

Hessisches Landesamt  
für Naturschutz, Umwelt und Geologie

Fachzentrum Klimawandel und Anpassung Hessen

HESSEN



# FACE-Experimente: Freiland-CO<sub>2</sub>-Anreicherung in Grünland, Weinberg und Gemüsebau



Klimafolgenforschung in Hessen – Schwerpunktthema



FACHZENTRUM  
KLIMAWANDEL  
UND ANPASSUNG

# Impressum

## Klimawandel in Hessen – Schwerpunktthema

Redaktion: Projektgruppe des LOEWE Schwerpunkts FACE<sub>2</sub>FACE  
Projektleitung: Justus-Liebig-Universität Gießen

Erarbeitung der Broschüre: Gerald Moser, Claudia Kammann,  
Christoph Müller, Marion Hemfler

Layout: Nadine Senkpiel

Herausgeber, © und Vertrieb: Hessisches Landesamt für Naturschutz,  
Umwelt und Geologie  
Fachzentrum Klimawandel und Anpassung Hessen  
Rheingaustraße 186  
65203 Wiesbaden

Telefon: 0611 6939-111

Telefax: 0611 6939-113

E-Mail: [vertrieb@hlnug.hessen.de](mailto:vertrieb@hlnug.hessen.de)

**[www.hlnug.de](http://www.hlnug.de)**

Stand: Korrigierte Auflage, Dezember 2019

Bildnachweis: Umschlagvorderseite: Kollage der drei Freiland CO<sub>2</sub> Anreicherungsanlagen  
in Weinberg und Gemüse (Hochschule Geisenheim University) sowie Grünland  
(Justus-Liebig-Universität Gießen) 2013. © Gerald Moser

Nachdruck - auch auszugsweise - nur mit schriftlicher Genehmigung des Herausgebers.



*Prof. Dr. Thomas Schmid  
Präsident des  
Hessischen Landesamtes  
für Naturschutz, Umwelt  
und Geologie*

Viele Ereignisse in den vergangenen Jahren haben es deutlich gemacht, dass der menschgemachte Klimawandel bereits da ist. Extremereignisse wie Dürren oder Starkregenereignisse und vielfältige Veränderungen der Natur sind allgegenwärtig. Daher ist die Frage einer möglichst guten Anpassung an den Klimawandel überaus drängend, um unsere Lebensgrundlagen auch zukünftig sicherzustellen. Neben den steigenden Temperaturen und der zeitlich und räumlich veränderten Niederschlags-Verteilung spielen dabei auch die steigenden Kohlendioxid-Konzentrationen der Luft eine Rolle. Unter ihrem Einfluss werden sich Ökosysteme verändern. Dies kann gravierende Auswirkungen auf den Agrarbereich und damit auf unsere Ernährungssicherheit haben.

In Hessen gibt es einzigartige Voraussetzungen, um diesen drängenden Fragestellungen nachzugehen. Bereits seit über 20 Jahren werden sie von der Justus-Liebig-Universität und dem Hessischen Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie gemeinsam untersucht. Dies geschieht in großen Freiland-Experimenten, sogenannten FACE-Anlagen, bei denen Grünland mit erhöhten CO<sub>2</sub>-Konzentrationen beaufschlagt wird. Inzwischen ist die erhobene Datenreihe eine der längsten der Welt und hat überragende wissenschaftliche Bedeutung.

Durch die hessische Exzellenz-Initiative LOEWE konnten an der Hochschule Geisenheim weitere FACE-Anlagen zur Untersuchung von Weinreben und Gemüse angelegt werden. Die beteiligten Institute gründeten zusammen mit der Philipps-Universität Marburg und dem Max-Planck-Institut für terrestrische Mikrobiologie den weltweit einzigartigen Forschungsverbund FACE<sub>2</sub>FACE. FACE<sub>2</sub>FACE führte in einem LOEWE-Projekt 2014-2017 umfangreiche Untersuchungen durch, die eine Vielzahl von wichtigen Ergebnissen brachten. In der vorliegenden Broschüre wird versucht, die wichtigsten davon in allgemein verständlicher Form der breiteren Öffentlichkeit vorzustellen.

# LOEWE Schwerpunkt FACE<sub>2</sub>FACE – Folgen des Klimawandels, Anpassung an den Klimawandel und Verminderung der Treibhausgas-Emissionen bis 2050

Im LOEWE-Schwerpunkt FACE<sub>2</sub>FACE werden die Auswirkungen des Klimawandels auf bedeutende Agrarökosysteme erforscht. Ziel von FACE<sub>2</sub>FACE ist es, den Einfluss vor allem von erhöhten atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen, Erwärmung und geänderter Wasserverfügbarkeit auf das Zusammenspiel der Pflanze und ihrer Umwelt zu untersuchen. Es sind vor allem die Reaktionen der Pflanzen und die Auswirkungen auf die Stoffkreisläufe und Produktqualität unter einem sich ändernden Klima, die im FACE<sub>2</sub>FACE Verbund erforscht werden.

Mit dem FACE<sub>2</sub>FACE-Verbund ist ein weltweit einzigartiger Langzeit-Forschungsverbund entstanden, der eine Keimzelle für internationale Kooperationen und sich daraus ergebende Verbundprojekte ist.

Kooperationspartner des Projektes:

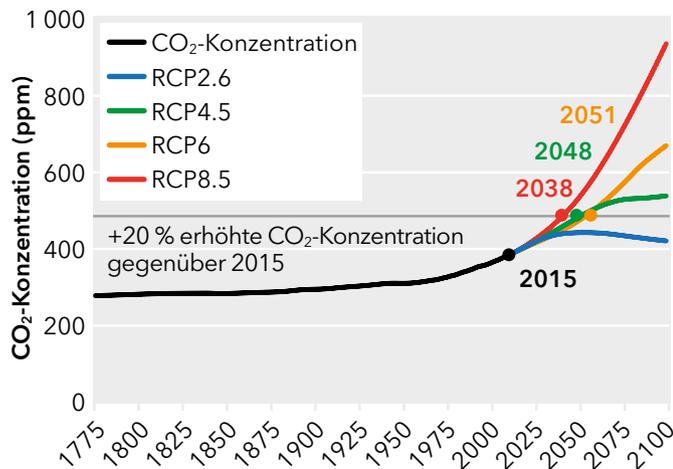
- Justus-Liebig-Universität Gießen (JLU)
- Hochschule Geisenheim University (HGU)
- Philipps-Universität Marburg (PU)
- Max-Planck-Institut für terrestrische Mikrobiologie Marburg (MPItM)
- Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG)



