

21. Alpenländisches Expertenforum

Klimawandel im Alpenraum – Auswirkungen auf das Ökosystem
Grünland und dessen Bewirtschaftung

26. und 27. März 2019
HBLFA Raumberg-Gumpenstein

www.raumberg-gumpenstein.at

BERICHT

über das

21. Alpenländische Expertenforum

zum Thema

Klimawandel im Alpenraum – Auswirkungen auf das Ökosystem Grünland und dessen Bewirtschaftung

26. und 27. März 2019

HBLFA Raumberg-Gumpenstein



Impressum

Herausgeber

Höhere Bundeslehr- und Forschungsanstalt für Landwirtschaft
Raumberg-Gumpenstein, A-8952 Irdning-Donnersbachtal
des Bundesministeriums für Nachhaltigkeit und Tourismus

Direktion

Direktor Mag. Dr. Anton HAUSLEITNER
Dipl. ECBHM Dr. Johann GASTEINER
Prof. DI Othmar BREITENBAUMER

Für den Inhalt verantwortlich

die Autoren

Redaktion

Erich M. PÖTSCH

Layout und Satz

Viktoria SCHWEIGER

Druck, Verlag und © 2019

Höhere Bundeslehr- und Forschungsanstalt für Landwirtschaft
Raumberg-Gumpenstein, A-8952 Irdning-Donnersbachtal



universität
wien



HOCHSCHULE FÜR
Agrar- und Umweltpädagogik

Inhaltsverzeichnis

Szenarien zum Klimawandel im Alpenraum

Andreas GOBIET..... 1

ClimGrass – ein innovatives Freilandexperiment zur Erforschung der Folgen des Klimawandels im Grünland

Erich M. PÖTSCH, Markus HERNDL, Michael BAHN, Andreas SCHAUMBERGER, Medardus SCHWEIGER, Matthias KANDOLF, David REINTHALER, Martina SCHINK und Manuel ADELWÖHRER 3

Einfluss des Klimawandels auf die Bodenwasserbilanz im inneralpinen Grünland

Veronika SLAWITSCH, Steffen BIRK, Markus HERNDL und Erich M. PÖTSCH 11

Auswirkungen des Klimawandels auf den Kohlenstoffkreislauf im Grünland

David REINTHALER 15

Einfluss des Klimawandels auf Stickstoffflüsse im Grünlandökosystem

Evi DELTEDESCO, Katharina KEIBLINGER, Maria NAYNAR, Hans-Peter PIEPHO, Markus GORFER, Erich M. PÖTSCH und Sophie ZECHMEISTER-BOLTENSTERN 19

Auswirkungen des Klimawandels auf mikrobielle Gemeinschaften und deren Funktionen in Böden:

Das ClimGrass-Experiment

Wolfgang WANEK, Alberto CANARINI, Eva SIMON, Joana SILVA, Judith PROMMER, Ivana BOGDANOVIC, Tania MAXWELL, Erich M. PÖTSCH, Michael BAHN und Andreas RICHTER..... 23

Wie reagiert die Bodenmikrobiologie im Grünland auf den Klimawandel?

Markus GORFER, Evi DELTEDESCO, Katharina KEIBLINGER, Hans-Peter PIEPHO, Livio ANTONIELLI, Sophie ZECHMEISTER-BOLTENSTERN und Erich M. PÖTSCH 25

Spurengas-Emissionen von Grünland- und Waldböden nach Dürre und Wiederbefeuchtung

Eva ECKER, Sophie ZECHMEISTER-BOLTENSTERN, Eugenio DIAZ-PINES, Torsten BERGER, Erich M. PÖTSCH..... 29

Kombinierte Effekte erhöhter CO₂- und Temperaturlevel auf N₂O- und CH₄-Konzentrationen und -flüsse während einer künstlichen Dürreperiode

Alexandre FAHRINGER, Eugenio DIAZ-PINES, Evi DELTEDESCO, Katharina KEIBLINGER, David REINTHALER, Erich M. PÖTSCH, Sophie ZECHMEISTER-BOLTENSTERN..... 31

Veränderungen der Vegetationsdynamik unter zukünftigen Klimabedingungen

Andreas SCHAUMBERGER, Erich M. PÖTSCH und Medardus SCHWEIGER..... 35

Einfluss des Klimawandels auf das Wurzelwachstum im Grünland

Sarah Helena GEIGER..... 45

Auswirkung zukünftiger Klimabedingungen auf Ertrag und Futterqualität im Grünland

Erich M. PÖTSCH, Markus HERNDL, Andreas SCHAUMBERGER, Medardus SCHWEIGER, Reinhard RESCH und Manuel ADELWÖHRER 49

Das hydrologische Jahr 2018 – Ausnahmejahr oder Beginn eines Trends für das inneralpine Grünland

Markus HERNDL, Veronika SLAWITSCH, Erich M. PÖTSCH und Martina SCHINK 55

Vorwort

Der Klimawandel und dessen Folgen betreffen alle Lebens- und Wirtschaftsbereiche. Die Landwirtschaft gilt als besonders sensitiv gegenüber klimatischen Veränderungen, zumal zahlreiche wetterespektive klimabestimmende Kenngrößen wie Temperatur, Niederschlag, Luftfeuchtigkeit, Globalstrahlung oder die atmosphärische CO₂-Konzentration zugleich auch wichtige Wachstumsfaktoren darstellen. Auch das Grünland als wichtigste Kulturart im Berggebiet und Alpenraum wird sich auf veränderte Klimabedingungen und auf das zunehmende Auftreten von Extremereignissen einstellen müssen. Grünlandvegetation weist im Vergleich zu anderen Kulturpflanzen einen sehr hohen Wasserbedarf auf und ist daher hinsichtlich der Ertragsleistung besonders stark von längeren Trockenperioden betroffen. Der Klimawandel wird sich auf das Ökosystem Grünland aufgrund der vorliegenden, sehr vielfältigen Standortbedingungen (Höhenlage, Exposition, Topographie, Art und Gründigkeit des Bodens, etc.) auch in unterschiedlicher Art und Intensität auswirken. ClimGrass, ein multifaktorielles, innovatives Freilandexperiment an der HBLFA Raumberg-Gumpenstein, ermöglicht schon jetzt einen Einblick in das komplexe System Pflanze-Boden-Wasser-Atmosphäre unter aktuellen und zukünftige Klimabedingungen im Grünland. Ergebnisse aus diesem Forschungsprojekt, an dem mittlerweile zahlreiche Partner aus universitären Einrichtungen mit teilweise eigenen Forschungsprojekten mitwirken, sollen zum besseren Verständnis der durch den Klimawandel beeinflussten Prozesse beitragen, zugleich aber auch Anpassungsstrategien für die praktische Grünlandwirtschaft erarbeiten bzw. überprüfen.

Im Rahmen des 21. Alpenländischen Expertenforums werden nach einem Einblick in die nationale Klimapolitik und die Szenarien zum Klimawandel im Alpenraum erste Ergebnisse aus unterschiedlichen Teilbereichen des ClimGrass-Projektes vorgestellt und diskutiert. Wir bedanken uns dafür bei allen Vortragenden, insbesondere auch für die Bereitstellung der schriftlichen Unterlagen zur Erstellung des Tagungsbandes, der von Frau Viktoria Schweiger perfekt layoutiert und gestaltet wurde!

Erich M. PÖTSCH, Markus HERNDL und Andreas SCHAUMBERGER

Szenarien zum Klimawandel im Alpenraum

Andreas Gobiet*

Klimawandel – ein Thema, das erst kürzlich durch den neuen „1.5 Grad-Bericht“ des Weltklimarates (<http://www.ipcc.ch/report/sr15/>) wieder stärker in das Bewusstsein der Öffentlichkeit gerückt wurde. Der Bericht zeigt auf, dass die derzeit geplanten Klimaschutz-Bemühungen bei weitem nicht ausreichen, um die weltweite Erwärmung, verglichen

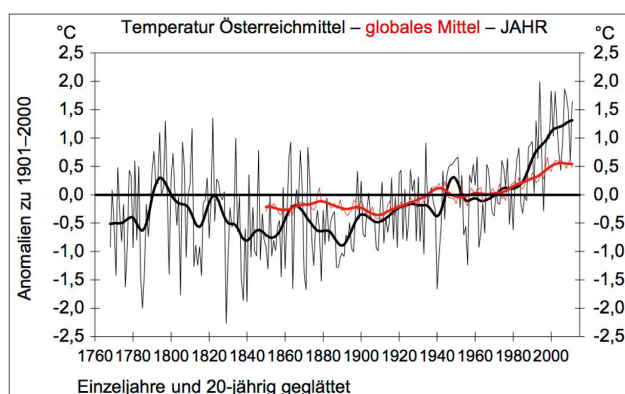


Abbildung 1: Anomalien der globalen Jahres-Mitteltemperatur (schwarz) und der Jahres-Mitteltemperatur in Österreich (rot). Quelle: APCC (2014).

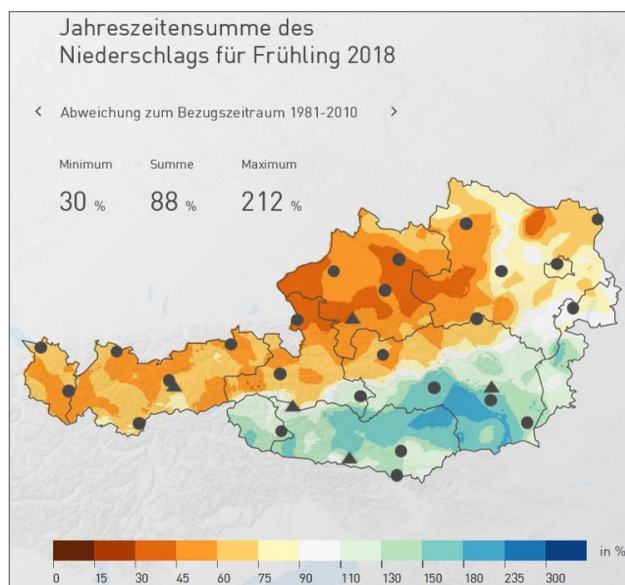


Abbildung 2: Niederschlagsanomalie im Frühling 2018. Quelle: <https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/klima-aktuell/klima-monitoring>.

mit vorindustriellen Zeiten, unter +1.5 °C zu halten. Die Atmosphäre hat sich bereits um ein Grad erwärmt, und ein gewisses Maß an weiterer Erwärmung ist selbst bei radikalen Klimaschutzbemühungen nicht mehr vermeidbar. Wir entscheiden heute also längst nicht mehr darüber, ob wir den Klimawandel vermeiden wollen, sondern vielmehr darüber, wie stark sich das Klima ändern wird. Die Spannweite reicht nach heutigen Schätzungen von den angesprochenen +1.5 ° bis etwa +5 ° weltweiter Erwärmung bis zum Ende des 21. Jahrhunderts. Was bedeutet nun aber „weltweite Erwärmung“ für den Alpenraum?

Wir wissen zum Beispiel, dass die Temperaturen in der Vergangenheit im Alpenraum doppelt so schnell gestiegen sind wie im weltweiten Mittel (+2 ° seit 1880; *Abbildung 1*).

Dieser langjährige Erwärmungstrend führt auch in Österreich vermehrt zu Temperaturrekorden und -extremen. So war etwa 2018 das wärmste Jahr in der über 150-jährigen Messgeschichte und der Frühling und Sommer 2018 durch ein starkes Niederschlagsdefizit in den nördlichen Landesteilen gekennzeichnet (*Abbildung 2*), was gemeinsam zu erheblicher Dürre führte. Auch der Winter 2018/2019 kann mit Rekordschneemengen im Norden, Rekordtrockenheit im Südosten und einem extrem frühen Start phänologischer Phasen, die Pflanzen für Spätfrost empfindlich machen (Blüte), als außergewöhnlich bezeichnet werden.

Des Weiteren wissen wir, dass die Kryosphäre (Eis und Schnee) im Alpenraum sehr sensibel auf Erwärmung reagiert. Bei Schnee zeigt sich der Einfluss des Klimawandels bereits deutlich, so zeigen fast alle qualitativ hochwertige Schneemessstation mit homogenisierten Datenreihen eine signifikante Abnahme der Schneedeckendauer an (*Abbildung 3*).

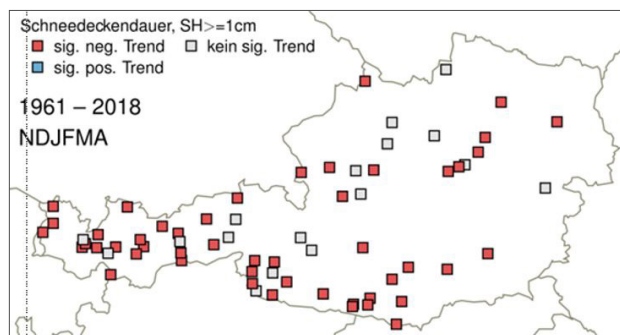


Abbildung 3: Trend der Schneedeckendauer an qualitativ hochwertige Schneemessstation mit homogenisierten Datenreihen in Österreich. Quelle: Olefs et al. (2019).

¹ Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG), KS-Stelle Steiermark, Klusmannstr. 21, A-8053 Graz

* Ansprechpartner: Dr. Andreas GOBIET, andreas.gobiet@zamg.ac.at

Ein weiteres für viele Sektoren hochrelevantes Thema sind Starkniederschläge. Obwohl diese Phänomene schwer zu messen und durch Modelle schwer zu beschreiben sind, zeichnet sich bereits heute in den Messdaten ein Trend zu intensiveren Niederschlägen ab (*Abbildung 4*).

In dem diesen Kurzaufsatz begleitenden Vortrag werden die oben erwähnten Phänomene im Lichte des globalen Klimawandels diskutiert und die Frage gestellt (und teilweise beantwortet), ob sie auf den Klimawandel zurückzuführen sind und ob in Zukunft mit weiterer Zunahme zu rechnen ist. Dazu wird auf die neueste Generation von Klimaszenarien zurückgegriffen.

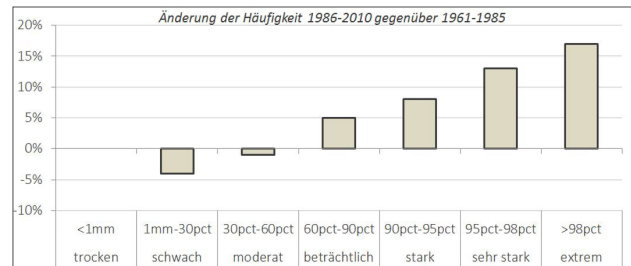


Abbildung 4: Änderung der Häufigkeit unterschiedlicher Niederschlagsklassen in Österreich. Quelle: SPARTACUS, ZAMG, aufbereitet von M. Hofstätter.

ClimGrass – ein innovatives Freilandexperiment zur Erforschung der Folgen des Klimawandels im Grünland

Erich M. Pötsch^{1*}, Markus Herndl¹, Michael Bahn², Andreas Schaumberger¹, Medardus Schweiger¹, Matthias Kandolf¹, David Reinthaler², Martina Schink¹ und Manuel Adelwöhrer¹

Nur wenige Themen beherrschen seit Jahren die Medien und die öffentliche Diskussion so sehr wie das Klima und dessen Veränderungen, die durch das vermehrte Auftreten von Extremereignissen, der steigenden Anzahl von Hitzetagen oder den drastischen Rückgang der heimischen Gletscher auch bei uns schon jetzt deutlich spür- und sichtbar werden. Der Klimawandel und dessen Folgen betreffen jeden einzelnen von uns und beeinflusst auch alle Lebens- und Wirtschaftsbereiche mit enormen finanziellen Schäden für die gesamte Volkswirtschaft.

Der 1988 gegründete Weltklimarat (IPCC), dem Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus der ganzen Welt, 195 Staaten sowie Beobachterinnen und Beobachter von mehr als 100 akkreditierten, internationalen Organisationen angehören, trägt den aktuellen Stand der Klimaforschung zusammen und bewertet auf Basis anerkannter Veröffentlichungen den jeweils neuesten Stand zum Klimawandel. Seit 1995 finden alljährlich Welt-Klimakonferenzen unter der Schirmherrschaft der Vereinten Nationen im Zuge der 1994 in Kraft getretenen Klimarahmenkonvention statt. Berlin, Genf und Kyoto waren dazu die ersten Gastgeber, Paris, Marrakesch, Bonn und schließlich Katowice im Dezember 2018 die letzten. Nach zähem Ringen haben sich bei dieser 24. UN-Klimakonferenz und zugleich 14. Treffen zum Kyoto-Protokoll insgesamt 196 Vertragsstaaten auf ein gemeinsames Regelbuch zur Umsetzung des Pariser Abkommens geeinigt. Dabei geht es unter anderem um Regeln und Standards zur Erfassung der CO₂-Emissionen und um die Nachvollzieh- und Vergleichbarkeit der jeweiligen nationalen Anstrengungen und Maßnahmen zur Zielerreichung, über die ab 2020 in zweijährlichem Abstand berichtet werden soll. Ab 2023 soll darüber hinaus alle fünf Jahre bilanziert werden, ob die Anstrengungen der Staaten die fortschreitende Erderwärmung tatsächlich wirksam begrenzen können.

Klimawandel und dessen Folgen

Jedenfalls werden die vom Weltklimarat und auch im österreichischen Sachstandsbericht „Klimawandel 2014“ prognostizierte Erhöhung der Temperatur, der Anstieg der CO₂-Konzentration der Atmosphäre sowie das verstärkte Auftreten von Wetterextremen in den nächsten Jahrzehnten massive Auswirkungen auf die Gesellschaft und unsere gesamte Umwelt verursachen. Nachdem viele der wetter- und klimabestimmenden Kenngrößen zugleich wichtige

Wachstumsfaktoren für Pflanzen sind, werden auch das österreichische Grünland und dessen Bewirtschaftung besonders vom Klimawandel betroffen sein werden.

Die Klima- und Klimafolgenforschung beschäftigt sich seit vielen Jahren bereits intensiv mit den Ursachen, insbesondere aber mit den Auswirkungen des Klimawandels auf unterschiedliche Lebens- und Wirtschaftsbereiche. Die Forschung stützt sich dabei sowohl auf die Modellierung als auch auf experimentelle Ansätze, wobei letztere durch die komplexe Materie sehr kosten- und zeitintensiv sind. Klimamanipulationsexperimente werden entweder unter Laborbedingungen in Klimakammern und Gewächshäusern (z.B. Kimball *et al.*, 1997) oder im Freiland durchgeführt, wobei meist nur einzelne Wetter-/Klimafaktoren wie z.B. Temperatur oder Niederschlag bewusst gesteuert und verändert werden. Freilandexperimente zur Klimafolgenforschung hingegen stellen eine ganz besondere Herausforderung dar, insbesondere wenn dabei gleich mehrere Faktoren zugleich verändert werden. Wissenschaftlich werden die Auswirkungen des Temperatur- und CO₂-Anstiegs auf Böden und Pflanzen schon seit einigen Jahrzehnten untersucht. Um den CO₂-Effekt auch unter Freilandbedingungen testen zu können, haben sich dazu zwei Methoden durchgesetzt, nämlich „Open-top chambers“ (OTC) und „Free-Air Carbon Dioxide Enrichment“ (FACE), wobei letztere in nahezu allen Kulturarten eingesetzt wird (Miglietta *et al.*, 2001; Winkler und Herbst, 2003; Hovenden *et al.*, 2006; Sánchez-Carillo *et al.*, 2015). Zur Simulation des Einflusses der Temperaturerhöhung werden unterschiedliche Ansätze verfolgt wie z.B. die Boden Erwärmung mit Heizschlangen oder eine Erwärmung mittels Abdeckung (Beier *et al.*, 2004; Ineson *et al.*; 1998). Als erfolgversprechendste Methode zur Simulation der Erderwärmung in Feldversuchen gilt die Erwärmung der Vegetation mittels Infrarotheizung, die im Idealfall mit einer FACE-Technik kombiniert wird (Parton *et al.*, 2007). Der Heizeffekt der Infrarotstrahlung verläuft sehr ähnlich der solaren Strahlung, wirkt allerdings im Gegensatz zu dieser photosynthetisch nicht aktiv.

ClimGrass-Freilandexperiment an der HBLFA Raumberg-Gumpenstein

In den vergangenen Jahren wurde an der HBLFA Raumberg-Gumpenstein unter Mitwirkung zahlreicher in- und ausländischer Experten ein weltweit einzigartiges, multifaktorielles Freilandexperiment entwickelt und realisiert (Herndl *et al.*, 2010, 2011; Pötsch *et al.*, 2019).

¹ Mitarbeiter des Institutes für Pflanzenbau und Kulturlandschaft, HBLFA Raumberg-Gumpenstein, Raumberg 38, A-8952 Irding-Donnersbachtal

² Institut für Ökologie, Universität Innsbruck, Sternwartestrasse 15, A-6020 Innsbruck

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

Versuchsdesign und technische Ausstattung

Auf insgesamt 54 Versuchspartellen können nun Erhöhungen von Temperatur und CO_2 -Konzentration sowie Trockenperioden in unterschiedlichen Abstufungen und Kombinationen simuliert werden (Abbildung 1). Für Feldversuche werden üblicherweise klassische Versuchsdesigns wie etwa lateinische Quadrate, Gitteranlagen oder Blockanlagen verwendet, um einzelne Versuchsglieder/-varianten randomisiert und in mehrfacher Wiederholung anzulegen und zu testen. Bei der Anlage des ersten, ursprünglichen Teils des ClimGrass-Experimentes (Lysi-T-FACE) war bereits klar, dass aufgrund der hohen Anzahl an Faktorkombinationen (3 Temperaturstufen * 3 CO_2 -Stufen) und der zusätzlichen Installation von Monolithlysometern auf 6 Partellen aus Kostengründen kein klassisches Design verwendet werden kann. In Kooperation mit Prof. Dr. Hans-Peter Piepho (Fachgruppe Biostatistik, Institut für Kulturpflanzenwissenschaften der Universität Hohenheim, Stuttgart) wurde daher ein response-surface-Design und damit ein Ansatz ausgewählt, der ursprünglich für technische Applikationen entwickelt und eingesetzt wurde (Piepho *et al.*, 2017).

Die Lufttemperatur wird in drei Abstufungen variiert, nämlich ambient (= T0, das entspricht der jeweils aktuellen Temperatur), $+1,5\text{ °C}$ (= T1) und $+3\text{ °C}$ (= T2), wobei die Beheizung ganztägig und ganzjährig erfolgt und nur bei einer durchgehenden Schneedecke ab einer Höhe von 10 cm ausgesetzt wird. Die Regelung der verwendeten Infrarotstrahler erfolgt auf Basis von Sensormessungen im Zentrum der Versuchspartellen und wird über Dimmer von der Steuerungssoftware „LabView“ (National Instruments) gesteuert. Die CO_2 -Konzentration der Atmosphäre wird ebenfalls in drei Abstufungen geprüft und zwar ambient (= C0, das entspricht der jeweils aktuellen CO_2 -Konzentration), $+150\text{ ppm}$ (= C1), $+300\text{ ppm}$ (= C2) (ppm bedeutet parts per million, also ein 1 Millionstel). Die Begasung erfolgt nur tagsüber, sobald eine Einstrahlungsenergie von 50 W/m^2 erreicht wird und nur innerhalb der Vegetationsperiode von März bis Ende November. Ab einer Windgeschwindigkeit von $1,5\text{ m/sec}$ wird die CO_2 -Zufuhr unterbrochen. Die Kombination C2T2 (also $+3\text{ °C}$ und $+300\text{ ppm CO}_2$)

entspricht jener Klimaprojektion, deren Eintreffen für den Alpenraum zum Ende des 21. Jhd. am wahrscheinlichsten erscheint (Gobiet *et al.*, 2014) und deshalb im internen Sprachgebrauch des ClimGrass-Projektes als „future climate“ bezeichnet wird.

Die Beheizung der Versuchspartellen erfolgt mit jeweils sechs hexagonal angeordneten Infrarotstrahlern, über einen zentral angeordneten Begasungsring (mini-FACE-System) strömt die mit CO_2 angereicherte Umgebungsluft in den Pflanzenbestand. Die gesamte Beheizungs-, Begasungs- und zugehörige Sensortechnik ist auf einem höhenverstellbaren Trägergerüst montiert, das in mehrtägigen Intervallen an die sich im Verlauf der einzelnen Aufwüchse verändernde Vegetationshöhe angepasst wird. Bei Ernte-, Pflege und Beprobungsaktivitäten kann das Trägergerüst über die kabelführende Standsäule in die vorhandenen Zwischenwege ausgeschwenkt werden und ermöglicht damit einen ungehinderten Zugang zu den Versuchspartellen. Zur Ausschaltung eines möglichen blower-effects (Pinter Jr. *et al.*, 2000) sind auch alle unbegasteten Partellen mit einem Begasungsring ausgestattet, durch den nicht angereicherte, ambiente Umgebungsluft strömt. Ebenso sind alle unbeheizten Partellen mit nicht angeschlossenen dummy-heatern bestückt, um allfällige Beschattungseffekte dadurch zu eliminieren.

Das zugeführte CO_2 weist eine gegenüber dem atmosphärischen CO_2 unterscheidbare Isotopensignatur ($\delta^{13}\text{C}$) auf und stammt aus einer speziellen Quelle. Dies erfordert daher jeweils eine separate Belieferung im Zeitintervall von etwa 8 – 10 Tagen, nachdem vor Ort aus Kosten- und Platzgründen nur ein Tankvolumen zur Lagerung von 5 t CO_2 zur Verfügung steht. Jede einzelne Charge wird beprobt und sowohl die Qualität des zugesetzten als auch des ambienten CO_2 in Form der Isotopensignatur an der Universität Wien überprüft. Da jede Parzelle individuell beheizt und begast wird, erfordert dies einen enormen Steuerungs- und Regelungsaufwand mit einer entsprechenden Programmierung im Hintergrund. Die Regelung der CO_2 -Zufuhr erfolgt auf Basis von Sensormessungen im Zentrum der Begasungsringe und wird über Proportionalventile mittels der Steuerungssoftware „LabView“ (National Instruments) gesteuert.

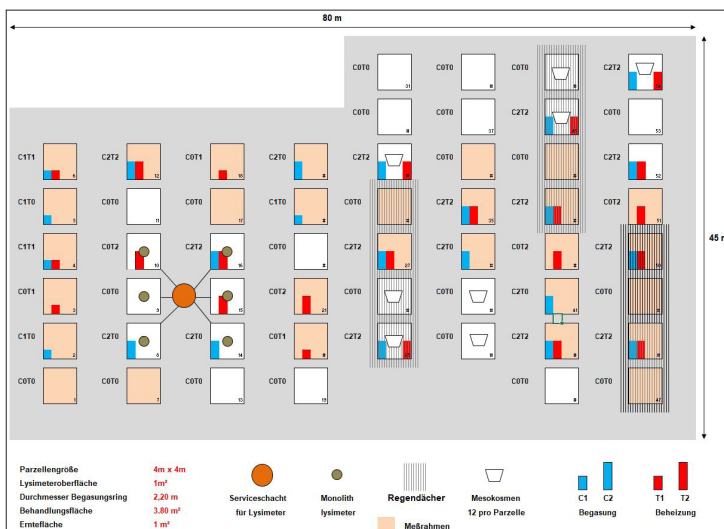


Abbildung 1: Schematische Darstellung der ClimGrass-Versuchsanlage.

Anlagenperformance

Die HBLFA Raumberg-Gumpenstein betreibt schon seit vielen Jahrzehnten sehr erfolgreich Freilandversuche zu unterschiedlichsten Frage- und Themenstellungen aus dem Bereich der Grünlandwirtschaft. Viele dieser Versuche beinhalten unterschiedlichste Gradienten hinsichtlich Düngung und/oder Nutzung und erfordern viel Erfahrung und entsprechendes versuchstechnisches know-how zu deren korrekten Durchführung und Anwendung. Die Umsetzung und möglichst genaue Erreichung der im ClimGrass-Experiment geplanten Erhöhung der Temperatur und der CO_2 -Konzentration stellt jedoch eine ganz besondere Herausforderung dar, nachdem die vorgesehene Beaufschlagung jeweils sehr unterschiedlichen, dynamischen Tages- und Jahresgängen folgen muss. Im Folgenden wird die Anlagenperformance

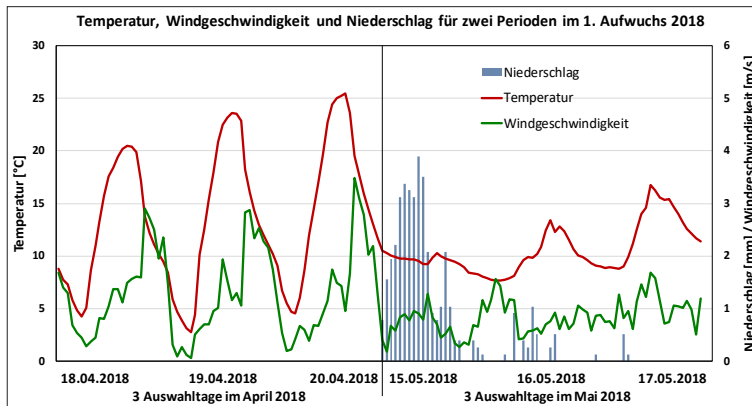


Abbildung 2: Witterungsverlauf in zwei ausgewählten Testperioden im April und Mai 2018.

exemplarisch für ausgewählte Phasen im Zeitraum des 1. Aufwuchses 2018 (04.04.2018 bis 27.05.2018) dargestellt. Diese Evaluierungsphase wurde ausgewählt, da sie sich sowohl durch heterogene Umweltbedingungen sowie durch eine starke Veränderung der Parzellenoberflächen auszeichnet. Um Trends anschaulich darstellen zu können, wurden für Auswertungen über den gesamten Zeitraum des ersten Aufwuchses die Minutendaten aus Beheizung und Begasung zu Tageswerten zusammengefasst. Statistische Auswertungen für diesen Zeitraum basieren hingegen auf Minutendaten. Für die Darstellung von Tagesgängen bestimmter Parameter wurden zwei Testperioden von jeweils drei Tagen mit gänzlich unterschiedlichen Rahmenbedingungen ausgewählt und dafür die Minuten- zu Stundendaten zusammengefasst (siehe *Abbildung 2*).

Testperiode I (*Abbildung 2*, links) vom 18.04.2018 bis 20.04.2018 fiel in die Anfangsphase des ersten Aufwuchses. Zu diesem Zeitpunkt befanden sich die Pflanzen im phänologischen Stadium des Schossens und die Bodenoberfläche war noch nicht vollständig mit Vegetation bedeckt. Die drei Tage waren niederschlagsfrei, durchgehend sonnig und wiesen überdurchschnittlich hohe Temperaturen auf. Allerdings gab es an diesen Tagen relativ starken und anhaltenden Wind, was besonders für die Steuerung der Begasung von großer Relevanz ist

Testperiode II (*Abbildung 2*, rechts) im Mai (15.05.2018 bis 17.05.2018) unterscheidet sich grundsätzlich von jener im April. Es handelt sich um eine „Schlechtwetterphase“ mit

Niederschlägen, geringer Sonnenscheindauer und vergleichsweise niedrigen Temperaturen. Die Windstärke war an diesen Tagen allerdings sehr gering. Der Pflanzenbestand war bereits voll entwickelt und befand sich in der Phase des Ähren-/Rispschiebens. Die beiden ausgewählten Perioden werden einander gegenübergestellt, sodass die Unterschiede sehr deutlich wahrzunehmen sind.

Beheizungsperformance

Der Verlauf der Oberflächentemperatur zeigt in Testperiode I drei typische Tagesgänge mit einer deutlichen Unterscheidung zwischen der kühleren Nacht- und der wärmeren Tagesphase mit einer Temperaturamplitude von bis zu knapp

30 °C (*Abbildung 3*, links). In der niederschlagsreichen Testperiode 2 sind die drei Tagesgänge für die Oberflächentemperatur recht unterschiedlich ausgeprägt und weisen eine Amplitude von ca. 5 bis max. 15 °C auf (*Abbildung 3*, rechts). In beiden Testperioden heben sich die Varianten mit Temperaturerhöhung über weite Strecken klar von der ambienten Referenztemperatur ab, wobei die Differenzierung bei tieferen Temperaturen deutlicher ausgeprägt ist als bei höheren Temperaturen. Bei sehr hohen Temperaturen von über 30 °C stoßen die verwendeten Infrarotstrahler technisch an ihre Leistungsgrenze und es ist dann eine weitere Temperaturbeaufschlagung auch nicht mehr umsetzbar. Bezogen auf die gesamte Periode des 1. Aufwuchses von 04.04.2018 bis 27.05.2018 wurden knapp 75 % aller erhobenen Messwerte (auf Minutenbasis) der Variante T1 für die Performanceanalyse herangezogen (Steuersignalebereich von 0,1 bis 9,9 innerhalb des Gesamtbereiches von 0 bis 10 Volt). In Bezug auf den angestrebten Beaufschlagungswert von +1,5 °C befanden sich von diesen Messwerten 96,8 % innerhalb eines Bereiches von ± 10 % um den Zielwert. Für die Variante T2 mit der Zielgröße +3 °C flossen knapp 70 % der Messwerte in die Performanceauswertung ein, wobei hier 96,5 % der Messwerte innerhalb ± 10 % des angepeilten Beaufschlagungswertes lagen.

Begasungsperformance

Die atmosphärische CO₂-Konzentration, gemessen in 2 m Höhe schwankt in den beiden Testperioden zwischen

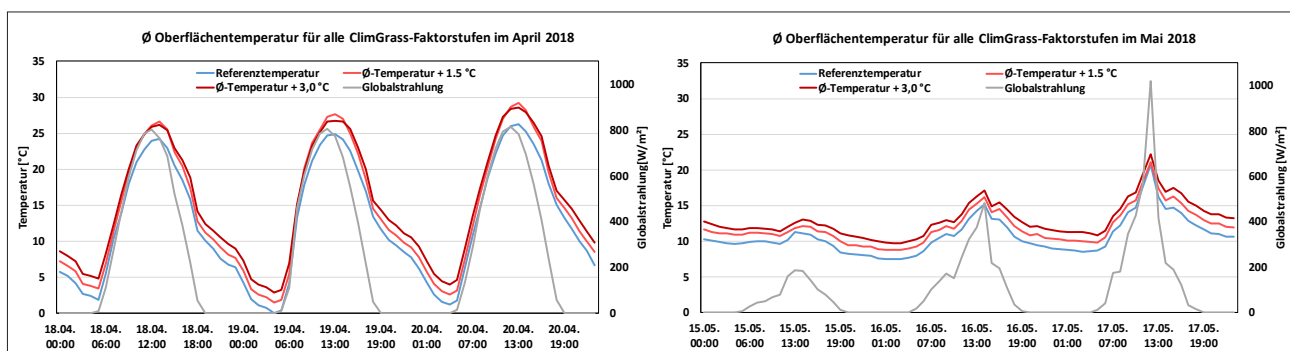


Abbildung 3: Verlauf der Globalstrahlung sowie der Oberflächentemperatur für die Temperaturvarianten T0, T1 und T2 in den beiden je dreitägigen Testperioden.

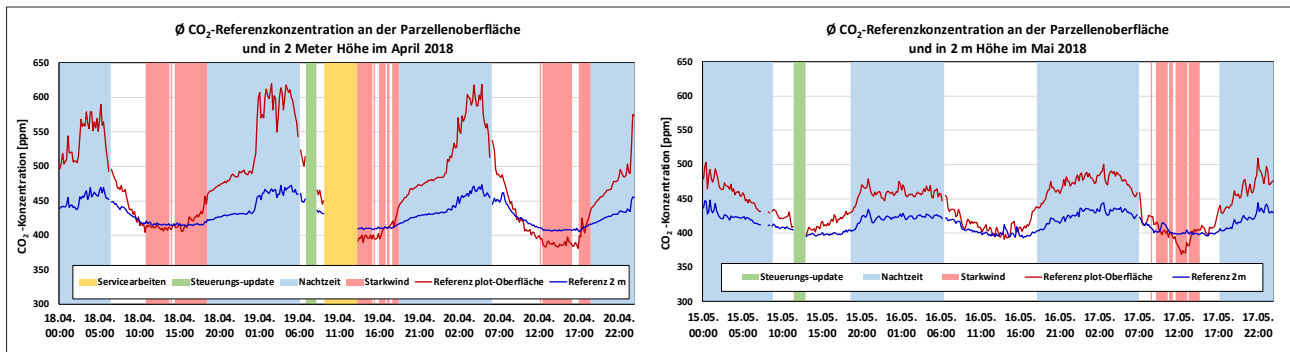


Abbildung 4: Verlauf der CO₂-Konzentration in den beiden Testperioden (Referenzkonzentration in der Atmosphäre = blau, Konzentration in unbegasteten Referenzparzellen = rot).

knapp 400 und 470 ppm, wobei die höheren Werte stets in den Nachtstunden auftreten und die in dieser Phase erhöhte Respiration widerspiegeln (blaue Kurven). Diese Messwerte stammen von hochpräzisen CO₂-Sensoren, die damit auch einen sehr guten Einblick über den Tagesgang der am Standort Gumpenstein vorliegenden atmosphärischen CO₂-Konzentration liefern. Die bodennah gemessene CO₂-Konzentration von unbegasteten Referenzparzellen zeigt einen vom Verlauf her ähnlichen Tagesgang, allerdings mit einer deutlich stärker ausgeprägten Amplitude (rote Kurven). Dies unterstreicht den in Bodennähe wesentlich größeren Einfluss der CO₂-Atmungs- und Veratmungsaktivitäten durch den Pflanzenbestand. Gut erkennbar ist auch die Annäherung der beiden Messwerte mit zunehmender Windgeschwindigkeit, die auf die dadurch bedingte Durchmischung und den Konzentrationsausgleich zurückzuführen sind (Abbildung 4).

In beiden Testperioden ist hinsichtlich der Beaufschlagungsqualität der Einfluss erhöhter Windgeschwindigkeiten erkennbar (rot hinterlegte Bereiche), in denen es durch eine verstärkte Regelungsaktivität bei beiden Begasungsniveaus zu deutlich höheren Schwankungen um den jeweiligen Zielwert kommt (Abbildung 5). Die im Vergleich zur Beheizung stärkeren Schwankungen bei der CO₂-Konzentration ergeben sich durch die träge Reaktion der Gasnachlieferung nach der Wiederöffnung bzw. dem „Überschießen“ der Konzentration nach dem Schließen der Ventile.

