

R. MANDERSCHEID, H.-J. WEIGEL

3 Das Braunschweiger FACE-Experiment

The Braunschweig FACE experiment

Zusammenfassung

Bei der Abschätzung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Landwirtschaft spielt der direkte Einfluss steigender atmosphärischer CO₂-Konzentrationen auf den Stoffwechsel der Pflanze eine wesentliche Rolle. Mehr CO₂ verringert die Transpiration und kann die Photosynthese erhöhen. Die Konsequenzen für Wachstum sind jedoch sehr komplex, sodass sie experimentell unter realen Feldbedingungen überprüft werden müssen. Freiland-CO₂-Anreicherungsversuche mit Kulturpflanzen werden erst seit einigen Jahren weltweit betrieben. Anhand der Braunschweiger Feld-CO₂-Anreicherungsversuche werden das CO₂-Begasungssystem und die Effekte auf Ertrag und Wasserhaushalt einiger Kulturpflanzen gezeigt.

Summary

To get a realistic estimate of the effect of climate change on crop production the direct influence of increasing atmospheric CO₂ concentrations on plant metabolism has to be considered. Elevated CO₂ concentrations decrease leaf transpiration and can increase photosynthesis. For an assessment of the implications for crop growth and yield CO₂ enrichment experiments under field conditions are necessary. For some years now such free air CO₂ enrichment (FACE) experiments are practiced globally including at the Braunschweig site in Germany. The FACE-system used in Braunschweig and the CO₂ effects on growth and water relations of the tested crop species are shown.

1 Einführung

Die CO₂-Konzentration der Atmosphäre betrug über mehr als 400 000 Jahre hinweg bis etwa zum Ende des 19. Jahrhunderts etwa 280-290 ppm. Seit Beginn der Industrialisierung ist sie deutlich angestiegen und beträgt gegenwärtig global bereits etwa 390 ppm. Nach den Prognosen des Weltklimarates soll die CO₂-Konzentration in 50 Jahren bereits bei etwa 470 bis 550 ppm liegen, wobei die gegenwärtig beobachteten jährlichen Steigerungsraten (PETERS et al. 2012) einen Anstieg auf mehr als 550 ppm erwarten lassen und damit die pessimistischen Annahmen des Weltklimarates noch übertreffen. CO₂ trägt – neben Wasserdampf – als wichtigstes Treibhausgas nicht nur zum Klimawandel insgesamt bei, sondern ist als Substrat der Photosynthese für alle Pflanzen von fundamentaler Bedeutung und wirkt direkt auf die Primärproduktion, das heißt auf die pflanzliche Biomassebildung ein.

In wissenschaftlichen Untersuchungen und bei der Bewertung der möglichen Folgen des zukünftigen Klimawandels auf die Vegetation insgesamt und auf die landwirtschaftliche Pflanzenproduktion im Besonderen, spielt die Frage nach den möglichen direkten Auswirkungen des raschen Anstieges der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre auf

das Pflanzenwachstum eine entscheidende Rolle. Die Berücksichtigung beziehungsweise Nichtberücksichtigung des so genannten „CO₂-Düngereffektes“ in entsprechenden Klimaimpaktmodellen beeinflusst in starkem Maße Voraussagen möglicher Temperatur- und Niederschlagseffekte für die Landwirtschaft (EASTERLING et al. 2007). In welchem Ausmaß sich der „CO₂-Düngereffekt“ unter Feldbedingungen tatsächlich realisieren und wie er mit anderen Faktoren des Klimawandels (zum Beispiel Trockenheit, Temperaturanstieg beziehungsweise Hitze) und des landwirtschaftlichen Managements (zum Beispiel Düngung) interagieren könnte, ist seit einigen Jahren Gegenstand experimenteller Felduntersuchungen am Institut für Biodiversität des TI (ehemals FAL, später TI) in Braunschweig.

2 Der CO₂-Düngereffekt: vom Einzelblatt bis zur Ertragswirkung

2.1 Primäre CO₂-Effekte auf den photosynthetischen CO₂- und H₂O-Gaswechsel

Bei der Photosynthese nimmt die Pflanze über ihre Spaltöffnungen CO₂ auf. Gleichzeitig kommt es zur Transpiration, das heißt H₂O diffundiert aus den Spaltöffnungen in

die Atmosphäre. In Anpassung an die erdgeschichtlichen Schwankungen der CO₂-Konzentration haben die Pflanzen unterschiedliche CO₂-Fixierungsmechanismen entwickelt (C₃- und C₄-Photosynthese). Die meisten unserer Kulturpflanzen (Gerste, Kartoffel, Reis, Soja, Weizen, Zuckerrübe) gehören zu den C₃-Pflanzen. Bei ihnen führt der CO₂-Anstieg zu einer Zunahme der Photosynthese. Die C₄-Pflanzen, wozu Mais, Hirse und Zuckerrohr gehören, sind an niedrige CO₂-Konzentrationen angepasst und bei ihnen erwartet man keine oder nur eine geringe Photosynthesestimulation durch mehr CO₂ (LEAKEY 2009). Alle Pflanzen (C₃ und C₄) reagieren auf eine CO₂-Erhöhung mit einer Verminderung der Spaltöffnungsweite (= stomatären Leitfähigkeit) beziehungsweise der Blatttranspiration (AINSWORTH und ROGERS 2007, LEAKEY 2009). Dies verbessert die unmittelbare Wasserausnutzungseffizienz des Blattes, das heißt das Verhältnis der Menge des assimilierten CO₂ zur Menge des an die Atmosphäre abgegebenen H₂O.

2.2 Wachstums- und Ertragseffekte durch den Anstieg der CO₂-Konzentration

Von landwirtschaftlicher Bedeutung ist, welche Wachstums- und Ertragsbeeinflussung bei Kulturpflanzen (Ackerbau, Grünland) durch erhöhte CO₂-Konzentrationen zukünftig zu erwarten sind. Die möglichen Konsequenzen aus den genannten Primärwirkungen erhöhter CO₂-Konzentrationen auf den Blattgaswechsel für die agronomische Leistungsfähigkeit von Kulturpflanzen (zum Beispiel Ertragsmenge und –qualität) beziehungsweise für agrarökologische Zusammenhänge (zum Beispiel Wasser- und Stoffhaushalt, Konkurrenzverhalten von Nutz-/Wildpflanzen; Pflanzenkrankheiten) sind komplex und daher noch immer nicht vollständig verstanden.

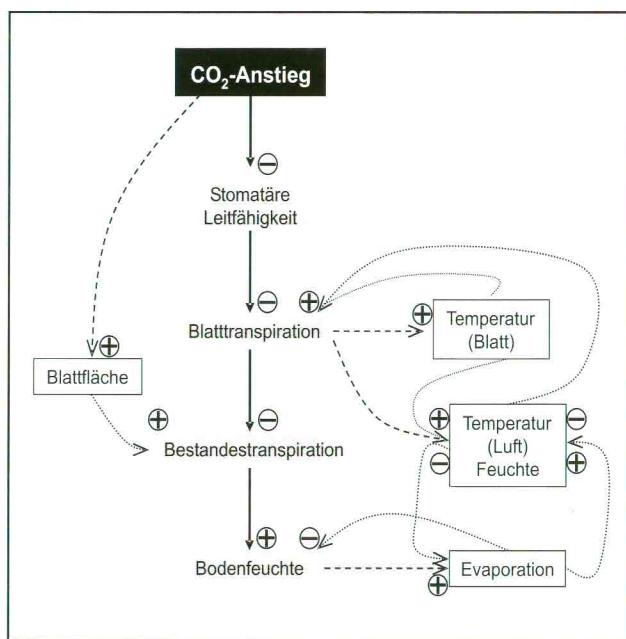


Abb. 3-1: Schematische Darstellung des primären CO₂-Effektes auf die stomatäre Leitfähigkeit sowie der Folgewirkungen und möglichen Rückkopplungen innerhalb des Pflanzenbestandes.

Die Zunahme der Photosynthese unter erhöhter CO₂-Konzentration kann durch verschiedene Faktoren modifiziert werden mit entsprechenden Konsequenzen für das Pflanzenwachstum und den Ertrag. Zu diesen modifizierenden Faktoren gehören Wetter und Witterung (Temperatur, Strahlung), die Wasser- und Nährstoffversorgung sowie pflanzeninterne Faktoren.

