

Gießener Freiland-CO₂-Anreicherungsexperiment (GiFACE): Treibhausgas-Bilanz

Seit Mai 1998 läuft auf der Umweltbeobachtungs- und Klimafolgenforschungsstation Linden, die gemeinsam vom Institut für Pflanzenökologie der Justus-Liebig-Universität Gießen und dem Hessischen Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie betrieben wird, ein Freiland-CO₂-Anreicherungsexperiment (GiFACE; Giessen Free-Air Carbon dioxide Enrichment).



Luftbildaufnahme der Forschungsstation (© HLNUG)

Seit nunmehr 20 Jahren werden drei Ringe mit Kohlendioxid (CO₂)-Anreicherung und drei Kontrollringe untersucht, um die ökosystemaren Auswirkungen der steigenden CO₂-Konzentrationen abzuschätzen. Die in Abhängigkeit von Windgeschwindigkeit und Windrichtung geregelte CO₂-Anreicherung erfolgt ganzjährig während der Tageslichtstunden, in denen die CO₂-Konzentration um +20 % gegenüber der jeweils aktuell herrschenden CO₂-Konzentration auf ein Niveau angehoben wird, welches in der Umgebungsluft voraussichtlich 2035 bis 2045 erreicht wird.

Klimawandel

1998 lag die durchschnittliche atmosphärische CO₂-Konzentration weltweit noch bei etwa 370 ppm (parts per million = Teile pro Million). Mittlerweile hat der weltweite Durchschnittswert die 400 ppm überschritten und lag 2017 bei 406 ppm CO₂. Zwischen 2007 und 2017 betrug die durchschnittliche jährliche Zunahme der klimarelevanten Gase für CO₂ 2,3 ppm, für Methan (CH₄) 4,7 ppb (parts per billion = Teile pro Milliarde) und für Lachgas (N₂O) 0,9 ppb. Diese Konzentrationserhöhung der Treib-

hausgase (THG) in der Atmosphäre führt zu einem erhöhten Wärmerückhaltevermögen. Dies bedeutet wiederum, dass sich der natürliche Treibhauseffekt verstärkt und es dadurch zur globalen Erwärmung bzw. zum Klimawandel kommt.



Gießener Freiland-CO₂-Anreicherungssystem (GiFACE), Ringe mit 8 m Innendurchmesser

Treibhausgasflüsse im Ökosystem

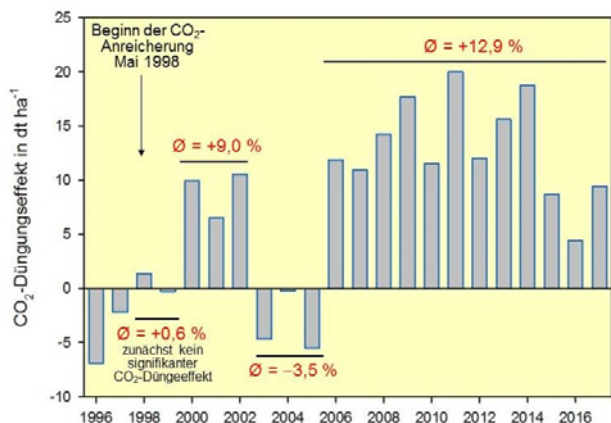
Bei der Ermittlung der Treibhausgas-Flüsse werden die Ökosystemflüsse der mengenmäßig bedeutendsten Klimagase CO₂, N₂O und CH₄ einbezogen, wobei Lachgas und Methan in CO₂-Äquivalente umgerechnet und entsprechend ihrem Treibhauspotential über 100 Jahre (GWP = Global Warming Potential) gewichtet werden. Die Wirksamkeit von CH₄ liegt 34mal über der von CO₂. Für N₂O liegt der Faktor sogar bei 298. Die THG-Bilanz dient zur Abschätzung der THG-Netto-Flüsse eines Ökosystems. Daraus wird ersichtlich, ob das Ökosystem eine Quelle oder eine Senke für Treibhausgase ist.

Im GiFACE werden die Treibhausgasflüsse des dortigen Grünlandökosystems untersucht. Dazu wird gemessen, wieviel CO₂, N₂O und CH₄ aus dem Ökosystem in die Atmosphäre strömt bzw. vom Ökosystem aus der Atmosphäre aufgenommen wird. Es wird angenommen, dass im Ökosystem unter erhöhten atmosphärischen CO₂-Konzentrationen der Kohlenstoffkreislauf und der daran gekoppelte Stickstoffkreislauf beeinflusst werden und sich damit auch die THG-Flüsse und -Bilanz verändern.