Bezogen auf die gesamte Periode des 1. Aufwuchses von 04.04.2018 bis 27.05.2018 wurden 63,4 % aller auf Minutenbasis erhobenen Messwerte der Variante C1 für die Performanceanalyse herangezogen (Ausschluss von

Messwerten bei Wind bzw. bei CO₂-Werten höher als die ambiante Konzentration +450 ppm). In Bezug auf den angestrebten Beaufschlagungswert (+150 ppm) befinden sich von diesen Messwerten 79,6 % innerhalb eines Bereiches von ±20 % um den Zielwert. Für die Variante T2 mit der Zielgröße +300 ppm waren es 66,2 % der Messwerte, deren Performance ausgewertet wurde. Hier lag der Zielerreichungsgrad für den Bereich von ±20 % um den Zielwert bei 68,3 %.

Monolithlysimeter

Sechs der Versuchspartellen sind mit wägbaren Monolithlysimetern ausgestattet, die umfassende Informationen zum Bodenwasserhaushalt liefern. Die hexagonal angeordneten Lysimeter (siehe auch *Abbildung 6*) mit je 1 m² Oberfläche und 1,5 m Tiefe werden über einen zentralen, begehbaren Schacht serviert, in dem sich auch die entsprechenden Einrichtungen zur Sickerwassergewinnung und Datenerfassung befinden. Die Lysimeter sind mit TDR-Trime-Sonden zur Bodenfeuchtebestimmung, kombinierten Tensiometern T8-30 zur Bestimmung des Matrixpotentials sowie Saugkerzen ausgestattet (Pütz *et al.*, 2011). Mittels einer bidirektionalen Pumpe, eines Saugkerzenrechners an der Unterseite des Monolithen und eines im Freiland in gleicher Tiefe platzierten Tensiometers, kann die untere Randbedingung feldidentisch nachgeführt werden (von Unold, 2008; Steins, 2008).

Regendächer

Drei sensorgesteuerte Regendächer ermöglichen es, für jeweils vier Versuchspartellen niederschlagsfreie Phasen

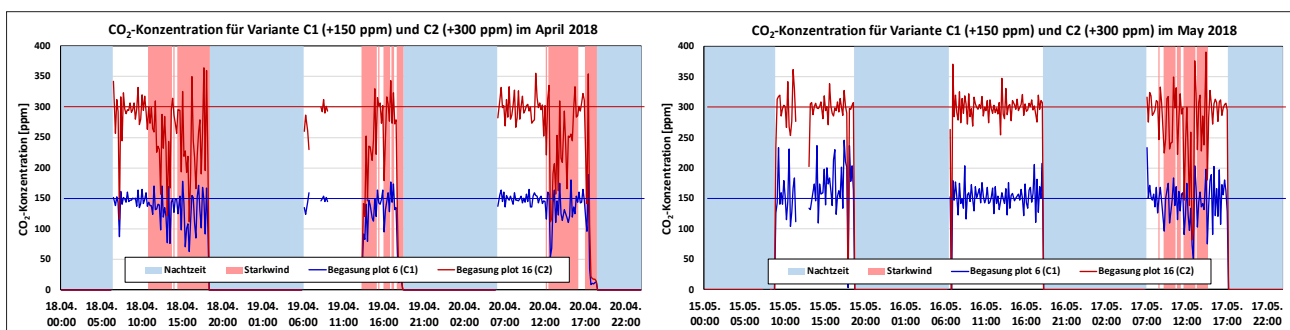


Abbildung 5: Verlauf der CO₂-Beaufschlagung für die Begasungsvarianten C1 und C2 in den beiden je dreitägigen Testperioden.

und damit Trockenheitsstress zu simulieren, wobei hier nur die treatments C0T0 (ambient) und C2T2 (future climate) abgedeckt sind. Der mittels der Regendächer abgehaltene Niederschlag wird aus dem Versuchsgelände ausgeleitet, damit es zu keiner Beeinflussung benachbarter Parzellen kommt. Für allfällige re-wetting-Maßnahmen wird Niederschlagswasser in einem nahegelegenen, ehemaligen Güllelager aus Dachrinnenabläufen gesammelt und dieses bei Bedarf mittels Tauchpumpen und durchflussgesteuerter Gießverteiler händisch in Teilmengen von max. 10 mm auf den Parzellen ausgebracht.

Mesokosmen

8 Versuchspartellen – vier unter den Regendächern und vier außerhalb – sind mit jeweils 12 Mesokosmen bestückt. Dabei handelt es sich um Edelstahlrohre mit einem Durchmes-

ser von 30 cm und einer Tiefe von 60 cm, die mittels eines Baggerstempels bis auf einen Überstand von knapp 5 cm in den Parzellenboden eingedrückt wurden. Diese Mesokosmen sind mit unterschiedlichen Düngungsvarianten (PK, NK und NPK) versehen und werden separat gedüngt, beprobt und geerntet. Die Mesokosmenparzellen umfassen wie auch die Regendächer nur die beiden Haupttreatments C0T0 und C2T2.

Beprobungsareale, messtechnische Ausstattung der Versuchspartellen

Die Einzelpartellengröße von je 16 m² erfordert hinsichtlich des ambitionierten Erhebungsspektrums eine genau festgelegte räumliche Unterteilung und Vorgangsweise (Abbildung 7). Die eigentliche Behandlungsfläche zur Begasung/Be-

heizung umfasst 3,8 m², also knapp 1/4 der gesamten Versuchspartelle. Ein Bereich von 0,55 m² ist zur destruktiven Beprobung des Versuchsbodens vorgesehen, wobei jede einzelne Entnahme mittels Schüsslerbohrer (ergibt Bohrkern mit Ø 2 cm und 10 cm Länge) genauestens geplant, dokumentiert und hinsichtlich der Lage mit Hilfe eines Gitterrasters (5 x 5 cm) verortet wird. Eine 1 m² große Kreisfläche (grün dargestellt) ist mit einem im Boden verankerten Edelstahlring abgegrenzt und dient pflanzenphysiologischen Untersuchungen, phänologischen und botanischen Erhebungen sowie als Erntefläche für die oberirdische Biomasse zur Ertragsbestimmung und Analyse der Futterqualität. Zur Ertragsermittlung der insgesamt drei Aufwüchse/Jahr wird zunächst sämtliche Biomasse außerhalb des Ertragsringes entfernt und abschließend die Vegetation innerhalb des Ernterings mit einer Schnitthöhe von 5 cm geerntet, gewogen und zur Analyse vorbereitet. Nach demselben Schema werden auch die insgesamt 96 Mesokosmen geerntet, womit bei drei Aufwüchsen jährlich insgesamt 426 Einzelerträge anfallen.

Die Erfassung der Bodenatmung erfolgt über in den Boden eingelassene Kunststoffröhren (R) mit einem Durchmesser von 10 cm deren Oberfläche mittels einer Abdeckung vegetationsfrei gehalten wird. Die Messungen der Bodenatmung erfolgt a) automatisiert mittels LI-COR 8100-Technik und manuell mittels PP-System EGM4. Zur Ermittlung des Netto-Gasaustausches des Grünlandbestandes (net ecosystem exchange – NEE) wird eine Messkammer über den Pflanzenbestand gestülpt und auf einen fix im Boden verankerten, quadratischen Kunststoffrahmen gespannt, mit dem knapp 30 Partellen ausgestattet sind. 15 ausgewählte Partellen bzw. treatments sind mit Bodensensoren zur permanenten Erfassung der Bodentemperatur und Bo-

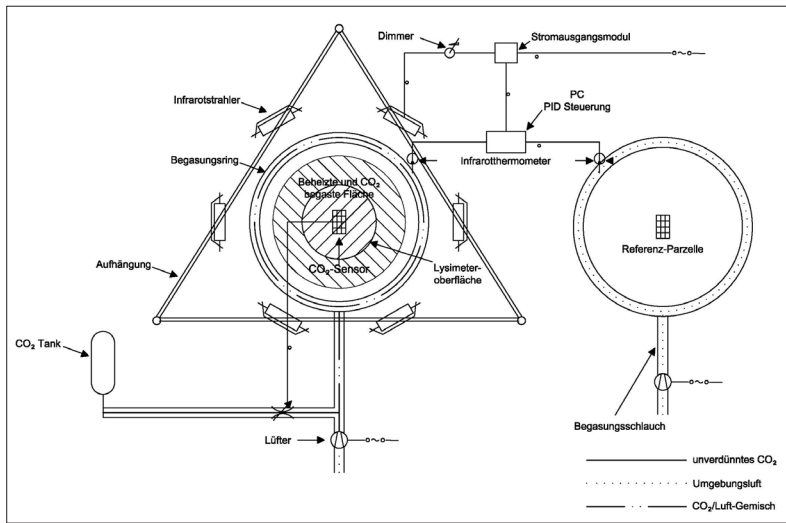


Abbildung 6: Schematische Darstellung der Beheizungs- und Begasungstechnik in Kombination mit einem Monolithlysimeter (aus Herndl et al., 2010).

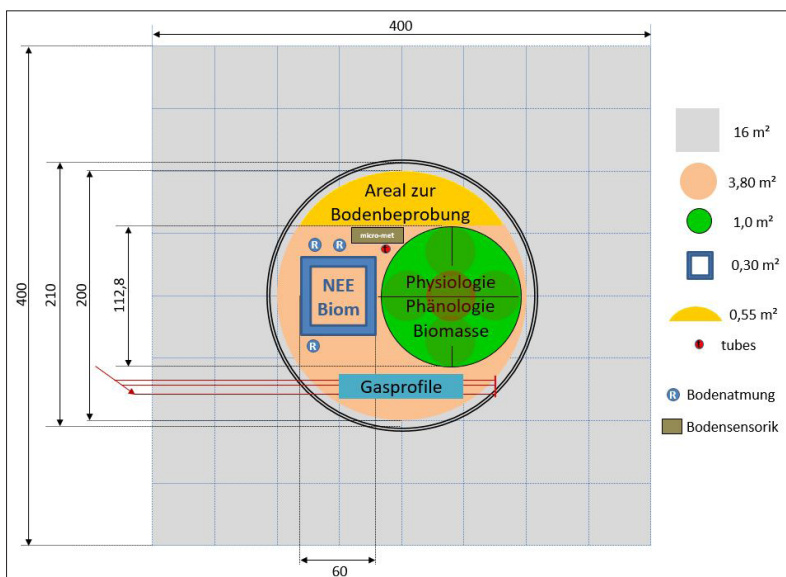


Abbildung 7: Schematische Darstellung einer Versuchspartelle mit Erhebungs- und Beprobungsarealen.

denfeuchtigkeit bestückt, zusätzlich sind in unmittelbarer Nähe des Ernteringes jeweils 50 cm lange tubes installiert, das sind Kunststoffröhren über die mittels einer manuell zu bedienenden Messsonde zeitgleich in vier unterschiedlichen Bodentiefen (10, 20, 30 und 40 cm) der Bodenfeuchtegehalt ermittelt werden kann.

Sechs Versuchspartzen (C0T0 und C2T2 jeweils unter und außerhalb der Regendächer sowie C2T0 und C0T2 außerhalb der Regendächer) sind zudem mit einem sehr aufwändigen Gasmessprofil in Form von Membranschläuchen im Boden ausgestattet, mit dessen Hilfe unmittelbar an der Bodenoberfläche sowie in unterschiedlichen Bodentiefen (3, 9, 18 und 36 cm) die CO₂-Dynamik zeitlich hochaufgelöst quantifiziert werden kann. Sämtliche Gasmessstrecken der sechs Partzen münden in einen zentralen Messschacht, in dem die zentrale Ansteuerung erfolgt und Datenlogger, Multiplexer, Ventilbox und CO₂-Sensorik untergebracht sind.

Auf zwei unbehandelten Partzen (C0T0) sind automatische Klimakammern installiert, mit deren Hilfe im Intervall von 15 Minuten eine kontinuierliche Erfassung der CO₂-Austauschraten inklusive der Ökosystemproduktivität während der gesamten Vegetationszeit erfolgt.

Zusätzliche Erhebungen und Analysen

Neben den klassischen, destruktiven Untersuchungsmethoden zur Bestimmung des Biomasseertrages bei den einzelnen Aufwüchsen werden zunehmend auch zerstörungsfreie Mess- und Erhebungstechniken genutzt. Ultraschallsensorik zur Wuchshöhenmessung und Feldspektrometrie zur Ermittlung unterschiedlichster Indizes ermöglicht einen tiefen Einblick in die Dynamik der Ertrags- und Qualitätsentwicklung (Schaumberger *et al.*, 2015; Schweiger, 2017). Zur Dokumentation werden bei diesen meist wöchentlichen Erhebungen zusätzlich Fotos mit einer GoPro-Kamera aufgenommen. Weitere Schwerpunkte des ClimGrass-Projektes betreffen die botanische Zusammensetzung des Pflanzenbestandes, die Beurteilung der phänologischen Entwicklung ausgewählter Grünlandarten (Knautgras, Goldhafer und Weissklee), die Bodennährstoffdynamik sowie Veränderungen im Wasser-, Kohlenstoff- und Stickstoffkreislauf. Wurzeluntersuchungen sowie Gasmessungen im Boden, Pflanzenbestand und Atmosphäre ergänzen das ambitionierte Untersuchungsprogramm, an dem neben der HBLFA Raumberg-Gumpenstein zahlreiche Universitäten und wissenschaftliche Einrichtungen beteiligt sind.

Datenmanagement im ClimGrass-Projekt

Die umfangreichen Erhebungen und Analysen an Pflanze, Boden, Bodenwasser und Atmosphäre erfordern ein entsprechend fundiertes Datenmanagement zur Erfassung, Prüfung, Speicherung, Bereitstellung und Verarbeitung der enormen Datenmengen. Im Rahmen des DaFNE-Projektes Nr. 100852 „DATALYS“ wurde eine Anwendung entwickelt, die geeignet ist, Daten aus verschiedenen Quellen wissenschaftlicher Experimente (kontinuierliche Datenströme aus Sensoren, manuelle Eingabe, Laborergebnisse, Computermodelle, usw.) in eine Datenbank mit relationalem Datenmodell zu überführen (Schaumberger, 2016). Das Datenmodell kann beliebig erweitert werden und passt sich so

unterschiedlichen Fragestellungen bzw. Anwendungsbereichen ohne Mehraufwand an. Die Flexibilität des Datenmodells erlaubt eine interdisziplinäre Anwendung sowie eine optimale Anpassung an Veränderungen und Erweiterungen der Forschungsschwerpunkte. Im Rahmen eines Datenbankmanagementsystems (DBMS) wird die Funktionalität des Datenmodells mit den Standardfunktionen wie Leistungsfähigkeit, Zugriffsmanagement, Datensicherheit und Qualitätssicherung kombiniert und bietet auf diese Weise die Grundlage für eine effiziente wissenschaftliche Auswertung der erfassten Daten. Neben einer automatisierten Migration von Sensordaten ermöglicht eine Benutzerschnittstelle über Web-Browser die benutzergesteuerte Datenein- und Datenausgabe. Diese Datenbankschnittstelle ist gleichzeitig die Grundlage für die Zusammenarbeit von Projektpartnern, welche Daten verteilt in das System einspeisen und zentral abfragen können. Werden Daten aus unterschiedlichen Disziplinen in ein gemeinsames System integriert, ergibt sich daraus die Möglichkeit, mit geeigneten Analysen und Synthesen explorativ an neuen Fragestellungen zu arbeiten, auch über einzelne Projektlaufzeiten hinaus. Das System bietet zusätzlich die Möglichkeit, Zeitreihendaten durch entsprechende Visualisierung zu kontrollieren und Probleme wie Datenlücken oder Ausreißer zu beseitigen.

Die ClimGrass-Datenbank bietet allen Projektbeteiligten nach Vergabe der entsprechenden Zugriffsrechte einen externen Zugang zur Dateneingabe als auch zur Datenabfrage und -auswertung. Aktuell beinhaltet die ClimGrass-Datenbank 66,3 Mio. Lysimeterdaten, 13,6 Mio. FACE-Daten, 4,9 Mio. Wetterdaten sowie 4,3 Mio. Messwerte aus den diversen Feld- und Sensorerhebungen (in Summe fließen Daten von rund 560 Sensoren ein) mit einem Gesamtdatenvolumen von 16 GB.

Kooperationspartner und Projekte

Seit 2010 besteht im Zusammenhang mit der ClimGrass-Anlage der HBLFA Raumberg-Gumpenstein eine intensive Kooperation mit den Universitäten Innsbruck, Wien, Graz sowie der Universität für Bodenkultur. Im Rahmen einer Bund-Bundesländerkooperation wurden speziell die Auswirkungen des Klimawandels und der Düngung auf die Produktivität und die Kohlenstoffdynamik in Grünland untersucht. Dieses Forschungsprojekt (Nr. 101027) wurde dankenswerter Weise vom BMNT sowie von den Bundesländern Vorarlberg, Tirol, Salzburg und der Steiermark finanziert und stellte eine ganz wesentliche Ergänzung zur bestehenden Anlage sowie eine wichtige Basis zur Akquirierung weiterer Projekte dar. Eine weitere Bund-Bundesländerkooperation (Nr. 101124) befasste sich aktuell mit den Auswirkungen des Klimawandels auf die Produktivität und Klimaregulation von Grünland – neben dem BMNT beteiligten sich daran die Bundesländer Vorarlberg, Tirol, Salzburg, Niederösterreich und die Steiermark. Kurz vor dem Abschluss stehen das ACRP-Projekt „ExtremeGrass“ (Leitung: Univ.-Prof. Zechmeister-Boltenstern, Universität für Bodenkultur), das sich mit den Auswirkungen der Erwärmung, erhöhter CO₂-Konzentration und Wetterextremen auf gasförmige Stickstoffflüsse im Grünland befasst sowie das FWF-Projekt „ClimGrass“ (Leitung: Univ.-Prof. Michael Bahn, Universität Innsbruck), bei dem es um die

Kohlenstoffdynamik im Grünland unter dem Eindruck der Klimaveränderung geht. Ende 2019 erfolgt der Abschluss des anstaltseigenen Projektes „ClimGrassEco“, in dessen Mittelpunkt agronomische Aspekte (Ertrag, Futterqualität und Vegetationsdynamik) sowie der Wasserhaushalt stehen.

Aktuell genehmigt wurde mittlerweile auch der bei der Österreichischen Akademie für Wissenschaften eingereichte Projektantrag „ClimGrassHydro“ (Ecohydrology of mountain grassland under multiple global change: mechanisms and consequences) unter der Leitung von Univ.-Prof. Michael Bahn (Universität Innsbruck). In diesem für eine Laufzeit von drei Jahren veranschlagten Projekt sind umfangreiche Experimente zu den Auswirkungen zukünftiger Klimabedingungen inklusive Trockenperioden auf hydrologische Prozesse sowie auf die Wassernutzungseffizienz auf der bestehenden ClimGrass-Anlage vorgesehen. Dazu werden weitere technische Ergänzungen in Form von smart field-Lysimetern erfolgen und die aus diesem Projekt generierten Daten auch als Basis für Modellierungen genutzt werden.

Literatur

- Beier, C.; B. Emmett; P. Gundersen; A. Tietema; J. Peñuelas; M. Estiarte; C. Gordon; A. Gorissen; L. Llorens; F. Roda and D. Williams (2004): Novel approaches to study climate change effects on terrestrial ecosystems in the field: Drought and passive night-time warming. *Ecosystems*, 7, 583-597.
- Herndl, M.; E.M. Pötsch; J.W. White; B. Kimball; H.P. Piepho; M. Kandolf; A. Böhner; A. Schaumberger; R. Resch; W. Graiss; B. Krautzer und K. Buchgraber (2010): "Lysi-T-FACE" - ein technisches Versuchskonzept zur Simulation der Erderwärmung im Grünland. *Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften*, Band 22, 73-74.
- Herndl, M.; E.M. Pötsch; A. Böhner und M. Kandolf (2011): Lysimeter als Bestandteil eines technischen Versuchskonzeptes zur Simulation der Erderwärmung im Grünland. 14. Gumpensteiner Lysimetertagung 2011, LFZ Raumberg-Gumpenstein, 119-126.
- Hovenden, M.J.; F. Miglietta; A. Zaldei; J.K. van der Schoor; K.E. Wills and P.C.D. Newton (2006): The TasFACE climate-change impacts experiment: design and performance of combined elevated CO₂ and temperature enhancement in a native Tasmanian grassland. *Australian Journal of Botany* 54 (1), 1-10.
- Ineson, P.; K. Taylor; A.F. Harrison; J. Poskitt; D.G. Benham; E. Tipping und C. Woof (1998): Effects of climate change on nitrogen dynamics in upland soils. 2. A warming study. *Global Change Biology*, 4, 153-161.
- Kimball, B.A.; J. Pinter; G.W. Wall; R.L. Garcia; R.L. Lamorte; P.M.C. Jak; K.F.A. Frumau und H.F. Vugts (1997): Comparisons of responses of vegetation to elevated carbon dioxide in free-air and open-top chamber facilities. p. 113-130. In Allen, L.H. Jr., M.B. Kirkham, et al. (eds.): *Advances in carbon dioxide effects research*. ASA Spec. Publ. 61. ASA, CSSA, SSSA, Madison, WI.
- Miglietta, F.; A. Peressotti; F.P. Vaccari; A. Zaldei; P. Deangelis and G. Scarascia-Mugnozza (2001): Free-air CO₂ enrichment (FACE) of a poplar plantation: the POPFACE fumigation system. *New Phytologist* 150 (2), 465-476.
- Parton, W.J.; J.A. Morgan; W. Guiming und S.J. del Grosso (2007): Projected ecosystem impact of the prairie heating and CO₂ enrichment experiment. *New Phytologist*, 174, 823-834.
- Piepho, H.-P.; M. Herndl; E.M. Pötsch und M. Bahn (2017): Designing an experiment with quantitative treatment factors to study the effects of climate change. *Journal of Agronomy and Crop Science* 203 (6), 584-592.
- Pinter Jr., P.J.; B.A. Kimball; G.W. Wall; R.L. Lamorte; D.J. Hunsaker; F.J. Adamsen; K.F.A. Frumau; H.F. Vugts; G.R. Hendrey; K.F. Lewin; J. Nagy; H.B. Johnson; F. Wechsung; S.W. Leavitt; T.L. Thompson; A.D. Matthias und T.J. Brooks (2000): Free-air CO₂ enrichment (FACE): blower effects on wheat canopy microclimate and plant development. *Agricultural and Forest Meteorology* 103 (4), 319-333.
- Pötsch, E.M.; M. Herndl und A. Schaumberger (2019): Produktivität von Grünland unter zukünftigen Klimabedingungen. Bericht zur 25. Österreichischen Wintertagung, S. 23-25.
- Pütz, T.; R. Kiese; S. Zacharias; H. Bogena; F. Priesack; U. Wollschläger; M. Schwank; H. Papen; G. Unold und H. Vereecken (2011): TERENO-SOILCan – Ein Lysimeter Netzwerk in Deutschland. 14. Gumpensteiner Lysimetertagung 2011, LFZ Raumberg-Gumpenstein, 5-10.
- Sánchez-Carrillo, S.; R. Morea; L. Serrano-Grijalva; A. Meco und R. Sánchez-Andrés (2015): A Free Air CO₂ Enrichment (FACE) Facility in a Wetland to Study the Effects of Elevated Atmospheric Carbon Dioxide: System Description and Performance. *Wetlands* 35 (1), 193-205.
- Schaumberger A.; J. Schellberg und J. Hollberg (2015): Spektrometrie – moderne, nicht-invasive Erfassungstechnik von Pflanzenbeständen. 20. Alpenländisches Expertenforum 2015, 23-32.
- Schaumberger, A. (2016): Entwicklung eines Prüf- und Analysesystems für kontinuierliche Datenströme sowie deren Überführung in relationale Datenbanken. Abschlussbericht des vom BMLFUW finanzierten Forschungsprojektes Nr. 100852, HBLFA Raumberg-Gumpenstein, 36 S.
- Schweiger, M. (2017): Entwicklung und Einsatz des Spektromobils zur Durchführung nicht-invasiver Erhebungen in Dauergrünlandversuchen. Projektarbeit im Rahmen der Dienstprüfung an der Verwaltungsakademie zum Themenbereich „Landwirtschaftliches Versuchswesen“, HBLFA Raumberg-Gumpenstein, 29 S.
- Steins, A. (2008): Lysimeter – ein Werkzeug zur genauen Erfassung von Wasser- und Stoffkreislaufparametern / 2. Anforderungen an die Messtechnik zur Umsetzung moderner Datengewinnungskonzepte.– 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.
- Von Unold, G. (2008): Lysimeter – ein Werkzeug zur genauen Erfassung von Wasser- und Stoffkreislaufparametern / 1. Modulare Konzepte der Lysimetertechnologie 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.– Beiträage z. Hydrogeologie, 56, Graz.
- Winkler, J.B. and M. Herbst (2004): Do plants of a semi-natural grassland community benefit from long-term CO₂ enrichment? *Basic and Applied Ecology*, 5 (2), 131-143.

Einfluss des Klimawandels auf die Bodenwasserbilanz im inneralpinen Grünland

Veronika Slawitsch^{1*}, Steffen Birk¹, Markus Herndl² und Erich M. Pötsch³

Einleitung

Die weltweite Änderung des Klimasystems findet bereits statt. Österreich gehört dabei zu den Regionen, in denen die Temperaturzunahme stärker als im weltweiten Mittel ausfällt – und zwar etwa doppelt so stark. Seit Beginn des 20. Jahrhunderts ist in Österreich die Lufttemperatur um 2 °C gestiegen (ZAMG, 2018; *Abbildung 1*). Die Jahresniederschlagssumme hat im österreichischen Mittel um 11 % zugenommen. Die Änderung der letzten 50 Jahre ist auf der Alpennordseite mit Zunahmen im Winter und Frühling am stärksten, die Alpensüdseite erfuhr ab 1980 eine starke Abnahme um 10 – 30 % (APCC, 2014).

Voraussetzung für eine erfolgreiche und produktive Grünlandwirtschaft ist die Verfügbarkeit von Wasser im Boden (Bodenwasserhaushalt). Aufgrund der erhöhten Lufttemperaturen, erhöhten atmosphärischen CO₂-Konzentrationen und unterschiedlichen Niederschlagsverteilung ist jedoch mit Veränderungen der Bodenwasserflüsse zu rechnen. Somit wird sich das Pflanzen- und Wurzelwachstum verändern und damit auch die Wasseraufnahme und Transpiration der Pflanzen.

Tendenziell führen die erhöhten Luft- und Bodentemperaturen zu einer längeren Vegetationsperiode in inneralpinen Lagen und daher zu einem verstärkten Pflanzenzuwachs im Grünland, oft jedoch auch zu einem erhöhten Verbrauch des

im Boden vorhandenen Wassers. Dies wiederum vermindert die Sickerwassermengen, die das Grundwasser Neubilden können.

Ziel dieser Arbeit ist es, mögliche Auswirkungen von erhöhten CO₂-Konzentrationen und Temperaturen auf den Bodenwasserhaushalt, insbesondere die für die Grundwasserneubildung wichtige Sickerwassermenge, in alpinen Gebieten unter Dauergrünland besser zu verstehen.

Lysimeterexperiment

Der Einfluss von erhöhten Temperaturen und erhöhten CO₂-Konzentrationen auf die Bodenwasserbilanz wird anhand von sechs hochpräzisen Grünlandlysimetern (Technisches Messgerät zur Bestimmung von Bodenwasserflüssen in der Landwirtschaft; *Abbildung 2*) bestimmt. Dabei werden die Wasserhaushaltsgrößen Niederschlag N, Evapotranspiration ET, Sickerwasser SW sowie die abgesetzten Niederschläge in Form von Tau und Reif (Groh und Slawitsch *et al.*, 2018) anhand der Massezunahme sowie der Massenabnahme der Lysimetergewichte mit höchster Auflösung nach genauen Datenkorrekturen berechnet (Slawitsch *et al.*, 2016).

Die Lysimeter sind in dem an der HBLFA Raumberg-Gumpenstein (Steiermark, Österreich) entwickelten und dort bestehenden Freilandexperiment zur Klimafolgenforschung (ClimGrass) integriert (Pötsch *et al.*, 2019).

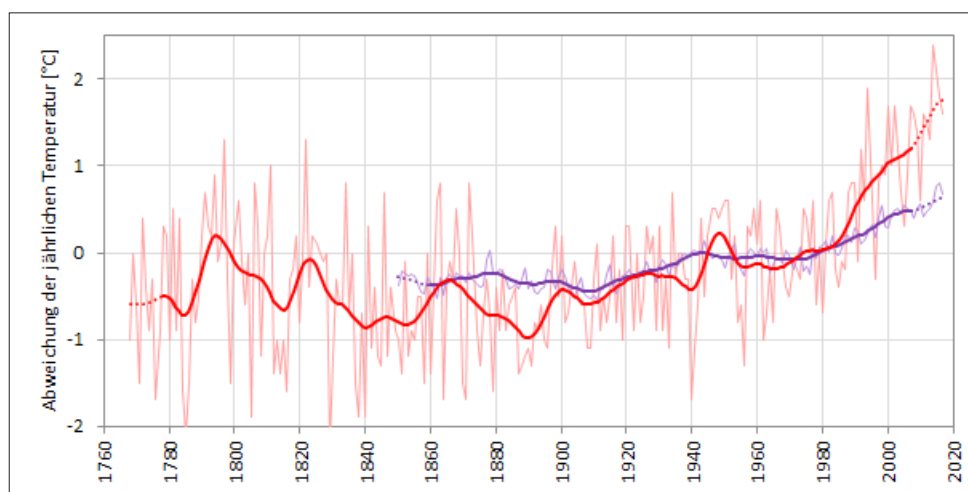


Abbildung 1: Entwicklung der mittleren Jahrestemperatur weltweit 1850 – 2016 (violett) und in Österreich 1767 – 2016 (rot) (ZAMG, 2018).



Abbildung 2: Darstellung eines Lysimeters mit berechneten Wasserbilanzparametern.

¹ Institut für Erdwissenschaften, Karl-Franzens Universität Graz, Heinrichstraße 26, A-8010 Graz

² Abteilung für Umweltökologie, HBLFA Raumberg-Gumpenstein, Raumberg 38, A-8952 Irdning-Donnersbachtal

³ Abteilung für Grünlandmanagement, HBLFA Raumberg-Gumpenstein, Raumberg 38, A-8952 Irdning-Donnersbachtal

* Ansprechpartner: Veronika SLAWITSCH, MSc, veronika.slawitsch@uni-graz.at

Dabei wird die Luft über zwei der sechs Lysimeter mit CO_2 angereichert (+300 ppm; C2T0), an zwei weiteren werden die Flächen zur Untersuchung von Effekten erhöhter Temperaturen (C0T2) mit Infrarotstrahler beheizt. Für die Untersuchung des Klimawandeleffekts erfährt ein Lysimeter die Kombination aus CO_2 -Anreicherung sowie Temperaturerhöhung (C2T2). Als Referenz dient eine unbehandelte Parzelle, die weder begast noch beheizt wird (C0T0).

Die Frage, ob und wie sich die Bodenwasserbilanzparameter an einem alpinen Grünlandstandort bei erhöhten Temperaturen als auch erhöhten CO_2 -Konzentrationen verändern werden, wird anhand der letzten 4 Vegetationsperioden (2015–2018) an der kombinierten Lysimeterparzelle (C2T2) verglichen mit der Referenzparzelle (C0T0) ermittelt.

Ergebnisse

Die berechneten **Niederschlagsmengen** der Vegetationsperioden 2015 und 2016 weisen auf der Referenzparzelle (C0T0) für eine alpine Region nördlich des Alpenhauptkammes durchschnittliche Werte von 721 mm sowie 821 mm auf; das den Klimawandel simulierende Lysimeter (C2T2) zeigt hingegen geringere Niederschläge von 702 mm bzw. 792 mm. Der Grund dafür liegt in der geringeren nächtlichen Taubildung der beheizten und CO_2 -angereicherten Parzelle. Das Jahr 2017 war ein überdurchschnittlich feuchtes Jahr, die Berechnungen zeigen allein von April bis Oktober einen Gesamtniederschlag an der C0T0-Variante von 900 mm. Die C2T2-Variante liegt wieder aufgrund der geringeren Taubildung bei 882 mm, jedoch aufgrund des niederschlagsreichen Sommers ca. 100 mm höher als in den Vorjahren. Das Jahr 2018 zählt zu einem der hydrologisch extremsten Jahre in der 251-jährigen Messgeschichte der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik. Die Niederschläge fielen speziell an der Alpennordseite äußerst gering aus, zudem wurde eine um $1,8\text{ °C}$ gegenüber dem Mittel von 1981–2010 höhere Jahresmitteltemperatur ermittelt (ZAMG, 2018). Der Niederschlag am Referenzlysimeter C0T0 ergibt in der Vegetationsperiode eine nur äußerst geringe Menge von 629 mm, wovon allein 85 mm am 24.10.2018 verzeichnet wurden. Bis Ende September liegt der Niederschlag bei nur 520 mm und demnach um über 200 mm niedriger als in den Vorjahren. Das C2T2-Lysimeter verzeichnet auch in dieser Vegetationsperiode verglichen mit dem Referenzlysimeter geringere Niederschlagsmengen von 605 mm aufgrund der geringeren nächtlichen Taubildung (Abbildung 3).

Die Ergebnisse der Evapotranspirations- sowie Sickerwassermengen in den Vegetationsperioden 2015–2018 zeigen ebenfalls einen unterschiedlichen Verlauf der Klimawandelvariante verglichen mit den aktuellen Klimabedingungen. Dabei unterscheidet sich jedoch die Evapotranspiration aufgrund des starken CO_2 -Effektes nicht so drastisch wie die

berechneten Sickerwassermengen an den unterschiedlich behandelten Lysimetern.

Die Jahre 2015 sowie 2018 mit $+1,4\text{ °C}$ bzw. $+1,8\text{ °C}$ über dem langjährigen Temperaturmittel (1981–2010) zählen zu den Top 5 der wärmsten Jahre in der 251-jährigen Messgeschichte der ZAMG (ZAMG, 2018).

Die **Evapotranspirationsmengen** weisen in diesen beiden Vegetationsperioden (2015 und 2018) an der Referenzparzelle 657 mm sowie 620 mm auf, das den Klimawandel simulierende Lysimeter zeigt im warmen, jedoch durchschnittlich feuchten Jahr 2015 etwas höhere Werte von 697 mm. Im Gegensatz dazu ändert sich die Evapotranspirationsmenge im warmen und in den zusätzlich äußerst trockenen Sommermonaten 2018, hier fällt die Evaporation sogar um knapp 30 mm ab. Das klimatisch durchschnittliche Jahr 2016 sowie das etwas feuchtere Jahr 2017 erreichen an der Referenzparzelle Evapotranspirationsmengen von April bis Oktober von 598 mm sowie 661 mm, das kombinierte C2T2-Lysimeter erreicht aufgrund des ausreichend hohen Niederschlags etwas höhere Werte von 687 mm sowie 673 mm (Abbildung 3).

Die Ergebnisse hinsichtlich des **Sickerwassers** unterscheiden sich von allen untersuchten Wasserbilanzgrößen an den beiden unterschiedlich behandelten Lysimetern am stärksten. Die Sickerwassermenge von April bis Oktober liegt in den beiden durchschnittlichen Niederschlagsjahren 2015 und 2016 an der C0T0-Parzelle bei 152 mm bzw. 209 mm; das den Klimawandel repräsentierende C2T2-Lysimeter errechnet hingegen deutlich geringere Sickerwassermengen von 43 mm bzw. 93 mm.

Das überdurchschnittlich feuchte Jahr 2017 weist in den Sommermonaten an beiden Versuchsvarianten sehr hohe Sickerwassermengen auf, die C0T0-Parzelle 236 mm, die kombinierte C2T2-Parzelle hingegen 172 mm und damit eine knapp 130 mm höhere Menge als in der beobachteten Vegetationsperiode 2015.

Das außerordentlich trockene Jahr 2018 spiegelt sich stark in den berechneten Sickerwassermengen wider. Das Referenzlysimeter weist ein Sickerwassermenge von April bis Oktober von nur 9 mm auf, das den Klimawandel simulierende Lysimeter hingegen von nur 1 mm auf. Aufgrund der erhöhten Temperatur und der zudem verstärkten Evapo-

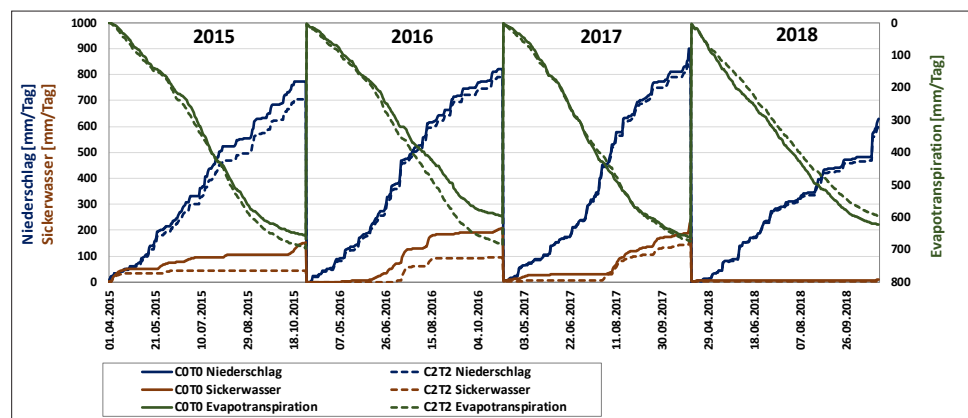


Abbildung 3: Kumulative Wasserbilanzparameter (Niederschlag / Evapotranspiration / Sickerwasser) in den Vegetationsperioden 2015–2018.

transpiration sowie zusätzlich sehr geringen Niederschlagsmengen ist in dieser Zeit nahezu keine Sickerwasserbildung möglich (Abbildung 3). Die zusätzliche Temperaturerhöhung durch Beheizung erhöht das Wasserdefizit derart, dass der Wasserbedarf der Pflanzen aus dem im Vorjahr gebildeten Bodenwasserspeicher gedeckt werden muss, was sich in ungewöhnlich niedrigen Matrixpotentialen und Bodenwassergehalten widerspiegelt.

