text{CO}_2$  an Ribulose-1,5-bisphosphat (RubP) mit der Bildung von 2 Teilen 3-Phosphoglycerinsäure (3-

PGA) über die Lichtreaktion von Chlorophyll energetisch gepumpt und durch das RubP-Carboxylase/Oxygenase-Enzym (Rubisco) katalysiert. Da durch die Rubisco neben dem carboxylierenden Reaktionsweg (mit „Gewinn“ von einem C-Atom)



auch die Oxydation von RubP („Verlust“ von einem C-Atom)



katalysiert wird, hängt die Effizienz der Kohlenstoffbindung stark vom Verhältnis der blattinternen Partialdrücke von Sauerstoff und Kohlendioxid ab. Der atmosphärische und blattinterne Sauerstoffgehalt kann mit ca. 210.000 ppm praktisch als konstant angesehen werden, somit wird die Variabilität des Partialdruckverhältnisses nur noch vom blattinternen CO<sub>2</sub>-Gehalt bestimmt. Die experimentellen Untersuchungen zur Wirkung von erhöhtem CA (CO<sub>2</sub><sup>+</sup>) lassen sich mit abnehmender Detailliertheit und zunehmender praktischer Repräsentativität etwa wie folgt einordnen:

- (i) biochemische Untersuchungen an Pflanzenextrakten (*in vitro* Aktivierung Carboxylierung), bzw. an lebendem Pflanzenmaterial (*in vivo*), wie Blätter bzw. Einzelpflanzen im Labor
- (ii) Kammer- und Gewächshausexperimente an Einzelpflanzen und kleinen Beständen (*in vivo*), meist unter Nutzung von Gefäßen
- (iii) Open-top Kammerexperimente mit Gefäßpflanzen oder mit kleinen Beständen (*in situ*)
- (iv) Freiluftexperimente unter Nutzung der Free-Air Carbon Dioxide Enrichment [FACE] Technologie an ausgedehnten Beständen (*in situ*) unter weitgehend natürlichen Bedingungen.

Mit der Bereitstellung neuester Technik zur Beobachtung des Energie- und Gasaustausches („Eddy correlation“ und transportable „Infrared Gas Analysator“-Technik usw.) bieten FACE Experimente derzeit die einzige Möglichkeit, derartige Untersuchungen der Wirkungen von CO<sub>2</sub><sup>+</sup> unter sonst **praktisch ungestörten natürlichen Bedingungen zu studieren.**

Entsprechend der Aufgaben des Potsdam-Institutes für Klimafolgenforschung, die sich an den mit dem Globalen Wandel verbundenen regionalen und globalen Herausforderungen zur Identifizierung und Aufklärung essentieller ökologischer und sozio-ökonomischer Folgen orientieren, waren die Bearbeiter an der Erarbeitung von Ergebnissen interessiert, die der schnellen Verbesserung und Anwendung bestehender Modellösungen dienen.

Nach der hier gegebenen Einführung erfolgt im zweiten Kapitel eine kurze Beschreibung der FACE Technik und des FACE Weizen Experimentes Maricopa. Das dritte Kapitel widmet sich der Beschreibung der Modellerweiterungen des Weizenmodells **demeter**, hierbei insbesondere den Verbesserungen des Energie- und Gasaustauschmoduls. Im vierten Kapitel werden exemplarische Modell-Meßwertvergleiche des FACE Experimentes beschrieben. Dieses Kapitel dient weiterhin einer kurzen Darstellung der im Ergebnis der Projektbearbeitung abgeleiteten weiterführenden Arbeiten, die in einem Anschlußvorhaben DLR-01LK9535 (FACE: Ableitung allgemeiner Modellösungen) seit Mitte 1996 durchgeführt werden. 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

### 2.1. Experimentelles Design des FACE Experimentes in den Jahren 1992-94 und 1995/96

Das FACE Weizen Experiment wird seit 1992 in der Sonora-Wüste Arizonas, USA, seitens des U.S. Water Conservation Laboratory Phoenix als internationales Gemeinschaftsprojekt im Rahmen des International Geosphere-Biosphere Program, Kernprojekt Global Change of Terrestrial Ecosystems durch geführt. An dem Vorhaben beteiligten sich zwischen 1993 und 1996 bis zu 50 Wissenschaftler aus 8 Ländern. Die FACE-Technik (Hendrey *et al.* 1993) wurde genutzt, um die CO<sub>2</sub>-Konzentration der Luft innerhalb von kreisförmigen Parzellen (Plots) unter Freilandbedingungen auf 550 ppm anzureichern. Der Durchmesser eines Plots betrug 22 m. Die Plots waren von Pipelines umgeben, die unmittelbar nach der Aussaat auf dem Feld installiert wurden. An einer ringförmigen Pipeline waren im Abstand von 2 m vertikale schmale Pipelines mit einer Höhe von 2.5 m angebracht (vgl. Abb. 2).



Abb. 2 FACE Weizen Experiment Maricopa, 16. Februar 1996

Die Versorgung mit CO<sub>2</sub> angereicherter Luft erfolgte durch Öffnungen aus den vertikalen Pipelines (Lewin *et al.* 1994). Windrichtung, -geschwindigkeit und die CO<sub>2</sub>-Konzentration wurden im Zentrum jedes Ringes gemessen. Ein Computergestütztes Steuerungssystem nutzte diese mit 1 Hz aufgezeichneten Daten, um die Injektion von CO<sub>2</sub> so zu regeln, daß die

CO<sub>2</sub>-Konzentration innerhalb der Ringe auf  $550 \pm 5$  ppm gehalten wurde. Die FACE-Technik wurde beginnend vor dem Aufgang kontinuierlich bis unmittelbar vor der Ernte angewendet. Pro Run wurden vier FACE- und vier Control-Ringe installiert. Der Abstand der Mittelpunkte der verschiedenen Ringe betrug 90 m. Die Anordnung der vier FACE- bzw. Control-Ringe und die Einteilung in Halbringe sind aus Abb. 3 ersichtlich.



Abb. 3 Luftaufnahme des FACE-Runs 1993 vom 08. Februar 1993.

Während der Jahre 1992 bis 1994 wurde in die Control-Ringe keine Luft injiziert. Dagegen wurden während der beiden Runs 1995-97 in den Control-Ringen die gleichen Gebläse installiert, wie in den FACE-Ringen. Die einströmende Luft wurde kontinuierlich mit der CO<sub>2</sub>-Konzentration der Umgebungsluft und mit der gleichen Flußrate wie in den FACE-Plots eingeblasen. Damit wurden weitgehend ähnliche mikroklimatische Bedingungen unter FACE- und Control-Bedingungen geschaffen. Diese Veränderung war notwendig, um den Einfluß der Gebläse auf die Ergebnisse des Experimentes beurteilen zu können. Während der FACE-Experimente 1992-94 wurde unter stabilen atmosphärischen Bedingungen, d. h. praktisch nur nachts, ein sogenannter „Blower“-Effekt festgestellt. Die durch die CO<sub>2</sub>-Gebläse induzierte Verringerung der atmosphärischen Stabilität bewirkte eine Erwärmung der FACE-Parzellen um 0.5 bis 1.5 K in Bestandeshöhe. Dadurch trat Tau in

den Control-Parzellen eher auf als in den FACE-Parzellen und verschwand später am Morgen. Daneben waren die  $\text{CO}_2$ -Konzentrationen in den Control-Parzellen durch die fehlende Steuerung während der Nacht häufig höher. Die mit festem Zielpunkt (550ppm) erfolgende Kontrolle der  $\text{CO}_2$ -Konzentration führte in der Nacht für die FACE-Parzellen gewissermaßen zum gelegentlichen „Ausblasen“ höherer Konzentrationen durch die Steuerung. Diese geringfügigen Mängel wurden durch das „Blasen“ in den Control-Ringen seit 1995/96 beseitigt. Die Bewässerung erfolgte mit einem unterirdischen Schlauchsystem, wobei sich die Schläuche in einer Tiefe von ca. 0.2 m und einem Abstand von 0.5 m befanden. Die Distanz der Auslaßöffnungen betrug ca. 0.3 m. Der Boden in der Sonra-Wüste bei Maricopa ist als Trix Clay-Loam klassifiziert.

## **2.2. Die FACE-Runs 1992-94**

Während der FACE-Experimente 1992-94 wurde die differenzierte Wirkung ambienten  $\text{CO}_2$ 's und von  $\text{CO}_2^+$  für zwei Wasserversorgungsstufen untersucht, wobei der Run 1993/94 eine Wiederholung des Experimentes 1992/93 darstellte, um die Zuverlässigkeit der gewonnenen Ergebnisse zu erhöhen. Jeder Ring wurde in zwei Halbkreise (vgl. Abb. 3) unterteilt, wobei der eine mit ausreichend Wasser (WET), der andere mit 50 % des Betrages (DRY) versorgt wurde. Es wurde bewässert, wenn der Wassergehalt des Bodens in der durchwurzelten Zone der WET-Parzellen die verfügbare Feldkapazität um etwa 30% unterschritt. Die Menge des eingebrachten Wassers entsprach der Höhe der potentiellen Verdunstung seit der letzten Bewässerung. Die Bewässerung betrug während des Runs 1992/93 600 (WET) bzw. 275 mm (DRY) und 620 bzw. 257 mm während des Runs 1993/94. Der Reihenabstand betrug 0.25 m. Die Pflanzendichte bei Aufgang und Ernte betrug 1992/93 130 bzw. 109 Pflanzen/ $\text{m}^2$  und 1993/94 186 bzw. 152 Pflanzen/ $\text{m}^2$ . Die Ernten waren am 24. Mai 1993 und am 1. Juni 1994. Die Stickstoffdüngung erfolgte mit der Bewässerung und betrug 277 kg N/ha bzw. 261 kg N/ha. Es wurde entschieden, neben Sommerweizen auch Sommergerste in das FACE-Experiment 1993/94 einzubeziehen. Die Gewinnung zusätzlicher Daten sollte die Validierung und Testung eines Sommergerstenmodells ermöglichen. Weiterhin sollte untersucht werden, ob sich die Sommergerste unter  $\text{CO}_2^+$  qualitativ ähnlich zum Sommerweizen verhalten würde. Der Schwerpunkt der experimentellen Untersuchungen lag bei der Sommergerste auf der morphologischen Entwicklung. Diese zusätzlichen Arbeiten wurden im Rahmen eines Stipendiums der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) realisiert, sie sind daher nicht Gegenstand des

