

Klimasymposium 2014

Grünland im Klimawandel: Szenarien, Prozesse, Forschungsansätze

16. Oktober 2014

HBLFA Raumberg-Gumpenstein

Seminarraum Gumpenstein



MINISTERIUM
FÜR EIN
LEBENSWERTES
ÖSTERREICH

HBLFA RAUMBERG - GUMPENSTEIN
LANDWIRTSCHAFT

www.raumberg-gumpenstein.at



Impressum

Herausgeber

Höhere Bundeslehr- und Forschungsanstalt
Raumberg-Gumpenstein, A-8952 IRDNING
des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft,
Umwelt und Wasserwirtschaft

Direktor

Dr. Anton HAUSLEITNER

Organisation

Univ.-Doz. Dr. Erich M. PÖTSCH
Theresia RIEDER

Für den Inhalt verantwortlich

die Autoren

Redaktion

Sandra PLEININGER
Brunhilde EGGER

Druck, Verlag und © 2014

Höhere Bundeslehr- und Forschungsanstalt
Raumberg-Gumpenstein, A-8952 IRDNING

Programm

Donnerstag, 16. Oktober 2014

- 10.15 Eröffnung und Begrüßung
Dir. Mag. Dr. Anton HAUSLEITNER, HBLFA Raumberg-Gumpenstein
- 10.30 Klimawandel - eine globale Perspektive (IPCC)
25' Univ.-Prof. Dr. Georg KASER, Universität Innsbruck
- 10.55 Klimaszenarien für Österreich und deren Bedeutung für die Klimafolgenforschung
20' Ass.-Prof. Mag. Dr. Andreas GOBIET, Universität Graz
- 11.15 Rückkoppelungen zwischen Klima und Kohlenstoffkreislauf
25' Dr. Markus REICHSTEIN, Direktor Max-Planck Institut für Biogeochemie Jena
- 11.40 Treibhausgasemissionen im Klimawandel
20' Univ.-Prof. Dr. Sophie ZECHMEISTER-BOLTENSTERN, Universität für Bodenkultur Wien
- 12.00 Mikrobielle Prozesse im Klimawandel
20' Univ.-Prof. Dr. Andreas RICHTER, Universität Wien
- 12.20 Diskussionsrunde
20'
- 12.40 Mittagessen
- 13.40 ClimGrass - ein experimenteller Ansatz zur Erforschung von Auswirkungen des Klimawandels auf Grünland
20' Ass.-Prof. Mag. Dr. Michael BAHN, Universität Innsbruck
- 14.00 Entwicklung und Aufbau der ClimGrass-Anlage
15' Univ.-Doz. Dr. Erich M. PÖTSCH und Dr. Markus HERNDL
HBLFA Raumberg-Gumpenstein
- 14.30 Eröffnung und Besichtigung der ClimGrass- Anlage
90' Eröffnung durch Mag. Margareta SCHEURINGER, BMLFUW
Dr. Johann GASTEINER, Leiter für Forschung und Innovation,
HBLFA Raumberg-Gumpenstein
- Fachstationen**
- Steuerungstechnik und Datenmanagement**
Mag. Jakob SCHAUMBERGER, HBLFA Raumberg-Gumpenstein
Dipl.-Ing. Andreas STEINS, UMS München
- Lysimetertechnik und Bodenwasserhaushalt**
Dipl.-Ing. Georg v. UNOLD, UMS München
Dr. Markus HERNDL, HBLFA Raumberg-Gumpenstein
- Nichtinvasive Messtechnik**
Dr. Andreas SCHAUMBERGER und Medardus SCHWEIGER
HBLFA Raumberg-Gumpenstein
- Bestandesgaswechsel und Bodenatmung**
David REINTHALER, MSc
Ass.-Prof. Mag. Dr. Michael BAHN, Universität Innsbruck
- 16.00 Schlussworte und Ende

Inhalt

Klimaszenarien für Österreich und deren Bedeutung für die Klimafolgenforschung	1
Andreas GOBIET	
Rückkoppelungen zwischen Klima und Kohlenstoffkreislauf	5
Markus REICHSTEIN	
Treibhausgasemissionen im Klimawandel - Greenhouse Gas Emissions and Climate Change	13
Sophie ZECHMEISTER-BOLTENSTERN	
Mikrobielle Prozesse im Klimawandel	15
Andreas RICHTER	
ClimGrass - ein experimenteller Ansatz zur Erforschung von Auswirkungen des Klimawandels auf Grünland	17
Michael BAHN	
Entwicklung und Aufbau der ClimGrass-Anlage	19
Erich M. PÖTSCH und Markus HERNDL	
Steuerungstechnik und Datenmanagement für ClimGrass	23
Andreas SCHAUMBERGER und Jakob SCHAUMBERGER	
Lysimetertechnik und Bodenwasserhaushalt	27
Markus HERNDL und Georg von UNOLD	
Einsatz von nicht-invasiven Messtechniken zur Beobachtung der Entwicklung von Grünlandbeständen	29
Andreas SCHAUMBERGER, Medardus SCHWEIGER und Manuel ADELWÖHRER	
Bestandesgaswechsel und Bodenatmung	33
David REINTHALER und Michael BAHN	

Klimaszenarien für Österreich und deren Bedeutung für die Klimafolgenforschung

Andreas GOBIET^{1*}

Seit etwa 250 Jahren ist die Änderung der Treibhausgas-konzentrationen in der Atmosphäre hauptsächlich durch menschliche Aktivitäten gesteuert und die CO₂ Konzentration nahm in diesem Zeitraum von etwa 280 auf 400 ppm im Jahr 2014 zu - eine dramatische Änderung die zumindest in

den letzten 10.000 Jahren der Erdgeschichte beispiellos ist. Die Auswirkungen des daraus resultierenden anthropogenen Treibhauseffekts sind mittlerweile gut dokumentiert: Die globale Durchschnittstemperatur ist seit 1880 um 0.85°C angestiegen wobei der Trend über den Kontinenten stärker

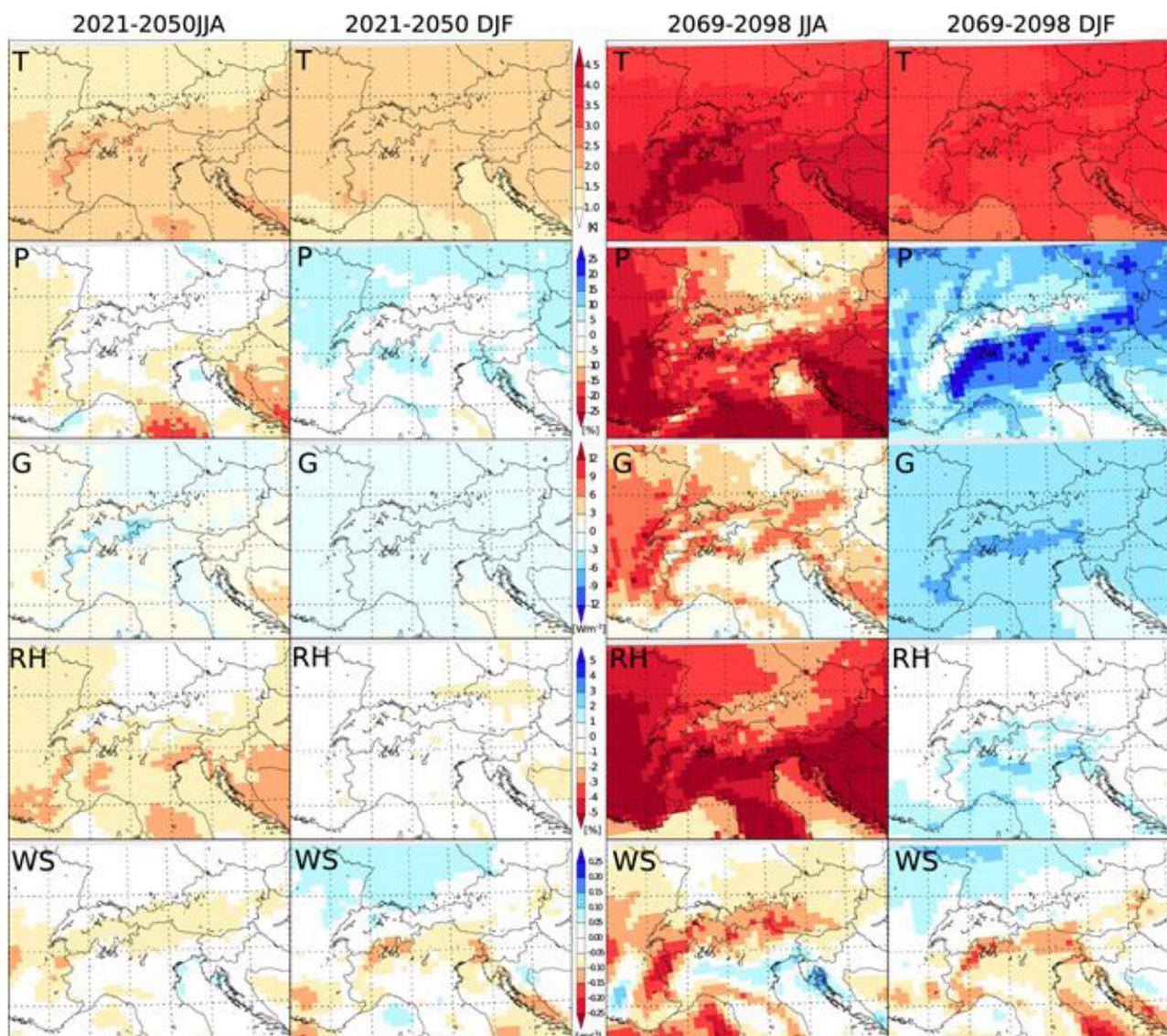


Abbildung 1: Räumliche Verteilung des erwarteten Klimawandels im Sommer (JJA) und Winter (DJF) in den Alpen: Temperatur (T), Niederschlag (P), Globalstrahlung (G), relative Feuchte (RH) und Windgeschwindigkeit (WS) im Vergleich zur Referenzperiode 1961-1990, links: 2021-2050, rechts: 2069-2098. Quelle: Gobiet *et al.* (2014).

¹ Universität Graz, Universitätsstraße 15, A-1010 GRAZ

* Ass.-Prof. Mag. Dr. Andreas GOBIET, andreas.gobiet@uni-graz.at

ausgeprägt und in Österreich nahezu 2°C beträgt (APCC, 2014). Gleichzeitig haben sich Niederschlagsmuster sowohl räumlich als auch saisonal verschoben und Veränderungen in der Häufigkeit und Intensität einiger extremer Wetterereignisse konnten festgestellt werden. Derartige Beobachtungen legen die Frage nach der zukünftigen Entwicklung des Klimas nahe, eine Frage die nur mit Hilfe komplexer Klimamodelle beantwortet werden kann. Dieser Beitrag gibt einen kurzen Überblick über Ergebnisse moderner Klimamodellierung, wobei insbesondere auf Klimaszenarien für den Alpenraum und Österreich eingegangen wird. Da das Klimasystem teilweise chaotisches Verhalten zeigt und Klimamodellierung mit Vereinfachungen und Fehlern behaftet ist, kann das Klima niemals exakt vorhergesagt

werden. Teilweise können diese Unsicherheiten durch Fortschritte in der Klimamodellierung verringert werden, aber eine gewisse Unschärfe ist durch die chaotische Natur des Klimasystems und unbekannt zukünftige Treibhausgas-Emissionen unvermeidbar. Eine exakte Vorhersage des zukünftigen Klimas ist also nicht möglich, aber es können in gewissen Bandbreiten wahrscheinlicher zukünftiger Entwicklungen vorhergesagt werden. Das wird durch die Betrachtung und statistische Auswertung einer Vielzahl unterschiedlicher Klimasimulationen möglich. Für Europa waren in den letzten Jahren Klimasimulationen aus dem Projekt ENSEMBLES (www.ensembles-eu.org) Stand der Wissenschaft. Diese werden derzeit von den Simulationen der EURO-CORDEX Initiative (<http://www.euro-cordex.net/>) abgelöst, welche regionale Klimaprojektionen für Europa in 12.5 km Gitterweite erstellt. EURO-CORDEX basiert auf den neuesten globalen Klimasimulationen (CMIP5) und den neuen IPCC Treibhausgas Emissionsszenarien („representative concentration pathways“; van Vuuren *et al.* (2011)), wurden aber für Österreich im Detail noch nicht untersucht. Die hier präsentierten Ergebnisse beruhen also auf ENSEMBLES und dem sogenannten A1B Emissionsszenario (Nakicenovic *et al.*, 2000) und besitzen eine Gitterweite von 25 km. Teile des Textes und die Abbildungen basieren auf dem Artikel von Gobiet *et al.* (2014), welcher auch Basis für die entsprechenden Teile des neuen Österreichischen Sachstandsbericht Klimawandel (APCC, 2014) ist.

Einen Überblick über die zu erwartenden Änderungen zeigen *Abbildung 1* und *Abbildung 2*. In *Abbildung 1* sind die mittleren erwarteten Änderungen der Temperatur, des Niederschlags, der Globalstrahlung, der relativen Luftfeuchte und der Windgeschwindigkeit für den Alpenraum im Vergleich zur Referenzperiode 1961-1990 für den Zeitraum 2021-2050 sowie 2069-2098 für Sommer und Winter dargestellt. Bis zur Mitte des Jahrhunderts

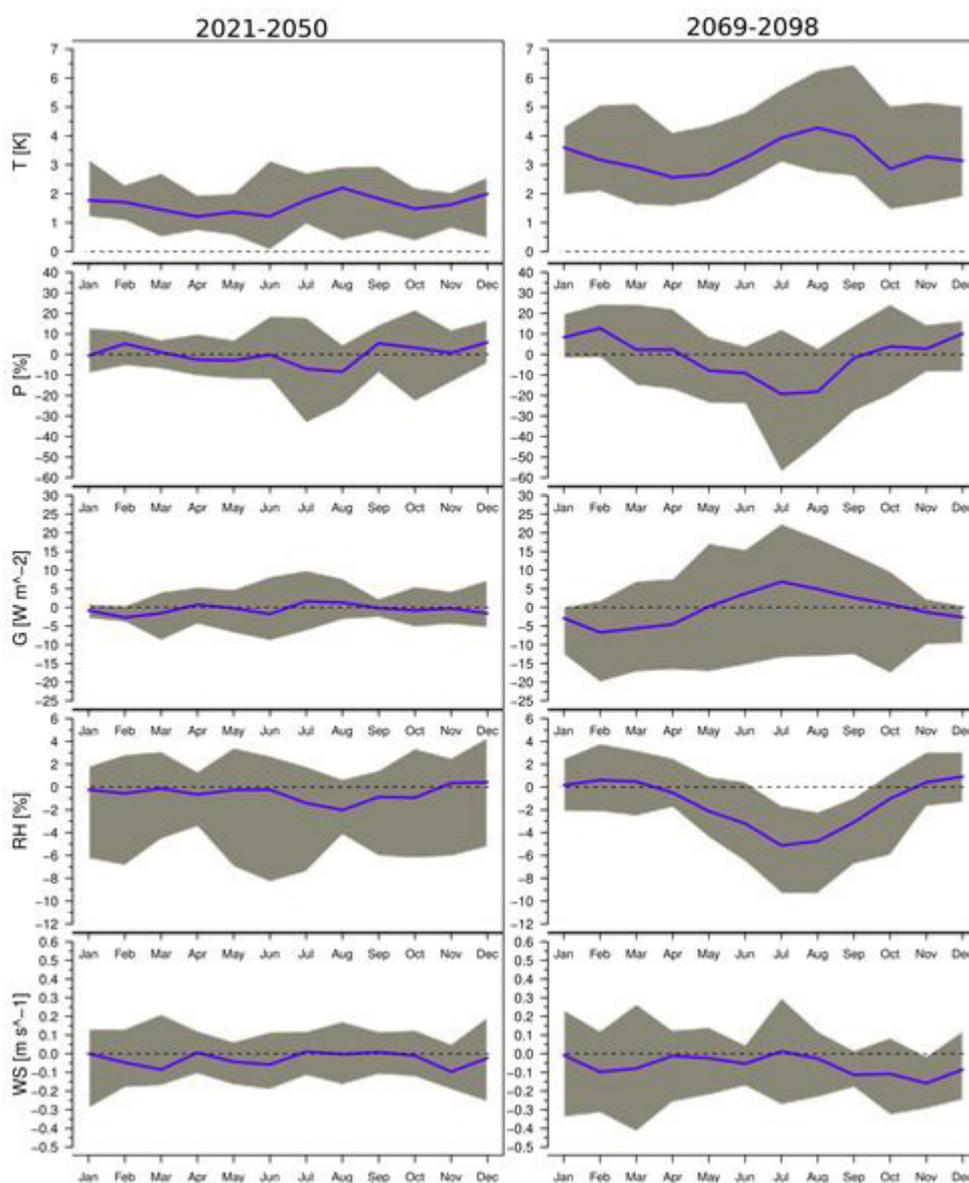


Abbildung 2: Jahresgang des erwarteten Klimawandels in den Alpen: Änderung der Temperatur (T), Niederschlag (P), Globalstrahlung (G), Relative Feuchte (RH) und Windgeschwindigkeit (WS) im Vergleich zur Referenzperiode 1961-1990, links: 2021-2050, rechts: 2069-2098. Die blaue Linie zeigt den Median und die graue Schattierung den 10-90 Perzentilebereich des multi-Modell Ensembles. Quelle: Gobiet *et al.* (2014).

wird im Alpenraum eine Erwärmung von etwa $+1.6^{\circ}\text{C}$ ($0,27^{\circ}\text{C}$ pro Jahrzehnt) im Winter und $+1.7^{\circ}\text{C}$ ($0,28$ pro Jahrzehnt) im Sommer erwartet. Bis zum Ende des Jahrhunderts wird unter Annahme des A1B Emissionsszenarios eine Erwärmung um etwa $+3.5^{\circ}\text{C}$ erwartet. Damit liegt der Alpenraum im Winter nahe dem Europa-Mittel und im Sommer leicht darüber. Die Unterschiede zwischen den Modellen sind im Vergleich zum Multimodell-Mittelwert relativ klein (Variationskoeffizient meist kleiner als 0.5) und alle Modelle zeigen eine Erwärmung an (siehe auch *Abbildung 2*). Daher ist es praktisch sicher, dass sich unter Annahme des A1B Emissionsszenarios der Alpenraum im 21. Jahrhundert weiter erwärmen wird. In *Abbildung 2* ist der Jahresgang der Änderung für die Perioden 2021-2050 und 2069-2098 dargestellt. Die mittlere Erwärmung ist im Winter und Spätsommer etwas stärker als in den restlichen Jahreszeiten, allerdings sind diese Unterschiede klein gegenüber der Bandbreite die durch die unterschiedlichen Simulationen aufgespannt wird.