Auch die Reduktion der Spaltöffnungsweite des Blattes unter erhöhter CO₂-Konzentration (AINSWORTH und ROGERS 2007) kann eine Vielzahl von Konsequenzen haben, die sich positiv oder negativ auf das Pflanzenwachstum auswirken können wie in Abbildung 3-1 dargestellt. Die Reduktion der Spaltöffnungsweite durch mehr CO₂ und die damit verbundene Reduktion der transpiratorischen Kühlung führen zu einer Erhöhung der Blatttemperatur sowie einer wärmeren und trockeneren Luft innerhalb des Bestandes. Dies könnte wiederum die antitranspiratorische CO₂-Wirkung abschwächen. Die erhöhte Temperatur kann auch eine Entwicklungsbeschleunigung bis hin zu einem schnelleren Absterben der Blätter verursachen, mit negativen Konsequenzen für das Pflanzenwachstum. Denkbar ist zudem, dass die CO₂-bedingte Erhöhung der Photosyntheserate eine Zunahme der Blattfläche bewirkt, sodass der Wasserverbrauch nur auf der Einzelblattebene aber nicht auf der Bestandesebene verringert wird. Eine Reduktion der Bestandestranspirationsrate unter erhöhter CO₂-Konzentration hätte bei gleicher Niederschlagsmenge eine Erhöhung der Bodenfeuchte zur Folge, die wiederum zu einer Zunahme der Evaporation oder der Bodenwasserreserven führt, sodass die Pflanze niederschlagsarme Perioden länger überstehen kann.

3 Untersuchungsmethoden zur Ermittlung des CO₂-Düngereffekts

3.1 Experimente in Klimakammern

Zur Ermittlung der Auswirkungen erhöhter CO₂-Konzentrationen auf das Wachstum und den Ertrag sind Experimente mit unterschiedlichen CO₂-Konzentrationen erforderlich. Derartige „CO₂-Begasungsversuche“ wurden und werden meist in Klimakammern mit vollständiger Kontrolle aller Umweltvariablen, in modifizierten Gewächshäusern, in Folientunneln oder in so genannten „Opentop“-Kammern durchgeführt, wobei die Pflanzen meist als Topfkulturen und selten in kleinen Modellbeständen angezogen werden. Folientunnel beziehungsweise Opentop-Kammern können jedoch auch direkt in agronomisch regulär etablierten Feldbeständen eingesetzt werden, indem man sie nach Aussaat oder Auflaufen der Kulturen im Feld über den Pflanzen errichtet (Abb. 3-2).

Gemeinsam ist allen Kammerversuchen, dass sich durch den Folien- oder Glaseinschluss die mikroklimatischen Bedingungen für die Pflanzen beziehungsweise Pflanzenbestände verändern. Dieser „Kammereffekt“ führt zu



Abb. 3-2: Versuchsfeld der ehemaligen FAL Braunschweig mit Open-Top-Kammern zur Untersuchung des CO₂-Düngeffekts auf Sommerweizen.

einem Klima, das sich im Hinblick auf Strahlungsqualität und –quantität, Temperatur, Windgeschwindigkeit und rel. Luftfeuchte meist deutlich vom Freilandklima unterscheidet. In der Regel sind die Klimaverhältnisse in den Kammern wärmer und dunkler sowie durch eine konstante beziehungsweise kontinuierliche Windstärke gekennzeichnet, die aus der Verwendung von Gebläsen zur CO₂-Dosierung resultiert. Kammerversuche stellen daher verfälschte Wachstumsbedingungen dar, in denen die Pflanzenbestände von der Atmosphäre und – bei Verwendung von Topfkulturen – auch vom freien Bodenvolumen „entkoppelt“ sind. Damit sind zum Beispiel Un-

tersuchungen zur CO₂-Wirkung auf den Wasserhaushalt von Pflanzenbeständen nur eingeschränkt möglich. Topfversuche erlauben keine ungehinderte Entwicklung der Pflanzenwurzel, sodass beispielsweise keine zuverlässigen Untersuchungen zum CO₂-Effekt auf die Aufnahme von Wasser und Nährstoffen möglich sind. Es bestand daher schon länger der Bedarf einer Technik zu entwickeln, mit der man die CO₂-Konzentration in einem Agrarökosystem manipulieren kann ohne Beeinträchtigung der klimatischen Bedingungen und der Bodenverhältnisse (HENDREY und MIGLIETTA, 2006).

3.2 Freiland-CO₂-Anreicherungssysteme (FACE)

Man hat bereits vor mehr als 20 Jahren damit begonnen, nach experimentellen Methoden zu suchen, mit denen sich zukünftige atmosphärische CO₂-Szenarien direkt im Feld simulieren lassen. Eine solche „Freiland-CO₂-Anreicherungstechnik“ ist das so genannte FACE-System (FACE = Free Air Carbon Dioxide Enrichment). Freilandbegasungssysteme wurden in den 1980iger Jahren erstmals in England im Rahmen der Wirkungsforschung von Luftschaadstoffen wie Schwefeldioxid auf die Vegetation entwickelt. Basierend auf dieser Technologie wurde in den USA das Begasungsprinzip auf die CO₂-Dosierung angewandt und weiterentwickelt (HENDREY und MIGLIETTA 2006). Dieses „ursprüngliche“ FACE-System besteht aus einem Tank mit Flüssig-CO₂, einem Verdampfer, einem Gebläse und einer Ringleitung versehen mit vertikalen Ausströmrohren, die an der Basis mit pneumatischen Ventilen versehen sind,

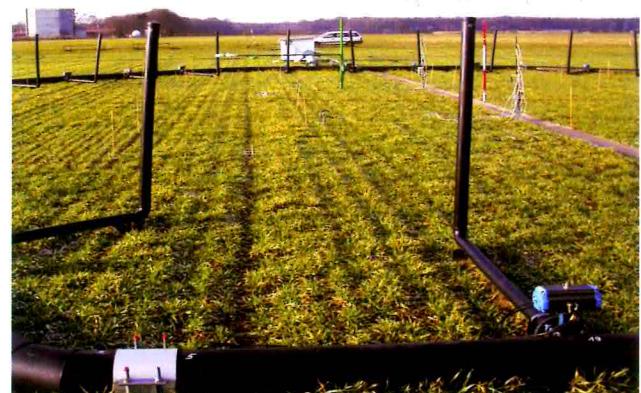
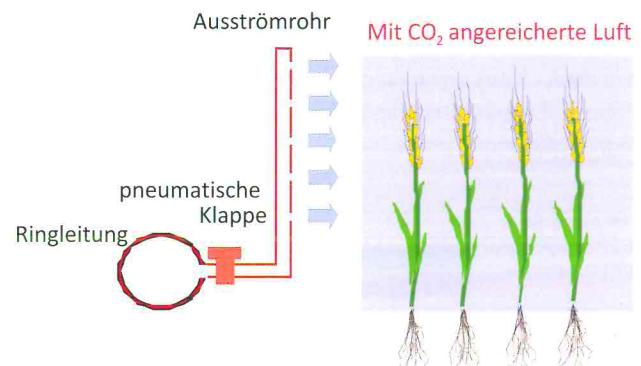
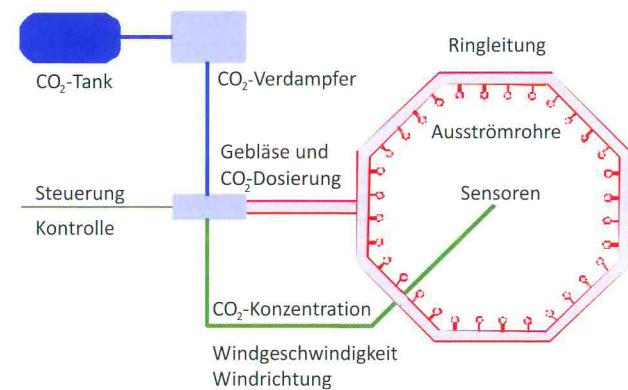


