

Aus dem Institut für Agrarökologie

Hans-Joachim Weigel
Klaus Waloszczyk
et al.

Andreas Pacholski
Cathleen Frühauf

Zur Wirkung erhöhter atmosphärischer CO₂- Konzentrationen auf Wintergerste, Zuckerrübe und Winterweizen in einer Fruchtfolge : Beispiele aus dem Braunschweiger Kohlenstoffprojekt

Veröffentlicht in: Landbauforschung Völkenrode ; 56(2006)3-4:101-115

Braunschweig

Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL)

2006

Zur Wirkung erhöhter atmosphärischer CO₂-Konzentrationen auf Wintergerste, Zuckerrübe und Winterweizen in einer Fruchtfolge: Beispiele aus dem Braunschweiger Kohlenstoffprojekt

Hans-Joachim Weigel, Andreas Pacholski, Klaus Waloszczyk, Cathleen Frühauf, Remigius Manderscheid, Traute-Heidi Anderson, Otto Heinemeyer, Bernd Kleikamp, Mohamed Helal, Stefan Burkart, Stefan Schrader, Christine Sticht und Anette Giesemann¹

Zusammenfassung

Im Hinblick auf den gegenwärtigen bzw. vorausgesagten Klimawandel ändern sich nicht nur Temperaturen und Niederschlagsverhältnisse, sondern auch die chemische Zusammensetzung der Atmosphäre (chemische Klimaparameter). Von besonderer Bedeutung ist hier das Kohlenstoffdioxid (CO₂), dessen Konzentration in der Atmosphäre rasch ansteigt. Die weitere globale Zunahme der atmosphärischen CO₂-Konzentration von gegenwärtig ca. 375 ppm auf ca. 450 – 550 ppm in den nächsten 50 – 100 Jahren gilt als unausweichlich. Insbesondere Pflanzen des C3-Typs reagieren auf erhöhte CO₂-Konzentrationen in der Umgebungsluft in der Regel mit einer Steigerung der Photosynthese sowie einer Reduktion der Transpiration. Inwieweit sich aus diesen Primärreaktionen positive Konsequenzen für das Pflanzenwachstum generell und speziell für die Biomassebildung und Erträge von Kulturpflanzen ergeben, ist von erheblicher Bedeutung für die Vorhersage der Folgen des Klimawandels für die Landwirtschaft bzw. für Agrarökosysteme. CO₂-Anreicherungsversuche unter Feldbedingungen können Beiträge zur Beantwortung dieser offenen Frage leisten. Im Rahmen des Braunschweiger Kohlenstoffprojektes werden in einem 6-jährigen Freiland-CO₂-Anreicherungsversuch (Free Air Carbon dioxide Enrichment = FACE) in einer ortsüblichen Fruchtfolge (Wintergerste-Zuckerrübe-Zwischenfrucht-Winterweizen) die Auswirkungen zukünftiger CO₂-Konzentrationen (550 ppm) und deren Wechselwirkung mit der Stickstoff-(N)-Düngung auf Pflanzenwachstum, Stoff- und Wasserflüsse sowie Bodenmerkmale untersucht. Im vorliegenden Beitrag wird dieser Versuch vorgestellt und einige vorläufige Ergebnisse aus dem 1. Fruchtfolgedurchgang beschrieben. Erhöhte CO₂-Konzentrationen ([CO₂]_h) stimulierten die Bestandesphotosynthese zwischen + 18 % (Gerste) bis + 45% (Zuckerrübe), während gleichzeitig die Evapotranspiration um - 2.6 % (Weizen) bis - 19.8 % (Zuckerrübe) reduziert wurde. Die [CO₂]_h-Behandlung resultierte in einer Stimulation der oberirdischen Biomassebildung im Bereich zwischen + 6.1% (Zuckerrübe, 50 % reduzierte N-Düngung) bis + 14.4 % (Winterweizen, ortsübliche N-Düngung). Die Feinwurzelbiomassebildung wurde ebenfalls durch die [CO₂]_h-Behandlung stimuliert, der Effekt war jedoch während der Vegetationsperioden nur vorübergehend messbar. Die mikrobielle Biomasse im Boden reagierte bisher nicht auf die [CO₂]_h-Behandlung, während sich das Verhältnis der bakteriellen zur pilzlichen Bodenatmung in Richtung bakterielle Respiration verschob. Artenzahlen und Abundanzen von Collembolen nahmen unter Weizen durch die [CO₂]_h-Behandlung zu. Die Bodenatmung (Gesamt CO₂-Fluss aus dem Boden) wurde ebenfalls durch die [CO₂]_h-Behandlung stimuliert, wobei der Effekt bei der Zuckerrübe stärker als bei Weizen ausgeprägt war. Eine eindeutige Veränderung des Bodenkohlenstoffgehal-

tes, dessen Analyse über die Methode der stabilen Kohlenstoff-Isotopen-Zusammensetzung erfolgte, war ebenfalls noch nicht erkennbar. Die Gesamtauswertung des 6-jährigen Versuches ist im Gang.

Schlüsselworte: Biomasse, Boden, Collembolen, FACE, Free Air Carbon dioxide Enrichment, Fruchtfolgen, Gerste, mikrobielle Biomasse, Klimawandel, Kohlenstoffhaushalt, Wasserhaushalt, Weizen, Zuckerrübe

Abstract

Effects of elevated atmospheric CO₂ concentrations on barley, sugar beet and wheat in a rotation: examples from the Braunschweig carbon project

Apart from changes in temperature and precipitation patterns 'climate change' is driven by and entails marked changes in atmospheric chemistry. The future increase of the atmospheric CO₂-concentration is the most prominent and undisputable change of the atmosphere. Elevated CO₂ (e[CO₂]) is known to stimulate leaf level photosynthesis and to reduce leaf transpiration. This may result in altered biomass production of agricultural plants and subsequent secondary feedback effects on ecosystem properties, as for example, water relations, carbon (C) turnover and soil biology. In the framework of the Braunschweig Carbon Project effects of e[CO₂] under different levels of nitrogen (N) supply are studied in an arable crop rotation system (winter barley - sugar beet - winter wheat, 1999-2005) under field conditions by means of a Free Air Carbon dioxide Enrichment (FACE) approach. Preliminary results obtained during the first 3 years of experimentation are shown here. Canopy CO₂ uptake was stimulated by e[CO₂] by ca. 18 % (barley) to ca. 45 % (sugar beet), while canopy H₂O loss (evapotranspiration) was reduced by 2.6 % (wheat) to 19.8 % (sugar beet). The effects of e[CO₂] resulted in a stimulation of above ground biomass production between ca. + 6.1 % (sugar beet, reduced N fertilization) to + 14.4 % (winter wheat, full fertilization). Fine root biomass production was stimulated by e[CO₂] but this effect was not consistent during the growing seasons. While no significant effects of e[CO₂] on soil microbial biomass were observed, a CO₂-induced shift in the ratio of bacterial to fungal soil respiration was observed indicating an increase of the percentage bacterial respiration. Species number and abundances of collembolans were enhanced by e[CO₂] during the wheat growing season. Total soil CO₂ efflux (soil respiration) was stimulated under e[CO₂], however the magnitude of this effect differed between sugar beet and wheat. As evidenced from stable carbon 13 isotope analysis changes in soil carbon content were not yet detected.

Key words: barley, biomass, carbon turnover, climate change, collembolans, crop rotation, Free Air Carbon dioxide Enrichment, FACE, microbial biomass, soil, sugar beet, water fluxes, wheat

¹ Institut für Agrarökologie der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL), Bundesallee 50, 38116 Braunschweig; E-Mail: hans.weigel@fal.de

1 Das Braunschweiger Kohlenstoffprojekt

Die vorausgesagten Veränderungen mittlerer Klimawerte sowie die Änderungen in Häufigkeit, Dauer und Stärke von Klimaextremen bergen Risiken für landwirtschaftliche Kulturpflanzen bzw. Agrarökosysteme und die Agrarproduktion insgesamt. Neben Veränderungen der Temperatur und Verschiebungen von Niederschlagsverhältnissen (physikalische Klimaparameter) verändert sich gleichzeitig die chemische Zusammensetzung der Atmosphäre (chemische Klimaparameter). Nachweisbar haben die Konzentrationen zahlreicher Spurengase (Kohlenstoffdioxid CO_2 ; Ozon O_3 in der Troposphäre; Distickstoffmonoxid/Lachgas N_2O ; Stickstoffmonoxid und -dioxid, NO/NO_2 ; Methan CH_4 ; Fluorchlorkohlenwasserstoffe) in den letzten 100 Jahren deutlich zugenommen (Dämmgen und Weigel 1998). Diese Spurengase tragen (zusammen mit Wasserdampf) einerseits als „Treibhausgase“ zur Änderung des Klimas bei (Treibhauseffekt), andererseits sind Gase wie CO_2 , O_3 und NO/NO_2 in die biogeochemischen Kreisläufe eingebunden und interagieren unmittelbar mit Pflanzen und Böden (Luo and Mooney 1999; Amthor 2001; Fuhrer 2003). Agrarisch genutzte Flächen (Ackerland, Grünland) spielen dabei eine wichtige Rolle als Quelle und Senke.

Von besonderer Bedeutung ist in diesem Zusammenhang die Zunahme der CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre. Diese Zunahme gehört zu den am sichersten vorhersagbaren und unausweichlichen Entwicklungen der vorausgesagten Klimaänderungen. Während die globale CO_2 -Konzentration der Atmosphäre über > 100 000 Jahre hinweg bis etwa zum Ende des 19. Jahrhunderts bei ca. 280–290 ppm lag (Petit et al. 1999), steigt sie seitdem rasch an und beträgt gegenwärtig bereits 375 ppm. Dieser Trend wird sich mit noch größerer Intensität als bisher fortsetzen. In nur 50 Jahren soll die CO_2 -Konzentration bereits bei ca. 450–550 ppm liegen (IPCC 2001). Als Substrat der Photosynthese ist CO_2 aus der Atmosphäre für Wachstum und Entwicklung aller Pflanzen von fundamentaler Bedeutung. Da die heutige CO_2 -Konzentration der Atmosphäre für C_3 -Pflanzen suboptimal ist, führt eine Erhöhung der CO_2 -Konzentration in der Regel zu einer Stimulation der Photosynthese. Gleichzeitig wird - zumindest bei vielen krautigen Pflanzenarten bzw. Kulturpflanzen - die Blatttranspiration reduziert (Abb.1; vgl. Kap. 2). Welche ökologischen bzw. agronomischen Folgen sich aus dieser Reaktion von Einzelpflanzen auf eine CO_2 -Anreicherung ergeben, ist nach wie vor schwer abzuschätzen (Weigel 2005).

Im Zuge der Diskussionen über die Bedeutung des raschen CO_2 -Anstieges in der Atmosphäre ist deutlich geworden, dass die Rolle von Agrarökosystemen im Kreislauf des Kohlenstoffs (C) noch nicht hinreichend verstanden wird (IPCC 2001). Insbesondere gilt dies für den Austausch von CO_2 zwischen Landoberflächen und

Atmosphäre, da noch immer Kenntnisdefizite darüber bestehen, welche Pflanzen- und Boden-Prozesse diese CO_2 -Flüsse steuern (Rees et al. 2005) und welche Wechselwirkungen zwischen CO_2 -Flüssen und Flüssen anderer Elemente bestehen. Zu den offenen Fragen gehört auch, welche Rückkoppelungseffekte sich aus den Auswirkungen der steigenden CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre auf Pflanzen für die Wasser- und Stoffflüsse in Agrarökosystemen ergeben könnten (Buyanowski and Wagner 1998; Mosier 1998). Dies gilt in besonderem Maße für den Ackerbau, der in Europa mit ca. 23 % der gesamten Landfläche eine bedeutende Landnutzungsform darstellt.