Die erwarteten Niederschlagsänderungen weisen über Europa sehr starke regionale Unterschiede, wie etwa einen deutlichen Nord-Süd-Kontrast auf. Es muss mit einer Abnahme in den südlichen Teilen (insbesondere im Sommer) und einer Zunahme in den nördlichen Teilen Europas (insbesondere im Winter) gerechnet werden. Die Unterschiede zwischen den Modellen sind zwar deutlich größer als bei Temperatur (Variationskoeffizient meist deutlich größer als 1; ohne *Abbildung*), im Norden und Süden Europas aber im Vergleich zum Multimodell-Mittelwert immer noch relativ klein, daher kann auch dieses Muster als wahrscheinlich angesehen werden. Der Alpenraum liegt sehr nahe der Grenze zwischen zunehmenden und abnehmenden Niederschlägen (siehe *Abbildung 1*) und Niederschlagsszenarios sind hier mit sehr großen Unsicherheiten behaftet. Bis Mitte des 21. Jahrhunderts wird im Alpenraum eine mittlere Zunahme von $+3.7\%$ im Winter und eine Abnahme von -3.1% im Sommer erwartet. Der Multimodell-Mittelwert deutet auf den Einfluss des Alpenhauptkammes auf die räumliche Verteilung der Klimaänderung hin. Dabei wird eine Tendenz zur Niederschlagszunahme nördlich der Alpen im Frühling, Sommer und Herbst projiziert, während die südlichen und westlichen Teile des Alpenraumes Abnahmen aufweisen. Die mit dieser Nord-Süd-Trennung der Niederschlagsänderung verbundenen Unsicherheiten sind jedoch sehr groß. In *Abbildung 2* ist der Jahresgang der Änderung für die Perioden 2021-2050 und 2069-2098 dargestellt. Obwohl schon zu Mitte des 21. Jahrhunderts (links) die bereits be-

schriebene Tendenz zu mehr Niederschlag im Winter und weniger Niederschlag im Sommer im Median zu erkennen ist, zeigen die Modelle in dieser Periode keinerlei Einigkeit über die Richtung der Änderung und die Unsicherheiten sind sehr groß. Zu Ende des 21. Jahrhunderts (rechts), zeigt sich aber unter dem A1B Szenario eine sehr deutliche Tendenz zu trockeneren Verhältnissen im Sommer (etwa -20%) und feuchteren Verhältnissen im Winter (etwa $+10\%$). Die Szenarios für Globalstrahlung und relative Feuchte sind konsistent mit den Niederschlagsszenarios. In Bezug auf die mittlere Windgeschwindigkeit ist anzumerken, dass die Modelle keine signifikanten Änderungen anzeigen.

Die präsentierten Ergebnisse zeigen, dass der Alpenraum in Zukunft deutlich vom Klimawandel beeinflusst werden wird. Das bezieht sich nicht nur auf steigende Temperaturen, sondern auch auf deutliche saisonale Verschiebungen im Niederschlag und der Globalstrahlung. Weiters werden auch Änderungen in extremen Wettererscheinungen, insbesondere mehr Hitzewellen und intensivere Extremniederschläge [Gobiet *et al.*, 2013, APCC, 2014] und weiters für die Gesellschaft wichtige Änderungen wie etwa in der Schneesicherheit erwartet. Diese und weitere erwartete Auswirkungen des Klimawandels werden in der, diesem Beitrag zugrunde liegenden Präsentation im Detail diskutiert.

Literatur

- APCC (2014): Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014 (AAR14), Austrian Panel on Climate Change (APCC), Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien, Österreich, 1096 Seiten, ISBN 978-3-7001-7699-2.
- Gobiet, A., S. Kotlarski, M. Beniston, G. Heinrich, J. Rajczak and M. Stoffel (2014): 21st century climate change in the European Alps-A review. *Sci. Total Environ.*, 493, 1138-1151, doi:10.1016/j.scitotenv.2013.07.050.
- Nakicenovic, N., Alcamo, J., Davis, G., de Vries, B., Fenhann, J., Gaffin, S., Gregory, K., Grübler, A., Jung, T.Y., Kram, T., La Rovere, E.L., Michaelis, L., Mori, S., Morita, T., Pepper, W., Pitcher, H., Price, L., Raihi, K., Roehrl, A., Rogner, H.-H., Sankovski, A., Schlesinger, M., Shukla, P., Smith, S., Swart, R., van Rooijen, S., Victor, N., Dadi, Z. (2000): IPCC Special Report on Emissions Scenarios, in , Cambridge, United Kingdom and New York, Cambridge University Press.
- van Vuuren, D.P., J. Edmonds, M. Kainuma, K. Riahi, A. Thomson, K. Hibbard, G.C. Hurtt, T. Kram, V. Krey, J. Lamarque, T. Masui, M. Meinshausen, N. Nakicenovic, S.J. Smith, and S.K. Rose (2011): The representative concentration pathways: an overview, *Clim. Change*, 109(1-2), 5-31, doi:10.1007/s10584-011-0148-z.

Rückkoppelungen zwischen Klima und Kohlenstoffkreislauf

Markus REICHSTEIN^{1*}

Was haben Diamant, Bleistiftminen, Kreide, Zucker, Erdöl, Kohlendioxid, Dimethylsulfid, Methan und die DNA, Träger der Erbinformation, gemeinsam? Sie enthalten alle zu einem wichtigen Anteil Kohlenstoffatome (C) und sie sind auf unserem Planeten zu finden. Allein diese Aufzählung zeigt in welcher vielseitigen Rollen Kohlenstoff schlüpfen kann. Betrachten wir das Klima und die Biosphäre im Erdsystem, so können wir mindestens drei Funktionstypen von Kohlenstoffverbindungen unterscheiden (*Abbildung 1*): Kohlenstoffverbindungen speichern freie chemische Energie, übermitteln biologische Information und besitzen wichtige physikalisch-chemische Eigenschaften. Letzteres ist von Bedeutung für unser Klima: die bekanntesten Kohlenstoffverbindungen sind dabei Kohlendioxid (CO₂) und Methan (CH₄), die als Treibhausgase die langwellige

Wärmestrahlung von der Erdoberfläche absorbieren und teilweise wieder zur Erde zurückschicken (Gegenstrahlung). Dieser natürliche Treibhauseffekt bewirkt eine Erhöhung der Durchschnittstemperatur auf der Erde auf einen Wert, der die aktuellen Lebensformen überhaupt möglich macht. Aber auch andere Kohlenstoffverbindungen, z.B. Dimethylsulfid ((CH₃)₂S), haben eine wichtige Wirkung, indem sie z.B. die Wolkenbildung beeinflussen.

Als Träger freier chemischer Energie ist Kohlenstoff das zentrale Element für alles Leben auf der Erde: Pflanzen nehmen bei der Photosynthese Kohlendioxid auf, verbinden es mit Wasser zu Zuckermolekülen und wandeln dabei Lichtenergie in chemische Energie um. Diese chemische Energie ermöglicht das Wachstum der Pflanzen und ist die Energie, die Mikroorganismen, Tieren und uns Menschen als

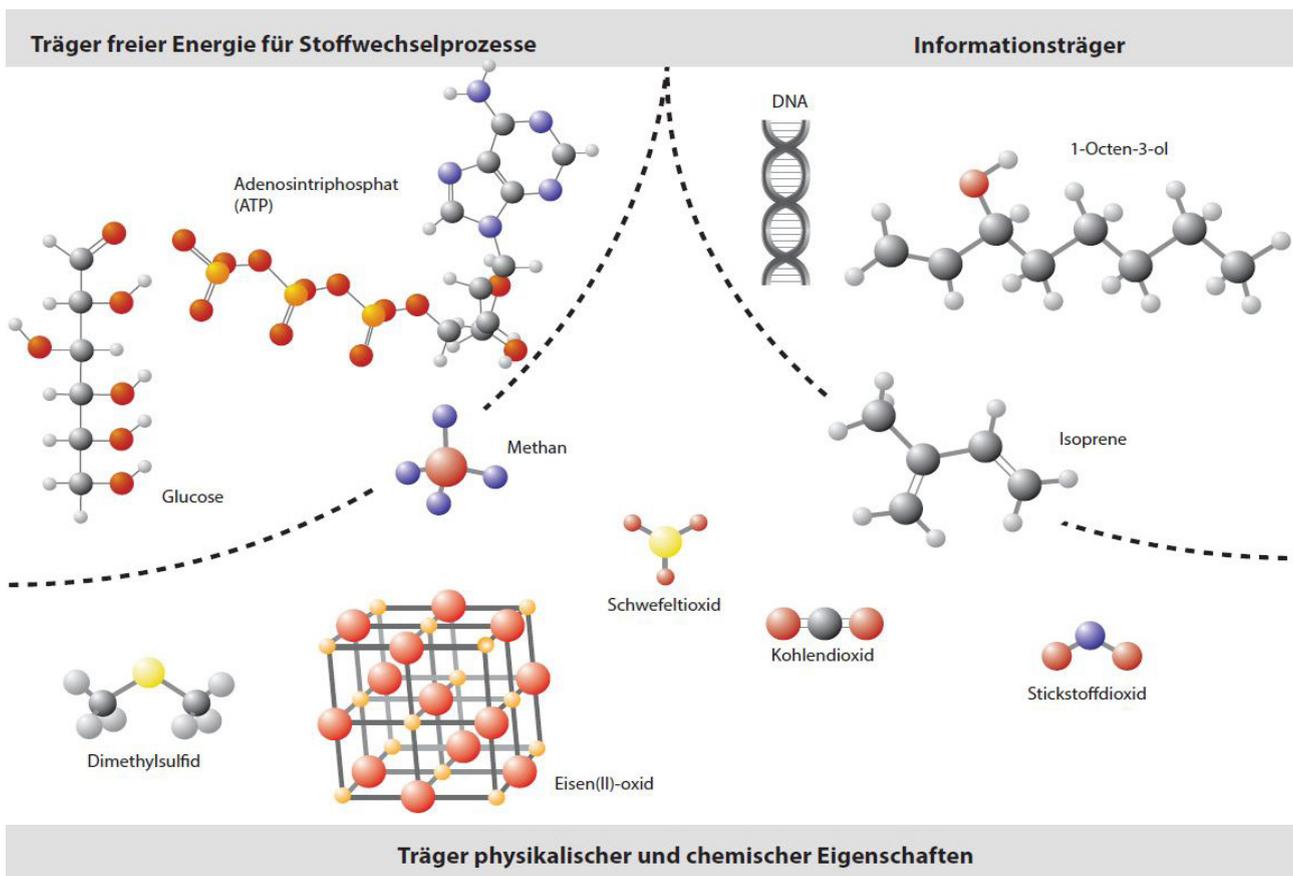


Abbildung 1: Kohlenstoffhaltige Moleküle mit unterschiedlichen Funktionen im Erdsystem

¹ Max-Planck Institut für Biogeochemie, Hans-Knöll-Straße 10, D-07745 JENA

* Direktor Dr. Markus REICHSTEIN, mreichstein@bgc-jena.mpg.de

Nahrung zur Verfügung steht. Bei der Atmung werden die Kohlenstoffmoleküle wieder in Kohlendioxid und Wasser umgewandelt, und die freiwerdende Energie kann vom Körper genutzt werden. Weil Kohlenstoffatome untereinander leicht Bindungen eingehen, können Lebewesen daraus auch kompliziertere Moleküle aufbauen, deren vorwiegender Zweck nicht Energiespeicher, sondern Information ist. Die DNA als Träger genetischer Information ist ein klassisches Beispiel. Weniger bekannt ist, dass Organismen auch über Kohlenstoffverbindungen kommunizieren: das Molekül 1-Octen-3-ol (*Abbildung 1*, rechts oben) verrät uns beispielsweise, dass Pilze im Wald sind. Diese Informationsfunktionen beeinflussen nun nicht das Klima in direkter Weise,

sie werden aber durch dieses beeinflusst. Es gibt außerdem eine Reihe von Kohlenstoffverbindungen, die in mehreren der drei Funktionstypen eine Rolle spielen. Beispielhaft ist in *Abbildung 1* Methan gezeigt, das sowohl ein wichtiges Treibhausgas ist, als auch Energiequelle für sogenannte methanotrophe Bakterien. Der Kohlenstoffkreislauf der Erde wirkt also auf das Klima und ist gleichzeitig notwendig für alles Leben auf der Erde und kann als Indikator der Lebensaktivität von Ökosystemen angesehen werden, welche wiederum vom Klima beeinflusst wird.

Wie sieht nun der globale Kohlenstoffkreislauf aus? Letztlich lässt er sich abstrakt durch den Austausch von Kohlenstoff zwischen verschiedenen Speichern oder Reservoiren

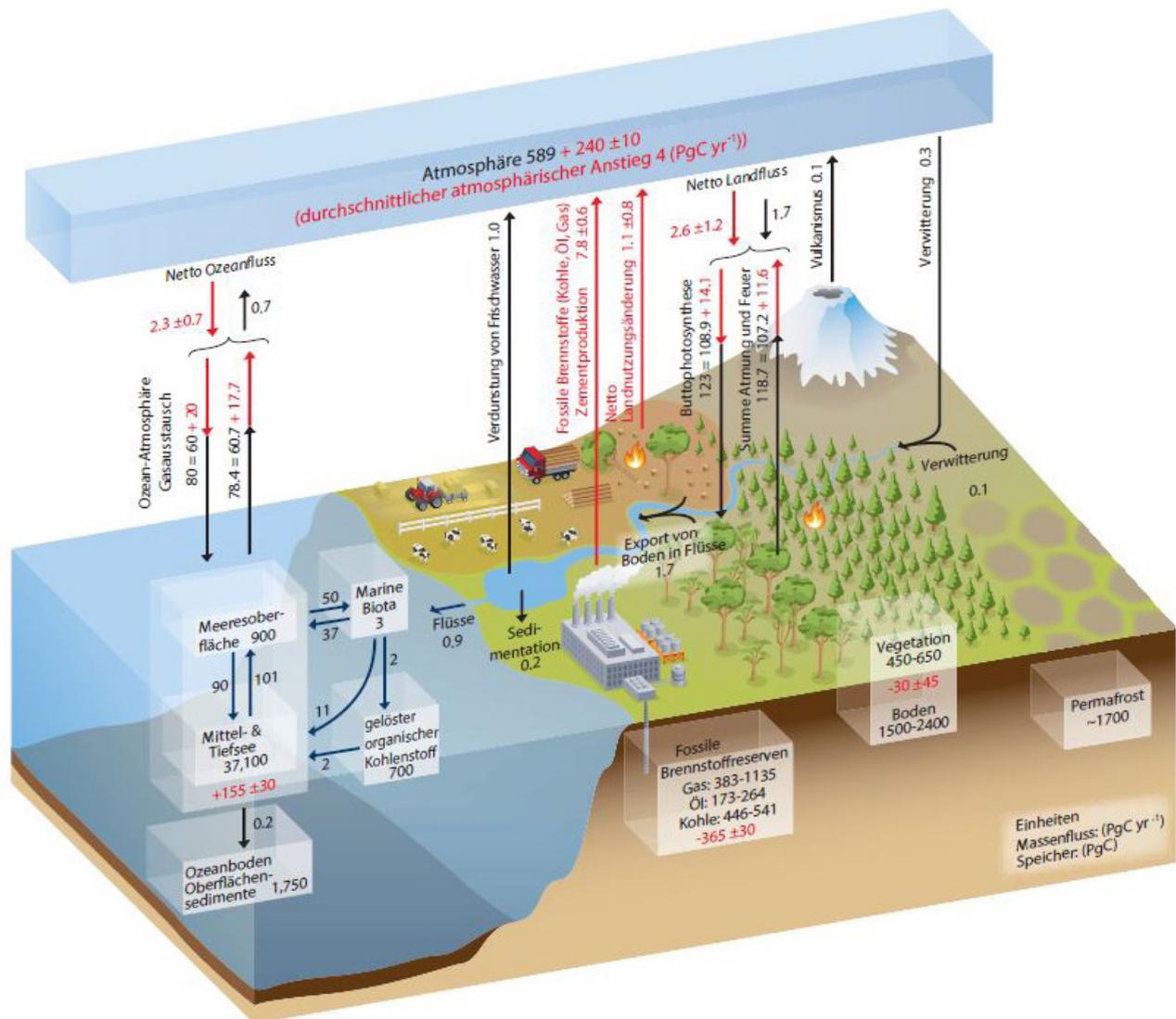


Abbildung 2: Übersetzt nach dem fünften Bericht des Weltklimarates [1]. Vereinfachtes Schema des globalen Kohlenstoffkreislaufs. Zahlen stellen Speichervorräte dar, auch „Kohlenstoffvorräte“ genannt in PgC ($1 \text{ PgC} = 10^{15} \text{ gC}$) und jährliche Kohlenstoffflüsse (in PgC yr^{-1}). Schwarze Zahlen und Pfeile geben Speichervorräte und Austauschraten geschätzt für die vor-industrielle Zeit, ungefähr 1750, an. Die Aufnahme von anthropogenem CO_2 durch den Ozean und terrestrische Ökosysteme, oft „Kohlenstoffsinken“ genannt, sind die roten Pfeile des Netto-Landflusses und des Netto-Ozeanflusses. Rote Zahlen in den Speichern kennzeichnen Gesamt-Veränderungen des anthropogenen Kohlenstoffs im Industriezeitalter von 1750-2011 (Spalte 2 in *Tabelle 6.1* ebenda). Vereinbarungsgemäß bedeutet eine positive Gesamt-Veränderung, dass ein Speicher seit 1750 Kohlenstoff hinzugewonnen hat. Die Gesamt-Veränderung des anthropogenen Kohlenstoffs im terrestrischen Speicher ist die Summe aus durch Landnutzungs-wandel kumulativ verlorenem Kohlenstoff und seit 1750 in anderen Ökosystemen akkumuliertem Kohlenstoff.