Abb. 3-3: Braunschweiger FACE-Anlage. Oben: schematische Darstellung der Aufsicht und Querschnitt eines Begasungsringes. Unten links: Foto zweier Versuchsringe kurz nach dem Aufbau (Oktober 1999) während des Fruchtfolgeversuchs mit Wintergerste (nach DÄMMGEN 2000). In den weißen Schränken befindet sich unter anderem das Steuerungsventil zur Dosierung des CO₂. Das Gebläse, mit dem das CO₂ mit Luft verdünnt und in die Ringleitung eingeblasen wird, ist durch die Schränke verdeckt. Unten rechts: Foto mit Detailansicht der Ringleitung und eines Ausströmrohrs mit pneumatischer Klappe.“



Abb. 3-4: Aufsicht auf einen Begasungsring während der drei FACE-Versuchsreihen (siehe Tabelle 3-1). Oben: Ring mit Winterweizen (Juni 2005) aus dem Fruchfolge-Experiment mit Bestandesgaswechselkammern und schattierten Teilflächen; die linke Kreishälfte ist mit reduzierte N-Düngung versorgt. Mitte: Ansicht des Maisversuchsfeldes (Juli 2008) mit einem FACE-Ring im Vordergrund und einem Kontrollring im Hintergrund links; jede Ringfläche ist in eine feuchte und trockene Hälfte unterteilt. Unten: Parzellen mit vier Sorghum-Sorten und einer Maissorte (unten links und oben rechts) in der feuchten und trockenen Ringhälfte (mit Regenaußenschlusszelt, aber ohne Plane im Juli 2011).

über die die CO₂-Zufuhr gesteuert wird (vergleiche Abb. 3-3, Kapitel 4.1). Innerhalb der Ringfläche werden Windrichtung, Windgeschwindigkeit sowie CO₂-Konzentration erfasst. Mit diesen Daten wird die CO₂-Freisetzung aus den Ausstromröhren so gesteuert, dass die Zielkonzentration in der Ringmitte eingehalten wird, wobei jeweils nur die

Ausströmrohre auf der dem Wind zugewandten Seite des Rings geöffnet werden. Dadurch wird die Luft mit erhöhter CO₂-Konzentration sowohl vom Gebläse als auch vom Wind über die Versuchsfläche verteilt.

FACE-Versuche wurden in den 1990iger Jahren des vorigen Jahrhunderts erstmals in den USA für Untersuchungen an Baumwolle und Weizen eingesetzt. Neben dem oben beschriebenen FACE-Typ, der unter Verwendung von Gebläsen mit einem Luft-CO₂-Gemisch arbeitet, das in die Pflanzenbestände eingeblasen wird, sind mittlerweile FACE-Typen entwickelt worden, die unter Überdruck direkt unverdünntes CO₂ über Mikroporen in Schlauchleitungssystemen in die Pflanzenbestände einleiten (HENDREY und MIGLIETTA, 2006). FACE-Experimente sind technisch aufwändig und aufgrund des hohen CO₂-Verbrauches relativ teuer im Betrieb und werden daher nur selten eingesetzt (LEAKY et al. 2009). Größere FACE-Versuche in ackerbaulich genutzten Agrarökosystemen mit Begasungsringen mit Durchmessern von > 10 m werden gegenwärtig in Australien, China, Japan, Italien und in Braunschweig betrieben.

4 Braunschweiger FACE-Experimente

4.1 FACE-Design

Für die CO₂-Anreicherungsversuche ist auf dem Gelände des TI in Braunschweig ein 20 ha umfassender Ackerschlag eingerichtet worden, der die notwendigen Anforderungen an Größe, Homogenität und freie Anströmbarkeit (fetch) erfüllt. Der Versuchsschlag wird vom landwirtschaftlichen Versuchsbetrieb des Forschungsgeländes nach gängiger landwirtschaftlicher Praxis im Hinblick auf Bodenbearbeitung, Düngung und Pflanzenschutz bewirtschaftet. Der Bodentyp ist ein sandiger Lehm (Luvisol; pH 6,5; C_{org} 0,85% - 1,8%; Bodenzahl 48) und die nutzbare Feldkapazität in 0-60 cm Bodentiefe liegt bei etwa 100 mm.

Es wird eine ursprünglich vom Brookhaven National Laboratory (New York/USA) entwickelte ringförmig aufgebaute FACE-Anlage eingesetzt (HENDREY und MIGLIETTA 2006; vergleiche Kapitel 3.2). Jedes Ringsystem (Fläche etwa 310 m²) besteht aus einer auf dem Boden aufliegenden ringförmigen CO₂-Hauptleitung, von der jeweils 32 senkrechte, gelochte „Begasungsrohren“ abgehen, aus denen das durch ein Gebläse vorgemischte CO₂-Luft-Gemisch ausströmt (Abb. 3-4). Auf dieser Ringfläche wird die Konzentration des CO₂ in der Atmosphäre während der Tageslichtstunden auf einen Zielwert (zum Beispiel 550 – 600 ppm) erhöht. Während der Versuche in Braunschweig wurden anfänglich (C₃-Fruchfolgeversuch) jeweils zwei „Begasungsringe“ (das heißt etwa 620 m² Fläche) mit CO₂ angereichert, während zwei Ringe als Kontrolle dienten und über das Gebläse nur mit Umgebungsluft versorgt wurden. Bei den späteren FACE-Versuchen wurden drei Begasungsringe (das heißt etwa 930 m² Fläche) betrieben und als Kontrollen dienten drei Flächen ohne Gebläse und CO₂-Anreicherung. Bei Umgebungstemperaturen < 5°C und bei Windgeschwin-

Fruchtfolge/Pflanzenart	CO ₂ -Konzentration [ppm]	Dauer	Ko-Variable beziehungsweise Untersuchung von Interaktionen
Wintergerste/Weidelgras Zuckerrübe Winterweizen	550	2000-2005	N-Versorgung ortsüblich vs. 50% von ortsüblich
Mais	550	2007-2008	Wasserversorgung feucht: nFK > 50% vs. trocken: nFK << 50%
Energiemaис und Sorten von Sorghum-Hirse	600	2010/2011	Wasserversorgung feucht: nFK > 50% vs. trocken: nFK << 50%
Winterweizen	550	2014-2015	Hitzestress erzeugt durch Infrarotstrahler

Tab. 3-1: FACE-Versuchsreihen in Braunschweig in der Vergangenheit (2000-2011) und geplant für die Zukunft (2014-2015).

digkeiten $> 6,5 \text{ ms}^{-1}$ in ein Meter Höhe über dem Bestand wurde die CO₂-Anreicherung grundsätzlich unterbrochen.

4.2 FACE-Experimente in Braunschweig

In Braunschweig wurden bisher FACE-Untersuchungen an einheimische Kulturpflanzen in drei verschiedenen mehrjährigen Experimenten durchgeführt und für 2014-2015 ist ein weiteres Experiment vorgesehen. Bei den einzelnen Versuchsreihen werden jeweils spezifische Fragestellungen verfolgt (siehe Tab. 3-1).

4.2.1 FACE-Versuchsreihe mit einer Fruchtfolge aus Wintergerste, Zuckerrübe und Winterweizen

In der ersten FACE-Versuchsreihe wurden die Auswirkungen erhöhter CO₂-Konzentration auf Wachstum, Ertrag und die Stoffflüsse unter einer für Norddeutschland typischen Fruchtfolge (Wintergerste, Weidelgras als Zwischenfrucht, Zuckerrübe, Winterweizen) ermittelt. Zur Untersuchung der Wechselwirkungen des CO₂-Düngereffektes mit der Stickstoff (N)-Versorgung der Versuchspflanzen wurde die Stickstoffdüngung der jeweiligen Fruchtfolgeglieder in jeder Ringhälfte um 50 % gegenüber der fruchtartspezifischen Volldüngung reduziert (siehe Abb. 3-4). Um weitere Einflussfaktoren möglichst auszuschließen, wurden alle anderen Nährstoffe in ausreichendem Masse angeboten. Die Wasserversorgung wurde kontrolliert und bei Bedarf wurde bewässert. Im Rahmen dieser FACE-Versuchsreihe wurden erstmals überhaupt Wintergerste und Zuckerrüben unter erhöhter CO₂-Konzentration angebaut. Für Weizen gab es bereits Resultate aus zwei FACE-Versuchen in den USA und in China.