Die möglichst genaue Kenntnis der ökologischen Regelgrößen der für den C-Umsatz in Agrarökosystemen verantwortlichen Prozesse ist Voraussetzung dafür, verbesserte biologische und biogeochemische Prozessmodelle zu entwickeln (Wenkel und Mirschel 1995), die wiederum Grundlage für höherskalige Modelle sind. Mit Prozessmodellen lassen sich z.B. kleinräumige Unterschiede in der Bewirtschaftung von Flächen und in den Bodeneigenschaften, interannuelle Klimaschwankungen sowie auch Einflüsse zukünftiger Klimaszenarien (z.B. erhöhter atmosphärischer CO_2 -Konzentrationen) so abbilden, dass

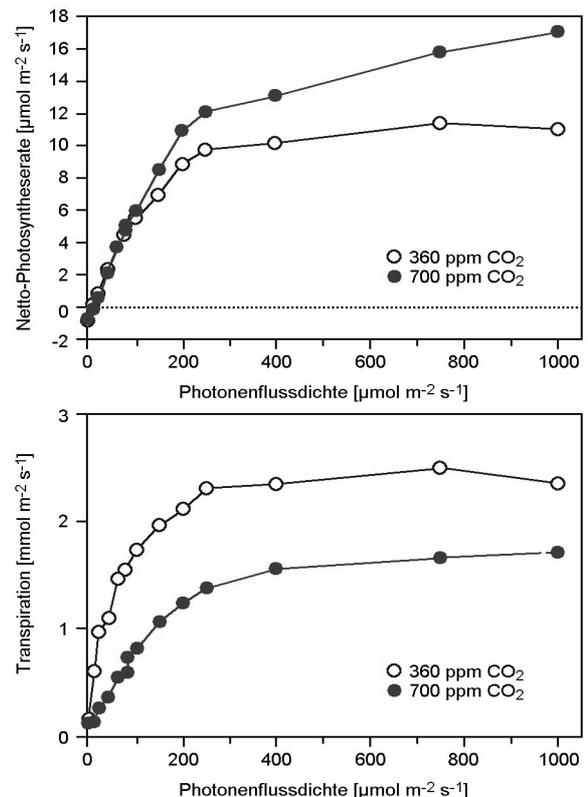


Abb. 1: Photosynthese (oben) und Transpiration (unten) eines Sommerweizenblattes in Abhängigkeit von der eingestrahelten Lichtintensität bei gegenwärtiger (360 ppm; offene Symbole) und erhöhter (700 ppm; geschlossene Symbole) CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre (Burkart, unveröffentlicht).

verlässlichere Informationen über großräumige Quellen- und Senkenstärken von Agrarökosystemen für CO₂ bzw. über mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf die Landwirtschaft vorliegen. Zur Entwicklung, Verbesserung und Validierung derartiger Modelle sind experimentelle Datensätze aus möglichst praxisnahen Versuchen mit besonderer zeitlicher und räumlicher Auflösung unerlässlich.

Vor dem Hintergrund dieser Fragestellungen ist in Braunschweig im Jahre 1999 ein mehrjähriger Feldversuch auf einem Ackerschlag etabliert worden, der sich mit ökosystemaren Stoff- und Energieflüssen unter heutigen und zukünftigen Klimabedingungen befasst (Weigel and Dämmgen 2000). Im Rahmen dieses „Braunschweiger Kohlenstoff-Projektes“ werden auf einem 24 ha-Schlag unter identischen Klima-, Nutzungs- bzw. Managementbedingungen folgende Untersuchungen durchgeführt.

- Kontinuierliche Messungen des Austausches von CO₂ und H₂O-Dampf (sowie weiterer Spurengase) zwischen Bestand und bodennaher Atmosphäre auf Schlägebene mittels mikrometeorologischer Verfahren.
- Diskontinuierliche Gasflussmessungen von Teilflüssen relevanter Spurengase (CO₂, H₂O, N₂O, CH₄, VOC) mittels Kammertechniken auf kleineren Skalen sowie Messungen sedimentierender atmosphärischer Stoffe mit verschiedenen Sammlern.
- Langzeit-CO₂-Anreicherungsversuche in realen Fruchtfolgen unter Verwendung einer kammerlosen CO₂-Expositionstechnik (Free Air Carbon dioxide Enrichment: FACE).

Ziel des „Braunschweiger Kohlenstoff-Projektes“ ist es, neben Prozessen des C-Umsatzes im System Atmosphäre-Bestand-Boden in Fruchtfolgen des Ackerbaus unter heutigen und zukünftigen CO₂-Konzentrationen die möglichen Folgen des Klimawandels für das Wachstum von Agrarpflanzen und für Agrarökosysteme zu untersuchen. Die erzeugten Datensätze sollen in Pflanzenwachstums-, Boden- bzw. Agrarökosystemmodelle einfließen. Der vorliegende Beitrag beschränkt sich auf den Aspekt der Auswirkungen veränderter Klimabedingungen und stellt den Versuchsansatz zur Simulation zukünftiger atmosphärischer CO₂-Konzentrationen (FACE) sowie einige vorläufige Ergebnisbeispiele vor.

2 Auswirkungen erhöhter atmosphärischer CO₂-Konzentrationen auf Agrarökosysteme: offene Fragen und Ziel des Braunschweiger FACE-Versuches

Untersuchungen zu den möglichen Auswirkungen erhöhter atmosphärischer CO₂-Konzentrationen auf terrestrische Ökosysteme generell und auf Agrarökosysteme im Besonderen werden von zwei Fragestellungen angetrieben. Zum einen wird versucht, vor dem Hintergrund möglicher Effekte des Klimawandels auf die globale Ernährungssituation der Zukunft zu bewerten, wie sich

zukünftige CO₂-Konzentrationen auf Wachstum und Ertrag von Kulturpflanzen auswirken könnten (Rosenzweig and Hillel 1998; Reddy and Hodges 2000; Kimball et al. 2002). Zum anderen wird in jüngerer Zeit angestrebt, die möglichen Rückkoppelungseffekte zwischen Agrarökosystemen und Klimawandel bzw. einer veränderten Chemie der Atmosphäre im Hinblick auf den Wasser- und Stoffaustausch (C, N) zwischen Atmosphäre und Biosphäre besser zu verstehen (Mosier 1998; Polley 2002).

In zahlreichen Versuchen ist festgestellt worden, dass aus der meist deutlichen Photosynthesestimulation (vgl. Abb. 1) auch eine Förderung des Pflanzenwachstums bzw. der Biomassebildung resultiert. Deren Höhe ist allerdings stark von der sonstigen Ressourcenverfügbarkeit (Nährstoffe, Wasser) abhängig. Viele der bisher durchgeführten CO₂-Anreicherungsversuche haben insbesondere bei landwirtschaftlichen Kulturpflanzen (z.B. Weizen, Reis, Sojabohnen, Baumwolle, Weidelgras) z.T. erhebliche Wachstums- bzw. Ertragssteigerungen (sog. „CO₂-Düngeeffekt“) ermittelt (Rosenzweig and Hillel 1998; Bender et al. 1999; Reddy and Hodges 2000; Amthor 2001). Die Mehrzahl dieser Versuche fand allerdings unter Bedingungen statt (z.B. Kammerversuche mit Topfkulturen; optimierte Wasser- und Nährstoffversorgung), die wenig relevant für tatsächliche landwirtschaftliche Anbauverhältnisse sind.

Inwieweit eine Reduktion der Blatt-Transpiration für Wasserdampf (vgl. Abb. 1) auf der Bestandesebene wirksam ist, wo zahlreiche bestandesinterne Wechselwirkungen (Koppelung mit der Atmosphäre, gegenseitige Beschattung, CO₂-bedingte Zunahme des Blattflächenindex) die Wasserflüsse in die Atmosphäre (Evapotranspiration) beeinflussen, ist ebenfalls nicht völlig geklärt (Morrison 1998; Polley 2002). Die Frage nach der Rückkoppelung zwischen physiologischer CO₂-Wirkung und pflanzlichem Wasserhaushalt ist ebenfalls von Bedeutung für die Bewertung der Wirkungen zukünftiger Klimaszenarien. Es ist z.B. noch offen, welche Rückwirkungen sich daraus auf den Stoff- und Energieaustausch zwischen Atmosphäre und Biosphäre und damit auch auf die Wachstums- und Ertragsleistungen von Kulturpflanzen bzw. auf den Wasserhaushalt von Vegetationseinheiten und Landschaften ergeben könnten. Es gibt Beispiele dafür, dass sich die „anti-transpirative“ Wirkung erhöhter CO₂-Konzentrationen auf der Bestandesebene langfristig positiv auf den Bodenwasserhaushalt auswirkt (Volk et al. 2000; Morgan et al. 2004). Änderungen der Bodenfeuchte wirken sich wiederum auf bodenbiologische Prozesse bzw. die Stoffumsetzungen im Boden aus (s.u.).

Das mögliche Ausmaß der positiven CO₂-Effekte spielt für die Vorhersage von Folgen der veränderten Temperaturen und Niederschläge für die terrestrischen Ökosysteme der Erde insgesamt und insbesondere für die globalen bzw. regionalen Ernteerträge eine wichtige Rolle. Je nachdem, ob und in welcher Höhe die physiologische CO₂-

Wirkung („CO₂-Düngeeffekt“) in entsprechenden Prognosemodellen berücksichtigt wird, unterscheiden sich Richtung und Ausmaß der vorhergesagten Ertragsänderungen erheblich (Rosenzweig and Hillel 1998). Der „CO₂-Düngeeffekt“ sollte daher so realitätsnah wie möglich abgeschätzt werden (Parry et al. 2004). Einen dafür geeigneten experimentellen Untersuchungsansatz stellt die CO₂-Anreicherung im Feld (Free Air Carbon dioxide Enrichment, FACE) dar (s.u.).

Prozesse und Poolgrößen im Boden werden durch veränderte atmosphärische CO₂-Konzentrationen nicht direkt beeinflusst, sondern reagieren auf Veränderungen der jeweiligen Vegetation. Die durch Pflanzen vermittelten CO₂-Effekte auf den Boden basieren hauptsächlich auf einem vermehrten Anfall oberirdischer Biomasse, einer Stimulation des Wurzelwachstums, einer verstärkten Wurzelabscheidung von Assimilaten (Exsudation bzw. Rhizodeposition), einer veränderten chemischen Zusammensetzung (z.B. erweitertes C/N-Verhältnis) der anfallenden pflanzlichen Biomasse sowie auf einer (möglichen) Zunahme der Bodenfeuchte. Daraus wiederum resultieren vielfältige Wirkungsketten, die die mikrobiellen Lebensgemeinschaften bzw. die Zoozöosen des Bodens in ihrer Struktur und Funktion und damit den C- bzw. den Stoffumsatz im Boden insgesamt betreffen (Rogers et al. 1997; Körner 2000; Zak et al. 2000; Norby et al. 2001). Es konnte z.B. gezeigt werden, dass eine durch hohe CO₂-Konzentrationen veränderte Wurzelexsudation (Rouhier et al. 1996; Hodge et al. 1998), die Zusammensetzung und Leistung mikrobieller Lebensgemeinschaften in der Rhizosphäre und im Gesamtboden beeinflusst. Daraus resultierende Folgen für die daran anschließenden Nahrungsnetze der Bodenfauna verbunden mit Änderungen in der Bodenatmung, d.h. der Freisetzung von CO₂ aus dem Boden in die Atmosphäre, sind möglich.