vorliegenden Reports und können aus dem DBU-Abschlußreport (Gräfe 1996) entnommen werden. Die experimentelle Beteiligung von Wissenschaftlern des PIK bestand in Untersuchungen zur morphologischen Entwicklung der Pflanzen, zu den Wurzelbiomassen und Wurzellängendichten sowie zur Boden- und Pflanzenchemie. Als Ergebnis der CO<sub>2</sub>-Anreicherung war ein um ca. 20 % höheres Biomassewachstum bis zur Mitte der Vegetationsperiode (Blüte) für WET und DRY zu verzeichnen (Pinter *et al.* 1995). Die Prozesse der Reifung und Vergilbung waren unter CO<sub>2</sub><sup>+</sup> beschleunigt. Im Zusammenwirken mit anderen CO<sub>2</sub>-Effekten führte dies zur Verkürzung der Kornfüllungsphase und verringerte den Wachstumsvorteil für die FACE Varianten auf 8% (WET) bzw. 20% (DRY) in den Erträgen. Die primäre Photosyntheseleistung stieg unter erhöhtem C<sub>A</sub> in beiden Varianten um bis zu 75 % an. Das Wurzelwachstum wurde unter CO<sub>2</sub><sup>+</sup> ebenfalls deutlich stimuliert (Wechsung *et al.* 1995). Die partielle Schließung der Stomata bei CO<sub>2</sub>-Anreicherung führte tagsüber zu einer nachweisbaren Erwärmung in den FACE-plots durch Verringerung der Transpiration (Kimball *et al.* 1995) pro Blattflächeneinheit (vgl. Abb. 4).

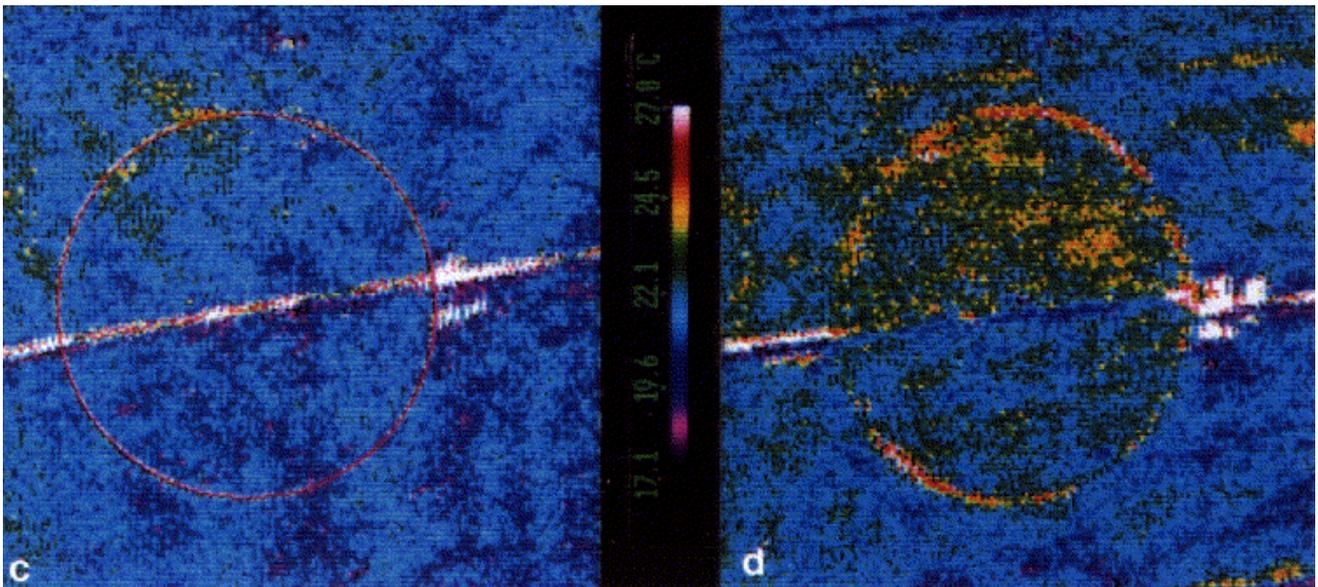


Abb. 4 Thermoscans des Weizenbestandes (08. April 1993). Die Abbildung zeigt die deutlichen Temperaturdifferenzen zwischen allen vier Treatments beim FACE Run 1993.  
 Links: Control-Ring (oben: Dry unten: WET)  
 Mitte: Temperaturskala  
 Rechts: Control-Ring (oben: Dry unten: WET)

Der Vorteil einer höheren Wassernutzungseffizienz auf Blattniveau wurde bis zum Ende der Vegetationsperiode auf Bestandesniveau durch höhere Biomassen bzw. Blattflächen kompensiert, so daß für den Gesamtwasserhaushalt kein ausgeprägter Vorteil durch eine höhere CO<sub>2</sub>-Konzentration entstand (Hunsaker *et al.* 1995, Grossman *et al.* 1995). Die experimentel-

len Befunde der FACE Runs 1993/94 unterstützen damit die These, daß durch  $\text{CO}_2^+$  ein moderater Wassermangel kompensiert werden kann, da die stimulierende Wirkung von  $\text{CO}_2^+$  mit zunehmender Wasserverknappung in einem weiten Bereich zunimmt.

### 2.3. Der FACE-Run 1995-96

Während des FACE-Experimentes 1996 wurden analoge Untersuchungen bei unterschiedlicher Stickstoffversorgung realisiert. Die Düngung betrug 350 kg N/ha (HIGH-N) unter unlimitierten und 70 kg N/ha (LOW-N) unter limitierten Bedingungen bei einer einheitlichen Bewässerung von 650 mm. Im Unterschied zu den vorherigen Experimenten wurde die  $\text{CO}_2$ -Konzentration um 200 ppm gegenüber Control angehoben. Aussaat und Ernte waren am 15. Dezember 1995 bzw. 21. Mai 1996. Es gab keine experimentelle Beteiligung des PIK während diesem Experiment. In den Vorjahren wurde unter erhöhtem  $C_a$  eine Beschleunigung der Phänologie des Bestandes um etwa eine Woche beobachtet. Im Experiment 1996 wurde hingegen nur eine Differenz von etwa 1-2 Tagen zwischen den FACE- und den Control-Bedingungen festgestellt. Unter Stickstofflimitierung gab es einen zwar geringeren, aber dennoch deutlichen  $\text{CO}_2$ -Effekt auf die Biomassen und Erträge. Die totale Biomasse war für die ausreichend gedüngten FACE-Pflanzen um 15-20% höher, als für die ausreichend gedüngten Control-Pflanzen, unter Stickstofflimitierung erwies sich die  $\text{CO}_2$ -induzierte Differenz im Gegensatz zur  $\text{CO}_2^+$ -Wirkung unter Wassermangel als geringer. Im Gegensatz zu früheren FACE-Experimenten wurde keine  $\text{CO}_2$ -Wirkung auf die Seneszenz der ausreichend gedüngten Pflanzen (HIGH-N) festgestellt. In den Low-N Varianten wurde ein schwacher Anstieg der Seneszenzraten unter  $\text{CO}_2$ -Anreicherung gefunden. Der Ertrag war unter  $\text{CO}_2^+$  in den High-N Varianten um 15%, in den Low-N Varianten um 12% höher. Der Ertrag wurde durch Stickstofflimitierung um etwa 23% gesenkt. Es ist anzunehmen, daß eine stärkere Reduzierung von Stickstoff die  $\text{CO}_2$ -Stimulation weiter verringern würde. Es wurden keine signifikanten Unterschiede in der saisonalen und täglichen Evapotranspiration durch  $\text{CO}_2^+$  gemessen. Die kumulative Evapotranspiration war dagegen unter Stickstoffmangel um etwa 20-24% niedriger als bei ausreichender Düngung. Aus den Photosynthesemessungen der Fahnenblätter gehen signifikante Unterschiede zwischen den unterschiedlich gedüngten Varianten erst ab Mitte März hervor. Die Ursachen sind einerseits die Stickstoffanfangsgehalte im Boden, zum anderen der vertikale Stickstoffgradient im Bestand. In den oberirdischen Biomassen war

bis Mitte Februar nur eine Stimulation durch erhöhtes  $\text{CO}_2^+$  und kein Einfluß unterschiedlich hoher Düngergaben erkennbar.

Insgesamt läßt sich damit eine Abschwächung der  $\text{CO}_2^+$ -Wirkung unter Stickstoffmangel im ableiten. Dieser Befund läßt die allgemeine Schlußfolgerung zu, daß bei mangelhafter Stickstoffversorgung, wie sie für die ökonomisch unterentwickelten Regionen der 3. Welt typisch ist, die begrenzten Vorteile von  $\text{CO}_2^+$  weiter geschmälert werden. Auch bedürfen bisherige zu großzügige globale Hochrechnungen zu ertragssteigernden Effekten von  $\text{CO}_2^+$  einer kritischeren Bewertung.

### 3. Weiterentwicklungen am Weizenmodell *demeter*

Das Weizenmodell *demeter* 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 1995)
- (v) Boden-Pflanzen-Atmosphäre-Transfer-Modul (Grossman *et al.* 1995)
- (vi) C<sub>3</sub>-Photosynthese-Modul (Kartschall *et al.* 1995).

Eine detaillierte Darstellung des gesamten Modells ist in Kartschall *et al.* (1996) enthalten. Der Simulationszeitschritt für die Modellanwendungen im bearbeiteten Vorhaben beträgt eine Stunde. Als Eingangsdaten dienen die stündlich aufgelösten Wetterdaten (Temperatur, Luftfeuchte, Strahlung, Windgeschwindigkeit) sowie Boden- und standort-spezifische Parameter (u.a. Feldkapazität, Welkepunkt, Sättigungsleitfähigkeit, Wärmekapazität).

#### 3.1. CO<sub>2</sub>-Wirkung und Wasserverfügbarkeit

In der ersten Phase des Projektes sollte die Wirkung einer erhöhten atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration in Verbindung mit Wasserlimitierung auf die Energie-, Wasser- und CO<sub>2</sub>-Bilanz sowie auf das Bestandeswachstum im Modell *demeter* abgebildet werden. Die Modellierungsarbeiten basierten auf der Beobachtung eines partiellen Schließens der Stomata unter erhöhtem C<sub>a</sub> und den sich daraus ergebenden physiologischen und mikrometeorologischen Konsequenzen. Neben der kurzzeitigen Wirkung auf die Photosynthese und die stomatäre Leitfähigkeit wurde im Modell der langfristige CO<sub>2</sub>-Düngungseffekt auf das Pflanzen- und Wurzelwachstum nicht explizit berücksichtigt, sondern durch das komplexe Zusammenwirken aller Modellteile generisch abgebildet. Die Validierung des Modells erfolgte zuerst ausschließlich für eine optimale Stickstoffversorgung.