4.2.2 Kombination von FACE mit einer Regenausschlussvorrichtung zur Klimawirkungsfor schung bei Mais

In der zweiten FACE-Versuchsreihe wurde der CO₂-Effekt auf Mais untersucht, wobei gleichzeitig die Wasserversorgung manipuliert wurde, indem die ringförmige Versuchsfläche in eine feuchte und trockene Hälfte aufgeteilt wurde. Dazu wurde die FACE-Technik mit einem Regenausschluss-System kombiniert (ERBS et al. 2012). Dieses bestand aus einem kommerziellen Großzelt (12 m x 20 m Grundfläche), das auf dem trockenen Halbkreis installiert wurde (Abb.

3-4). Der Aluminiumrahmen des Zeltes wurde an Tagen mit intensivem Regen ($> 10 \text{ mm d}^{-1}$) mit transparenten Planen überzogen und so der Niederschlag von der Versuchsfläche abgehalten.

4.2.3 Kombination von FACE mit einer Regenausschlussvorrichtung zum Vergleich des Wachstums von Sorghum-Hirse-Genotypen und Mais

Sorghum-Hirse ist im Rahmen des Anbaus von Energiepflanzen in das Interesse der Landwirtschaft gerückt. Die Pflanze hat etwas höhere Temperaturansprüche und soll bei trockener Witterung mehr Biomasse produzieren als Mais. Es wurde ein zweijähriges FACE-Experiment mit verschiedenen Sorghum-Sorten und einer Maissorte durchgeführt. Die Ziele dieser FACE-Versuchsreihe waren zu prüfen, ob es intraspezifische (zwischen Sorghum-Sorten) und interspezifische Differenzen (zwischen Sorghum und Mais) gibt hinsichtlich der Reaktion auf geänderte Klimabedingungen (CO₂-Konzentration, Sommertrockenheit).

5 Ergebnisbeispiele aus der Braunschweiger FACE-Versuchsreihe

In den FACE-Untersuchungen waren neben den klassischen agronomischen Erhebungen zu Wachstum, Ertragsmengen und -qualität der Fruchtfolgeglieder auch agrarökologische Erhebungen zum Wasser- und Kohlenstoffhaushalt und zur Biodiversität im Boden von Interesse. Die Ausführungen hier beschränken sich auf Ergebnisse zum Wasserhaushalt und zu Wachstums- und Ertragsdaten der Kulturpflanzen. Es werden nur zusammenfassende Aussagen gemacht.

5.1 Auswirkungen erhöhter CO₂-Konzentration auf Wachstum und Ertrag verschiedener Kulturpflanzen

5.1.1 Fruchtfolge mit verschiedenen C₃-Pflanzen

In Tabelle 3-2 sind die Erträge für die einzelnen Fruchtfolgeglieder (ohne Weidelgras) über den insgesamt sechsjährigen Feldversuch aufgelistet. Weniger Stickstoffdüngung war wie erwartet mit einer Ertragsminderung von 10 % bis maximal 20 % verbunden.

Der relative CO₂-Effekt auf den Ertrag war unabhängig von der Düngung. Die Zunahme des Kornertrags unter erhöhter CO₂-Konzentration war bei der Wintergerste im

CO_2	N	2000	2001	2002	2003	2004	2005
		Wintergerste	Zuckerrübe	Winterweizen	Wintergerste	Zuckerrübe	Winterweizen
normal	100	9,5	68	5,7	5,9	72	8,3
	50	7,8	61	4,7	4,7	64	7,3
erhöht	100	10,2	73	6,6	6,9	78	9,7
	50	8,5	66	5,9	5,6	75	7,5
% CO_2 -Effekt	100	8	8	16	17	7	16
	50	9	8	12	18	16	4

Tab. 3-2: Erträge (t ha^{-1}) der verschiedenen Pflanzen aus dem zweimaligen Fruchfolgeversuch unter normaler (370-380 ppm) und erhöhte CO_2 -Konzentration (550 ppm) sowie mit ausreichender (N100) und reduzierter Stickstoffdüngung (N50= 50% von N100). Angegeben sind die Körnerträge und die Rübenfrischmassen.

Durchschnitt geringer als bei Winterweizen. Bei Letztem betrug der Ertragszuwachs 16 % unter N100.

Am auffälligsten waren die Resultate zur Wirkung erhöhter CO_2 -Konzentration auf das Wachstum und den Ertrag von Zuckerrüben. Mit Hilfe von Großküvetten wurde zwar im Sommer eine positive Interaktion zwischen CO_2 und Temperatur auf die Photosyntheserate nachgewiesen, aber am Ende der Vegetationsperiode lag die Steigerung des Rübenertrages mit 7 % unter normaler Düngung deutlich niedriger als der CO_2 -Effekt aus Kammerversuchen. Auch die zeitliche Dynamik des Bestandeswachstums war unerwartet, denn nach einem positiven CO_2 -Effekt auf die grüne Blattfläche im Frühsommer wurde im weiteren Verlauf eine Effektkehre beobachtet (MANDERSCHEID et al. 2010). Im August zeigten die Pflanzen unter erhöhter CO_2 -Konzentration eine Beschleunigung der Blattseneszenz (Abb. 3-5) und im September hatten sie einen kleineren grünen Blattflächenindex als die Pflanzen unter normaler CO_2 -Konzentration. Eine mögliche Erklärung für dieses unerwartete Verhalten ist, dass der Rübenkörper nicht wie bisher angenommen eine unbegrenzte, sondern nur eine begrenzte Aufnahmekapazität für Assimilate hat und die Pflanze daher die Kapazität für die Assimilatsynthese über eine Reduktion der grünen Blattfläche diesem limitierten Bedarf anpasst.

Hinweise für eine interne Begrenzung des Pflanzewachstums unter erhöhter CO_2 -Konzentration gab es auch beim Getreide. Der Körnertrag setzt sich zusammen aus der Kornzahl sowie der Kornwachstumsrate und –dauer. Erwartungsgemäß wurden unter erhöhter CO_2 -Konzentration ein Anstieg der Kornzahl sowie eine Zunahme der Kornwachstumsrate festgestellt. Angesichts der hohen Temperatur während der Kornfüllung im Juni und der damit verbundenen Erhöhung der Photosyntheserate unter mehr CO_2 , war eine Zunahme der Kornwachstumsrate zu erwarten. Überraschend war jedoch, dass gleichzeitig die Kornwachstumsdauer verringert wurde, sodass in der Summe kein positiver CO_2 -Effekt auf das Einzelkornwachstum beobachtet wurde (MANDERSCHEID et al. 2009).

Generell war darüber hinaus der relative CO_2 -Effekt auf den Ertrag und die gesamte oberirdische Biomasse etwa gleich groß, das heißt es gab keinen Effekt auf die Stoffverteilung zwischen einzelnen Pflanzenorganen (Ernte-Index). Neben der Ertragshöhe spielt auch die Ertragsqualität eine entscheidende Rolle in der Landwirtschaft. In den Braunschweiger FACE-Versuchen wurde wie in anderen Versuchen (TAUB et al. 2008) erstmals auch im Feld eine Reduktion des Kornproteinangehalts beim Wintergetreide gefunden. Dies ist insbesondere beim Winterweizen problematisch, da hier vor allem die Klebereiweiße betroffen



Abb. 3-5: Ansicht des Zuckerrübenbestandes im August 2001 auf einer Versuchsfläche mit normaler (rechts) und erhöhte CO_2 -Konzentration (links).

Variable	CO ₂	Wasser	2007	2008
Biomasse	normal	feucht	21,4	22,5
		trocken		17,2
	erhöht	feucht	21,7	22,5
		trocken		21,3
	% CO ₂ -Effekt	feucht	1	0
		trocken		24
Kornertrag	normal	feucht	10,2	11,3
		trocken		7,3
	erhöht	feucht	10,3	11,2
		trocken		10,2
	% CO ₂ -Effekt	feucht	1	-1
		trocken		41

Tab. 3-3: Auswirkungen einer erhöhten CO₂-Konzentration (FACE) auf Biomasse und Kornertrag (t ha⁻¹) von Mais unter ausreichender und reduzierter Wasserversorgung. Ergebnisse aus der FACE-Versuchsreihe mit Mais von 2007 bis 2008.

sind, die für die Backqualität eine entscheidende Rolle spielen (WIESER et al. 2008).