Zurzeit ist nicht schlüssig zu beantworten, welche Folgen aus diesen Reaktionen für den C-Umsatz bzw. die C-Speicherung und die sonstigen Stoffumsetzungen in terrestrischen Ökosystemen insgesamt abzuleiten sind. Diskutiert wird einerseits eine eventuelle „Beschleunigung“ des C-Umsatzes im Boden durch den atmosphärischen CO₂-Anstieg, die auf einer Stimulation der Aktivität von Bodenorganismen (insbesondere Bodenmikroorganismen) beruht. Andererseits wird vermutet, dass durch das erweiterte C/N-Verhältnis der anfallenden Pflanzenreste unter erhöhten CO₂-Konzentrationen eine Verzögerung des Streuabbaus bzw. der C-Mineralisierung eintreten könnte, die zumindest vorübergehend zu einer C-Speicherung führt. Auf die Vielzahl der zu beiden Hypothesen existierenden Einzelergebnisse kann hier nicht eingegangen werden (Körner 2000). Informationen aus ackerbaulich genutzten Flächen liegen dazu nicht vor.

Je weiter sich die Fragen nach den Wirkungen eines atmosphärischen CO₂-Anstieges auf die Biosphäre von den mehr oder weniger gut bekannten Phänomenen auf

der Einzelblattebene auf die mögliche Bedeutung für die Ökosystemebene hin bewegen, um so unschärfer werden die Antworten. Auf den höheren Systemebenen werden nicht nur die Einflüsse anderer Faktoren als die der CO₂-Konzentration zahlreicher, sondern auch die unterschiedlichen Rückkoppelungseffekte nehmen an Bedeutung zu. Zur Klärung dieser offenen Fragen bedarf es experimenteller Versuchsansätze zur CO₂-Anreicherung auf Ökosystemebene, bei denen die Koppelung zwischen Atmosphäre und Vegetation einerseits und zwischen Vegetation und Boden andererseits so naturnah wie möglich belassen wird. CO₂-Anreicherungsversuche im Feld nach dem FACE-Prinzip erfüllen diese Bedingungen weitgehend.

Vor dem Hintergrund dieses Kenntnisstandes werden im Braunschweiger FACE-Versuch folgende Ziele verfolgt:

- Überprüfung von Hypothesen zum Wachstumsverhalten von Kulturpflanzen auf eine CO₂-Anreicherung, die aus Kammerversuchen stammen.
- Einbeziehung der Reaktionen bisher kaum untersuchter und agronomisch relevanter Arten.
- Ermittlung möglicher Interaktionen mit dem Management (z.B. der N-Versorgung).
- Bewertung möglicher Konsequenzen für Systemeigenschaften (z.B. Wasser-, Stoff-, Energieflüsse, Biodiversität).

3 Versuchsdesign und Methoden

3.1 Messfeldcharakteristik und landwirtschaftliches Management

Das für die CO₂-Anreicherungsversuche und die Stoffflussmessungen eingerichtete Messfeld liegt auf dem Gelände der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL) in Braunschweig (Abb. 2). Es handelt sich um einen 24 ha umfassenden Ackerschlag, der die für mikrometeorologische Messungen und für den Freiland-CO₂-Anreicherungs-Versuch (FACE) notwendigen Anforderungen an Größe, Homogenität und freie Anströmbarkeit (fetch) sehr gut erfüllt. Das Klima am Versuchsstandort ist charakterisiert durch mittlere Jahrestemperaturen von 8,8 °C, eine mittlere Juli-Temperatur von 17 °C, eine Niederschlagsmenge von 618 mm a⁻¹, einer Sonnenscheindauer von 1514 h a⁻¹ und einer Globalstrahlung von ca. 350 kJ cm⁻² a⁻¹.

Im Rahmen einer ortsüblichen dreigliedrigen Fruchtfolge aus Wintergerste (1999/2000 und 2002/2003) > Zwischenfrucht Weidelgras (2000/2003) > Zuckerrübe (2001/2004) > Winterweizen (2001/2002 und 2004/2005) wird der Versuchsschlag vom landwirtschaftlichen Versuchsbetrieb der FAL (185 ha Gemischtfutterbaubetrieb) nach gängiger landwirtschaftlicher Praxis im Hinblick auf Bodenbearbeitung, Düngung und Pflanzenschutz bewirtschaftet (vgl. Tabelle 1). Der Bodentyp ist ein sandiger Lehm (Luvisol; pH 6,5; C_{org} 0,85 % - 1,8 %; Bodenzahl

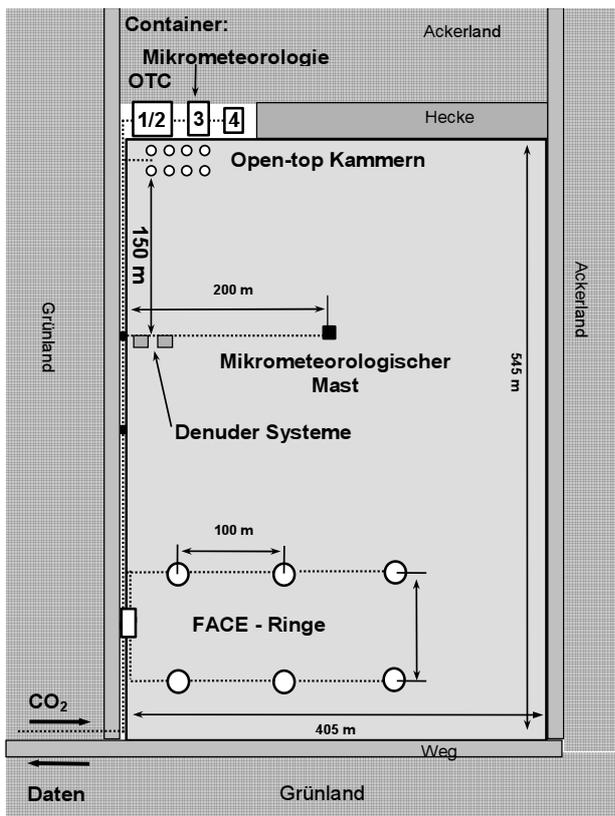


Abb. 2: Schematische Darstellung des Messfeldes in Braunschweig mit Ausrüstungen zum Fluss-Monitoring und zur Freiland-CO₂-Anreicherung (FACE)



Abb. 3: Aufsicht auf einen CO₂-Begasungsring des Freiland-CO₂-Anreicherungsversuches (FACE) in einem Winterweizenfeld im Rahmen des Braunschweiger Kohlenstoffprojektes. Innerhalb des Ringes (20 m Durchmesser) ist die CO₂-Konzentration der bodennahen Luft während der Tageslichtstunden auf 550 ppm erhöht. Beschattungsversuche dienen der Aufklärung von Wechselwirkungen zwischen Strahlung und CO₂-Effekt. Mit Hilfe von Bestandesgaswechselkammern werden CO₂- und H₂O-Flüsse zwischen Bestand und Atmosphäre untersucht.

48). Zur Vermeidung von Wechselwirkungen zwischen Wasserversorgung und CO₂-Anreicherung werden die Versuchsflächen beregnet (entspricht der ortsüblichen Praxis bei Trockenheit), sofern die nutzbare Feldkapazität einen Wert von 50 % unterschreitet. Die Dauer des FACE-Versuches ist zunächst auf zwei Fruchtfolgedurchgänge, d.h. insgesamt 6 Jahre, festgelegt.

3.2 Freiland CO₂-Anreicherung (FACE)

Es wird eine vom Brookhaven National Laboratory (New York/USA) entwickelte Freiland-CO₂-Anreicherungsanlage (Free Air Carbon Dioxide Enrichment = FACE) eingesetzt (Hendrey 1992; Weigel und Dämmgen 2000). Das System besteht aus 32 ringförmig angeordneten „Begasungsröhren“, die jeweils eine Fläche von ca. 310 m² umschließen (Abb. 3). Auf dieser Fläche wird die Konzentration des CO₂ in der Atmosphäre während der Tageslichtstunden auf 550 ppm erhöht. Es werden zwei „Begasungsringe“ (d.h. ca. 620 m² Fläche) mit CO₂ angereichert, zwei Ringe dienen als Kontrolle und werden mit Umgebungsluft versorgt (ca. 375 ppm CO₂). Bei Umgebungstemperaturen < 5 °C und bei Windgeschwindigkeiten > 6.5 m s⁻¹ wird die CO₂-Anreicherung unterbrochen. Das für die CO₂-Anreicherung eingesetzte CO₂ unterscheidet sich in seiner stabilen C-Isotopensignatur von dem der Umgebungsluft und dient damit als „Tracer“ zur Untersuchung des C-Umsatzes im System Atmosphäre-Pflanze-Boden. Zur Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen Kohlenstoff- und Stickstoffflüssen bzw. zwischen CO₂-Anreicherung und N-Versorgung ist die N-Versorgung der jeweiligen Fruchtfolgeglieder in jeder Ringhälfte um 50 % (N-50) gegenüber der fruchtartspezifischen Volldüngung (N-100) reduziert. Tabelle 1 gibt Auskunft über wichtige Kenndaten der Versuchsdurchführung während der ersten Fruchtfolge.

3.3 Untersuchungsmethoden

Eine detaillierte Beschreibung der Messungen von Konzentrationen und vertikalen Flüssen von Luftinhaltsstoffen sowie von weiteren abiotischen Parametern, die auf dem Messfeld außerhalb der FACE-Ringe durchgeführt werden, findet sich bei Weigel und Dämmgen (2000). Zur Charakterisierung des Wasser- und Energiehaushaltes der Flächen unter CO₂-Anreicherung werden folgende weiteren Variablen mit unterschiedlicher zeitlicher Auflösung gemessen: relative Luftfeuchte, Evaporation, Bodenwassergehalt (gravimetrisch und mit TDR-Sonden), Globalstrahlung, Photosynthetisch Aktive Strahlung (PAR), Anteil reflektierter Strahlung (Albedo), Lufttemperatur, Bestandestemperatur, Bodentemperatur, Windgeschwindigkeit und -richtung. Zur Untersuchung des Einflusses erhöhter CO₂-Konzentrationen auf die Flüsse von CO₂ und H₂O-Dampf zwischen Bestand und Atmosphäre wer-

Tabelle 1:
Fruchtfolgeglieder, CO₂-Behandlung und landwirtschaftliches Management während des 1. Fruchtfolgedurchganges (1999-2002) im Rahmen des Braunschweiger FACE-Projektes

Management-Maßnahme	Einheit	Wintergerste „Theresa“	Weidelgrasmischung „Lippstädter Futtertrio“	Zuckerrübe „Wiebke“	Winterweizen „Batis“
Aussaat	Datum	23. 9. 1999	26.7.2000	11.4.2001	6.11.2001
Saat-Dichte	Körner m ⁻²	280	40 kg ha ⁻¹	11	360
Beginn der CO ₂ -Begasung	Datum	4.10.1999	5.8.2000	14.5.2001	22.1.2002
N-Düngung	(Zahl)	(4)	(1)	(2)	(3)
N-Gesamtmenge 100 %/50 %	kg ha ⁻¹	264 / 105	197 / 99	126 / 63	181 / 91
Beregnung	Zahl / mm	3 / 69	2 / 44	5 / 107	3 / 60
CO ₂ -Begasung	Tage	260	70	138	183
mittlere CO ₂ -Konzentration (normal/erhöht)	ppm	373 / 549	373 / 550	371 / 550	377 / 548
Endernte	Datum	22.6.2000	12.10.2000	24.9.2001	31.7.2002