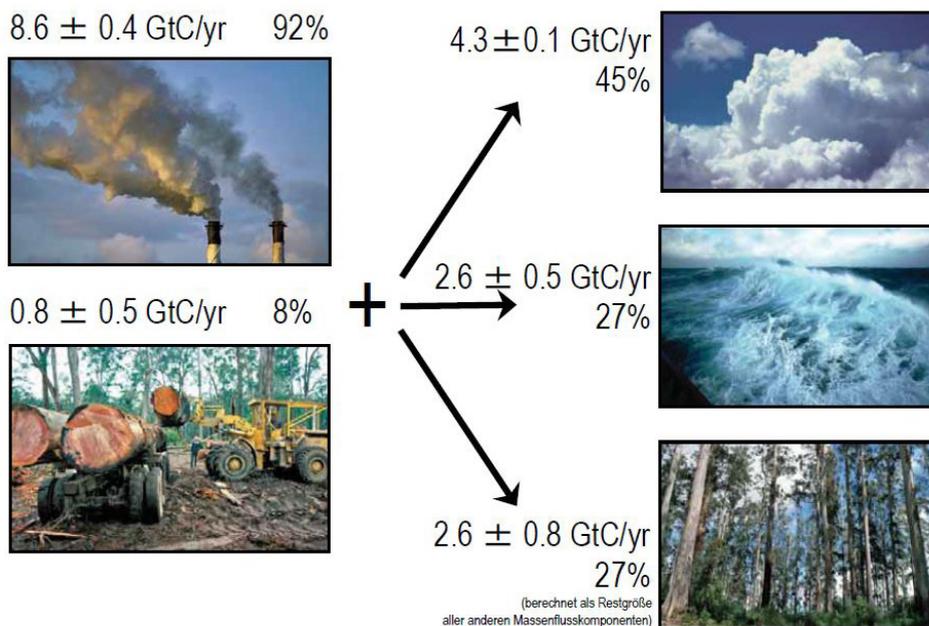


Abbildung 3: Anthropogene Kohlenstoffemissionen und deren Verbleib in der Atmosphäre, den Ozeanen und in Landökosystemen im Jahrzehnt 2003 bis 2012 (nach [8] und www.globalcarbonproject.org mit freundlicher Genehmigung von P. Canadell)

beschreiben. Größere Reservoirs sind zum Beispiel das Kohlendioxid in der Atmosphäre, die Kohlenstoffverbindungen im Holz der Bäume und im Boden, gelöstes Kohlendioxid im Meer und Karbonat haltiges Gestein (z.B. Kalkgestein der Alpen) in der Erdkruste. Letzteres ist ein sehr großes, aber äußerst inaktives Reservoir, das heißt, es tauscht in für uns Menschen relevanten Zeiträumen keine bedeutenden Mengen an Kohlenstoff mit z.B. der Atmosphäre aus. Ganz anders verhält es sich mit dem Austausch zwischen der Atmosphäre und den Ökosystemen der Landoberfläche. Der größte Fluss - so nennt man den Massenstrom von einem Reservoir zum anderen - von Kohlenstoff auf der Erde findet durch die Photosynthese der Landvegetation statt: jedes Jahr werden dadurch ca. 120 Milliarden Gramm (1 Billiarde Gramm = 10¹⁵ Gramm = 1 Petagramm = 1 Gigatonne) Kohlenstoff aufgenommen und in Zuckermolekülen gespeichert. Bei einem Weltmarktpreis von einem halben Dollar pro Kilogramm Glukose (Traubenzucker) käme man in einer theoretischen Rechnung auf eine „Wertschöpfung“ von jährlich 160 Billionen Dollar, was größenordnungsmäßig dem zwei- bis dreifachen des Bruttoerzeugnisses entspricht (1). Dies sind enorme Mengen. Wenn man diese Menge auf den Quadratmeter Landoberfläche herunterbricht, liegt die durchschnittliche Glukoseproduktion jedoch nur bei etwa zwei Kilogramm pro Quadratmeter. Und davon verbrauchen die Pflanzen die Hälfte relativ schnell wieder für ihren eigenen Stoffwechsel. Für den globalen Kohlenstoffkreislauf ist eine andere Betrachtung noch interessanter: In der Atmosphäre befinden sich zurzeit ca. 830 Milliarden Gramm Kohlenstoff. Die Photosynthese entzieht ihr jedes Jahr etwa ein Siebtel des Kohlenstoffs oder statistisch gesehen wird ein Kohlendioxidmolekül der Atmosphäre im Durchschnitt alle 7 Jahre durch Photosynthese in ein Zuckermolekül eingebaut. Wenn es nur diesen Austauschprozess gäbe (und die Photosynthese

unabhängig vom Kohlendioxidgehalt gleich stark weitergehen könnte), wäre die Atmosphäre innerhalb von 7 Jahren kohlendioxidfrei. Das ist natürlich nicht der Fall, zeigt aber anschaulich, was für ein mächtiger Prozess die Photosynthese global gesehen ist. Warum geschieht das nicht? Weil sich der Kohlenstoffkreislauf annähernd in einem sogenannten Fließgleichgewicht befindet, das bedeutet, dass soviel wie in ein Reservoir hineinfließt auch in etwa wieder herausgeht (Abbildung 2). So werden die (genau) 123 Milliarden Gramm Kohlenstoff, die aufgenommen werden, durch Abgabe von knapp 119 Milliarden Gramm an die Atmosphäre (durch Atmung und Feuer) und Transport von 1.7 Milliarden Gramm in die Gewässer, nahezu wieder ausgeglichen [1]. Aber nur

nahezu, denn das Fließgleichgewicht ist nicht perfekt, und es verbleiben zurzeit jedes Jahr netto schätzungsweise 2.6 Milliarden Gramm in Pflanzen und Böden. Der wichtigste Grund für dieses nachweisbare Ungleichgewicht ist die vom Menschen verursachte Veränderung des Kohlenstoffkreislaufs (Abbildung 2, rote Zahlen). Durch Verbrennung fossiler Brennstoffe, Zementproduktion und Entwaldung gelangen jährlich knapp 9 Milliarden Gramm Kohlenstoff als Kohlendioxid in die Atmosphäre (2) und erhöhen dort den Kohlendioxidgehalt. Er ist seit der Industrialisierung um knapp 120 ppm (3) von ca. 280 ppm auf knapp 400 ppm gestiegen - so hoch wie seit etwa 10 Millionen Jahren nicht mehr. Dieser Anstieg ist allerdings geringer als zu erwarten wäre, wenn die Atmosphäre alle Emissionen aufnehmen und behalten würde, denn bei einer Gesamtemission seit der Industrialisierung von ca. 530 Milliarden Gramm würde man einen Anstieg von 250 ppm (und nicht 120 ppm) erwarten (4). Es verbleibt offensichtlich weniger als die Hälfte der Emissionen in der Atmosphäre. Wo der andere Teil der Kohlendioxidemissionen bleibt, und wie es in der Zukunft damit weitergeht, war und ist eine der wichtigen Rätsel in der Klima- und Erdsystemforschung.

Weil sich die Atmosphäre und der Ozean gut durchmischen und dadurch die räumliche Heterogenität geringer ist, sind Änderungen im Kohlenstoffgehalt dort recht genau bestimmbar. Aufgrund entsprechender Messungen und Beobachtungen kommt man für die letzten zehn Jahre zu folgendem Bild (Abbildung 3): Anthropogene Emissionen entstehen zu über 90% aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe und der Zementproduktion und zu 8% durch Entwaldung, vor allem in den Tropen. Der Anstieg der Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre entspricht nur einem Anteil von 45% der Emissionen; 27% der Emissionen werden vom Ozean aufgenommen und weitere 27% von den Landökosystemen. Die Aufnahme von anthropogenem Koh-

lendioxid durch den Ozean oder terrestrische Ökosysteme wird auch „Kohlenstoffsene“ genannt. Ozean und Land puffern unsere Emissionen also in bedeutendem Umfang ab und schwächen dadurch gegenwärtig den Klimawandel ab. Die letzte Zahl, die sogenannte Kohlenstoffsene über Land, lässt sich allerdings nur indirekt als Restgröße bestimmen. Außerdem bleibt es eine große Herausforderung, direkt abzuschätzen, wo genau und durch welche Prozesse Landökosysteme mehr Kohlendioxid aufnehmen als sie abgeben. Hinzu kommt, dass die Aufnahme durch Landökosysteme alles andere als stabil ist: sie schwankt von Jahr zu Jahr zwischen 0 und 4 Milliarden Gramm, und in manchen Jahren ist sie sogar leicht negativ, es wird also mehr abgegeben als aufgenommen. Welche Faktoren diese Schwankungen beeinflussen, gibt auch Hinweise darauf, wie der Kohlenstoffkreislauf auf einen zukünftigen Klimawandel reagiert. Damit sind wir schon bei den drei großen Herausforderungen bezüglich des Kohlenstoffkreislaufs:

Diagnose, Verständnis und Vorhersage

Wie ein Arzt zum Beispiel eine Blutprobe entnimmt, um den Blutzuckerspiegel als einen Indikator des Stoffwechsels zu messen, ist zunächst einmal wichtig, den Kohlenstoffkreislauf auf der Erde genau zu beobachten. Durch Langzeitbeobachtungen der Kohlendioxidkonzentration in Hawaii (Mauna Loa) seit den 1960er Jahren wissen wir, wie sich der Kohlendioxidgehalt in der Atmosphäre von Monat zu Monat, Jahr zu Jahr und über Jahrzehnte verändert. Diese Messungen erlaubten frühzeitig einen aufsteigenden Trend des Kohlendioxidgehalts zu diagnostizieren, der sich wie oben beschrieben aus der Bilanz zwischen anthropogenen Emissionen in die Atmosphäre und der Aufnahme durch die Ozeane und Landökosysteme ergibt. Um herauszufinden, in welchen Regionen und Ökosystemen jene 2,6 Milliarden Gramm Kohlenstoff aufgenommen werden und wo sie gespeichert werden, bedarf es weiterer Messungen als nur die der Kohlendioxidkonzentration an einem Standort, so wie auch zur Diagnose von Diabetes und deren Ursachen auch weitere Parameter gemessen werden müssen. 2,6 Milliarden Gramm Kohlenstoff müsste man doch schnell finden können, mag man denken. Allerdings könnten sie theoretisch überall auf den 150 Millionen Quadratkilometern Landoberfläche aufgenommen werden. Rechnet man diese globale Aufnahme auf den Quadratmeter um, kommt man auf eine durchschnittliche Aufnahme von gut 17 Gramm pro Quadratmeter und Jahr. Mit anderen Worten, es gilt eine Änderung im Kohlenstoffgehalt - z.B. in einem Wald - zu detektieren, die weniger als der Hälfte eines normalen Blattes Papier entspricht (5). Bezogen auf den gesamten Kohlenstoffspeicher der Landökosysteme sind das weniger als 0,1%. Diese relative Änderung entspricht der Änderung des Füllstands einer Badewanne um weniger als 500 Micrometer. Dabei sind die Schätzungen für den Gesamtkohlenstoffspeicher schon bei weitem nicht so genau (vgl. Unsicherheitspanne in *Abbildung 2*). Besonders unsicher und geradezu als „dunkle Materie“ der Erdsystemforschung zu bezeichnen ist der Bodenkohlenstoff: Während man noch vor etwa 20 Jahren davon ausging, dass im Boden etwa doppelt so viel Kohlenstoff wie in der Atmosphäre gespeichert ist (also ca. 1500 Milliarden Gramm), weiß man heute, dass es sich um

mindestens das Fünffache handelt. Ein großer Teil dieses Kohlenstoffs ist dabei im Permafrost „eingefroren“ und wird beim Auftauen durch die Klimaerwärmung teilweise freigesetzt werden (6).

Für Prognosen, wie sich der Kohlenstoffkreislauf in der Zukunft in einem sich verändernden Klima verhalten wird, reicht eine reine Quantifizierung der Speicher und deren Änderungen im *status quo* nicht aus: entscheidend ist es, die Zusammenhänge zwischen dem Kohlenstoffkreislauf und dem Klima zu erkennen und zu verstehen. Dazu ist es notwendig, nicht nur die Gesamtbilanz (die Nettokohlenstoffaufnahme) zu betrachten, sondern die einzelnen Prozesse und ihre Abhängigkeit von Klimavariablen zu analysieren. Dies ist vergleichbar dazu einen Staatshaushalt zu betrachten, der aus verschiedenen Einnahmen und Ausgaben besteht, die zum Verständnis im Einzelnen analysiert werden müssen. Der mit Abstand wichtigste Prozess zur Aufnahme von Kohlendioxid durch die Landökosysteme ist die pflanzliche Photosynthese. Die Kohlendioxidabgabe an die Atmosphäre geschieht durch die Atmung der Pflanzen, Tiere und Mikroorganismen, sowie durch Feuer, z.B. Wald- und Steppenbrände.

Bezüglich der Reaktion der Nettobilanz auf Klimaänderungen hat sich vereinfacht folgende Betrachtungsweise etabliert: einerseits wird die Photosynthese durch erhöhte Kohlendioxidkonzentrationen („CO₂-Düngung“) gefördert und in kühleren Regionen durch steigende Temperaturen, wobei sich diese Effekte ab einem bestimmten Konzentrations- bzw. Temperaturniveau abschwächen (saturieren). Andererseits hängen Atmungsprozesse exponentiell von der Temperatur ab, aber nicht von der Kohlendioxidkonzentration. Daraus folgt, dass Landökosysteme als Reaktion auf steigende Temperaturen und Kohlendioxidkonzentrationen solange mehr Kohlenstoff aufnehmen, bis aufgrund des Temperaturanstiegs die Atmungsprozesse dominieren und netto Kohlendioxid an die Atmosphäre abgegeben wird. Diesem Prinzip folgen auch die meisten Klimamodelle, die den Kohlenstoffkreislauf beschreiben. Sie erklären die gegenwärtige Aufnahme der obengenannten 2,6 Milliarden Gramm Kohlenstoff mit den stimulierenden Effekten auf die Photosynthese, sagen aber voraus, dass sich diese Nettoaufnahme in der Zukunft deutlich abschwächt oder sogar in eine Nettoabgabe umkehrt. Das heißt die oben beschriebene derzeit zu beobachtende sogenannte negative Rückkopplung (mehr Kohlendioxid in der Atmosphäre führt zu Entzug von Kohlendioxid und somit zu einer Abschwächung des Anstiegs) kann sich in der Zukunft zu einer positiven Rückkopplung und damit einer selbstverstärkenden Klimaerwärmung umwandeln. Hinter diesem Modellansatz liegt die vereinfachende Vorstellung, dass die oberirdischen Photosyntheseprozesse und die unterirdischen Atmungsprozesse durch Mikroorganismen, Pflanzenwurzeln und Tiere konzeptionell getrennt betrachtet werden können. Die Forschung der letzten Jahre hat allerdings gezeigt, dass die Prozesse stark miteinander vernetzt sind, so dass ein komplexes dynamisches System mit vielfältigen Wechselwirkungen entsteht. Die Situation ist also komplizierter als oben beschrieben und Umweltänderungen können zu unerwarteten Abläufen im Ökosystem - insbesondere im Boden - führen, wenn physikalische, chemische und biologische Prozesse wechselwirken.

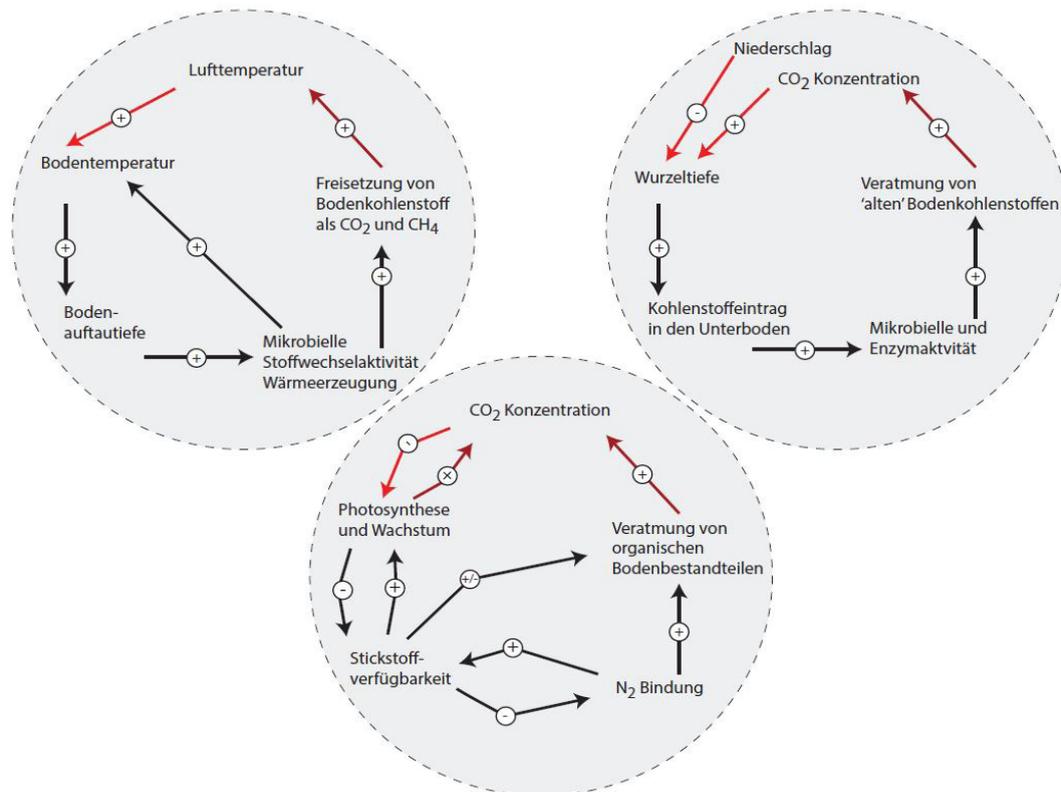


Abbildung 4: Ökosystemare Rückkopplungen die durch Klimaänderungen ausgelöst werden können mit Schwerpunkt auf Bodenprozessen. Drei Beispiele für kritische Prozessketten sind vereinfacht dargestellt, nach [4].