5.1.2 Maisversuche bei gleichzeitiger Variation der Wasserversorgung

In der Braunschweiger FACE-Versuchsreihe wurde weltweit erstmals die Wechselwirkung von CO₂ und kontrollierter Wasserversorgung auf das Maiswachstum unter Feldbedingungen experimentell untersucht. Durch den Betrieb der Rain-Shelter in den Trockenstress-Parzellen und die bedarfsgerechte Bewässerung in der feuchten Variante war die Wasserzufluss (Regen und Bewässerung) in beiden Varianten mit 160 mm (trocken) und 330 mm (feucht) im zweiten Versuchsjahr mit Mais sehr unterschiedlich. Hinzu kam eine nutzbare Feldkapazität von etwa 100 mm (siehe Kapitel 4.1), die im Verlauf der Vegetationsperiode von den Pflanzen in unterschiedlichem Maße für ihre Wasserversorgung verwendet wurde (siehe Kapitel 5.2.4). Das unterschiedliche Wasserangebot führte zu deutlichen Minderungen im Biomasse- (-24%) und Kornertrag (-35%) der Versuchspflanzen in der trockenen Variante und unter normaler CO₂-Atmosphäre (Tab. 3-3). In beiden Versuchsjahren gab es unter feuchten Bodenbedingungen keinen CO₂-Effekt auf das Wachstum. Die gefundenen Differenzen zwischen den beiden CO₂-Varianten sind so gering (< 1 %), dass angenommen werden kann, dass das Maiswachstum nicht auf den CO₂-Anstieg reagiert, sofern eine ausreichende Wasserversorgung gegeben ist. Bei begrenzter Wasserverfügbarkeit gab es dagegen einen deutlichen CO₂-Effekt auf die gesamte oberirdische Trockenmasse (+24 %) und den Kornertrag (+41 %).

Bei wenig Niederschlag wird das Wachstum durch die verfügbaren Wasserressourcen bestimmt. Die produzierte Biomasse ergibt sich aus der Wassernutzungseffizienz (WNE) und der verfügbaren Wassermenge. Die erhöhte CO₂-Kon-

zentration führte in der trockenen Variante zu einer deutlichen Zunahme von WNE (Tab. 3-4). Bei ausreichender Bewässerung gab es keinen oder nur einen geringen CO₂-Einfluss, was vermutlich auf einem vermehrten Wasserverlust durch Evaporation und Versickerung beruhte. Unter Trockenstress wurde eine Erhöhung der WNE um 25 % gefunden, das heißt die Pflanzen benötigen unter erhöhter CO₂-Konzentration etwa 20 % weniger Wasser für die Biomasseproduktion. Dies stimmt überein mit der Transpirationsminderung, die in dem Maisversuch gefunden wurde (siehe Kapitel 5.2.2).

5.2 Auswirkungen erhöhter CO₂-Konzentration auf den Wasserhaushalt verschiedener Kulturpflanzen

Wie unter 2.1 dargestellt, profitieren C₃- und C₄-Pflanzen von einer erhöhten CO₂-Konzentration unter anderem durch einen sparsameren Wasserverbrauch. Bei der Versuchsreihe mit C₃-Pflanzen wurde ein Einfluss der Wasserversorgung auf das Wachstum weitestgehend ausgeschlossen, indem die Bodenfeuchte im Bedarfsfall durch Beregnung angehoben wurde, sodass die nutzbare Feldkapazität stets zwischen 60 bis 90 % lag. Behandlungseffekte auf das Pflanzenwachstum können daher größtenteils auf CO₂-bedingte Änderungen in der Photosynthese zurückgeführt werden. Bei den C₃-Pflanzen wurden neben Kammermessungen zur Bestandesevapotranspiration nur Messungen zur Bodenfeuchte im Oberboden (0 bis 40 cm Tiefe) und zur Bestandestemperatur durchgeführt, während bei den C₄-Pflanzen Transpirationsmessungen auf Einzelblatt und Bestandesebene, Temperaturmessungen sowie ausführliche Messreihen zur Bodenfeuchte bis in über 100 cm Bodentiefe durchgeführt wurden. Im Folgenden werden Ergebnisse aus den verschiedenen FACE-Versuchen zu den in Abbildung 3-1 diskutierten Primär- und möglichen Sekundäreffekten erhöhter CO₂-Konzentration gezeigt.

5.2.1 Stomatäre Leitfähigkeit und Transpirationsrate auf Einzelblattebene

Während des zweijährigen Maisexperiments wurde die stomatäre Leitfähigkeit (gs) an mehreren Tagen an den oberen sonnenexponierten Blättern in der gut bewässerten Variante mit normaler und erhöhter CO₂-Konzentration gemessen. In Abb. 3-6 sind die zum gleichen Zeitpunkt durchgeführten Messungen zu gs dargestellt. Danach ist gs unter erhöhter CO₂-Konzentration um etwa 20 % bis 50 %

CO ₂	Wasser	2007	2008
normal	feucht	7,21	7,60
	trocken		8,06
erhöht	feucht	7,24	8,34
	trocken		10,1
% CO ₂ -Effekt	feucht	0	10
	trocken		25

Tab. 3-4: Auswirkungen einer erhöhten CO₂-Konzentration (FACE) auf die Wasserausnutzungseffizienz der Biomasseproduktion (g kg⁻¹) von Mais unter ausreichender und reduzierter Wasserversorgung. Ergebnisse aus der FACE-Versuchsreihe mit Mais von 2007 bis 2008.

verringert. Porometrische Untersuchungen an unterschiedlichen Blättern von verschiedenen Sorten von Sorghum-Hirse lieferten einen CO₂-Effekt in ähnlichem Umfang.

5.2.2 Transpirationsrate auf Bestandesebene

Wie bereits erläutert, sind bei der Aufskalierung des CO₂-Effekts vom Einzelblatt auf die Bestandesebene weitere Faktoren zu berücksichtigen (Abb. 3-1). Ein wesentlicher Aspekt sind Änderungen in der Blattfläche pro Pflanze. Es hat sich jedoch gezeigt, dass der grüne Blattflächenindex in der Regel bei allen untersuchten Pflanzenarten kaum durch CO₂ beeinflusst wird. Der Wasserverbrauch auf Bestandesebene wurde in der FACE-Versuchsreihe mit der C₃-Fruchtfolge mit Bestandesgaswechselkammern gemessen, wobei die Evapotranspiration (Wasserfluss von etwa 0,7 m² großen Bestandesausschnitten) erfasst wurde (BURKART et al. 2011). Durch den Kammereinschluss der Pflanzen gab es leichte Änderungen im Mikroklima (Temperatur, Strahlung, Windgeschwindigkeit) im Vergleich zu den Feldbedingungen. Die so über die Vegetationsperiode ermittelte Reduktion der Evapotranspiration durch die erhöhte CO₂-Konzentration reichte von 9 % bei Win-

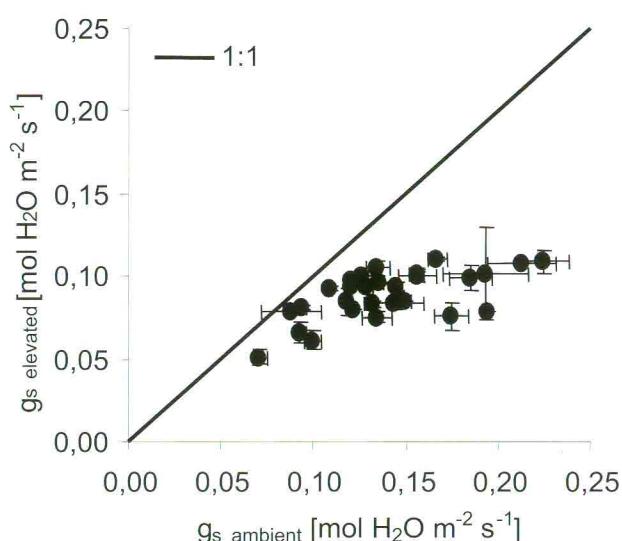


Abb. 3-6: Messwerte der stomatären Leitfähigkeit (g_s) von Maisblättern unter normaler (ambient) und erhöhter (elevated) atmosphärischer CO₂-Konzentration aus dem Maisversuchsjahr 2007 und 2008. Die Pflanzen waren gut bewässert.