Die **Differenz des Niederschlags gegenüber der Evapotranspiration** (Abbildung 4) fällt in den Vegetationsperioden 2015/2016 sowie 2017 an der C0T0-Parzelle überwiegend positiv aus, es steht in dieser Zeit mehr Niederschlag zur Verfügung als Wasser verdunstet. Gegensätzlich dazu zeigt das C2T2-Lysimeter im warmen, jedoch ausreichend feuchten, Jahr 2015 im Frühling sowie im Herbst eine negative Bilanz, die Verdunstung ist demnach größer als der Niederschlag. In den Sommermonaten 2016 überwiegen in Summe die positiven Flüsse des C2T2-Lysimeters, ebenso wie im Herbst des sehr feuchten Jahres 2017. Im Frühsommer 2017 sind jedoch stark negative Flüsse berechnet worden, in Summe zeigt sich in den genannten drei Jahren im Frühjahr eine ausgeprägte negative Bilanz. Der an der Alpennordseite niederschlagsarme sowie warme Sommer 2018 zeigt an der Referenzparzelle eine ab dem Frühjahr bis zum Ende der Vegetationsperiode stark negative Bilanz, zudem sind etwas größere negative Flüsse als an der Klimawandel simulierenden Parzelle C2T2 beobachtet worden. Unter den extremen Bedingungen des Jahres 2018 scheint also der Effekt der erhöhten CO₂-Konzentration jenen der Temperaturerhöhung etwa zu kompensieren (Abbildung 4). Aufgrund der Ergebnisse lässt sich ableiten, dass der verdunstungsmindernde Effekt erhöhter CO₂-Konzentrationen unter ungewöhnlich trockenen und warmen Witterungsbedingungen an Bedeutung gewinnt.

Schlussfolgerung

Die derzeitigen Klimaszenarien zeigen, dass ein weiterer Temperaturanstieg in Österreich zu erwarten ist. In der ersten Hälfte des 21. Jahrhunderts beträgt dieser etwa 1,4 °C (gegenüber dem derzeitigen Niveau; APCC, 2014).

Auch zeichnet sich mit zunehmender Höhenlage eine stärkere Erwärmung ab. Niederschläge sind ein für die Landwirtschaft wesentlicher Produktionsfaktor, der bereits jetzt in manchen Gebieten wachstumslimitierend in Erscheinung tritt. Tendenziell werden Niederschläge nördlich des Alpenhauptkammes im Winter eher zunehmen, jedoch während der Vegetationsperiode abnehmen, wodurch auch im nördlichen Alpenraum mit zunehmend trockeneren Verhältnissen zu rechnen sein wird, auch wenn die Modelle noch mit einer hohen Unsicherheit verbunden sind (IPCC, 2018).

Die stärkere Temperaturzunahme sowie tendenziell geringere Niederschlagsraten wirken sich auf die Bodenwasserflüsse, insbesondere auf die für das Pflanzenwachstum notwendige Sickerwassermenge massiv aus, wovon vor allem landwirtschaftliche Gebiete nördlich des Alpenhauptkammes betroffen sein werden.

Im warmen und in den Sommermonaten trockenen Jahr 2018 wurden dazu bis zum Ende der Vegetationsperiode Lysimeterdaten des ClimGrass-Experimentes ausgewertet. Dabei wurden beim Referenzlysimeter von April bis Oktober 2018 unter ambienten, aktuellen Klimabedingungen äußerst geringe Sickerwassermengen von 9 mm, beim beheizten und CO₂ begasten Lysimeter (zukünftiges Klima) Sickerwassermengen von sogar nur 1 mm ermittelt.

Die Lysimeterauswertungen zeigen sowohl durch den Vergleich des Jahres 2018 mit den etwa typischen Witterungsbedingungen repräsentierenden Jahren 2015/2016 und 2017 als auch durch den Vergleich der unterschiedlich behandelten Lysimeter, dass erhöhte Temperaturen die Evapotranspiration auf alpinem Dauergrünland verstärken und damit zu einer Abnahme der Differenz zwischen Niederschlag und Evapotranspiration führen. Die Auswertung der Wasserbilanzen des Lysimeters, welches mit CO₂ und Temperatur behandelt wird, zeigt, dass die negativen Effekte von Erwärmung und Trockenheit auf die Wasserverfügbarkeit durch die verdunstungsmindernde Wirkung erhöhter CO₂-Konzentrationen zumindest teilweise kompensiert werden kann. Die Kombination von hohen Temperaturen und ausbleibenden Niederschlägen kann offenbar auch an grundsätzlich wasserreichen, alpinen Standorten zumindest

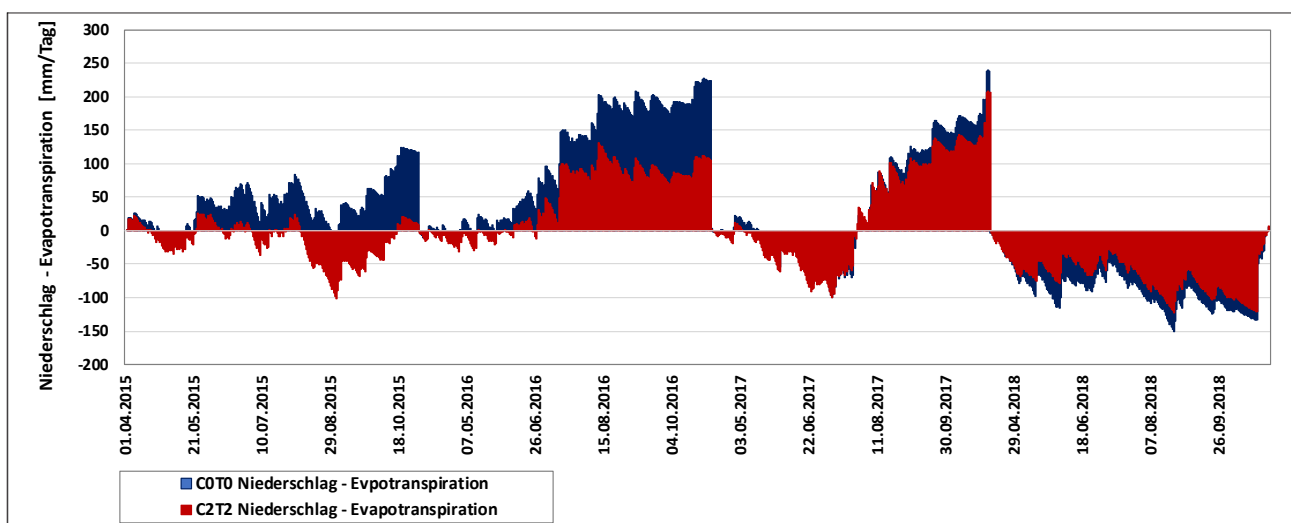


Abbildung 4: Tagesflüsse der Differenz Niederschlag – Evapotranspiration in den Vegetationsperioden 2015 – 2018.

temporär zu Defiziten in der Wasserbilanz führen, deren Folgen für alpine Ökosysteme und die Landwirtschaft weiterer Untersuchungen bedürfen.

Literatur

- APCC (2014): Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014 (AAR14). Austrian Panel on Climate Change (APCC), Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien, Österreich, 1096 pp.
- Groh, J.; V. Slawitsch, M. Herndl, A. Graf, H. Vereecken and T. Pütz (2018): Determining dew and hoar frost formation for a low mountain range and alpine grassland site by weighable lysimeter. *Journal of Hydrology*, 372-381.
- IPCC (2018): Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger: In: 1,5 °C globale Erwärmung. Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, ProClim, Österreichisches Umweltbundesamt, Bonn/Bern/Wien, November 2018.
- Pötsch, E.M.; M. Herndl und A. Schaumberger (2019): Produktivität von Grünland unter zukünftigen Klimabedingungen. 25. Österreichische Wintertagung, 23-25.
- Slawitsch, V.; S. Birk and M. Herndl (2016): A lysimeter-based approach to quantify the impact of climate change on soil hydrological processes. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 18, EGU2016-15838.
- ZAMG (2018): <https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal-klimawandel/klimavergangenheit/neoklima/lufttemperatur> (Stand: 05.03.2018).

Auswirkungen des Klimawandels auf den Kohlenstoffkreislauf im Grünland

David Reinthaler^{1*}

Einleitung

Durch den Anstieg der atmosphärischen CO₂-Konzentration und den damit einhergehenden Temperaturanstieg wird eine Reihe von Änderungen von biogeochemischen Kreisläufen erwartet (Frank *et al.*, 2015). Des Weiteren wird erwartet, dass die Auftretswahrscheinlichkeit von Wetterextremen wie Dürren und Hitzewellen in Zukunft zunehmen wird. Um diesen Änderungen vorbereitet entgegenzutreten zu können, werden in verschiedenen Klimamanipulationsexperimenten Versuche durchgeführt um zu untersuchen, wie sich diese Änderungen auf Biomasseproduktion, Wasser- und Nährstoffhaushalt sowie Treibhausgasemissionen auswirken könnten.

Globaler Kohlenstoffkreislauf

Der Kohlenstoffkreislauf beschreibt den Austausch von Kohlenstoff (C), hauptsächlich in Form von CO₂, zwischen verschiedenen Ökosystemen mit der Erdatmosphäre und berücksichtigt auch Emissionen aus der Verbrennung fossiler Energieträger und vulkanischer Aktivität.

Vereinfacht dargestellt kann gesagt werden, dass natürliche Ökosysteme, die sich im Aufbau befinden, eine positive Kohlenstoffbilanz haben, sprich C aus der Atmosphäre binden. Ökosysteme im Klimax Stadium bilanzieren gegen Null und Ökosysteme, die aus dem Gleichgewicht kommen, können zu Kohlenstoffquellen werden. Dies ist relevant, da in der Pedosphäre und Biosphäre zwei bis dreimal so viel C gespeichert ist, wie in der Atmosphäre.

Die Flüsse von und zur Pedosphäre, mit der Biosphäre als Schnittstelle sind wesentlich höher als die Emissionen aus fossilen Quellen und mittlerweile maßgeblich anthropogen beeinflusst, sei es direkt durch Landnutzungsänderungen

oder Intensivlandwirtschaft, oder indirekt durch globale Erwärmung und erhöhten atmosphärischen CO₂-Gehalt.

Kohlenstoffkreislauf im Grünland

Grünland stellt einen erheblichen Anteil an landwirtschaftlich und kulturell genutzten Landschaften dar und ist allein daher für die Bilanzierung von regionalen, nationalen und globalen Kohlenstoffflüssen von großem Interesse. Grünlandökosysteme nehmen CO₂ durch Photosynthese auf und geben es über verschiedene Atmungsprozesse wieder an die Atmosphäre ab. Die Größe der CO₂-Aufnahme hängt dabei maßgeblich von der Bestandesstruktur, den Lichtverhältnissen, der Wasser- und Nährstoffverfügbarkeit sowie von Temperatur und CO₂-Gehalt der Atmosphäre ab. Auch die Atmungsprozesse im Boden (Bodenfauna, Mikroorganismen, Wurzelatmung) sind stark an Temperatur und CO₂-Gehalt gekoppelt. Solange die CO₂ Aufnahme höher ist als die Summe der Atmungsprozesse, fungiert ein Ökosystem als Kohlenstoffsenke, überwiegt die Atmung, wird das System zur Kohlenstoffquelle. Zieht man in Betracht, dass der Boden, wie oben erwähnt, den größten Kohlenstoffpool auf der Erdoberfläche darstellt, wird klar, dass kleine Änderungen in diesem Pool große Auswirkungen auf den Kohlenstoffkreislauf haben können und dadurch den Klimawandel weiter verstärken oder auch kompensieren könnten. Der Einfluss von Temperatur und CO₂-Gehalt auf die Kohlenstoffbilanz von Grünlandsystemen ist eine wesentliche Motivation, dieses System in einem Klimawandalexperiment wie ClimGrass zu untersuchen.

Methodik

Zur Erhebung von Kohlenstoffflüssen werden verschiedene Kammersysteme (*Abbildung 1*) zur direkten Messung von



Abbildung 1: a) transparente Kammer zur Messung ökosystemarer CO₂-Flüsse; b) automatische Bodenatmungskammer; c-d) Messschacht und Membranschläuche für CO₂-Profil Messungen.

¹ Institut für Ökologie, Universität Innsbruck, Sternwartestrasse 15, A-6020 Innsbruck

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

Flussraten verwendet. In transparenten Kammern, die bei guten Lichtverhältnissen über den Bestand gestülpt werden, wird der Verlauf der CO₂-Konzentrationen gemessen und daraus die Flussrate berechnet. Ist der Fluss negativ, ist die C-Aufnahme durch die Photosynthese größer als die Atmungsprozesse. Die hiermit gemessene Größe nennt sich ökosystemarer Netto-C-Austausch oder NEE. Mit abgedunkelten Kammern lässt sich nach dem gleichen Prinzip die Summe der Atmungskomponenten messen, die Ökosystematmung oder Reco. Zur weiteren Trennung der Atmungskomponenten wird eine Reihe verschieden aufgebauter Kammern zur Messung der Gesamtbodenatmung oder Bodenatmung unter Wurzelausschluss verwendet.

Weiters betreiben wir auf der Anlage ein automatisiertes System zur hochauflösenden Messung der CO₂-Konzentrationen im Bodenprofil. Anhand dieser Daten können CO₂-Flüsse und auch die CO₂-Produktion in verschiedenen Bodentiefen modelliert werden, was wiederum einen wesentlichen Informationsgewinn über die im Boden ablaufenden Prozesse und deren zeitliche Dynamik erbringt.

Ergebnisse

Dürreexperiment 2017

Im Sommer 2017 wurde auf unserer Versuchsfläche ein Dürreexperiment durchgeführt, in welchem die Auswirkungen dieses Extremereignisses auf die Kohlenstoffflüsse unter aktuellen (C0T0) und zukünftigen Klimabedingungen (C2T2) untersucht wurden.

Schon vor Beginn des Dürreexperimentes war die Produktivität auf den Flächen, die dem zukünftigen Klimaszenario ausgesetzt waren, eingeschränkt. Unter beiden Klimaszenarien konnte ein Rückgang der Produktivität des Grünlandes bei Dürre beobachtet werden, wobei der Rückgang im zukünftigen Szenario stärker war als im aktuellen. Dieser Rückgang der Produktivität war auf eine Einschränkung der Atmung und der Photosyntheseleistung des Systems zurückzuführen, wobei der starke Unterschied der beiden Szenarien auf einer erhöhten Einschränkung der Photosynthese unter zukünftigem Klima beruhte (Abbildung 2). In der Erholungsphase nach der Dürre kam es zu einem Überschießen vor allem der Atmung, welches jedoch den vorangegangenen Produktivitätsverlust nicht ausgleichen konnte.

Bei einem genaueren Blick auf die Atmungskomponenten konnten wir eine starke Einschränkung der Bodenatmung unter Dürre erkennen, wobei auch hier die Einschränkung unter dem zukünftigen Klima wesentlich höher war als unter aktuellem (Abbildung 3).

Befeuchtungspulse der Bodenatmung, auch „Birch Effekt“ genannt (Birch, 1958)

sind ein erprobtes Mittel zur Klassifizierung von Dürreintensitäten. Dazu wird bei kontrollierter Wiederbefeuchtung (Rewetting) nach einem Dürreereignis hochauflösend die Bodenatmung gemessen. Kurz nach dem Rewetting kommt es zu einer rapiden Erhöhung der Bodenatmung, resultierend aus der rapiden Mineralisierung von organischem C durch

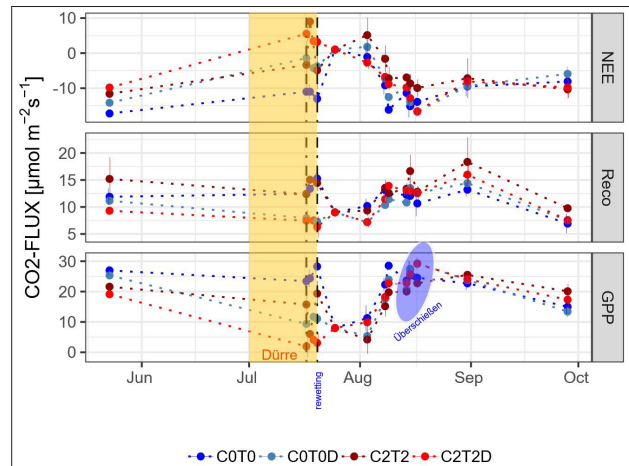


Abbildung 2: Bruttoprimärproduktivität (GPP) und deren Komponenten Netto-C-Austausch (NEE) und Ökosystematmung (ER) während des Dürreexperimentes und darauffolgender Erholungsphase. Stärkere Einschränkung durch Dürre unter zukünftigem Klima (C2T2D) als unter aktuellem Klima (C0T0D) unter Dürre. Das sogenannte „Überschießen“ in der Erholungsphase konnte zuvor erlittene Verluste nicht ausgleichen.

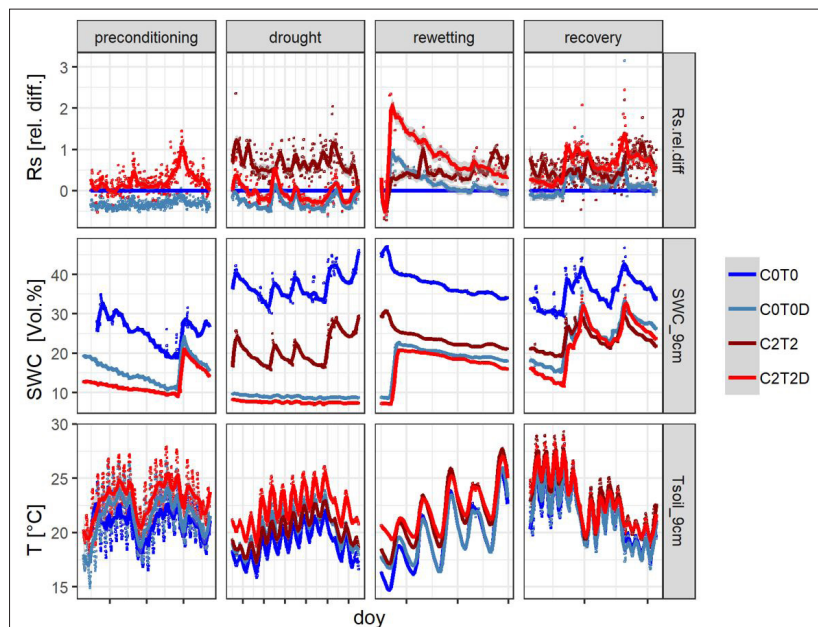


Abbildung 3: Auf die Kontrolle (C0T0) normalisierte Bodenatmungsflüsse vor, während und nach dem Dürreexperiment sowie dazugehörige Bodenfeuchte und Bodentemperatur. Während der Dürre kam es in beiden Klimaszenarien zu wesentlichen Einschränkungen in den Bodenatmungsraten. Bei der Wiederbefeuchtung (rewetting) fielen die Atmungspulse im zukünftigen Klima (C2T2D) stärker aus, als unter aktuellem (C0T0D). Auch Überschießen der Bodenatmung während der Erholungszeit (recovery) war unter C2T2D stärker ausgeprägt als unter C0T0D.

Mikroorganismen, welcher während der Dürre akkumuliert wurde. Hier gilt: je höher der resultierende Puls, desto stärker das vorangegangene Dürreereignis. Auch diese Messgröße fiel unter zukünftigem Klima wesentlich höher aus, als unter aktuellem.

Schlussfolgerungen

Unter zukünftigen Klimabedingungen ist eine Veränderung der Produktivität von Grünland zu erwarten, vor allem unter Extremereignissen. Bei einer überproportionalen Zunahme von Atmungsprozessen kann ein Verlust von Kohlenstoff an die Atmosphäre nicht ausgeschlossen werden, der die bisher dokumentierten Verluste durch Dürren weitaus übersteigt (Ciais *et al.*, 2005). Inwiefern diesen Verlusten durch Anpassung der Grünlandbestände und Nährstoffbedingungen

entgegengewirkt werden kann, bleibt Gegenstand weiterer Untersuchungen.

Literatur

- Birch, H. F. (1958): The effect of soil drying on humus decomposition and nitrogen availability. In *Plant and Soil* 10 (1), pp. 9-31. DOI: 10.1007/BF01343734.
- Ciais, Ph.; M. Reichstein, N. Viovy, A. Granier, J. Ogée and V. Allard *et al.* (2005): Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. In *Nature* 437, 529 EP-. DOI: 10.1038/nature03972.
- Frank, D.; M. Reichstein, M. Bahn, K. Thonicke, D. Frank and M.D. Mahecha *et al.* (2015): Effects of climate extremes on the terrestrial carbon cycle. Concepts, processes and potential future impacts. In *Glob Change Biol* 21 (8), pp. 2861-2880. DOI: 10.1111/gcb.12916.

Einfluss des Klimawandels auf Stickstoffflüsse im Grünlandökosystem

Evi Deltedesco^{1*}, Katharina Keiblinger¹, Maria Naynar¹, Hans-Peter Piepho², Markus Gorfer³, Erich M. Pötsch⁴ und Sophie Zechmeister-Boltenstern¹

Einleitung

Klimaforscher kündigen für die nächsten Jahrzehnte einen deutlichen Anstieg der Lufttemperatur und des atmosphärischen Kohlendioxids (CO₂) an (IPCC, 2014; World-Meteorological-Organization, 2017). Weltweit konnte bereits ein Temperaturanstieg von 0.85 °C zwischen 1880 und 2012 gemessen werden (IPCC, 2014). In Österreich hingegen wurde bereits in den letzten Jahren ein signifikanter Anstieg der Mitteltemperatur von 1 bis 7 °C verzeichnet (BMNT, 2015). Dadurch wird verdeutlicht, dass in gemäßigten Zonen Europas noch ein größerer Temperaturanstieg zu erwarten ist (Koch *et al.*, 2007). Diese Temperaturerhöhungen werden durch den immer massiveren Ausstoß von CO₂ und anderen Spurengasen verursacht. Insbesondere die atmosphärischen Konzentrationen von Kohlendioxid (CO₂) und Distickstoffmonoxid („Lachgas“, N₂O), zwei wichtige direkte Treibhausgase, erreichten im Jahr 2016 einen neuen historischen Höchststand von 403.3 ppm und 328.9 ppb. Dies bedeutet einen Anstieg von 145 % für CO₂ und 122 % für N₂O seit vorindustrieller Zeit (IPCC, 2014; World-Meteorological-Organization, 2017). In Österreich (Salzburg) wurde bereits 2015 erstmals eine CO₂-Konzentration von 400 ppm überschritten (BMNT, 2015). Ungefähr 10 – 12 % der globalen, durch den Menschen verursachten Treibhausgasemissionen stammen aus dem Agrarsektor (Smith *et al.*, 2007). Indirekte Treibhausgase, wie Stickoxide (NO_x) und Ammoniak (NH₃) werden vor allem bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe bzw. bei der Herstellung von Mineraldüngern erzeugt. Jedoch sollten die Emissionen, welche im Boden produziert werden, nicht vernachlässigt werden. Sie können zu einer Erhöhung des troposphärischen Ozons führen und durch Ablagerung des Nitrats den Boden ansäuern. Diese Prozesse können wiederum zu einer Erhöhung der N₂O-Emissionen führen. Lachgas weist ungefähr ein 300 Mal so hohes Erwärmungspotential wie CO₂ auf (Akiyama *et al.*, 2004; Ferretti *et al.*, 2017; Galloway *et al.*, 2003; Smith *et al.*, 1998).

Es gibt bereits viele Belege dafür, dass Erwärmung und erhöhtes atmosphärisches CO₂ direkte, sowie indirekte Treibhausgase beeinflussen können, indem sie die Produktion der Pflanzen, mikrobielle Aktivitäten im Boden sowie das Mikroklima verändern. Im Grünland wurden bereits verschiedenste Klimaexperimente durchgeführt, wobei meist nur einzelne Wetter-/Klimafaktoren, wie z.B. Temperatur oder Niederschlag, bewusst gesteuert und ver-

ändert wurden (Luo *et al.*, 2006; Moser *et al.*, 2018; Shaw *et al.*, 2002; Zhou *et al.*, 2008). Diese Experimente wiesen Schwierigkeiten bei der Interpretation der Daten auf, da es viele Störfaktoren (Stickstoffablagerung, Streuabbau und Stickstoffverfügbarkeit) gibt, die sich ändern oder interagieren können (Davidson *et al.*, 2000; Pilegaard *et al.*, 2006). Diese Störparameter können keine objektive Schätzung der direkten und indirekten Treibhausgasemissionen liefern. Deshalb stellen Experimente zur Klimafolgenforschung eine besondere Herausforderung dar, insbesondere, wenn dabei gleich mehrere Faktoren zugleich verändert werden. Die Stärke, aber auch die Wechselwirkungen der beiden Klimafaktoren (erhöhtes atmosphärisches CO₂ und Erwärmung) sind noch weitgehend unbekannt (Yue *et al.*, 2017). Deshalb haben wir eine kombinierte Feld-Laborstudie durchgeführt, um einerseits diese Störparameter kleinstmöglich zu halten und gleichzeitig mehrere Effekte (erhöhtes atmosphärisches CO₂ und Erwärmung) auf direkte, aber auch indirekte Treibhausgasemissionen zu testen.

Material und Methoden

Auf der „Climgrass“ Versuchsfläche in Raumberg-Gumpenstein werden die für das Jahr 2050 prognostizierten Erhöhungen von Temperatur und CO₂-Konzentration in verschiedenen Abstufungen und Kombinationen simuliert. Die Lufttemperatur wird in drei Abstufungen verändert: ambient (entspricht dem jeweiligen aktuellen Zustand), +1.5 °C und +3 °C. Die CO₂-Konzentration der Atmosphäre wird ebenfalls in drei Abstufungen verändert: ambient, +150 ppm und +300 ppm.

Im Oktober 2016 wurden von insgesamt 27 Versuchspartnern intakte Bodenbohrkerne entnommen und für weitere Analysen zur BOKU nach Wien gebracht. Die oberirdische Biomasse wurde entfernt und die Bohrkerne wurden mit 30 kg N ha⁻¹ Ammoniumnitrat gedüngt. Anschließend wurden die Bohrkerne in einem im-Haus gebauten Inkubator bei Raumtemperatur (20 °C) für 12 Stunden inkubiert und NH₃-Emissionen wurden gemessen. Anschließend wurden die Bohrkerne wiederum für 12 Stunden bei 20 °C inkubiert und es konnten mit einem Chemolumineszenz-Analysator NO_x-Emissionen analysiert werden. Zum Schluss wurden die Bohrkerne nochmals bei verschiedenen Temperaturen (0, 5, 10, 15 und 20 °C) inkubiert. Durch eine manuelle Beprobung (4 Proben pro Stunde pro Temperatur) konnten

¹ Department für Wald und Bodenwissenschaften, Universität für Bodenkultur, Peter-Jordan-Straße 82, A-1190 Wien

² Institut für Kulturpflanzenwissenschaften, Bereich Biostatistik, Universität Hohenheim, Fruwirthstraße 23, D-70599 Stuttgart

³ Austrian Institute of Technology, Bioresources, Konrad-Lorenz-Straße 24, A-3430 Tulln

⁴ Institut für Pflanzenbau und Kulturlandschaft, HBLFA Raumberg-Gumpenstein, Raumberg 38, A-8952 Irdning-Donnersbachtal

* Ansprechpartner: DI Evi DELTEDESCO, evi.deltedesco@boku.ac.at

Gasproben für die Analyse von Lachgas gezogen werden. Diese wurden anschließend mit einem Gas-Chromatographen gemessen. Durch den sukzessiven Temperaturanstieg konnte die Temperatursensitivität mikrobieller Prozesse (Q_{10}), welche bei der Treibhausgasproduktion beteiligt sind, bestimmt werden. Nach den Treibhausgasmessungen wurde der Boden jedes Bohrkernes gesiebt und homogenisiert, um verschiedenste Bodenparameter (mikrobielle Biomasse, Wassergehalt, mineralischer N-Gehalt...) zu bestimmen (detaillierte Methodenbeschreibung in Deltedesco *et al.*, 2019).

Ergebnisse und Diskussion

NH_3 -Emissionen

Es konnten keine behandlungsbedingten Unterschiede der NH_3 -Emissionen festgestellt werden. Generell können Bö-

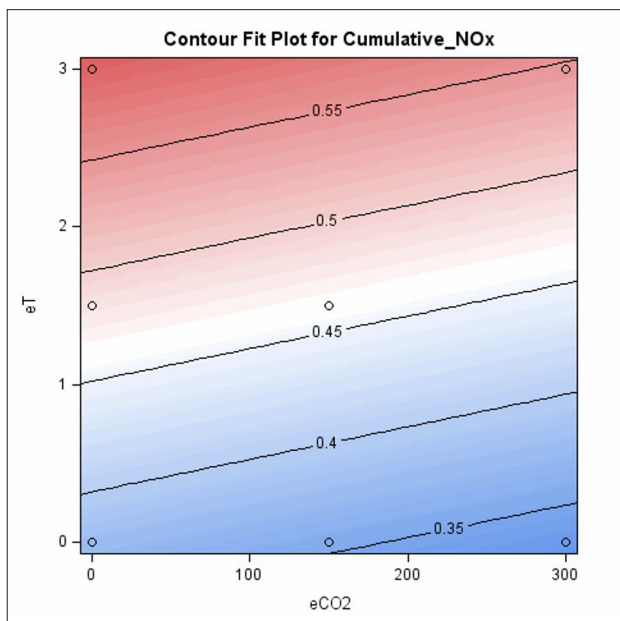


Abbildung 1: Contour Plot der NO_x -Emissionen (in $mg\ m^{-2}$) entlang eines Temperaturgradienten (y-Achse) und eines CO_2 -Gradienten (x-Achse).

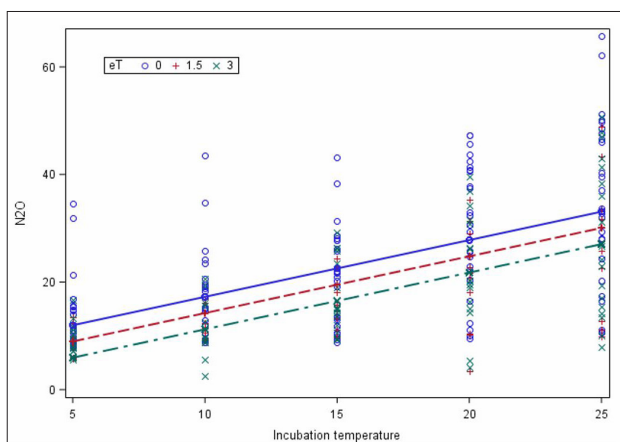


Abbildung 2: Lineare Regression der Temperatur für N_2O -Emissionen bei verschiedenen Inkubationstemperaturen.

den als Ammoniakquelle oder -senke wirken, normalerweise begünstigt eine Temperaturerhöhung jedoch die Umwandlung von gelösten in gasförmiges NH_3 . Dies gilt aber nur, wenn andere Faktoren, wie z.B. Ammonium-Verfügbarkeit oder der pH-Wert konstant sind (Flechard *et al.*, 2015). Obwohl eine vorübergehende Temperaturerhöhung die NH_3 -Emissionen aktiv erhöhen könnte (Flechard *et al.*, 2015), scheint dies für zwei Jahre Erwärmung nicht zu gelten. Auch wenn die direkte Reaktion der NH_3 -Emissionen langfristig mit einer Temperaturerhöhung gesteigert wird, können indirekte Auswirkungen, wie ein Rückgang des Wassergehaltes oder die Abnahme von Ammonium bestimmende Faktoren sein.

NO_x -Emissionen

NO_x -Emissionen zeigten starke Wechselwirkungen mit extrahierbarem Gesamtstickstoff und Nitrat im Boden. Stickstoffverfügbarkeit im Boden wurde von Pilegaard (2013) als entscheidender Faktor für NO_x -Emissionen beschrieben. In unserer Studie stiegen die NO_x -Emissionen vor allem in den erwärmten Versuchspartellen an (Abbildung 1). Wir gehen davon aus, dass die Erhöhung der NO_x -Emissionen vor allem durch einen indirekten Effekt der Erwärmung auf die Bodenfeuchtigkeit hervorgerufen wird. Dies ist im Einklang mit den Ergebnissen in Schaufler *et al.* (2010), in dieser Studie wurde berichtet, dass vor allem in wärmeren und trockeneren Teilen Europas NO_x -Emissionen aus dem Boden zunehmen.

N_2O -Emissionen

Interessanterweise zeigten unsere Klimawandel-Behandlungen keinen signifikanten Unterschied zu den Kontrollplots. Arnone III and Bohlen (1998) stellte bereits nach zwei Vegetationsperioden positive Auswirkungen von erhöhtem CO_2 auf N_2O -Emissionen fest, die hauptsächlich mit verbesserten Bodenwasserbedingungen einhergingen. Erhöhtes CO_2 kann zu einer geringeren Stomataöffnung und dies wiederum zu einer verringerten Transpiration der Pflanzen führen und so indirekt den Wasserhaushalt der Pflanzen beeinflussen. Es kann jedoch Jahre dauern, bis sich solche Prozesse in den Pflanzen ändern (Morgan *et al.*, 2011; Morgan *et al.*, 2004). In vielen Untersuchungen wurden diese positiven Auswirkungen auf das Bodenwasser saisonal und hauptsächlich dann, wenn die Wasserverfügbarkeit begrenzt war, beschrieben (Morgan *et al.*, 2004; Roy *et al.*, 2016; Selsted *et al.*, 2012). Erwärmung kann sich durch höhere Evapotranspirationsraten stärker auf die Bodenfeuchtigkeit auswirken als erhöhtes CO_2 (Liu *et al.*, 2009).

In verschiedensten Studien wurden bereits Zusammenhänge zwischen Bodenfeuchtigkeit und N_2O -Emissionen gezeigt (Bateman and Baggs, 2005; Werner *et al.*, 2014), dies konnte auch in unserer Studie durch eine positive Korrelation/ Wechselwirkung bestätigt werden.

In unserer Studie hat wahrscheinlich eine relativ hohe räumliche Variabilität die behandlungsbedingten Unterschiede der N_2O -Emissionen verringert, dies wurde auch in anderen Studien berichtet (Arias-Navarro *et al.*, 2017; Harris *et al.*, 2018). Die Climgrass-Versuchsfläche zeichnet sich durch eine hohe Pflanzenvariabilität aus und auch

eine unterschiedliche Pflanzenzusammensetzung kann zu wesentlichen Unterschieden bezüglich N_2O -Emissionen beitragen (Parkin, 1987).

Temperatursensitivität

Die Lachgas Emissionen in unserer Studie stiegen signifikant mit sukzessiver Temperaturerhöhung an, dies wurde bereits zuvor in anderen Studien beschrieben (Díaz-Pinés *et al.*, 2014). Die gemessenen N_2O -Emissionen, während der Inkubation bei sukzessivem Temperaturanstieg, reagierten signifikant auf die erhöhte Temperatur-Behandlung im Feld. Jansen-Willems *et al.* (2016) beschrieb bereits in seiner Studie eine Verringerung der N_2O -Emissionen durch einen Temperaturanstieg. In unserer Studie konnte der Effekt der Erwärmung aber erst durch die wiederholten Messungen bei sukzessivem Anstieg der Inkubationstemperatur festgestellt werden.

Die Temperatursensitivität (Q_{10}) zeigte keinen konsistenten Verlauf und nahm mit steigender Inkubationstemperatur nur geringfügig ab. Wir gehen davon aus, dass die Lachgas-Bildung im Boden viele verschiedene Bodenprozesse und verschiedenste Mikroorganismen umfasst, die alle zeitweilig durch erhöhte Temperatur stimuliert werden. Diese verschiedenen Effekte können sich jedoch multiplizierend auf den Stickstoff-Kreislauf sowie auf die N_2O -Emissionen auswirken und die Temperatursensitivität signifikant beeinflussen (Butterbach-Bahl *et al.*, 2013).

Conclusio

Unsere Ergebnisse weisen darauf hin, dass N_2O - und NO_x -Emissionen aus dem Boden vor allem durch die indirekten Auswirkungen der Erwärmung auf die Bodenfeuchtigkeit beeinflusst werden. Basierend auf derzeit verfügbare Daten, stellen Sekundäreffekte, wie z.B. Änderungen der Pflanzenleistungen (Stomataverschluss und Evapotranspiration) sowie abiotische Bodeneigenschaften (Wassergehalt) die Haupttreiber für mikrobielle Prozesse im Boden dar und diese sind wiederum verantwortlich für die Bildung der Treibhausgase. Es ist daher äußerst wichtig, diese komplexen Wechselwirkungen zu untersuchen und zu verstehen, um Vorhersagen von Klimawandel-Szenarien für biogeochemische Bodenprozesse zu verbessern.

Literatur

Akiyama, H.; I.P. McTaggart, B.C. Ball and A. Scott (2004): N_2O , NO , and NH_3 Emissions from Soil after the Application of Organic Fertilizers, Urea and Water. *Water, Air, and Soil Pollution* 156, 113-129.

Arias-Navarro, C.; E. Díaz-Pinés, S. Klatt, P. Brandt, M.C. Rufino, K. Butterbach-Bahl and L.V. Verchot (2017): Spatial variability of soil N_2O and CO_2 fluxes in different topographic positions in a tropical montane forest in Kenya. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 122, 514-527.

Arnone III, J.A. and P.J. Bohlen (1998): Stimulated N_2O flux from intact grassland monoliths after two growing seasons under elevated atmospheric CO_2 . *Oecologia* 116, 331-335.

Bateman, E.J. and E.M. Baggs (2005): Contributions of nitrification and denitrification to N_2O emissions from soils at different water-filled pore space. *Biology and Fertility of Soils* 41, 379-388.

BMNT (2015): ÖKS15, Klimaszenarien für Österreich, Daten-Methoden-Klimaanalyse.

Butterbach-Bahl, K.; E.M. Baggs, M. Dannenmann, R. Kiese and S. Zechmeister-Boltenstern (2013): Nitrous oxide emissions from soils: how well do we understand the processes and their controls? *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 368, 20130122.

Davidson, E.A.; M. Keller, H.E. Erickson, L.V. Verchot and E. Veldkamp (2000): Testing a conceptual model of soil emissions of nitrous and nitric oxides: using two functions based on soil nitrogen availability and soil water content, the hole-in-the-pipe model characterizes a large fraction of the observed variation of nitric oxide and nitrous oxide emissions from soils. *Bioscience* 50, 667-680.