Bei der Betrachtung der Zukunft des Kohlenstoffkreislaufs und der Wechselwirkung mit Klima und anderen Umweltveränderungen müssen wir vor allem viele andere Faktoren als nur die Temperatur („global warming“) berücksichtigen.

In mehr als der Hälfte der Ökosysteme der Erde sind das Pflanzenwachstum und die Photosyntheseleistung stark durch die Wasserverfügbarkeit bestimmt [2]. Daher werden insbesondere Änderungen der Niederschlagsmenge und -verteilung direkten Einfluss auf Ökosysteme und deren Kohlenstoffkreislauf haben. Außerdem ist zu erwarten, dass mit dem anthropogenen Treibhauseffekt aufgrund der steigenden Globaltemperaturen die Verdunstung von Wasser zunimmt, was tendenziell zu mehr Trockenheit führt. Auf der anderen Seite führen steigende Kohlendioxidkonzentrationen zur Verengung der Spaltöffnungen in den Blättern der Pflanzen, die wie Ventile die Wasserabgabe regulieren, was zu einer verringerten Verdunstung führt.

Der Effekt einer veränderten Wasserverfügbarkeit auf die Nettokohlenstoffaufnahme (Photosynthese minus Pflanzen- und Bodenatmung) hängt stark von Bodeneigenschaften, wie der Wasserhaltekapazität, der Verteilung von Wurzeln und Kohlenstoff im Boden und der Trockenstresstoleranz der Vegetation ab. Wenn zum Beispiel der meiste Bodenkohlenstoff in den obersten Zentimetern konzentriert ist, die Wurzeln aber tief gehen und eventuell Grundwasser anzapfen können, wird die Bodenatmung stärker betroffen sein als die Photosynthese, weil der Oberboden zuerst austrocknet, während die Pflanzen weiter wachsen. Im Gegensatz dazu wird

die Photosynthese in flachgründigen Böden mit geringer Wasserhaltekapazität viel stärker betroffen sein. Unter Trockenheit kann es also je nach Standorteigenschaften theoretisch zu mehr Kohlenstoffaufnahme oder zu mehr Kohlenstoffverlusten kommen.

Daher sind Beobachtungen unter vielfältigen Bedingungen nötig - diese zeigen in der Tat, dass es in den allermeisten Fällen zu verringerter Kohlenstoffaufnahme kommt, wenn es trockener wird. Ein weiterer wichtiger Faktor ist die Stickstoffverfügbarkeit, die die Größe des oben genannten CO₂-Düngeeffekts stark beeinflussen oder sogar ganz verhindern kann [3]. Erst seit kurzem wird dieser Faktor in einigen globalen Kohlenstoffmodellen berücksichtigt und führt in diesen Modellen zu einem verringerten CO₂-Düngeeffekt von global mindestens 50 Milliarden Gramm. Als eine weitere wichtige Einflussgröße sei hier außerdem die solare Einstrahlung genannt, die als primäre Energiequelle direkt auf die Photosyntheseleistung wirkt und sich zum Beispiel durch Wolkenbildung verändert.

Neben diesem direkt einleuchtenden Effekt gibt es noch einen weiteren nicht so offensichtlichen Einfluss: Die auf der Erdoberfläche verfügbare Sonnenenergie besteht aus direkter Strahlung und diffuser Strahlung, d.h. indirektes Licht, das durch gestreute Reflektion des Sonnenlichtes in der Erdatmosphäre entsteht. Bei Zunahme der diffusen Strahlung im Verhältnis zur direkten Strahlung nimmt auf Ökosystemebene die Photosynthese zu, weil diffuse Strahlung tiefer in einen Vegetationsbestand eindringt. Also hat auch die Veränderung des Aerosolgehalts in der Luft einen Einfluss auf den Kohlenstoffkreislauf, weil er

den Anteil diffuser Strahlung erhöht. Angesichts dieser komplexen Zusammenhänge ist es immer noch schwierig genaue Vorhersagen zum Kohlenstoffkreislauf zu machen.

Extremereignisse

Und es gibt einen weiteren wesentlichen Aspekt: Ökosysteme reagieren natürlich nicht auf das durchschnittliche Wetter oder (Mittelwert-)Klima - welches nur eine statistische Zusammenfassung über einen langen Zeitraum ist, sondern auf die konkrete Abfolge von Wetterereignissen. Nehmen wir ein einfaches Beispiel: eine konstante Lufttemperatur von 25°C bietet für einen typischen Wald oder ein Weizenfeld sehr gute Bedingungen für Photosynthese und Wachstum. Gibt es eine Periode, in der die Temperatur für beispielsweise 10 Tage auf 40°C ansteigt und danach für 10 Tage auf 10°C fällt, beträgt die Durchschnittstemperatur auch 25°C, aber der Hitzestress kann zu irreversiblen Schäden bei den Pflanzen geführt haben. Im Jahre 2003 hat die Hitzewelle verbunden mit Trockenheit in Europa den Klimaforschern gezeigt, dass einzelne Wetterereignisse einen großen Einfluss auf den Kohlenstoffkreislauf haben können. Während dieser Hitzeperiode ist in Mittel- und Westeuropa die Kohlenstoffaufnahme mehrerer Jahre rückgängig gemacht worden. Langfristige und deutlich über die Andauer des (extremen) Wetterereignisses hinaus anhaltende Auswirkungen entstehen vor allem dann, wenn langlebige Pflanzen wie Bäume so massiv geschädigt werden, dass sie absterben (und der in ihnen gespeicherte Kohlenstoff durch Pilze und Mikroorganismen veratmet und an die Atmosphäre abgegeben wird). Inzwischen sind derartige Beispiele rund um die Welt bekannt, z.B. neben Europa auch aus dem Amazonas-Regenwald oder dem Südwesten der USA. Globale Hochrechnungen mithilfe von Satellitendaten haben kürzlich ergeben, dass aufgrund extremer Wetterereignisse global jedes Jahr mehr als 2 Milliarden Gramm Kohlenstoff nicht durch Photosynthese fixiert werden können [4]. Sollten sich solche Extremereignisse verdoppeln, könnte das die aktuelle Kohlenstoffsinke (2.6 Milliarden Gramm) rechnerisch fast „auffressen“ (7). Solche negativen Extremereignisse des Kohlenstoffkreislaufs konnten dabei mit verschiedenen Faktoren in Verbindung gebracht werden: Trockenheit, Hitzewellen, Kälteeinbrüche, Feuerereignisse und Starkniederschläge. Auch hier spielt der Wasserkreislauf (Trockenheit) auf allen Kontinenten die wichtigste Rolle. Trockenheit ist auch einer der wenigen auf alle Ökosystemtypen wirkenden Faktoren. Stürme dagegen haben beispielsweise kaum Einfluss auf intakte Grasländer, während sie durch Windbruch und Entwurzelung von Bäumen auf Wälder verheerend wirken können (auch wenn in genutzten Wäldern versucht wird, dieses Holz noch zu ernten). Sturm „Lothar“ verursachte Waldschäden welche 16 Billionen Gramm Kohlenstoff potenziell der Zersetzung durch Mikroorganismen freigaben. Insgesamt kann die Wirkungskette Klimaänderungen, daraus folgende Verstärkung von Extremereignissen, daraus folgende Abgabe von Kohlenstoff an die Atmosphäre zu einem „Teufelskreislauf“, d.h. einer positiven Klimarückkopplung führen.

Es sind aber nicht nur die Extremereignisse die den Unterschied zu langsamen Änderungen etwa der mittleren Temperatur machen. Neben Extremereignissen sind auch

der Zeitpunkt an dem ein bestimmtes Wetterphänomen auftritt (z.B. Frost) oder die Verteilung einer Kenngröße (z.B. des Niederschlages) innerhalb des Jahresganges von wesentlicher Bedeutung für die Ökosysteme und den Kohlenstoffkreislauf. Ein früheres Austreiben der Vegetation führt beispielsweise dazu, dass dem Boden länger Wasser entzogen wird, so dass es im Sommer zu Trockenstress kommen kann. Insbesondere ist auch der Zeitpunkt der Niederschläge wichtig. Ein einfaches Beispiel: in Berlin fallen im Durchschnitt jährlich ca. 590 mm Niederschlag, in Lissabon 650-700 mm, also deutlich mehr. Trotzdem muss die Vegetation in Lissabon besser an Trockenheit angepasst sein. Warum? Unter anderem weil der Niederschlag dort vor allem im Winter fällt und in der Zeit, in der Einstrahlung und Temperaturen und damit der Wasserbedarf für die Pflanzen hoch sind, der Boden schon sehr ausgetrocknet ist (8). Im Gegensatz dazu fällt der meiste Niederschlag in Berlin im August, einem der wärmsten Monate. Auch der Einfluss z.B. von Hitzewellen auf ackerbauliche Kulturen ist völlig unterschiedlich zu bewerten, je nachdem, ob sie vor oder nach der Fruchtreife auftreten. Das heißt, wenn wir den Einfluss von Klimaänderungen auf Ökosysteme und deren Kohlenstoffkreislauf bestimmen wollen, müssen wir unbedingt auf den Jahresgang der verschiedenen Einflussgrößen achten.

Außerdem müssen wir uns auf unerwartete Rückkopplungen auch innerhalb der Ökosysteme einstellen, was Vorhersagen des Kohlenstoffkreislaufs noch komplizierter macht [5]. Ein Rückkopplungsmechanismus kann zum stark beschleunigten, sich selbst verstärkenden Auftauen von Permafrostböden führen (*Abbildung 4*, links oben). Hier besteht die interne Rückkopplung darin, dass Mikroorganismen durch Temperaturerhöhung aufgrund des Klimawandels aktiver werden, und ähnlich wie im Misthaufen durch ihre höhere metabolische Aktivität mehr Wärme abgeben, somit zur weiteren Bodenerwärmung beitragen und damit wiederum ihre eigene Aktivität befeuern. Ob der Effekt zum Tragen kommt, hängt unter anderem davon ab, wie gut Moose den Boden isolieren. Ist die Isolation stark, wird die Wärme nicht gut nach oben abgeführt und der selbstverstärkende Effekt kann eintreten. Die Schneebedeckung spielt hierbei auch eine überraschende Rolle: Stärkere Schneebedeckung führt eher zu einer Erwärmung und zum schnelleren Auftauen des Bodens, weil die Winterkälte durch die Schneeisolierung nicht so schnell in den Boden eindringen kann. Eine weitere rückkoppelnde Kausalkette ist oben rechts in *Abbildung 4* zu finden. Veränderte Kohlenstoffkonzentrationen und veränderter Niederschlag können zu stärkerer und tieferer Durchwurzelung und damit zu mehr frischem Kohlenstoff im Boden führen. Auch dies regt die mikrobielle Aktivität an, so dass mehr Kohlenstoff zu CO₂ veratmet wird, vor allem auch alter Kohlenstoff, der sonst nicht abgebaut würde. Zusätzlich birgt die Wechselwirkung mit dem Stickstoffkreislauf weitere komplexe Rückkopplungen (*Abbildung 4* unten). All diese Rückkopplungen sind noch nicht gut verstanden und Gegenstand aktiver Forschung.

Kohlenstoff-Engineering

Wir haben es also beim Kohlenstoffkreis mit einem hoch komplexen System zu tun, das sich durch nicht-lineares Verhalten auszeichnet, bei dem kleine Anstöße große

Wirkungen haben können und umgekehrt große Anstöße durchaus abgepuffert werden können. Vorhersagen sind also schwierig, denn oftmals spielen nicht bedachte indirekte Effekte eine wichtige Rolle. „Rettungsmaßnahmen“ wie Geoengineering sind deshalb auch sehr viel schwieriger und riskanter als einige einfach wirkende Lösungen uns manchmal fälschlich glauben lassen. Eine Idee ist zum Beispiel, Kohlendioxid aus der Atmosphäre durch Aufförsung von bisher nicht bewaldeten Flächen, inklusive der Wüsten zu entfernen. Das Potenzial solcher Maßnahmen ist eher gering und die potenziellen Nebenwirkungen sind vielfältig. Nach jüngsten Modellrechnungen [6] können der Atmosphäre auf diese Weise bis zum Jahr 2100 etwa 100 Milliarden Gramm Kohlenstoff entzogen werden, gerade mal 5% unserer erwarteten Kohlendioxid-Emissionen bis zu diesem Zeitpunkt (9). Gleichzeitig verringert sich die Rückstrahlung (Albedo genannt), d.h. die Erde wird dunkler, weil die Wälder viel Strahlung absorbieren, was insgesamt zu einer höheren Temperatur führt. Außerdem verändern sich zumindest regional die Niederschlagsverteilungen, was zu einem veränderten Abfluss in die Ozeane und damit veränderten Salzgehalt der Küstengewässer führt. Eine großflächige Bewaldung würde außerdem zu weniger Staubverblasung führen. Da dieser Staub Mikronährstoffe enthält, würde die damit verbundene Düngewirkung, z.B. im Ozean oder im Amazonasregenwald abnehmen.

Ein weiteres Beispiel, an dem man bereits jetzt die Folgen eines zu kurz gedachten Engineering beobachten kann, ist die Bioenergie. Sie soll fossile, nicht-nachwachsende Brennstoffe durch nachwachsende Rohstoffe ersetzen (z.B. Biodiesel) und dadurch Kohlendioxidemissionen einsparen. An sich eine gute Idee, aber wenn man, wie Anfang der 2000er Jahre in Europa einseitige Anreize schafft, entstehen problematische Nebenwirkungen wie Entwaldung zur Schaffung von Anbauflächen für Bioenergiepflanzen und klimawirksame Spurengasemissionen, die den eigentlichen Effekt zunichtemachen, ein Verlust an biologischer Vielfalt,

mannigfaltige sozio-ökonomische Folgen, die mit der starken Konkurrenz zu und Verdrängung von Nahrungsmittelproduktion und Zerstörung von kleinbäuerlichen Strukturen einhergehen [7]. Hier kommt man schnell zu Themen, die die eigentliche Klimaforschung überschreiten. Dies ist auch nicht verwunderlich angesichts der Vielfältigkeit des Kohlenstoffs.

Literatur

- [1] Stocker, T.F., Q. Dahe, G.-K. Plattner, Climate Change 2013: The Physical *Science* Basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Summary for Policymakers (IPCC, 2013), (2013).
- [2] Beer, C., M. Reichstein, E. Tomelleri, P. Ciais, M. Jung, N. Carvalhais, C. Rödenbeck, M. A. Arain, D. Baldocchi, G.B. Bonan, A. Bondeau, A. Cescatti, G. Lasslop, A. Lindroth, M. Lomas, S. Luyssaert, H. Margolis, K.W. Oleson, O. Roupsard, E. Veenendaal, N. Viovy, C. Williams, F.I. Woodward, D. Papale, Terrestrial gross carbon dioxide uptake: global distribution and covariation with climate. *Science* **329**, 834-838 (2010).
- [3] Zaehle, S., Terrestrial nitrogen-carbon cycle interactions at the global scale. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* **368**, 20130125 (2013).
- [4] Reichstein, M., M. Bahn, P. Ciais, D. Frank, M.D. Mahecha, S.I. Seneviratne, J. Zscheischler, C. Beer, N. Buchmann, D.C. Frank, Climate extremes and the carbon cycle. *Nature* **500**, 287-295 (2013).
- [5] Heimann, M., M. Reichstein, Terrestrial ecosystem carbon dynamics and climate feedbacks. *Nature* **451**, 289-292 (2008); published online Epub 17 Jan.
- [6] Keller, D.P., E.Y. Feng, A. Oschlies, Potential climate engineering effectiveness and side effects during a high carbon dioxide-emission scenario. *Nat Commun* **5**, (2014); published online Epub02/25/online (10.1038/ncomms4304).
- [7] Schubert, R., Future bioenergy and sustainable land use (Earthscan, 2010).
- [8] Quéré, C.L., R.J. Andres, T. Boden, T. Conway, R. Houghton, J.I. House, G. Marland, G.P. Peters, G. van der Werf, A. Ahlström, The global carbon budget 1959-2011. *Earth System Science Data* **5**, 165-185 (2013).