tergerste bis 18 % bei der Zuckerrübe. Bei den anschließenden FACE-Versuchsreihen mit C₄-Pflanzen wurde die Transpiration der ganzen Pflanzen mit Hilfe von Saftflussmanschetten erfasst. Die Manschetten werden knapp über dem Boden an den Stängel montiert und versorgen diesen über ein Heizband mit einem konstanten Wärmestrom. Über Temperatursensoren ober- und unterhalb des erwärmteten Stängelabschnitts wird die Verlagerung der Wärme durch den Transpirationsstrom erfasst und dieser so quantifiziert. Mit der Methode wurde beim Mais unter guter Bewässerung eine deutliche Abnahme des Transpirationsstroms unter erhöhter CO₂-Konzentration festgestellt. An den Messtagen im ersten Versuchsjahr wurde insgesamt ein Wasserverbrauch von 52,1 mm unter normaler und von 37,3 mm unter erhöhter CO₂-Konzentration gefunden (Abb. 3-7). Im zweiten Versuchsjahr lagen die entsprechenden Werte bei 36,9 beziehungsweise 29,3 mm. Danach beträgt die durchschnittliche Reduktion der Bestandestranspiration durch die erhöhte CO₂-Konzentration 25 %. Bei der anschließenden Versuchsreihe mit Sorghum-Hirse wurde mit der gleichen Methode ein ähnlich großer Transpirationsabfall nachgewiesen.

5.2.3 Temperatur der Bestandsoberfläche und der Bestandesluft

Zu ausgewählten Terminen, das heißt bei geschlossenem Bestand, sonnigem Wetter mit hoher Einstrahlung (um die Mittagszeit) und wenig Wind, wurden von einer Hebebühne in etwa 10 Meter Höhe über dem Versuchsfeld Aufnahmen der unterschiedlich behandelten Pflanzenbestände mit einer Thermokamera durchgeführt. Bei allen Pflanzenarten war unter diesen Bedingungen innerhalb der Versuchsfläche mit erhöhter CO₂-Konzentration eine Erwärmung der Bestandsoberfläche um etwa 1 bis 2°C im Vergleich zur Fläche außerhalb des Begasungsringes zu sehen (Abb. 3-8). Beim Winterweizen erfolgte die Thermographie ausnahmsweise unter relativ windigen Bedingungen mit entsprechenden Konsequenzen für die CO₂-Verteilung nach dem CO₂-Austritt aus den vertikalen Begasungsrohren und dem Erwärmungsmuster. Das Wärmebild des Zuckerrübenbestandes wurde Anfang Juli aufgenommen als der Bestand in der normal gedüngten Stickstoffvariante (N100) gerade den Bestandesschluss erreicht hatte (Abb. 3-8). In einem linken Streifen mit verringrigerter Düngung (N50) war das Blattwachstum und somit die transpiratorische Oberfläche etwas geringer, was eine höhere Oberflächentemperatur zur Folge hatte. Innerhalb des FACE-Ringes war für beide N-Stufen eine deutliche Zunahme der Oberflächentemperatur zu erkennen. Das unterste Wärmebild in Abb. 3-8 wurde während des ersten Maisversuches vor Beginn der unterschiedlichen Wasserversorgung aufgenommen. Man erkennt deutlich die Erhöhung der Oberflächentemperatur in den Versuchsflächen mit CO₂-Anreicherung.

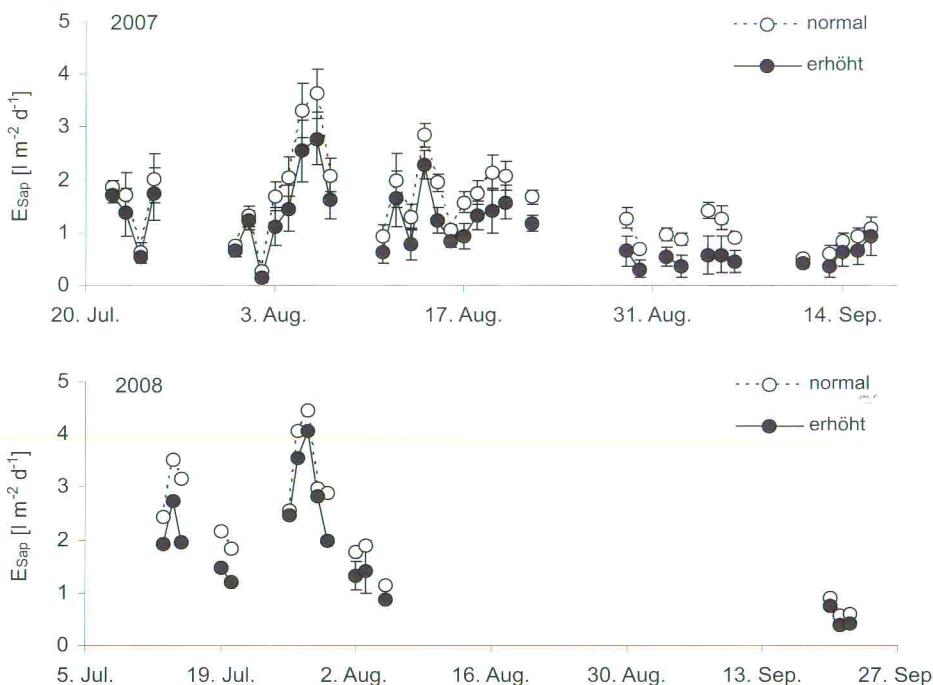


Abb. 3-7: Saisonaler Verlauf der Saftflussrate (Esap) des Maisbestandes unter normaler und erhöhter CO_2 -Konzentration bei ausreichender Wasserversorgung in 2007 und 2008.

Neben den punktuellen Messungen der Oberflächentemperatur wurden über die ganze Vegetationsperiode in Kooperation mit dem DWD in Braunschweig kontinuierlich die Lufttemperatur in etwa 70 % Bestandshöhe aufgezeichnet. Es wurde eine positive Korrelation zwischen der Globalstrahlung und der CO_2 -bedingten Erhöhung der Bestandeslufttemperatur gefunden. Entsprechend war der CO_2 -Effekt zur Mittagszeit am größten und der mittlere Erwärmungseffekt über die Wachstumsperiode reichte meist von 0,3 bis 0,5°C, während nachts kaum Temperaturdifferenzen auftraten (Abb. 3-9). Abgesehen vom ersten Versuchsjahr mit Wintergerste waren die beobachteten CO_2 -Effekte auf die Lufttemperatur im Bestand bei den einzelnen Kulturen relativ ähnlich - inklusive der Maisresultate. Das Tagesmittel der Lufttemperatur-Differenz zwischen den beiden CO_2 -Varianten war so gering (< 0,2°C), dass kein Temperatur-Effekt auf die Phänologie zu erwarten ist. Dies stimmt überein mit entsprechenden phänologischen Messungen an den Versuchspflanzen.