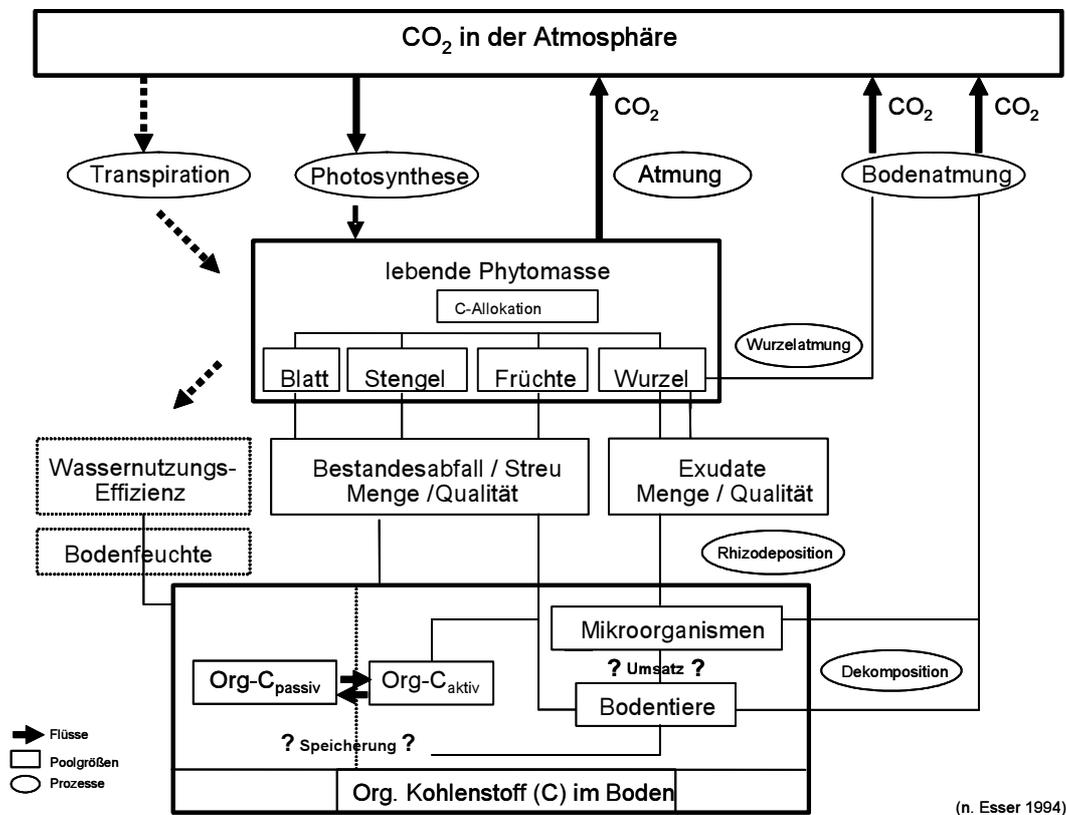


Abb. 4:
Schematische Darstellung des Umsatzes von CO₂ aus der Atmosphäre im System Pflanze-Boden eines Agrarökosystems. Zusätzlich dargestellt ist der Effekt der CO₂-Erhöhung auf die Transpiration (gestrichelte Pfeile), über die wiederum die Bodenfeuchte beeinflusst werden kann.

den offene CO₂-/H₂O-Bestandesgaswechselkammern (0,8 m³) innerhalb der FACE-Ringe eingesetzt (Burkart et al. 2000; vgl. Abb. 3). Messungen des CO₂-Efflux aus dem Boden (*in situ* Bodenatmung) werden mit Hilfe einer Bodenrespirationskammer (LiCOR 6400-9) durchgeführt (Soe et al. 2004).

Die pflanzenphysiologischen, agronomischen und bodenökologischen Messungen zur Bewertung des Einflusses des erhöhten CO₂-Angebotes umfassen u.a.: Blattflächenindex, Bestandeshöhe, Ertrag und Ertragskomponenten, oberirdische Biomasseentwicklung, Bestandesphänologie, Chlorophyll-Gehalt, Gehalt an löslichen Kohlenhydraten in den Blättern sowie die Wurzelbiomasseentwicklung. Folgende Bodenuntersuchungen werden an Bodenproben (0-30 cm Tiefe) durchgeführt: organischer C-Gehalt im Boden (C_{org}), NH₄⁺-/NO₃⁻-Konzentration in der Bodenlösung, mikrobielle Biomasse im Boden (Anderson and Domsch 1978; Heinemeyer et al. 1989), Pilz-/Bakterien-Verhältnis der mikrobiellen Biomasse (Anderson and Domsch 1975), Abundanzen von

Collembolen (MacFadyen 1961). Die ¹²C/¹³C-Zusammensetzung ausgewählter Pflanzen-, Boden-, Tier- und Spurengasproben wird massenspektrometrisch untersucht (Soe et al. 2004; Gieseemann 2005).

4 Ergebnisbeispiele

Im Braunschweiger FACE-Experiment war u.a. von Interesse, ob und inwieweit die in Kap. 1 angedeuteten Primäreffekte erhöhter CO₂-Konzentrationen auf das Pflanzenwachstum weitergehende Konsequenzen auf der agrarökosystemaren Ebene haben. Mögliche Struktur- und Prozesselemente, an denen diese weitergehenden Wirkungen deutlich werden könnten, sind in Abb. 4 vereinfacht dargestellt. Nachfolgend werden dazu einige Ergebnisbeispiele gezeigt, die im Verlauf der ersten Fruchtfolge erzielt wurden und die daher als vorläufig zu betrachten sind. Beschrieben werden vorwiegend die Haupteffekte der CO₂-Anreicherung, Interaktionen mit der Stickstoffversorgung werden nur vereinzelt angesprochen.

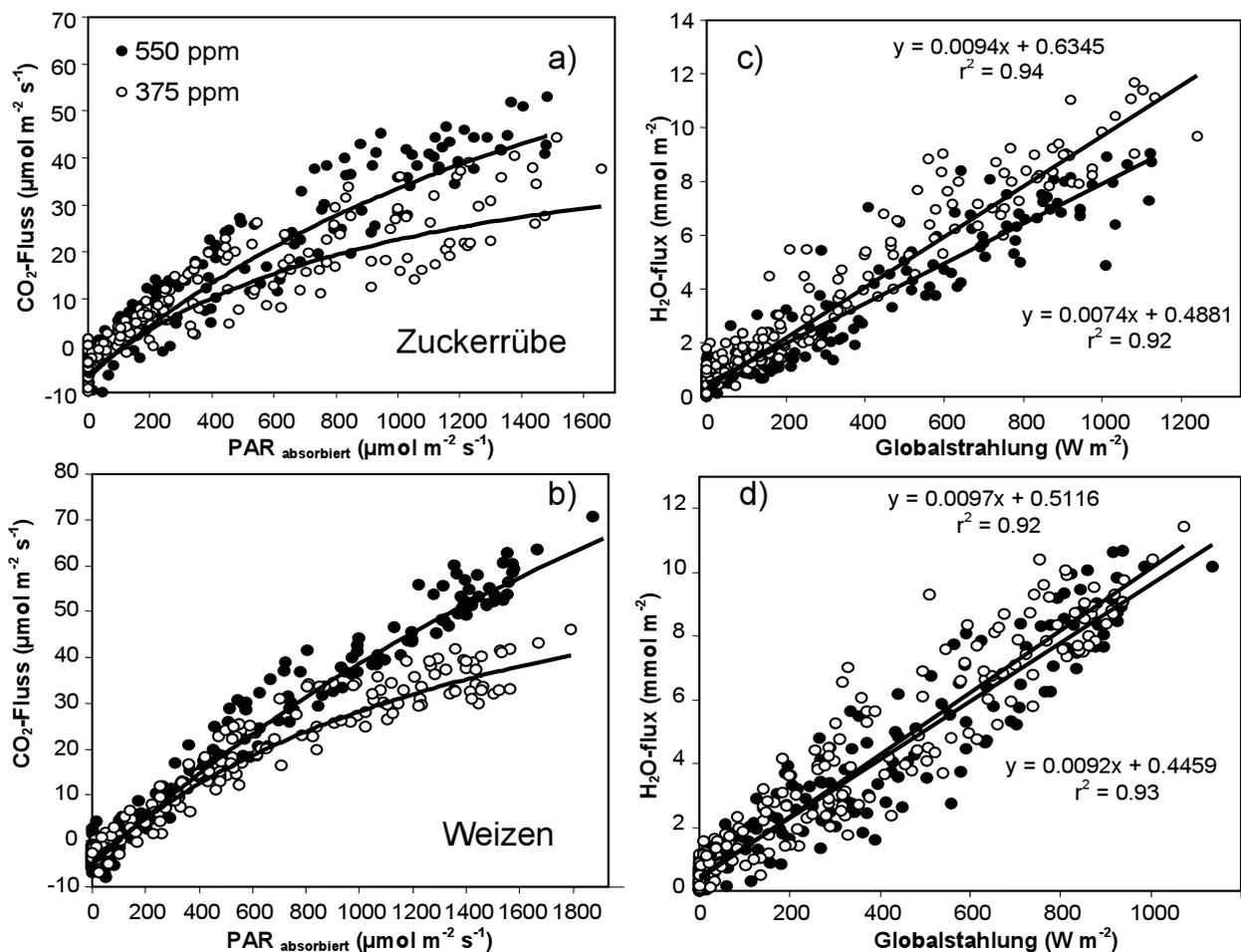


Abb.5: Bestandesphotosyntheserate (Bestandesnetto-CO₂-Fluss; a, b) und Bestandes-H₂O-Fluss (Evapotranspiration; c, d) als Funktion der Strahlungsintensität ermittelt in einem Zuckerrüben- und Weizenbestand mit CO₂/H₂O-Gaswechselkammern bei 375 ppm und 550 ppm CO₂ in FACE-Ringen. Gezeigt sind 10 min Mittelwerte, die im Laufe einer Woche im August (Zuckerrübe) bzw. Mai (Weizen) gemessen wurden.

4.1 Bestandesphotosynthese (CO_2 -Flüsse)

Messungen von CO_2 -Flüssen auf der Bestandesebene sind für die Bewertung der Folgen von Klimaänderungen für die Produktivität und Ökosystemfunktion relevanter als entsprechende Einzelblattuntersuchungen. Derartige Flussmessungen liefern erste Informationen über Veränderungen der CO_2 -Aufnahme in das System Pflanze-Boden. CO_2 -Bestandesflussmessungen im Feld unter CO_2 -Anreicherungszenarien der Atmosphäre liegen für Agrarökosysteme bisher kaum vor (Brooks et al. 2001).