Erwärmungs- und CO<sub>2</sub>-Anreicherungsversuch Gießen T-FACE (Free air Temperature and Free Air CO<sub>2</sub> Enrichment) © Gerald Moser

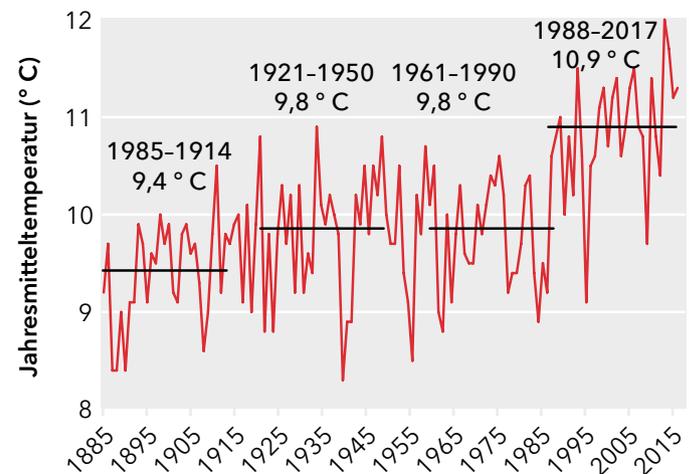
## Blick in die Zukunft des Klimawandels

Die mittlere atmosphärische Konzentration des Treibhausgases Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) stieg von 1750 bis 2017 von 280 ppm auf 406 ppm (+45%). Die direkten Effekte einer zukünftig weiter steigenden atmosphärischen  $\text{CO}_2$ -Konzentration auf Ökosysteme können nur mit Freiland- $\text{CO}_2$ -Anreicherungssystemen untersucht werden, sogenannten FACE (Free Air  $\text{CO}_2$  Enrichment) Experimenten. Im FACE<sub>2</sub>FACE-Schwerpunkt wurde dazu in drei hessischen Anlagen die aktuell herrschende  $\text{CO}_2$ -Konzentration um 20% erhöht, so dass während der Jahre 2014–2017 ein Konzentrations-Niveau erreicht wurde, welches je nach Klimaszenario des Weltklimarates IPCC voraussichtlich zwischen 2038 und 2051 erreicht werden wird.



Historisches globales Mittel der atmosphärischen  $\text{CO}_2$ -Konzentrationen und IPCC-Projektionen (RCP2.6-8.5) Daten: <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trend> and <https://tntcat.iiasa.ac.at:8743/RcpDb>

Die erhöhten atmosphärischen Konzentrationen von  $\text{CO}_2$  und weiteren Treibhausgasen wie z. B. Methan ( $\text{CH}_4$ ) und Lachgas ( $\text{N}_2\text{O}$ ) führten zu einer Erwärmung der Luft. Dies führte zum Beispiel in Geisenheim zur Steigerung der 30-jährigen Mitteltemperatur zwischen den Perioden 1885–1914 und 1988–2017 um 1,5 °C. Der Temperaturanstieg war dabei aber nicht linear. Durch die starke Luftverschmutzung zwischen 1960 und 1990 wurde die Temperaturerhöhung gebremst (*global dimming*). Durch die wirksame Verminderung der Schadstoffemissionen, z. B. von Schwefeldioxid (*global brightening*), kam es in Folge zu einer vorher durch die Schadgase überdeckten raschen Erwärmung.



Jahresmitteltemperatur und 30-jährige Mitteltemperatur in Geisenheim, Daten DWD: <https://www.dwd.de/DE/leistungen/cdcftp/cdcftp.html>

## CO<sub>2</sub>-Anreicherungsanlagen im Grünland ...

Auf der Umweltbeobachtungs- und Klimafolgenforschungsstation Linden südöstlich von Gießen wurde 1998 zur Abschätzung der Auswirkungen der steigenden CO<sub>2</sub>-Konzentration ein Freiland-CO<sub>2</sub>-Anreicherungssystem (= FACE - Free Air CO<sub>2</sub> Enrichment) in Betrieb genommen. Dort werden die Auswirkungen der erhöhten CO<sub>2</sub>-Konzentration auf Grünland untersucht. Grünland ist als Futterquelle für die Viehwirtschaft von großer Bedeutung.

Die Station in Linden wird gemeinsam von der Justus-Liebig-Universität Gießen und dem Hessischen Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie betrieben. Das Freiland-CO<sub>2</sub>-Anreicherungssystem besteht aus je drei Ringen zur CO<sub>2</sub>-Anreicherung und drei Kontrollringen ohne veränderte Luftzusammensetzung mit je 8 m Durchmesser<sup>1</sup>. Es wird verglichen, ob sich der Bewuchs innerhalb der Ringe mit erhöhten CO<sub>2</sub>-Konzentrationen anders entwickelt als in den Kontrollringen. Die CO<sub>2</sub>-Anreicherung wird in Abhängigkeit von Windgeschwindigkeit und -richtung geregelt. Aus den hohen gebogenen Rohren wird so die benötigte Menge mit CO<sub>2</sub> angereicherter Luft nach unten geblasen und vom Wind durch die Ringe verweht. Die Anreicherung erfolgt ganzjährig während der Tageslichtstunden und erreicht eine CO<sub>2</sub>-Konzentration die um 20% höher liegt als die CO<sub>2</sub>-Konzentration in den Kontrollringen.