5.2.4 Änderungen in der Bodenfeuchte

Die CO_2 -Anreicherung führte bei allen hier untersuchten Pflanzenspezies zu einer Erhöhung der Bodenfeuchte, wie sich bei der kontinuierlichen Messung mit Bodenfeuchte-Sensoren (TDR-Sonden) oder bei punktuellen gravimetrischen Feuchtemessungen durch den DWD zum Ende der Vegetationsperiode herausstellte (BURKART et al. 2011). Abbildung 3-10 zeigt als Beispiel den Verlauf des pflanzenverfügbaren Bodenwassers (entsprechend nutzbare Feldkapazität) in 0 bis 60 cm Tiefe für das zweite Maisversuchsjahr. Anfang Juli begann die unterschiedliche Wasserversorgung der trockenen und feuchten Ringhälften. Im weiteren Verlauf fiel das pflanzenverfügbare Bodenwasser

in der trockenen Variante auf bis zu etwa 10 mm ab, während in den feuchten Versuchsparzellen die nutzbare Feldkapazität über 50 % lag. In beiden Bewässerungsvarianten war im Verlauf der Vegetationsperiode ein deutlicher CO_2 -Effekt zu sehen und die Bodenwasserreserven waren unter erhöhter CO_2 -Konzentration bis zu 20 mm höher als unter normaler CO_2 -Konzentration. In der feuchten Variante wurde ab August die Bewässerungsmenge auf den FACE-Flächen verringert, um Staunässe zu verhindern, und der Maisbestand bei normaler CO_2 -Konzentration erhielt bis zur Endernte 20 mm mehr Wasser über die Tropfbewässerung.

6 Fazit und Ausblick

Zusammenfassend haben die Braunschweiger FACE-Versuche folgende Ergebnisse geliefert:

- eine deutliche Stimulation der Photosynthese bei den C_3 -Pflanzen Gerste, Zuckerrübe und Weizen, aber eine vergleichsweise geringe Stimulation des Wachstums und der Erträge, die niedriger ausfiel als in vielen ähnlichen Kammerversuchen,
- eine deutliche Beeinflussung des Wasserhaushaltes (verminderte Blatt- und Bestandstranspiration, höhere Bodenfeuchten) bei C_3 - und C_4 -Pflanzen,
- ähnliche CO_2 -Effekte bei hoher und niedriger N-Düngung,
- deutliche Veränderungen der Kornqualität und
- kein CO_2 -Effekt auf das Wachstum von Mais bei ausreichender Wasserversorgung, aber Kompensation von Trockenstresseffekten.

Die weitere Anpassung der landwirtschaftlichen Pflanzenproduktion an den unvermeidbaren Klimawandel in den nächsten Jahrzehnten steht jetzt im Mittelpunkt des wissenschaftlichen und politischen Interesses. Eine Anpassung zur Vermeidung negativer Effekte und zur Nutzung positiver Effekte gelingt, wenn einerseits die regionalen Szenarien des Klimawandels möglichst genau bekannt sind und andererseits die tatsächlichen „Nettoeffekte“ der unterschiedlichen Wirkungen der verschiedenen Klimaelemente bestmöglich bekannt sind. Im Hinblick auf den CO_2 -Düngeeffekt in der Pflanzenproduktion sollte sich die zukünftige wissenschaftliche Bearbeitung auf zwei Bereiche konzentrieren. Die erste Herausforderung besteht darin, die Wechselwirkungen des CO_2 mit den übrigen Elementen des Klimawandels (Trockenheit, Temperaturanstieg, Hitzeperioden, phytotoxische Ozonkonzentrationen) und mit Aspekten des landwirtschaftlichen Managements noch besser zu verstehen. Die überwiegende Mehrzahl der

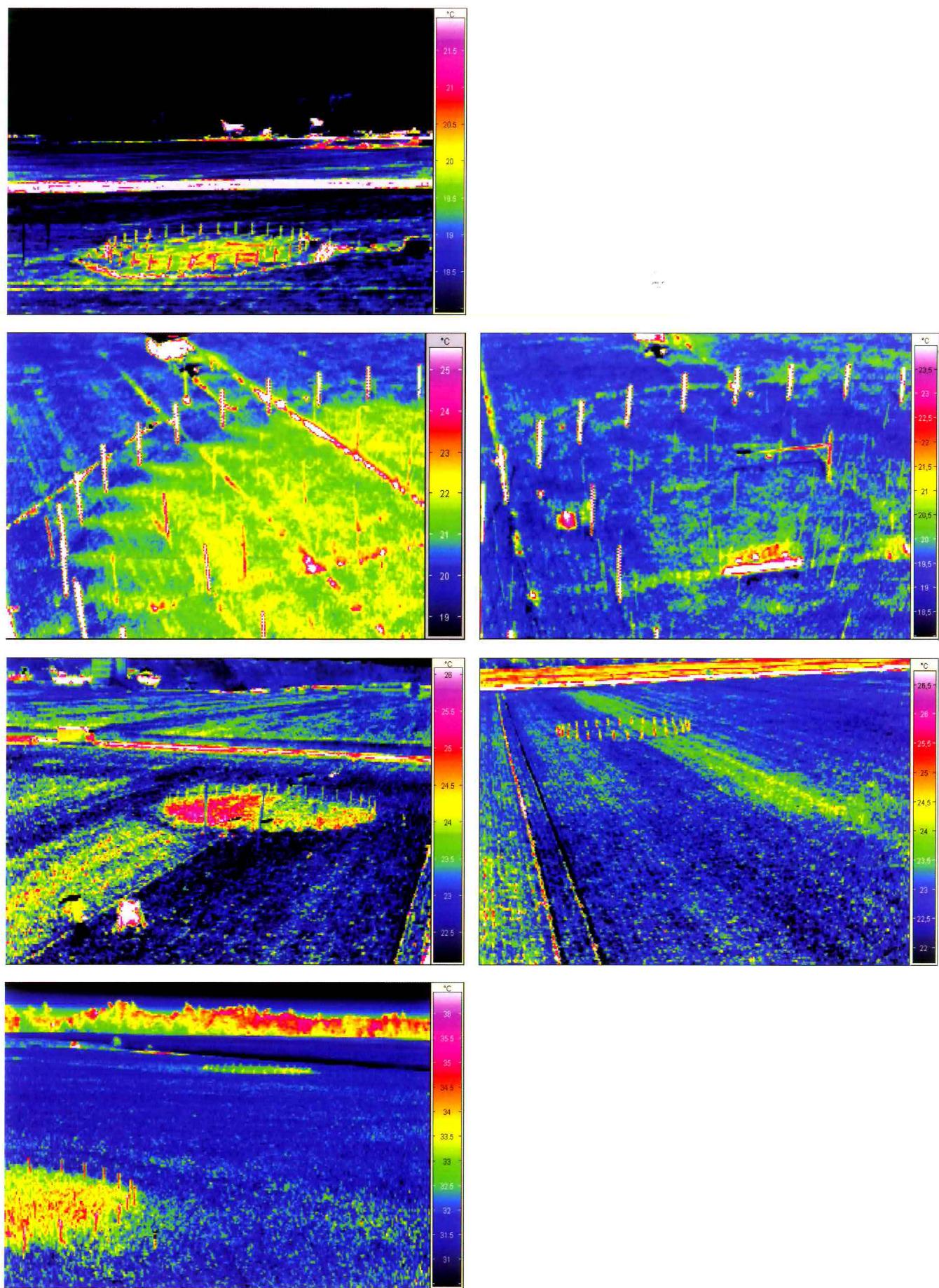


Abb. 3-8: Wärmebilder der Bestandesoberfläche der einzelnen untersuchten Kulturpflanzen unter erhöhter CO₂-Konzentration (von oben nach unten: FACE-Ring mit Wintergerste; Winterweizen in FACE-Ring (links) und in normaler CO₂-Atmosphäre (rechts); Zuckerrübe in FACE-Ring (links) und in normaler CO₂-Atmosphäre (rechts); Maisversuchsfeld mit zwei FACE-Ringen).