Deldedesco, E.; K.M. Keiblinger, M. Naynar, H.-P. Piepho, M. Gorfer, M. Herndl, M. Bahn, E.M. Pötsch and S. Zechmeister-Boltenstern (2019): Trace gas fluxes from managed grassland soil subject to multifactorial climate change manipulation. *Applied Soil Ecology*.

Díaz-Pinés, E.; A. Schindlbacher, M. Godino, B. Kitzler, R. Jandl, S. Zechmeister-Boltenstern and A. Rubio (2014): Effects of tree species composition on the CO_2 and N_2O efflux of a Mediterranean mountain forest soil. *Plant and Soil* 384, 243-257.

Ferretti, G.; K.M. Keiblinger, M. Zimmermann, D. Di Giuseppe, B. Faccini, N. Colombani, A. Mentler, S. Zechmeister-Boltenstern, M. Coltorti and M. Mastrocicco (2017): High resolution short-term investigation of soil CO_2 , N_2O , NO_x and NH_3 emissions after different chabazite zeolite amendments. *Applied soil ecology* 119, 138-144.

Flechar, C.R.; R.S. Massad, B. Loubet, E. Personne, D. Simpson, J.O. Bash, E.J. Cooter, E. Nemitz and M.A. Sutton (2015): Advances in Understanding, Models and Parameterizations of Biosphere-Atmosphere Ammonia Exchange, in: Massad, R.-S., Loubet, B. (Eds.), *Review and Integration of Biosphere-Atmosphere Modelling of Reactive Trace Gases and Volatile Aerosols*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 11-84.

Galloway, J.N.; J.D. Aber, J.W. Erisman, S.P. Seitzinger, R.W. Howarth, E.B. Cowling and B.J. Cosby (2003): The nitrogen cascade. *Bioscience* 53, 341-356.

Harris, E.; T. Ladreiter-Knauss, K. Butterbach-Bahl, B. Wolf and M. Bahn (2018): Land-use and abandonment alters methane and nitrous oxide fluxes in mountain grasslands. *Science of The Total Environment* 628-629, 997-1008.

IPCC (2014): *Climate Change 2014: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel in Climate Change.

Jansen-Willems, A.B.; G.J. Lanigan, T.J. Clough, L.C. Andresen and C. Müller (2016): Long-term elevation of temperature affects organic N turnover and associated N_2O emissions in a permanent grassland soil. *SOIL* 2, 601-614.

Koch, O.; D. Tscherko and E. Kandeler (2007): Temperature sensitivity of microbial respiration, nitrogen mineralization, and potential soil enzyme activities in organic alpine soils. *Global Biogeochemical Cycles* 21.

Liu, W.; Z. Zhang and S. Wan (2009): Predominant role of water in regulating soil and microbial respiration and their responses to climate change in a semiarid grassland. *Global Change Biology* 15, 184-195.

Luo, Y.; D. Hui and D. Zhang (2006): Elevated CO_2 stimulates net accumulations of carbon and nitrogen in land ecosystems: A meta-analysis. *Ecology* 87, 53-63.

Morgan, J.A.; D.R. McCain, E. Pendall, D.M. Blumenthal, B.A. Kimball, Y. Carrillo, D.G. Williams, J. Heisler-White, F.A. Dijkstra and M. West (2011): C4 grasses prosper as carbon dioxide eliminates desiccation in warmed semi-arid grassland. *Nature* 476, 202.

Morgan, J.A.; D.E. Pataki, C. Körner, H. Clark, S.J. Del Grosso, J.M. Grünzweig, A.K. Knapp, A.R. Mosier, P.C.D. Newton, P.A. Niklaus, J.B. Nippert, R.S. Nowak, W.J. Parton, H.W. Polley and M.R. Shaw (2004): Water relations in grassland and desert ecosystems exposed to elevated atmospheric CO_2 . *Oecologia* 140, 11-25.

- Moser, G.; A. Gorenflo, K. Brenzinger, L. Keidel, G. Braker, S. Marhan, T.J. Clough and C. Müller (2018): Explaining the doubling of N_2O emissions under elevated CO_2 in the Giessen FACE via in-field ^{15}N tracing. *Global change biology* 24, 3897-3910.
- Parkin, T.B. (1987): Soil Microsites as a Source of Denitrification Variability. *Soil Science Society of America Journal* 51, 1194-1199.
- Pilegaard, K. (2013): Processes regulating nitric oxide emissions from soils. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 368, 20130126.
- Pilegaard, K.; U. Skiba, P. Ambus, C. Beier, M. Pihlatie and T. Vesala (2006): Factors controlling regional differences in forest soil emission of nitrogen oxides (NO and N_2O). *Biogeosciences*.
- Roy, J.; C. Picon-Cochard, A. Augusti, M.-L. Benot, L. Thiery, O. Darsenville, D. Landais, C. Piel, M. Defosse, S. Devidal, C. Escape, O. Ravel, N. Fromin, F. Volaire, A. Milcu, M. Bahn and J.-F. Soussana, (2016): Elevated CO_2 maintains grassland net carbon uptake under a future heat and drought extreme. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 113, 6224-6229.
- Schaufler, G.; B. Kitzler, A. Schindlbacher, U. Skiba, M.A. Sutton and S. Zechmeister-Boltenstern (2010): Greenhouse gas emissions from European soils under different land use: effects of soil moisture and temperature. *European Journal of Soil Science* 61, 683-696.
- Selsted, M.B.; L. van der Linden, A. Ibrom, A. Michelsen, K.S. Larsen, J.K. Pedersen, T.N. Mikkelsen, K. Pilegaard, C. Beier and P. Ambus (2012): Soil respiration is stimulated by elevated CO_2 and reduced by summer drought: three years of measurements in a multifactor ecosystem manipulation experiment in a temperate heathland (CLIMATE). *Global Change Biology* 18, 1216-1230.
- Shaw, M.R.; E.S. Zavaleta, N.R. Chiariello, E.E. Cleland, H.A. Mooney and C.B. Field (2002): Grassland Responses to Global Environmental Changes Suppressed by Elevated CO_2 . *Science* 298, 1987-1990.
- Smith, K.A.; P.E. Thomson, H. Clayton, I.P. McTaggart and F. Conen (1998): Effects of temperature, water content and nitrogen fertilisation on emissions of nitrous oxide by soils. *Atmospheric Environment* 32, 3301-3309.
- Smith, P.; D. Martino, Z. Cai, D. Gwary, H. Janzen, P. Kumar, B. McCarl, S. Ogle, F. O'Mara and C. Rice (2007). Greenhouse gas mitigation in agriculture. *Philosophical transactions of the royal Society B: Biological Sciences* 363, 789-813.
- Werner, C.; K. Reiser, M. Dannemann, L.B. Hutley, J. Jacobeit and K. Butterbach-Bahl (2014): N_2O , NO , N_2 and CO_2 emissions from tropical savanna and grassland of northern Australia: an incubation experiment with intact soil cores. *Biogeosciences* 11, 6047-6065.
- World-Meteorological-Organization (2017): WMO Greenhouse Gas Bulletin, The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2016.
- Yue, K.; D.A. Fornara, W. Yang, Y. Peng, C. Peng, Z. Liu and F. Wu (2017): Influence of multiple global change drivers on terrestrial carbon storage: additive effects are common. *Ecology Letters* 20, 663-672.
- Zhou, J.; S. Kang, C.W. Schadt and C.T. Garten (2008): Spatial scaling of functional gene diversity across various microbial taxa. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 105, 7768-7773.

Auswirkungen des Klimawandels auf mikrobielle Gemeinschaften und deren Funktionen in Böden: Das ClimGrass-Experiment

Wolfgang Wanek^{1*}, Alberto Canarini¹, Eva Simon¹, Joana Silva¹, Judith Prommer¹, Ivana Bogdanovic¹, Tania Maxwell², Erich M. Pötsch³, Michael Bahn⁴ und Andreas Richter¹

Böden spielen eine wichtige Rolle für Ökosystemprozesse und Ökosystemleistungen wie etwa Kohlenstoffspeicherung, Wasserreinigung und -speicherung, und Nährstoffkreisläufe. Gesunde Böden mit intakten Bodenfunktionen stellen somit eine wichtige Basis für die nachhaltige und somit langfristige Nahrungs- und Futtermittelproduktion und den Erhalt der biologischen Vielfalt dar. Viele dieser Ökosystemleistungen wie die Nährstoffzyklisierung und Kohlenstoffspeicherung des Bodens werden durch mikrobielle Gemeinschaften in den Böden erbracht

Diese mikrobiellen Gemeinschaften reagieren empfindlich auf Umweltveränderungen. Klimaerwärmung und Trockenheit beeinflussen Bodenmikroben direkt, während sich ansteigende atmosphärische CO_2 Konzentrationen indirekt über Beeinflussung des Pflanzenwachstums und Wurzausscheidungen auf die mikrobiellen Gemeinschaften auswirken.

Globale Klimamodelle prognostizieren für den Alpenraum atmosphärische CO_2 -Erhöhungen um 200 – 400 ppm, einen Temperaturanstieg um +3 bis +4 °C sowie häufigere und extremere Dürreperioden. Es ist daher von entscheidender

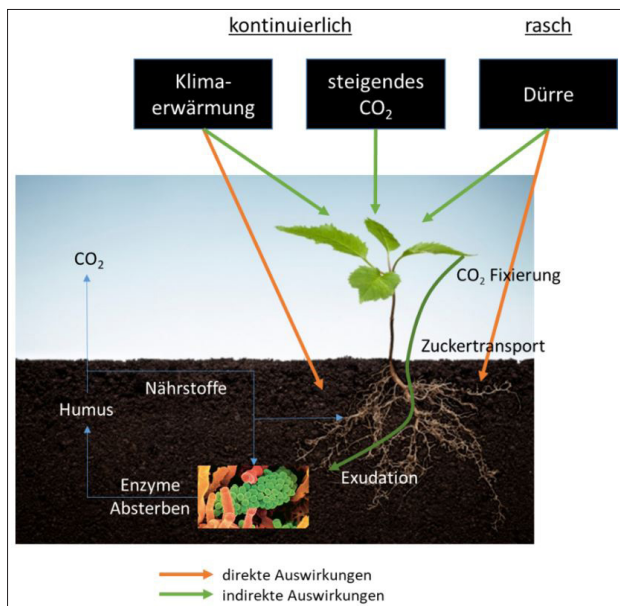
Bedeutung, die Auswirkungen dieser Klimaveränderungen auf Böden im alpinen Wirtschaftsgrünland zu erforschen. Die gewonnenen Erkenntnisse sollen dazu dienen, Bewirtschaftungsweisen des Grünlands an die prognostizierten Klimaveränderungen adaptieren zu können, um deren nachhaltige Nutzung zu gewährleisten.

Diese Präsentation zeigt die Auswirkungen des Klimawandels auf Böden unter Grünlandbewirtschaftung mit speziellem Fokus auf mikrobielle Gemeinschaftsstrukturen, Nährstoffkreisläufe sowie den Kohlenstoffhaushalt von Böden. Im Folgenden wird zudem auf die Rolle der Wechselwirkungen zwischen Pflanzen und Bodenmikroben eingegangen. Innerhalb des Climgrass-Experiments untersuchen wir seit 6 Jahren die langfristigen ökosystemaren Auswirkungen von erhöhtem CO_2 (eCO_2) und erhöhter Temperatur (eT) wie auch den Effekt kurzfristiger Störungen, die durch Dürren (eD) ausgelöst werden.

eCO_2 bewirkte, dass innerhalb weniger Jahre bis zu 15 % des Bodenhumus von frischem Pflanzenmaterial ersetzt wurden; ein Hinweis auf die hohe Dynamik des Kohlenstoffs im Boden. Wir fanden jedoch kaum Auswirkungen auf die Struktur der mikrobiellen Gemeinschaften, auf die Nährstoffverfügbarkeit (Stickstoff, Phosphor, Kalium, Calcium) oder auf mikrobielle Prozesse generell. Im Gegensatz dazu bedingte eCO_2 eine verbesserte pflanzliche Wassernutzungseffizienz und steigerte damit den Bodenwassergehalt. Wir erwarten, dass ausgeprägte eCO_2 Effekte erst deutlich später erkennbar werden, etwa nach mehr als 10 Jahren CO_2 Behandlung, da sich nicht nur die Entwicklung sondern auch die Veränderung/Anpassung eines Ökosystems über längere Zeiträume erstreckt.

eT wirkte sich nach 4 – 5 Jahren analog zu eCO_2 nicht auf die Struktur der mikrobiellen Gemeinschaften aus, verursachte jedoch verstärkten Bodenwasserverlust, beschleunigte die Kalzium- und Magnesiumnachlieferung der Böden, während die Stickstoff- und Phosphorverfügbarkeit sowie mikrobielle Aktivitäten (mikrobielle Kohlenstoffnutzung) relativ unbeeinflusst blieben. Auch diese Resultate zeigen, dass Auswirkungen des Klimawandels, hier eT , sich erst nach längeren Zeiträumen in einem Ökosystem manifestieren.

Dürre, als eine kurzfristige, wiederkehrende Ökosystemstörung durch Extremwetterereignisse, hingegen zeigte bei



¹ Department of Microbiology and Ecosystem Science, Althanstrasse 14, A-1090 Wien

² INRA UMR 1391 Interactions Sol-Plante-Atmosphère, Université de Bordeaux, CS 20032, FR-33882 Villenave d'ornon cedex

³ Institut für Pflanzenbau und Kulturlandschaft, HBLFA Raumberg-Gumpenstein, Raumberg 38, A-8952 Irdning-Donnersbachtal

⁴ Institut für Ökologie, Universität Innsbruck, Sternwartestrasse 15, A-6020 Innsbruck

* Ansprechpartner: Ao. Univ.-Prof. Dr. Wolfgang WANEK, wolfgang.wanek@univie.ac.at

weitem die stärksten Auswirkungen auf die untersuchten Prozesse. Dürreperioden beeinträchtigten die Interaktion von Pflanzen und Bodenmikroorganismen: so wurden z.B. weniger pflanzliche Zucker über die Wurzeln in die austrocknenden Böden abgegeben. Der starke Bodenwasserverlust und die Einschränkungen im Pflanzenwachstum führten zu einer Veränderung in der mikrobiellen Gemeinschaftsstruktur, einem Anstieg von Ammonium und organischem Stickstoff im Boden, während die Phosphorkonzentrationen im Boden sanken. Die Calcium- und Kaliumnachlieferungen sanken deutlich, während die mikrobiellen Aktivitäten wiederum relativ wenig reagierten. Die Dürre-beeinträchtigten Grünländer waren jedoch 2 Wochen nach Wiederbefeuchtung wieder in ihrem natürlichen/ökologischen Gleichgewicht. Dies bezeugt, dass Ökosysteme auf kurzfristige

Störungen „ökologisch und ökonomisch“ reagieren können, indem sie ihre grundlegende Organisationsweise wiederherhalten (Resilienz).

Zusammenfassung

Kurzfristige Störungen wie Dürre wiesen deutlich stärkere Auswirkungen auf Nährstoffkreisläufe und mikrobielle Aktivitäten auf, verglichen zu den langsam wirksamwerdenden Klimaszenarien Erwärmung und steigendes Kohlendioxid. Es wird folglich hoch interessant das Verhalten des Berggrünlands über die Jahre weiter zu verfolgen, um langfristige Reaktionen der Systeme auf Klimawandel zu verstehen und Anpassungen der Managementstrategien abzuleiten.

Wie reagiert die Bodenmikrobiologie im Grünland auf den Klimawandel?

Markus Gorfer^{1*}, Evi Deltedesco², Katharina Keiblinger², Hans-Peter Piepho³, Livio Antonielli¹,
Sophie Zechmeister-Boltenstern² und Erich M. Pötsch⁴

Einleitung

Das globale Klima hat sich seit Beginn der Industrialisierung um 1750 drastisch geändert (World-Meteorological-Organization, 2017). Davon sind mittlerweile so gut wie alle Organismen auf der Erde betroffen, auch die Mikroben im Boden. Bakterien, Archaeen, Pilze sowie zahlreiche andere Kleinstlebewesen bewerkstelligen im Boden die Umsetzung der Nährstoffe und den Abbau der organischen Substanz. Geänderte Umweltbedingungen wie höhere atmosphärische CO₂-Konzentrationen und höhere Temperaturen können die Bodenmikrobiologie und damit eine ganze Reihe von mikrobiellen Prozessen direkt und indirekt beeinflussen (Kuzyakov *et al.*, 2019). So können Pflanzen auf erhöhte CO₂-Konzentrationen mit Änderungen in den Wurzelexudaten reagieren, die dann die mikrobiellen Gemeinschaften im Boden beeinflussen (Hungate *et al.*, 1997; Phillips *et al.*, 2011). In den meisten Studien werden die Einflussfaktoren CO₂ und Temperatur separat untersucht, während kombinierte Effekte nur selten Gegenstand von Untersuchungen sind (Castro *et al.*, 2010). Aufgrund der bislang vorhandenen Datenlage ist es offensichtlich, dass es schwierig ist, die Auswirkungen der wichtigsten Klimafaktoren auf die Bodenmikrobiologie und die damit verbundenen Prozesse und Nährstoffzyklen vorherzusagen (Janus *et al.*, 2005; Lipson *et al.*, 2005; Lipson *et al.*, 2006; Lesaulnier *et al.*, 2008; Austin *et al.*, 2009; Deltedesco *et al.*, 2019). Das liegt unter anderem an komplexen Interaktionen und störenden Einflussfaktoren.

In der ClimGrass Versuchsanlage in Raumberg-Gumpenstein werden Plots seit 2014 mit CO₂ begast bzw. mit Infrarotstrahlen erwärmt, wobei es unterschiedliche Kombinationen der Behandlungsvarianten mit keiner, mittlerer bzw. starker Erhöhung gegenüber den Umgebungswerten gibt (Piepho *et al.*, 2017). Im Herbst 2016 wurden von 27 Plots aller Behandlungskombinationen Bodenproben aus den oberen 10 cm entnommen. Mithilfe der Hochdurchsatzsequenzierung wurden die Bodengemeinschaften von Bakte-

rien und Pilzen untersucht. Diese Methode ist unabhängig von der Kultivierung und ermöglicht somit die Erfassung des Großteils der mikrobiellen Biodiversität. Zum Vergleich wurden auch die Pflanzenwurzeln in der Bodenprobe über Hochdurchsatzsequenzierung erfasst, da hier Einflüsse auf die Zusammensetzung der Bakterien und Pilze erwartet wurden.

Ergebnisse und Diskussion

Allgemeine Beschreibung der mikrobiellen Gemeinschaften im Boden

Die Pilzgemeinschaften in den Böden der Versuchsfläche werden von Ascomycota dominiert. Basidiomycota sowie Mucoromycota und Mortierellomycota sind nur zu einem

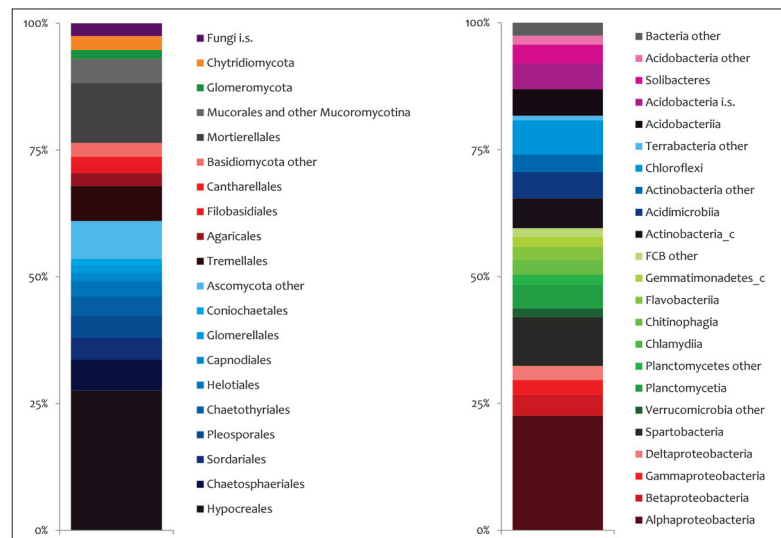


Abbildung 1: Die Zusammensetzung der mikrobiellen Gemeinschaften im Boden auf der ClimGrass-Versuchsfläche im Oktober 2016. Daten von 27 untersuchten Plots mit unterschiedlichen Behandlungsvarianten wurden zusammengefasst. Die Arten wurden auf einer adäquaten taxonomischen Ebene gruppiert. Die Pilze (links) sind auf der Ebene der Ordnung dargestellt. Ascomycota: blau; Basidiomycota: rot; Mortierellomycota and Mucoromycota: grau; Glomeromycota: grün; Chytridiomycota: gold; Fungi i.s.: violett. Bacteria (rechts) wurden bevorzugt auf der Ebene der Klasse zusammengefasst. Proteobacteria: rot; PVC und FCB Gruppe: grün; Terrabacteria: blau; Acidobacteria: violett; andere Bakterien: grau.

¹ Austrian Institute of Technology, Bioresources, Konrad-Lorenz-Straße 24, A-3430 Tulln

² Department für Wald und Bodenwissenschaften, Universität für Bodenkultur, Peter-Jordan-Straße 82, A-1190 Wien

³ Institut für Kulturpflanzenwissenschaften, Bereich Biostatistik, Universität Hohenheim, Fruwirthstraße 23, D-70599 Stuttgart

⁴ Institut für Pflanzenbau und Kulturlandschaft, HBLFA Raumberg-Gumpenstein, Raumberg 38, A-8952 Irnding-Donnersbachtal

* Ansprechpartner: Dr. Markus GORFER, markus.gorfer@ait.ac.at

geringeren Teil zu finden. Glomeromycota, die mit den Wurzeln vieler Pflanzen die sogenannte arbuskuläre Mykorrhiza ausbilden können, kommen nur zu einem sehr geringen Anteil in den Böden vor. Dies entspricht der Zusammensetzung wie man sie in vielen landwirtschaftlich genutzten Böden findet (Domsch and Gams, 1970; Klaubauf *et al.*, 2010; Hartmann *et al.*, 2015; Keiblinger *et al.*, 2018). Die Ergebnisse sind in *Abbildung 1* zusammengefasst. Auffallend war die hohe Abundanz von *Purpureocillium lilacinum*. Hierbei handelt es sich um einen potenziell insektenpathogenen Ascomyzeten, der zwar aus landwirtschaftlichen Böden bekannt ist (Domsch *et al.*, 1993), nicht jedoch in diesen großen Mengen.

Bei den Bakterien dominieren die Phyla Proteobacteria, Acidobacteria, Actinobacteria und Verrucomicrobia (siehe dazu *Abbildung 1*). Auch hier handelt es sich um Gruppen, die generell häufig in landwirtschaftlich genutzten Böden gefunden werden (Bergmann *et al.*, 2011; Hartmann *et al.*, 2015).

Räumliche Effekte auf der Versuchsfläche

Für die Pilzgemeinschaften gibt es auf der Versuchsfläche eine deutliche räumliche Autokorrelation. Benachbarte Plots sind einander ähnlicher als weiter entfernte Plots (siehe *Abbildung 2A*). Besonders ausgeprägt ist der Unterschied zwischen der linken (= westlichen) und der rechten (= östlichen) Hälfte der Versuchsfläche, während der Unterschiede zwischen der vorderen (= nördlichen) und hinteren (= südlichen) Hälfte weniger deutlich ist. So nimmt zum Beispiel der häufigste Pilz auf der Versuchsfläche – *P. lilacinum* – von links nach rechts stark ab, während die Gattung *Fusarium* von links nach rechts ansteigt. Des Weiteren zeigt Plot 23 eine auffällig abweichende Zusammensetzung der Pilzgemeinschaft. Die Art *Mucor hiemalis* ist hier überrepräsentiert, während sie auf anderen Plots gar nicht oder in sehr viel geringerer Menge vorkommt. Die Bodenprobe von Plot 23 war durch Wurzeln von *Rumex acetosa*, dem Wiesen-Sauerampfer, dominiert. Pflanzenwurzeln können über Wurzelexudate und andere Mechanismen stark die Bodenmikrobiologie beeinflussen, und vermutlich wird das Wachstum von *M. hiemalis* stark durch *R. acetosa* gefördert.

Für Bakterien kann die räumliche Autokorrelation ebenfalls, aber in geringerem Maße, beobachtet werden. Es gibt jedoch auch bei Bakterien einen Plot, der sich auffällig von allen anderen Plots unterscheidet: Plot 32 wird von *Providencia sp.* aus der Ordnung Enterobacteriales dominiert. Diese Gruppe kann in allen anderen Plots bestenfalls in sehr geringen Mengen gefunden werden. Unterschiede zwischen links und rechts können auch bei einigen bodenmikrobiologischen Sum-

menparametern beobachtet werden. So sind auf der rechten Hälfte der mikrobielle Kohlenstoff sowie das mikrobielle C/N-Verhältnis signifikant höher als auf der linken Seite (*Abbildung 3*). Bleiben diese Effekte in statistischen Modellen unbeachtet, können sie Einflüsse von CO₂ und Temperatur auf die mikrobiellen Gemeinschaften im Boden verschleiern.

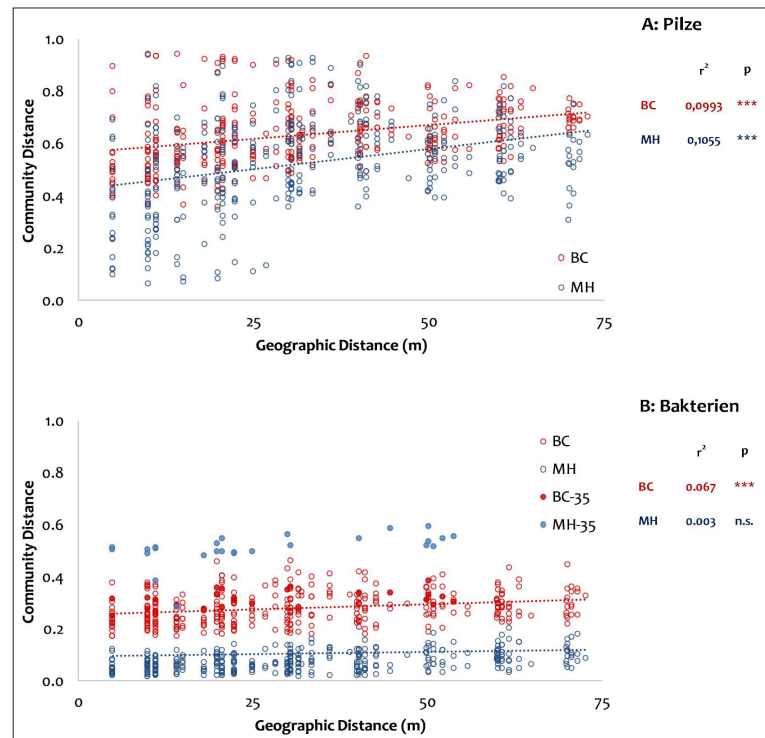


Abbildung 2: β -Diversität der Pilze (A) und Bakterien (B) im Boden der ClimGrass-Versuchsfläche. Zwei unterschiedliche Indices für β -Diversität – Bray-Curtis (BC) und Morisita-Horn (MH) – wurden gegen die geografische Distanz zwischen den Plots aufgetragen. Distanzen zum Plot 35 (BC-35 und MH-35) sind für die bakteriellen Gemeinschaften durch gefüllte Kreise hervorgehoben. Dieser Plot unterscheidet sich von allen anderen Plots durch eine sehr hohe Abundanz von *Providencia sp.*

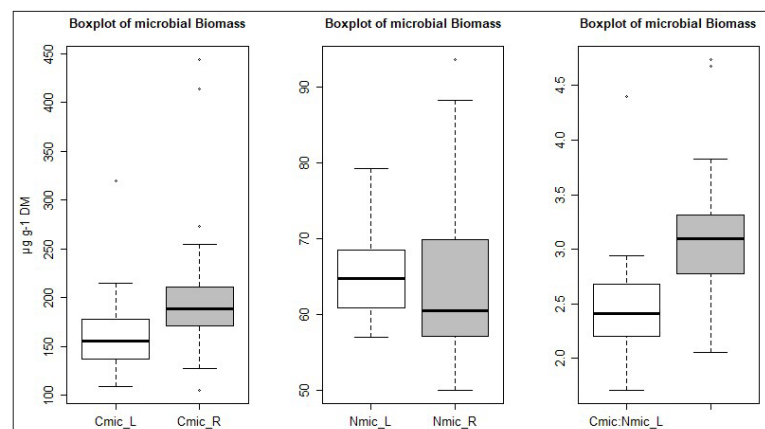


Abbildung 3: Mikrobielle Biomasse in den Böden der ClimGrass-Versuchsfläche. Der mikrobielle Kohlenstoff (C_{mic}), der mikrobielle Stickstoff (N_{mic}) sowie das mikrobielle C/N-Verhältnis ($C_{mic}:N_{mic}$) sind separat für die linke (L) und die rechte (R) Hälfte der Versuchsfläche dargestellt. Für C_{mic} und $C_{mic}:N_{mic}$ sind die Unterschiede statistisch hoch signifikant.

Einfluss von Klimafaktoren auf die Bodenmikrobiologie

Die Gemeinschaften der Bakterien und der Pilze reagieren auf der ClimGrass-Versuchsfläche nicht sehr deutlich auf die Erhöhung von CO₂ und Temperatur. Vorallem bei den häufigen Gruppen konnten keine konsistenten Veränderungen beobachtet werden, da gerade hier die räumlichen Effekte besonders stark ausgeprägt waren. Mithilfe der Response Surface Modellierung und der Mitbeachtung der räumlichen Effekte konnten jedoch Einflüsse auf weniger häufige Gruppen identifiziert werden. Besonders hervorzuheben ist hier die statistisch signifikante Zunahme von koprophilen Weißfäulepilzen in Plots mit erhöhter Temperatur (siehe *Abbildung 4*). Diese Pilze aus der Gruppe der Basidiomyceten besiedeln bevorzugt den Dung von Pflanzenfressern und können überdies Lignin abbauen. Plot 32, wo überdurchschnittlich viele Bakterien der Gattung *Providencia*, einem Darmbakterium, gefunden wurden, ist ebenfalls eine Behandlungsvariante mit erhöhter Temperatur. Es konnte beobachtet werden, dass auf den wärmeren Plots mehr Mauselöcher zu finden sind. Mäuse bevorzugen also offensichtlich die wärmeren Bereiche auf der Versuchsfläche, was möglicherweise das verstärkte Vorkommen von koprophilen Weißfäulepilzen und in speziellen Fällen von Darmbakterien erklären kann. Ähnliche Effekte wurden in landwirtschaftlichen Flächen, die mit Stallmist gedüngt werden, beobachtet (Hartmann *et al.*, 2015).

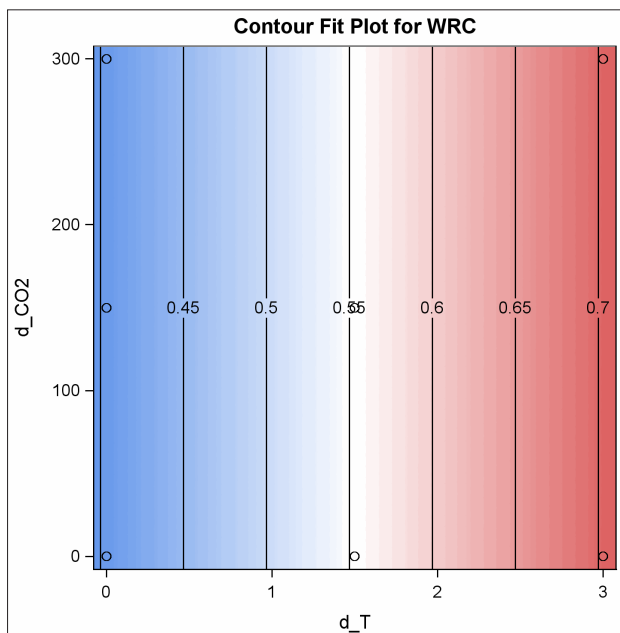


Abbildung 4: Temperaturabhängige Häufigkeitsverteilung von koprophilen Weißfäulepilzen auf der ClimGrass-Versuchsfläche. Auf der x-Achse ist die Temperaturerhöhung zur Umgebungstemperatur in °C, auf der y-Achse die Erhöhung der CO₂-Konzentration im Vergleich zur Umgebungsumgebung in ppm aufgetragen. Die Werte im Diagramm geben die Quadratwurzeln der relativen Häufigkeiten der koprophilen Weißfäulepilze an. Niedrige Werte sind blau markiert, hohe Werte rot.

Conclusio

Nach drei Jahren erhöhten CO₂-Konzentrationen bzw. Temperaturen gibt es kaum deutliche Effekte auf die Gemeinschaften der Pilze und Bakterien in den Böden der ClimGrass-Versuchsanlage. Es wird jedoch erwartet, dass sich die Effekte in Zukunft mit längerer Behandlungsdauer verstärken. Es konnte eine Reihe von Einflussfaktoren identifiziert werden, die es bei der Planung von Versuchen und der Auswertung der Ergebnisse zu beachten gilt. So gibt es auf der Versuchsfläche Unterschiede zwischen der linken und der rechten Hälfte. Überdies ist die Artenzusammensetzung der Pflanzendecke unterschiedlich, was mikrobielle Prozesse im Boden beeinflussen kann. Für viele Untersuchungen ist die benötigte Probenmenge nur sehr klein. Für die DNA-Isolierung wurde nur 1 g Boden verwendet. Die geringe Größe der Plots erlaubt es jedoch nicht, dass für jede Untersuchung mehrfache Proben gezogen werden, um nachher Mischproben herstellen zu können. Es ist also notwendig zusätzliche Einflussfaktoren, wie die Artenzusammensetzung der Wurzeln, mit zu erfassen. Zu guter Letzt kann es Phänomene wie verändertes Verhalten von Tieren geben, die direkt mit den Behandlungsvarianten – z.B. Erwärmung – auf der Versuchsfläche in Verbindung stehen, die aber eher typisch für die kleinflächigen Unterschiede sind. Mäuse mögen wärmere Plots bevorzugen, würden aber bei großflächigen Erwärmungen nicht unbedingt vermehrt vorkommen. Ähnliche Phänomene wurden auch auf anderen Versuchsflächen zu Klimawandelexperimenten beobachtet (Moise and Henry, 2010).

Wenn störende Einflussfaktoren in den statistischen Modellen miteinbezogen werden, wird es in Zukunft möglich sein, direkte und indirekte Klimawandeleffekte auf die mikrobiellen Gemeinschaften im Boden und die damit verbundenen Prozesse feststellen können. Ein Wissen um die Veränderungen kann dabei helfen, negative Auswirkungen des Klimawandels auf die Landwirtschaft zu minimieren.

Literatur

- Austin, E.E.; H.F. Castro, K.E. Sides, C.W. Schadt and A.T. Classen (2009): Assessment of 10 years of CO₂ fumigation on soil microbial communities and function in a sweetgum plantation. *Soil Biol Biochem* 41: 514-520.
- Bergmann, G.T.; S.T. Bates, K.G. Eilers, C.L. Lauber, J.G. Caporaso, W.A. Walters, R. Knight and N. Fierer (2011): The underrecognized dominance of Verrucomicrobia in soil bacterial communities. *Soil Biol Biochem* 43: 1450-1455.
- Castro, H.F.; A.T. Classen, E.E. Austin, R.J. Norby and C.W. Schadt (2010): Soil microbial community responses to multiple experimental climate change drivers. *Appl Environ Microbiol* 76: 999-1007.
- Deltedesco, E.; K.M. Keiblinger, M. Naynar, H.-P. Piepho, M. Gorfer, M. Herndl, M. Bahn, E.M. Pötsch and S. Zechmeister-Boltenstern (2019): Trace gas fluxes from managed grassland soil subject to multifactorial climate change manipulation. *Appl Soil Ecol* 137: 1-11.
- Domsch, K.H. und W. Gams (1970): *Pilze aus Agrarböden*. Stuttgart: Gustav Fischer Verlag.
- Domsch, K.H.; W. Gams and T.-H. Anderson (1993): *Compendium of Soil Fungi*. Eching, Germany: IHW-Verlag.
- Hartmann, M.; B. Frey, J. Mayer, P. Mader and F. Widmer (2015): Distinct soil microbial diversity under long-term organic and conventional farming. *ISME J* 9: 1177-1194.

- Hungate, B.A.; E.A. Holland, R.B. Jackson, F.S. Chapin III, H.A. Mooney and C.B. Field (1997): The fate of carbon in grasslands under carbon dioxide enrichment. *Nature* 388: 576.
- Janus, L.R.; N.L. Angeloni, J. McCormack, S.T. Rier, N.C. Tuchman and J.J. Kelly (2005): Elevated atmospheric CO₂ alters soil microbial communities associated with trembling aspen (*Populus tremuloides*) roots. *Microb Ecol* 50: 102-109.
- Keiblinger, K.M.; M. Schneider, M. Gorfer, M. Paumann, E. Deltedesco, H. Berger, L. Jochlinger, A. Mentler, S. Zechmeister-Boltenstern and G. Soja *et al.* (2018): Assessment of Cu applications in two contrasting soils-effects on soil microbial activity and the fungal community structure. *Ecotoxicology* 27: 217-233.
- Klaubauf, S.; E. Inselsbacher, S. Zechmeister-Boltenstern, W. Wanek, R. Gottsberger, J. Strauss and M. Gorfer (2010): Molecular diversity of fungal communities in agricultural soils from Lower Austria. *Fungal Divers* 44: 65-75.
- Kuzyakov, Y.; W.R. Horwath, M. Dorodnikov and E. Blagodatskaya (2019): Review and synthesis of the effects of elevated atmospheric CO₂ on soil processes: No changes in pools, but increased fluxes and accelerated cycles. *Soil Biol Biochem* 128: 66-78.
- Lesaulnier, C.; D. Papamichail, S. McCorkle, B. Ollivier, S. Skiena, S. Taghavi, D. Zak and D. van der Lelie (2008): Elevated atmospheric CO₂ affects soil microbial diversity associated with trembling aspen. *Environ Microbiol* 10: 926-941.
- Lipson, D.A.; M. Blair, G. Barron-Gafford, K. Grieve and R. Murthy (2006): Relationships between microbial community structure and soil processes under elevated atmospheric carbon dioxide. *Microb Ecol* 51: 302-314.
- Lipson, D.A.; R.F. Wilson and W.C. Oechel (2005): Effects of elevated atmospheric CO₂ on soil microbial biomass, activity, and diversity in a chaparral ecosystem. *Appl Environ Microbiol* 71: 8573-8580.
- Moise, E.R.D. and H.A.L. Henry (2010): Like moths to a street lamp: exaggerated animal densities in plot-level global change field experiments. *Oikos* 119: 791-795.
- Phillips, R.P.; A.C. Finzi and E.S. Bernhardt (2011): Enhanced root exudation induces microbial feedbacks to N cycling in a pine forest under long-term CO₂ fumigation. *Ecol Lett* 14: 187-194.
- Piepho, H.P.; M. Herndl, E.M. Pötsch and M. Bahn (2017): Designing an experiment with quantitative treatment factors to study the effects of climate change. *J Agron Crop Sci* 203: 584-592.
- World-Meteorological-Organization (2017): WMO Greenhouse Gas Bulletin, The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2016.