Das im folgenden erläuterte gekoppelte Gleichungssystem, bestehend aus der Energiebilanz des Bestandes als Funktion der Bestandestemperatur, einem biochemischen Modell für die Berechnung der Assimilationsraten und einer Gleichung für die Bestimmung der intrazellulären CO<sub>2</sub>-Konzentration C<sub>i</sub>, wurde für jede Stunde iterativ gelöst. Damit wurde im Modell die Wechselwirkung dieser Prozesse berücksichtigt.

Mit Hilfe der **Energiebilanz des Bestandes**, einer gewöhnlichen Differentialgleichung erster Ordnung (Glg. 1), wurde die Bestandestemperatur sowie die Energieflüsse zwischen Bestand und Atmosphäre in Abhängigkeit von den atmosphärischen Bedingungen an der Referenzhöhe (2m) und physiologischen Variablen berechnet. Verwendung fand ein Einschichtmodell, in dem angenommen wurde, daß der gesamte Bestand im vertikalen Profil dem gleichen Mikroklima ausgesetzt war. Diese Annahme ist für die Beschreibung von Bestandesprozessen befriedigend (Raupach und Finnigan 1988).

$$R_{N,C}(T_C) - H_C(T_C) - \lambda \cdot E_T(T_C) - c_C \cdot \frac{dT_C}{dt} - \lambda \cdot E_P(T_C) - P_I \cdot c_W \cdot (T_C - T_A) = F(T_C) \Rightarrow 0 \quad (1)$$

mit

$\lambda$	... latente Verdunstungswärme [ $J \cdot kg^{-1}$ ]
$\lambda E_T$	... latenter Wärmefluß durch Transpiration und Taubildung [ $W \cdot m^{-2}$ ]
$\lambda E_P$	... latenter Wärmefluß durch Evaporation des Niederschlages [ $W \cdot m^{-2}$ ]
$c_C$	... Wärmekapazität des Bestandes [ $J \cdot g^{-1} \cdot K^{-1}$ ]
$c_W$	... Wärmekapazität des Wassers [ $J \cdot g^{-1} \cdot K^{-1}$ ]
$H_C$	... sensibler Wärmefluß zwischen Bestand und Atmosphäre [ $W \cdot m^{-2}$ ]
$P_I$	... Interzeption des Niederschlages [ $m \cdot s^{-1}$ ]
$R_{N,C}$	... Nettostrahlungsbilanz des Bestandes [ $W \cdot m^{-2}$ ]
$T_C$	... Bestandestemperatur [K]
$T_A$	... Lufttemperatur [K].

Die einzelnen Komponenten der Gleichung (1) sind in Grossman *et al.* (1995) ausführlich beschrieben. Die numerische Lösung der Differentialgleichung erfolgte mittels des Newton-Raphson Verfahrens.

Die **Photosyntheserate** (A)

$$A = V_C \cdot \left( 1 - 0.5 \cdot \frac{V_O}{V_C} \right) = V_C \cdot \left( 1 - \frac{\Gamma^*}{C_i} \right) \quad (2)$$

mit

$V_C$	... Carboxylierungsrate [ $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ ]
$V_O$	... Oxygenierungsrate [ $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ ]
$\Gamma^*$	... $CO_2$ -Kompensationspunkt [ $\mu mol \cdot mol^{-1}$ ]

wird im Modell **demeter** mit Hilfe des biochemischen Photosynthesemodells von Farquhar *et al.* (1980, 1982) für drei verschiedene Schichten des Bestandes entsprechend der absorbierten Strahlung und schichtspezifischer Parameter berechnet. Die gesamte Assimilationsrate des Bestandes ergab sich aus der Addition der Raten der einzelnen

Schichten. Das vereinfachte reaktionskinetische Modell des Calvin-Zyklus ist geeignet, die Kurzzeitwirkung veränderlicher atmosphärischer CO<sub>2</sub>-Konzentrationen auf biochemisch-physiologischer Ebene näherungsweise zu beschreiben. Im Falle von RubP- bzw. Lichtsättigung erweist sich die Carboxylierungsrate als Rubisco-limitiert, bei ungenügender Regeneration von RubP dagegen RubP-limitiert. Die tatsächliche Carboxylierungsrate  $V_C$  ist daher das Minimum der beiden potentiellen Raten

$$V_C = \min\{W_C, W_J\} . \quad (3)$$

Bei RubP-gesättigtem Zyklus (Rubisco-Limitierung) wird die Carboxylierungsrate  $W_C$  wie folgt ermittelt:

$$W_C = \frac{V_{C_{\max}} \cdot C_i}{C_i + K_C \cdot (1 + O_i \cdot K_O^{-1})} \quad (4)$$

mit

$O_i$  ... blattinterne O<sub>2</sub>-Konzentration [mmol·mol<sup>-1</sup>]

$V_{C_{\max}}$  ... Carboxylierungsrate bei Licht- und CO<sub>2</sub>-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<sub>2</sub> [ $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ]

$K_O$  ... Michaelis-Menten-Konstante für O<sub>2</sub> [mmol·mol<sup>-1</sup>].

Die RubP-limitierte Rate der Carboxylierung berechnet sich nach:

$$W_J = \frac{C_i \cdot J}{4.5 \cdot C_i + 10.5 \cdot \Gamma^*} \quad (5)$$

mit

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

Unter optimalen Bedingungen kann das Verhältnis aus der interzellulären CO<sub>2</sub>-Konzentration  $C_i$  zu  $C_a$  von C<sub>3</sub>-Pflanzen für einen weiten Bereich von  $C_a$  als 0.7 angenommen werden (Farquhar und Wong 1984). Das  $C_i/C_a$ -Verhältnis kann durch das Defizit der spezifischen Feuchte sowie durch Wasserstreß reduziert werden, wodurch die für den Photosyntheseprozess zur Verfügung stehende CO<sub>2</sub>-Konzentration verringert wird. Im Modell wurde kein direkter Wasserstreßeffekt auf die maximale Carboxylierungskapazität abgebildet, wie es für moderaten Wasserstreß (Sharkey and Badger 1982, Brodribb 1996) angenommen werden kann. Für die Beschreibung des Einflusses des spezifischen Feuchtedefizits auf  $C_i$

wurde der Ansatz von Jacobs (1994) genutzt und durch die Einführung von Wasserstreß unter der Annahme modifiziert, daß beide Einflüsse unabhängig voneinander wirken.  $C_i$  wurde folgendermaßen aus  $C_a$  berechnet:

$$C_i = f_s \cdot (C_a - \Gamma^*) + \Gamma^* \quad (7)$$

Die  $\text{CO}_2$ -Transferfunktion  $f_s$  wurde wie folgt ermittelt:

$$f_s = f_{s,\max} \cdot (1 - D_s / D_{\max}) \cdot (E / E_{\max}) + f_{s,\min} \cdot (D_s / D_{\max}) \cdot (1 - E / E_{\max}) \quad (8)$$

mit

- $D_s$  ... Defizit der spezifischen Feuchte [ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ]
- $D_{\max}$  ... Wert von  $D_s$ , bei dem die Stomata als vollständig geschlossen angenommen werden [ $45 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ]
- $E$  ... tatsächliche Transpiration [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ]
- $E_{\max}$  ... potentielle Transpiration [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ]

$E_{\max}$  wurde zuerst unter der Annahme einer unlimitierten Wasserversorgung berechnet und mit der Menge des verfügbaren Wassers in der durchwurzelten Zone verglichen. Diese ergab sich aus der Aufnahmekapazität der Wurzeln, die von der simulierten Wurzelbiomasse und dem aktuellen Bodenwassergehalt abhing. Der Betrag der tatsächlichen Evaporation  $E$  war entweder durch  $E_{\max}$  oder die Aufnahmekapazität der Wurzeln limitiert. Wasserstress trat auf, wenn  $E$  kleiner  $E_{\max}$  war. Das Maximum von  $f_s$  hatte den Wert  $f_{s,\max} = 0.85$ . Dies entspricht einem  $C_i/C_a$ -Verhältnis von 0.7 bei ausreichender Wasserversorgung und einem typischen spezifischen Feuchtedefizit von  $10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ . Das Minimum der Transferfunktion  $f_{s,\min}$  wurde berechnet nach:

$$f_{s,\min} = g_c / (g_c + g_m) \quad (9)$$

mit

- $g_c$  ... Cuticularleitfähigkeit für Weizen [ $2000 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$ ]
- $g_m$  ... Mesophylleitfähigkeit [ $\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ ].

Die stomatäre Leitfähigkeit  $g_s$  wurde mit Hilfe des üblichen  $A(g)$ -Ansatzes bestimmt:

$$g_s = 1.6 \cdot \frac{A_n}{C_a - C_i} \quad (10)$$

mit

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

Die während der Newton-Raphson-Iteration berechneten Werte für  $T_c$ ,  $C_p$ , und  $A$  wurden genutzt, um aus den entsprechenden Fluß-Gradient Beziehungen die sensiblen und latenten Wärmeflüsse sowie die Strahlungsbilanz des Bestandes zu berechnen.