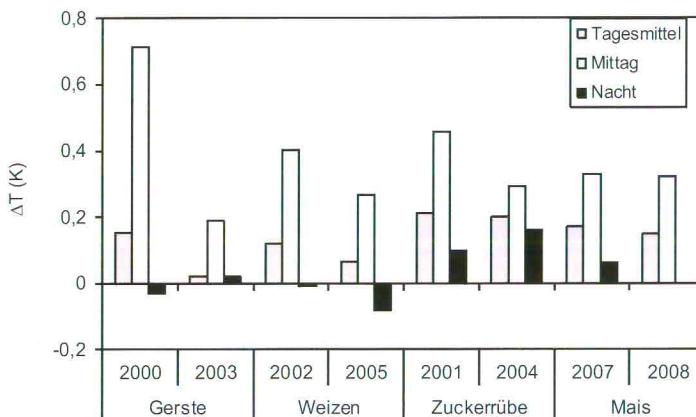


Abb. 3-9: Differenz der Bestandestemperaturen zwischen Versuchsflächen mit erhöhter (550 ppm) und normaler CO₂-Konzentration). Die Temperatur wurde in etwa 70% der Bestandeshöhe gemessen. Angegeben sind das Tagesmittel (0-24 Uhr, Mittagsmittel (11-15 Uhr) und Nachtmittel (23-5 Uhr) für die Kulturpflanzen aus den FACE-Versuchsreihen bis 2008. Die Messwerte für die Fruchtfolge (2000-2005) beziehen sich jeweils auf die ganze Vegetationsperiode und für die Maisversuche (gut bewässerte Variante) auf die Monate Juli bis August.

bisherigen Untersuchungen hat sich nur mit den Wirkungen des CO₂ als Einzelfaktor befasst. Es mangelt aber vor allem an relevanten Feldstudien zur Interaktion verschiedener Klimaelemente. Zukünftig ist beispielsweise in den Sommermonaten verstärkt mit Trockenheit und mit häufigerem Auftreten von Hitzeperioden zu rechnen. Ob und wie die Auswirkungen dieser Stressfaktoren durch mehr CO₂ in der Atmosphäre modifiziert werden, ist eine offene Frage.

Nicht zuletzt wegen der überwiegend negativen Einflüsse der prognostizierten Klimaänderungen (Temperaturanstieg, Trockenheit) auf das Pflanzenwachstum sollte der positive Effekt durch den CO₂-Anstieg möglichst ausgeschöpft werden. Wie oben dargestellt mehren sich bei FACE-Experimenten die Hinweise, dass die heutigen Sorten unserer Kulturpflanzen die theoretisch möglich Steigerung der Photosynthese unter erhöhter CO₂-Konzentration nur zum Teil in Ertragssteigerung umsetzen (LEAKEY et al. 2009). Die Ursachen hierfür sind ver-

mutlich pflanzeninterne Regulationsprozesse, die zu unterschiedlichen Entwicklungsphasen das Wachstum und die Ertragsbildung steuern und in komplexer Weise von der genetischen Ausstattung und den Witterungsbedingungen abhängen. Es sollen daher in Zukunft FACE-Versuche mit möglichst vielen Genotypen einer Pflanzenart durchgeführt werden, um zu prüfen, ob es intraspezifische Variabilität im CO₂-Effekt auf Wachstum und Ertrag gibt. Mit diesem Ansatz sollen die zugrunde liegenden Prozesse ermittelt und der CO₂-Düngereffekt auf den Ertrag optimiert werden.

Am Thünen-Institut für Biodiversität wird beiden Fragestellungen nachgegangen. Laufende Untersuchungen bearbeiten die relative Empfindlichkeit verschiedener Sorghum-Genotypen gegenüber Trockenheit und einer erhöhten CO₂-Konzentration. Ein Feldversuchsprojekt widmet sich weiterhin dem Screening einer hohen Zahl von Gerstegenotypen, um Spannbreiten der Wachstumsreaktionen gegenüber einer CO₂-Anreicherung zu testen. Darüber hinaus wird die Infrastruktur für Untersuchungen zur Interaktion zwischen hohen CO₂-Konzentrationen (FACE) und erhöhten Temperaturen (unter anderem Hitzestress) unter Feldbedingungen aufgebaut, die in 2013 beginnen.

7 Literatur

- AINSWORTH, E., ROGERS, A., 2007: The response of photosynthesis and stomatal conductance to rising CO₂: mechanisms and environmental interactions. *Plant Cell Environ.* **30**, 258–270.
- BURKART, S., MANDERSCHEID, R., WITTICH, K.-P., LÖPMEIER, F. J., WEIGEL, H.-J., 2011: Elevated CO₂ effects on canopy and soil water flux parameters measured using a large chamber in crops grown with free-air CO₂ enrichment. *Plant Biol.* **13**, 258–269.
- EASTERLING, W.E., AGGARWAL, P.K., BATIMA, P., BRANDER, L.M., ERDA, L., HOWDEN, S.M., KIRILENKO, A., MORTON, J., SOUSSANA, J.-F., SCHMIDHUBER, J. ET AL ., 2007: FOOD, FIBRE AND FOREST PRODUCTS. In: PARRY, M.L., CANZIANI, O.F., PALUTIKOF, J.P., VAN DER LINDEN, P.J., HANSON, C.E., Eds. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 273–313.
- ERBS, M., MANDERSCHEID, R., WEIGEL, H.J., 2012: A combined rain shelter and free-air CO₂ enrichment system to study climate change impacts on plants in the field. *MEE* **3**, 81-88.
- HENDREY, G.R., MIGLIETTA, F., 2006: FACE technology: past, present, and future. In: ‘Managed ecosystems and CO₂ case studies, processes, and perspectives’. (Eds J. Nosberger, S.P. Long, R.J. Norby, M. Stitt, G.R. Hendrey, H. Blum), Springer-Verlag, Berlin, pp. 15–43.

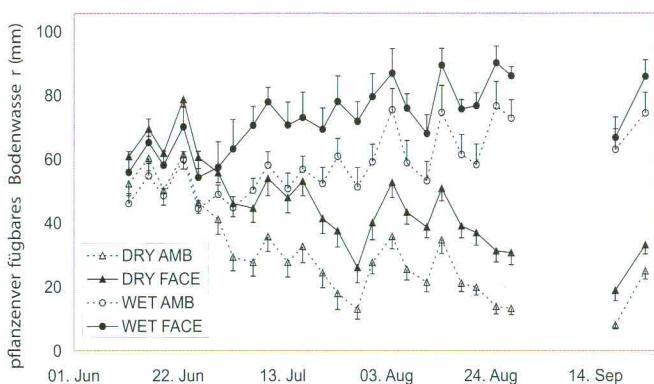


Abb. 3-10: Saisonaler Verlauf des pflanzenverfügbaren Bodenwassers (0-60 cm Tiefe) unter Maisbeständen bei normaler (AMB) und erhöhter CO₂-Konzentration (FACE) sowie mit unterschiedlicher Wasserversorgung ab Anfang Juli (feucht: WET; trocken: DRY).

- LEAKEY, A.D.B., 2009: Rising atmospheric carbon dioxide concentration and the future of C₄ crops for food and fuel. *Proc. R. Soc. Lond. B: Biol. Sci.* **276**, 2333-2343.
- LEAKEY, A.D.B., AINSWORTH, E.A., BERNACCHI, C.J., ROGERS, A., LONG, S.P. AND ORT, D.R., 2009: Elevated CO₂ effects on plant carbon, nitrogen, and water relations: six important lessons from FACE. *J. Exp. Bot.* **60**, 2859-2876.
- MANDERSCHEID, R., PACHOLSKI, A., FRÜHAUF, C., WEIGEL, H.J., 2009: Effects of free air carbon dioxide enrichment and nitrogen supply on growth and yield of winter barley cultivated in a crop rotation. *Field Crops Res.* **110**, 185-196.
- MANDERSCHEID, R., PACHOLSKI, A., WEIGEL, H.J., 2010: Effect of free air carbon dioxide enrichment combined with two nitrogen levels on growth, yield and yield quality of sugar beet: evidence for a sink limitation of beet growth under elevated CO₂. *Eur. J Agron.* **32**, 228-239.
- PETERS, G.P., MARLAND, G., LEQUERE, C., BODEN, T., CANADELL, J.G. , RAUPACH, M.R., 2012: Rapid growth in CO₂ emissions after the 2008–2009 global financial crisis. *Nature Clim. Change* **2**, 2-4.
- TAUB, D.R., MILLER, B., ALLEN, H., 2008: Effects of elevated CO₂ on the protein concentration of food crops: a meta-analysis. *Glob. Change Biol.* **14**, 565-575.
- WIESER, H., MANDERSCHEID, R., ERBS, M., WEIGEL H.J., 2008: Effects of elevated atmospheric CO₂ concentrations on the quantitative protein composition of wheat grain. *J. Agric. Food Chem.* **56**, 6531-6535.