-
- (1) 1g Kohlenstoff sind in 2,66 g Glucose ($C_6H_{12}O_6$) enthalten, also entsprechen 120 Pg Kohlenstoff 320 Pg Glucose, was 320 Billionen kg sind und damit theoretisch 160 Billionen Dollar wert sind.
 - (2) Dies sind die sogenannten anthropogenen Kohlendioxid Emissionen gemessen als Kohlenstoffmasse. Da Kohlendioxid neben Kohlenstoff noch zwei Sauerstoffatome enthält, entspricht dies einer Kohlendioxid-Masse von ca. 33 Billionen Tonnen. In wirtschaftswissenschaftsnahen Betrachtungen wird häufig die Kohlendioxidmasse angegeben.
 - (3) Die Einheit ppm gibt hier das Volumen-Mischungsverhältnis an -1 ppm bedeutet das ein Millionstel des Gesamtvolumens durch Kohlendioxid gefüllt ist.
 - (4) 1ppm entspricht hochgerechnet 212 Milliarden Gramm Kohlenstoff als Kohlendioxid in der Atmosphäre.
 - (5) Ein normales Blatt Papier wiegt 80 Gramm pro Quadratmeter, der Anteil von Kohlenstoff darin liegt bei etwa 45%, also sind 36 g Kohlenstoff pro Quadratmeter Papier enthalten.
 - (6) Hier sei angemerkt, dass es noch sehr größere Kohlenstoffspeicher auf der Erde gibt, so zum Beispiel mehr als das Zehntausendfache in Karbonaten und anderen Sedimenten in der Erdkruste, aber dass diese nach menschlichen Zeithorizonten inaktiv sind und vor allem in erdgeschichtlichen Zusammenhängen (Millionen von Jahren) eine Rolle spielen.
 - (7) Ganz so einfach ist die Rechnung in Bezug auf die Gesamtbilanz allerdings nicht, weil auch Atmungsprozesse betroffen sind, deren Reaktion bisher deutlich unklarer ist.
 - (8) Ein weiterer wichtiger Grund ist außerdem die südliche Lage, die erhöhter Sonneneinstrahlung und damit zu erhöhter Verdunstung führt
 - (9) Vgl. RCP8.5 Szenario im 5. IPCC Bericht [1].

**Dieser Beitrag wird in geänderter Form im Beck-Verlag „Zukunft Klima“
(Reichstein in Gruss & Marotzke 2015) erscheinen.**

Treibhausgasemissionen im Klimawandel - Greenhouse Gas Emissions and Climate Change

Sophie ZECHMEISTER-BOLTENSTERN^{1*}

Fertilized grasslands are a major source of the potent greenhouse gas N₂O, exceeding other land use types such as croplands, wetlands and forests. This lecture addresses effects of climate change on the emission of radiatively active trace gases (N₂O, NO, NO₂, NH₃ and CH₄) and the underlying soil microbial and physical processes.

We hypothesize that 1) a rise in temperature is likely to increase NxOy emissions to a larger extent than CO₂ emissions, because of multiplying effects of a series of underlying processes, which are all temperature sensitive; 2) elevated atmospheric CO₂ concentrations may counteract the temperature effect; 3) drought slows down the N-cycle and rewetting leads to pulses of N-release, which result in enhanced N-trace gas emission rates; 4) during drought the NO/N₂O ratio and the N₂O/N₂ ratio will increase.

In order to catch both hot spots and hot moments of soil trace gas fluxes one can combine manual, semi-automated and fully automated field measurements with controlled laboratory incubations of intact soil cores. The results can be fit into a non-linear multiple regression model for the prediction of GHG emissions from the soil. Predictions from lab incubations can be validated against field measurements. Nitrogen losses via N₂ and the N₂O:N₂ ratio can

be assessed in a specially designed laboratory incubation system.

Plot-scale GHG budgets for the different treatments can be obtained by combining results from non-CO₂ GHG emissions, soil respiration, and biomass production. Similarly, a N-budget including N-leaching and N₂-fixation results could be estimated. The processes of nitrification, denitrification and nitrifier denitrification and their contribution to N-gas emission can be studied. Our laboratory model parameterization results feeds into ecosystem modelling of climate change effects.

The novelty of the Gumpenstein Experiment and the envisaged investigation approach lies in (i) the assessment of non-linear and non-additive effects of climate change on the N-budget as well as the GHG budget. Hereby the response surface approach enables us to distinguish linear from non-linear response functions of soil trace gas fluxes and to single out contrasting effects of temperature, elevated CO₂, nutrient supply and drought. (ii) Trace gas measurements combine technologies for non-reactive as well as reactive N-species and could include experiments on N₂-fluxes, which is unique and closes an important gap of knowledge within the N-cycle.

¹ Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Bodenforschung, Peter Jordan Straße 82, A-1180 WIEN

* Univ.-Prof. Dr. Sophie ZECHMEISTER-BOLTENSTERN, sophie.zechmeister@boku.ac.at

Mikrobielle Prozesse im Klimawandel

Andreas RICHTER^{1*}

Böden speichern weltweit etwa fünfmal mehr an organischem Kohlenstoff als die gesamte Vegetation zusammengekommen. Die Speicherung von Bodenkohlenstoff ist dabei stark an mikrobielle Prozesse gekoppelt, da Mikroorganismen sowohl die zentrale Rolle im Abbau von organischem Material spielen, wie auch die wichtigste Komponente im Aufbau von Humus darstellen. Derzeit setzen Mikroorganismen etwa 60-75 Gt C pro Jahr aus Streu und Humus frei, circa achtmal mehr als die Emissionen aus fossilen Treibstoffen. Es ist daher von außerordentlicher Bedeutung die Reaktion der mikrobiellen Gemeinschaften auf Klimawandel zu verstehen, weil von dieser Reaktion abhängt, ob es zu einer positiven oder negativen Rückkopplung auf das Klima kommen wird.

Der Globale Wandel beeinflusst mikrobielle Prozesse in vielfältiger Weise. Man kann dabei grundsätzlich direkte und indirekte Effekte auf mikrobielle Gemeinschaften unterscheiden. Zu den wichtigsten direkten Einflüssen gehören erhöhte Temperaturen, veränderte Niederschlagsmengen und -muster (die zum Beispiel zu Bodentrockenheit führen können) und erhöhte Nährstoffdepositionen. Wichtiger scheinen aber indirekte Effekte sein, die vor allem durch Veränderungen des Pflanzenwachstums und der Zusammensetzung der Vegetation durch erhöhte Temperaturen, veränderte Niederschläge, sowie durch erhöhtes atmosphärische CO₂ und Nährstoff-Deposition ausgelöst werden. Verändertes Pflanzenwachstum führt dabei nicht nur zu Veränderungen in Menge und Qualität der Blatt- und Wurzelstreu, sondern auch zu Änderungen in Wurzelexsudaten, Rhizodeposition und Kohlenstoffabgabe an Mykorrhiza-Pilze. Dieser unterirdischen Inputs sind ganz wesentlich für die Aktivität der Mikroorganismen im Boden verantwortlich. Wurzelexsudationen können dabei die mikrobielle Gemeinschaft aktivieren (etwa in tieferen Bodenschichten, wo die Mikroorganismen meist energielimitiert sind) oder zu verstärktem Abbau von stickstoffhaltigen Substraten anregen, was man als „microbial

nitrogen mining“ bezeichnet. In beiden Fällen kann es durch die Wurzelexsudationen zu einem verstärkten Abbau von Humusstoffen kommen, was man als „priming of soil organic matter decomposition“ bezeichnet und was einer der wichtigsten Mechanismen sein dürfte, wie Pflanzen den Abbau von organischem Material beeinflussen, und damit die Verfügbarkeit von Nährstoffen.

Ziel unserer Arbeitsgruppe an der Universität Wien ist es aber nicht nur die Auswirkungen von Klimawandel zu beschreiben, sondern auch die dahinterliegenden Mechanismen zu verstehen, um bessere Prognosen von Boden-Klima-Rückkopplungen zu ermöglichen. Um die Reaktionen von Mikroorganismengemeinschaften zu beschreiben, gibt es vor allem drei Schlüssel-Parameter: die Kohlenstoff- und Stickstoffnutzungseffizienz, die mikrobiellen Turnover-Raten (mikrobielle Mortalität) und die Muster der Extrazellulären Enzymaktivitäten. Die mikrobielle Kohlenstoffnutzungseffizienz (CUE) beschreibt, wie viel vom organischen Kohlenstoff, den Mikroorganismen aufnehmen, in Wachstum umgesetzt werden kann. Gemeinsam mit den mikrobiellen Turnover-Raten, bestimmt diese Größe, wie viel Kohlenstoff pro Zeiteinheit im Boden verbleibt und wie viel als CO₂ in die Atmosphäre gelangt. Die mikrobielle Stickstoffnutzungseffizienz (NUE) beschreibt hingegen, wie viel vom organischen Stickstoff den Mikroorganismen aufnehmen, als anorganischer Stickstoff wieder in den Boden kommt und damit für das Pflanzenwachstum zu Verfügung steht. CUE und NUE sind daher synthetisch-integrative Darstellungen des Kohlenstoff- und Stickstoff-Metabolismus von Mikroorganismengemeinschaften.

In diesem Vortrag werden Beispiele aus der Literatur und aus eigener Forschung vorgestellt, wie sich CUE und NUE im Klimawandel verhalten, etwa aus einem Projekt in dem Mähwiesen in den österreichischen Alpen untersucht wurden, wo CUE und NUE erstmals gemeinsam bei unterschiedlichen Temperaturen und Bodenfeuchtigkeiten gemessen wurden.

¹ Department für Mikrobiologie und Ökosystemforschung Universität Wien, Universitätsring 1, A-1010 WIEN

* Univ.-Prof. Dr. Andreas RICHTER, andreas.richter@univie.ac.at

ClimGrass - ein experimenteller Ansatz zur Erforschung von Auswirkungen des Klimawandels auf Grünland

Michael BAHN^{1*}

Klimaprojektionen lassen in den kommenden Jahrzehnten eine deutliche Zunahme der Lufttemperatur, der atmosphärischen CO₂-Konzentrationen und der Häufigkeit und Intensität von Wetterextremen erwarten. Die Quantifizierung der Auswirkungen dieser Umweltveränderungen auf die Produktivität von Ökosystemen und auf deren biogeochemische Rückkopplungen mit dem Klimasystem ist immer noch mit großen Unsicherheiten behaftet, sowohl hinsichtlich der Größenordnung als auch der Wechselwirkungen. Wetterextreme sind dabei von besonderer Bedeutung, da sie überproportional starke Auswirkungen auf die Produktivität und die ökosystemaren Rückkopplungen zum Klimasystem haben. Während die Auswirkungen einzelner Klimafaktoren auf die Produktivität und Stoffkreisläufe von Ökosystemen verhältnismäßig gut erforscht sind, gibt es kaum Studien, die die zu erwartenden kombinierten Auswirkungen mehrerer Faktoren, wie Erwärmung, erhöhtes CO₂ und Dürreereignisse untersuchen. Das stellt eine bedeutsame Wissenslücke dar, vor allem da Metaanalysen darauf hinweisen, dass die Reaktionen von Ökosystemen auf kombinierte Umweltveränderungen anhand der Ergebnisse von Einzelfaktorexperimenten nicht vorhersagbar sind.

Die Klima-Manipulationsanlage an der landwirtschaftlichen Forschungsanstalt HBLFA Raumberg-Gumpenstein stellt einen Meilenstein in der systematischen Untersuchung

möglicher Auswirkungen des Klimawandels auf Ökosysteme dar, insbesondere für bewirtschaftetes Grünland, das in viele Regionen Europas und im speziellen in Österreich von großer Bedeutung ist. Sie ermöglicht die Analyse von Auswirkungen einzelner und kombinierter Veränderungen der Lufttemperatur (Erwärmung um 1,5 bzw. 3°C) und der atmosphärischen CO₂-Konzentrationen (Erhöhung um 150 bzw. 300 ppm gegenüber dem aktuellen Wert) auf die Produktivität und die Kreisläufe von Kohlenstoff, Wasser und Nährstoffen. Das experimentelle Design folgt aufbauend auf mehrstufigen experimentellen Änderungen der Umweltfaktoren einem regressionsbasierten Ansatz, der für Ökosystemmodelle besonders wertvolle Eingangs- und Validierungsgrößen liefert *Abbildung 1*). Darüber hinaus wird untersucht, wie sich Wetterextreme (Sommerdürre und Hitzewelle) auf das Grünland auswirken und in welcher Weise künftige Klimabedingungen die Reaktion des Systems auf Wetterextreme beeinflussen. Da erwartet wird, dass die Nährstoffverfügbarkeit eine zentrale Regelgröße der Reaktion von Ökosystemen auf den Klimawandel und veränderte atmosphärische CO₂-Konzentrationen darstellt, wird in einem Zusatzexperiment der Einfluss der Düngung, einer typischen Bewirtschaftungsmaßnahme in vielen Grünlandsystemen Europas, auf die Produktivität, die Kohlenstoffdynamik und Treibhausgas-Emissionen untersucht.

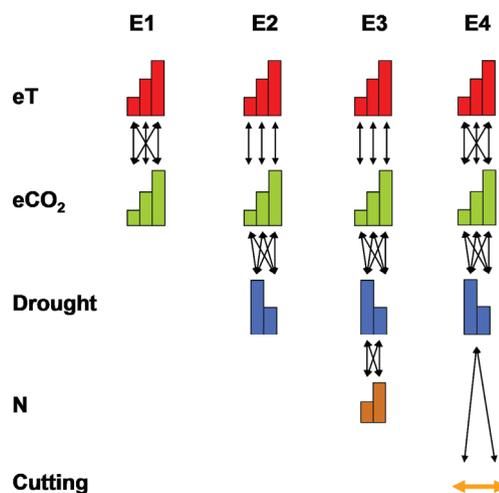


Abbildung 1: Geplante Experimente zur Kombination von Klimafaktoren (eT: aktuelle Temperatur bzw. um +1.5 bzw. + 3°C erhöhte Temperatur; eCO₂ aktuelle bzw. um 150 oder 300 ppm erhöhte atmosphärische CO₂-Konzentration) und Bewirtschaftungsmaßnahmen (veränderte Düngungs bzw. Schnittregimes).

¹ Institut für Ökologie, Universität Innsbruck, Innrain 52, A-6020 INNSBRUCK

* Assoz. Prof. Mag. Dr. Michael BAHN, michael.bahn@student.uibk.ac.at

Entwicklung und Aufbau der ClimGrass-Anlage

Erich M. PÖTSCH und Markus HERNDL^{1*}

Die Planung, Durchführung und Auswertung von Exaktversuchen zu unterschiedlichsten Themenbereichen der Grünlandwirtschaft (Wertprüfung von Sorten, Anlage und Erneuerung, Unkrautregulierung, Düngung, Schnitt- und Weidenutzung sowie Futterkonservierung) sind eine der zentralen Aufgaben des Instituts für Pflanzenbau und Kulturlandschaft an der HBLFA Raumberg-Gumpenstein. Neben den teilweise bereits seit 1945 bestehenden Langzeitversuchen werden zu aktuellen Fragestellungen auch immer wieder neue Freilandversuche angelegt und entsprechende bodenkundliche, vegetationskundliche und pflanzenbauliche Erhebungen durchgeführt.

Klimawandel, Klimafolgen und Anpassungsstrategien im Grünland

Im Jahr 2001 wurde von der HBLFA Raumberg-Gumpenstein zum Thema „Klimawandel“ an knapp 30 Standorten in Österreich ein Versuchskonzept installiert, mit dessen Hilfe die räumliche und geografische Variabilität von Grünlanderträgen und der Futterqualität erfasst und hinsichtlich der klimatischen Veränderungen analysiert werden können (Schaumberger, 2011; Resch, 2012). Dieses Versuchsstellennetz veranschaulicht sehr gut die unterschiedliche Vulnerabilität der einzelnen Standorte gegenüber klimatischen Veränderungen, ermöglicht aber nur eine eingeschränkte systematische Analyse der daraus resultierenden Auswirkungen auf Boden, Bodenwasser und Vegetation (Pötsch *et al.*, 2014). Das Wissen um funktionale Zusammenhänge sind jedoch Grundvoraussetzung für die gezielte Erstellung von Anpassungsstrategien zur Sicherung und Erhaltung der vielfältigen Ökosystemleistungen des Grünlands.

Bereits im Jahre 2008 fanden an der HBLFA Raumberg-Gumpenstein erste Überlegungen und Gespräche zur Errichtung eines multifaktoriellen Freilandexperimentes statt, mit dessen Hilfe der Einfluss gezielt veränderter Wetter- resp. Wachstumsparameter auf das Grünlandökosystem untersucht werden kann. Die ersten Projektideen wurden

mit FachkollegInnen aus den USA (Bruce Kimball und Jeffrey White vom Arid-Land Agricultural Research Center in Maricopa, Arizona) und Deutschland (Babro Winkler, Helmholtz-Zentrum, München; R. Manderscheid und M. Erbs, FAL Braunschweig sowie Georg v. Unold, UMS, München) ausführlich diskutiert und weiterentwickelt. Das Versuchsdesign beinhaltet zunächst die Faktoren Temperatur und CO₂-Konzentration in jeweils drei Abstufungen, später kam noch der Faktor Niederschlag hinzu, der in der nun bestehenden Anlage für ausgewählte Faktorkombinationen zur Simulation von Trockenphasen ausgeschaltet werden kann.