### 3.2. Abbildung der $\text{CO}_2$ -Wirkung unter Stickstofflimitierung

Im zweiten Teil des Projektes wurde die Wirkung einer erhöhten atmosphärischen  $\text{CO}_2$ -Konzentration in Verbindung mit Stickstofflimitierung im Modell abgebildet. Für die Beschreibung des Einflusses von Stickstoffmangel auf das Wachstum und die Stickstoffaufnahme wurden im Wesentlichen die Modellansätze von Van Keulen und Seligmann (1987) implementiert. Die Photosynthese wird bei Stickstoffmangel über eine Verringerung der maximalen Carboxylierungskapazität durch geringere Rubiscopegehalte beeinflusst. Die bisherige Parameterisierung von  $V_{C_{\max}}$  im Modell erfolgte mit Hilfe von Zeitreihen, die im Rahmen der FACE-Experimente 1992-94 an den Fahnenblättern gemessen wurden. In der jetzigen Modellversion wurde diese Lösung durch den folgenden Ansatz ersetzt (Amthor 1995):

$$V_{C_{\max}} = n_R \cdot k_t \cdot k_{\text{cat}} \cdot f_{\text{Rubisco}} \cdot N_{\text{Blatt}} \quad (11)$$

mit

$n_R$  ...Anzahl der Reaktionszentren pro Stickstoff in der Rubisco [ $\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ]

$k_t$  ...dimensionsloser Temperaturkoeffizient

$k_{\text{cat}}$  ...Katalysationskonstante für  $\text{RuP}_2$  Carboxylierung [ $\text{mol CO}_2\cdot\text{mol}^{-1}$   
Katalysationsstellen an der Rubisco $\cdot\text{s}^{-1}$ ]

$f_{\text{Rubisco}}$  ...Anteil des Stickstoffgehaltes des Blattes in der Rubisco [0.23]

Der Modellteil zur Beschreibung des Pflanzenwachstums wurde dahingehend geändert, daß die bisher undifferenzierte grüne Biomasse in Blatt- und Stamm Biomasse unterschieden wurde. Desweiteren wurde ein Reservepool für Assimilate eingeführt, der insbesondere während der Kornfüllungsphase zur Verfügung steht. Die Proportionen für die Verteilung der Assimilate auf die verschiedenen Organe von Weizenpflanzen ist im Wesentlichen vom phänologischen Entwicklungszustand abhängig. Umweltgrößen haben einen geringen Einfluß auf das Allokationsmuster. Wasser- und Stickstoffstreß können allerdings das Verhältnis von oberirdischer zu unterirdischer Biomasse zugunsten der

Wurzelbiomasse beeinflussen. Genotypische Differenzen können insbesondere bei Weizensorten mit einer reduzierten Statur auftreten. Dies war für die hier betrachtete Weizensorte Yecora Rojo der Fall. Die in der Literatur angegebenen Daten für die Assimilatverteilung in Abhängigkeit vom Entwicklungsstadium (Fischer 1983, Van Keulen & Seligmann 1987) lieferten keine gute Übereinstimmung mit den gemessenen Daten. Deshalb wurde die Verteilung der Assimilate auf die verschiedenen Organe durch Differenzenbildung aus den Messungen der Blatt- und Stammbiomassen der FACE-Experimente 1992-94 abgeleitet (Tabelle 1).

Phänologische Entwicklung (DC)	Assimilate für Blatt (%)	Assimilate für Stamm (%)	Assimilate für Wurzel (%)	Assimilate für Reserve (%)
10	0.38	0.095	0.5	0.025
20	0.38	0.095	0.5	0.025
25	0.36	0.215	0.4	0.025
31	0.467	0.333	0.22	0.025
35	0.333	0.467	0.175	0.025
45	0.24	0.6	0.135	0.025
50	0.17	0.6	0.1	0.05
55	0.15	0.68	0.075	0.095
60	0.12	0.65	0.05	0.18
59	0.06	0.6	0.03	0.31
61	0	0.45	0.02	0.53
69	0	0.19	0.01	0.8
71	0	0	0	1
90	0	0	0	1

Tab. 1: prozentualer Anteil der auf die verschiedenen Organe verteilten Assimilate in Abhängigkeit vom phänologischen Entwicklungszustand der Pflanzen.

Das Modell reagiert sehr sensitiv auf die Assimilatverteilung. Eine Über- oder Unterschätzung der Blattbiomasse zu Beginn der Vegetationsperiode hat starke Konsequenzen auf die Berechnung der Photosyntheseraten zu späteren Zeitpunkten. Die Simulation zu

hoher Biomassen infolge der Überschätzung der Blattbiomasse zu Beginn der Vegetationsperiode kann für die stickstofflimitierten Varianten schneller zu Stickstoffstreß führen. Außerdem können wegen zu hoher Photosyntheseraten und Blattflächenindizes die Transpirationsraten überschätzt werden. Neben der Veränderung der Assimilatverteilung wurden die Stickstoffgehalte der verschiedenen Organe (Blatt, Stamm, Wurzel, Korn) als Zustandsgrößen in das Modell eingeführt. Die aktuellen Stickstoffkonzentrationen wurden durch organotypische minimale und maximale Stickstoffkonzentrationen für Weizen begrenzt, die vom Entwicklungsstadium des Bestandes abhängig sind und im Laufe der Vegetationsperiode abnehmen (van Keulen & Seligmann 1987). Aus der Summe der Differenzen zwischen den augenblicklichen Stickstoffkonzentrationen der einzelnen Organe und den maximalen Stickstoffkonzentrationen ergab sich die Forderung des Bestandes für die Stickstoffaufnahme aus dem Boden. Die Aufnahme erfolgte mit dem Transpirationsstrom und durch Diffusion über die Wurzeln.

Der physiologisch wirksame Stickstoffstreß  $F_N$  wurde im Modell folgendermaßen definiert:

$$F_N = \frac{N_{\text{Blatt}} - N_{\text{Blatt,min}}}{N_{\text{Blatt,max}} - N_{\text{Blatt,min}}} \quad (12)$$

mit

$N_{\text{Blatt}}$  ... aktuelle Stickstoffkonzentration der Blätter [ $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ]

$N_{\text{Blatt,min}}$  ... minimale Stickstoffkonzentration der Blätter [ $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ]

$N_{\text{Blatt,max}}$  ... maximale Stickstoffkonzentration der Blätter [ $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ].

Im Modell *demeter* war die Ontogenese bisher vom Mittelwert der Lufttemperatur während der Photoperiode abhängig (Claus 1982). Stickstoffmangel kann zu einer Erwärmung des Bestandes von einigen Kelvin führen (Seligman 1983) und damit diesen Prozeß signifikant beschleunigen. Aus diesem Grunde wurde die mittlere Lufttemperatur durch die berechnete mittlere Bestandestemperatur während der Photoperiode in der Prozeßformulierung für die Ontogenese ersetzt. Ein empirisch begründeter, bisher als Beschleunigungsterm wirkender direkter Einfluß auf die Ontogenese konnte dadurch eliminiert werden.

#### 4. Simulationsergebnisse

Die Simulationen wurden für 1993 und 1996 mit  $C_A$ -Werten von 370 ppm (Control) und 550 ppm (FACE) durchgeführt, da noch keine Meßdaten für die aktuellen  $CO_2$ -Konzentrationen im Run 1996 zur Verfügung standen. Die zu Stundenwerten aggregierten Meßwerte der Lufttemperatur und -feuchte, der Windgeschwindigkeit und Globalstrahlung wurden als Eingangsdaten für das Modell genutzt. Daneben standen die Berechnungs- und Düngungsdaten des Experimentes für die Modellläufe zur Verfügung. Der RETC Code nach van Genuchten (1992) wurde verwendet, um die Saugspannungskurven für die verschiedenen Bodenschichten an die gemessenen Daten anzupassen und die hydraulische Leitfähigkeit sowie Diffusivität zu berechnen. Die Modellvalidierung für die Beschreibung der Wechselwirkung von  $CO_2$  und Wasserlimitierung erfolgte im wesentlichen anhand der Ergebnisse des FACE-Experimentes 1992/93. Diese Ergebnisse sind seitens der deutschen und amerikanischen Bearbeitergruppen umfassend durch originäre Publikationen dokumentiert, daher soll im Rahmen des vorliegenden Berichtes der Schwerpunkt auf die Darstellung der dazu durchgeführten Simulationen gelegt werden.

Beginnen soll die Darstellung der Simulationsergebnisse mit den in Abb 5 ersichtlichen zeitlichen Verlauf der beobachteten und simulierten *Ontogenese* (i.f. gemäß dem üblichen angel-

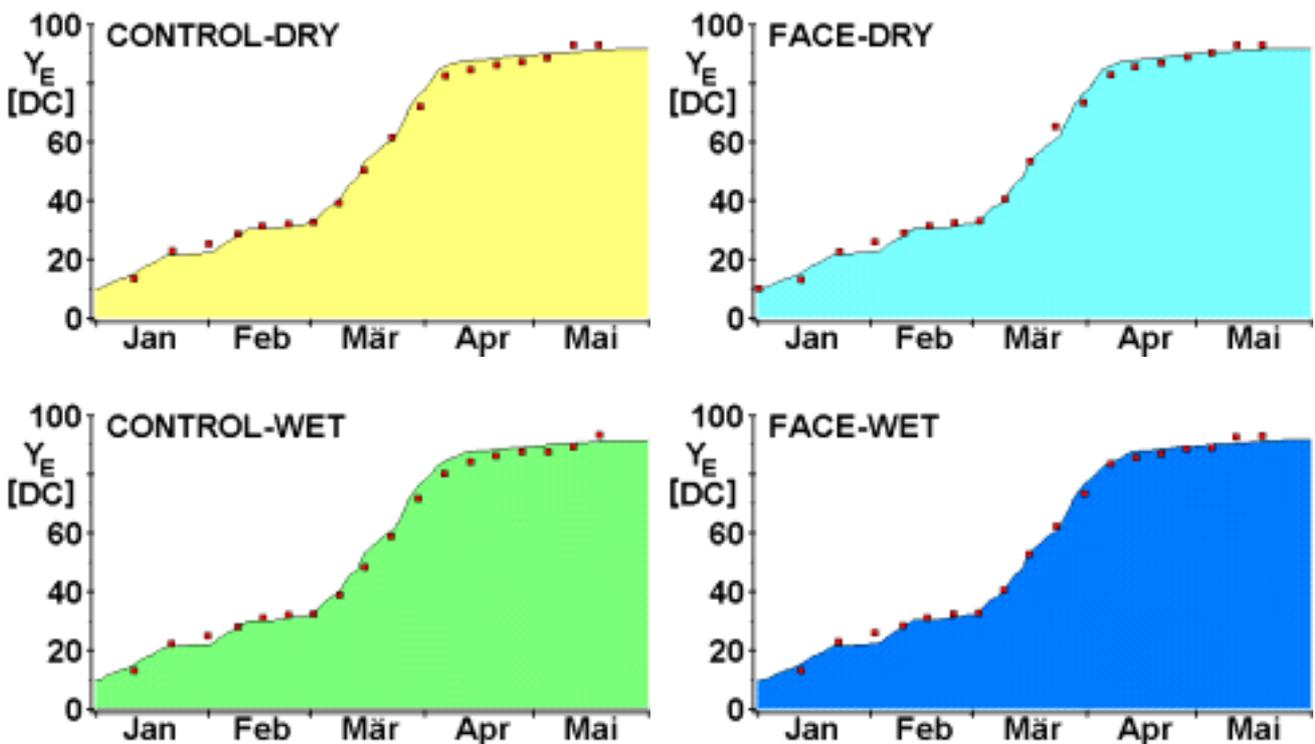


Abb. 5 Beobachtete (■) und berechnete (■) Verläufe der Phänologie von Weizen beim FACE-Experiment 1992/93