Spurengas-Emissionen von Grünland- und Waldböden nach Dürre und Wiederbefeuchtung

Eva Ecker^{1*}, Sophie Zechmeister-Boltenstern¹, Eugenio Diaz-Pines¹, Torsten Berger¹, Erich M. Pötsch²

Einleitung

Der Klimawandel beeinflusst nicht nur Jahresdurchschnittswerte, sondern auch Extremwetterereignisse wie Dürren und Starkregeneperioden. Böden können als Quelle und Senke für Spurengase dienen, deshalb ist es unablässig ein tieferes Verständnis der Zusammenhänge zwischen Extremwetterereignissen und der Produktion, bzw. Aufnahme von Spurengasen aus Böden zu gewinnen.

Wie wirken sich veränderte Umweltbedingungen auf verschiedene Landnutzungen (Grünland und Wald) und auf verschiedene Probenmaterialien (Mineralböden und Waldbodenaufgabe) aus?

CO₂

- Konzentration in der Atmosphäre: ~403 ppm;
- Hauptquellen: Landnutzungs-änderungen (LUC), Verbrennung fossiler Rohstoffe, Bodenatmung.

NO und NO_x

- Indirekte Treibhausgase;
- Produziert und aufgenommen durch biotische und abiotische Prozesse.

N₂O

- Ganz und gar nicht lustig....
- 300x effizienter als CO₂;
- Hauptquelle: Landwirtschaft (N-Dünger).

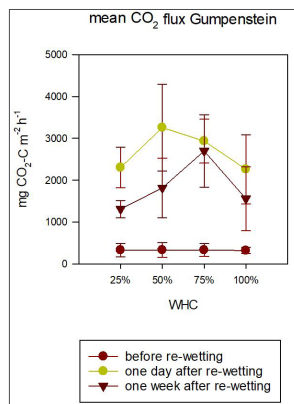


Abbildung 1: Grünland CO₂ Emissionen.

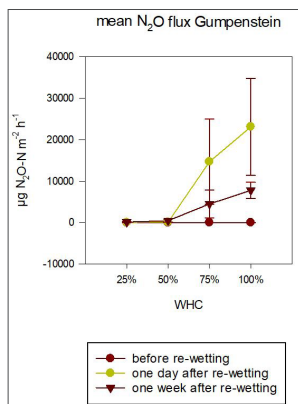


Abbildung 2: Grünland N₂O Emissionen.

CH₄

- 25 – 30x effizienter als CO₂;
- Hauptquellen: LUC, Landwirtschaft (Viehhaltung).

Resultate

Kohlendioxid-Emissionen im Grünland ein Tag vor, ein Tag nach und eine Woche nach der Wiederbefeuchtung (Abbildung 1). Abbildung 2 zeigt die Werte für Lachgas. Abbildung 3: Nitrat-Konzentrationen: ein Tag vor, ein Tag nach und eine Woche nach der Wiederbefeuchtung. Abbildung 4: Muster aller gemessenen Kohlendioxid-Emissionen aus Wald- und Grünland-Mineralböden vor und nach der Wiederbefeuchtung.

Conclusio

- NO and NO_x ▶ bei geringer Bodenfeuchte (BF);
- CO₂ ▶ bei mittlerer BF;
- N₂O ▶ bei hoher BF + regulärer N-Verfügbarkeit;
- CH₄ Aufnahme ▶ in gut belüfteten Waldböden bei mittlerer BF;
- CH₄ Emission ▶ im Grünland wenn Böden stark wassergesättigt.
- Höchste NH₄⁺ Werte ▶ Laubstreu;
- Höchste NO₃⁻ Werte ▶ Grünland.

Material und Methoden

Das Probenmaterial bestand aus intakten Mineralbodenbohrkernen und Laubstreu aus dem BOKU-Lehrforst Rosalia und einem Grünland Standort in Gumpenstein.

Die Proben, zuerst trocken inkubiert und dann einem Befeuchtungsprozess ausgesetzt, wurden bezüglich: CO₂, NO, NO_x, N₂O und CH₄ mehrmals täglich gemessen (dynamische Kammermessung).

Zusätzliche Analysen: mikrobielle Biomasse (C_{mic}, N_{mic}), Ammonium und Nitrat (Abbildung 5).

Gesamt: 325 Proben

Labor-Inkubationsversuche mit vier verschiedenen Befeuchtungsintensitäten für alle Probenmaterialien und Landnutzungen (Abbildung 6)

¹ Department für Wald und Bodenwissenschaften, Universität für Bodenkultur, Peter-Jordan-Straße 82, A-1190 Wien

² Institut für Pflanzenbau und Kulturlandschaft, HBLFA Raumberg-Gumpenstein, Raumberg 38, A-8952 Irnding-Donnersbachtal

* Ansprechpartner: Eva ECKER, eva.ecker@boku.ac.at

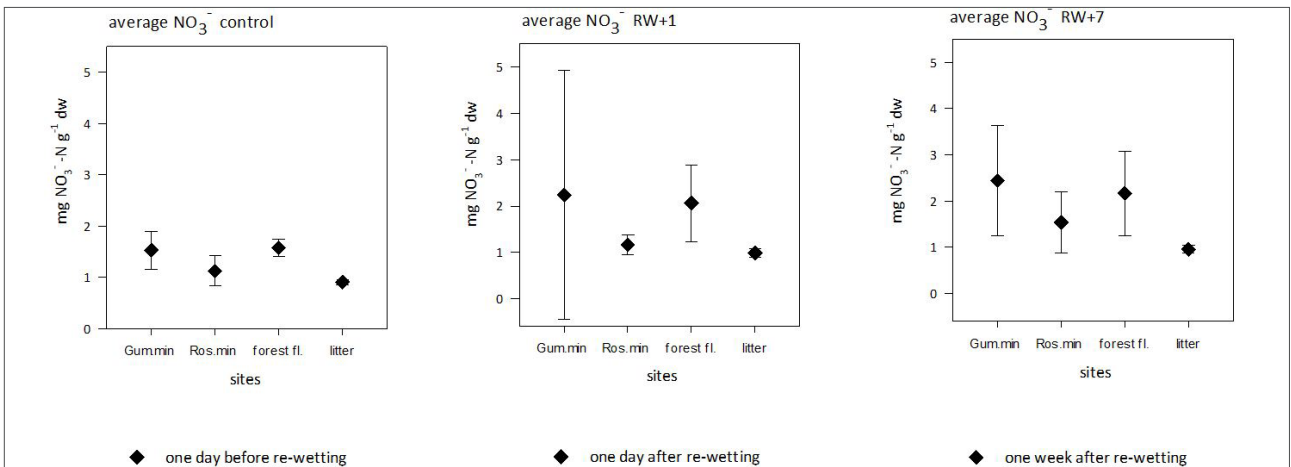


Abbildung 3: Nitrat-Konzentration vor und nach der Befeuchtung.

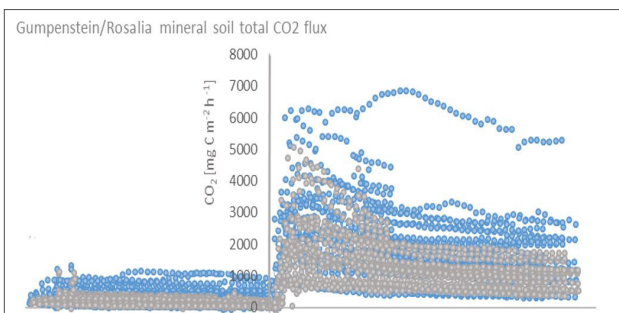


Abbildung 4: CO_2 Spurengasflüsse gesamt.

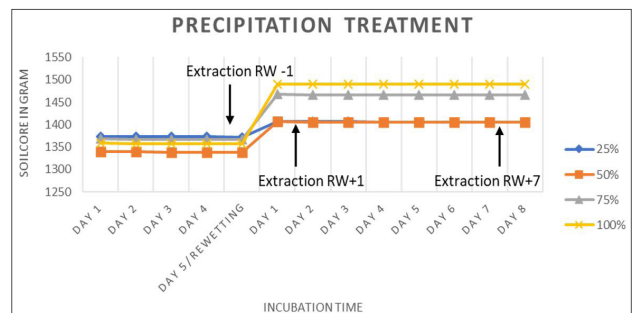


Abbildung 5: Inkubations-/Extraktions Schema.

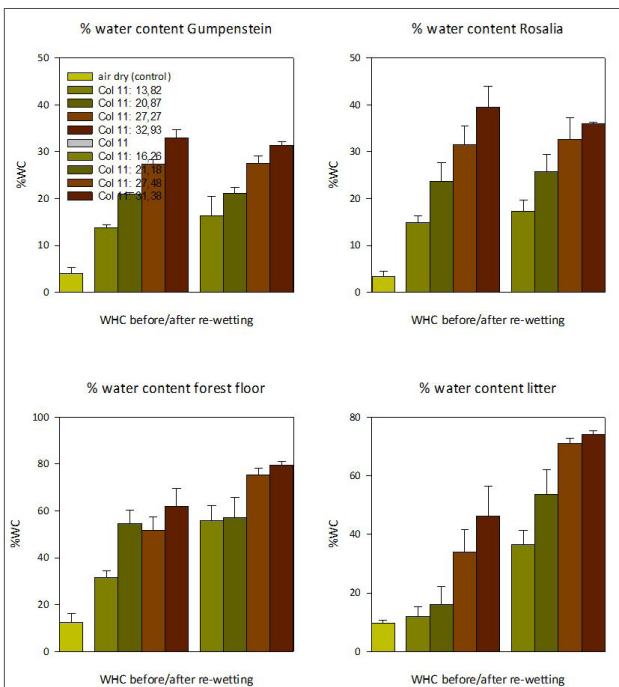
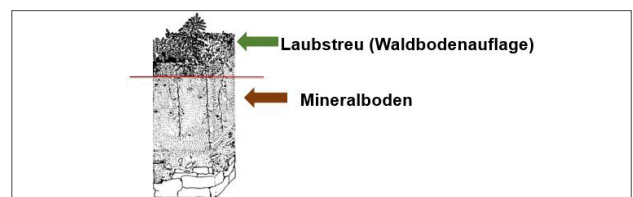


Abbildung 6: Wassergehalt der Proben vor und nach Befeuchtung.



Abbildungen 7: Probenentnahme, Inkubation und Befeuchtung (Bildquellen: Zechmeister-Boltenstern, Diaz-Pines und Ecker, 2018).



Kombinierte Effekte erhöhter CO₂- und Temperaturlevel auf N₂O- und CH₄-Konzentrationen und -flüsse während einer künstlichen Dürreperiode

Alexandre Fahringer^{1*}, Eugenio Diaz-Pines¹, Evi Deltedesco¹, Katharina Keiblinger¹, David Reinthaler², Erich M. Pötsch³, Sophie Zechmeister-Boltenstern¹



Abbildung 1: ClimGrass-Anlage Raumberg-Gumpenstein.



Abbildung 2: Schacht für Tiefenprofilmessungen.



Abbildung 3: Gasmessung unter künstlichen Dürrebedingungen.

Einführung

Grünland spielt eine bedeutende Rolle in der Landwirtschaft und bedeckt ein Fünftel der Landmasse Europas. Grünlandböden sind eine wichtige Quelle für gasförmiges Lachgas (N₂O) und Senke für Methan (CH₄). Der Einfluss kombinierter Faktoren des globalen Klimawandels wie erhöhte CO₂ und Temperaturwerte sowie häufigere Dürreperioden ist noch wenig erforscht.

Ziel dieser Studie war es einen besseren Einblick in die kombinierten Effekte der Faktoren CO₂, Temperatur und Dürre auf das gesamte Profil eines Grünlandbodens zu gewinnen.

Material und Methoden

Ein Los Gatos Research CH₄/N₂O Analyzer wurde verwendet um Lachgas- und Methankonzentrationen in 3, 6, 9, 18 und 36 cm Tiefe zu messen (Abbildung 2). Die untersuchten Plots waren entweder einer Kombination aus erhöhten CO₂ und Temperaturlevels (+300 ppm und +3°C, C2T2) oder Umgebungswerten (C0T0) ausgesetzt. Zwei Plots (C2T2R, C0T0R) waren Teil eines Dürreexperiments (Abbildung 3). Der Einfluss von Schnitt („cut“) und Düngung („fertilization“) der Wiese war ein weiterer Teil des Experiments. Die Gradientenmethode wurde verwendet um aus den vorliegenden Konzentrationen Gasflüsse zwischen den Bodenschichten zu modellieren.

Gradientenmethode

Die Gradientenmethode verwendet eine Kombination aus dem Konzentrationsgradienten eines Gases in verschiedenen Bodentiefen und physischen Bodeneigenschaften

¹ Department für Wald und Bodenwissenschaften, Universität für Bodenkultur, Peter-Jordan-Straße 82, A-1190 Wien

² Institut für Ökologie, Universität Innsbruck, Sternwartestrasse 15, A-6020 Innsbruck

³ Institut für Pflanzenbau und Kulturlandschaft, HBLFA Raumberg-Gumpenstein, Raumberg 38, A-8952 Irdning-Donnersbachtal

* Ansprechpartner: Alexandre FAHRINGER, alexandre.fahringer@gmail.com

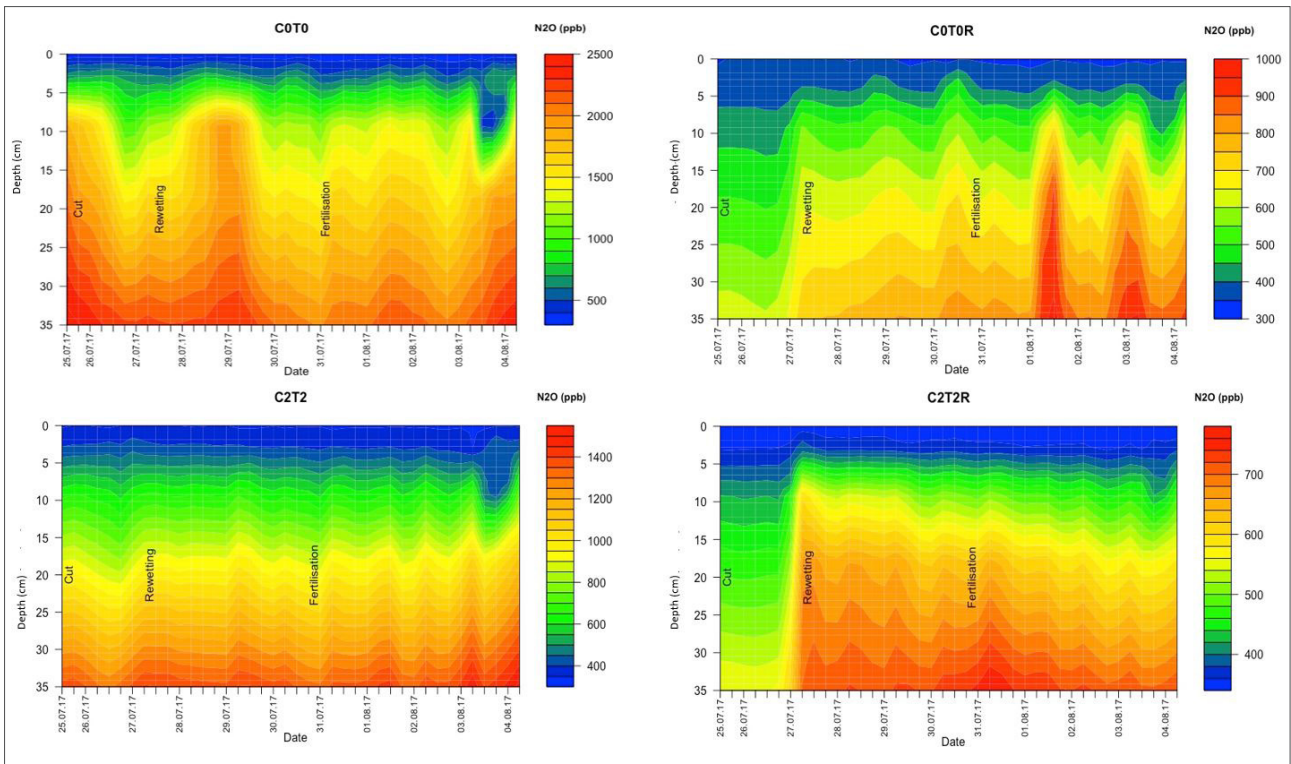


Abbildung 4a: Vergleich von N_2O Konzentrationen (ppb) auf Plots mit (C2T2) oder ohne (C0T0) erhöhten CO_2 und Temperaturwerten oder zusätzlich unter künstlichen Dürrebedingungen (C0T0R, C2T2R) während einer elftägigen Messperiode mit Schnitt („Cut“) Wiederbewässerung („Rewetting“) und Düngung („Fertilisation“).

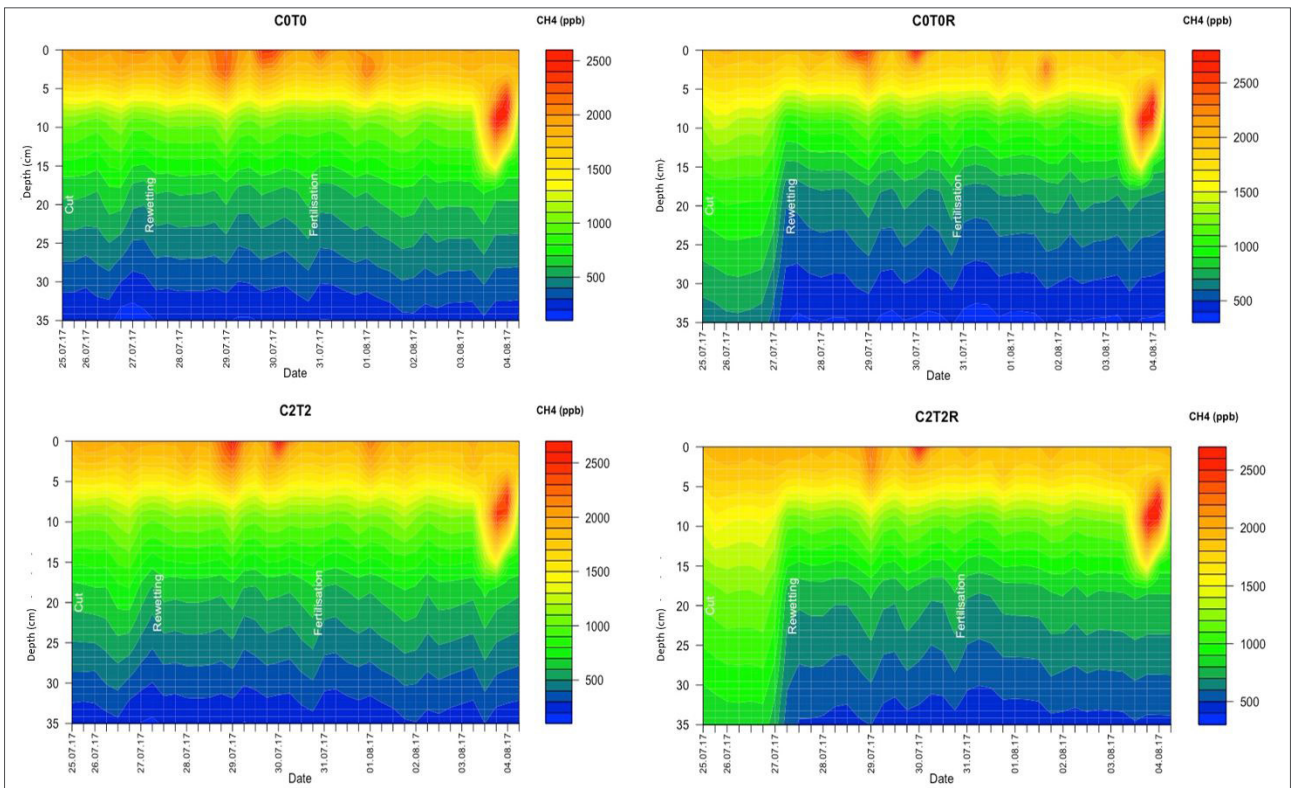


Abbildung 4b: Vergleich von CH_4 Konzentrationen (ppb) auf Plots mit (C2T2) oder ohne (C0T0) erhöhten CO_2 und Temperaturwerten oder zusätzlich unter künstlichen Dürrebedingungen (C0T0R, C2T2R) während einer elftägigen Messperiode mit Schnitt („Cut“) Wiederbewässerung („Rewetting“) und Düngung („Fertilisation“).

(Porosität, Bodenwasser- und Luftgehalt, Tortuosität) um Diffusionsmodelle für Transportprozesse des untersuchten Gases zu errechnen.

Ergebnisse N₂O

- N₂O Konzentrationen steigen mit Bodentiefe;
- Wiederbewässerung führt in tieferen Bodenschichten zu einem Anstieg in N₂O Konzentrationen auf Plots unter Dürrebedingungen;
- keine einheitliche Reaktion nach Düngung.

Gradientenmethode

- Höchste Gasflüsse in obersten Bodenschichten;
- Flussraten steigen nach Wiederbewässerung;
- Düngung hat keinen klaren Einfluss auf N₂O Flussraten.

Ergebnisse CH₄

- CH₄ Konzentrationen nehmen mit Bodentiefe ab;
- Wiederbewässerung führt in tieferen Bodenschichten zu einer Reduktion in CH₄ Konzentrationen auf Plots unter Dürrebedingungen;
- keine Konzentrationsänderungen nach Düngung sichtbar.

Gradientenmethode

- Höchste Gasflüsse in obersten Bodenschichten;
- reduzierte Flussraten nach Wiederbewässerung;
- Düngung hat keinen klaren Einfluss auf CH₄ Flussraten.

Diskussion

Erhöhte N₂O und niedrigere CH₄ Konzentrationen nach Wiederbewässerung in vor allem in tieferen Bodenschichten geben Auskunft über die erschwerten Diffusionsbedingungen unter höherem Bodenwassergehalt. N₂O wird nach heftigen Regenfällen im Boden produziert, kann aber schlecht in die Atmosphäre aufsteigen, CH₄ kann weniger gut von methanotrophen Bakterien im Boden aufgenommen werden.

Fazit

Änderungen im Bodenwassergehalt haben mehr Einfluss auf N₂O Emissions- und CH₄ Aufnahmeraten als Änderungen in CO₂ und Temperaturlevel

Literatur

Maier, M. and H. Schack-Kirchner (2014): „Using the gradient method to determine soil gas flux: A review.“ *Agricultural and forest meteorology* 192: 78-95.

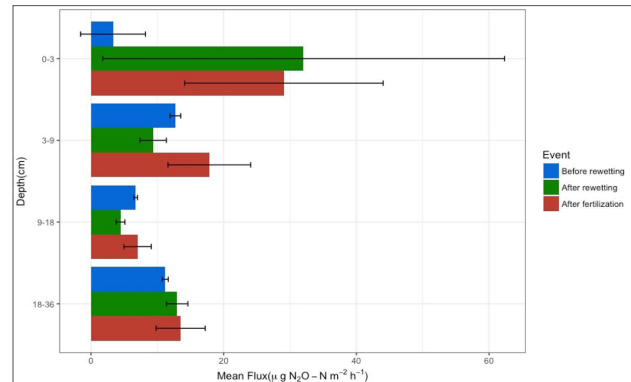


Abbildung 5: Mithilfe der Gradientenmethode modellierte N₂O Flüsse (Plot C0T0R) vor und nach Wiederbewässerung/nach Düngung.

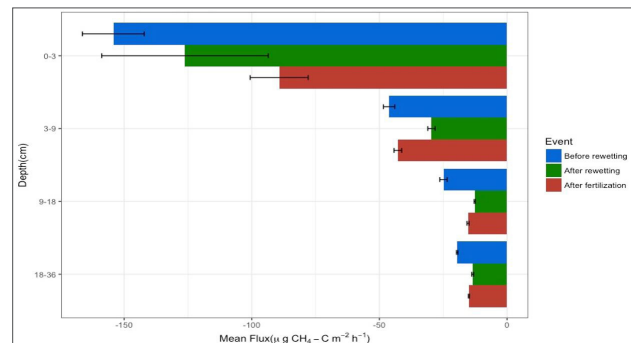


Abbildung 6: Mithilfe der Gradientenmethode modellierte CH₄ Flüsse (Plot C2T2R) vor und nach Wiederbewässerung/nach Düngung.

Veränderungen der Vegetationsdynamik unter zukünftigen Klimabedingungen

Andreas Schaumberger¹*, Erich M. Pötsch¹ und Medardus Schweiger¹

Einleitung

Die Entwicklung von Pflanzen hängt in hohem Maß von der Versorgung mit Energie und Wasser ab. Im Zusammenspiel mit der Bewirtschaftung hat die Witterung somit einen entscheidenden Einfluss auf das Wachstum und den Ertrag landwirtschaftlicher Kulturen. Temperaturen und die zeitliche Verteilung von Niederschlägen bestimmen im Wesentlichen die Entwicklungsgeschwindigkeit, also die Dauer einzelner phänologischen Phasen und in weiterer Folge die Abfolge von Nutzungszeitpunkten. Beim Wirtschaftsgrünland mit mehreren Nutzungen pro Jahr ist die Witterung innerhalb eines Aufwuchses sowohl für die Festlegung des optimalen Schnitzeitpunktes als auch für den Ertrag entscheidend. Die Anzahl der Schnitte ist wiederum vom langfristigen Standortfaktor Klima abhängig, differenziert in Gunstlagen mit ausreichenden Niederschlägen und höheren Temperaturen sowie extensiv bewirtschaftete Regionen, meist in höheren Lagen des Berggebietes.

Die Vegetationsdynamik im Grünland ist ein komplexer Prozess, bei dem Bewirtschaftungs- und Standortfaktoren wie Witterung und klimatische Bedingungen ineingreifen und auf die Zusammensetzung des Pflanzenbestandes einwirken (Pötsch, 2009). Der Pflanzenbestand als Summe verschiedener Gräser, Kräuter und Leguminosen entwickelt sich in Abhängigkeit der Umweltbedingungen zudem nicht einheitlich. Den Entwicklungsstadien und die darauf abgestimmte Wahl der Erntezeitpunkte kommt aber hinsichtlich Qualität und Ertrag im Grünland große Bedeutung zu und klimabedingte Veränderungen erfordern deshalb auch Anpassungen im Grünlandmanagement, um ein entsprechendes Qualitäts- und Ertragsniveau auch weiterhin zu gewährleisten.

Im Versuch ClimGrass (Pötsch *et al.*, 2019) wird die Wirkung veränderter Klimabedingungen auf einen Dauergrünlandbestand wissenschaftlich untersucht und aus unterschiedlichen Perspektiven betrachtet. Den Schwerpunkt bildet dabei der Pflanzenbestand selbst, aber auch Boden, Hydrologie und CO₂-Kreisläufe auf unterschiedlichen Ebenen stehen im Fokus diverser Experimente und tragen ihren Teil dazu bei, das Gesamtsystem Grünland im Kontext der Klimaveränderung besser zu verstehen. In der vorliegenden Arbeit werden ausgewählte Ergebnisse der Vegetationsdynamik vorgestellt, die auf den Auswertungen einer Vielzahl unterschiedlicher Daten beruhen, die während

der letzten Jahre sowohl mit invasiven als auch mit nicht-invasiven Methoden gesammelt wurden.

Material und Methoden

Witterungsbedingungen im Versuchszeitraum

Bei der Betrachtung vegetationsdynamischer Aspekte wird aus den verschiedenen Faktorkombinationen des ClimGrass-Versuches die Variante mit einer Temperaturerhöhung von 3 °C und einer CO₂-Konzentration von +300 ppm (Abkürzung C2T2) ausgewählt und mit der aktuellen Klimasituation (C0T0) verglichen. Die Witterung der einzelnen Versuchsjahre spielt dabei eine bedeutende Rolle, da die Simulationsparameter Temperatur und CO₂-Konzentration zum aktuellen Wetter beaufschlagt werden; die relative Anpassung findet dabei nahezu in Echtzeit statt. So werden beispielsweise Effekte einer Dürreperiode durch die Klimavariante C2T2 noch massiv verstärkt. Ausgewogene und sehr günstige Witterungsverhältnisse wirken sich in der Klimavariante hingegen wieder zum Vorteil des Pflanzenbestandes aus. Für die vorliegende Arbeit werden hauptsächlich die beiden Jahre 2016 und 2017 herangezogen. Das Jahr 2016 war ein außergewöhnlich ertragsreiches Jahr, in dem das Grünland in Gumpenstein optimale Bedingungen vorfand (vgl. *Abbildung 1*). Im Jahr 2017 wurde an ausgewählten Parzellen des ClimGrass-Versuches mit Hilfe von Regendächer eine künstliche Dürreperiode für den Zeitraum des 2. Aufwuchses (Juni – Juli) geschaffen (vgl. *Abbildung 2*). Auswertungen für dieses Jahr beziehen

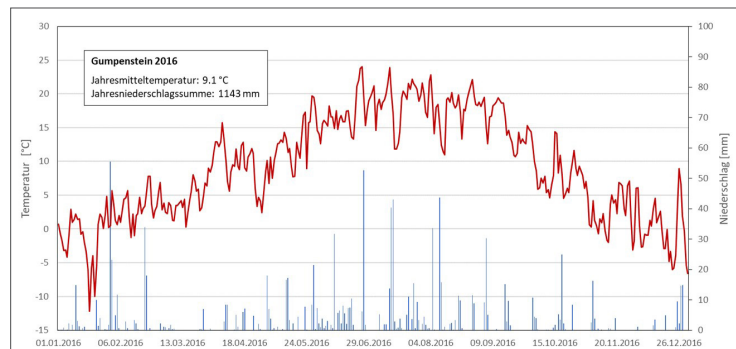


Abbildung 1: Temperaturen und Niederschläge der Wetterstation Gumpenstein im Jahr 2016.

¹ Mitarbeiter des Institutes für Pflanzenbau und Kulturlandschaft, HBLFA Raumberg-Gumpenstein, Raumberg 38, A-8952 Irdning-Donnersbachtal

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

die Ergebnisse aus dem Dürreexperiment mit ein und sollen zeigen, wie sich eine Kombination von kontinuierlicher Klimaveränderung und Extremereignis, in diesem Fall Dürre, auf Grünland auswirken könnte.

Nicht-invasive Beobachtungen

Vegetationsperiode und Temperatursummen

Die klimatologische Vegetationsperiode, nach Chmielewski (2007) auch als thermische Vegetationsperiode bezeichnet, beruht auf Vereinfachungsgründen auf einer Auswertung von Temperaturschwellen, die sich meist auf längere Zeiträume bezieht und klimatische Entwicklungen aufzeigt. Durch unterschiedliche Definitionen und Kombinationen der Schwellenwerte wird versucht, sich den realen Bedingungen und Anforderungen für eine Mehrheit von Pflanzen bestmöglich anzunähern. Wird im Frühjahr eine bestimmte Temperatur anhaltend überschritten, beginnt das Pflanzenwachstum. In der vorliegenden Berechnung wird dies durch eine Überschreitung des Schwellenwertes von 5 °C Tagesmitteltemperatur für die Dauer von mindestens fünf Tagen abgebildet. Das Vegetationsende basiert auf einer Umkehrung des definierten Kriteriums – für fünf aufeinanderfolgende Tage wird die Tagesmitteltemperatur von 5 °C unterschritten. Die Kombination von Temperaturschwelle und einer Periode mit durchgehender Über- oder Unterschreitung dieser Schwelle zur Festsetzung von Beginn und Ende der thermischen Vegetationsperiode stellt in der Literatur einen gewissen Standard dar und wird vielfach verwendet (z. B. in Broad and Hough, 1993, Chmielewski, 2007, Frich *et al.*, 2002, Sparks *et al.*, 2005).

Neben der Berechnung aus Temperaturdaten wird auch eine phänologische Beobachtung des Vegetationsbeginns nach den Kriterien von ZAMG (2000) und Deutscher Wetterdienst (1991) durchgeführt und steht für den Standort Gumpenstein als Zeitreihe ab 1995 zur Verfügung.

Bei den Temperatursummen für die Gegenüberstellung der ClimGrass-Varianten C0T0 mit C2T2 werden nicht Lufttemperaturen wie bei der Berechnung der Vegetationsperiode herangezogen, sondern Oberflächentemperaturen von 15 Referenzparzellen (C0T0) bzw. von 8 mit Infrarotstrahlern beheizten Parzellen (C2T2). Nur diese Oberflächentemperaturen gewährleisten eine Differenzierung und bieten somit eine entsprechende Vergleichsmöglichkeit.

Die Entwicklung der Grünlandvegetation wird von einer Vielzahl an Faktoren beeinflusst, wobei der Temperatur, insbesondere der Temperatursumme, aufgrund ihres starken Zusammenhangs mit der Abfolge phänologischer Phasen eine Schlüsselrolle zukommt (Menzel, 2007). In der vorliegenden Arbeit wird ein Temperatursummenmodell für tägliche Oberflächentemperaturen gerechnet, indem vom 1. März eines jeden Jahres alle Temperaturen mit mindestens 4 °C aufsummiert werden. Die den einzelnen Aufwüchsen zugeordneten Temperatursummen werden vom der Ernte folgenden Tag bis zur drauffolgenden Ernte summiert.

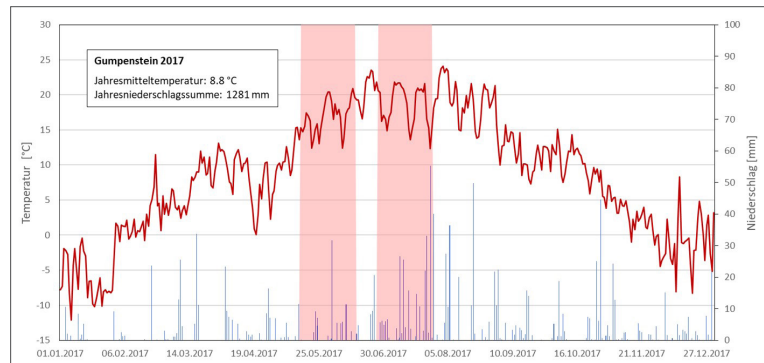


Abbildung 2: Temperaturen und Niederschläge der Wetterstation Gumpenstein im Jahr 2017 mit einer künstlich geschaffenen Dürreperiode durch Abhaltung von Niederschlägen mit Hilfe von Regendächer (rot hinterlegt).

Vegetationsbeobachtungen

Sämtliche Versuchspartellen in ClimGrass werden in einem Abstand von 7 – 10 Tagen nach den phänologischen Makrostadien der Arten Knäulgras (*Dactylis glomerata*) und Goldhafer (*Trisetum flavescens*) gemäß BBCH-System (Meier *et al.*, 2009) bonitiert. Die beiden Gräserarten werden ausschließlich innerhalb des Parzellenernterings auf einer Fläche von 1 m² Fläche beobachtet, wobei der relative Anteil der höchsten Entwicklungsstufe festgehalten wird. Beispiel: Wenn 70 % des Knäulgrases die Entwicklungsstufe 3 erreicht, wird der Wert 3-070 dokumentiert. Für die verbleibenden 30 % wird angenommen, dass sie sich in der nächstniedrigen Entwicklungsstufe befinden. Da es sich bei dem Beispielwert von 3-070 um eine qualitative (Stadium 3) und quantitative (70 %) Mischinformation handelt, wird der Wert 3070 in einen Index umgerechnet, indem der jeweilige Prozentwert mit der dazugehörigen Entwicklungsstufe gewichtet und anschließend zu einem Mittelwert zusammengeführt wird. Der so errechnete Mittelwert wird zum vorhergehenden Ergebnis aufgeschlagen und ist als Dezimalwert Teil einer kontinuierlichen Indexreihe. Die Umformung in eine metrische Skala erlaubt die Bildung von Variantenmittelwerten, welche die Voraussetzung für den Vergleich zwischen den Varianten ist.

Vor jeder Ernte werden für die jeweiligen Flächen der Ernterlinge die Ertragsanteile für die Artengruppen Gräser, Kräuter und Leguminosen nach Klapp (1930) geschätzt. Bei dieser Schätzung handelt es sich um eine Massenprozent-schätzung bezogen auf den TM-Ertrag, deren Gesamtergebnis immer 100 % ergibt; etwaige Lücken und offene Stellen werden gesondert in % der Aufnahme-fläche angegeben (Opitz von Boberfeld, 1994).

Wuchshöhen

Auf ausgewählten Parzellen des ClimGrass-Versuches werden wiederum im Bereich des Ernterings in etwa wöchentlichem Abstand Wuchshöhenmessungen mit Hilfe von Ultraschall-Sensoren vorgenommen (Biewer *et al.*, 2009). Aufgrund der zeitlich dichten Messreihe lässt sich aus dieser Datenreihe der Verlauf der Bestandesentwicklung sehr gut ablesen und zwischen den Varianten vergleichen. Diese Sensoren erlauben eine effiziente Messung mit einer 4- bis 8-fachen Wiederholung, bei der die Daten sofort in ein

Datenbanksystem einfließen können. Die Methode beruht auf einer Distanzmessung zwischen Sensor, der in einer konstanten und dem System bekannten Höhe über einem Bestand positioniert wird, und den höchsten Pflanzenteilen eines Bestandes. Aus der Differenzbildung zwischen bekannter Höhe über Grund und der gemessenen Distanz ergibt sich die Bestandeshöhe (vgl. Fricke *et al.*, 2011), bei der Ausreißerwerte anhand einer statistischen Auswertung der Streuung innerhalb der Messwiederholungen korrigiert werden können. Bei dem eingesetzten System handelt es sich um Sensoren der Firma Pepperl & Fuchs, Modell UC2000-30GM-IUR2-V15, ein handelsübliches Einkopfsystem mit einer Schallfrequenz von 65 – 195 ms und einem Öffnungswinkel von 24°. Mit Hilfe einer eigens programmierten Softwareschnittstelle lassen sich die Sensoren in Serie schalten, sodass bei einem Messdurchgang mehrere Ultraschallköpfe gleichzeitig zum Einsatz kommen.