GiFACE-Ergebnisse

Ertrag

Pflanzen können in der Regel bei höheren CO₂-Konzentrationen mehr CO₂ bei der Fotosynthese aufnehmen und so durch den sogenannten CO₂-Düngungseffekt besser wachsen. Die jährliche Ertragssteigerung unter erhöhtem CO₂ im GiFACE betrug über die 20 Jahre des Experiments im Mittel 8,4 % verglichen mit der Kontrolle, von 2006–2017 war sie im Mittel 12,9 % (siehe Abb. unten). Es dauerte einige Jahre, bis ein stabiler CO₂-Düngungseffekt auftrat, der aber stark witterungsabhängig war und v.a. von den mittleren Temperaturen und Niederschlagssummen während der Wachstumsperiode beeinflusst wurde (Obermeier et al. 2017). Lagen die Temperatur und Bodenfeuchte signifikant über oder unter dem langjährigen Durchschnitt, reduzierte sich der CO₂-Düngungseffekt. Er kehrte sich im und nach dem trockenen Hitzesommer 2003 sogar ins Negative um (Andresen et al. 2018).



Einfluss des CO₂-Düngungseffekts auf die Ertragsleistung (in Dezentonnen pro ha)

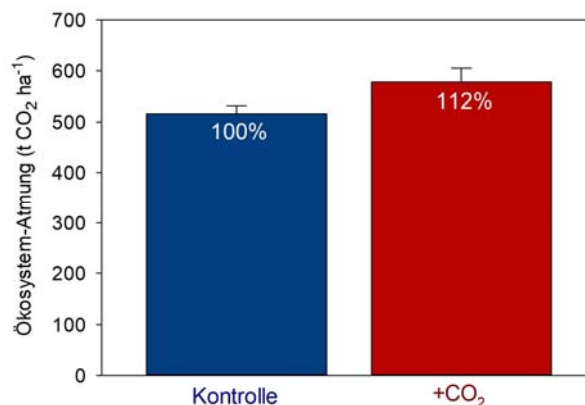
Die Konzentration von Stickstoff (N) im Pflanzengewebe sank (eine normale Reaktion unter erhöhtem CO₂), d.h. der Pflanzenbestand baute mit der gleichen Menge N mehr Ertrag auf (im Mittel 7,1 statt 6,5 t Biomasse ha⁻¹ a⁻¹). Ein Grund für die sinkende N-Konzentration des Gesamtbestandes war die Zunahme des Anteils der Gräser auf Kosten der Kräuter. Hiermit ergeben sich auch Änderungen der Futtermittelqualität des Mahdguts.

Kohlendioxid (CO₂)

Die mittlere Ertragssteigerung zeigt, dass zunächst vermehrt CO₂ in die Pflanzenbiomasse gebunden wird. CO₂ wird während der Vegetationsperiode in den Tageslichtstunden bei der Fotosynthese von Pflanzen assimiliert und dann in die Biomasse eingebaut, jedoch bei Nacht in geringeren Mengen auch wieder durch Atmung an die Atmosphäre abgege-

ben. Im GiFACE wird seit Beginn des Experiments sowohl die nächtliche CO₂-Abgabe (= Ökosystematmung – emittiertes CO₂ aus Boden und Pflanze) als auch die reine Bodenatmung (Mikroorganismen und Pflanzenwurzeln) gemessen.

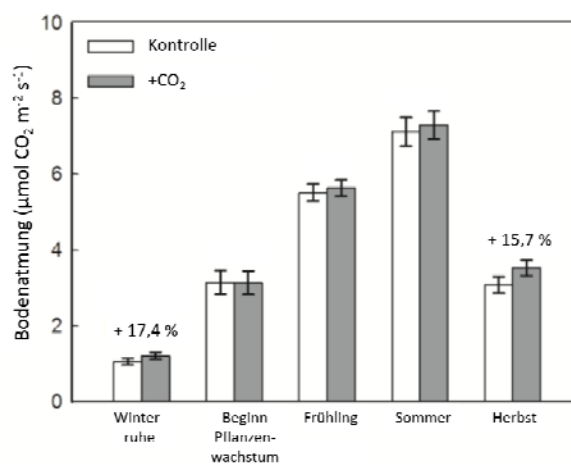
Die langjährige Beobachtung zeigt, dass die nächtliche Ökosystematmung während des ganzen Messzeitraumes unter erhöhtem CO₂ immer höher als die Kontrolle war.