sächsischen Gebrauch **Phänologie** genannt). Der Phänologie, oder auch dem „biologischen Alter“, kommt in den Pflanzen und damit auch in ihrer „virtuellen Realität“, dem Modell, die Rolle der wichtigsten Kontroll- und Steuerfunktion für das Initiieren von Prozessen, der Verteilung von Assimilaten usw. zu. Besonders wichtig sind zeitlicher Ablauf und Dauer der wichtigsten phänologischen Phasen wie Aufgang, Bestockung, Blüte und Kornfüllungsdauer bis zur Reife, da sie das gesamte Wachstum und letztlich die Ertragsbildung wesentlich beeinflussen. So schmälerte die im FACE Run 1993 beobachtete Verkürzung der Kornfüllungsdauer (DC61 bis DC91) den Ertragszuwachs der unter  $\text{CO}_2^+$  gewachsenen Bestände. Vom Modell wurde eine Beschleunigung für die FACE-Varianten von 1 bis 3 Tagen ausgewiesen, im Feld wurden dagegen bis zu 6 Beschleunigung beobachtet. Bisher ist noch nicht vollständig geklärt, ob das Zurückbleiben der simulierten Phänologie auf Modellungenauigkeiten in der letzten Phase der Seneszenz oder aber auf den auf S. 5ff diskutierten „Blower“-Effekt, der im Modell nicht quantifizierbar war, zurückzuführen ist.

Sind die o.g. Ergebnisse zur Phänologie und im weiteren folgende Angaben so stellen die jetzt folgenden Modell-Meßwertvergleiche zur **Photosynthese** (Abb. 6) beim FACE Run 1993 originäre Arbeitsergebnisse des vorliegenden Vorhabens dar. Die Ergebnisse konnten nur durch die umfassende Verbesserung des Energie- und Gasaustausches (SVAT\_MOD und SYNTHESSE) in **demeter** (vgl. Grossman *et al.* 1995, Kartschall *et al.* 1995) erarbeitet werden.

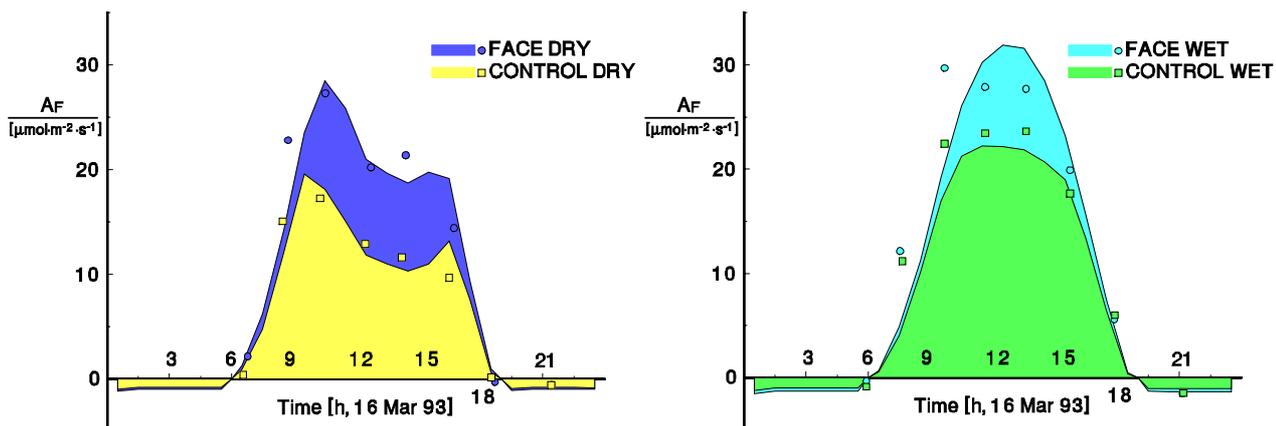


Abb. 6: Beobachteter (■) und berechneter (■) Tagesverlauf der Blattphotosynthese am 16. März 1993 beim FACE Run 1993

Diese Modellierungsarbeiten standen von 1993 bis 1996 im Zentrum der theoretisch und modellseitig orientierten Aktivitäten des PIK. Bemerkenswert aus der Sicht der Bearbeiter

ist die verblüffend gute Übereinstimmung von beobachteten und berechneten Werten, da der Vergleich erst nach 1776 abgelaufenen Simulationsschritten (je 1h) seit Simulationsbeginn am 01. Januar 1993 einsetzt. Auf eine weitergehende inhaltliche Diskussion der deutlich sichtbaren Wirkungen von unterschiedlicher Bewässerung und  $\text{CO}_2^+$  sei hier mit Rücksicht auf noch in der Publikationsphase befindliche Originalarbeiten der amerikanischen und deutschen Bearbeiter jedoch verzichtet.

Deutlich sichtbar sind die Effekte der unterschiedlichen Wasserversorgung und die  $\text{CO}_2^+$ -Wirkung auch an den *photosynthetisch aktiven Biomassen*.

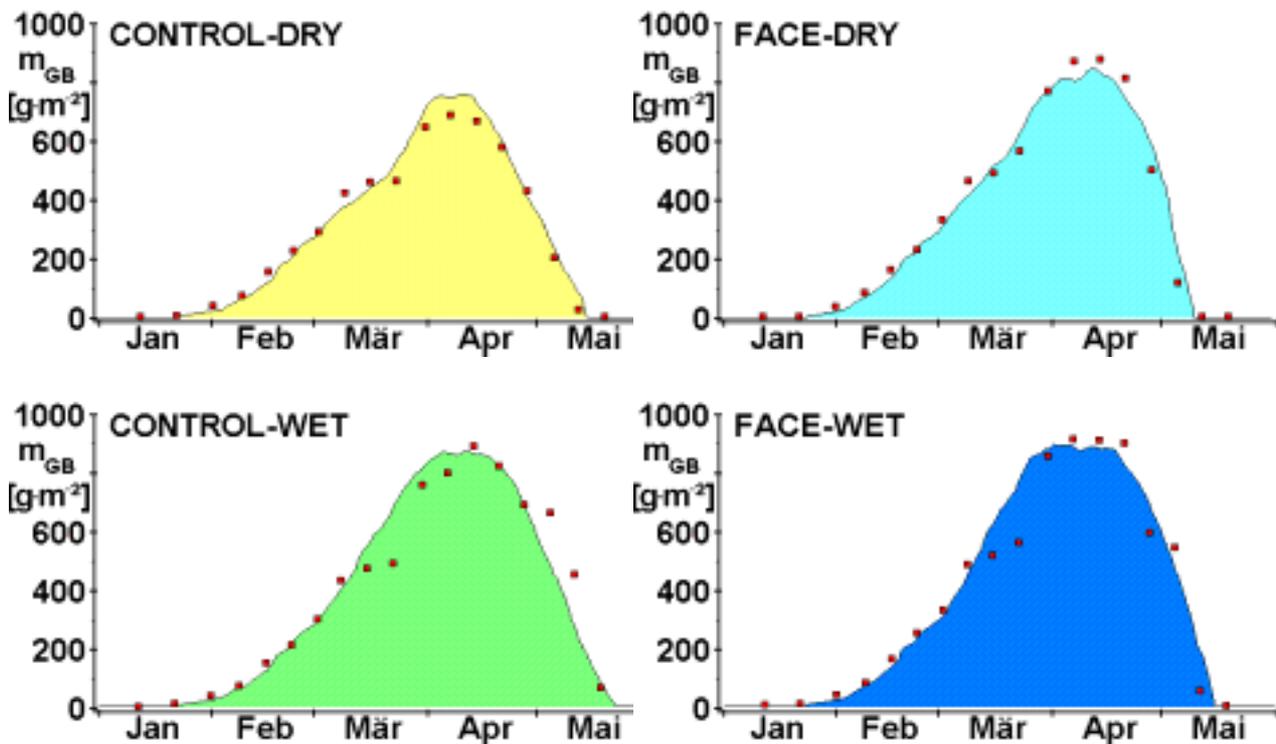


Abb. 7 Beobachtete (■) und berechnete (■) photosynthetisch aktive Biomassen beim FACE-Experiment 1992/93

Neben der guten Übereinstimmung der gemessenen und berechneten Werte sei hier noch auf den deutlich sichtbaren Effekt der verkürzten Lebensdauer der photosynthetisch aktiven Biomassen in den FACE Varianten hingewiesen. Der  $\text{CO}_2^+$ -Effekt auf die Biomassen ist gegenüber den deutlichen Unterschieden bei der Photosynthese bereits reduziert. Von *demeter* wurde diese Reduzierung durch das Zusammenwirken aller dynamischen Teile generiert, es kann daher aus der Analyse des Modellverhaltens keine monokausale Ursache für dieses allgemein bekannte Phänomen adressiert werden. Es muß von dem komplexen

Zusammenwirken verschiedener Prozesse des Nährstoff- und Wasserhaushaltes, der geringfügig beschleunigten phänologischen Abläufe usw. ausgegangen werden<sup>1)</sup>.

Lagen die Vorteile durch CO<sub>2</sub><sup>+</sup> für die saisonale Photosynthese bei ca. 40% (Dry) bzw. 28% (Wet) so ist in der Wirkung auf die **Erträge** eine deutliche Verminderung zu erkennen (vgl. Tab. 2). Die Ursachen dafür wurden bereits im Abschnitt zur Phänologie diskutiert.