Versuchskonzeption und Installation

Der Versuchsplan wurde unter Beiziehung von Prof. Hans-Peter Piepho (UNI Hohenheim) erstellt, der ein surface-response-Konzept entwickelte, bei dem die einzelnen Faktorkombinationen im Gegensatz zu klassischen Versuchsanlagen nicht in einer statischen sondern in unterschiedlicher Häufigkeit wiederholt werden. Die im Jahr 2007 mit einer aus 9 Futtergräsern und zwei Futterleguminosen bestehenden Dauerwiesenmischung eingesäte Versuchsfläche wurde hinsichtlich der Homogenität des Bodens, des Pflanzenbestandes und der Produktivität geprüft. Im Jahr 2009 erfolgten zunächst der Einbau des Lysimeterhexagons inklusive eines zentralen Serviceschachtes sowie die Verlegung von Einzugschläuchen und Verteilschächten für die spätere Aufnahme von elektrischen Leitungen und Gasschläuchen zur Versorgung der ursprünglich 24 Einzelparzellen. Die erste Ausbaustufe beinhaltete bereits eine weltweit einzigartige Kombination von drei technischen Systemen, i) wägbare Monolithlysimeter (Fa. UMS, D), ii) Infrarot-Heizungssystem (Kimball, 2008; USA) und miniFACE-System (Migletta *et al.*, 2001, I). Die zur Aufnahme der Begasungs- und Beheizungstechnik erforderliche Infrastruktur auf den einzelnen Versuchspartellen wurde auf Basis umfassender Vorversuche ebenso wie die Begasungsringe oder auch die Kästen für die Lüfter im Eigenbau angefertigt und installiert. Dies

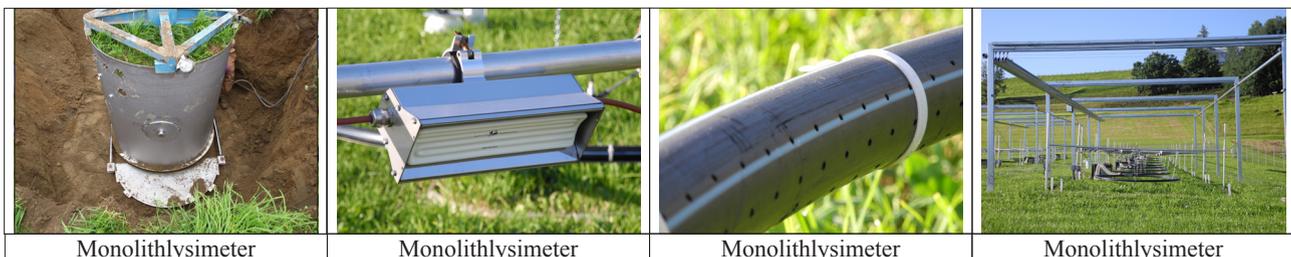


Abbildung 1: Funktionale, technische Elemente der ClimGrass-Anlage

¹ HBLFA Raumberg-Gumpenstein, Institut für Pflanzenbau und Kulturlandschaft, Raumberg 38, A-8952 IRDNING

* Univ.-Doz. Dr. Erich M. PÖTSCH, erich.poetsch@raumberg-gumpenstein.at

Steuerungstechnik und Datenmanagement

Die exakte Simulation der Temperatur (ambient, +1,5°C, +3°C) sowie der CO₂-Konzentration (ambient, +150 ppm, +300 ppm) erfordert eine entsprechende Technik (Dimmer, CO₂-Controller) sowie eine ausgeklügelte Regelung und Steuerung, die in einem direkt am Versuchsfeld stehenden Container untergebracht ist. Die Programmierung der Steuerungstechnik für Temperatur und CO₂-Konzentration erfolgte durch Mag. Jakob Schaumberger, wobei die kontinuierliche Einhaltung der im Vergleich zu Referenzwerten festgelegten Zielgrößen eine extreme Herausforderung darstellt und ein im Millisekundenbereich liegendes Steuerungsintervall erfordert. Die gesamte Steuerung wird visuell auf einem Bildschirm auf Parzellenebene dargestellt und kann manuell bedient bzw. hinsichtlich der für die Beheizung und Begasung festgelegten Kriterien (Einschalt- und Ausschaltzeitpunkt, Strahlungswerte, Windgeschwindigkeit, Referenzparzellenauswahl etc.) verändert werden.

Es besteht der Anspruch, sämtliche im Zusammenhang mit der ClimGrass-Anlage anfallenden Daten zu erfassen zu speichern und in unterschiedlicher Form bereitzustellen. Dies betrifft sowohl Steuerungsdaten, Wetterdaten als auch jegliche Form von Erhebungs- und Messdaten in den Lysimetern als auch auf den Parzellen. Die Datenbank und deren umfangreiche Struktur wurde von Dr. Andreas Schaumberger (HBLFA Raumberg-Gumpenstein) entwickelt und an die individuellen Bedürfnisse der am Projekt beteiligten Institutionen und Personen angepasst.

Erhebungen und Analysen

Im Vergleich zu traditionellen Freilandversuchen erfordert die Pflege, Bearbeitung und Beerntung der ClimGrass-Anlage besondere Vorkehrungen und Sorgfalt. Die Anlage

wird für länger andauernde Arbeiten heruntergefahren, zudem müssen etwa für die Versuchsernte die Trägergestelle von den Parzellen in die Zwischenwege ausgeschwenkt werden, damit eine exakte Ertragserte in den fix positionierten Ernterinnen vorgenommen werden kann. Während dazu in anderen Feldversuchen auch eine Vollerntemaschine zum Einsatz gelangt, muss in der ClimGrass-Anlage auf Motormäher, Hecken- und sogar auf die Handschere zurückgegriffen werden.

Die Parzellengröße von je 16 m² (4×4 m) erfordert hinsichtlich des bestehenden Erhebungsspektrums eine genau festgelegte räumliche Unterteilung und Vorgangsweise (siehe *Abbildung 3*). Die begrenzte Flächenverfügbarkeit beschränkt natürlich auch den Umfang und die Menge von Beprobungen im Bereich Phytomasse und insbesondere des Bodens. Minimal- bzw. nichtinvasive Mess- und Erhebungsmethoden stehen daher im besonderen Interesse und werden z.B. in der Ertrags- und Futterqualitätsbestimmung bei den einzelnen der jeweils drei Grünlandaufwüchse eingesetzt. Ultraschallsensorik und Spektrometertechnik ermöglichen hier zerstörungsfreie Messungen zur dynamischen Ertrags- und Qualitätsbestimmung.

Neben Ertrags- und Qualitätserhebungen stehen Veränderungen des Artenspektrums sowie der phänologischen Entwicklung des Pflanzenbestandes durch die unterschiedlichen Behandlungen im besonderen Interesse. Dazu erfolgen entsprechende Bonituren und Erhebungen auf allen Versuchspartellen (siehe *Abbildung 4*). Weitere Schwerpunkte des Projektes betreffen die Bodennährstoffdynamik sowie Veränderungen im Wasser-, Kohlenstoff- und Stickstoffkreislauf. Wurzeluntersuchungen sowie Gasmessungen im Boden und Pflanzenbestand ergänzen das ambitionierte Untersuchungsprogramm.

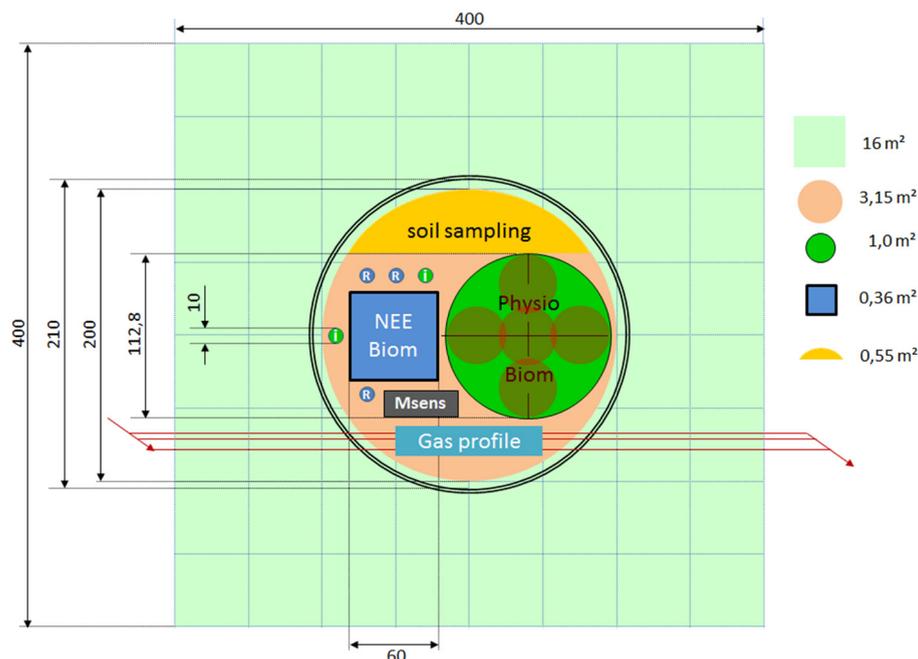


Abbildung 3: Erhebungs- und Beprobungsareale einer Versuchspartelle im ClimGrass-Projekt



Abbildung 4: Messeinrichtungen und Erhebungsarbeiten an der ClimGrass-Anlage

Kooperationspartner und Projekte

Seit 2010 besteht im Zusammenhang mit dem ClimGrass-Projekt der HBLFA Raumberg-Gumpenstein eine intensive Kooperation mit der Universität Innsbruck, der Universität Wien und der Universität für Bodenkultur.

Aktuell wird im Rahmen einer Bund-Bundesländerkooperation unter der Projektleitung von Univ.-Prof. Michael Bahn (Institut für Ökologie der UNI Innsbruck) ein Mesokosmenexperiment vorbereitet, um damit in der bestehenden ClimGrass-Anlage die Auswirkungen des Klimawandels und der Düngung auf die Produktivität und die Kohlenstoffdynamik in Grünland zu untersuchen (Abbildung 5).

Dieses Forschungsprojekt (Nr. 101027) wird dankenswerter Weise vom BMLFUW sowie von den Bundesländern Vorarlberg, Tirol, Salzburg und der Steiermark finanziert und stellt eine wesentliche Ergänzung zur bestehenden Anlage sowie eine wichtige Basis zur Akquisition weiterer Projekte dar.

Literatur

- KIMBALL, B.A., CONLEY, M.M., WANG, S., LIN, X., LUO, C., MORGAN, J. and D. SMITH (2008): Infrared heater arrays for warming ecosystem field plots. *Global Change Biology* 14: 309-320.
- MIGLIETTA, F., HOOSBEEK, M.R., FOOT, J., GIGON, F., HASSINEN, A., HEIJMANS, M., PERESSOTTI, A., SAARINEN T., VAN BREEMEN, N. and B. WALLEN (2001): Spatial and temporal performance of the MiniFACE (Free Air CO₂ Enrichment) system on bog ecosystems in northern and central Europe. *Environmental Monitoring and Assessment* 66: 107-127.
- PÖTSCH, E., ASEL, A., SCHAUMBERGER, A. and RESCH, R. (2014): Impact of climate change on grassland productivity and forage quality in Austria. *Grassland Science in Europe*, Vol. 19 - EGF at 50: The Future of European grasslands, 139-141.
- RESCH, R. (2012): Stoffflüsse, Futtererträge und Biodiversität bei differenzierter Grünlandbewirtschaftung in Österreich. Abschlussbericht Forschungsprojekt NEFA 2345 (DaFNE 100080), LFZ Raumberg-Gumpenstein, 29 S.
- SCHAUMBERGER, A. (2011): Räumliche Modelle zur Vegetations- und Ertragsdynamik im Wirtschaftsgrünland. Dissertationsschrift, Technische Universität Graz, 264 S.

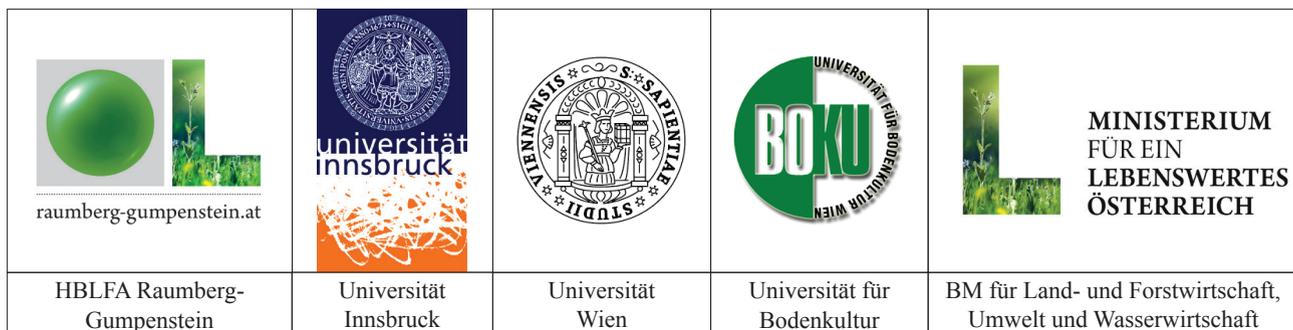


Abbildung 5: Beteiligte Institutionen und Projektpartner



Steuerungstechnik und Datenmanagement für ClimGrass

Andreas SCHAUMBERGER^{1*} und Jakob SCHAUMBERGER

Einleitung

In den Experimenten der Versuchsanlage ClimGrass werden die Auswirkungen möglicher Klimaveränderungen auf die Grünlandwirtschaft untersucht, insbesondere der Effekt einer künftigen Temperaturerhöhung, Trockenheit sowie die Zunahme der Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre stehen im Mittelpunkt des Interesses. Eine Vielzahl an Sensoren, Beobachtungen und Messungen liefern permanent Informationen über den Zustand von insgesamt 54 Dauergrünlandparzellen, welche unterschiedlichen Umweltbedingungen ausgesetzt sind. Im Gegensatz zu Experimenten unter nahezu vollständig kontrollierbaren Laborbedingungen ist die Beeinflussung von Klimabedingungen am Versuchsfeld und unter freiem Himmel eine nicht zu unterschätzende Herausforderung. Die Simulation einer relativen Temperaturerhöhung und Kohlendioxidkonzentration auf Basis aktueller Bedingungen, sowie die Erzeugung künstlicher Trockenperioden mittels Abschattung von Niederschlägen erfordert eine Regelungs- und Steuerungstechnik für Beheizung, Begasung und Niederschlagsabschirmung, die eine kontinuierliche Anpassung an die Referenzsituation (also an das aktuelle Wetter) gewährleistet.

Zahlreiche externe Effekte wie zum Beispiel Wind, Niederschlag, Sonnenstrahlung und Temperaturschwankungen müssen dabei in Zeitabständen von wenigen Millisekunden ausgeglichen werden, um die Simulation für Trockenperioden sowie zwei Szenarien des Klimaeinflusses korrekt durchführen zu können. Bei diesen zwei Szenarien wird in mehrfacher Wiederholung eine mittlere Temperaturzunahme von +1.5°C und +3.0°C bzw. eine Zunahme der Kohlendioxidkonzentration um 150 bzw. 300 ppm simuliert.

Neben der Steuerung ist die Verarbeitung der anfallenden Daten und deren Bereitstellung für die spätere wissenschaftliche Auswertung eine wichtige Voraussetzung. So liefern die automatischen Sensorsysteme in Wetterstationen, Lysimetern und Steuerungsmechanismen pro Tag ca. 40.000 neue Daten, dazu kommen noch Beobachtungen und Analysen von unterschiedlichen Projektbeteiligten aus Erntematerial, Boden, Bonituren, nicht-invasiven Messkampagnen, usw. Ohne automatische Verarbeitung und Speicherung sowie ohne technische Unterstützung bei der Kontrolle ist es nicht möglich, diese Daten in großem Umfang interdisziplinär zu nutzen und daraus fachübergreifende Informationen abzuleiten.

Steuerung und Regelung

Die Klimasimulationen der ClimGrass-Experimente werden mit einer eigens entwickelten Software, programmiert in

der visuellen Programmiersprache LabView von National Instruments, gesteuert. Labview ist weltweit verbreitet und wird hauptsächlich in der Anlagensteuerung verwendet, bei der höchste Präzision gefordert ist. Häufig handelt es sich dabei um Materialtests in Produktion und Forschung. Weitere Anwendungsfelder finden sich in der Weltraumforschung und bei sehr großen und komplexen Projekten, wie etwa jene rund um den CERN-Teilchenbeschleuniger in der Schweiz.

Die visuelle Programmiersprache LabView unterstützt Funktionen und Methoden herkömmlicher Sprachen wie Schleifen, Verzweigungen, Datentypdefinitionen und eine Vielzahl von Datenspeicherstrukturen. Da in LabView hauptsächlich prozessorientierte Konzepte verwirklicht werden, erfüllt diese Art der Softwareentwicklung die Anforderungen in ClimGrass auf optimale Weise. Das entwickelte Steuerungsprogramm unterteilt sich in viele einzelne Module; dies fördert eine übersichtliche und für den geübten Programmierer gut verständliche Abfolge der einzelnen Algorithmen. LabView unterstützt den lesenden und schreibenden Zugriff auf viele Sensoren, Messgeräte und Datenlogger unterschiedlicher Hersteller. Diese Kompatibilität und die Möglichkeit der Schaffung geeigneter Schnittstellen sind gerade für den Einsatz und die Kombination heterogener Systeme in ClimGrass, wie Heizelemente, Begasungseinheiten, Rainout-Shelter, Wetterstationen, Messsensoren, besonders wichtig.

Die Umsetzung der Steuerung in LabView gliedert sich in fünf Bereiche: (a) Initialisierung der Variablen mit Daten aus den Sensoren, (b) Prüfung der Messwerte auf plausible Wertebereiche, (c) Steuerung der Heizelemente, Ventile und Motoren, (d) Aufzeichnung der Steuerungssignale und der dafür zugrundeliegenden Sensordaten in der zentralen ClimGrass-Datenbank und (e) Bereitstellung einer grafischen Oberfläche zur Interaktion zwischen Benutzer und der Anlagensteuerung.

LabView ermöglicht nämlich neben der Entwicklung von Algorithmen auch die Visualisierung sämtlicher Abläufe und Regelmechanismen für die gesamte Versuchsanlage. Die Oberfläche bietet für die tägliche Bedienung der Steuerung wichtige Informationen und es können auf einfache Weise Einstellungen und Zustände verändert werden (siehe *Abbildung 1*).