Es wurden die Bestandes- CO_2 -Nettoflüsse während der Tageslichtstunden gemessen und als Bestandesphotosyntheseraten (BPR) interpretiert (Burkart et al. 2000). Abb. 5a, b zeigt am Beispiel von Zuckerrübe und Winterweizen die Auswirkung der erhöhten CO_2 -Konzentration auf die BPR. Es wird deutlich, dass insbesondere zu Zeiten hoher Strahlungsintensitäten bei CO_2 -Anreicherung der Atmosphäre erheblich mehr CO_2 durch den Bestand fixiert wird. Gemittelt über mehrere Messkampagnen pro Vegetationsperiode (Blattflächenindex > 2; nur Stufe N-100) ergab sich, dass die CO_2 -Anreicherung die Bestandesphotosynthese der Fruchtfolgeglieder Gerste, Zuckerrübe und Weizen um ca. 18 %, 45 % bzw. 37 % gegenüber der Umgebungsluft stimulierte (Daten nicht gezeigt). Damit wird deutlich, dass das zusätzlich angebotene CO_2 assimiliert wurde bzw. dass erheblich mehr C in die Bestände eingebaut wurde.

4.2 Evapotranspiration (H_2O -Flüsse) und Bodenfeuchte

Bisherige Messungen der Bestandeswasserabgabe (Evapotranspiration EP) unter CO_2 -Anreicherung in verschiedenen Ökosystemen mit unterschiedlichen Methoden ergaben kein einheitliches Bild. Es wurden sowohl verminderte, unveränderte als auch - in Einzelfällen - erhöhte EP-Raten ermittelt. Abb. 5 c, d zeigt als Beispiel einer Messperiode die mit der gleichen Versuchstechnik wie die CO_2 -Flüsse gemessene EP in Abhängigkeit von der Einstrahlung. Eine verminderte EP unter CO_2 -Anreicherung ist insbesondere bei der Zuckerrübe erkennbar. Die mittlere tägliche EP unter CO_2 -Anreicherung lag im Vergleich zur Kontrolle generell niedriger, die Höhe des Effektes variierte jedoch zwischen Gerste (-7,5 %), Zuckerrübe (-19,8 %) und Weizen (-2,6 %) (Daten nicht gezeigt). Vergleichbare Ergebnisse für Gerste und Zuckerrüben liegen in der Literatur bisher nicht vor. In einem FACE-Experiment mit Weizen in Maricopa/Arizona/USA wurde eine Minderung der EP durch erhöhte CO_2 -Konzentrationen (550 ppm) von ca. - 4,5 % bis - 11,5 %, d.h. in einer ähnlichen Größenordnung wie im vorliegenden Fall, ermittelt (Kimball et al. 1995). Offensichtlich ist aus den Ergebnissen des Braunschweiger FACE-Versuches, dass die Bestände in den unterschiedlichen Versuchsjahren weniger Wasser an die Atmosphäre abgegeben haben.

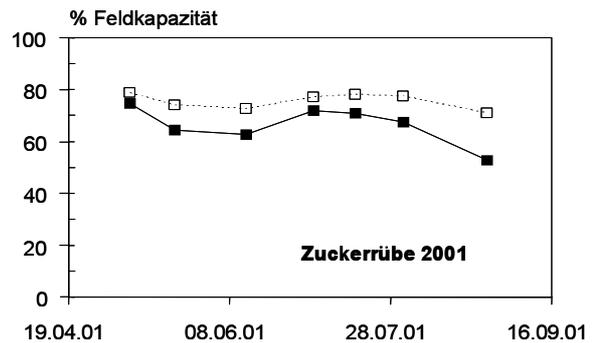


Abb. 6: Verlauf der nutzbaren Feldkapazität (%) in 0-30 cm Bodentiefe unter Zuckerrüben ermittelt in Fruchtfolgeversuchen unter Freiland- CO_2 -Anreicherung (offene Symbole = 550 ppm CO_2 ; gefüllte Symbole = 375 ppm CO_2). Die Feldkapazität wurde gravimetrisch ermittelt (nach Löpmeier, DWD)

Die über die Wirkung der erhöhten CO_2 -Konzentration verminderten Wasserflüsse in die Atmosphäre resultierten in einer gegenüber der Kontrollbehandlung erhöhten Bodenfeuchte. Abb. 6 zeigt diesen Effekt am Beispiel der Zuckerrübe. Dieser über die physiologische Wirkung auf die Stomata der Blätter vermittelte Effekt entwickelte sich im Laufe der Bestandesentwicklung mit zunehmendem Blattflächenindex. Vergleichbare Resultate wurden sowohl über gravimetrische Messungen als auch durch den Einsatz von TDR-Sonden zur Messung der Bodenfeuchte erzielt. Für Zuckerrüben und Weizen lag die unter erhöhter CO_2 -Atmosphäre gemessene nutzbare Feldkapazität im Vegetationsdurchschnitt der Jahre 2001 und 2002 um ca. 11 % bzw. 8 % höher als in den Kontrollen (Daten nicht gezeigt). Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass unter erhöhten atmosphärischen CO_2 -Konzentrationen mehr Bodenwasser zur Verfügung stehen könnte.

4.3 Oberirdisches Wachstum und Qualität der Biomasse

Bei allen untersuchten Fruchtfolgegliedern konnte am Ende der Vegetationsperiode eine signifikante Stimulation des oberirdischen Biomassewachstums nachgewiesen werden (Tabelle 2). Diese Reaktion integriert die durch die erhöhte CO_2 -Konzentration beobachteten Effekte auf die Bestandesphotosyntheserate und die Bodenfeuchte.

Die Wachstumsstimulation betrug zwischen ca. 6 % für die Zuckerrübe und ca. 14 % für Weizen. Während bei Wintergerste die relative Wachstumsstimulation unter limitierter N-Versorgung größer war als bei ortsüblicher N-Düngung, war dies bei den anderen beiden Fruchtfolgegliedern umgekehrt. Gegenwärtig muss noch offen bleiben, ob die Unterschiede in der Reaktion der einzelnen Fruchtarten auf Unterschieden zwischen den Arten selbst oder auf den unterschiedlichen Klimabedingungen der einzelnen Versuchsjahre basieren. In den wenigen bisher mit Ackerkulturen (Reis, Weizen, Futtergras) durchgeführten FACE-Versuchen wurde im Durchschnitt über alle

Tabelle 2:

Oberirdische Gesamtbiomasseproduktion (g m^{-2}) der Fruchtfolgeglieder im Rahmen des Braunschweiger FACE-Projektes. Die Bestände wurden während der gesamten Vegetationszeit der erhöhten CO_2 -Konzentration ausgesetzt. Gezeigt sind die Daten der Endernten (Behandlungsmittelwerte \pm Standardabweichung). N50/N100 = reduzierte/ ortsübliche Stickstoff-Düngung (vgl. Tabelle 1); * Signifikanz: $P < 0.05$

N	CO_2	Fruchtart			
		Wintergerste	Weidelgras	Zuckerrübe	Winterweizen
		g m^{-2}			
N50	375 ppm	1360 \pm 44	484 \pm 19	1919 \pm 44	1163 \pm 33
N50	550 ppm	1546 \pm 26	531 \pm 24	2036 \pm 29	1292 \pm 37
Relativer CO_2 -Effekt (%)		+13.7 *	+ 9.6	+ 6.1	+ 11.1 *
N100	375 ppm	1679 \pm 19	484 \pm 16	2295 \pm 42	1272 \pm 27
N100	550 ppm	1815 \pm 3	543 \pm 27	2481 \pm 23	1456 \pm 43
Relativer CO_2 -Effekt (%)		+ 8.1 *	+ 12.1	+ 8.1 *	+ 14.4 *

Versuche und unter optimaler Ressourcenverfügbarkeit eine Wachstumsförderung von ca. 11 % ermittelt (Kimball et al. 2002). Dies entspricht etwa der im vorliegenden Fall ermittelten Größenordnung, wenn die Ergebnisse über alle Fruchtarten gemittelt werden. Es wird damit deutlich, dass unter dem veränderten CO_2 -Szenario mehr Phytomasse gebildet wurde, wobei die Größenordnung des „ CO_2 -Düngeeffektes“ deutlich geringer war, als dies aus der Stimulation der Bestandesphotosynthese vermutet wurde.

In den meisten bisherigen CO_2 -Anreicherungsversuchen ist beobachtet worden, dass die chemische Zusammensetzung der untersuchten vegetativen und generativen Pflanzenteile sich verändert (Idso und Idso 2001). Ein besonders deutliches Beispiel dafür ist die Abnahme der Stickstoffkonzentration in Blättern, Nadeln und Samen bzw. Früchten (Cotrufo et al. 1998; Weigel und Manderscheid 2005). Wie Tabelle 3 am Beispiel der Gerste zeigt, wurde dies auch im Braunschweiger FACE-Versuch beobachtet. Die N-Konzentration des Gerstenstrohs nahm unter erhöhten CO_2 -Konzentrationen bei

Tabelle 3:

Stickstoff(N)Gehalt und N-Ertrag von Wintergerstenstroh im Rahmen des Braunschweiger FACE-Versuches. Gezeigt sind die Daten der Endernte (Behandlungsmittelwerte \pm Standardabweichung). N50/N100 = reduzierte/ortsübliche N-Düngung (vgl. Tabelle 1); * Signifikanz: $P < 0.05$; n.s. nicht signifikant

N-Düngungsstufe	N-50			N-100			
	CO_2 -Behandlung	375 ppm	550 ppm	Relativer CO_2 -Effekt %	375 ppm	550 ppm	Relativer CO_2 -Effekt %
Stroh-N (%)		0.45 \pm 0.021	0.43 \pm 0.007	- 3.8 (n.s.)	0.68 \pm 0.057	0.55 \pm 0.024	- 19.3 (p = 0.08)
Stroh-N (g m^{-2})		2.43 \pm 0.12	2.65 \pm 0.05	+ 9.1 (n.s.)	4.69 \pm 0.46	4.10 \pm 0.22	- 12.6 (n.s.)

ortsüblicher N-Düngung um ca. 19 % und unter reduzierter N-Düngung um ca. 4 % ab. Ähnliche Wirkungen der CO_2 -Anreicherung wurden auch bei den anderen Fruchtarten gefunden (Daten nicht gezeigt). Das Beispiel demonstriert, dass Pflanzenreste mit einem möglicherweise größeren C-/N-Verhältnis in den Boden gelangten. Die im vorliegenden FACE-Versuch ermittelte Veränderung der N-Konzentration liegt in der gleichen Größenordnung, die auch in anderen FACE-Versuchen mit Gräsern des C_3 -Typs bei ausreichender N-Versorgung ermittelt wurde (Kimball et al. 2002).