Gießener Grünland-FACE-Ring (8 m Innendurchmesser)  
© Eva Diehl



Geisheimer Gemüse-FACE-Ringe (12 m Durchmesser)  
© Hochschule Geisenheim

## ... im Gemüsebau und im Weinberg

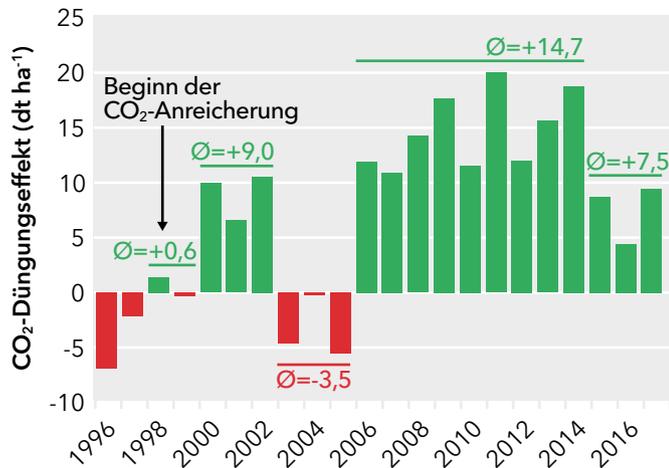
Während der Laufzeit des LOEWE-Schwerpunktes FACE<sub>2</sub>FACE wurde an der Hochschule Geisenheim University das Weinberg-FACE und Gemüse-FACE etabliert. Das Gemüse-FACE beruht auf einer ähnlichen Technik wie das Gießen FACE, allerdings beträgt der Durchmesser jeweils 12 m. Die Bauweise des Weinberg-FACE unterscheidet sich deutlich, da hier die CO<sub>2</sub>-Anreicherung über die gesamte Höhe der Weinreben verteilt werden

muss. Aber auch hier wird die angereicherte Luft von 2 m Höhe nach unten geblasen und über die Ringe mit 12 m Durchmesser verweht. Da in Zukunft in Hessen voraussichtlich trockenere Sommer und feuchtere Winter zur Regel werden, wird im Gemüse auch der Faktor Wasserverfügbarkeit mit untersucht. Ebenfalls neu ist die Kombination aus +20% CO<sub>2</sub> und +2 °C Lufttemperatur im neuen Gießener T-FACE.



Geisenheimer Weinberg-FACE-Ring (12 m Durchmesser) © Winfried Schönbach

# Auswirkungen erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Luft auf die Produktivität im Grünland ...



Einfluss des CO<sub>2</sub>-Düngungseffekts im Gießen FACE auf die Ertragsleistung in Dezitonnen pro Hektar (dt ha<sup>-1</sup>)



Frühling im Gießener Grünland-FACE © Gerald Moser

## Ergebnisse aus über 20 Jahren Forschung

Grundsätzlich können Pflanzen unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentration besser wachsen, da sie über die Fotosynthese mehr Kohlenstoff aufnehmen können. Man spricht deshalb vom sogenannten CO<sub>2</sub>-Düngungseffekt, der zu Ertragssteigerungen führt. Im Gießener Grünland-FACE betrug die jährliche Ertragssteigerung durch den CO<sub>2</sub>-Düngungseffekt über die bisherige Gesamt-Laufzeit des Experiments verglichen mit der Kontrolle im Mittel 8,4 Dezitonnen pro Hektar (dt ha<sup>-1</sup>), von 2006–2014 im Mittel sogar 14,7 dt ha<sup>-1</sup>. Neu ist allerdings die Erkenntnis, dass der CO<sub>2</sub>-Düngungseffekt auf das Pflanzenwachstum sehr von der Witterung abhängt und am stärksten unter mittleren Temperaturen und Niederschlagssummen während der Wachstumsperiode auftritt<sup>2</sup>. Lagen die Temperatur und Bodenfeuchte nennenswert über oder unter dem langjährigen Durchschnitt (z. B. 2015), reduzierte sich der CO<sub>2</sub>-Düngungseffekt. Er kehrte sich im und nach dem trockenen Hitzesommer 2003 sogar ins Negative um. Durch Modellierung konnte gezeigt werden, dass die Biomasseproduktion des untersuchten Grünlandes trotz erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in Zukunft (Mitte 21. Jahrhundert) aufgrund veränderter Klimabedingungen geringer ausfallen wird<sup>3</sup>.

## ... und die Futterqualität

Die chemische Analyse des Grünlandschnitts zeigte eine Abnahme des Energiegehalts, also der „Nährhaftigkeit“ der Pflanzen, die unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentration gewachsen sind. Durch die Abnahme des Energiegehaltes des Futters auf Grund von steigenden CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in der Atmosphäre müssen Kühe in Zukunft mehr Grünfutter fressen, um genügend Energie daraus ziehen

zu können. Das gesteigerte Fressen und damit verbundene Verdauen und Wiederkäuen würde wiederum voraussichtlich zu einer gesteigerten Methanproduktion und dem Ausstoß bei Kühen führen. Unter erhöhtem CO<sub>2</sub> sinkt also der Futterwert bei gleichzeitiger Zunahme klimaschädlicher Gase.



Frühlingsaufwuchs im Giebener Grünland-FACE © Gerald Moser

## Auswirkungen des Klimawandels auf die Vermehrung der Grünlandpflanzenarten ...

Die Zusammensetzung der Pflanzenartengemeinschaft im Gießen-FACE blieb über die 20 Jahre sehr konstant. Es kam zu keinem Artenwandel, allein die Anteile der einzelnen Arten variieren leicht zwischen den Jahren. Im Grünland werden die Pflanzenarten in drei funktionelle Gruppen eingeteilt, und zwar in Gräser, Kräuter und Leguminosen. Unabhängig von der CO<sub>2</sub>-Konzentration verschob sich der Masseanteil dieser Gruppen im gemähten Gras über die 20 Jahre etwas zugunsten

der Kräuter<sup>4</sup>. Bei den Untersuchungen der Pflanzensamen im Boden konnte festgestellt werden, dass es unter erhöhtem CO<sub>2</sub> zu einer Veränderung in der Häufigkeit von Samen der unterschiedlichen Arten kommt. Arten, die sich überwiegend durch langlebige Samen vermehren, besitzen unter erhöhtem CO<sub>2</sub> einen Konkurrenzvorteil gegenüber Arten, die kurzlebige Samen bilden, und sich überwiegend ungeschlechtlich vermehren z. B. durch Ausläufer.