Ertrag	CONTROL [g·m <sup>-2</sup> ]	FACE [g·m <sup>-2</sup> ]	Verhältnis (FACE/CONTROL)
<b>Dry</b>			
beobachtet	595	720	1.21
berechnet	586	677	1.16
<b>Wet</b>			
beobachtet	837	904	1.08
berechnet	841	924	1.09
<b>Verhältnis [Dry/Wet]</b>			
beobachtet	0.71	0.80	•
berechnet	0.70	0.73	

Tab. 2 Beobachtete und berechnete Ernteerträge und Verhältnisse zwischen den verschiedenen Varianten

Nun soll die Aufmerksamkeit auf Kurz- und Langzeitergebnisse des Energie- und Wasser-austausches gelenkt werden. Beginnen soll dieser Abschnitt mit einer Darstellung zum zeitlichen Verlauf der Evapotranspiration beim FACE-Run 1993. Die in Abb. 8 ersichtlichen zeitlichen Verläufe dieser Größe zeigen ebenfalls eine gute Übereinstimmung berechneter und beobachteter Werte. Besonders wichtig erscheint das Ergebnis, daß die kumulative Evapotranspiration weder im Modell (durch eine fortlaufende Integration der bei der Energiebilanz berechneten latenten Wärmeflüsse auf Stundenbasis ermittelt) noch die durch gravimetrische Bodewasserbilanz ermittelten experimentellen Werte praktisch keinen Einfluß

<sup>1)</sup> Vorgehend soll bereits hier eine Bewertung der Anwendung von Simulationsmodellen als wissenschaftliche Methode im Rahmen einer ausgedehnten Fußnote erfolgen, da durch einzelne Fachwissenschaftler der Nutzen komplexer Simulationsmodelle gelegentlich in Zweifel gezogen wird. Die Integration der simulierten Kurz- und Langzeitergebnisse und des komplexen Zusammenwirkens der Einzelprozesse (im folgenden wird noch auf die Ertragswirkung und Auswirkungen auf die Energie- und Wasserbilanz eingegangen) stellt ein mit klassischen Mitteln der Biochemie, Biologie und Agrarwissenschaften nicht mehr erreichbares Resultat dar.

von  $\text{CO}_2^+$  auf Bestandesebene ausweisen. Dies läßt die Schlußfolgerung zu, daß  $\text{CO}_2^+$  für  $\text{C}_3$ -Pflanzen zwar mit einer erhöhten Wassernutzungseffizienz nicht aber mit einer auf Bestandesebene bezogenen bzw. großflächigen Wasserersparnis zu rechnen ist.

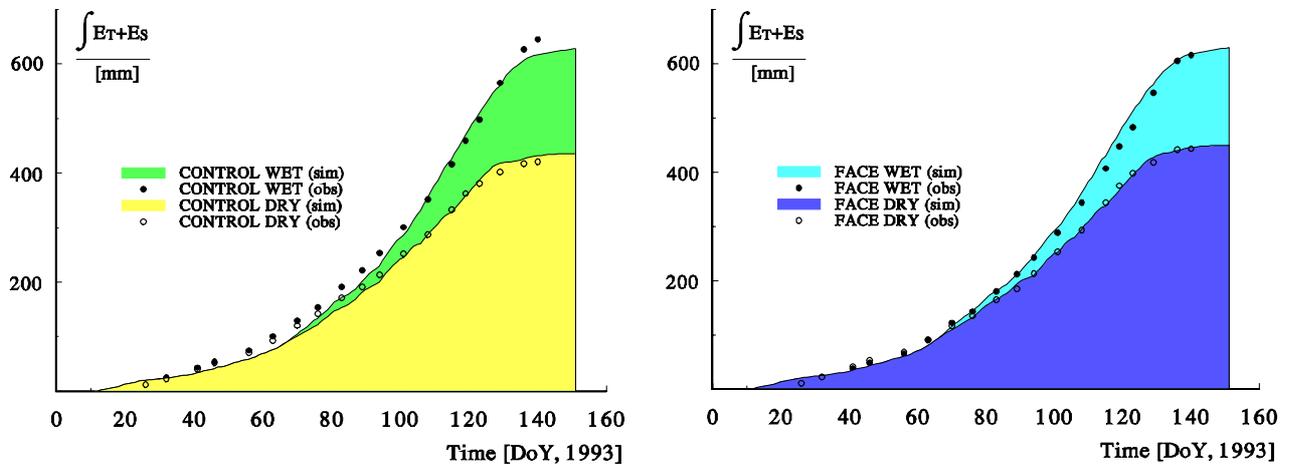


Abb. 8: Berechneter und beobachteter (Hunsaker *et al.* 1996) zeitlicher Verlauf der kumulativen Evapotranspiration, FACE Run 1993

Die täglichen Verläufe der simulierten Bestandestemperaturen sowie die gemessenen Daten für den 16. März 1993 sind in Abb. 9 enthalten.

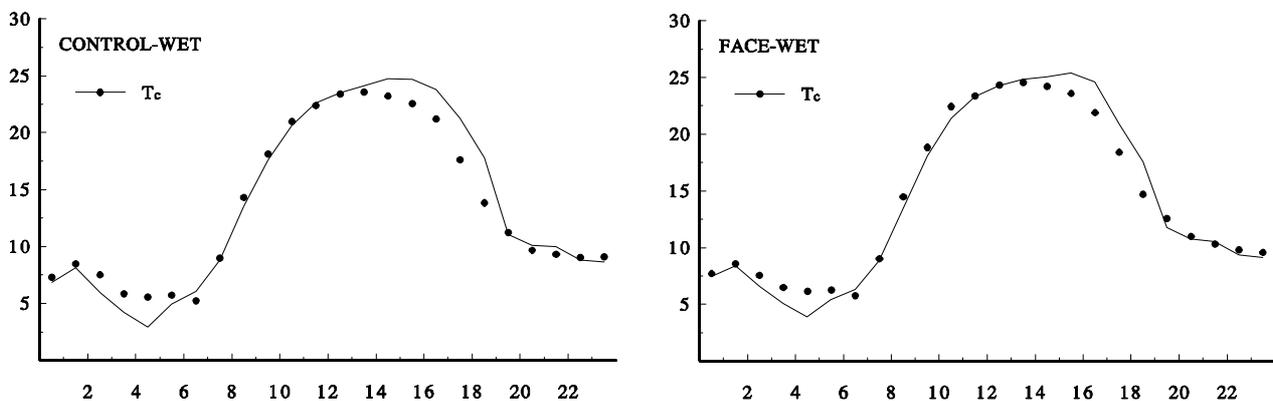


Abb. 9: Gemessene (●) und berechnete (—) Bestandestemperaturen am 16. März 1993.

Die Bestandestemperatur wird im Modell bei der Lösung der Energiebilanz gemeinsam mit den Werten für die Energiekomponenten, die Photosynthese und die stomatare Leitfähigkeit ermittelt. Die Messung im FACE Experiment erfolgte mittels Infrarotthermometern und ist

in Kimball *et al.* (1995) beschrieben. Die für die Modell-Meßwertvergleiche verwendeten gemessenen Bestandestemperaturen wurden nicht mit den für Abb. 4 verwendeten Methode ermittelt.

In Abb. 10 ist der entsprechende tägliche Verlauf der latenten Wärmeflüsse des Bestandes dargestellt.

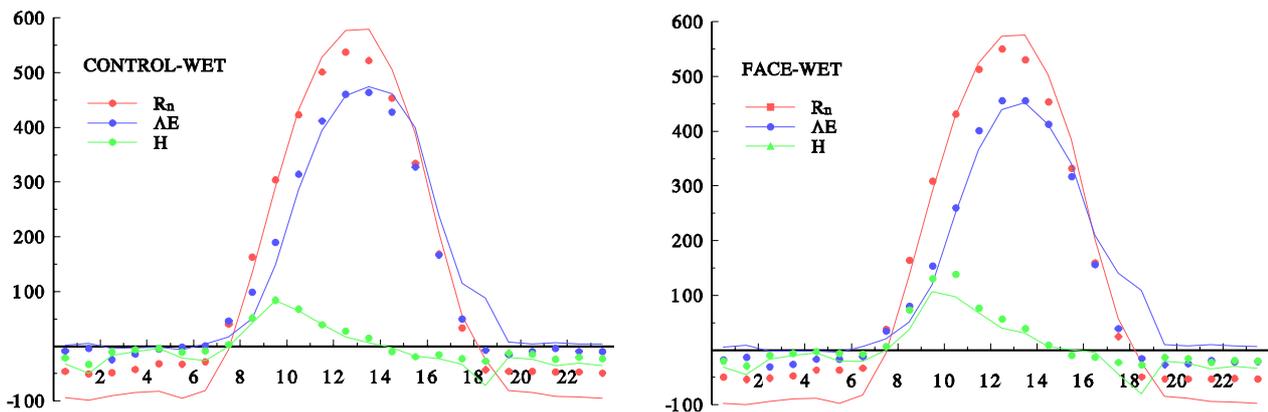


Abb. 10: Beobachtete (●) und berechnete (—) Komponenten der Energiebilanz des Weizenbestandes am 16. März 1993.

Die Resultate für die Dry-Varianten weisen im Prinzip die gleichen Eigenschaften auf und sollen hier nicht detailliert dargestellt werden.

Abschließend sei jetzt auf die durch die aktuell erfolgten **Modellmodifikationen** erarbeiteten Simulationsergebnisse des FACE Runs 1996 eingegangen. Aus den während der Untersuchungen identifizierten Schwachstellen des Energie- und Gasaustauschmoduls wurde ein Versuchsprogramm abgeleitet, welches sich im Rahmen eines Anschlußprojektes (01LK9535) seit Mitte 1996 der experimentellen Verifikation möglicher kurzfristiger und saisonal auftretender Hemmungsmechanismen auf den Prozeß der Carboxylierung widmet. Dabei erarbeitete erste Ergebnisse können naturgemäß nicht Gegenstand des vorliegenden Berichtes sein, jedoch sei an dieser Stelle darauf verwiesen, daß durch die im Rahmen des vorliegenden Vorhabens langfristig abgesicherte Teilnahme am FACE-Experiment eine essentielle Voraussetzung zur Identifikation dieser Fragestellungen ermöglicht wurde.