Die im Verlauf eines Aufwuchses mehrfach durchgeführten Ultraschall-Höhenmessungen werden um Höhenmessungen mit Zollstock und Rising Plate Meter (Sanderson *et al.*, 2001) unmittelbar vor der Ernte ergänzt. Diese Momentaufnahmen der Wuchshöhe zum Erntezeitpunkt dienen in erster Linie der Modellierung und dem systematischen Vergleich unterschiedlicher Messmethoden und werden deshalb in der vorliegenden Arbeit nicht weiter berücksichtigt.

Feldspektroskopie und Blattflächenindex

Gleichzeitig mit den Wuchshöhen werden auf ausgewählten ClimGrass-Parzellen dichte Zeitreihen von Spektralmessungen mit einem Feldspektrometer (HandySpec Field VIS/NIR 1.7 der Firma tec5) vorgenommen. Der Sensor des HandySpec hat einen Öffnungswinkel (Field-of-View) von 25° und wird in einer Höhe von 120 cm über der Mitte des Ernterings positioniert. In vierfacher Wiederholung werden Spektralsignaturen im Wellenlängenbereich von 400 bis 1.700 nm erfasst, nach Bedarf und dem Auftreten eines meist temperaturbedingten Sensor-Shifts (Aasen *et al.*, 2014, Dorigo, 2008, Dorigo *et al.*, 2006, MacArthur *et al.*, 2012, Milton *et al.*, 2009) korrigiert und nach Savitzky und Golay (1964) geglättet (King *et al.*, 1999, Ruffin und King, 1999). Eine detaillierte Darstellung der Messmethode findet sich in Schaumberger *et al.* (2015).

Die im Feld erhobenen Hyperspektralsignaturen werden mit Hilfe von Spectral Response Functions (ESA, 2018) in multispektrale Bänder transformiert, die jenen Kanälen entsprechen, welche auch mit Copernicus Sentinel-2 zur Verfügung stehen. Das Ziel dabei ist, auf Versuchspartellen erhobene Daten künftig mit Hilfe der Satellitenfernerkundung in einen regionalen Kontext zu stellen. Auf diese Weise können mit Versuchsdaten kalibrierte und validierte Modelle auf ganze Regionen übertragen und angewendet werden.

Ein wichtiger Kennwert für zahlreiche biologische und physikalische Prozesse ist der Blattflächenindex, der besonders dafür geeignet ist, die Veränderungen des Pflanzenbestandes zu beschreiben (Atzberger *et al.*, 2015, Darvishzadeh *et al.*, 2011, Wenng, 2017, Zheng and Moskal, 2009). Auf der Grundlage der zu

Sentinel-2-Kanälen transformierten Feldspektrometerdaten wird mit Hilfe eines neuronalen Netzes nach Baret *et al.* (2010) der Blattflächenindex berechnet. Das verwendete Neuronale Netz wurde speziell an Sentinel-2 angepasst und mit Werten aus den physikalischen Strahlungstransfermodellen PROSPECT und SAIL (Jacquemoud *et al.*, 2009, Verhoef, 1984) trainiert. Aus den so generierten Blattflächenindizes werden für die Varianten COT0 und C2T2 Mittelwerte generiert und miteinander verglichen.

Ergebnisse und Diskussion

Veränderungen der Vegetationsperiode

Für die Grünlandwirtschaft im topografisch komplexen Berggebiet Österreichs ist die Dauer der Vegetationsperiode ein maßgeblicher Faktor der Ertragsfähigkeit und macht eine regional angepasste Wirtschaftsweise notwendig. Ein Anstieg der Seehöhe bei abnehmender Temperatur verkürzt nicht nur die gesamte Dauer der vegetativen Phase, es verschlechtern sich auch die Wachstumsbedingungen, sodass die Anzahl an Schnitten zwangsläufig abnehmen muss und schließlich mehr und mehr in eine Weidehaltung übergeht. Die höheren Temperaturen eines zukünftigen Klimas werden zu einer Ausdehnung der Vegetationsperiode in allen Höhenlagen und damit auch zu einer räumlichen Verschiebung von Bewirtschaftungsweisen und -intensitäten führen.

Abbildung 3 zeigt eine Auswertung von langjährigen Temperatur- und Beobachtungsdaten am Standort Gumpenstein. Der Beginn der thermischen Vegetationsperiode weist im Verlauf des über 50-jährigen Beobachtungszeitraums einen negativen Trend auf, d.h. einen stetig früheren Beginn der Vegetation. Insgesamt sind das immerhin mehr als 8 Tage. Seit 1995 steht auch eine durchgehende Reihe der phänologischen Beobachtung „Ergrünen der Wiese“ zur Verfügung und wird in *Abbildung 3* zum Vergleich mit den Berechnungsergebnissen dargestellt. Abgesehen davon, dass die Rechenmethode den Beginn etwas früher als die Beobachtung setzt, ist der langfristige Trend vergleichbar.

Mit der Kombination von Vegetationsbeginn und der rechnerischen Ermittlung des Vegetationsendes über den Beobachtungszeitraum ergibt sich im Vergleich zu den 1960er Jahren

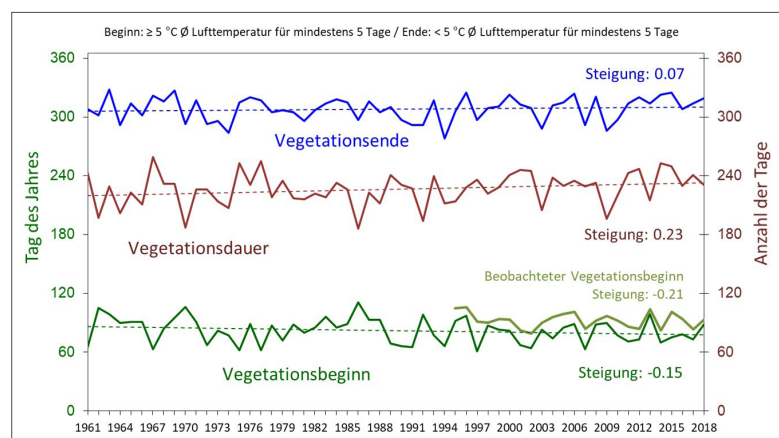


Abbildung 3: Thermische Vegetationsperiode von 1961 bis 2018 am Standort Gumpenstein.

eine Ausdehnung der Vegetationsperiode von 13,1 Tagen. Dies entspricht in etwa der Auswertung, die an ausgewählten österreichischen Stationen für das Projekt „Klimaszenarien für Österreich“ (ÖKS15, 2016) durchgeführt wurde und eine mittlere Zunahme um 13,5 Tage ergab. Sowohl für die Dauer als auch für den Beginn der Vegetationsperiode gibt es große regionale Unterschiede, so kam es beispielsweise in Wien zu einer Verschiebung von 20 Tagen nach vorne und im nördlichen Waldviertel um 5 Tage (ÖKS15, 2016). Das inneralpine Gebiet befindet sich im Mittelfeld und wird, wie die vorgestellten Ergebnisse zeigen, durch die Station in Gumpenstein sehr gut repräsentiert. Zudem handelt es sich um typisches Grünlandgebiet und ist auch für diese im Bergland wichtigste Form der Landwirtschaft repräsentativ.

In naher Zukunft wird sich die Vegetationsperiode im Vergleich zur Referenzperiode 1971 – 2000 nach neuesten Klimaszenarien um durchschnittlich 20 Tage weiter ausdehnen. Betrachtet man die fernere Zukunft (bis 2100) fällt diese Verlängerung noch deutlich dramatischer aus. Werden keine geeigneten Klimaschutzmaßnahmen gesetzt und die Emission von Treibhausgasen nicht gebremst, wird diese Ausdehnung 61,1 Tage (RCP8.5) betragen und der Vegetationsbeginn um durchschnittlich 36,3 Tage früher stattfinden. Greifen allerdings die Bemühungen, künftige Emissionen deutlich einzuschränken (RCP4.5), wird die Vegetationsperiode im österreichischen Durchschnitt immerhin noch um 32,7 Tage länger werden. Auch bei einem optimistischen Ausblick und im besten Fall, wie es die Szenarien des Treibhausgaskonzentrationspfades RCP4.5 zeigen, wird die Auswirkung der Klimaveränderung auf die Vegetationsperiode zu signifikanten Änderungen in der Landwirtschaft führen. Dies betrifft sowohl die Art der Landnutzung als auch die Bewirtschaftungsformen und traditionellen Abläufe.

Mit dem ClimGrass-Versuch und der Möglichkeit, ein um 3 °C wärmeres Klima zu simulieren, können die konkreten Auswirkungen der durch die Vegetationsperiode bedingten Entwicklungsdynamischen Veränderungen am Grünlandbestand untersucht werden. Ausgewählte Ergebnisse dazu werden im folgenden Kapitel vorgestellt.

Entwicklungsdynamiken von Grünlandbeständen

Temperaturen und Aufwuchsperioden

Die unterschiedlichen Varianten des ClimGrass-Versuches weisen eine einheitliche Bewirtschaftung auf, um den Fokus

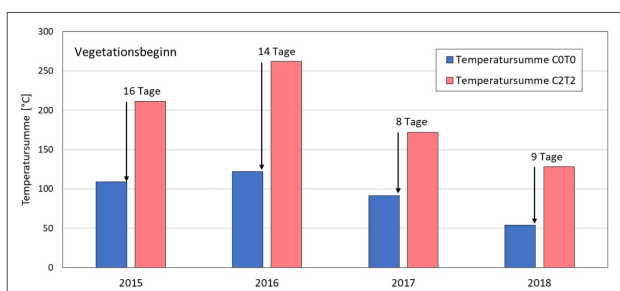


Abbildung 4: Temperatursummen der Varianten C0T0 und C2T2 zum beobachteten Vegetationsbeginn.

vollständig auf den Klimaeffekt zu richten. Neben gleicher Düngung werden unabhängig von Beheizung und Begasung auch alle Parzellen dreimal pro Jahr gleichzeitig geerntet. Dies berücksichtigt zwar nicht die unterschiedlich schnelle Entwicklung von Beständen unbehandelter Parzellen im Vergleich zur Klimavariante, ermöglicht aber die Untersuchung aller Einflüsse während einer gleichgeschalteten Aufwuchsperiode. Entwicklungsdynamiken sind in hohem Maß von Temperatursummen abhängig bzw. bieten sie einen großen Beitrag zur Erklärung phänologischer Phaseintritte (Lauscher, 1960). Um den Klimaeinfluss zu quantifizieren, werden Temperatursummen für beide Varianten (C0T0 und C2T2) zu Vegetationsbeginn und zu den einzelnen Erntezeitpunkten gebildet und miteinander verglichen.

Eine Gegenüberstellung der Temperatursummen zum Zeitpunkt des beobachteten Vegetationsbeginns für die Jahre 2015 bis 2018 in *Abbildung 4* zeigt, dass die für den Start der Vegetation erforderliche Temperatursumme bei der Variante C2T2 im Durchschnitt bereits 11,8 Tage früher erreicht wird. Die Taganzahl in den dargestellten Jahren ist unterschiedlich und hängt vom Temperaturverlauf im jeweiligen Jahr ab, wo sich C0T0 und C2T2 abgesehen von der 3-Grad-Verschiebung kaum unterscheiden. Zusätzlich ist für die Berücksichtigung eines Temperaturwertes für die Summenbildung ein Mindestwert von 4 °C relevant. Ein warmer Frühling mit rasch ansteigenden Temperaturen wie in den Jahren 2015 und 2016 führt bei dieser Auswertung zu einem höheren Tagesabstand, kältere Frühjahre zu kürzeren Abständen.

Die in *Abbildung 4* gezeigten Differenzen können aufgrund des starken Zusammenhangs zwischen Temperatur und dem Eintritt phänologischer Phasen als Richtwert für das Maß eines früheren Vegetationsbeginns herangezogen werden. Weitere phänologische Phasen zu Beginn der vegetativen Entwicklung hängen unmittelbar vom Startzeitpunkt der Vegetation ab. Eine sehr markante und relativ frühe Entwicklungsstufe im Grünland ist die Löwenzahnblüte (*Taraxacum officinale*), die im Rahmen von botanischen Erhebungen jedes Jahr beobachtet wird und zur Evaluierung der zeitlichen Phasenunterschiede zwischen C0T0 und C2T2 herangezogen werden kann. Die mittlere Differenz zwischen den beiden Varianten beträgt 10,8 Tage und entspricht in etwa jenem mittleren Abstand, der sich auch aus dem Temperatursummenvergleich zu Vegetationsbeginn ergibt. Höhere Temperaturen wirken sich auch auf das Erreichen der für den optimalen Schnitzeitpunkt maßgeblichen phänologischen Phase des Ähren- und Rispschiebens aus. In *Abbildung 5* ist ein Vergleich der Temperatursummen für

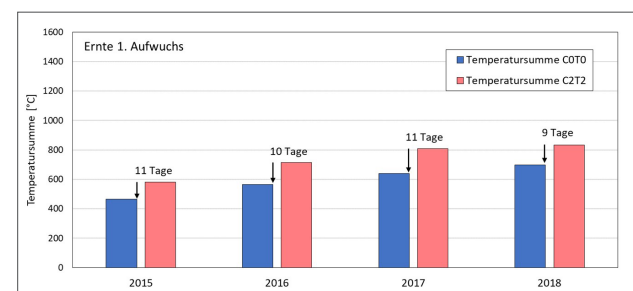


Abbildung 5: Temperatursummen der Varianten C0T0 und C2T2 zum Zeitpunkt des ersten Schnittes.

den ersten Aufwuchs dargestellt, wobei die Summe ab Vegetationsbeginn gebildet wird. Wie bereits bei *Abbildung 4* gezeigt, werden auch hier die Tage entlang des Temperaturverlaufs im jeweiligen Jahr ermittelt. Mit einer mittleren Differenz von 10,3 Tagen ist hier ein sehr deutliches und über die unterschiedlichen Jahre stabiles Signal zu sehen. Es zeigt, dass unter künftigen Klimabedingungen sich nicht nur der Vegetationsbeginn ändert, sondern auch der Erntetermin des für den Jahresertrag maßgeblichen ersten Aufwuchses signifikant früher anzusetzen sein wird.

Für die Folgeaufwüchse ergibt sich ein ähnliches Bild. Der zweite Aufwuchs erreicht in der Variante C2T2 die Temperatursumme von C0T0 8,8 Tage früher, beim dritten Aufwuchs sind es 15,5 Tage. Auch hier wird nach jedem Schnitt mit der Summenbildung bis zum Folgeschnitt neu gestartet. Die zeitlichen Differenzen resultieren daher nicht aus einem kumulativen Effekt vom Beginn der Vegetationsperiode an, sondern sind immer aufwuchsbezogen zu betrachten. Ein früher Vegetationsbeginn und vergleichsweise hohe Temperaturen während der ganzen Saison ermöglicht aufgrund der rascheren phänologischen Entwicklung eine Erhöhung der Schnittfrequenz.

Entwicklungsgeschwindigkeit

Da Temperatursummen lediglich als Prädiktoren für Entwicklungsphasen gelten, sind Beobachtungen der Pflanzenbestände für einen direkten Vergleich unterschiedlicher Entwicklungsstadien unerlässlich. Die Makrostadien gemäß BBCH-Skala nach Meier *et al.* (2009) von Knaulgras (*Dactylis glomerata*) zeigen signifikante Unterschiede zwischen den beiden Varianten C0T0 und C2T2. In *Abbildung 6* ist der Verlauf für die drei Aufwüchse im Jahr 2016 mit den dazugehörigen akkumulierten Temperaturen dargestellt. Bei der Prüfung auf statistische Signifikanz mit der Methode Mixed Model (SAS Proc Mixed) wurden alle Beobachtungsjahre (2015 bis 2018) einbezogen.

Während sich zu Beginn eines jeden Aufwuchses die Varianten kaum unterscheiden, zeigt sich bei Knaulgras gegen Ende der Aufwuchsperiode ein deutlicher Entwicklungsvorsprung in der Klimasimulationsvariante. Im Gegensatz dazu ist bei der zweiten beobachteten Pflanzenart Goldhafer (*Trisetum flavescens*) keine signifikante Unterscheidung zwischen den Behandlungsvarianten möglich (*Abbildung 7*). Dieses Beispiel zeigt, dass bei einem Grünlandmischbestand immer von einer sehr heterogenen Entwicklung aller enthaltenen Arten ausgegangen werden muss und es unmöglich ist, eine bestimmte Entwicklungsphase für den gesamten Pflanzenbestand festzumachen. Manche Arten entwickeln sich stärker im ersten Aufwuchs, andere eher in den Folgeaufwüchsen. Beim Goldhafer in *Abbildung 7* zeigen sich in den Folgeaufwüchsen beispielsweise steilere Kurven als im ersten Aufwuchs oder bei einem Vergleich mit Knaulgras. In der Praxis behilft man sich damit, dass die Phänologie der wichtigsten, bestandesbildenden Gräser beobachtet werden, um Managemententscheidungen zu treffen.

Entwicklung der Artenzusammensetzung

Vor jeder Ernte wird auf allen Parzellen das Artengruppenverhältnis innerhalb des Ernteringes bestimmt. Die Auswertung für die Varianten C0T0 und C2T2 zeigt bei

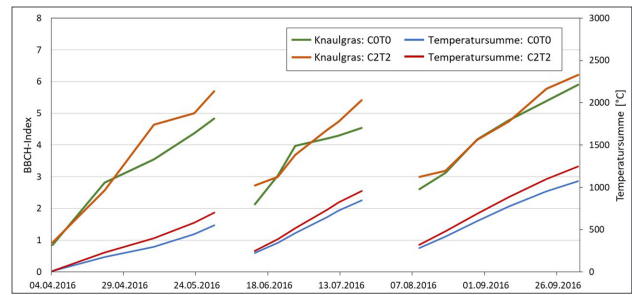


Abbildung 6: Entwicklungstadien von Knaulgras für das Jahr 2016 auf der Grundlage von BBCH-Makrostadien.

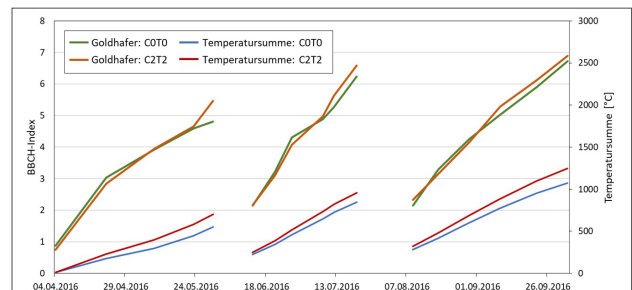


Abbildung 7: Entwicklungstadien von Goldhafer für das Jahr 2016 auf der Grundlage von BBCH-Makrostadien.

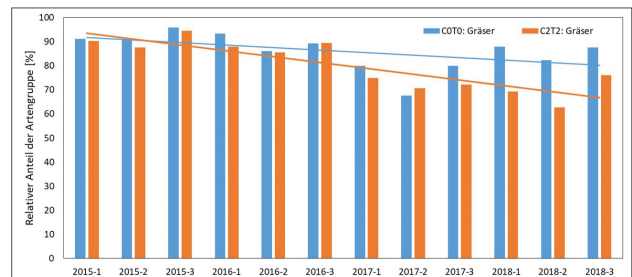


Abbildung 8: Entwicklung der Gräser im Beobachtungszeitraum 2015 bis 2018.

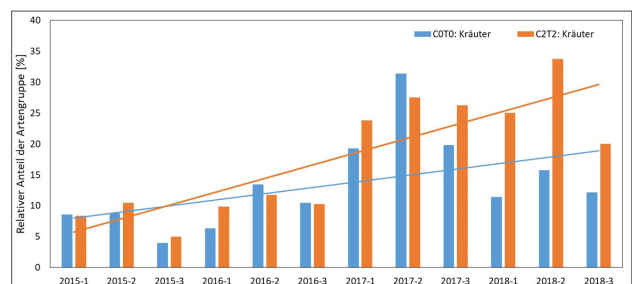


Abbildung 9: Entwicklung der Kräuter im Beobachtungszeitraum 2015 bis 2018.

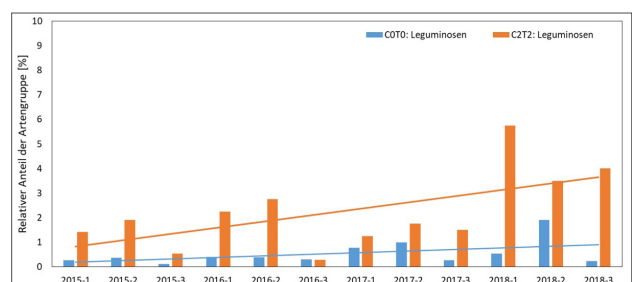


Abbildung 10: Entwicklung der Leguminosen im Beobachtungszeitraum 2015 bis 2018.

jeder Artengruppe einen deutlichen Einfluss der Klimasimulation. Die Gräser, dargestellt in *Abbildung 8*, nehmen zwar im Verlauf der vier Versuchsjahre in beiden Varianten ab, bei C2T2 sind es mit einer Reduktion von -29,1 % aber deutlich mehr als in C0T0 (-12,6 %). In gleichem Ausmaß profitieren Kräuter und Leguminosen. Bei den Kräutern beträgt die Steigerung ihres Anteils auf den Parzellen der Klimasimulationsvariante C2T2 +26,0 %, bei der unbehandelten Variante C0T0 sind es +11,9 % (*Abbildung 9*). Bei den Leguminosen, deren Anteil grundsätzlich niedrig ist, beträgt die Zunahme bei C2T2 +3,1 % und bleibt bei C0T0 mit +0,7 % auf einem niedrigem Niveau (*Abbildung 10*).

Wuchshöhen und Blattflächenindex

Sowohl die Bestandeshöhe als auch der Blattflächenindex werden unter anderem zur Schätzung der Biomasse bzw. des Ertrages herangezogen (Fang *et al.*, 2012, Fricke *et al.*, 2011, Punalekar *et al.*, 2018, Reddersen *et al.*, 2014). Beide Parameter beschreiben somit wichtige und ertragsrelevante Eigenschaften des Grünlandbestandes und zeigen im Vergleich zwischen ambienter und beheizter/begaster Variante, wie stark und auf welche Weise ein sich veränderndes Klima auf diese Bestandeseigenschaften wirkt.

Die Wuchshöhe in den Parzellen der ambienten Variante (C0T0) ist bis auf wenige Ausnahmen deutlich höher als in den Parzellen der Variante C2T2 und hat sowohl im ertragreichen Jahr 2016 (*Abbildung 11*) als auch im eher durchschnittlichen Jahr 2017 (*Abbildung 12*) das etwa gleiche Erscheinungsbild. Der höhere Pflanzenbestand in C0T0-Parzellen ist in der Regel von Beginn des Aufwuchses bis hin zur Ernte mit leicht unterschiedlichen Differenzen gegeben. Offenbar hängt die Ausbildung und Höhe der strukturellen Pflanzenteile von Umwelteinflüssen ab, die unter anderem durch die Klimasimulation verändert werden.

Im Jahr 2017 wurde aufgrund der Durchführung des Dürreexperimentes die Beobachtungsreihe auch auf jene Parzellen ausgedehnt, die unter den Regendächern liegen. Während *Abbildung 12* nur die Mittelwerte der C0T0- und C2T2-Parzellen enthält, die nicht vom Dürreexperiment betroffen waren, wurden für die Auswertung in *Abbildung 13* ausschließlich jene Daten verwendet, die auf den vier C0T0- und den vier C2T2-Parzellen erhoben wurden. Der Vergleich beider Datensätze zeigt, dass die Wuchshöhen beider Varianten während der Dürre im zweiten Aufwuchs (Juni bis Juli) stark abfallen.

Trockenstress vermindert die Ausprägung eines hohen Bestandes deutlich stärker, jedoch mit vergleichbaren Differenzen zwischen den beiden Varianten wie bei den C0T0- und C2T2-Parzellen ohne Stress. Die Daten zeigen, dass eine kontinuierliche Klimaveränderung zwar dazu beiträgt, dass Bestände über alle Aufwüchse hinweg niedriger wachsen, bei einer Kombination von Klimaveränderung und Dürreextrem das Niveau der Wuchshöhe allerdings insgesamt sinkt.

Beim Vergleich des darauffolgenden Aufwuchses fällt auf, dass die Parzellen, die vorher einem Trockenstress ausgesetzt waren, sich in beiden Varianten unterschiedlich verhalten. Während die Trockenstress-Variante C2T2 im dritten Aufwuchs nur geringfügig höhere Wuchshöhen (vgl. *Abbildung 13*) aufweist, als die nicht gestressten Parzellen

(vgl. *Abbildung 12*), ist bei den ambienten Parzellen ein deutlicher Unterschied gegeben. Die Wuchshöhen der im zweiten Aufwuchs gestressten ambienten Parzellen sind im Verlauf des gesamten dritten Aufwuchses deutlich höher. Der kompensatorische Effekt auf die Wuchshöhe wirkt demnach in Abhängigkeit der Intensität einer Dürre, nach einem Stress unter gegenwärtigem Klima (C0T0) erholt sich der Bestand offensichtlich schneller und besser als bei verändertem Klima und damit intensiverer Dürre (C2T2).

Der Blattflächenindex zeigt ein der Wuchshöhe gegenläufiges Ergebnis. Bei fast allen Spektralmessungen ergibt sich für die Variante C2T2 ein höherer Indexwert als für die Variante C0T0. In *Abbildung 14* wird wieder das Jahr 2016 dargestellt, in *Abbildung 15* das Jahr 2017, diesmal allerdings als gemischter Datensatz. Für den ersten Aufwuchs werden alle C0T0- und C2T2-Parzellen in die Mittelwertbildung einbezogen und ab dem zweiten Aufwuchs

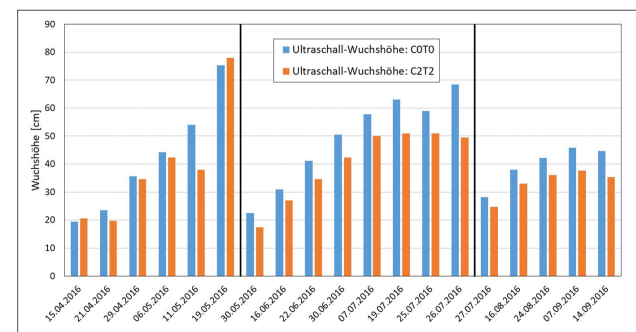


Abbildung 11: Verlauf der Wuchshöhe (Ultraschallmessung) für die drei Aufwüchse im Jahr 2016.

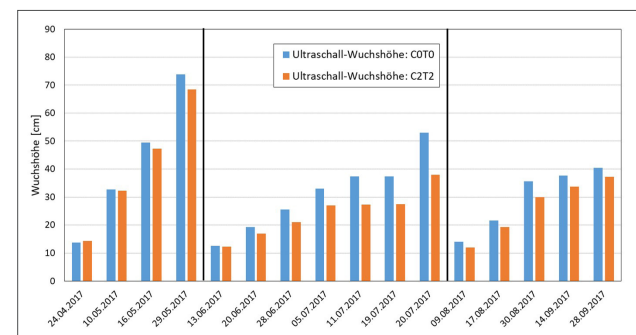


Abbildung 12: Verlauf der Wuchshöhe (Ultraschallmessung) für die drei Aufwüchse im Jahr 2017.

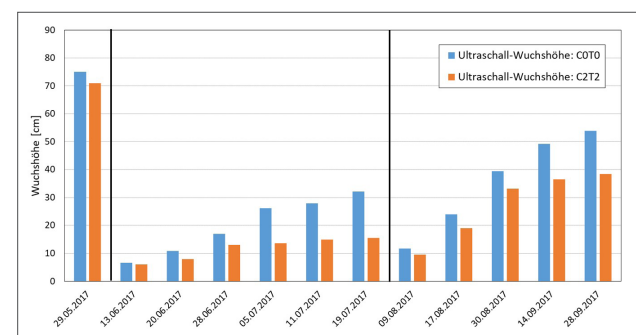


Abbildung 13: Verlauf der Wuchshöhe (Ultraschallmessung) auf den Parzellen des Dürreexperimentes im Jahr 2017.

nur jene C0T0- und C2T2-Parzellen, die sich unter den Regendächern befinden und während des zweiten Aufwuchses einem Trockenstress ausgesetzt wurden. Während der Trockenstressphase zeigt sich im Vergleich zu den beiden anderen Aufwüchsen eine Umkehrung des Verhältnisses von C0T0 zu C2T2, was darauf schließen lässt, dass die Blattfläche besonders stark auf das Extremereignis Dürre reagiert.

Die gemeinsame Betrachtung von Wuchshöhen und Blattflächenindex führt zur Erkenntnis, dass eine Zunahme der Temperatur und CO_2 -Konzentration zu „gedrungeren“ Grünlandbeständen führt, die zwar etwas niedriger, dafür aber blattreicher sind. Dieses Ergebnis bestätigt die visuelle Beobachtung der ClimGrass-Parzellen, bei der genau dieser Unterschied zwischen den Parzellen der einzelnen Varianten festzustellen ist.

Erträge im Kontext der Vegetationsentwicklung

Das Ergebnis jeder Bestandesentwicklung ist der Ertrag, der mit einer destruktiven Probenahme den Entwicklungszyklus abrupt beendet. Der Biomassertrag sowie die Quantifizierung der Inhalts- und Nährstoffe als Qualitätsparameter bildet die Summe aller Effekte ab, die auf den Pflanzenbestand während einer Aufwuchsperiode einwirken.

In Berücksichtigung der Auswertungen zur Wuchshöhe, zum Blattflächenindex und zum Artgruppenverhältnis zeigt sich, dass der Klimaeffekt nicht isoliert an einzelnen Parametern festgemacht werden kann, sondern das Ergebnis von Wechselwirkungen und Abhängigkeiten zwischen den verschiedenen Eigenschaften eines Pflanzenbestandes und deren Einflussfaktoren ist. Es kann allerdings ohne weiter-

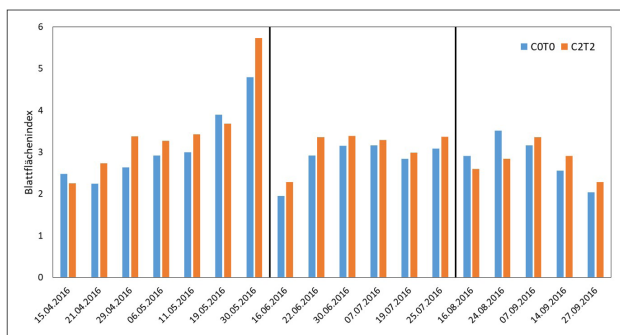


Abbildung 14: Verlauf des Blattflächenindex (Feldspektrometernmessungen) im Jahr 2016.

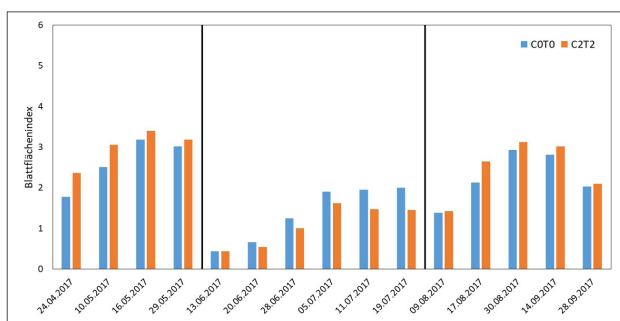


Abbildung 15: Verlauf des Blattflächenindex (Feldspektrometernmessungen) unter Einbeziehung des Dürreexperiments während des 2. Aufwuchses im Jahr 2017.

gehende Analysen, die bei dieser Thematik zweifellos notwendig sind, festgestellt werden, dass die Kombination von kontinuierlicher Klimaveränderung und Extremereignissen eine negative Auswirkung auf die Erträge im Grünland hat.

Schlussfolgerungen

Die Klimaveränderung zeigt sich in erster Linie in der Zunahme der mittleren Temperaturen. Untrennbar damit verbunden ist auch eine Zunahme der CO_2 -Konzentration, die als eine Ursache des Treibhauseffektes und damit der Temperaturerhöhung zu sehen ist. In ClimGrass wird die kombinierte Wirkung beider Parameter auf Dauergrünland untersucht und berücksichtigt damit die in einem zukünftigen Klima zwangsläufig bestehende Wechselwirkung zwischen Temperatur- und CO_2 -Effekt.

Höhere Temperaturen wirken sich unmittelbar auf die Vegetationsperiode aus. Früherer Beginn und späteres Ende verlängern die Saison, in der Anbau, Pflege und Ernte landwirtschaftlicher Kulturen stattfindet. Vergleiche von Temperatursummen zwischen aktuellem (C0T0) und zukünftigem Klima (C2T2) zeigen, dass die vom Temperaturverlauf abhängige phänologische Phase der Schnittrufe bei einem zukünftigen Klima bei jedem Aufwuchs um fast zwei Wochen früher erreicht wird. Für das Wirtschaftsgrünland erfordert dies eine Anpassung und damit die Erhöhung der Schnittanzahl mit einhergehender Intensivierung der Bewirtschaftung. Grundsätzlich führt dies zu höheren Erträgen; das trifft allerdings nur dann zu, wenn eine Region auch ausreichend mit Wasser versorgt ist. In den Klimaszenarien sind Aussagen zur Veränderung zur Veränderung von Niederschlägen mit großen Unsicherheiten behaftet, sodass regionsspezifische Vorhersagen zukünftiger Ertragspotenziale kaum möglich sind. Es gilt allerdings als gesichert, dass die Schwankungsbreiten in einem zukünftigen Klima zunehmen und Extremereignisse wie beispielsweise Trockenheit und Dürre öfter und intensiver auftreten werden. Die Erträge im Grünland werden dadurch jährlichen Schwankungen unterworfen sein, die von überdurchschnittlichen Erträgen bis hin zu kompletten Ertragsausfällen reichen.

Die Zusammensetzung des Pflanzenbestandes bildet die Grundlage des Ertrages und der Futterqualität. Die Klimaveränderung führt zu Veränderungen des Pflanzenbestandes, indem Gräser zurückgehen und deren Lücken hauptsächlich von Kräutern geschlossen werden, aber auch der Anteil an Leguminosen steigt an. Pflanzenbestandsparameter wie Wuchshöhe und Blattfläche verändern sich gegenläufig. Während die Wuchshöhe unter geänderten Klimabedingungen abnimmt, erhöht sich die Blattfläche; Bestände werden tendenziell niedriger, aber blattreicher.

Um auch den Effekt eines Dürreereignisses im Kontext des sich verändernden Klimas untersuchen zu können, besteht im ClimGrass-Versuch die Möglichkeit, neben der Temperaturerhöhung und der erhöhten CO_2 -Konzentration auch das Auftreten von Dürre durch die Abschirmung von Niederschlägen zu simulieren. Im Beobachtungszeitraum 2015 bis 2018 wurde eine solche Dürre für den zweiten Aufwuchs 2017 simuliert. Bestände, welche einem massiven Trockenstress ausgesetzt sind (C2T2 + Dürre), wachsen kaum in die Höhe und entwickeln im Vergleich zur Vari-

ante mit Trockenstress unter aktuellen Klimabedingungen (C0T0 + Dürre) deutlich weniger Blattfläche. Der Ertrag sinkt in der Extremvariante demzufolge sehr stark ab.

Gerade das Dürreexperiment zeigt, dass bei einer Veränderung des Klimas die Extremereignisse besonders drastisch auf Grünland und dessen Vegetations- und Ertragsdynamik einwirken. Das Risiko einer ausreichenden und kontinuierlichen Versorgung des Viehbestandes steigt damit erheblich und verursacht eine große Planungsunsicherheit. Die Entwicklung von Anpassungsstrategien und deren Umsetzung ist somit eine wichtige Voraussetzung für die Erhaltung bestehender Strukturen von Grünland- und Viehwirtschaftsbetrieben.