Winter im Gießener Grünland-FACE © Christoph Müller

## ... und die mikrobielle Gemeinschaft auf Blättern und im Boden

Die neuen Erkenntnisse der Forschung zeigten, dass die beiden Faktoren erhöhtes CO<sub>2</sub> und erhöhte Temperatur auch zu signifikanten Veränderungen der Zusammensetzung der Bakterienarten führen, die auf den Blattoberflächen wachsen. Häufige und für die Pflanze vorteilhafte Bakteriengattungen wurden von potentiell pathogenen Bakteriengattungen verdrängt<sup>5</sup>. Es konnte beobachtet werden, dass die geänderte Zusammensetzung der Stoffwechselprodukte der Blätter deutlich mit dem veränderten Stoffwechsel dieser Bakterien korrelierte.

Die Untersuchungen zeigten, dass in nicht durchwurzelten Bodenteilen unter erhöhtem CO<sub>2</sub> die Vielfalt der Pilzartengemeinschaft insgesamt und die der N<sub>2</sub>O-emittierenden Pilzarten signifikant erhöht war und somit zu einem Anstieg der Emissionen des Treibhausgas N<sub>2</sub>O beitragen kann, während sie in durchwurzelten Bodenteilen unverändert geblieben ist. Der kombinierte Effekt von erhöhtem CO<sub>2</sub> und der trockenen Hitzeperiode 2015 führte zu einer deutlichen Verringerung der Häufigkeit von Pilzen im Boden, während die Bakterien-Häufigkeit in Wurzeln und im Boden anstieg. Dadurch werden vielfältige Prozesse im Boden beeinflusst, was zu einer Beeinträchtigung der Nährstoffversorgung der Pflanzen führt.



Elektronenmikroskopische Aufnahme der Bakteriengemeinschaft auf den Blattoberflächen von Glatthafer (links) und dem Weißen Labkraut (rechts) © Ebru Aydogan

## Kippt das Klima durch erhöhte Treibhausgas-Emissionen im Grünland?

In jüngster Zeit ist oft von sogenannten Kippunkten des Klimas die Rede. Gemeint sind Erwärmungsmechanismen, die sich ab einem bestimmten Schwellenwert der Treibhausgaskonzentration selbst verstärken (*positives Feedback*) und sich nicht mehr stoppen oder rückgängig machen lassen. Viele solcher Rückkopplungsmechanismen sind jedoch noch unzureichend bekannt, wie z. B. die Auswirkungen des steigenden CO<sub>2</sub>-Gehalts der Atmosphäre auf die biologischen Bodenprozesse, die Treibhausgase wie Methan (CH<sub>4</sub>) und Lachgas (N<sub>2</sub>O) freisetzen. Diese besitzen über 100 Jahre gerechnet ein 34- bzw. 298-mal größeres globales Erwärmungspotenzial als CO<sub>2</sub>.

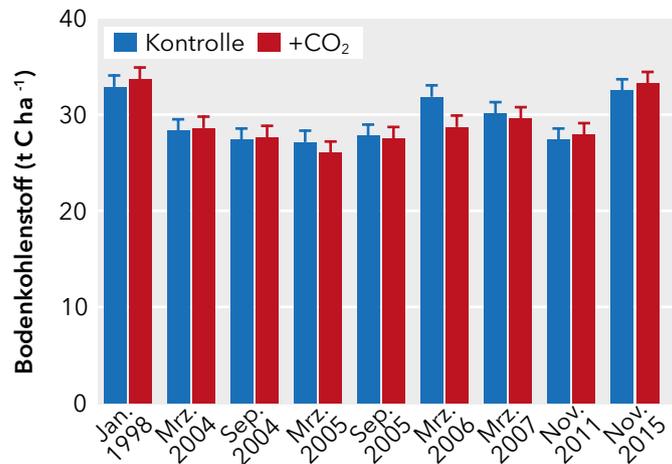
Extensiv bewirtschaftetes Grünland ist mehr oder weniger klimaneutral oder kann sogar eine Senke für Treibhausgase sein, in der der Kohlenstoff im Boden angereichert und gespeichert wird. Der Bodenkohlenstoffvorrat hat sich im Gießen-FACE über die Zeit aber nicht signifikant geändert<sup>6</sup>, so dass kein zusätzliches CO<sub>2</sub> als Kohlenstoff im Boden gespeichert wurde.

Die Ergebnisse der Treibhausgas-Bilanz des Gießen-FACE Grünlandes für den Gesamtzeitraum 1998-2017 zeigen, dass sich unter erhöhtem CO<sub>2</sub> durch erhöhte Ökosystematmung<sup>7</sup>, vermehrte Lachgas-Emissionen u. a. das Grünland zukünftig

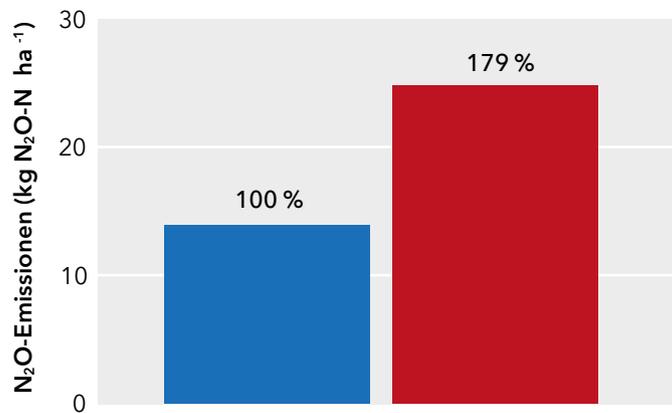
zu einer Treibhausgasquelle entwickelt. Dies ist unter Klimaschutz-Gesichtspunkten sehr kritisch zu sehen und könnte die Klimaerwärmung zusätzlich beschleunigen.