Für die Simulation von Evapotranspiration und Photosynthese nach der Blüte wurden in der fortgeschrittenen Version von **demeter** altersabhängige Parameteränderungen von  $V_{C_{max}}$  in den entsprechenden Prozeßbeschreibungen berücksichtigt. Für  $V_{C_{max}}$  wurden in der Version des Jahres 1993 von **demeter** noch Meßwerte gewählt. Dieser Mangel sollte in der fortge-

schriftlichen Version durch eine einfache Annahme für  $V_{C_{max}}$  (Gl. 11) ausgeräumt werden. Mit der häufig gemachten Annahme eines  $C_i/C_a$ -Verhältnisses von 0.7 unter optimalen Bedingungen konnte dabei die Evapotranspiration bis zur Blüte in guter Übereinstimmung mit den Meßwerten simuliert werden. Wendet man jedoch nach der Blüte Gl. 11 für die Bestimmung von  $V_{C_{max}}$  ohne Modifikation in weiteren Teilen des Energie- und Gasaustauschmoduls an, so kommt es zu einer signifikanten Unterschätzung der täglichen Evapotranspiration um bis zu 50%. Aus den während des FACE-Experimentes gewonnenen Daten zur Photosynthese der Fahnenblätter während der Seneszenz war ersichtlich, daß die Nettoassimilationsraten schneller sanken, als die stomatare Leitfähigkeit. Dies führte zu einem Ansteigen des  $C_i/C_a$ -Verhältnisses und zur Abnahme der Wassernutzungseffizienz. Deshalb wurde das  $C_i/C_a$ -Verhältniss im Modell nach der Blüte in Abhängigkeit vom Entwicklungszustand des Bestandes von 0.7 auf etwa 1 zur Reife erhöht. Nach der Blüte war die stomatare Leitfähigkeit im fortgeschrittenen Modell nicht mehr vom Defizit der spezifischen Luftfeuchte abhängig. Mit diesen Änderungen konnten die Simulationsergebnisse der deutlich verbessert werden. Eine ausführliche Beschreibung dieser Untersuchungen findet sich bei Grossman (1996).

Die Validierung der Modellversion zur Beschreibung der Wirkung einer erhöhten atmosphärischen  $CO_2$ -Konzentration unter Stickstofflimitierung erfolgte anhand der Ergebnisse des **FACE-Experimentes 1995/96** für die vier Varianten Control Low N und Control High N bzw. FACE Low N und FACE High N. Da die experimentellen Daten seitens der Autoren noch nicht originär publiziert wurden, stehen sie nur für einen projektinternen Modell-Experiment Vergleich zur Verfügung. Eine Vorabveröffentlichung im Rahmen dieses Berichtes kann nach Abstimmung mit dem Kooperationspartner U.S Water Conservation Laboratory Phoenix daher noch nicht erfolgen. Die Simulationsergebnisse werden jedoch qualitativ besprochen. Insofern sind die Bearbeiter darauf angewiesen, daß die hier vorgelegten Einschätzungen zum FACE Run 1996 ohne direkte Model-Meßwert-Vergleiche Akzeptanz finden. Angesichts der guten Qualität der Modell-Meßwert-Vergleiche für 1993 sind aus der Sicht der Bearbeiter jedoch keine sachlichen Gründe vorhanden, diesen Einschätzungen für den Run 1996 seitens des Lesers etwa weniger Vertrauen gegenüberzubringen als dies für den Run 1993 sicher geschehen wird.

So stimmen die berechneten Erträge des Runs 1996 sehr gut mit den gemessenen Werten überein, einem Vergleich stimmten die amerikanischen Autoren dieser Daten nur auf der

Ebene prozentualer Werte zu. Die absoluten wie relativen Abweichungen sind jedoch gering und die gute Übereinstimmung der Relationen ist aus Tab. 3 ersichtlich.

Ertrag	CONTROL [g·m <sup>-2</sup> ]	FACE [g·m <sup>-2</sup> ]	Verhältnis (FACE/CONTROL)
Low N beobachtet berechnet	585	637	1.12 * 1.09
High N beobachtet berechnet	785	883	1.15 * 1.13
Verhältnis [High N/Low N] beobachtet berechnet	1.29 * 1.34	1.34 * 1.38	•

Tab. 3: Simulierte Erträge des FACE Runs 1996 und relative Angaben zu den Wirkungen der Faktoren auf die beobachteten Erträge (\* vorläufige Werte)

Die simulierte Ertragssteigerung infolge der CO<sub>2</sub>-Stimulierung beträgt für die High N Varianten 12.5 %, für die Low N Varianten dagegen nur 8 %. Eine volle Stickstoffversorgung bewirkte im Modell für die Control Variante eine Erhöhung des Ertrages um etwa 34 % gegenüber 29 % gemessen. Die Stickstoffwirkung war unter CO<sub>2</sub><sup>+</sup> höher und bei berechnet 38% gegenüber gemessenen 34 %.

Die berechneten Differenzen der Bestandstemperaturen zwischen den High N und Low N Varianten reichten nicht vollständig aus, um die gemessenen Differenzen in der phänologischen Entwicklung, die am Ende der Vegetationsperiode etwa 6 Tage betrug, zu beschreiben. Entsprechend dem Modell betrug die Beschleunigung der phänologischen Entwicklung unter Stickstoffmangel nur etwa 4 Tage. Die berechnete Differenz der Bestandstemperaturen während der Photoperiode betrug bis zu 5K während der Mittagsstunden, im Mittel etwa 0.6 K. Dieses Ergebnis ist in guter Übereinstimmung mit Messungen von Seligmann (1983). Nach der Auswertung der Daten der mikrometeorologischen Anlage können diese Modellergebnisse mit den experimentellen Daten verglichen werden. Viele Prozesse im Modell sind vom phänologischen

Entwicklungsstadium des Bestandes abhängig. Eine qualitativ gute Abbildung dieses Prozesses ist deshalb essentiell.

In der Abb. 11 sind die simulierten Werte für die kumulative Evapotranspiration dargestellt. Es wurden nur geringe Differenzen zwischen den FACE High N und den Control High N bzw. den entsprechenden Low N Varianten berechnet. Die Wassernutzungseffizienz, d.h. das Verhältnis aus durch die Photosynthese gebundenem Kohlenstoff und dem dafür durch Transpiration verbrauchten Wasser, ist für die FACE Pflanzen auch unter Stickstofflimitierung höher, da die simulierten Biomassen bei etwa gleichem Wasserverbrauch höher waren. Es wurde mit dem Modell eine um 28 % höhere kumulative Transpiration am Ende der Vegetationsperiode für die High N Varianten berechnet. Dies ist in guter Übereinstimmung mit den gemessenen Daten (24 %).

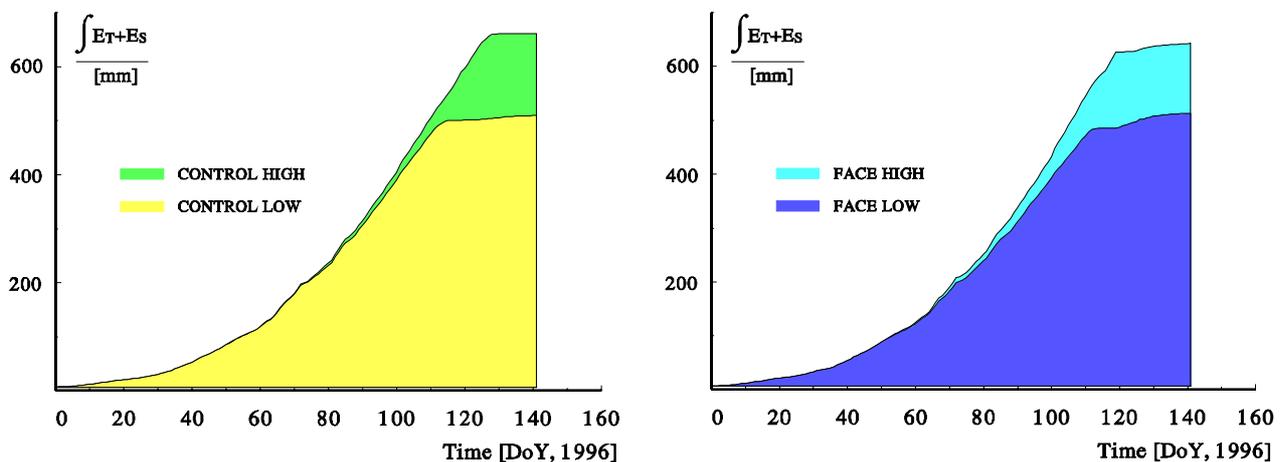


Abb. 11: Berechnete kummulative Evapotranspiration vom 10. Januar bis 10. Mai 1996 für die Control High N und Low N bzw. FACE High N und Low N Plots.

Während der ersten Photosynthesemessungen wurden sowohl ein deutlicher  $CO_2$ - als auch ein Stickstoffeffekt auf den Gasaustausch des Bestandes festgestellt. Aus den Messungen der Photosynthese der Fahnenblätter (infolge der Apikaldominanz auf Kosten anderer Organe noch optimal versorgt) ging hingegen nur ein  $CO_2$ - und kein Stickstoffeffekt hervor. Das deutete darauf hin, daß in den frühen phänologischen Entwicklungsabschnitten merkliche Differenzen in den Photosyntheseraten der unteren Blätter in Abhängigkeit von deren Stickstoffgehalt aufgetreten sein müssen. Auch in anderen experimentellen Versuchen und Modellrechnungen konnte nachgewiesen werden, daß die beobachteten Verteilungen des Stickstoffs im Bestand zu höheren Photosyntheseraten als homogene Verteilungen führten (Balocchi und Harley 1995). Daher wurde im Modell ein vertikaler Stickstoffgradient eingeführt, der über die zu einem vertikalen Gradienten der maximalen Carboxylierungskapazität

gemäß Gl. 11 führte. Die Schichten des Bestandes mit einer höheren Strahlungsexposition werden besser mit Stickstoff versorgt, was zu einer Erhöhung der Assimilationsrate des Bestandes führt. Zunehmend werden Optimierungsansätze für die Berechnung des Stickstoffprofils (Badeck 1995) verwendet. Diesem Vorgehen liegt die Annahme zugrunde, daß Stickstoff in der Pflanze an die Blätter in verschiedenen morphologischen Positionen so verteilt wird, daß die Assimilationsrate maximiert wird (Field 1983, Farquhar 1989, Evans 1993). Durch die Bearbeiter wurde, wie allgemein üblich, ein exponentieller Ansatz für die Verteilung des Stickstoffes im Bestand verwendet. Diese Lösung erforderte nur einen geringen Rechenaufwand, was für die Anwendung in einem so komplexen Modell notwendig ist. Unterschiedliche Blattalter wurden dabei nicht berücksichtigt. Als Nebenbedingung gilt, daß die Stickstoffgehalte der einzelnen Schichten den minimalen oder maximalen Stickstoffgehalt nicht unter- bzw. überschreiten dürfen. Die Einführung des Stickstoffgradienten im Bestand ist nicht nur für die exakte Berechnung der Assimilationsraten von Bedeutung, sondern verstärkt insbesondere auch in der kumulativen Wirkung auf die Biomassen und Erträge den  $\text{CO}_2$ -Effekt unter Stickstofflimitierung im Modell. Die Ursache liegt in den niedrigeren Stickstoffkonzentrationen der Blätter unter  $\text{CO}_2$ -Anreicherung. Haben Blätter mit einer grösseren Photosyntheseleistung, wie das Fahnenblatt, eine höhere Stickstoffkonzentration, so ist die  $\text{CO}_2$ -Stimulation für den gesamten Bestand höher.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß mit dem Modell *demeter* die Wechselwirkung einer erhöhten atmosphärischen  $\text{CO}_2$ -Konzentration unter Stickstoff- bzw. Wasserlimitierung qualitativ und quantitativ sehr gut beschreiben läßt. Obwohl die Validierung des Modells für speziell für Weizen erfolgte, lassen sich die Beschreibungen, insbesondere für die kurzzeitige  $\text{CO}_2$ -Wirkung auf andere  $\text{C}_3$ -Pflanzen verallgemeinern und in entsprechenden Modellen nutzen. Daneben sei hier auch nochmals auf die bereits auf Seite 20 gemachte Anm. 1 verwiesen.