4.4 Wurzelwachstum

Im Vergleich zu der Zahl der Ergebnisse über mögliche Effekte erhöhter atmosphärischer CO_2 -Konzentrationen auf die oberirdische Biomassebildung liegen sehr viel weniger Befunde zu den möglichen Reaktionen des Wurzelwachstums von Pflanzen unter diesen Bedingungen vor (Rogers et al. 1997). Die meisten dieser Untersuchungen

Tabelle 4:

Feinwurzelbiomasse (g m^{-2}) in 0-30 cm Bodentiefe von Wintergerste, Zuckerrübe und Winterweizen ermittelt im Rahmen des Braunschweiger FACE-Versuches in Fruchtfolgen (FACE = 550 ppm CO_2 , Kon = 375 ppm CO_2) zu Beginn und Ende der jeweiligen Vegetationsperiode. Gezeigt sind Mittelwerte ($n = 4 \pm$ Standardabweichung); N50/N100 = reduzierte/ortsübliche N-Düngung (vgl. Tabelle 1); unterschiedliche Buchstaben = signifikant verschieden, n.s. = nicht signifikant

Fruchtart	Datum	N- bzw. CO_2 -Behandlung			
		550 ppm / N100	375 ppm / N100	550 ppm / N50	375 ppm / N50
Gerste	20.3.2000	52,3 \pm 4,07 ^b	39,2 \pm 3,69 ^c	67,1 \pm 3,59 ^a	43,6 \pm 2,21 ^{bc}
	22.6.2000	43,1 \pm 2,60 ^c	46,0 \pm 2,91 ^{bc}	51,4 \pm 2,19 ^{ab}	56,8 \pm 1,86 ^a
Rübe	28.6.2001	38,9 \pm 6,49 ^{ns}	28,4 \pm 1,65 ^{ns}	53,4 \pm 12,44 ^{ns}	38,8 \pm 3,61 ^{ns}
	29.9.2001	84,9 \pm 5,31 ^b	58,3 \pm 4,03 ^c	109,3 \pm 5,36 ^a	57,7 \pm 8,09 ^c
Weizen	10.4.2002	55,5 \pm 1,47 ^e	51,0 \pm 8,64 ^e	71,1 \pm 3,66 ^{de}	56,0 \pm 6,28 ^e
	19.6.2002	166,3 \pm 8,40 ^a	106,1 \pm 12,11 ^c	161,4 \pm 10,87 ^{ab}	137,4 \pm 21,66 ^b

wurden zudem unter vergleichsweise naturfernen Bedingungen (Topfversuche in Klimakammern etc.) durchgeführt. FACE-Experimente mit Sommerweizen und Baumwolle in den USA zeigten jedoch, dass die Feinwurzelbiomassebildung als Reaktion auf die CO_2 -Anreicherung im Feld zunahm (Wechsung et al. 1999; Prior et al. 1994).

Im Braunschweiger FACE-Experiment wurden die Feinwurzel-Biomassen der unterschiedlichen Fruchtfolgeglieder jeweils in einem frühen und späten Entwicklungsstadium der Pflanzen untersucht (Tabelle 4). Die Erhöhung der CO_2 -Konzentration beeinflusste das Feinwurzelwachstum der verschiedenen Fruchtfolgeglieder in nicht konsistenter Weise. Generell konnte zwar eine Tendenz zu mehr Feinwurzelwachstum unter der CO_2 -Anreicherung festgestellt werden, die Ergebnisse waren jedoch meist nicht signifikant. Das Wurzelwachstum der Wintergerste wurde z.B. bei beiden N-Düngungsstufen in der frühen Pflanzenwachstumsphase positiv beeinflusst (ca. 30 % - 50 % Stimulation), wobei der Effekt unter reduzierter N-Versorgung höher war (+ 50 %) als unter ortsüblicher N-Düngung (+ 30 %). Dagegen war das Feinwurzelwachstum der Zuckerrübe unter erhöhter CO_2 -Konzentration nur gegen Ende der Vegetationsperiode erhöht. Winterweizen reagierte dagegen unter ortsüblicher N-Düngung am stärksten auf die CO_2 -Anreicherung, da hier das Wurzelwachstum signifikant gefördert war. Es bleibt abzuwarten, ob und inwieweit sich diese Ergebnisse im zweiten Fruchtfolgedurchgang des FACE-Versuches bestätigen lassen. Die Reaktion des Wurzelwachstums deutet aber darauf hin, dass mehr C aus der Atmosphäre über diesen Weg in den Boden gelangen kann.

4.5 Bodenorganismen: Mikrobielle Biomasse und Pilz-/Bakterienverhältnis

Bodenmikroorganismen (Bakterien, Pilze, Actinomyceten) machen zwar nur einen sehr geringen Teil der Gesamtbioasse eines Ökosystems aus, die mikrobielle

Biomasse spielt jedoch eine Schlüsselrolle beim C- und N-Umsatz im Boden. Veränderungen der mikrobiellen Biomasse sind daher u.a. ein „früher“ Indikator für Veränderungen im organischen C-Gehalt (C_{org}) des Bodens. Rückschlüsse auf die Umsatzleistungen der beteiligten Mikroorganismen selbst lassen sich daraus jedoch nur eingeschränkt ziehen. Ausgehend von einem unter erhöhter CO_2 -Konzentration beobachteten veränderten Wurzelwachstum und veränderten Bodenfeuchten (s.o.) haben sich eine Reihe von Untersuchungen in unterschiedlichen Ökosystemtypen bzw. mit unterschiedlichen Modellökosystemen mit den Auswirkungen auf die mikrobielle Biomasse befasst (Zak et al. 2000). Zwar überwiegen dabei die Befunde, die eine Zunahme der mikrobiellen Biomasse unter CO_2 -Anreicherung beobachteten (ca. 65 % der vorliegenden Studien), es wurden jedoch auch häufig keine Reaktionen bzw. Abnahmen festgestellt.

Im Braunschweiger FACE-Experiment wurde die mikrobielle Biomasse der verschiedenen Versuchsvarianten zunächst 14-tägig, später monatlich über den Versuchszeitraum beprobt. Bedingt u.a. durch die auftretende Variabilität der Bodenproben konnten bisher keine signifikanten Effekte der CO_2 -Anreicherung (und der N-Düngung) beobachtet werden (Daten nicht gezeigt). Es muss offen bleiben bis zum Abschluss der Auswertungen des FACE-Versuches in Braunschweig, ob und inwieweit sich die Reaktion der mikrobiellen Biomasse für die Bewertung von Langzeiteffekten veränderter CO_2 -Konzentrationen in der Atmosphäre auf Böden eignet.

Dagegen konnten im Verlauf der ersten Fruchtfolge Hinweise darauf gefunden werden, dass sich das Verhältnis der respiratorischen Leistung innerhalb der mikrobiellen Biomasse im Boden ändert. Pilze und Bakterien in der mikrobiellen Biomasse eines Bodens stehen in einem ganz bestimmten Verhältnis zueinander. Mit Hilfe der Methode der *Selektiven Hemmung* (Anderson and Domsch 1978) kann das respiratorische Pilz/Bakterien-Verhältnis bestimmt werden. So liegt das durchschnittli-

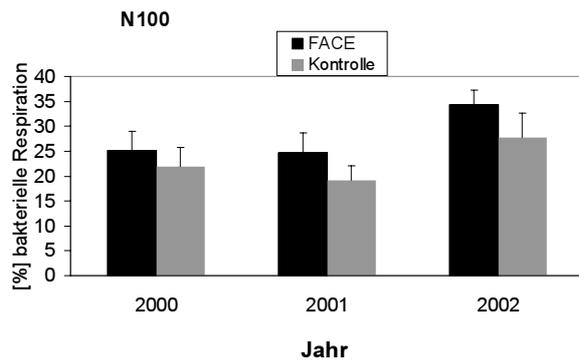


Abb. 7: Pilz-/Bakterien-Verhältnis der mikrobiellen Biomasse (dargestellt als Prozentanteil bakterieller Respiration an der Gesamtrespiration von Bodenproben) im Boden einer Fruchtfolge (2000: Wintergerste; 2001: Zuckerrübe; 2002: Winterweizen) unter Freiland-CO₂-Anreicherung (FACE = 550 ppm CO₂; Kontrolle = 375 ppm CO₂). Dargestellt sind Jahresmittelwerte (± Standardabweichung) für die einzelnen Fruchtarten und Behandlungen (nur ortsübliche Düngungsvariante N100) ermittelt aus monatlicher Beprobung der Böden.

che Pilz/Bakterien-Verhältnis bei einem Boden-pH um ~ > 6.0 bei 80/20 % (Ackerböden) oder 70/30 % (Waldböden) (Anderson und Kreitz 1998; Blagodatskaya and Anderson 1998). Dies bedeutet, dass z.B. 80 % der Gesamtrespiration der Mikroflora eines Ackerbodens auf pilzliche Atmungsaktivität zurückzuführen ist und 20 % auf bakterielle.

Die im Braunschweiger FACE-Versuch beobachteten Veränderungen des Pilz/Bakterien-Verhältnisses zugunsten erhöhter bakterieller Respiration unter erhöhter CO₂-Konzentration (Abb. 7) lassen die Vermutung zu, dass unter diesen Bedingungen von den Pflanzen leicht verfügbare C-Quellen in den Boden abgegeben werden (erhöhter Exsudatfluss), von denen am schnellsten Bakterien profitieren. Die beobachtete Erhöhung der Feinwurzelproduktion (s.o.) unter FACE als zusätzliche Quelle leicht abbaubarer organischer Substanz könnte ebenfalls eine Ursache des sich verändernden Pilz/Bakterien-Verhältnisses sein. Während im Jahr 2000 von der Gesamtrespiration in den

Kontrollen 22 % und unter FACE 25 % der Atmung bakterieller Herkunft war, stieg die bakterielle Atmung auf 34 % unter FACE im Jahr 2002 an (Abb. 7). Die Unterschiede zu den nicht begasten Flächen ließen sich ab dem 2. Versuchsjahr statistisch sichern ($p < 0.001$). Eine Zunahme von Bakterien unter erhöhter CO₂ Konzentration wird z.B. von Sonnemann and Wolters (2005) für Grünland berichtet.

4.6 Bodenorganismen: Collembolen

Bodentiere sind in ihrer funktionellen Bedeutung als Destruenten maßgeblich an Dekompositionsprozessen und damit am C-Umsatz und der Nährstofffreisetzung in Böden beteiligt. Nach wie vor ist nicht geklärt, ob und in welchem Maße sich Abundanzen und Biodiversität sowie funktionelle Leistungen der Bodentiere in Agrarökosystemen als Folge einer erhöhten atmosphärischen CO₂-Konzentration und eines damit verbundenen erhöhten C-Eintrages in den Boden verändern. Bisherige Arbeiten beziehen sich primär auf Grünlandstandorte und liefern keine eindeutigen Ergebnisse (Niklaus et al. 2003; Sonnemann and Wolters 2005; Yeates et al. 1997). Das im Braunschweiger FACE-Projekt beobachtete erhöhte Feinwurzelwachstum und der damit verstärkte C-Eintrag in den Boden sowie die erhöhte Bodenfeuchte unter erhöhter atmosphärischer CO₂-Konzentration verbessern die Randbedingungen für Bodenorganismen, so dass eine indirekte Wirkung erhöhter atmosphärischer CO₂-Konzentration auf Bodentiere zu erwarten ist (Wardle et al. 1998). Unter den Bodentieren stellen Collembolen (Springschwänze) wichtige Bindeglieder im Nahrungsnetz des Bodens dar. Ein Beispiel für deren Reaktion auf die CO₂-Erhöhung wird hier vorgestellt.

Die Abundanz der Collembolen stieg unter Winterweizen bei erhöhter CO₂-Konzentration in der Atmosphäre um ca. 50 %, wie Tabelle 5 zeigt. Insgesamt wurden 35 verschiedene Collembolen-Arten aus 5 Familien gefunden. Die Diversität war größer unter erhöhtem CO₂ (28

Tabelle 5: Artenzahlen und Individuen-Dichten (Ind. m⁻²) verschiedener Familien von Collembolen im Boden eines Winterweizenbestandes während des Braunschweiger FACE-Versuches.