Kumulierte nächtliche Ökosystematmung des Grünlands über den gesamten Zeitraum des Experiments (1998–2017)

Die Messung der Bodenatmung über mehrere Jahre (2008–2010) zeigte, dass im Herbst und Winter die Bodenatmung unter erhöhtem CO₂ signifikant höher lag als unter aktuellem CO₂ (Keidel et al. 2015).

Zur Berechnung der Treibhausgasbilanz ist die Berücksichtigung der CO₂-Flüsse während der Herbst- und Wintermonate von Bedeutung, da eine erhöhte Bodenatmung das globale CO₂-Konzentrationsmaximum in der Atmosphäre im Winter noch weiter erhöhen kann.



Bodenatmung zu verschiedenen Jahreszeiten für 3 Untersuchungsjahre (2008–2010) (aus Keidel et al., 2015)

Somit zeigen diese Beobachtungen, dass das CO₂, welches unter erhöhter CO₂-Konzentration vermehrt durch die Fotosynthese in Biomasse gebunden wur-

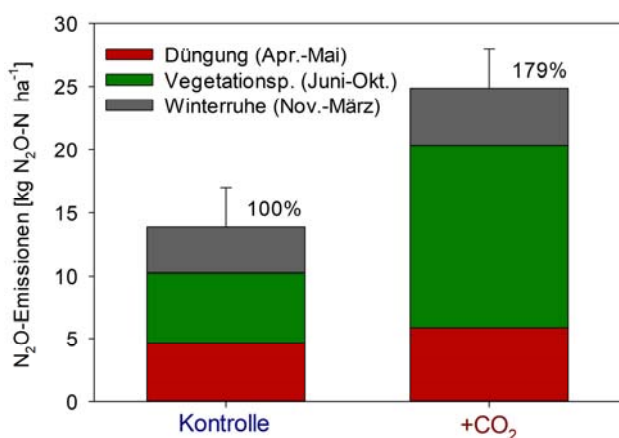
de, aus dem Ökosystem schnell wieder zurück in die Atmosphäre gelangte und nicht langfristig im Ökosystem gespeichert wurde.

Eine grobe Bilanzierung der nächtlichen Ökosystematmung nach 20 Jahren Laufzeit des GiFACE-Experiments ergibt eine Summe von 578 t CO₂ pro ha unter erhöhtem CO₂ und von 516 t CO₂ pro ha bei der Kontrolle. Das entspricht etwa 30 t CO₂ pro ha im Jahr unter erhöhtem CO₂ und 27 t CO₂ pro ha im Jahr bei der Kontrolle.

Lachgas (N₂O)

Lachgas entsteht weltweit in terrestrischen Böden durch mikrobielle Prozesse (u.a. Nitrifikation und Denitrifikation), vor allem nach der N-Düngung.

Entgegen den Erwartungen war eine starke Zunahme der N₂O-Abgabe unter erhöhtem CO₂ zu verzeichnen. Nach den ersten drei bis vier Jahren war dieser Effekt noch nicht nachweisbar – ein weiteres Argument für Langzeitstudien.



Kumulierte Lachgas-Emissionen über 20 Jahre (1998–2017)

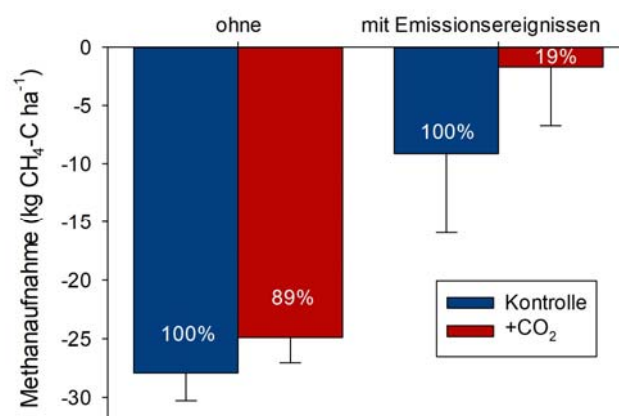
Die Stimulation der N₂O-Emissionen trat selten direkt nach der N-Düngung im April auf, sondern vor allem während der weiteren Vegetationsperiode. Sowohl die erhöhten Bodenatmungsraten (siehe S. 2) als auch die erhöhten N₂O-Emissionen im Spätsommer und Herbst unter erhöhtem CO₂ deuten auf eine verstärkte Aktivität von Mikroorganismen im Boden hin. Diese Mikroorganismen werden vermutlich von energiereichen Kohlenstoffverbindungen der Pflanzen stimuliert, welche unter erhöhtem CO₂ in vermehrtem Umfang verfügbar werden. Somit erhöhen sich in Folge die Raten der Mineralisation, Nitrifikation und Denitrifikation und damit die unter erhöhtem CO₂ zusätzlich abgegebene N₂O-Menge (Moser et al. 2018).