## 5. Zusammenfassung

Mit dem vorgelegten Abschlußbericht des Vorhabens konnte die Entwicklung eines modular aufgebauten prozeßorientierten Modells für Agrarökosysteme (DEMETER) am Beispiel Winter- und Sommerweizen (*Triticum aestivum* L.) unter Einbeziehung des gegenwärtigen internationalen Kenntnisstandes in seiner ersten an umfangreichen Beispielen erprobten Version abgeschlossen werden. Daneben konnte eine Erprobungsversion für Sommergerste (*Hordeum vulgare* L.) aus dem Weizenmodell abgeleitet werden (DBU-Vorhaben). Diese Version muß noch an verschiedenen Standorten erprobt werden. Für Klimafolgenuntersuchungen soll aufbauend auf diesen beiden Modellen und unter Nutzung weiterer durch das ZALF aus dem Winterweizenmodell TRITSIM abgeleiteten Modellen für Winterroggen und Wintergerste schrittweise strukturell einheitliche Modellfamilien für die wichtigsten Kulturarten Deutschlands aufgebaut werden. Die nutzbaren Leistungsparameter des Modells DEMETER sind:

- (i) die Quantifizierung der Wechselwirkungen mit den angrenzenden Systemen Boden und Atmosphäre (Kap. 3, 4 des Berichtes gem. ANBest-P 5b2.2 (BMFT v. 01.01.1982),
- (ii) die nachgewiesene dynamische Reaktion des Modells auf wechselnde Umweltbedingungen
- (iii) die retrospektiven, aktuellen und prognostischen Möglichkeiten der Abschätzung von lokalen bis regionalen Ertragstendenzen.

Deartige prozeßorientierte Ökosystemmodelle besitzen die für Untersuchungen im Rahmen der Global Change Forschung notwendige Leistungsfähigkeit. Die von den Bearbeitern des Vorhabens gewählte Vorgehensweise der prozeßorientierten Modellierung der wichtigsten pflanzeninternen Prozesse in ihrer Wechselwirkung zu den exogenen Einflüssen entspricht dem im vorgelegten Bestand referierten Stand der Bearbeitung im Rahmen der internationalen Global Change Forschung. Das Modellsystem **demeter** (Weizen) ist seit 1993 als Teil des Internationalen GCTE Wheat Networks bestätigt. Erste regionale Anwendungen der Modelle in der Struktur von **demeter** konnten zwar im Rahmen des hier abgerechneten Berichtes nicht mehr realisiert werden, liegen aber als Ergebnis innerhalb des weiterführenden Projektes 01LK9535 zwischenzeitlich vor und verdeutlichen sowohl die Leistungsfähigkeit des Modellansatzes, offenbaren aber auch die Notwendigkeit einer soliden und belastbaren Datenbasis.

Im Rahmen der Bearbeitung konnte festgestellt werden, daß sich z. Zt. existierende GCM-Szenarios für den Raum Deutschland nicht für Klimafolgenabschätzungen mit derartig de-

taillierten Impactmodellen eignen, da insbesondere die Abbildungsgüte der zeitlichen und räumlichen Verteilung von Niederschlägen durch die GCM's in den Auflösungen T23 und T46 unzureichend ist. Ergebnisse zu diesen Testrechnungen sind wegen mangelnder Eignung zur Publikation mit ihrem aktuellen Stand als internes Arbeitsmaterial beim Bearbeiter vorhanden, können aber nach Absprache mit dem Kooperationspartner MPI Hamburg dem Bewilligungsorgan vorgelegt werden. Im Rahmen der weiterführenden Arbeiten ist in Auswertung dieser Testrechnungen die Verwendung von Szenarien höher aufgelöster GCM's (T106) bzw. von genesteten regionalen Szenarios für Deutschland vorgesehen.

Das Vorhaben konnte erfolgreich bearbeitet werden. Entsprechend der Zielstellung wurde eine Version des Modells *demeter* erarbeitet, die die Auswirkungen erhöhter atmosphärischer CO<sub>2</sub> Konzentrationen auf Weizenbestände unter Wasser- und Stickstofflimitierung qualitativ und quantitativ beschreibt. Insbesondere wurden mit dem Photosynthese- und Energiebilanzmodul des Modells *demeter* für andere Ökosystemmodelle verwendbare Modellbausteine geschaffen.

## Literatur

- Amthor JS (1994) Scaling CO<sub>2</sub>-photosynthesis relationships from the leaf to the canopy. *Photosynthesis Research* **39**, 321-350.
- 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.
- Brodribb T (1996) Dynamics of changing intercellular CO<sub>2</sub> concentration (ci) during drought and determination of minimum functional ci. *Plant Physiology* **111**, 179-185.
- Claus S (1982) Ein Beitrag zum Beschreiben der Ontogenese von Getreidepflanzen. In: *Wissenschaftliche Beiträge* **35** (eds Unger K & Schulz I), Umweltstreb. Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, 267-278.
- Farquhar GD, von Caemmerer S & Berry BA (1980) A biochemical model of photosynthetic CO<sub>2</sub> assimilation in leaves of C<sub>3</sub> species. *Planta* **149**, 78-90.
- Farquhar GD & von Caemmerer S (1982) Modelling of Photosynthetic Response to Environmental Conditions. In: *Physiological Plant Ecology, Encyclopedia of Plant Physiology* **12D** (NS) (eds Lange OL, Noble PS, Osmond CB & Ziegler H), pp. 549-587. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, Germany, USA.
- Farquhar GD & Wong SC (1984) An Empirical Model of Stomatal Conductance. *Australian Journal of Plant Physiology* **11**, 191-210.
- Fischer, R.A. (1983) Wheat. In: *Proceedings of the Symposium on Potential Productivity of Field Crops under Different Environments*, September 1980, IRRI, Los Banos, 129-154.
- Goudriaan J (1995) Predicting Crop Yields under Global Change. In: *Global Change and Terrestrial Ecosystems, IGBP Book Series 2* (eds Walker BH & Steffen WL) Cambridge University Press Ltd.
- Gräfe J (1996) *Untersuchungen zur umweltabhängigen Architektur eines Sommergerstebestandes für die Erweiterung eines Agrarökosystem-Modells*. Abschlußbericht zum Stipendium der Deutschen Bundesstiftung Umwelt, Humboldt-Universität zu Berlin und Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e.V.
- Grossman S, Kartschall Th, Kimball BA, LaMorte RL, Garcia RL, Wall GW, Hunsaker DJ & Pinter Jr. PJ (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.
- Hendrey GR, Lewin K & Nagy J (1993) Control of carbon dioxide in unconfined field plots. In (eds Schulze ED & Mooney HA) *Design and Execution of Experiments on CO<sub>2</sub> Enrichment*. Commission of the European Communities, Environmental Research Programme, Ecosystem Research Report Series **6**, Brussels.
- Hunsaker DJ, Kimball BA, Pinter Jr PJ, LaMorte RL & Wall GW (1996) Effects of CO<sub>2</sub> enrichment and irrigation on soil water balance evapotranspiration of wheat grown under open-air field conditions. *Transactions of the ASAE*. **39**, 1345-1355

- Jacobs CMJ (1994) *Direct impact of atmospheric CO<sub>2</sub> enrichment on regional transpiration*. PhD Thesis, Department of Meteorology, Wageningen Agricultural University, The Netherlands, 179 pp.
- 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 T, Grossman S, Kimball BA, Garcia RL, LaMorte RL, Pinter Jr. PJ & Wall GW (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.
- Keeling CD & Whorf TP (1997) Atmospheric CO<sub>2</sub> 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.
- van Keulen H & Seligmann NG (1987) Simulation of water use, nitrogen nutrition and growth of a spring wheat crop. *Simulation Monographs*, PUDOC, Wageningen, 310 pp.
- Kimball BA, Pinter Jr PJ, Garcia RL, LaMorte RL, Wall GW, Hunsaker DJ, Wechsung G, Wechsung F & Kartschall Th (1995) Productivity and water use of wheat under free-air CO<sub>2</sub> enrichment. *Global Change Biology*, **1**, 429-442.
- Lewin KF, Hendrey GR & 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 GK), CRC Press, Boca Raton, FL, USA, pp. 135-141
- Pinter Jr PJ, Kimball BA, Garcia RL, Wall GW, Hunsaker DJ & LaMorte RL (1995) Free-Air CO<sub>2</sub> 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, pp. 215-264.
- Raupach MR and Finnigan, JJ (1988) Single-layer Models of Evaporation from Plant Canopies are Incorrect but Useful, Whereas Multilayer Models are Corredt but Useless. Discuss. Aust. J. Plant Physiol., **15**, 705-716.
- Seligmann, N.G., Loomis, R.S., Burke, J. & Abshahi, A. (1983) Nitrogen nutrition and canopy temperature in field-grown spring wheat. *J. agric. Sci. Camb.* **101**, 691-697.
- Sharkey TS & Badger MR (1982) Effects of water stress on photosynthetic electron transport, photophosphorylation and metabolite levels of *Xanthium strumarium* mesophyll cells. *Planta* **156**, 199-206.
- Spitters CJT, Toussaint HAJM & 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 GW, Adamsen FJ, Kimball BA, Garcia RL, Pinter Jr PJ & Kartschall Th (1995) Biomass and Growth rate of a Spring Wheat Root System grown in Free-Air CO<sub>2</sub> Enrichment (FACE) and ample soil moisture. *Journal of Biogeography* **22**, 623-634