Familie	550 ppm CO ₂		375 ppm	
	Art	[Ind. m ⁻²]	Art	[Ind. m ⁻²]
Entomohyridae	4	199	2	40
Isotomidae	10	5968	11	3839
Onychiuridae	3	4576	2	1949
Poduridae	5	875	4	617
Sminthuridae	6	1930	4	995
Total	28	10544	23	7440
Juv.; unbest.		696		80
Total		11240 *		7520

Arten) im Vergleich zu Umgebungsluft (23 Arten). Der Effekt der CO₂-Anreicherung unterschied sich zwischen den häufigen Arten: z.B. wurden ca. 75 % der Individuen von *Folsomia inoculata*, die im System vorhanden waren, unter CO₂-Anreicherung gefunden, lediglich 25 % befanden sich in der Kontrolle. Die Ergebnisse für *Folsomia listeri* hingegen waren genau entgegengesetzt. Als Ursachen für diese Verschiebungen in der Verteilung kommen Änderungen hinsichtlich der Nahrungsressourcen, der Konkurrenz, des Feinddruckes etc. in Frage. *Isotomodes productus* ist ein Beispiel für eine Art, die nicht durch CO₂-Anreicherung beeinflusst wurde. Aufgrund solcher artspezifischer Reaktionen müssen bei zukünftigen Untersuchungen Folgen für Abbau- und Mineralisierungsprozesse in Betracht gezogen werden. Diversitätsänderungen dieser Bodentiere könnten zu Verschiebungen der Zersetzungsraten und damit der Nährstofffreisetzung in Böden führen, was besonders in Agrar-ökosystemen Folgen hätte.

4.7 Bodenatmung

Die CO₂-Freisetzung aus Böden (*in-situ* Bodenatmung) repräsentiert die Atmung der Pflanzenwurzeln (autotrophe Atmung) und der Bodenorganismen (heterotrophe Atmung) (vgl. Abb. 4). Sie ist damit ein integrativer Indikator für das Prozessgeschehen des C-Umsatzes in Böden. Zur Untersuchung möglicher Effekte erhöhter atmosphärischer CO₂-Konzentrationen auf die *in-situ* Bodenatmung liegen Untersuchungen an unterschiedlichen Vegetationstypen (Wald, Grasland, Ackerkulturen) vor, die unter unterschiedlichen CO₂-Expositionsbedingungen durchgeführt wurden (Zak et al. 2000). Die dabei erzielten Ergebnisse deuten zwar im Mittel über alle Studien auf eine Stimulation der Bodenatmung unter erhöhten CO₂-Konzentrationen hin, allerdings sind sehr hohe Schwan-

kungsbreiten dieses Mittelwertes zu verzeichnen. Trotz der hohen Variabilität dieser Befunde und der offenen Frage, welche Anteile des CO₂-Flusses aus dem Boden aus der autotrophen bzw. der heterotrophen Bodenatmung stammen, sind diese Ergebnisse dahingehend interpretiert worden, dass der C-Umsatz im Boden als Reaktion auf erhöhte atmosphärische CO₂-Konzentrationen beschleunigt sein könnte (Schlesinger und Richter 2001).

Im Braunschweiger FACE-Versuch kann diese Tendenz bisher nicht durchgehend bestätigt werden. Tabelle 6 zeigt den Effekt der CO₂-Anreicherung auf den saisonalen Verlauf der Bodenatmung am Beispiel der Zuckerrübe und des Weizens. Während für die Zuckerrübe über einen langen Zeitraum im Laufe der Vegetationsperiode eine deutliche Stimulation der Bodenatmung (bis max. ca. 30 %) durch erhöhte CO₂-Konzentrationen nachweisbar war, war dieser Effekt für Weizen nur ansatzweise zu erkennen.

4.8 Bodenkohlenstoff

Ein wichtiger Aspekt bei der Bewertung von Folgen einer CO₂-Anreicherung in der Atmosphäre besteht in der Klärung der Frage, ob und in welchem Umfang sich die stimulierenden Effekte einer erhöhten CO₂-Konzentration auf das Wachstum durch den gesteigerten Eintrag von Wurzeln und Ernteresiduen in einer Erhöhung des Bodenc-C-Gehaltes niederschlagen. Dadurch würde ein Teil des anthropogen emittierten CO₂ wieder in die Böden zurückgebunden werden. Bei der Untersuchung dieser Fragestellung tritt das grundlegende methodische Problem auf, dass aufgrund der geringen jährlichen Eintragsraten von „neuem“ C im Vergleich zu den in Böden vorhandenen C-Mengen eine mögliche Zunahme des C-Gehaltes bei den kurzen Laufzeiten von FACE-Experimenten statistisch nur schwer zu sichern ist. Häufig wird daher die Methode der stabilen C-Isotopenmarkierung eingesetzt, mit deren

Tabelle 6:

Saisonaler Verlauf der *in-situ* Bodenatmung unter Zuckerrübe (2001) und Winterweizen (2002) ermittelt im Rahmen des Braunschweiger FACE-Versuches. Dargestellt sind mittlere Tageswerte der Bodenatmung ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) für die unterschiedlichen CO₂-Konzentrationen der ortsüblichen N-Düngungsstufe (N100). Die Tagesmittelwerte wurden aus Messungen an unterschiedlichen Stellen innerhalb der FACE-Ringe zu unterschiedlichen Zeiten im Laufe eines Tages errechnet.

Fruchtart	Datum	550 ppm	375 ppm	Signifikanz
Zuckerrübe	15.5.2001	2,96	2,75	n.s.
	5.7.2001	5,89	4,17	P<0.05
	31.7.2001	5,03	4,10	P<0.05
	20.8.2001	3,96	2,79	P<0.05
	10.9.2001	1,18	0,67	n.s.
Winterweizen	20.3.2002	0,95	0,92	n.s.
	9.4.2002	1,58	2,22	n.s.
	23.4.2002	3,24	3,53	n.s.
	22.5.2002	5,15	4,51	P<0.05
	14.6.2002	4,28	4,12	n.s.
	8.7.2002	3,82	3,36	P<0.05
	30.7.2002	4,21	4,56	n.s.

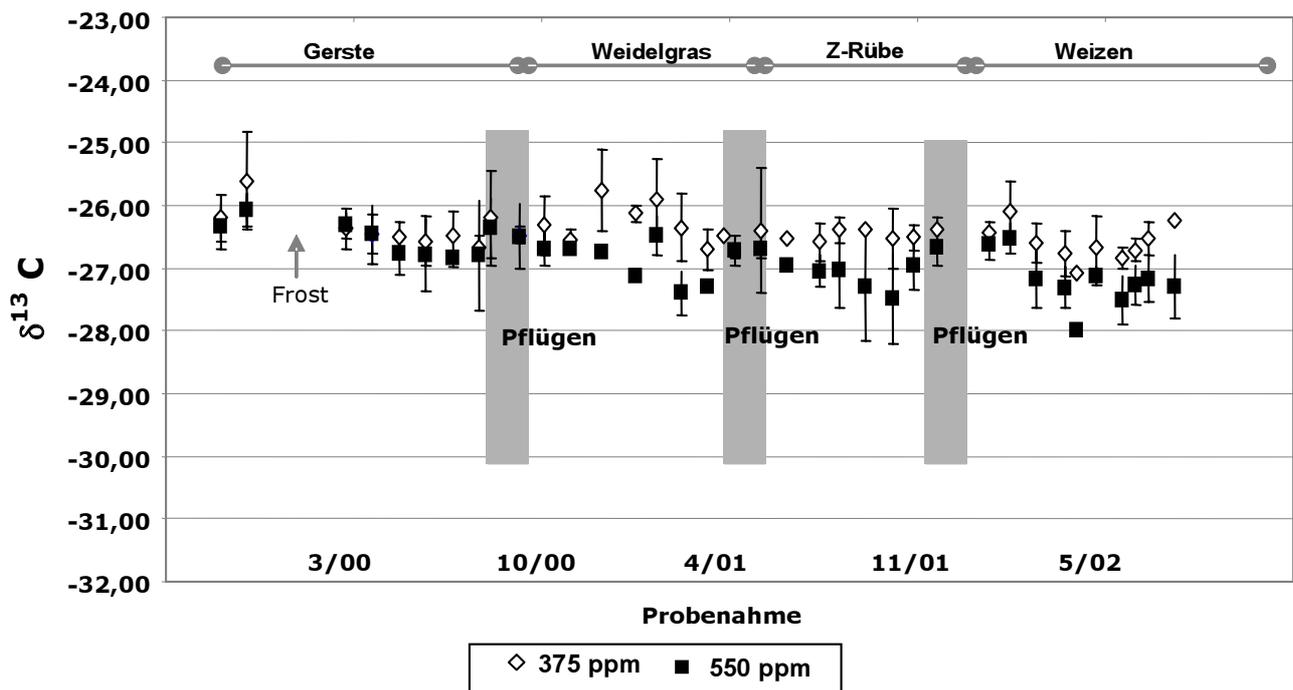


Abb. 8: Zeitlicher Verlauf des $\delta^{13}\text{C}$ -Wertes des Bodenkohlenstoffes im Braunschweiger FACE-Experiment im Zeitraum der ersten Fruchtfolge (Bodentiefe 0-10 cm).

Hilfen sich auch relativ kleine Änderungen im Boden-C nachweisen lassen, sofern sich das C-Isotopenverhältnis des neu zugeführten von dem des vorhandenen C unterscheidet. In einem Vergleich bisheriger FACE-Experimente, die mit landwirtschaftlichen Kulturpflanzen unter Einsatz der stabilen C-Isotopentechnik durchgeführt wurden, ließ sich zwar ein Trend zu höheren Boden-C-Gehalten unter CO_2 -Anreicherung feststellen, die Ergebnisse waren aber in keinem der Fälle statistisch signifikant (Kimball et al. 2002).

Auch im Braunschweiger FACE-Experiment wurde nach Durchlaufen der ersten Fruchtfolge ein nicht signifikanter Trend zu höheren C-Gehalten ermittelt (Daten nicht gezeigt). Abb. 8 zeigt, dass sich die C-Isotopensignatur ($\delta^{13}\text{C}$ -Wert) des Boden-C im Verlauf der jeweiligen Vegetationsperioden unter erhöhten CO_2 -Konzentrationen deutlich zu negativeren Werten verschiebt, d.h. sich auf den Wert des zusätzlich angebotenen C aus der CO_2 -Anreicherung hinbewegt. Dies ist ein Hinweis darauf, dass „neues“ Pflanzenmaterial in den C-Speicher des Bodens eingebracht wird. Diese Veränderung der C-Isotopensignatur wurde jedoch durch die jeweilige Pflugbearbeitung am Ende der Vegetationsperiode teilweise wieder nivelliert. Zu beachten ist in diesem Zusammenhang, dass die gezeigte Stimulation der Bodenatmung durch die CO_2 -Erhöhung einerseits und der im gleichen Zeitraum aus älterem C-Material durch Mineralisierung freigesetzte C eventuell nur geringe Effekte erwarten lassen.

5 Fazit

Der Braunschweiger FACE-Versuch erzeugt für deutsche Anbauverhältnisse erstmals relevante Felddaten zur möglichen Reaktion von Kulturpflanzen und Agrarökosystemen auf die zukünftige atmosphärische CO_2 -Konzentration. Die hier vorgestellten Beispiel-Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Produktivität, der Wasser- und Stoffhaushalt sowie die Biozönosen des Bodens durch diese Veränderung der Atmosphärenchemie beeinflusst werden könnten. Bisher wurden folgende Effekte beobachtet:

- eine deutliche Stimulation der Bestandes-Photosynthese,
- eine Reduktion der Bestandeswasserabgabe und eine Erhöhung der Bodenfeuchte,
- eine im Vergleich zu vielen Kammerversuchen relativ niedrige Wachstumsstimulation der Feldfrüchte,
- eine Veränderung der Gewebe-/Produktqualität im Hinblick auf die Stickstoffgehalte,
- eine Beeinflussung von Leistungen und Vielfaltsmerkmalen von Bodenorganismen,
- (noch) keine konsistenten Effekte auf den Boden-C-Umsatz insgesamt.