Bodenprofil im Grünland © Gerald Moser



Bodenkohlenstoffvorrat (in Tonnen Kohlenstoff pro Hektar innerhalb der Bodentiefe 0-7,5 cm) über 17 Jahre CO<sub>2</sub>-Anreicherung im Gießen-FACE



Kumulierte Lachgas-Emissionen in kg N<sub>2</sub>O-N pro Hektar über 20 Jahre (1998-2017) der Kontrollflächen (blau) und CO<sub>2</sub>-Anreicherung (rot) im Gießen-FACE Experiment

## Auswirkungen erhöhter Temperatur auf das Grünland

Der Klimawandel wirkt auf Ökosysteme zusätzlich auch durch die Temperaturerhöhung. Um die Auswirkungen von höherer Bodentemperatur auf die Kohlenstoffspeicherung und die Treibhausgasflüsse im Grünland zu untersuchen, wurden von 2007–2014 Infrarot-Lampen genutzt, die in drei verschiedenen Höhen über dem Boden installiert wurden, wodurch eine Temperaturerhöhung der Bodenoberflächen um 1–3 °C simuliert wurde. Die Ergebnisse zeigen bei Erwärmung eine Abnahme des Bodenkohlenstoffgehalts durch erhöhte Bodenatmung und eine Verringerung der N<sub>2</sub>O-Emissionen<sup>10,11</sup>.

Diese Ergebnisse sollten allerdings mit Vorsicht betrachtet werden, da sich beim stattfindenden Klimawandel nicht die Infrarot-Strahlung erhöht (welche vorwiegend zur Erwärmung von Oberflächen führt), sondern die Lufttemperatur steigt. Eine erhöhte Lufttemperatur verursacht aber andere physiologische Reaktionen bei Pflanzen und Bodenmikroorganismen als eine erhöhte Blatt- und Bodenoberflächentemperatur. Deshalb wurde die T-FACE Technik entwickelt, die im Folgenden erläutert wird.



Gießener Erwärmungsexperiment © Jochen Senkbeil

## Kombinationsexperiment Gießen T-FACE

Nach einer intensiven Testphase wurde 2018 auf einer seit 2012 untersuchten Erweiterungsfläche das Kombinationsexperiment im Grünland in Betrieb genommen, bei dem gleichzeitig die Lufttemperatur um 2 °C erwärmt und die atmosphärische CO<sub>2</sub>-Konzentration um 20% angereichert wird (Gießen T-FACE = free air Temperature warming and Free Air CO<sub>2</sub> Enrichment). Die Ringkonstruktionen der neu entwickelten Anlage können in Abhängigkeit von der Windrichtung und -geschwindigkeit die vorbeistreichende Luft mit Heizmatten erwärmen und über Düsen mit CO<sub>2</sub> anreichern.

Die Phänologie der Pflanzen (= periodisch im Jahresverlauf wiederkehrende Wachstums- und Entwicklungsstadien) wird sich voraussichtlich bei der Kombination der Lufterwärmung mit der CO<sub>2</sub>-Anreicherung ändern und die Pflanzen werden mit geänderter Fotosyntheserate und verändertem Wasserhaushalt reagieren. Eine wichtige Forschungsfrage ist dabei, wie groß der CO<sub>2</sub>-Düngungseffekt auf das Pflanzenwachstum bei 2 °C höherer Lufttemperatur sein wird. Außerdem soll geklärt werden, ob der CO<sub>2</sub>- oder der Temperatureffekt auf die N<sub>2</sub>O-Emissionen überwiegt und wie diese und andere Ökosystemreaktionen unter unterschiedlichen Witterungsbedingungen inklusive Extremwetterereignissen wie Hitze und Dürre aussehen werden.



Gießen T-FACE - air Temperature warming and Free Air CO<sub>2</sub> Enrichment, mit +2 °C Lufttemperatur und +20 % CO<sub>2</sub>, Innendurchmesser: 4,3 m, Start 2018; Pfeile = Luftströmung bei Wind, blau = Umgebungstemperatur, rot = +2 °C © Gerald Moser

## Auswirkungen des Klimawandels auf die Reben ...

Im Geisenheimer Weinberg-FACE zeigte sich in den ersten 3 Jahren der 20 %igen CO<sub>2</sub>-Anreicherung, dass erhöhte CO<sub>2</sub>-Gehalte kaum Einfluss auf die phänologische Entwicklung im Jahresverlauf hatten.

Unabhängig von der Rebsorte (Riesling, Cabernet Sauvignon) zeigte sich ab dem zweiten Untersuchungsjahr ein signifikanter CO<sub>2</sub>-Düngeeffekt. Photosyntheserate und Wassernutzungseffizienz auf Blattebene stiegen signifikant an, was zu einer gesteigerten Blatt- und Triebbiomasse und zu

einem bis zu 18% höheren Traubenertrag führte. Das unveränderte Mostgewicht führte bei höherem Ertrag zu einem deutlich höheren Zuckerertrag.<sup>12</sup>

Die Transpiration (Verdunstung) über die Blätter war gegenüber dem Vergleichsring ohne erhöhtes CO<sub>2</sub> erhöht und hängt möglicherweise mit der Standortadaption sowie dem Wasserhaushalt der Rebe zusammen. Unter erhöhtem CO<sub>2</sub> konnte eine verbesserte Wassernutzungseffizienz beobachtet werden.



Weinberg-FACE Panorama © Hochschule Geisenheim



Gaswechselformung an Weinblättern der Sorte Riesling in einem FACE-Ring. Abgebildet ist M. Sc. Yvette Wohlfahrt bei der Messung. © Moustafa Selim

## ... und die Weinqualität

Auch im Weinbau haben Extremwetterereignisse einen signifikanten Einfluss. Im extrem trockenen Jahr 2015 reduzierte sich generell die Gesamt-N-Konzentration als Summe aller stickstoffhaltigen chemischen Verbindungen der Moste, die wichtig für die Qualität des Weins ist, gegenüber 2014. Bei Cabernet Sauvignon-Most aus Trauben, die unter erhöhtem CO<sub>2</sub> wuchsen, zeigte sich in Relation zum Gesamt-N-Gehalt entgegen den Erwartungen eine Steigerung zugunsten des Stickstoffs, der chemisch als sogenanntes Amino-N vorlag. Dieser Amino-N-Anteil beeinflusst wesentlich die alkoholische Gärung durch die Hefen und ist für die Weinqualität besonders wichtig.