Die Bilanzierung der N₂O-Flüsse zeigt höhere Treibhausgas-Emissionen unter erhöhtem CO₂ (+5,1 t CO₂-Äquivalente pro ha über 20 Jahre bzw. +0,3 t CO₂-Äquivalente pro ha und Jahr) als bei der Kontrolle.

Methan (CH₄)

CH₄ wird aus organischer Substanz durch methanogene Archaeen (einzellige Mikroorganismen) unter sauerstofffreien Bedingungen gebildet, wie z. B. in Reisfeldern, Wiederkäuer-Mägen, Sümpfen, Mülldeponien und Biogasanlagen, aber auch in wassergefüllten Bodenporen oder im Grundwasserbereich. In gut durchlüfteten Böden, wie es im GiFACE im Oberboden der Fall ist, wird hingegen atmosphärisches Methan von methanotrophen Bakterien konsumiert und so der Atmosphäre entzogen (=THG-Senke).

Unter erhöhtem CO₂ verminderte sich langfristig die CH₄-Aufnahme in den Boden. Besonders nach starken Sommerniederschlägen (z.B. 2002) wurden über den gesamten Zeitraum des Experiments zudem einzelne hohe CH₄-Emissionsereignisse beobachtet, die unter erhöhtem CO₂ deutlich stärker ausfielen.



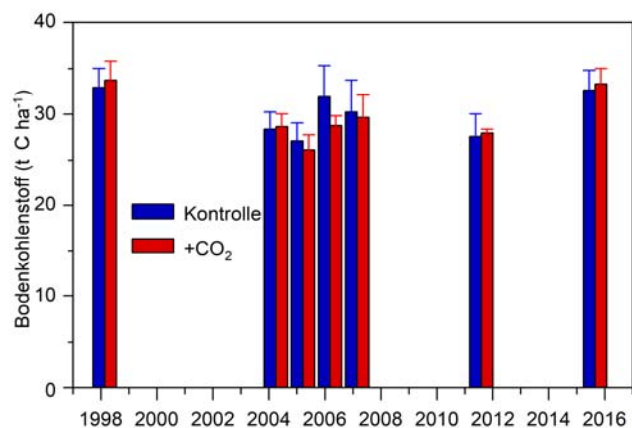
Kumulierte Methanaufnahme in den Böden mit und ohne Berücksichtigung der Emissionsereignisse (1998–2017)

Das tatsächliche Ausmaß der CH₄-Emissionen ist mit den bisherigen Untersuchungsmethoden nicht eindeutig feststellbar, so dass eine konkrete Bilanzierung schwerfällt. Bei Berücksichtigung dieser ungewöhnlich hohen Emissionsereignisse nimmt die Fähigkeit des Bodens Methan zu binden stark ab, und der Unterschied zwischen Kontrolle und erhöhtem CO₂ wird größer. Umgerechnet in CO₂-Äquivalente liegt die Spanne der Methanaufnahme für den gesamten Messzeitraum unter erhöhtem CO₂ zwischen 0,2 und 3 t CO₂-Äquivalenten pro ha, bei der Kontrolle zwischen 1,1 und 3,5 t CO₂-Äquivalenten pro ha.

Treibhausgas-Bilanz

Für die THG-Bilanz (in CO₂-Äquivalenten) werden alle Spurengasflüsse und Änderungen der in Pflanzen und Boden gebundenen Kohlenstoffmengen einbezogen.

Die Emissionen der Treibhausgase CO₂ und N₂O und die kurzfristig in Pflanzen gebundene Kohlenstoffmenge in der geernteten Biomasse nahmen im Mittel unter erhöhtem CO₂ zu, die ökosystemare Aufnahme von CH₄ nahm ab, während es zu keiner signifikanten Änderung des im Boden gespeicherten Kohlenstoffs (C) kam (Keidel et al. 2018).