Literatur

- Aasen, H.; M.L. Gny, Y. Miao and G. Bareth, G. (2014): Automated Hyperspectral Vegetation Index Retrieval from Multiple Correlation Matrices with HyperCor. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 80 (8), 785-795.
- Atzberger, C.; R. Darvishzadeh, M. Immitzer, M. Schlerf, A. Skidmore and G. le Maire (2015): Comparative analysis of different retrieval methods for mapping grassland leaf area index using airborne imaging spectroscopy. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 43, 19-31.
- Baret, F.; M. Weiss, P. Bicheron and B. Berthelot (2010): Sentinel-2 MSI Products WP1152 Algorithm Theoretical Basis Document for Product Group B, INRA-EMMAH, Avignon, France.
- Biewer, S.; T. Fricke and M. Wachendorf (2009): Determination of Dry Matter Yield from Legume-Grass Swards by Field Spectroscopy. *Crop Science* 49 (5), 1927-1936.
- Broad, H.J. and M.N. Hough (1993): The growing and grazing season in the United Kingdom. *Grass and Forage Science* 48 (1), 26-37.
- Chmielewski, F.-M. (2007): Folgen des Klimawandels für Land- und Forstwirtschaft. In Endlicher und Gerstengarbe (Eds.): *Der Klimawandel – Einblicke, Rückblicke und Ausblicke*, Humboldt-Universität zu Berlin, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät II, Geographisches Institut, Berlin, 75-85.
- Darvishzadeh, R.; C. Atzberger, A. Skidmore and M. Schlerf (2011): Mapping grassland leaf area index with airborne hyperspectral imagery: A comparison study of statistical approaches and inversion of radiative transfer models. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 66 (6), 894-906.
- Deutscher Wetterdienst (1991): *Anleitung für die phänologischen Beobachter des Deutschen Wetterdienstes. Vorschriften und Betriebsunterlagen* 17, 3. Auflage, Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main, 155 S.
- 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.
- Dorigo, W.A.; M. Bachmann and W. Heldens (2006): *AS Toolbox & Processing of field spectra, User's manual*, German Aerospace Center (DLR), Oberpfaffenhofen, 31 S.
- ESA (2018): *Sentinel-2 Spectral Response Functions (S2-SRF)*, 5 S., https://earth.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/document-library/-/asset_publisher/Wk0TKajiISaR/content/sentinel-2a-spectral-responses.
- Fang, H.; Z. Xiao, Y. Qu and J. Song (2012): Chapter 11 - Leaf Area Index. In Liang et al. (Eds.): *Advanced Remote Sensing*, Academic Press, Boston, 347-381.
- Frich, P.; L.V. Alexander, P. Della-Marta, B. Gleason, M. Haylock, A.M.G. Klein Tank and T. Peterson (2002): Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. *Climate Research* 19, 193-212.
- Fricke, T.; F. Richter and M. Wachendorf (2011): Assessment of forage mass from grassland swards by height measurement using an ultrasonic sensor. *Computers and Electronics in Agriculture* 79 (2), 142-152.
- Jacquemoud, S.; W. Verhoef, F. Baret, C. Bacour, P.J. Zarco-Tejada, G.P. Asner, C. François and S.L. Ustin (2009): PROSPECT + SAIL models: A review of use for vegetation characterization. *Remote Sensing of Environment* 113, Supplement 1 (0), S56-S66.
- King, R.L.; C. Ruffin, F.E. LaMastus and D.R. Shaw (1999): The analysis of hyperspectral data using Savitzky-Golay filtering-practical issues (Part 2). *Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS '99 Proceedings*, Hamburg, IEEE, 1, June 28 - July 2, 1999, 398-400.
- Klapp, E. (1930): *Zum Ausbau der Graslandbestandsaufnahme zu wissenschaftlichen Zwecken*. *Pflanzenbau* 6, 197-210.
- Lauscher, F. (1960): *Lufttemperatur*. In Steinhauser et al. (Eds.): *Klimatographie von Österreich*, Band 3, 2. Lieferung, Denkschriften der Gesamtakademie, Springer Verlag, Wien, 138-206.
- MacArthur, A.; C.J. MacLellan and T. Malthus (2012): The Fields of View and Directional Response Functions of Two Field Spectroradiometers. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 50 (10), 3892-3907.
- Meier, U.; H. Bleiholder, L. Buhr, C. Feller, H. Hack, M. Heß, P.D. Lancashire, U. Schnock, R. Staub, T. Van den Boom, E. Weber and P. Zwerger (2009): The BBCH system to coding the phenological growth stages of plants – history and publications. *Journal für Kulturpflanzen* 61 (2), 41-52.
- Menzel, A. (2007): *Phänologische Modelle. promet - Meteorologische Fortbildung* 33 (1/2), 20-27.
- Milton, E.J.; M.E. Schaepman, K. Anderson, M. Kneubühler und N. Fox (2009): Progress in field spectroscopy. *Remote Sensing of Environment* 113 (Supplement 1), S92-S109.
- ÖKS15 (2016): *Klimaszenarien für Österreich, Daten - Methoden - Klimaanalyse*. ÖKS15-Arbeitsgruppe, Wien, 358 S.
- Pötsch *et al.* (2019): *Auswirkung zukünftiger Klimabedingungen auf Ertrag und Futterqualität im Grünland*. Tagungsbericht zum 21. Alpenländischen Expertenforum „Klimawandel im Alpenraum – Auswirkungen auf das Ökosystem Grünland und dessen Bewirtschaftung“, HBLFA Raumberg-Gumpenstein, S 49-54.
- Pötsch, E.M. (2009): *Einflussfaktoren auf Ertrag und Qualität von Grünlandfutter*. Fortbildungsveranstaltung „Tierärztliche Bestandsbetreuung von Milchviehbetrieben in Österreich“, Gumpenstein, LFZ Raumberg-Gumpenstein, 4.-6. Juni 2009, 5-13.
- Punalekar, S.M.; A. Verhoef, T.L. Quaife, D. Humphries, L. Bermingham and C.K. Reynolds (2018): Application of Sentinel-2A data for pasture biomass monitoring using a physically based radiative transfer model. *Remote Sensing of Environment* 218, 207-220.
- Reddersen, B.; T. Fricke and M. Wachendorf (2014): A multi-sensor approach for predicting biomass of extensively managed grassland. *Computers and Electronics in Agriculture* 109 (0), 247-260.
- Ruffin, C. and R.L. King (1999): The analysis of hyperspectral data using Savitzky-Golay filtering-theoretical basis (Part 1). *Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS '99 Proceedings*, Hamburg, IEEE, 2, June 28 - July 2, 1999, 756-758.
- Sanderson, M.A.; C.A. Rotz, S.W. Fultz and E.B. Rayburn (2001): Estimating Forage Mass with a Commercial Capacitance Meter, Rising Plate Meter, and Pasture Ruler. *Agronomy Journal* 93 (6), 1281-1286.
- Savitzky, A. und M.J.E. Golay (1964): Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures. *Analytical Chemistry* 36 (8), 1627-1639.
- Schaumberger, A.; Schellberg, J. und Hollberg, J. (2015): *Spektrometrie - moderne, nicht-invasive Erfassungstechnik von Pflanzenbeständen*.

20. Alpenländisches Expertenforum zum Thema „Bedeutung und Funktionen des Pflanzenbestandes im Grünland“, Gumpenstein, HBLFA Raumberg-Gumpenstein, 1.-2. Oktober 2015, 23-32.
- Sparks, T.H.; Croxton, P.; Collinson, J.N. und Grisenthwaite, D.A. (2005): The grass is greener (for longer). *Weather* 60 (5), 121-125.
- Verhoef, W. (1984): Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: The SAIL model. *Remote Sensing of Environment* 16 (2), 125-141.
- Weng, H.T. (2017): Estimation and Validation of the Biophysical Parameter Leaf Area Index for Agricultural Areas from Satellite Sentinel-2A Data. Master Thesis, University of Natural Resources and Life Science, Vienna, Institute of Surveying, Remote Sensing and Land Information, 48 S.
- ZAMG (2000): Anleitung zur phänologischen Beobachtung in Österreich, Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Abteilung für Klimatologie, 31 S., http://zacost.zamg.ac.at/phaeno_portal/fileadmin/bilder/phaeanleitung1.pdf, (20.09.2011).
- Zheng, G. und Moskal, L.M. (2009): Retrieving Leaf Area Index (LAI) Using Remote Sensing: Theories, Methods and Sensors. *Sensors* 9 (4), 2719-2745.

Einfluss des Klimawandels auf das Wurzelwachstum im Grünland

Sarah Helena Geiger^{1*}

Die Forschung an Wurzeln ist aufgrund ihrer zentralen Stellung im Stickstoff- und Kohlenstoffkreislauf, in Prozessen der Bodenbildung, in Wasser- und Nährstoffaufnahme und in der Wechselwirkung zu Mikroorganismen von großer Bedeutung. Das Wissen, wie sich Wurzeln und ihre funktionellen Merkmale mit dem globalen Wandel verändern werden, ist essentiell, um Voraussagen über Ökosystemdienstleistungen zu treffen.

Globaler Wandel

Die CO₂ Konzentration in der Atmosphäre ist seit dem Beginn des industriellen Zeitalters, um 40 % angestiegen. Je nach Treibhausgasausstoß reichen die Prognosen von einem Anstieg von +1.5 °C bis zu +3 °C bis zum Jahr 2050 (IPCC, 2014; World-Meteorological-Organization, 2017). Die Alpenregion soll besonders stark von diesen klimatischen Veränderungen betroffen sein, ein Anstieg an Wetterextremen wird erwartet (Auer *et al.*, 2007). Es wird mit mehr Niederschlag im Winter (in Form von Regen) und einer Zunahme von Hitzewellen und Dürreperioden im Sommer gerechnet. Dieser Wandel wird unweigerlich starke Auswirkungen auf die Landwirtschaft haben. Um Prognosen für die Zukunft zu erstellen, sind Experimente nötig, die diesen Klimawandel simulieren.

Funktionelle Merkmale

Die Forschung hat mehr und mehr den Fokus von der Betrachtung unterschiedlicher Arten, auf Unterschiede in funktionellen Merkmalen gelegt, da durch diese Ökosystemprozesse und -dienstleistungen besser erklärt werden können (Bardgett *et al.*, 2014). Unter funktionellen Merkmalen von Pflanzen versteht man morphologische, physiologische und phänologische Eigenschaften wie zum Beispiel Wachstumsrate, Fotosyntheserate und Nährstoffkonzentration.

Funktionelle Wurzelmerkmale

Architektur: Verwurzelungstiefe, Wurzeldichte.

Morphologie: Durchmesser, spezifische Wurzellänge.

Physiologie: Wurzelatmung, Nährstoffaufnahme, Nährstoffgehalt, Ausscheidung von Wurzelexsudaten.

Biotische Merkmale: Austausch mit Mykorrhiza und anderen Mikroorganismen.

Man kann Wurzelmerkmale mit langsam wachsenden (konservativen) oder schnell wachsenden Arten assoziieren. Schnell wachsende Arten zeichnen sich durch hohe spezifische Wurzellänge, geringe Gewebedichte, hohe Rate in der

Stickstoffaufnahme und generell hohen Stickstoffgehalt, hohe Wurzelatmung und eine kurze Lebensdauer aus und umgekehrt (Bardgett *et al.*, 2014; Pérez-Harguindeguy, 2013).

Wurzelmerkmale und Ökosystemprozesse

Kohlenstoffkreislauf: Veränderungen in der Architektur oder der Lebensdauer der Wurzeln haben starke Auswirkung auf den Anteil von Kohlenstoff im Boden. Wie viel CO₂ vom Boden wiederum in die Atmosphäre gelangt, wird zu einem großen Teil von der Wurzelatmung und der Exsudation gesteuert (Bardgett *et al.*, 2014; De Deyn *et al.*, 2008).

Nährstoffkreislauf: Pflanzen nehmen über Exsudate Einfluss auf die Nährstoffzusammensetzung im Boden. Beispielsweise werden organische Säuren abgesondert, oder es werden mikrobielle Prozesse angekurbelt, um an mehr Nährstoffe zu gelangen (Bardgett *et al.*, 2014; Bengtson *et al.*, 2012; Dijkstra *et al.*, 2013).

Bodenbildung: Morphologische Wurzelmerkmale wie Wurzeldichte und Durchmesser haben großen Einfluss auf die Stabilität von Böden, wobei dichtere, feinere Wurzelsysteme den Boden besser binden können. Grobe Wurzeln führen zu einer höheren Lagerungsdichte, feine Wurzeln zu mehr Porosität. Eine Zunahme in Exsudaten trägt, durch ihren bindenden Effekt, ebenfalls zu einer besseren Stabilität bei (Bardgett *et al.*, 2014; Whalley *et al.*, 2005; Czarnes *et al.*, 2000).

Wurzelmerkmale und Globaler Wandel

Globaler Wandel wird Veränderungen in der Artenzusammensetzung und in Wurzelmerkmalen hervorrufen und somit auch in Ökosystemprozessen und allen Ebenen. Bisherige Forschungen zeigen, dass Wurzelmerkmale besonders schnell auf Veränderungen reagieren.

Erhöhtes atmosphärisches CO₂ führt meist zu einem Anstieg in Wurzellänge, Durchmesser und Biomasse. Damit verbunden konnte eine Zunahme in der Wurzelatmung, Exsudationsrate und Kolonisation von Mykorrhiza verzeichnet werden (Comas *et al.*, 2013; Nie *et al.*, 2013; Bardgett *et al.*, 2014).

Ein Anstieg der Temperatur wurde ebenfalls mit einer Zunahme von Biomasse in Verbindung gebracht, besonders in kälteren Regionen. Ebenfalls ist eine Ausweitung des Vorkommens bestimmter Arten zu sehen, was eine Veränderung in der Artzusammensetzung und eine Verdrängung mancher Arten zur Folge hat (Bardgett *et al.*, 2014; Weltzin *et al.*, 2003).

Höhere Temperaturen und Dürreperioden haben eine Zunahme von tiefer wurzelnden Pflanzen zur Folge, um an

¹ Universität Innsbruck, Innrain 52, A-6020 Innsbruck

* Ansprechpartner: Sarah Helena GEIGER, BA BA BSc, Sarah.H.Geiger@student.uibk.ac.at

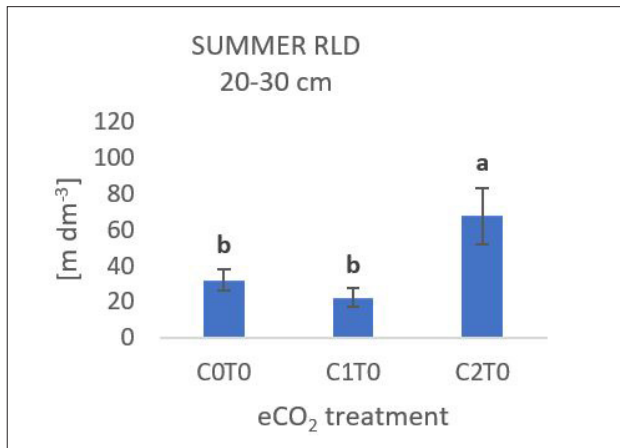


Abbildung 1: C2T0 (+300 ppm CO₂) Behandlung zeigt einen signifikanten Anstieg der Wurzelichte in 20 – 30 cm Tiefe im Sommer (Wachstumsperiode vom 8./9. Juni bis 25./26. Juli).

Wasser aus tieferen Bodenschichten zu gelangen (Weltzin *et al.*, 2003). Außerdem tötet Dürre Mikroorganismen und Bodentiere, was zu einem Anstieg in der Verfügbarkeit von Kohlenstoff und der Mineralisation von Stickstoff führt, sobald wieder Wasser zur Verfügung steht. Während der Dürre wird die Umgebung für Mikroorganismen und Pflanzen jedoch stark verändert, viele Nährstoffe werden immobilisiert und Mikroorganismen können mit ihrer Umgebung nicht mehr in Kontakt stehen (De Vries *et al.*, 2016).

Pflanzen haben Strategien entwickelt, um Dürreperioden überstehen zu können, welche sich auf eine Kombination von verschiedenen funktionellen Merkmalen stützen. Eine hohe Effizienz in der Wassernutzung, niedrige stomatäre Leitfähigkeit oder eine hohe Wurzel zu Spross Rate sind Strategien für eine Vermeidung von Dürre. Pflanzen mit Dürretoleranz bilden beispielsweise niedermolekulare Stoffe, welche sie von den Auswirkungen der Trockenheit schützen. Bei langsam wachsenden Pflanzen nimmt die Nachfrage von Kohlenstoff zugunsten der Verteidigung gegen Dürre ab, schnell wachsende Pflanzen investieren mehr Kohlenstoff in die Wurzeln, um tiefere Bodenschichten zu erreichen (De Vries *et al.*, 2016; Brunner *et al.*, 2015; Perez-Ramos *et al.*, 2013).

Multifaktorielle Experimente – „ClimGrass“

Durch multifaktorielle Experimente soll versucht werden, den Einfluss von verschiedenen Klimafaktoren auf ein Ökosystem zu prognostizieren. Durch erhöhtes atmosphärisches CO₂, erhöhte Temperatur und die Simulation einer Dürreperiode, wird das Zusammenspiel dieser Klimafaktoren auf ein Grasland getestet. Dabei soll herausgefunden werden, welche kombinierten Effekte sich durch einen Anstieg in CO₂ und Temperatur ergeben und wie sich diese Faktoren auf die Pflanzen unter zusätzlichem Dürrestress auswirken.

Bisherige Ergebnisse und Diskussion der Auswirkungen des Klimawandels auf Wurzelmerkmale

Stark erhöhtes CO₂ führte während der Wachstumsperiode von Anfang Juni bis Ende Juli zu einem signifikanten An-

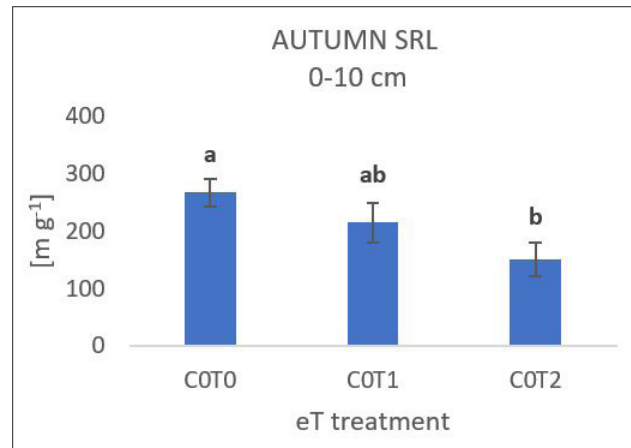


Abbildung 2: C0T2 (+3 °C) Behandlung zeigt eine signifikante Abnahme der spezifischen Wurzellänge in 0 – 10 cm Tiefe im Herbst (Wachstumsperiode vom 25./26. Juli bis 2./3. Oktober).

stieg in der Wurzelichte (RLD) in 20 – 30 cm Tiefe. Zahlreiche Studien verzeichneten einen positiven Zusammenhang zwischen erhöhtem CO₂ und der Zunahme von Wurzellänge bzw. Wurzelichte (Norby *et al.*, 2004; Luo *et al.*, 2006; Nie *et al.*, 2013; Bardgett *et al.*, 2013). Dieses Ergebnis lässt darauf schließen, dass erhöhtes CO₂ besonders in tieferen Bodenschichten zu einer Zunahme der Kohlenstoffeinlagerung im Boden führt, indem die morphologische Entwicklung der Wurzeln angekurbelt wird.

Stark erhöhte Temperatur führte während der Wachstumsperiode von Ende Juli bis Anfang Oktober zu einem signifikanten Rückgang der spezifischen Wurzellänge (SRL). Das heißt, in stark beheizten Plots wurde mehr Masse pro Länge Wurzeln investiert. Höhere Temperaturen können mit einer Erhöhung der Produktion in Verbindung gebracht werden, was einen Rückgang in der spezifischen Wurzellänge zur Folge hat (Hoepfner and Dukes, 2012).

Das Dürreexperiment hatte die stärksten Auswirkungen auf alle gemessenen Wurzelmerkmale. Die Wurzelichte (RLD) nahm in den Dürreplots bereits im Frühling, aber noch intensiver im Sommer, signifikant ab. Im Herbst konnten sich die Wurzeln wieder erholen, besonders in tieferen Bodenschichten holten die Plots mit Klimawandel-Behandlung verstärkt auf und bildeten höhere Wurzelichten. Der Rückgang im Frühling kann auf eine Zeitspanne der Präkonditionierung der Dürreplots zurückgeführt werden, in welcher bereits Regen ausgeschlossen wurde. Die Hochphase der Dürre fand von Ende Juni bis Ende Juli statt und führte durch Trockenstress zu einer verminderten Wurzelichte. Der Anstieg des Wachstums im Herbst kann auf die vermehrte Verfügbarkeit von Nährstoffen, welche nach einer Dürre auftreten kann, zurückgeführt werden (De Vries and Bardgett, 2016). Nährstoffe werden während der Trockenheit immobilisiert und viele Organismen sterben ab, was zu einem Anstieg in der Verfügbarkeit von Nährstoffen führen kann, nachdem wieder Wasser zur Verfügung steht (De Vries *et al.*, 2016; Freschet *et al.*, 2013).

Im Frühling war die spezifische Wurzellänge (SRL) in der obersten Bodenschicht signifikant kleiner in den Dürreplots als in der Kontrolle, im Sommer zeigten nur die Kontrollplots der Dürre eine signifikant kleinere spezifische

Wurzellänge, die Klimawandel-Behandlung in den Dürreplots zeigte vergleichbare Werte, als jene Plots ohne Dürre-Behandlung. Im Herbst zeigte sich, vor allem in tieferen Bodenschichten, eine Erhöhung der spezifischen Länge in den Dürreplots. Besonders in 20–30 cm hatte die Klimawandel-Behandlung eine positive Auswirkung auf die spezifische Wurzellänge, wobei jedoch keine signifikanten Unterschiede gefunden wurden. Eine Anpassung an die Dürre durch eine Erhöhung der spezifischen Wurzellänge in den Plots mit Klimawandel-Behandlung konnte schon mehrfach beobachtet werden (De Vries *et al.*, 2016; Freschet *et al.*, 2013). Dies deutet auf eine erhöhte Resilienz bezüglich Trockenstress von Grasland in zukünftigen Klimaszenarien hin.

Literatur

- Auer, I.; R. Böhm, A. Jurkovic, W. Lipa, A. Orlik, R. Potzmann, W. Schöner, M. Ungersböck, C. Matulla, K. Briffa, P. Jones, D. Efthymiadis, M. Brunetti, T. Nanni, M. Maugeri, L. Mercalli, O. Mestre, J.M. Moisselin, M. Begert, G. Müller-Westermeier, V. Kveton, O. Bochnicek, P. Stastny, M. Lapin, S. Szalai, T. Szentimrey, T. Cegnar, M. Dolinar, M. Gajic-Capka, K. Zaninovic, Z. Majstorovic and E. Nieplova (2007): HISTALP – historical instrumental climatological surface time series of the Greater Alpine Region. *International Journal of Climatology* 27, 17-46.
- Bardgett, R.D.; P. Manning, E. Morrien and F.T. De Vries *et al.* (2013): Hierarchical responses of plant–soil interactions to climate change: consequences for the global carbon cycle. *Journal of Ecology* 101: 334-343.
- Bardgett, R.D.; L. Mommer and F.T. De Vries (2014): Going underground: root traits as drivers of ecosystem processes. *Cell Press. Trends in Ecology* Vol. 29, No. 12.
- Bengston, P. *et al.* (2012): Evidence of a strong coupling between root exudation, C and N availability, and stimulated SOM decomposition caused by rhizosphere priming effects. *Ecology and Evolution* 2, 1843–1852.
- Brunner, I.; C. Herzog, M. Dawes, M. Arend and C. Sperisen (2015): How tree roots respond to drought. *Frontiers of Plant Science* 6.
- Comas, L.H.; S.R. Becker, V.M.V. Cruz, P.F. Byrne and D.A. Dierig (2013): Root traits contributing to plant productivity under drought. *Frontiers in Plant Science*. Vol. 4: 442.
- Czarnes, S. *et al.* (2000): Root- and microbial-derived mucilages affect soil structure and water transport. *European Journal of Soil Science* 51, 435-443.
- De Deyn, G.; J.H.C. Cornelissen and R.D. Bardgett (2008): Plant functional traits and soil carbon sequestration in contrasting biomes. *Ecology Letters* 11: 516-531.
- De Vries, F.T.; C. Brown and C.J. Stevens (2016): Grassland species root response to drought: consequences for soil carbon and nitrogen availability. *Plant Soil* 409: 297-312.
- Dijkstra, F.A. *et al.* (2013): Rhizosphere priming: a nutrient perspective. *Frontiers in Microbiology* 4. Published online July 29, 2013. (<http://dx.doi.org/10.3389/fmicb.2013.00216>).
- Freschet, G.T.; W.K. Cornwell, D.A. Wardle, T.G. Elumeeva, W.D. Liu, B.G. Jackson, V.G. Onipchenko, N.A. Soudzilovskaia, J.P. Tao and J.H.C. Cornelissen (2013): Linking litter decomposition of above- and

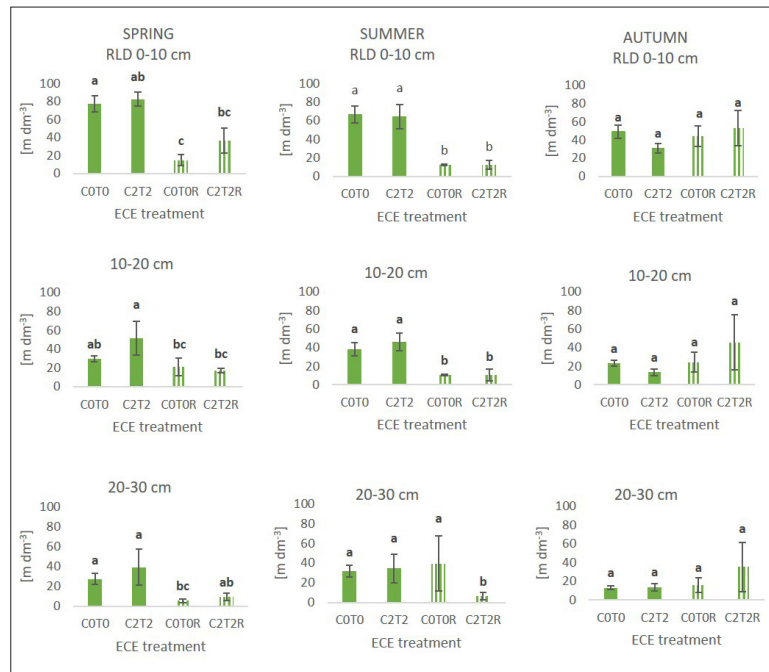


Abbildung 3: Wurzelichte der Kontrolle (C0T0), Extrem-Behandlung (C2T2), Kontrolle der Dürre (C0T0R) und Extrem-Behandlung kombiniert mit Dürre (C2T2R) über alle drei Erntezeitpunkte und Tiefenstufen.

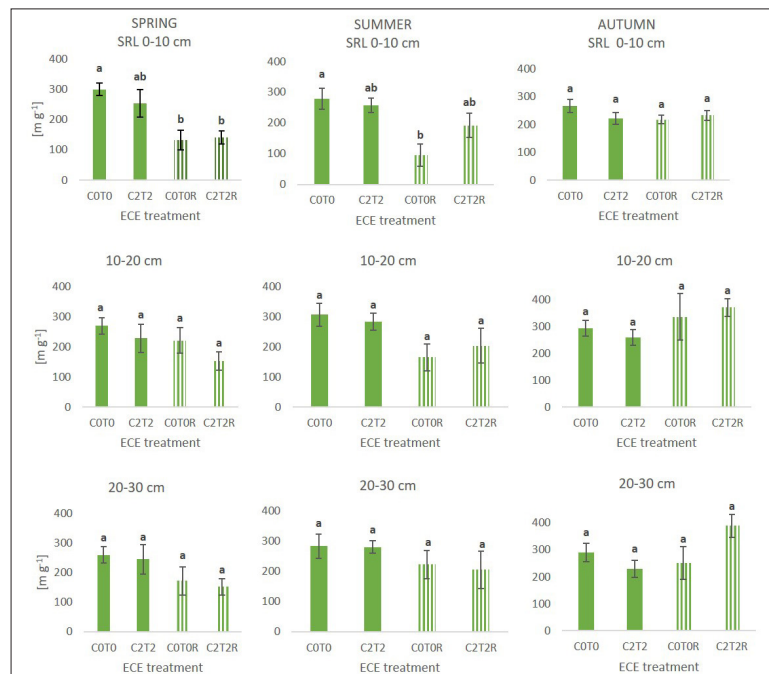


Abbildung 4: Spezifische Wurzellänge der Kontrolle (C0T0), Extrem-Behandlung (C2T2), Kontrolle der Dürre (C0T0R) und Extrem-Behandlung kombiniert mit Dürre (C2T2R) über alle drei Erntezeitpunkte und Tiefenstufen.

below-ground organs to plant-soil feedbacks worldwide. *Journal of Ecology* 101:943-952.

Hoepfner, S.S. and J.S. Dukes (2012): Interactive responses of oldfield plant growth and composition to warming and precipitation. *Global Change Biology*. 18, 1754-1768.

Intergovernmental Panel On Climate Change (IPCC, 2014): Climate change 2014: Synthesis Report. Contributing of Working Groups I, II and III

- to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland.
- Luo, Y. (2007): Terrestrial carbon-cycle feedback to climate warming. *Annual Review of Ecology Evolution and Systematics* 38: 683-712. *Ecology* 94(3): 726-738.
- Nie, M.; M. Lu, J. Bell, S. Raut and E. Pendall (2013): Altered root traits due to elevated CO₂: a meta-analysis. *Global Ecology and Biogeography* 22: 1095-1105.
- Norby, R.J. *et al.* (2017): Introduction to a Virtual Issue on root traits. *New Phytologist* 215: 5-8.
- Pérez-Harguindeguy, N.; S. Díaz, E. Garnier, S. Lavorel, H. Poorter, P. Jaureguiberry, M.S. Bret-Harte, W.K. Cornwell, J.M. Craine, D.E. Gurvich, C. Urcelay, E.J. Veneklaas, P.B. Reich, L. Poorter, I.J. Wright, P. Ray, L. Enrico, J.G. Pausas, A.C. de Vos, N. Buchmann, G. Funes, F. Quétier, J.G. Hodgson, K. Thompson, H.G. Morgan, H. ter Steege, M.G.A. van der Heijden, L. Sack, B. Blonder, P. Poschlod, M.V. Vaieretti, G. Conti, A.C. Staver, S. Aquino and J.H.C. Cornelissen (2013): New handbook for standardized measurement of plant functional traits worldwide. *Australian Journal of Botany*. 61: 167-234.
- Perez-Ramos, I.M.; F. Voltaire, M. Fattet, A. Blanchard and C. Roumet (2013): Tradeoffs between functional strategies for resource-use and drought-survival in Mediterranean rangeland species. *Environmental and Experimental Botany*. 87: 126-136.
- Weltzin, J.F. *et al.* (2003): Potential effects of warming and drying on peatland plant community composition. *Global Change Biology* 9, 141-151.
- Whalley, W.R. *et al.* (2005) Structural differences between bulk and rhizosphere soil. *European Journal of Soil Science* 56, 353-360.
- World-Meteorological-Organization (2017): WMO Greenhouse Gas Bulletin, The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2016.

Auswirkung zukünftiger Klimabedingungen auf Ertrag und Futterqualität im Grünland

Erich M. Pötsch^{1*}, Markus Herndl¹, Andreas Schaumberger¹, Medardus Schweiger¹, Reinhard Resch¹ und Manuel Adelwöhrer¹

Grünland stellt in den Produktionsgebieten Hochalpen, Vor-alpen und Alpenvorland mit seinen vielfältigen Nutzungstypen und Pflanzengesellschaften die wichtigste Kulturart der österreichischen Landwirtschaft dar und ist unverzichtbares Element einer offenen, gut gepflegten Kulturlandschaft. Grünland erfüllt vor allem bei extensiver Nutzung eine Vielzahl an ökologischen Funktionen und besitzt eine ganz besondere Bedeutung für die Landschafts-, Habitat- und Artenvielfalt in Österreich. Für rund 50.000 österreichische Landwirte steht jedoch die primär einkommenswirksame Produktionsfunktion ihrer Wiesen und Weiden durch die Bereitstellung von wertvollem Grundfutter für die Versorgung raufutterverzehrende Nutztiere bzw. Bewirtschaftungsmaßnahmen ab. Neben der Düngung (Intensität, Zeitpunkt, Form), der Nutzung (Häufigkeit, Zeitpunkt, Art) und dem Pflanzenbestand (Artengruppenverhältnis, Artenspektrum) entscheidet vor allem der Standort mit den vorliegenden Lage- und Bodenverhältnissen sowie den klimatischen Bedingungen über Ertrag und Futterqualität im Grünland.

Für Grünlandbauern spielt das Wetter nicht nur für die Entwicklung und das Wachstum der Grünlandvegetation eine wichtige Rolle sondern auch für eine möglichst schonende und verlustfreie Futterernte und Konservierung – dies gilt besonders für die Heugewinnung durch Bodentrocknung, die je nach Höhenlage, Exposition und Produktivität auch mehrere Tage in Anspruch nehmen kann (Pötsch *et al.*, 2010; Resch *et al.*, 2014). Nachdem für viele Grünlandbauern das wirtschaftseigene Futter von Wiesen und Weiden die Hauptkomponente in der Nutztierfütterung darstellt, gilt dem Wettergeschehen und vor allem der zukünftigen Entwicklung des Klimas ein ganz besonderes Augenmerk (Kromp-Kolb *et al.*, 2005; Huber *et al.*, 2012; Schaumberger *et al.*, 2009; 2010, 2012; Kipling *et al.*, 2016; Pötsch *et al.*, 2018). Die HBLFA Raumberg-Gumpenstein hat sich bereits in einigen Forschungsprojekten mit den Auswirkungen unterschiedlicher Klimabedingungen auf die Produktivität von Grünland beschäftigt (z.B. Trockenschädenprojekt – Monitoring auf knapp 30 Standorten in Österreich (Schaumberger, 2005; Pötsch *et al.*, 2014; Resch, 2012, 2017); zahlreiche Langzeitversuche, die rückblickend betrachtet klimatisch bedingte Veränderungen zeigen (Pötsch *et al.*, 2015). Mit der Entwicklung, dem Aufbau und der Durchführung des ClimGrass-Projektes wurde ab 2008 ein Schritt gesetzt, der aus versuchstechnischer Sicht eine ganz besondere Herausforderung stellt, zugleich aber – gemeinsam mit den zahlreichen Projektpartnern – große

Möglichkeiten eröffnet und die zahlreichen Fragen im Zusammenhang mit den zu erwartenden Klimaveränderungen beantworten soll.

Material und Methodik

Die ClimGrass-Anlage, deren funktionale, technische Einrichtungen sowie Informationen zur Performance sind in Herndl *et al.* (2010) sowie Pötsch *et al.* (2019) ausführlich dargestellt. Die 2007 mit einer Dauerwiesenmischung eingesäte Versuchsfläche umfasst 54 Parzellen, die jährlich in Form einer Dreischnittnutzung geerntet werden, wobei aus versuchstechnischen Gründen keine Variation des jeweiligen Schnitzeitpunktes erfolgt. Alle 7 unterschiedlichen Versuchsvarianten (C0T0, C1T0, C2T0, C0T1, C1T1, C0T2 und C2T2) werden also bei den einzelnen drei Aufwüchsen jeweils zum selben Zeitpunkt geerntet. Unmittelbar vor der Ernte erfolgt eine Wuchshöhenbestimmung, eine visuelle Schätzung der projektiven Deckung sowie des Gräser-Kräuter-Leguminosen-Verhältnisses. Die gesamte abgeerntete Biomasse der insgesamt 96 Mesokosmen (8 Versuchspartellen) wird gewogen, getrocknet, vermahlen und zur weiteren Analyse vorbereitet. Die von den restlichen 46 Versuchspartellen aus den Ertragsringen geerntete Biomasse wird ebenfalls gewogen (Frischmasse) und anschließend mittels eines Probenstechers jeweils eine repräsentative Mischprobe von 1.000 g für die Ermittlung des Trockenmasse-Gehaltes und zur Durchführung der Futteranalytik gezogen. Je Aufwuchs ergeben sich somit 144 Biomasseproben als Grundlage für die Ertragsermittlung und Bestimmung der Futterqualität als wesentliche Kenngrößen für die Grünlandwirtschaft.

Ergebnisse

Die ClimGrass-Anlage ist nach einer langen Entwicklungs- und Aufbauphase nun seit Mai 2014 im Vollbetrieb – für einen derart komplexen Versuch ist das allerdings noch immer ein sehr kurzer Zeitraum, um endgültige Aussagen treffen zu können. Die erste Projektphase (DaFNE-Projekt Nr. 101067) endet 2019, eine weitere 5-jährige Projektphase ist in Vorbereitung und bietet dann gemeinsam mit dem mittlerweile genehmigten Forschungsprojekt ClimGrass-Hydro (Laufzeit 2019 – 2021) eine optimale Möglichkeit für vertiefende Untersuchungen und Analysen. Im Folgenden werden vorwiegend Ergebnisse für die beiden Versuchsvarianten C0T0 (aktuelle Klimabedingungen) und C2T2 (zukünftige

¹ Mitarbeiter des Institutes für Pflanzenbau und Kulturlandschaft, HBLFA Raumberg-Gumpenstein, Raumberg 38, A-8952 Irnding-Donnersbachtal

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

Klimabedingungen) dargestellt, deren Auswirkungen und Konsequenzen die stärkste Relevanz für die landwirtschaftliche Praxis aufweisen.

Vegetationsperiode und phänologische Entwicklung

Erste Ergebnisse zeigen hier bereits jetzt einen klaren Einfluss der zukünftigen Klimabedingungen (C2T2) auf die Dauer der Vegetationszeit mit einer Verlängerung um rund 2 – 3 Wochen (Schaumberger *et al.*, 2019). Ein erstes sichtbares Zeichen dafür ist das deutlich beschleunigte Abschmelzen der Schneedecke im Frühjahr und das dadurch bedingte, frühere Ergrünen der Grasnarbe. Unter den zukünftigen Klimabedingungen kommt es insbesondere beim 1. Aufwuchs auch zu einer beschleunigten, phänologischen Entwicklung der behandelten Pflanzenbestände. Sehr gut sichtbar ist dies etwa am Beispiel der Kuhlblume (*Taraxacum officinalis*), die in den beheizten Varianten bereits frühzeitig zur Blüte bzw. Samenreife gelangt und dadurch leicht überhand nehmen kann. Zur Erzielung und Sicherstellung einer hohen Futterqualität erfordert dies als kurzfristig umsetzbare Maßnahme daher einen vorgezogenen Erntetermin (vor allem beim Primäraufwuchs) und mittel- bis langfristig betrachtet, den verstärkten Einsatz spätreifer, trockenheitstoleranter Sorten in den Saatgutmischungen. Die längere Vegetationszeit kann entweder durch eine Streckung der Aufwuchszeiten (vor allem jener der nutzungselastischeren Folgeaufwüchse) oder auch durch eine Erhöhung der Nutzungshäufigkeit genutzt werden.

Bodenwassergehalt

Der Temperaturanstieg ist in einem engen Zusammenhang mit dem pflanzenverfügbaren Niederschlag zu sehen, der ganz maßgeblich das Wachstums- und Ertragsgeschehen

bestimmt. Die Temperaturerhöhung um 3 °C (in Kombination mit +300 ppm CO₂) führte je nach Niederschlagshöhe und Niederschlagsverlauf zu einer deutlichen Absenkung der Bodenwassergehalte um bis zu Ø 3,5 Vol.-%, wobei die unterste Bodenschicht davon am stärksten betroffen war (Abbildung 1). Bei längeren niederschlagsarmen bzw. -freien Phasen kann diese Abnahme des Bodenwassergehaltes einen deutlich erhöhten Stress für die Grünlandpflanzen bedeuten und in weiterer Folge auch zu stärkeren Ertrags-einbußen führen.