Hier werden neben manuellen Eingriffen in die Steuerungsprozesse auch die Referenzparzellen für die Klimasimulationen definiert. Die für ClimGrass entwickelte Oberfläche ermöglicht die Abfrage der Werte unterschiedlicher Sensoren, visualisiert die Regelung und bietet dem Benutzer auch

¹ HBLFA Raumberg-Gumpenstein, Institut für Pflanzenbau und Kulturlandschaft, Raumberg 38, A-8952 IRDNING

* Ansprechpartner: Andreas SCHAUMBERGER, andreas.schaumberger@raumberg-gumpenstein.at

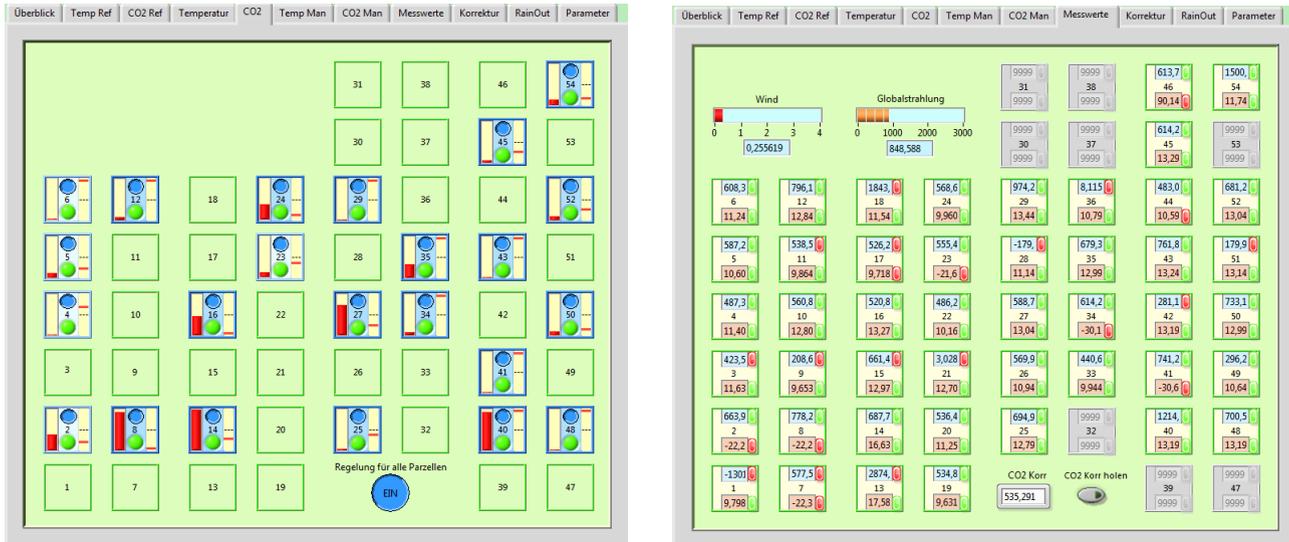


Abbildung 1: Grafische Benutzeroberfläche der ClimGrass-Steuerung mit einer laufenden CO₂-Steuerungsübersicht (links) und einer aktuellen Zustandsanzeige (rechts) als Beispiel

die Möglichkeit, wichtige Einstellungen zu setzen. Auch das Abschalten bzw. Einschalten der gesamten Anlage sowie die Auswahl von Referenzparzellen kann hier per Mausklick vorgenommen werden.

Bei der Temperatursimulation wird auf einigen Versuchspartellen die Bestandesoberfläche mit Hilfe von Infrarotstrahlern um einen Betrag von +1.5°C bzw. +3.0°C im Vergleich zu einer oder mehrerer unbeheizter Referenzflächen erwärmt. Dies erfordert eine permanente Messung der aktuellen Temperatursituation und einen Steuerungsalgorithmus, der bewirkt, dass die zu simulierende Temperaturerhöhung auf die laufenden Schwankungen addiert und die Infrarotstrahler in ihrer Heizleistung so beeinflusst werden, bis ein Gleichgewicht zwischen Referenz- und Simulationsfläche unter Berücksichtigung des erhöhten Temperaturbetrages hergestellt ist. Die Temperatur auf den beteiligten Partellen wird laufend gemessen und alle Abweichungen ausgeglichen, indem die Leistung der Heizelemente mit Hilfe von entsprechend dimensionierten Dimmern reguliert wird.

Klimamodelle zeigen für die Zukunft eine deutliche Zunahme der Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre. In ClimGrass wird die Wirkung dieser Entwicklung auf den Grünlandbestand für zwei Szenarien (+150 und +300 ppm) untersucht. Um diese Konzentrationen zu simulieren ist eine kontinuierliche Begasung des Bestandes mit einem Luft-Kohlendioxid-Gemisch erforderlich. Das Signal für die Steuerung der Ventile, welche die CO₂-Zufuhr auf die Partellen regelt, liegt zwischen 0 und 10 Volt.

Für beide Intensitätsstufen ist zudem eine Regelung der Lüfterleistung mittels Dimmer erforderlich. Die Lüfter dienen der Mischung von CO₂ mit der Umgebungsluft und dem Einblasen über die gelochten Begasungsringe im Zentrum einer Versuchspartelle. Da schon geringe Windstärken zu einer Verfrachtung des eingeblasenen Gases führen, werden die CO₂-Ventile und die Lüfterleistung in Abhängigkeit der Windstärke geregelt. Sobald die Gefahr der unmittelbaren Verfrachtung aufgrund eines starken Windes besteht, schließen die Ventile, um möglichst sorgsam mit

den Gasressourcen umzugehen. Weiters wird nur während des Tages begast, wo die Kohlendioxidkonzentration auch ihre Wirkung in den Pflanzen entfalten kann. Die Begasung wird nur dann aktiviert, wenn die Globalstrahlung einen definierten Wert übersteigt.

Um in ClimGrass auch Trockenperioden simulieren zu können, wurde die Möglichkeit geschaffen, einige Partellen automatisch und in Abhängigkeit von Niederschlägen abzudecken. Ist gemäß Versuchsplan eine Trockenperiode zu simulieren, können Motoren gesteuert werden, welche eine Abdeckplane über insgesamt 12 Partellen ziehen. Sobald der Sensor Niederschlag registriert, startet die Abdeckung; erfolgt kein Niederschlag, sind die Planen eingezogen und in „Parkposition“. Kommt bei aufgespannter Abdeckung starker Wind auf, werden die Planen ebenfalls automatisch eingezogen, um Beschädigungen zu verhindern. Die Steuerung basiert auf den Daten von Regen- und Windsensoren.

Alle Regelungs- und Steuerschritte werden innerhalb einer Schleife im Abstand von 5 Millisekunden ausgeführt. Einzelne Bereiche wie das Einlesen werden alle 100 Millisekunden und die Änderung des Steuersignals jede Sekunde an die Schnittstellen weitergeleitet. Das Hinausschreiben der Werte wird alle 10 Sekunden durchgeführt. Damit wird eine unnötige Überlastung der Geräte und des Steuer-PCs vermieden. Sämtliche Parameter, wie die Frequenz der Bereiche, aber auch wichtige Grenzwerte, Sollwerte und Steuerungsparameter können manuell auch im laufenden Betrieb über die grafische Benutzeroberfläche (siehe *Abbildung 1*) geändert werden.

Datenmanagement

Im Rahmen von ClimGrass werden zahlreiche Daten erhoben, die entweder von Messungen automatischer Sensorsysteme am Feld stammen, von Mitarbeitern manuell beobachtet, gemessen und analysiert oder als Untersuchungsergebnisse in Labors generiert werden. Um Informationen aus den unterschiedlichsten Quellen (Wetterstationen, Lysimeter, Ernte, phänologische Beobachtungen,

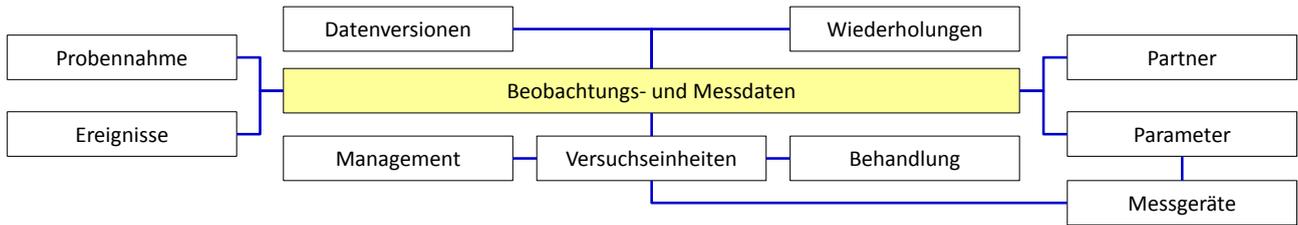


Abbildung 2: Vereinfachtes Schema der Datenstruktur in der ClimGrass-Datenbank

nicht-invasive Erhebungen, usw.) auf möglichst effiziente Weise miteinander kombinieren und gemeinsam auswerten zu können, ist der Aufbau einer zentralen Datenhaltung eine wichtige Voraussetzung.

In *Abbildung 2* ist deren Struktur als stark vereinfachtes Schema dargestellt. Um immer wieder neue Versuchsfragen mit Hilfe der ClimGrass-Anlage bearbeiten zu können,

braucht es eine Datenstruktur, die beliebig erweiterbar ist und auf neue Projekte und Projektpartner ohne zusätzlichen Adaptierungsaufwand reagieren kann. Das entwickelte Relationenschema weist deshalb eine starke Trennung in Datengruppen auf, die jede für sich zwar beliebig skalierbar ist, aber nur durch die Verbindungen untereinander sinnvolle und interpretierbare Informationen liefert.

Lysimetertechnik und Bodenwasserhaushalt

Markus HERNDL^{1*} und Georg von UNOLD²

Um Wasser- und Stoffflüsse im System Atmosphäre-Pflanze-Boden untersuchen zu können, gelten Lysimeter bzw. Lysimeter-Systemlösungen mit dementsprechender Sensorausstattung als vielfach erprobtes und gängiges technisches Hilfsmittel. Ein Lysimeter (von griech. lysis = Lösung, Auflösung und metron = Maß) ist per Definition ein Gerät zur Ermittlung von Bodenwasserhaushaltsgrößen (Versickerungsrate, Verdunstung) und zur Beprobung von Bodensickerwasser, um dessen Quantität und Qualität zu bestimmen.

Lysimeter sind oben offene Zylinder, die mit einem Bodenkern gefüllt und in den Boden so eingelassen sind, dass sie mit ihrer Umgebung glatt abschließen. Am unteren Ende ist der Zylinder verschlossen. Das Sickerwasser wird am Boden des Zylinders aufgefangen und zu einer Messvorrichtung geleitet. Der im Lysimeter befindliche Boden ist in der Regel ein ungestörter Bodenkern aus der nahen Umgebung, kann bei speziellen Fragestellungen aber auch ein gestörter, künstlich geschichteter Boden sein. Die Oberfläche des Bodenkerns im Lysimeter ist meist mit der Vegetation der unmittelbaren Umgebung bewachsen (www.Lysimeter.at).

Neuerungen wie aufgehängte Wägezellen, Gehäusung zur feldidentischen Temperaturdynamik sowie die Verwen-

dung eines Saugkerzenrechs (von Unold, 2008), tragen zu immer genaueren Messwerten sowie zum Einsatz für immer vernetztere wissenschaftliche Fragestellungen bei. Das Lysimeter-System in der ClimGrass-Anlage ergibt ein Lysimeterhexagon, das linear angeordnet ist und aus sechs Bodenmonolithen mit je 1 m² Oberfläche und 1,5 m Tiefe besteht (Herndl, *et al.* 2011).

Anordnung des Lysimeter-Hexagons in der ClimGrass-Anlage

Die Sensorausstattung der wägbaren Lysimeter ist auf die Tiefen 10, 30 und 50 cm konzentriert und umfasst TDR-Trime Sonden pico32 (IMKO GmbH) zur Wassergehaltsmessung sowie mit Temperaturerfassung kombinierte Tensiometer T8-30 (UMS GmbH) zur Bestimmung des Matrixpotentials (siehe *Abbildung 2*). Die Sickerwassererfassung erfolgt über einen 50 Liter-Tank und eine Waage, die grammgenau den Sickerwasseraustrag erfassen kann. Der Einsatz einer bidirektionalen Pumpe sowie eines Saugkerzenrechs an der Unterseite des Lysimeters und Tensiometer im Freiland in gleicher Tiefe, ermöglichen feldidentische Wasserflüsse an der Unterkante der Bodensäule (von Unold, 2008).



Abbildung 1: Lysimeter mit Sondenausstattung vor dem Einbau

¹ HBLFA Raumberg-Gumpenstein, Institut für Pflanzenbau und Kulturlandschaft, Raumberg 38, A-8952 IRDNING

² UMS GmbH, MÜNCHEN

* Dr. Markus HERNDL, markus.herndl@raumberg-gumpenstein.at

Mit der Lysimeter-technik und den in der ClimGrass-Anlage möglichen Versuchsvarianten (Begasung +300 ppm, Beheizung +3°C) sollen folgende Forschungsfragestellungen beantwortet werden:

- langfristige Abnahme/Zunahme von löslichen Formen von Bodennährstoffen v.a. von
 - Stickstoff und Phosphor
 - Veränderungen im Kohlenstoff- und Stickstoffkreislauf
 - Änderungen in den Wasserbilanzparametern (Verdunstung, Sickerwassermenge)
 - Auswirkungen auf Bodentemperatur und Bodenwasser-spannung

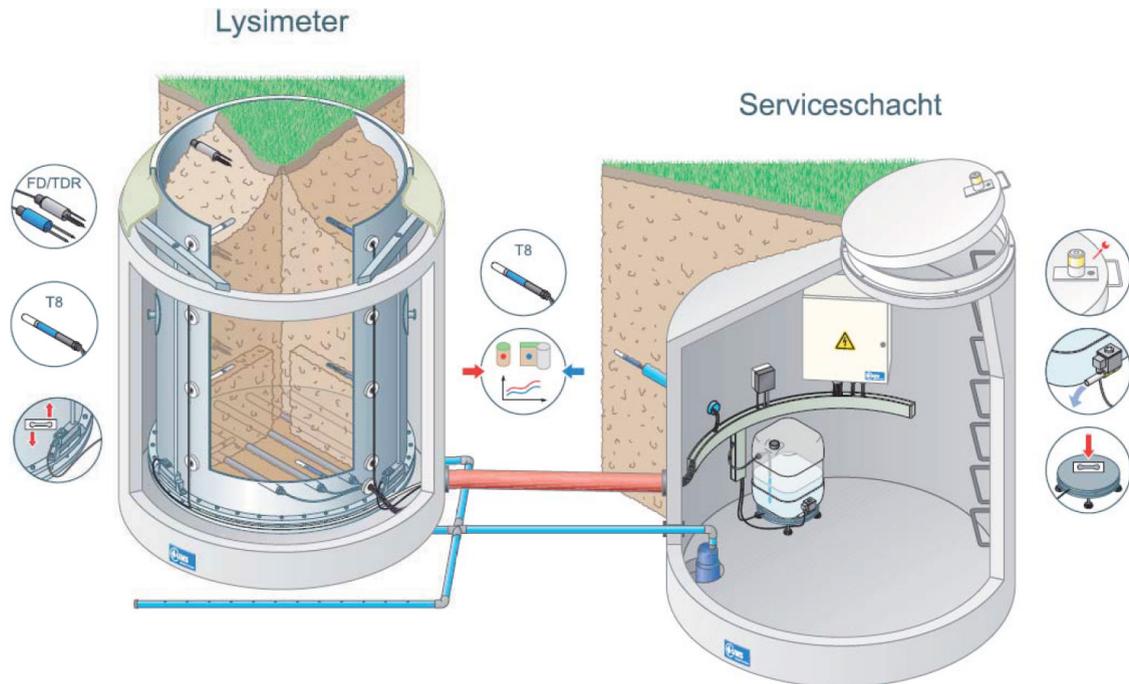


Abbildung 2: Sensorausstattung bzw. Schnitt durch den Lysimeter bzw. Serviceschacht in der ClimGrass-Anlage

Weiterführende Informationen/Literatur

<http://de.wikipedia.org/wiki/Lysimeter>

<http://www.lysimeter.at>

<http://www.ums-muc.de>

<http://www.raumberg-gumpenstein.at>

HERNDL, M., PÖTSCH, E.M., BOHNER, A. und M. KANDOLF (2011): Lysimeter als Bestandteil eines technischen Versuchskonzeptes zur

Simulation der Erderwärmung im Grünland. 14. Gumpensteiner Lysimetertagung 2011, LFZ Raumberg-Gumpenstein.

VON UNOLD, G., (2008): Lysimeter - ein Werkzeug zur genauen Erfassung von Wasser- und Stoffkreislaufparametern/ 1. Modulare Konzepte der Lysimeter-technologie für differenzierte Anwendungsbereiche und deren Einordnung in die Skalenproblematik. In: Fank, J. & Ch. Lanthaler (Hrsg., 2008): Diffuse Einträge in das Grundwasser: Monitoring - Modellierung - Management. Landwirtschaft und Wasserwirtschaft im Fokus zu erwartender Herausforderungen. Beiträge z. Hydrogeologie, 56, Graz.

Einsatz von nicht-invasiven Messtechniken zur Beobachtung der Entwicklung von Grünlandbeständen

Andreas SCHAUMBERGER^{1*}, Medardus SCHWEIGER¹ und Manuel ADELWÖHRER¹

Einführung und Motivation

Mit Hilfe der ClimGrass-Versuchsanlage wird die Wirkung von Umwelteinflüssen auf die Entwicklung und die Eigenschaften eines Grünland-Mischbestandes beobachtet. Um möglichst viele Effekte im System Boden-Pflanze-Atmosphäre untersuchen zu können, werden zahlreiche Sensoren eingesetzt, welche Umweltbedingungen erfassen und steuern. Der Grünlandbestand auf den Versuchspartellen steht dabei im Mittelpunkt des Interesses. Um exakte Informationen über die Biomasse und deren Inhaltsstoffe zu bekommen, werden bei jeder Ernte des als Dreischnittsystem angelegten Grünlandes Proben genommen und einer umfangreichen Analyse zugeführt.