Sensorische Untersuchungen bezüglich der Unterscheidbarkeit der Weine oder ihrer Aromen-Intensität ergaben bisher keine qualitativen Unterschiede zwischen den Weinen der ersten drei Jahrgänge, die unter erhöhten CO<sub>2</sub>-Konzentrationen entstanden sind. Es bleibt zu untersuchen, ob sich sensorische Unterschiede bei zukünftigen Weinjahrgängen bzw. während der Alterung der Jahrgänge zeigen. Die geringfügigen Veränderungen, die in der inhaltstofflichen Zusammensetzung von Beeren und Most unter erhöhtem CO<sub>2</sub> auftraten, führten zu keiner qualitativen Veränderung im Wein. Ob sich durch das erhöhte CO<sub>2</sub> die Lagerfähigkeit der FACE-Weine verändert, ist ein weiteres Untersuchungs-Thema.



Weinberg-FACE © Hochschule Geisenheim



Reife Trauben von Riesling (oben) und Cabernet Sauvignon (unten) im Weinberg-FACE vor der Lese © Yvette Wohlfahrt

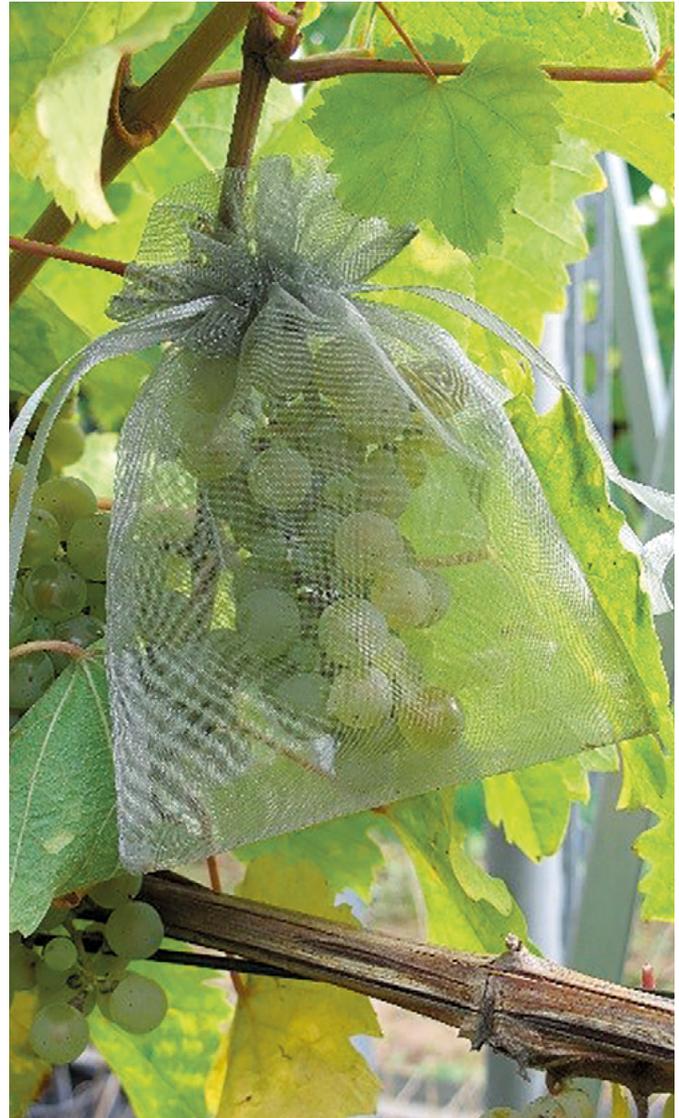
## Auswirkungen des Klimawandels auf die Schaderreger der Reben ...

Riesling-Reben, die unter erhöhtem  $\text{CO}_2$  wachsen, zeigen anatomische Anpassung, indem sie z. B. eine größere Anzahl an Spaltöffnungen (Stomata) bilden. Dies könnte zukünftig eine Infektion durch den Falschen Mehltau begünstigen, allerdings wurde dies bisher noch nicht beobachtet.

Bei der Interaktion von Weinreben mit Schaderregern, wie dem Befall mit Falschem Mehltau und auch nach Fraß durch Larven des Traubenwicklers zeigten die Reben physiologisch eine deutliche Beeinflussung durch die erhöhte  $\text{CO}_2$ -Konzentration: Es wurde die Synthese von pflanzlichen Sekundärstoffwechselprodukten und damit Abwehrreaktionen aktiviert<sup>13</sup>. Die Populationen des Traubenwicklers, eines Schadinsekts, passten sich ebenfalls physiologisch an höhere  $\text{CO}_2$ -Konzentrationen an und zeigten nach mehreren Generationen veränderte Abläufe in der Entwicklungsbiologie, u. a. eine verkürzte Entwicklungsdauer der Larven oder ein höheres Puppengewicht.



Mikroskopische Aufnahme der Blattunterseite eines Rebblattes mit Stomata © Moustafa Selim



Künstliche Infektion von Trauben im Freiland mit Larven des Bekreuzten Traubenwicklers © Moustafa Selim

## ... sowie die mikrobielle Gemeinschaft im Boden und die Treibhausgasflüsse

Es konnte die neue Erkenntnis gewonnen werden, dass erhöhte CO<sub>2</sub>-Konzentrationen im Weinbergboden zu einer unterschiedlichen Artenvielfalt der Pilze in den durchwurzelten und den nicht durchwurzelten Anteilen des Bodens führt.

Die Ergebnisse aus den ersten Jahren zeigten, dass eine erhöhte CO<sub>2</sub>-Konzentration keine Änderung der Treibhausgasbilanz der Weinbergböden bewirkt. Allerdings konnte durch die detaillierte Datenanalyse gezeigt werden, dass unabhängig

von der CO<sub>2</sub>-Konzentration die Begrünung der Rebzeilen zwischen den Rebstöcken zu einer verschlechterten Treibhausgasbilanz gegenüber unbegrünten Rebzeilen führte. So verringerte sich dadurch die Aufnahme von Methan im Boden um 33% und die Abgabe von Lachgas erhöhte sich um 46%. Vermutlich ist der Boden in unbegrünten, offenen Rebzeilen durch regelmäßiges Umbrechen des Bodens besser durchlüftet und es verringert sich dadurch die Bildung von Lachgas.