Es bleibt abzuwarten, inwieweit sich diese Effekte bei längerer Versuchsdauer bestätigen. Darüber hinaus sind noch zahlreiche weitere Informationen z.B. zum Nährstoffhaushalt der Flächen und zu den Klimabedingungen der einzelnen Jahre zu erheben bzw. auszuwerten, die für

eine Interpretation der Ergebnisse bzw. eine Gesamtbewertung benötigt werden.

Die gezeigten Effekte deuten darauf hin, dass für die Abschätzung der möglichen Folgen von Klimaänderungen für landwirtschaftlich genutzte Böden nicht nur Aspekte sich ändernder Temperatur- und Niederschlagsverhältnisse relevant sind, sondern dass auch aus den direkten Effekten einer sich ändernden Atmosphärenchemie auf die Vegetation Rückkoppelungsphänomene zu erwarten sind, die den Boden in seiner Produktions-, Regelungs- und Lebensraumfunktion betreffen und damit in eine Bewertung der Folgen des Klimawandels mit eingeschlossen werden müssen.

Danksagung

Das FACE-Expositionssystem des Instituts für Agrarökologie ist vom Brookhaven National Laboratory (BNL), Upton/New York/USA, entwickelt worden. Wir danken den Kollegen George Hendrey, Keith Lewin und John Nagy für die entscheidende Mitarbeit beim Aufbau des FACE-Systems sowie für die kontinuierliche Mitbetreuung und Ansprechbarkeit während des FACE-Betriebes. Allen am FACE-Experiment beteiligten technischen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts für Agrarökologie sei für die engagierte Mitarbeit gedankt. Dem BMELV danken wir für die finanzielle Unterstützung des Experimentes.

Literatur

- Amthor JS (2001) Effects of atmospheric CO₂ concentration on wheat yield : review of results from experiments using various approaches to control CO₂ concentration. *Field Crops Res* 73:1-34
- Anderson JPE, Domsch KH (1978) Measurement of bacterial and fungal contributions to respiration of selected agricultural and forest soils. *Can J Microbiol* 21:315-322
- Anderson T-H, Kreitz S (1997) Verschiebung des Pilz/Bakterien-Verhältnisses und der Substratnutzung von Mikroorganismen-Gesellschaften in Abhängigkeit vom Boden-pH. *SchrR Bundesminist Ernähr Landwirtsch Forsten. R A Angew Wiss* 465:408-410
- Bender J, Hertstein U, Black CR (1999) Growth and yield responses of spring wheat to increasing carbon dioxide, ozone and physiological stresses : a statistical analysis of ESPACE wheat results. *Eur J Agron* 10:185-195
- Blagodatskaya E, Anderson T-H (1998) Interactive effects of pH and substrate quality on the fungal-to-bacterial ration and QCO₂ of microbial communities in forest soils. *Soil Biol Biochem* 30(10/11):1269-1274
- Brooks TJ, Wall GW, Pinter PJ, Kimball BA, La Morte RL, Leavitt S, Matthias AD, Adamsen FJ, Hunsacker DJ, Webber AN (2001) Acclimation response of spring wheat in a free air CO₂ enrichment (FACE) atmosphere with variable soil nitrogen regimes. 3. Canopy architecture and gas exchange. *Photosynthesis Res* 66:97-108
- Burkart S, Manderscheid R, Weigel H-J (2000) Interacting effects of photosynthetic photon flux density and temperature on canopy CO₂ exchange rate of spring wheat under different CO₂ concentrations. *J Plant Physiol* 157:31-39
- Buyanowski GA, Wagner GH (1998) Carbon cycling in cultivated land and its global significance. *Global Change Biol* 4:131-141
- Cotrufo MF, Ineson P, Scott A (1998) Elevated CO₂ reduces the nitrogen concentration of plant tissue. *Global Change Biol* 4:43-54
- Dämmgen U, Weigel H-J (1998) Trends in atmospheric composition (nutrients and pollutants) and their interaction with agroecosystems. In: El Bassam N, Behl RK, Prochnow B (eds) *Sustainable agriculture for food, energy and industry : strategies towards achievement*. London : James & James, pp 85-93
- Fuhrer J (2003) Agroecosystem responses to combinations of elevated CO₂, ozone, and global climate change. *Agric Ecosyst Environ* 97:1-20
- Giesemann A (2005) Changes in soil C-isotopic composition in an agroecosystem under Free Air Carbon Dioxide Enrichment (FACE) treatment during a crop rotation period. *Rapid Comm Mass Spectrom* 19:1373-1380
- Graefe U (1984) Eine einfache Methode zur Extraktion von Enchytraeiden aus Bodenproben. Protokoll des Workshops zu Methoden der Mesofaunaerfassung und zur PCB-Wirkung auf Collembolen und andere Mesofauna-Gruppen, Bremen 1984, p 17
- Heinemeyer O, Insam H, Kaiser E-A, Walenzik G (1989) Soil microbial biomass and respiration measurements: an automated technique based on infra-red gas analysis. *Plant Soil* 115(1):191-195
- Hendrey G (1992) Global greenhouse studies : need for a new approach to ecosystem manipulation. *Crit Rev Plant Sci* 11(2-3):61-74
- Hodge A, Paterson E, Grayston SJ, Campbell CD, Ord BG, Killham K (1998) Characterisation and microbial utilisation of exudate material from the rhizosphere of *Lolium perenne* grown under CO₂ enrichment. *Soil Biol Biochem* 30:1033-1043
- Idso SB, Idso KE (2001) Effects of atmospheric CO₂ enrichment on plant constituents related to animal and human health. *Environ Exp Bot* 45:179-199
- IPCC (2001) In: Houghton JT, Ding Y, Griggs DJ, Noguer M, van der Linden PJ, Xiaosu D (eds) *Climate change 2001 : the scientific basis*. Cambridge : Cambridge Univ Press, UK
- Kimball B, Pinter P, Garcia R, Lamorte R, Wall G, Hunsaker D, Wechsung G, Wechsung F, Kartschall T (1995) Productivity and water use of wheat under free-air CO₂ enrichment. *Global Change Biol* 1:429-442
- Kimball BA, Kobayashi K, Bindi M (2002) Responses of agricultural crops to free-air CO₂ enrichment. *Adv Agron* 77:293-368
- Körner CH (2000) Biosphere responses to CO₂ enrichment. *Ecol Appl* 10:1590-1619
- Luo Y, Mooney HA (eds) (1999) *Carbon dioxide and environmental stress*. San Diego [ua] : Academic Press, 418 p
- MacFadyen A (1961) Improved funnel-type extractors for soil arthropods. *J Anim Ecol* 30:171-184
- Morgan JA, Pataki DE, Körner CH, Clark H, Delgrosso SJ, Grünzweig JM (2004) Water relations in grassland and desert ecosystems exposed to elevated atmospheric CO₂. *Oecologia* 140:11-25
- Morison JIL (1998) Stomatal response to increased CO₂ concentration. *J Exp Bot* 49:443-452
- Mosier AR (1998) Soil processes and global change. *Biol Fertil Soils* 27:221-229
- Niklaus PA, Alphei J, Ebersberger D, Kampichler C, Kandeler E, Tscherko D (2003) Six years of in situ CO₂ enrichment evoke changes in soil structure and biota of nutrient-poor grassland. *Global Change Biol* 9:585-600
- Norby RJ, Cotrufo MF, Ineson P, O'Neill EG, Canadell JG (2001) Elevated CO₂, litter chemistry and decomposition : a synthesis. *Oecologia* 127:153-165
- Parry ML, Rosenzweig C, Iglesias A, Livermore M, Fischer G (2004) Effects of climate change on global food production under SRES emissions and socio-economic scenarios. *Global Environ Change A* 14:53-67
- Petit JR, Jouzel J, Raynaud D, Barkov NI, Barnola JM, Basile I (1999) Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature* 399:429-436

- Polley HW (2002) Implications of atmospheric and climatic change for crop yield. *Crop Sci* 42:131-140
- Prior SA, Rogers HH, Runion GB, Hendrey GR (1994) Free-air CO₂ enrichment of cotton : vertical and lateral root distribution patterns. *Plant Soil* 165:33-44
- Reddy KR, Hodges HF (eds) (2000) Climate change and global crop productivity. Wallingford : CABI, 472 p
- Rees RM, Bingham IJ, Baddeley JA, Watson CA (2005) The role of plants and land management in sequestering soil carbon in temperate arable and grassland ecosystems. *Geoderma* 128:130-154
- Rogers HH, Runion GB, Krupa SV, Prior SA (1997) Plant responses to atmospheric CO₂ enrichment : implications in root-soil-microbe interactions. *ASA Spec Publ* 61:1-34
- Rosenzweig C, Hillel D (1998) Climate change and the global harvest : potential impacts of the greenhouse effect on agriculture. New York : Oxford Univ Press, 324 p
- Rouhier H, Billes G, Billes L, Bottner P (1996) Carbon fluxes in the rhizosphere of sweet chestnut seedlings (*Castanea sativa*) grown under two atmospheric CO₂ concentrations : ¹⁴C partitioning after pulse labeling. *Plant Soil* 180:101-111
- Schlesinger WH, Richter J (2001) Limited carbon storage in soil and litter of experimental forest plots under increased atmospheric CO₂. *Nature* 411:466-469
- Soe ARB, Giesemann A, Anderson T-H, Weigel H-J, Buchmann N (2004) Soil respiration under elevated CO₂ and its partitioning into recently assimilated and older carbon sources. *Plant Soil* 262(1-2):85-94
- Sonnemann I, Wolters V (2005) The microfood web of grassland soils responds to a moderate increase in atmospheric CO₂. *Global Change Biol* 11:1148-1155
- Volk M, Niklaus PA, Körner C (2000) Soil moisture effects determine CO₂ responses of grassland species. *Oecologia* 125:380-388
- Wechsung G, Wechsung F, Wall GW, Adamsen F J, Kimball BA, Pinter PJ, Lamorte RL, Garcia RL, Kartschall T (1999) The effects of free-air CO₂ enrichment and soil water availability on spatial and seasonal patterns of wheat root growth. *Global Change Biol* 5:519-529
- Wardle DA, Verhoef HA, Clarholm M (1998) Trophic relationships in the soil microfood-web : predicting the responses to a changing global environment. *Global Change Biol* 4:713-727
- Weigel H-J, Dämmgen U (2000) The Braunschweig Carbon Project : atmospheric flux monitoring and Free Air Carbon Dioxide Enrichment (FACE). *J Appl Bot* 74:55-60
- Weigel H-J (2005) Der CO₂-Anstieg in der Atmosphäre : Folgen für Vegetation und Böden. *Landbauforsch Völkenrode* SH 280:131-144
- Weigel H-J, Manderscheid R (2005) CO₂ enrichment effects on forage and grain nitrogen concentration of pasture and cereal plants. *J Crop Improvement* 1/2:73-89
- Wenkel K-O, Mirschel W (eds) (1995) Agroökosystemmodellierung : Grundlage für die Abschätzung von Auswirkungen möglicher Landnutzungs- und Klimaänderungen, ZALF-Berichte 24
- Yeates GW, Tate KR, Newton PCD (1997) Response of the fauna of a grassland soil to doubling of atmospheric carbon dioxide concentration. *Biol Fertil Soils* 25:307-315
- Zak DR, Pregitzer KS, King JS, Holmes WE (2000) Elevated atmospheric CO₂, fine roots and the response of soil microorganisms: a review and hypothesis. *New Phytol* 147:201-222