Bodenkohlenstoffvorrat (0–7,5 cm Tiefe) über 17 Jahre CO₂-Anreicherung

Somit ist nur die Veränderung der THG-Flüsse relevant. Unter erhöhtem CO₂ nahmen die CO₂-Emissionen im Durchschnitt um 3,2 t CO₂ pro ha und Jahr zu, die N₂O-Emissionen stiegen im Schnitt um 0,3 t CO₂-Äquivalente pro ha und Jahr, und die CH₄-Aufnahme nahm um 0,5–0,9 t CO₂-Äquivalente pro ha und Jahr ab. Somit wird das Gießener Grünland unter zukünftigen atmosphärischen CO₂-Bedingungen voraussichtlich zur THG-Quelle von zusätzlich 4,0–4,4 t CO₂-Äquivalenten pro ha und Jahr im Vergleich zu heute. Auf die deutschlandweite Grünlandfläche hochgerechnet entspräche das in etwa dem Ausstoß von zusätzlich 5 bis 8 Mio. PKWs allein in Deutschland.

Fazit

Steigende CO₂-Konzentrationen verschlechtern die Treibhausgas-Bilanz des Grünlands. Die Natur wird uns nicht helfen, den Anstieg der atmosphärischen CO₂-Konzentration zu bremsen.

Seit Beginn der Klimawandelfolgen-Forschung bestand die Hoffnung, dass die Ökosysteme über den CO₂-Düngungseffekt und über höhere Kohlenstoffspeicherung in Böden ihre THG-Senkenfunktion für Treibhausgase verstärken. Die Ergebnisse zeigen aber, dass durch die Zunahme der Extremwetterereignisse, wie Hitze- und Dürreperioden, der CO₂-Düngungseffekt reduziert wird. Die erhoffte Zunahme der C-Speicherung im Boden unter erhöhtem CO₂ wurde auch nicht erfüllt. Die THG-Emissionszunahme (+4,0–4,4 t CO₂-Äquivalente pro

ha und Jahr) wurde nicht durch erhöhte Biomasserträge (+0,6 t Biomasse pro ha und Jahr, entspricht +1 t CO₂ pro ha und Jahr) ausgeglichen.

Grundsätzlich ist extensiv bewirtschaftetes Grünland aktuell mehr oder weniger klimaneutral, zukünftig wird es aber voraussichtlich zu einer THG-Quelle werden. Um dem entgegenzuwirken, muss durch geeignete Bewirtschaftungsmaßnahmen (z.B. Erhöhung des Humusanteils durch weniger Pflügen oder Biokohleeinsatz) deutlich mehr Kohlenstoff langfristig im Boden gespeichert werden, um so die THG-Emissionen auszugleichen.

Aufgaben der nächsten Jahre

- Weiteres Langzeitmonitoring (Ertragsleistung, Bodenkohlenstoff, C- und N-Flüsse, THG-Bilanzen)
- Implementierung des Kombinationsexperiments zu erhöhter Temperatur und CO₂-Konzentration im neuen Forschungsprojekt Giessen T-FACE und Untersuchung des Einflusses auf die C- und N-Kreisläufe sowie die Phänologie der Pflanzen
- Untersuchung des Wurzelwachstums und des Wurzelabbaus in beiden FACE-Systemen
- Untersuchungen zum Prozessverständnis der THG-Flüsse und Aufklärung der Mechanismen
- Erstellung von Modellen zur Abschätzung der zukünftig zu erwartenden Veränderungen auf ökosystemarer Ebene

Literatur:

- Andresen et al. (2018) *Global Change Biology* (DOI: [10.1111/gcb.13705](https://doi.org/10.1111/gcb.13705)).
- Keidel et al. (2015) *Biogeosciences* 12: 1257-1269.
- Keidel et al. (2018) *Soil Biology & Biochemistry* 123: 145-154.
- Moser et al. (2018) *Global Change Biology* (DOI: [10.1111/gcb.14136](https://doi.org/10.1111/gcb.14136)).
- Obermeier et al. (2017) *Nature Climate Change* 7: 137-141.

Impressum

Bearbeitung: Dr. G. Moser, Dr. M. Deppe, C. Guillet, Chr. Eckhardt, R. Seibert, L. Keidel, Prof. Dr. L. Grünhage, Prof. Chr. Müller PhD (Justus-Liebig-Universität Gießen)
Prof. Dr. C. Kammann (Hochschule Geisenheim University)
Dr. M. Hemfler, Dr. C. Fookan (HLNUG)

Stand: Mai 2018

Herausgeber:
Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie
Postfach 3209, 65022 Wiesbaden
Telefon: 0611/6939-0
Telefax: 0611/6939-555