Geisenheimer Weinberg-FACE © Hochschule Geisenheim

## Auswirkungen des Klimawandels ...

In der Gemüse-FACE Anlage wurde u.a. der Einfluss einer moderat reduzierten Wasserversorgung, wie sie bei Hitze- und Dürreperioden im Zuge des Klimawandels in Zukunft voraussichtlich häufiger auftreten wird, auf die inhaltsstoffliche Zusammensetzung von Feldgemüse innerhalb der FACE-Flächen untersucht. Spinat, Radieschen und Einleggurke als Vertreter von Blatt-, Wurzel- und Fruchtgemüse wurden zum Teil mehrmals im Jahr kultiviert. Bereits eine geringe Reduzierung der verfügbaren Wassermenge führte zu deutlichen

Veränderungen der Inhaltsstoffe der Ernteprodukte. Diese Veränderungen führten bei allen drei Gemüsen zu deutlichen Änderungen der Qualität, die sich auf die Weiterverarbeitung, den Gehalt essentieller Nährstoffe und den Geschmack auswirken kann. Durch den geringeren Wassergehalt der geernteten Gemüse bei reduzierter Wasserverfügbarkeit erhöht sich die Konzentration der Inhaltsstoffe. Ergebnisse zum Effekt erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentration auf den Ertrag und die Qualität von Gemüse liegen noch nicht vor.



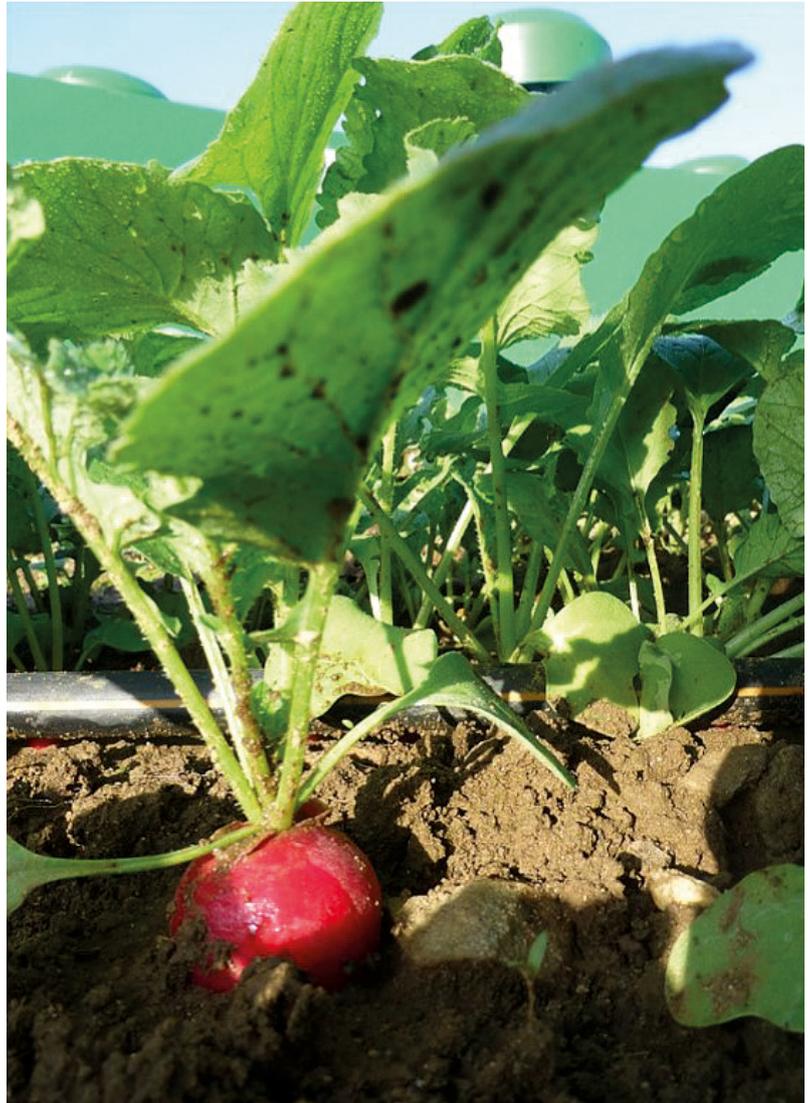
Geisenheimer Gemüse-FACE, dahinter das Weinberg-FACE  
© Hochschule Geisenheim



Messungen und Arbeiten in den Gemüse-FACE-Ringen, Benjamin Spehle im Vordergrund, Viktor Rempel links, Uwe Loos hinten  
© Hannah-Rebecca Klostermann

Eine umfassende Literaturanalyse hat gezeigt, dass im geschützten Anbau eine sehr starke Reaktion auf die erhöhte  $\text{CO}_2$ -Konzentration zu beobachten ist. Sie wird in der Reihenfolge Blattgemüse  $\rightarrow$  Knollen- & Blütengemüse  $\rightarrow$  Fruchtgemüse geringer. Diese Erkenntnisse deuten darauf hin, dass die Höhe der Aufnahmekapazität der Gemüsepflanzen für zusätzliches  $\text{CO}_2$  und die Fixierung in Form von Zucker aus der gesteigerten Photosynthese die Reaktion der Pflanzen bestimmt.

Versuche im Labor haben gezeigt, dass Einlegegurken im vegetativen Stadium bei guter Wasserversorgung nahezu keinen  $\text{CO}_2$ -Effekt auf die Blattgrößen zeigen. Bei einer reduzierten Wasserverfügbarkeit ändert sich aber das Längen- zu Breitenverhältnis der Blätter. Dies und weitere negative Auswirkungen schlechterer Wasserversorgung auf die Pflanze kann durch erhöhtes  $\text{CO}_2$  vermindert werden. Eine erhöhte  $\text{CO}_2$ -Konzentration der Luft fördert den Gesamtblattflächenzuwachs.



*Radieschen im Gemüse-FACE © Hannah-Rebecca Klostermann*

## Fazit

Die hessischen FACE-Untersuchungen zeigen auf, dass die Auswirkungen der erhöhten  $\text{CO}_2$ -Konzentrationen, wie sie durch den von Menschen gemachten Klimawandel bereits zur Mitte dieses Jahrhunderts zu erwarten sind, erhebliche Auswirkungen auf die verschiedenen Agrar-Ökosysteme und damit auf die Nahrungsmittelsicherheit der Menschen haben werden. Auf der einen Seite können steigende Erträge positiv sein. Auf der ande-

ren Seite stellen sinkende Futtermittel-Qualitäten des Grünlands, schlechtere Nährstoff-Versorgung und erhöhte Infektionsanfälligkeit von Pflanzen oder die schnellere Vermehrung von Schädlingen Herausforderungen dar, für die Anpassungsstrategien gefunden werden müssen. Dazu kommen die deutlich zunehmenden Emissionen klimaschädlicher Treibhausgase, die sehr kritisch zu sehen sind.