Bei vielen dieser Untersuchungen handelt es sich um sehr detaillierte Momentaufnahmen des Pflanzenbestandes, die allerdings destruktiv sind und somit auf nur drei Erntezeitpunkte pro Vegetationsperiode beschränkt bleiben. Soll jedoch eine Entwicklung der Pflanzen und die darauf wirkenden Umwelteffekte untersucht werden, muss auf nichtinvasive Messtechniken zurückgegriffen werden, bei denen verschiedene Parameter am lebenden Pflanzenbestand in möglichst kurzen Zeitabständen zu erfassen sind. Die vorliegende Beschreibung bezieht sich auf die in ClimGrass verwendeten Systeme der nichtinvasiven Beobachtung von Dauergrünland.

Technische und methodische Grundlagen

Der Aufbau von Mess- und Datenreihen zur Beschreibung einer langfristigen Entwicklung ist wegen der Vielzahl an Kleinparzellen und Varianten sowie der häufigen Messwiederholung in kurzen Zeitabständen mit einem sehr hohen Aufwand verbunden. Dem Zusammenspiel verschiedener Systeme zur effizienten Gestaltung von Messkampagnen kommt demzufolge eine große Bedeutung zu. Zu diesem Zweck wurde eine mobile Messeinrichtung konstruiert (siehe *Abbildung 1*), welche als Träger verschiedener Systeme dient, eine exakte Wiederholbarkeit von Messungen gewährleistet und die praktische Arbeit am Feld somit wesentlich unterstützt.

Eine Anwendung nicht-invasiver Messtechniken ist unter anderem die Schätzung der Biomasseentwicklung (vgl. Biewer *et al.*, 2009; Dorigo, 2008). Dafür werden Höhenmessungen am Bestand mittels Ultraschallsensoren der Firma Pepperl & Fuchs durchgeführt (vgl. Fricke *et al.*, 2011b) und mit feldspektroskopischen Messungen kombiniert (Fricke und Wachendorf, 2013). Hier kommt ein Gerät der Firma tec5 mit folgenden Spezifikationen zum Einsatz: HandySpec Field (VIS/NIR 1.7) mit einem Spektralbereich von 360 bis 1690 nm (zwei Sensoren: MMS1 NIR enh. und PGS NIR 1.7) und einer spektralen Auflösung von 10 bzw. 5 nm. Ergänzt werden die beiden Systeme mit einer

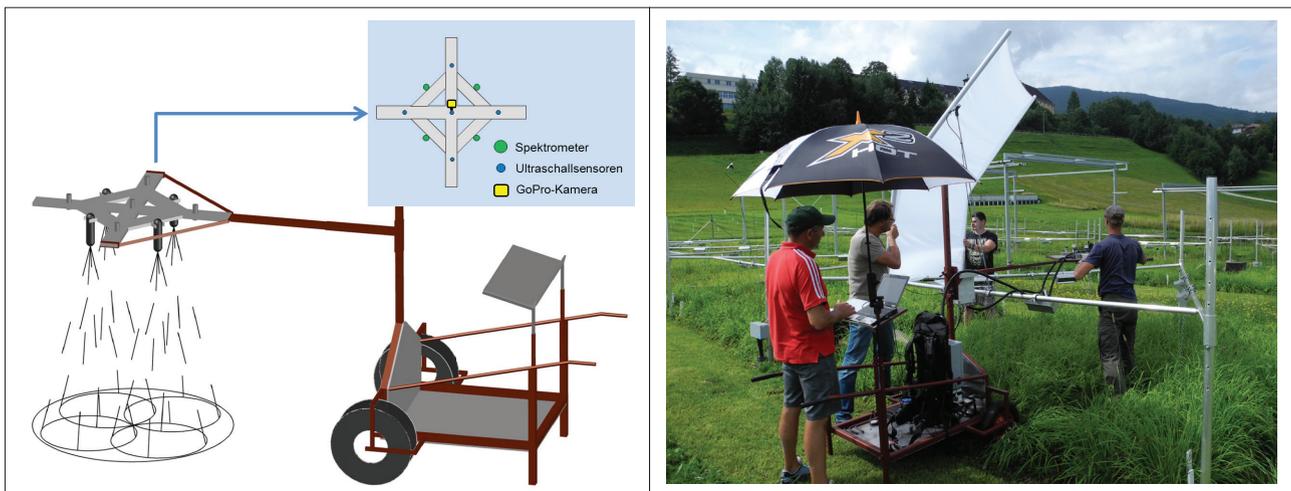


Abbildung 1: Mobile Messeinrichtung für die Ermittlung von Bestandeshöhen mittels Ultraschall und für feldspektroskopische Untersuchungen an den ClimGrass-Versuchspartellen

¹ HBLFA Raumberg-Gumpenstein, Institut für Pflanzenbau und Kulturlandschaft, Raumberg 38, A-8952 IRDNING

* Ansprechpartner: Andreas SCHAUMBERGER, andreas.schaumberger@raumberg-gumpenstein.at

Kamera (GoPro Hero 3+ Black Edition), welche die beobachtete Situation visuell erfasst und spätere Auswertungen unterstützt. Mit dem in *Abbildung 1* dargestellten mobilen Sensorträgersystem ist es möglich, Messungen an immer gleichen Positionen und in einer einheitlichen Höhe über Grund durchzuführen.

Die Veränderung der Bestandeshöhe im Laufe eines Aufwuchses steht in engem Zusammenhang mit der Zunahme des Ertrages (vgl. Fricke *et al.*, 2011a). Regelmäßige Messungen der Bestandeshöhe mit einem Messstab sind aufwendig, jedoch erforderlich, wenn eine kontinuierliche Entwicklung beobachtet werden soll. Um Messkampagnen möglichst objektiv und effizient zu gestalten, wurden auf der in *Abbildung 1* dargestellten mobilen Messeinrichtung fünf Ultraschallsensoren installiert, welche den Abstand zur Oberfläche des Pflanzenbestandes erfassen.

In Kombination mit einer eigens entwickelten Software werden an den fünf Sensoren in fünffacher Wiederholung Messungen vorgenommen. Bevor die Ergebnisse dieser 25 Einzelmessungen pro Parzelle zu einem Mittelwert zusammengefasst werden, kann der Benutzer einzelne Ergebnisse korrigieren. Dies ist dann notwendig, wenn beispielsweise eine höhere Einzelpflanze zu einer Verzerrung des Ergebnisses führen könnte. Überschreitet der Messwert an bestimmten Sensorpositionen eine dafür definierte Standardabweichungsgrenze, kann an dieser Position ein Korrekturwert angebracht werden. Der über den durchschnittlichen Bestand hinausgehende Grashalm kann sozusagen „virtuell“ abgeschnitten werden. Die Bestandeshöhe kann nach Fricke und Wachendorf, 2013 in weiterer Folge mit feldspektroskopischen Messungen kombiniert werden, um daraus unter anderem den Ertrag zu schätzen.

Das dafür eingesetzte Feldspektrometer misst die Reflexion des Lichtes innerhalb des definierten Spektralbereiches. Schatten auf der zu erfassenden Oberfläche beeinflussen je nach Sonnenstand die Reflexionsmessungen sehr stark (vgl. Perbandt *et al.*, 2010) und können aufgrund der Konstruktion des mobilen Messwagens (siehe *Abbildung 1*) und der Gestänge für CO₂-Begasung und Temperaturerhöhung an den ClimGrass-Parzellen nicht verhindert werden. Aus

diesem Grund wird eine künstliche, großflächige Abschattung mittels weißen Gardinstoffes aus 92% Polyester und 8% Leinen vorgenommen. Die Dichte des Textilmaterials lässt genug Sonnenlicht durch und löst bei wolkenlosen Bedingungen dennoch extreme Schlagschatten ausreichend auf und schafft eine diffuse Strahlungssituation. Außerdem wird durch die Abschirmung der direkten Sonnenstrahlung die Schattenbildung auch innerhalb des Bestandes reduziert. *Abbildung 1 rechts* zeigt die Verwendung dieser Vorrichtung.

Neben den bereits genannten Systemen wird der Chlorophyllgehalt des Pflanzenbestandes mittels Chlorophyll-Meter SPAD 502 Plus laufend bestimmt. Zusätzlich erfolgt eine Messung des Leaf Area Index (LAI) mit einem ACCURPAR LP-80. Diese Daten dienen der Kalibrierung von Modellen zur Beschreibung der Pflanzenbestandsentwicklung und unter anderem auch dem direkten Vergleich mit Messungen aus der Spektrometrie.

Das Potenzial der Spektroskopie ist, wie auch andere Disziplinen zeigen, enorm und Spektrogramme können auf vielerlei Art und Weise ausgewertet werden. Neben der Ableitung verschiedener Vegetationsindizes sind statistische Auswertungen und Modellentwicklungen auf Basis einzelner Spektralbereiche Gegenstand vieler wissenschaftlicher Arbeiten (Jacquemoud *et al.*, 2009; Lak und Aboonajmi, 2013; Psomas, 2008; Thenkabail *et al.*, 2000). In *Abbildung 2* wird eine typische Spektralsignatur einer Grünlandoberfläche dargestellt. Es handelt sich dabei um wiederholte Messungen in verschiedenen Positionen.

Wie die Kurven in *Abbildung 2* zeigen, gibt es Bereiche, welche eine Aufbereitung der Daten unbedingt erforderlich machen. So ist beispielsweise im oberen Spektralbereich ein Messrauschen zu sehen, welches durch geeignete Glättungsalgorithmen eliminiert wird. Beim Übergang zwischen verschiedenen Sensoren (in diesem Beispiel bei 1040 nm) tritt oft ein sogenannter Sensor-Offset auf, der aus verschiedenen Gründen auftreten kann und eine Korrektur erfordert. Die angeführten Beispiele zeigen, dass der Datenaufbereitung ebenso wie der Erhebung am Feld größte Aufmerksamkeit geschenkt werden muss, damit eine qualitativ hochwertige

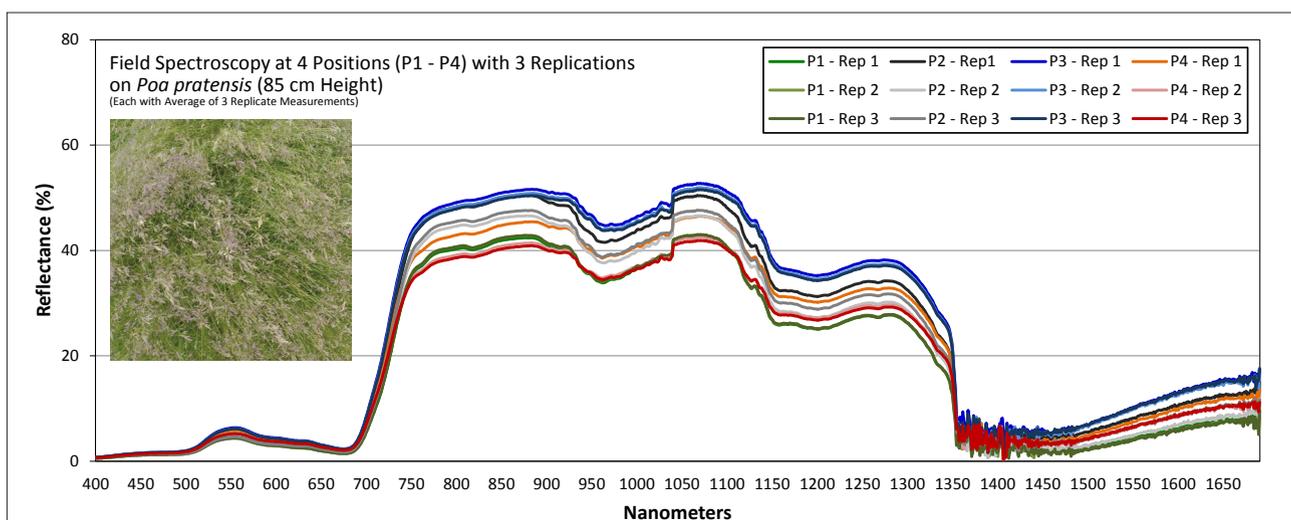


Abbildung 2: Ergebnis einer Messung mittels Feldspektrometer bei wolkenlosen Bedingungen am 12.06.2014

und für die Auswertung brauchbare Datenbasis entstehen kann. Für die Verarbeitung der Daten wird sowohl eine umfangreiche Software als auch eine geeignete Datenbankstruktur entwickelt.

Zusammenfassung

Die Generierung von Messdaten aus pflanzenbaulichen Experimenten führen in den meisten Fällen zu mehr oder minder invasiven Eingriffen in das System Boden-Pflanze-Atmosphäre. Dadurch kommt es unweigerlich zu einer Beeinflussung der Pflanzenbestandsentwicklung, die beispielsweise im Fall einer Ernte die gesamte Entwicklung vollständig „zurücksetzt“. Nichtinvasive Messtechniken haben den Vorteil, dass sie beliebig oft wiederholt werden können, ohne die Pflanzen in ihrer Entwicklung zu stören. Dadurch ergeben sich Zeitreihen, die Informationen über Veränderungen an den immer gleichen Individuen und der darauf einwirkenden Umwelteffekte liefern. Die Methodik und die darauf angewandte Sorgfalt bei der nichtinvasiven Datenerhebung am Feld ist von größter Bedeutung, da hier viele Unsicherheiten bestehen, welche nicht direkt in den Daten abgebildet werden (beispielsweise atmosphärische Trübungen und deren Auswirkung auf die Reflexionswerte in der Feldspektroskopie). Ziel in ClimGrass ist es unter anderem, einen klar definierten und methodisch fundierten Datenfluss vom Feld bis hin zum statistischen Modell zu gewährleisten. Dazu gehören sowohl die praktischen Anforderungen am Feld, als auch die eingesetzten Auswerteverfahren.

Literatur

- Biewer, S., Fricke, T. und Wachendorf, M. (2009): Determination of Dry Matter Yield from Legume-Grass Swards by Field Spectroscopy. *Crop Science* 49 (5), 1927-1936.
- Dorigo, W.A. (2008): Retrieving canopy variables by radiative transfer model inversion - a regional approach for imaging spectrometer data. Dissertation, Technische Universität München, Wissenschaftszentrum Weihenstephan, 230 S.
- Fricke, T., Richter, F. und Wachendorf, M. (2011a): Assessment of forage mass from grassland swards by height measurement using an ultrasonic sensor. *Computers and Electronics in Agriculture* 79 (2), 142-152.
- Fricke, T., Richter, F. und Wachendorf, M. (2011b): Störungsfreie Erfassung von Biomassen in Leguminosen/Gras-Beständen mit einem Ultraschallsensor. 55. Jahrestagung der Arbeitsgemeinschaft Grünland und Futterbau der Gesellschaft für Pflanzenwissenschaften „Nachhaltigkeit in der intensiven Futtererzeugung“, Oldenburg, AGGF, Band 12, 25.-27. August 2011, 73-78.
- Fricke, T. und Wachendorf, M. (2013): Combining ultrasonic sward height and spectral signatures to assess the biomass of legume - grass swards. *Computers and Electronics in Agriculture* 99 (0), 236-247.
- Jacquemoud, S., Verhoef, W., Baret, F., Bacour, C., Zarco-Tejada, P.J., Asner, G.P., François, C. und Ustin, S.L. (2009): PROSPECT + SAIL models: A review of use for vegetation characterization. *Remote Sensing of Environment* 113, Supplement 1 (0), S56-S66.
- Lak, M.B. und Aboonajmi, M. (2013): Application of spectrometry in agricultural practices. CSBE/SCGAB 2013 Annual Conference, Saskatoon, University of Saskatchewan, July 7-10, 2013, 8.
- Perbandt, D., Fricke, T. und Wachendorf, M. (2010): Effects of additional illumination under changing simulated sky cover on field spectroscopic measurements in clover-grass swards. 23rd EGF General Meeting “Grassland in a Changing World”, Kiel, Germany, Grassland Science in Europe 15, August 29 - September 2, 2010, 262-264.
- Psomas, A. (2008): Hyperspectral Remote Sensing for Ecological Analyses of Grassland Ecosystems. Dissertation, Universität Zürich, Mathematisch-naturwissenschaftliche Fakultät, 121 S.
- Thenkabail, P.S., Smith, R.B. und De Pauw, E. (2000): Hyperspectral Vegetation Indices and Their Relationships with Agricultural Crop Characteristics. *Remote Sensing of Environment* 71 (2), 158-182.

Bestandesgaswechsel und Bodenatmung

David REINTHALER^{1*} und Michael BAHN¹

Bei der Station “Bestandesgaswechsel und Bodenatmung” wird der ökosystemare Kohlenstoffkreislauf und die Effekte der Klimaänderungen darauf erklärt. Die Nettoaustauschrate von CO₂ zwischen Ökosystemen und Atmosphäre (NEE) ist entscheidend dafür, in welchem Maß CO₂ als Treibhausgas aus der Atmosphäre in Ökosystemen aufgenommen bzw. aus Ökosystemen emittiert wird. Sie setzt sich aus den Komponenten Photosynthese und Atmung zusammen. Für die ökosystemare Atmung ist die Bodenatmung die wichtigste Komponente.

Sie setzt weltweit ca. 10-mal so viel CO₂ frei wie anthropogene Emissionen. Erste Ergebnisse aus unserem Experiment bestätigen die Hypothese, dass sich mit erhöhter Temperatur auch die Bodenatmung des untersuchten Graslandes erhöht.

Neben einer Präsentation der ersten Ergebnisse zum Bestandesgaswechsel und der Bodenatmung bietet die Station die Möglichkeit, die wichtigsten in diesem Experiment angewandten Methoden zur Erfassung der CO₂-Flüsse kennenzulernen.



Begasungseinheit mit Erntering sowie Teflonrahmen zum Fixieren von mobilen Gaswechselkammern



Vollautomatisierte Einheit zur Messung des Gaswechsels im Pflanzenbestand



Rohrstutzen zur Durchführung von Bodengasmessungen

¹ Institut für Ökologie, Universität Innsbruck, Innrain 52, A-6020 INNSBRUCK

* David REINTHALER, MSc, david.reinthal@student.uibk.ac.at