Luftbildaufnahme der Gießener Freiland  $\text{CO}_2$ -Anreicherungsexperimente GiFACE (Giessen Free Air  $\text{CO}_2$  Enrichment) im Vordergrund und T-FACE (Free Air Temperature and Free Air  $\text{CO}_2$  Enrichment) im Hintergrund © Sebastian Egli 2018

# Internetseiten, Literatur und Quellen

## Internetseiten

Projektseite des LOEWE-Schwerpunkts FACE<sub>2</sub>FACE  
[http://www.FACE<sub>2</sub>FACE.center](http://www.FACE2FACE.center)

Projektseite des LOEWE-Schwerpunkts FACE<sub>2</sub>FACE bei ProLOEWE [http://www.proloewe.de/FACE<sub>2</sub>FACE](http://www.proloewe.de/FACE2FACE)

Ergebnispräsentationen des FACE<sub>2</sub>FACE Schwerpunktes am 10.10.2017 in Geisenheim im Beisein der Hessischen Umweltministerin Priska Hinz durch das Fachzentrum Klimawandel Hessen des Hessischen Landesamtes für Naturschutz, Umwelt und Geologie.

[https://www.hlnug.de/themen/klimawandel-und-anpassung/veranstaltungsarchiv/FACE<sub>2</sub>FACE.html](https://www.hlnug.de/themen/klimawandel-und-anpassung/veranstaltungsarchiv/FACE2FACE.html)

## Literatur

- <sup>1)</sup> JÄGER et al. (2003) Journal of Applied Botany, 77, 117-127
- <sup>2)</sup> OBERMEIER et al. (2017) Nature Climate Change 7: 137-141. DOI: 10.1038/NCLIMATE3191
- <sup>3)</sup> OBERMEIER et al. (2018) Earths Future, DOI: 10.1029/2018EF000833
- <sup>4)</sup> ANDRESEN et al. (2018) Global Change Biology DOI: 10.1111/gcb.13705
- <sup>5)</sup> AYDOĞAN et al. (2018) Frontiers in Microbiology. 9: p. 144. DOI: 10.3389/fmicb.2018.00144
- <sup>6)</sup> KEIDEL et al. (2018) Soil Biology & Biochemistry 123: 145-154. DOI: 10.1016/j.soilbio.2018.05.005
- <sup>7)</sup> KEIDEL et al. (2015) Biogeosciences 12: 1257-1269. DOI: 10.5194/bg-12-1257-2015
- <sup>8)</sup> MOSER et al. (2018) Global Change Biology. DOI: 10.1111/gcb.14136
- <sup>9)</sup> KARBİN et al. (2015) Plos ONE, DOI: 10.1371/journal.pone.0131665
- <sup>10)</sup> JANSEN-WILLEMS et al. (2016) Ecology and Evolution. 6(21): p. 7856-7868. DOI: 10.1002/ece3.2210
- <sup>11)</sup> JANSEN-WILLEMS (2016) Soil. 2: p. 601-614. DOI: 10.5194/soil-2-601-2016
- <sup>12)</sup> WÖHLFAHRT, Y., SMITH, J.P., TITTMANN, S., HONERMEIER, B., STOLL, M., 2018. Primary productivity and physiological responses of *Vitis vinifera* L. cvs. under Free Air Carbon

dioxide Enrichment (FACE). European Journal of Agronomy 101, 149-162.

- <sup>13)</sup> REINEKE, A., SELIM, M., 2019. Elevated atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations alter grapevine (*Vitis vinifera*) systemic transcriptional response to European grapevine moth (*Lobesia botrana*) herbivory. Scientific Reports 9, 2995.

## Beteiligte Personen

### FACE<sub>2</sub>FACE-Leitung:

Christoph Müller, Jürg Luterbacher, Hans Reiner Schultz

### FACE<sub>2</sub>FACE Mitglieder der Justus-Liebig-Universität Gießen:

Lutz Breuer, Ludger Grünhage, Peter Kämpfer, Karl-Heinz Kogel, Annette Otte, Sylvia Schnell, Volker Wissemann, Hans-Peter Ziemek, Louise Andresen, Martin Erbs, Tobias Donath, Stefanie Glaeser, Philipp Kraft, Amanda Lima, Gerald Moser, Naiming Yuan, Ebru Aydoğan, Cécile Guillet, Mi-Kyung Ha, Juliane Keller, Ralf Liebermann, Corinna Maisinger, Ruben Seibert, Andreas Brück, Birte Lenz, Gerhard Maier, Siegfried Schmidt, Lara Seehawer, Jochen Senkbeil, Wolfgang Stein, Till Strohbush

### FACE<sub>2</sub>FACE Mitglieder der Hochschule Geisenheim University:

Beate Berkelmann-Löhnertz, Helmut Dietrich, Katrin Kahlen, Otmar Löhnertz, Annette Reineke, Manfred Stoll, Jana Zinkernagel, Claudia Kammann, Moustafa Selim, Antje Berlebach, Felix Eiserlo, Hannah-Rebecca Klostermann, Christine Schlering, Yvette Wohlfahrt

### FACE<sub>2</sub>FACE Mitglieder der Philipps-Universität Marburg:

Jörg Bendix, Lukas Lehnert, Maik Dobermann, Wolfgang Obermeier

### FACE<sub>2</sub>FACE Mitglieder des Max-Planck-Instituts für terrestrische Mikrobiologie Marburg:

Werner Liesack, Qicheng Bei, Xiaohong Wu

### FACE<sub>2</sub>FACE Mitglieder des Hessischen Landesamtes für Naturschutz, Umwelt und Geologie:

Thomas Schmid, Marion Hemfler



Hessisches Landesamt für  
Naturschutz, Umwelt und Geologie  
Für eine lebenswerte Zukunft