Bodenwassergehalt unter Dürrebedingungen

Zu dieser Thematik wurde 2017 für den Zeitraum des 2. Aufwuchses (31. Mai bis 25. Juli) mit Hilfe der Regendächer ein aufwändiges Dürreexperiment durchgeführt, bei dem insgesamt 12 Versuchspartellen einem mehrwöchigen Trockenstress ausgesetzt wurden. Diese Versuchspartellen erhielten in diesen 8 Wochen nur knapp 40 mm Niederschlag im Vergleich zu 250 mm, die den Partellen außerhalb der Regendächer zur Verfügung standen. Der durchschnittliche Bodenwassergehalt lag außerhalb der Regendächer bei 26,5 Vol.-% für C0T0 und bei 22,5 Vol.-% für C2T2, wobei die Gehaltswerte im Verlauf der Vegetationsperiode in allen untersuchten Bodentiefen anstiegen. Unter den Regendächern hingegen sank der Bodenwassergehalt bei beiden Vergleichsvarianten kontinuierlich ab und erreichten zum Zeitpunkt der Ernte insbesondere in den beiden obersten Bodenschichten Tiefstwerte von knapp 10 Vol.-%. Unmittelbar nach der Ernte erfolgte eine Bewässerung der dürre-gestressten Partellen mit jeweils 40 mm gesammeltem Niederschlagswasser, das zur Vermeidung eines Oberflächenabflusses in vier Teilgaben zu je 10 mm innerhalb eines Zeitraums von 2 Stunden ausgebracht wurde. Diese Bewässerung führte innerhalb weniger Tage in allen vier Bodenschichten zu einem Anstieg des Bodenwassergehaltes (Abbildung 2).

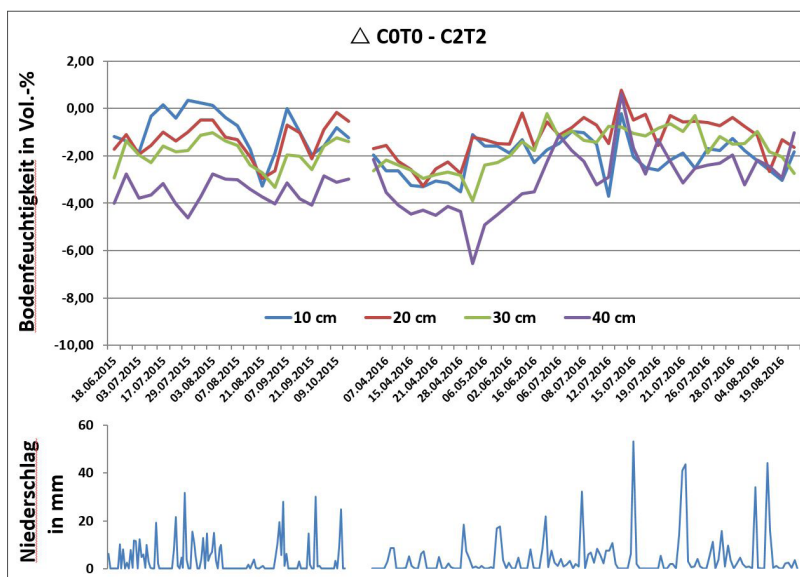


Abbildung 1: Differenz im Bodenwassergehalt zwischen ambienten (C0T0) und zukünftigen (C2T2) Klimabedingungen bei natürlichen Niederschlagsverhältnissen in zwei unterschiedlichen Beobachtungsperioden.

Biomasseertrag

In den fünf Jahren seit Beginn der Inbetriebnahme der ClimGrass-Anlage 2014 lagen am Standort Gumpenstein mit Jahresdurchschnittstemperaturen zwischen 8,8 °C und 9,6 °C sowie Jahresniederschlägen zwischen 982 mm und 1.281 mm recht unterschiedliche Witterungsbedingungen vor (Abbildung 3). Dazu kommt ein teilweise sehr unterschiedlicher Temperatur- und Niederschlagsverlauf mit variierenden Wachstumsbedingungen in der jeweiligen Vegetationszeit. Bezogen auf das erste Versuchsjahr 2014, in dem ab dem 2. Aufwuchs mit der Begasung und Beheizung begonnen wurde, zeigen sich daher in den Folgejahren im Durchschnitt aller Versuchsvarianten auch sehr unterschiedliche Ertragsniveaus. 2016 war dabei mit einer einzigen Ausnahme (Variante C1T1) das mit Ø 11.100 kg TM/ha und Jahr ertragsstärkste Versuchsjahr.

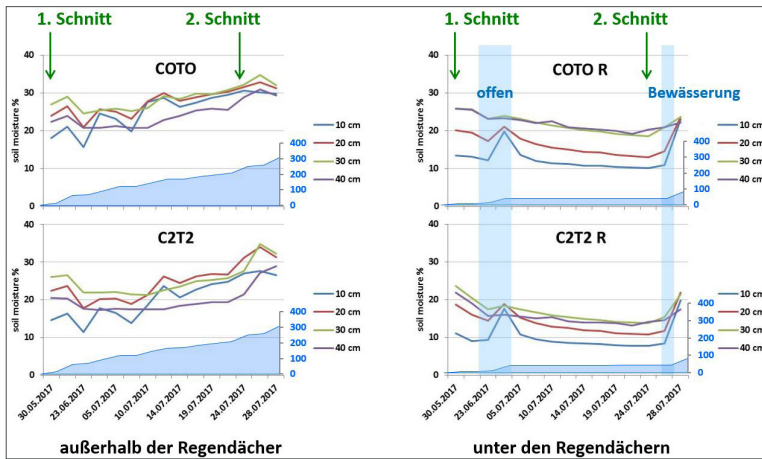


Abbildung 2: Verlauf des Bodenwassergehaltes unter ambienten (C0T0) und zukünftigen (C2T2) Klimabedingungen bei natürlichen Niederschlagsverhältnissen (linke Hälfte) und unter simulierten Dürrebedingungen (rechte Hälfte) im Versuchsjahr 2017.

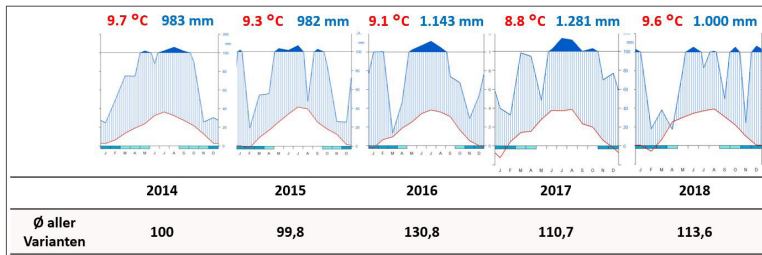


Abbildung 3: Witterungs- und Ertragsverlauf im Versuchszeitraum 2014 – 2018 (Basisjahr 2014).

Ein besonderes Augenmerk gilt aus der Sicht der landwirtschaftlichen Praxis der Ertragssituation unter zukünftigen Klimabedingungen. Im Vergleich zu ambienten Verhältnissen kam es im bisherigen Versuchszeitraum durch die Kombination von stark erhöhter Temperatur und starker Anhebung der CO₂-Konzentration zu Ertragsminderungen zwischen 5 und 14 % (Tabelle 1). In Jahren mit niedrigen Durchschnittstemperaturen bzw. kühleren Phasen in der Vegetationsperiode könnte eine Temperaturerhöhung sogar durchaus günstigere Wuchsbedingungen schaffen, sofern der Niederschlag nicht limitierend wirkt. Umgekehrt ist jedoch in überdurchschnittlich warmen Jahren vor allem in Kombination mit trockenen Perioden mit Ertragsminderungen zu rechnen, wobei dies im Ausnahmejahr 2018 sogar am Standort Gumpenstein der Fall war. Diese Zusammenhänge unterstreichen auch die Aussage, wonach sich das zukünftige Klima in einzelnen Regionen recht unterschiedlich auswirken wird und es sowohl Gebiete gibt, die davon profitieren werden als auch solche, in denen sich die teilweise jetzt schon angespannte Situation noch weiter verschärfen wird (Mosimann *et al.*, 2012; Meisser *et al.*, 2015).

Tabelle 1: Relative Ertragsveränderung unter zukünftigen Klimabedingungen am Standort Gumpenstein (Basis: ambiente Situation).

	2014	2015	2016	2017	2018
C0T0	100,0	100	100	100	100
C2T2	92,7	90,7	91,0	94,8	86,2

Ertragssituation unter (temporären) Dürrebedingungen

Das im Jahr 2017 durchgeführte Dürreexperiment umfasste nur die zwei Varianten C0T0 und C2T2 im 2012 erweiterten und mit Regendächern ausgestatteten Versuchsblock. Der für den 2. Aufwuchs 2017 simulierte Trockenstress führte bei den unbehandelten Parzellen (C0T0R) zu einer Ertragsminderung von 33 %, bei den beheizten und begasten Parzellen (C2T2R) zu einer Ertragsreduktion von knapp 55 % für den betreffenden Aufwuchs (Abbildung 4)! Nach Hofer *et al.* (2016) sind hinsichtlich der trockenstressbedingten Ertragseinbußen Nicht-N-Fixierer stärker als N-fixierende Arten wie etwa Weißklee oder Rotklee betroffen. Während der zweite Aufwuchs bei Dreischmittflächen im Durchschnitt etwa 30 % zum Gesamtertrag beiträgt, reduzierte sich dieser Anteil durch die Trockenheit auf 20 % (C0T0R) bzw. auf 13 % (C2T2R). Der Dürreeffekt beim 2. Aufwuchs 2017 lag im Durchschnitt der beiden Versuchsvarianten bei -44 %, der Behandlungseffekt (ambient vs. zukünftiges Klima) bei -20 %.

Der durch die Dürre gestresste Pflanzenbestand erholte sich nach der Bewässerung unerwartet rasch und übertraf in der absoluten Ertragsleistung des 3. Aufwuchses sogar die nicht behandelten Vergleichsvarianten um 7 % (C0T0R) bzw. um 11 % (C2T2R). Dieser Mehrertrag

kann aber nicht nur auf die nachfolgende Bewässerung von 40 mm zurückgeführt werden, denn fast zum selben Zeitpunkt kam es zu einem Niederschlagsereignis mit 49 mm, von dem alle Parzellen außerhalb der Regendächer profitierten. Durch die dürrebedingten, deutlichen Mindererträge kam es auch zu einem geringeren Entzug an Nährstoffen, die aufgrund der sehr geringen Bodenwassergehalte auch keiner Verlagerung in tiefere Bodenschichten bzw. Auswaschung ausgesetzt waren. Die beim 2. Aufwuchs ungenutzten Nährstoffe dürften daher in Kombination mit der zum 3. Aufwuchs erfolgten Düngung für die ermittelten Mehrerträge verantwortlich sein. Untersuchungen in der Schweiz haben gezeigt, dass dürregegrastete Grünlandpflanzen stärkere Wurzeln bilden und zudem mehr Reserven einlagern, die zusammen mit dem nach der Wiederbefeuchtung des Bodens in erhöhtem Ausmaß freigesetzten Stickstoff den Wiederaustritt beschleunigen und die Ertragsleistung anheben (Hofer *et al.*, 2016). Bezogen auf den Gesamtertrag im Jahr 2017 lag der Dürreeffekt damit bei -10 %, der Behandlungseffekt (ambient vs. zukünftiges Klima) hingegen bei -0,5 %.

Mit einer derartigen Ertragskompensation beim Folgeaufwuchs kann allerdings nicht in jedem Fall gerechnet werden, da die Auswirkungen der Temperatur- und CO₂-Erhöhung in Kombination mit einer Dürrephase auch vom Basisniveau der Temperatur abhängt. So kann in einem überdurchschnittlich heißen und trockenen Jahr (wie z.B. 2018) eine längere niederschlagsfreie Phase in der Vegetationszeit auch zu irreversiblen Schäden führen, die dann

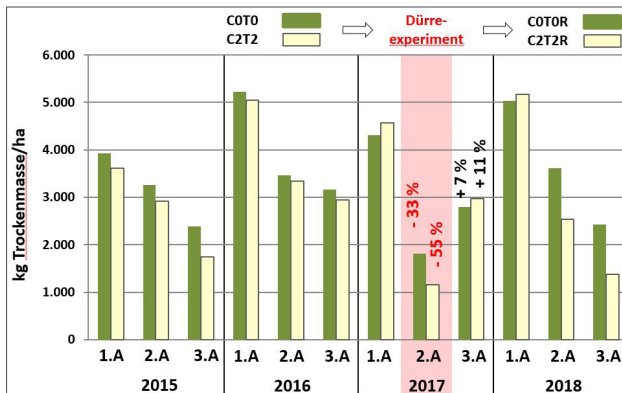


Abbildung 4: Ertragsverlauf der Varianten im Versuchszeitraum 2015 – 2018 mit dem Dürreexperiment zum 2. Aufwuchs 2017 (die beiden Varianten erhalten ab diesem Zeitpunkt eine eigene Codierung).

keine natürliche Regeneration des Pflanzenbestandes mehr zulassen und damit eine Nachsaat oder unter Umständen sogar eine Neuansaat erfordern. Welche Art von Verbesserungsmaßnahmen getroffen werden muss, hängt auch sehr stark vom Arten- und Sortenspektrum des Grünlandbestandes und von dessen Anpassungsvermögen in Form der phänotypischen Plastizität ab. Dazu wurden intensive Untersuchungen am Knaulgras (*Dactylis glomerata*) durchgeführt und von 2016 bis 2018 für jeden Einzelaufwuchs eine Reihe von funktionalen Eigenschaften an jeweils 30 Einzelpflanzen je Parzelle für die Varianten C0T0 und C2T2 erhoben. Dabei zeigte sich beim dürregestressten 2. Aufwuchs eine deutliche Reduktion in der Wuchshöhe und im Gesamtpflanzengewicht, beim Folgeaufwuchs (so wie auch beim Ertrag) hingegen eine Erhöhung dieser beiden Kenngrößen im Vergleich zu den nicht der Trockenheit ausgesetzten Vergleichsvarianten.

Für das Dürreexperiment 2017 wurde der 2. Aufwuchs ausgewählt, um auf dem grundsätzlich ausreichend mit Niederschlag versorgten Standort Gumpenstein tatsächlich auch Trockenstress simulieren zu können. In vielen, deutlich regenärmeren Grünlandregionen Österreichs sind jedoch zunehmend das Frühjahr und damit der ertragsstärkste Primäraufwuchs von Trockenheit betroffen, was mitunter bereits zu extremen Ernteausfällen und entsprechenden Konsequenzen für die Versorgung der Nutztiere führt.

Futterqualität

Trockenperioden wirken sich je nach Dauer und Intensität stark auf die Ertragsleistung, jedoch nur in einem geringeren Ausmaß auf die Futterqualität aus (Buxton and Casler 1993; Buxton and Fales 1994). Nach Meisser *et al.* (2015) sind jedoch die Auswirkungen von Trockenperioden auf den Nährwert des Futters (noch) schwieriger zu bestimmen resp. zu erklären, als auftretende Ertragsunterschiede. Hinsichtlich der durch Trockenheit bedingten Veränderungen von Futterinhaltsstoffen finden sich dazu in der Literatur sehr widersprüchliche Ergebnisse (Dumont *et al.*, 2015). So kamen Jensen *et al.* (2010) zum Ergebnis, dass eine moderate Trockenheit zu einer Erhöhung des Rohprotein Gehaltes (XP) und zu einer Reduktion des Rohfasergehaltes

(XF) führt, was teilweise mit einer langsameren Reifung der Pflanzen erklärt wird (Halim *et al.*, 1989). Bei starkem Trockenstress hingegen beobachten andere Autoren einen Rückgang des XP-Gehaltes, der einerseits durch die vorzeitige Alterung der Blätter (Buxton, 1996) oder durch die reduzierte N-Bindungsleistung der Leguminosen begründet wird, wobei dieser Rückgang stärker ist, als die Abnahme des Wachstums (Küchenmeister *et al.*, 2013). Natürlich spielt hinsichtlich der Futterqualität grundsätzlich auch die botanische Zusammensetzung der Bestände und deren klimabedingte Veränderung eine wesentliche Rolle.

Aktuell sind für die letzten beiden Versuchsjahre noch keine vollständigen Analysendaten für die Futterqualität verfügbar. Daher werden im Folgenden nur ausgewählte, verfügbare Qualitätsparameter für das Jahr 2017, in dem auch das Dürreexperiment stattfand, dargestellt und besprochen. Im Vergleich zum XP-Gehalt unter ambienten Bedingungen lag die C2T2-Variante bei allen drei Aufwüchsen auf einem vergleichbaren Niveau, während die XP-Werte bei beiden Vergleichsvarianten C0T0R und C2T2R insbesondere beim dürregestressten 2. Aufwuchs um 15 % bzw. 18 % und auch beim bewässerten Folgeaufwuchs um rund 10 % höher lagen. Der Rohfasergehalt der Variante C2T2 lag bei allen drei Aufwüchsen deutlich unter der Variante C0T0, die beiden dürregestressten Varianten wiesen bei dem betreffenden 2. Aufwuchs um 7 % (C0T0R) bzw. 15 % (C2T2R) geringere Rohfaserwerte zu den Vergleichsvarianten auf. Diese Ergebnisse stimmen mit den Aussagen von Jensen *et al.* (2010) überein, die sich allerdings auf eine moderate Trockenheit in Form einer geringen Beregnungsmenge beziehen.

Das Produkt aus dem XP-Gehalt im Futter und dem Trockenmasseertrag je ha ergibt den XP-Ertrag je ha, eine Kenngröße, die angesichts der laufenden Diskussion um den durchaus klimabeeinflussenden Import von Eiweißfuttermitteln auch im Grünland von Bedeutung ist. Der XP-Ertrag der dürregestressten Varianten lag beim 2. Aufwuchs um 23 % bzw. 45 % unter jenem der Vergleichsvarianten, hingegen beim bewässerten Folgeaufwuchs um 18 % bzw. 24 % darüber. Bezogen auf den Jahres-XP-Ertrag konnten die beiden dürregestressten Varianten durch die Kompensationswirkung des 3. Aufwuchses beinahe zum Ergebnis der Vergleichsvarianten aufschließen.

Weitere Veränderungen und Beobachtungen

Deutlich erkennbar ist eine Zunahme der biologischen Aktivität auf den beheizten Flächen in Form eines verstärkten Auftretens von Ameisen, Feldmäusen und auch Engerlingen, was zu zusätzlichen Problemen in der Bewirtschaftung des Grünlandes führen könnte. Die zukünftigen Klimabedingungen werden vielseitige Auswirkungen auf wichtige Kennwerte und Prozesse im Boden haben, wie etwa den Anstieg der Bodenatmung mit einer Freisetzung von CO₂ oder Änderungen im Bodenwasserhaushalt (z.B. höhere Verdunstungsraten) sowie in der Substratverfügbarkeit, die wiederum eine wichtige Rolle für Stickstoff- und Kohlenstoffemissionen aus dem Boden spielen (Reinthalter *et al.*, 2018; Meeran *et al.*, 2018; Slawitsch *et al.*, 2018; Deltedesco *et al.*, 2019; Fahringer, 2019).

Ausblick

Der Klimawandel beeinflusst in vielfältiger und sehr komplexer Weise das Ökosystem Grünland und es braucht zur Erfassung und Erklärung dieser Auswirkungen nicht nur experimentelle Ansätze wie ClimGrass, sondern auch einen langen Atem und motivierte, neugierige Wissenschaftler, die sich den bestehenden und zukünftigen Herausforderungen eines derart komplexen Freilandexperimentes stellen. Damit sollen in den kommenden Jahren gut abgesicherte Aussagen hinsichtlich der Auswirkungen des Klimawandels auf das Grünland getroffen und das Spektrum der bekannten Anpassungsstrategien präzisiert und erweitert werden.

Literatur

- BMNT (2018): Grüner Bericht 2018. Bericht über die Situation der österreichischen Land- und Forstwirtschaft. 59. Auflage, Wien, 268 S.
- Buxton, D.R. and M.D. Casler (1993): Environmental and genetic effects on cell wall composition and digestibility. In: *Forage Cell Wall Structure and Digestibility* (Ed. H. G. Jung, D. R. Buxton, R. D. Hatfield & J. Ralph). ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI.
- Buxton, D.R. and S.L. Fales (1994): Plant environment and quality. In: *Forage quality, evaluation and utilization* (G. C. Jr. Fahay, M. Collins, D. R. Mertens & L. E. Moser). ASA, CSSA & SSSA, Lincoln, NE.
- Buxton, D.R. (1996): Quality-related characteristics of forages as influenced by plant. *Anim. Feed Sci. Tech.* 59, 37-49.
- Deltedesco, E.; K. Keiblinger, M. Naynar, H.P. Piepho, M. Gorfer, M. Herndl, M. Bahn, E.M. Pötsch and S. Zechmeister-Boltenstern (2018): Trace gas fluxes from managed grassland soil subject to multifactorial climate change manipulation. *Applied Soil Ecology* Vol. 137, <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2018.12.023>.
- Dumont B.; D. Andueza, V. Niderkorn, A. Lüscher, C. Porqueddu and C. Picon-Cochard (2015): A meta-analysis of climate change effects on forage quality in grasslands: specificities of mountain and Mediterranean areas. *Grass Forage Sci.* 70, 239-254.
- Fahringer, A. (2019): Combined effects of elevated atmospheric CO₂ and temperature levels on N₂O and CH₄ fluxes in managed alpine grassland during a simulated drought period. Master thesis, BOKU, Vienna – 83 p.
- Halim R.A.; D.R. Buxton, M.J. Hattendorf and R.E. Carlson (1989): Water-Stress Effects on Alfalfa Forage Quality after Adjustment for Maturity Differences. *Agron. J.* 81, 189-194.
- Herndl, M.; E.M. Pötsch, J.W. White, B. Kimball, H.P. Piepho, M. Kandolf, A. Bohner, A. Schaumberger, R. Resch, W. Graiss, B. Krautzer and K. Buchgraber (2010): "Lysi-T-FACE" – ein technisches Versuchskonzept zur Simulation der Erderwärmung im Grünland. *Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften*, Band 22, 73-74.
- Hofer, D.; M. Suter, E. Haughey, J.A. Finn, N.J. Hoekstra, N. Buchmann and A. Lüscher (2016): Yield of temperate forage grassland species is either largely resistant or resilient to experimental summer drought. *Journal of Applied Ecology*, 53, 1023-1034.
- Huber, R.; P. Bebi, S. Briner, H. Bugmann, A. Buttler, A. Grêt-Regamey, C. Hirschi, R. Scholz, W. Zimmermann und A. Rigling (2012): Klimawandel und nachhaltige Landnutzung im Berggebiet. *Agrarforschung Schweiz* 3 (7-8), 240-245.
- Jensen, K.B.; B.L. Waldron, M.D. Peel and J.G. Robins (2010): Nutritive value of herbage of five semi-irrigated pasture species across an irrigation gradient. *Grass Forage Sci.* 65, 92-101.
- Kipling R.P.; A. Bannink, G. Bellocchi, T. Dalgaard, N.J. Fox, N.J. Hutchings, C. Kjeldsen, N. Lacetera, F. Sinabell, C.F.E. Topp, M. Van Oijen, P. Virkajärvi and N.D. Scollan (2016): Modeling European ruminant production systems: Facing the challenges of climate change. *Agricultural Systems* 147, 24-37.
- Kromp-Kolb, H.; J. Eitzinger, H. Formayer, M. Trnka, W. Laube und G. Gruszczynski (2005): Abschlussbericht zum Forschungsprojekt „Bestimmung der Auswirkungen von Trockenperioden im Grünland mittels Wachstumsmodellen und klimatologische Analysen österreichischer Daten“, Universität für Bodenkultur (BOKU), Institut für Meteorologie und Physik, Wien, 88 S.
- Küchenmeister, K.; F. Küchenmeister, M. Kayser, N. Wrage-Mönnig and J. Isselstein (2013): Influence of drought stress on nutritive value of perennial forage legumes. *Int. J. Plant Prod.* 7, 693-710.
- Meeran, K.; J. Ingrisch, D. Reinthaler, E.M. Pötsch and M. Bahn (2018): Effect of summer drought on the coupling of photosynthesis and soil respired CO₂ in the current and future climate. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 20, EGU2018-2996-2.
- Meisser, M.; C. Deléglise, L. Stevenin und E. Mosimann (2015): *Agrarforschung Schweiz* 6 (9): 400-407.
- Mosimann, E.; M. Meisser, C. Deléglise und B. Jeangros (2012): Das Futterpotenzial der Juraweiden. *Agrarforschung Schweiz* 3, 516-523.
- Pötsch, E.M.; K. Buchgraber and R. Resch (2010): Forage conservation in mountainous regions – results of the Austrian silage monitoring project. 14th International Symposium of Forage Conservation, Brno, Mendel University Brno, March 17-19, 2010, 4-11.
- Pötsch, E.; A. Asel, A. Schaumberger and R. Resch (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.
- Pötsch, E.M.; J. Schellberg und M. Hejcman (2015): Langzeitversuche im Grünland – mehr als nur ressourcenzehrende Nostalgie? Tagungsbericht zum 20. Alpenländischen Expertenforum, HBLFA Raumberg-Gumpenstein, 77-83
- Pötsch, E.M.; D. Lenzen and J. Schellberg (2018): Response of plant functional traits to temperature along an alpine gradient of altitude. *Grassland Science in Europe*, Vol. 23, Sustainable meat and milk production from grasslands, pp 556-558.
- Pötsch, E.M.; M. Herndl, A. Schaumberger, M. Schweiger, M. Kandolf, M. Schink und M. Adelwöhrer (2019): ClimGrass – ein innovatives Freilandexperiment zur Erforschung der Folgen des Klimawandels im Grünland. Tagungsbericht zum 21. Alpenländischen Expertenforum „Klimawandel im Alpenraum – Auswirkungen auf das Ökosystem Grünland und dessen Bewirtschaftung“, HBLFA Raumberg-Gumpenstein, S 3-10.
- Reinthaler, D.; S. Hörbst, E.M. Pötsch, M. Herndl and M. Bahn (2018): Drought response of soil CO₂ emissions in current and future climate. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 20, EGU2018-2747.
- Resch, R. (2012): Stoffflüsse, Futtererträge und Biodiversität bei differenzierter Grünlandbewirtschaftung in Österreich. Abschlussbericht zum DAFNE-Projekt Nr. 100080 (NEFA). HBLFA Raumberg-Gumpenstein, 29 S.
- Resch, R.; A. Adler und E.M. Pötsch (2014): Impact of different drying techniques on hay quality. 16th International Symposium Forage Conservation, Brno, Mendel University Brno, June 3-6, 2014, 27-38.
- Resch, R. (2017): Bewertungskriterien für eine standortangepasste und produktionsorientierte Bewirtschaftungsintensität von Dauerwiesenbeständen in Österreich. Abschlussbericht zum DAFNE-Projekt Nr. 100844 (DW-NET). HBLFA Raumberg-Gumpenstein, 27 S.
- Schaumberger, A. (2005): Ertragsanalyse im österreichischen Grünland mittels GIS unter besonderer Berücksichtigung klimatischer Veränderungen. Diplomarbeit, Johannes Kepler Universität Linz, Eingereicht am Institut für Geoinformation der Technischen Universität Graz, Rottenmann, 138 S.
- Schaumberger, A. und A. Kowarik (2009): Räumliche Modellierung von Grünlanderträgen unter dem Einfluss von Wasserstress. 4. Klimaseminar zum Generalthema „Grünland im Klimawandel: Szenarien, Prozesse, Forschungsansätze“, Irnding, LFZ Raumberg-Gumpenstein, 10. September 2009, 51-67.

- Schaumberger, A.; E.M. Pötsch und K. Buchgraber (2010): Räumliche Modellierung von Grünlanderträgen unter Berücksichtigung von Witterungseinflüssen, Forschungsbericht, LFZ Raumberg-Gumpenstein, Gumpenstein, 166 S.
- Schaumberger, A.; E.M. Pötsch and H. Formayer (2012): GIS-based analysis of spatio-temporal variation of climatological growing season for Austria. Grassland Science in Europe, Vol. 7, edited by P. Golinski, M. Warda and P. Stypinski, ISBN 978-83-89250-77-3, p634-636.
- Schaumberger *et al.* (2019): Veränderung der Vegetationsdynamik unter zukünftigen Klimabedingungen. Tagungsbericht zum 21. Alpenländischen Expertenforum „Klimawandel im Alpenraum – Auswirkungen auf das Ökosystem Grünland und dessen Bewirtschaftung“, HBLFA Raumberg-Gumpenstein, S 35-44.
- Slawitsch, V.; S. Birk, M. Herndl, E.M. Pötsch and A. Schaumberger (2018): Effects of elevated temperature and CO₂ concentration on the soil water balance in permanent grassland areas. Geophysical Research Abstracts, Vol. 20, EGU2018-5400-1.

Das hydrologische Jahr 2018 – Ausnahmejahr oder Beginn eines Trends für das inneralpine Grünland

Markus Herndl^{1*}, Veronika Slawitsch², Erich M. Pötsch³ und Martina Schink¹

Einleitung

Auswertungen auf Basis des HISTALP-Datensatzes der ZAMG, weisen 2018 als wärmstes Jahr für das österreichische Tiefland seit Beginn der Temperaturmessungen im Jahr 1768 aus (ZAMG, 2018). In den inneralpinen Tälern gilt 2018 mit einer Abweichung von +2,3 °C zum Mittel (1961 – 1990) als das zweitwärmste Jahr seit Messbeginn. Die Niederschlagssummen zeigen regionale Unterschiede, wobei es im Norden, Südosten und Westen zu trocken, inneralpin dagegen ein eher nasses Jahr (+4 %) im Vergleich zum 30-jährigen Mittel (1961 bis 1990) war.

Dass diese Änderungen Folgen für den Bodenwasserhaushalt und das damit verbundene Pflanzenwachstum haben, liegt auf der Hand. Das inneralpine Grünland befindet sich meist in Lagen, in denen zwar die Temperatur für das Wachstum limitierend wirkt, aber üblicherweise genügend Wasser für die Ertragsbildung zur Verfügung steht. Ziel dieses Beitrags ist es, den Einfluss der Temperatur- und Niederschlagsbedingungen auf den Bodenwasserhaushalt im Extremjahr 2018 an einem inneralpinen Grünlandstandort zu beschreiben, um daraus Rückschlüsse auf mögliche Konsequenzen der globalen Erwärmung in Bezug auf den Bodenwasserhaushalt zu gewinnen. Zu diesem Zweck werden die im Jahr 2018 gemessenen bodenhydrologischen Größen mit jenen aus dem Durchschnittsjahr 2016 verglichen.

Experiment

Zur Quantifizierung des Einflusses von Temperatur und Niederschlägen auf das Bodenwasser werden Daten von Lysimetern herangezogen, welche an der HBLFA Raumberg-Gumpenstein (Steiermark, Österreich) in ein dort bestehendes Freilandexperiment zur Klimafolgenforschung im Dauergrünland (ClimGrass) integriert sind. Auf insgesamt 6 Lysimeterparzellen können die für das Jahr 2050 prognostizierten Erhöhungen von Temperatur und CO₂-Konzentration simuliert werden (Herndl *et al.*, 2011). Die Temperatur wird in zwei Abstufungen variiert, nämlich ambient (= T0, das entspricht der jeweils aktuellen Temperatur) und +3 °C (= T2). Die CO₂-Konzentration der Atmosphäre wird ebenfalls in zwei Abstufungen geprüft und zwar ambient (= C0, das entspricht der jeweils aktuellen CO₂-Konzentration) und +300 ppm (= C2). 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 (Meter Group AG) zur Bestimmung des Matrixpotentials. Die Sickerwassererfassung erfolgt über einen 50 Liter-Tank und eine Waage, die grammgenau den Sickerwasseraustrag erfassen kann.

Ergebnisse

Der Niederschlagssumme im Jahr 2018 am Standort Irnding-Gumpenstein betrug 1.016 mm und lag damit im langjährigen Durchschnitt (1961 – 1990). Auffallend war die geringe Niederschlagsmenge am Beginn der Vegetationszeit (April), wo sowohl im langjährigen Vergleich als auch in der Gegenüberstellung mit dem Referenzjahr 2016 um rund 2/3 weniger Regen fiel (*Abbildung 1*). Auch die Monate Juli und September hatten vergleichsweise weniger Niederschlag.

Summiert man die Niederschläge über die Vegetationszeit 2018 (April – Oktober) und stellt sie der Summe im Vergleichszeitraum 2016 gegenüber, zeigt sich eine Differenz von rund 200 mm (*Abbildung 2*). Die Verdunstungen (gemessen am Lysimeter) in diesem Zeitraum war für beide Jahre annähernd gleich, wodurch sich eine Differenz am Lysimeter für 2016 von 200 mm und 2018 von 10 mm ergibt.

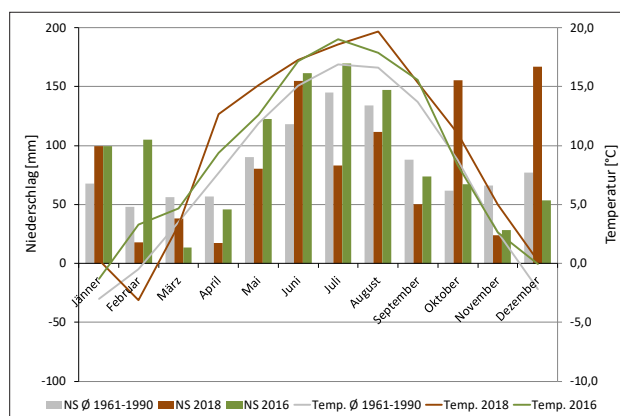


Abbildung 1: Monatliche Niederschlagssumme und Durchschnittstemperatur der Jahre 2016 und 2018 am Standort Irnding-Gumpenstein.

¹ Abteilung für Umweltökologie, HBLFA Raumberg-Gumpenstein, Raumberg 38, A-8952 Irnding-Donnersbachtal

² Institut für Erdwissenschaften, Karl-Franzens Universität Graz, Heinrichstraße 26, A-8010 Graz

³ Abteilung für Grünlandmanagement, HBLFA Raumberg-Gumpenstein, Raumberg 38, A-8952 Irnding-Donnersbachtal

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

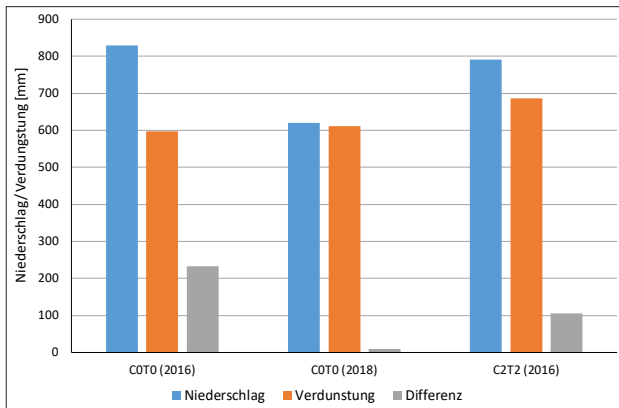


Abbildung 2: Niederschlags- und Verdunstungssumme über die Vegetationsperiode (April – Oktober) der Versuchsvarianten C0T0 (2016, 2018) und C2T2 (2016) am Standort Irdning-Gumpenstein.

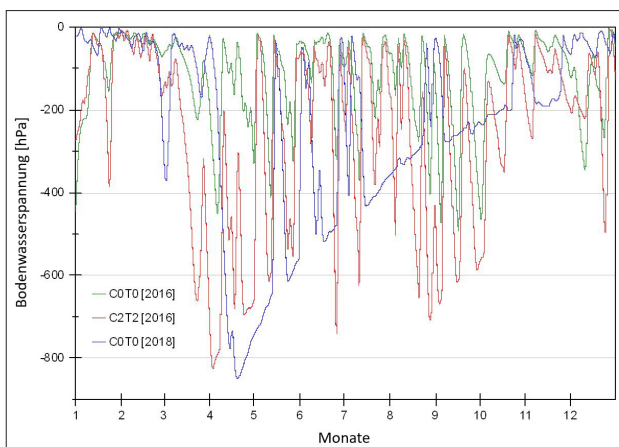


Abbildung 3: Bodenwasserspannung in 10 cm Bodentiefe der Versuchsvarianten C0T0 (2016, 2018) und C2T2 (2016) am Standort Irdning-Gumpenstein.

Zur Beantwortung der Frage, ob denn diese Differenz über die Vegetationszeit eine Ausnahme war oder möglicherweise der Beginn eines Trends ist, kann man sich die Klimawandelvariante (C2T2) im Jahr 2016 ansehen. Hier führte die Begasung und Beheizung zu einer Halbierung der Differenz, weil die Verdunstung im Vergleich zum Niederschlag anstieg, wobei dieser Trend auch in anderen Versuchsjahren beobachtet werden kann.

Geringe Niederschläge und vergleichsweise hohe Temperaturen, wie es zum Beispiel im April und Mai 2018 der Fall war, führt zur Austrocknung des Bodens. Messungen der Bodenfeuchte anhand der Saugspannung zeigen, dass Wasser in der Hauptwurzelzone des Grünlandes (10 cm Tiefe) bis weit in den Juli hinein nur schwer verfügbar (> 300 hPa) war (Abbildung 3). Auch hier zeigt der Vergleich mit der Klimawandelvariante C2T2 im Jahr 2016, dass die Temperaturerhöhung vor allem zur Zeit des 1. Schnittes zur Austrocknung im Oberboden führt. Da der 1. Schnitt bis zu 50 % des Gesamtjahresertrages im Grünland ausmachen kann, kann dieser Trend zu immer früherer Austrocknung in Zukunft auch stärker ertragswirksam werden. Das bestätigt auch die Tatsache, dass die Grünlanderträge in der C2T2-Variante im Jahr 2018 im Durchschnitt um ca. 20 % geringer waren als in der unbehandelten (C0T0).

Zusammenfassung

In den inneralpinen Tälern war 2018 das zweitwärmste Jahr seit Messbeginn (1768), wohingegen die Niederschlags-summe in diesem Jahr eher durchschnittlich war. Um den Einfluss der Temperatur- und Niederschlagsbedingungen auf den Bodenwasserhaushalt im Extremjahr 2018 an einem inneralpinen Grünlandstandort zu beschreiben und daraus Rückschlüsse auf mögliche Konsequenzen der globalen Erwärmung in Bezug auf den Bodenwasserhaushalt zu gewinnen, wurden Daten von Lysimetern in einem Freilandexperiment zur Klimafolgenforschung (ClimGrass) an der HBLFA Raumberg-Gumpenstein herangezogen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Verdunstung durch die hohen Temperaturen vergleichsweise stärker zugenommen hat und damit das pflanzenverfügbare Wasser vor allem zu Beginn der Vegetationsperiode knapper geworden ist. Diese 2018 vorliegende Situation könnte zukünftig häufiger auftreten und mögliche Konsequenzen auf den Grünlandertrag haben.

Literatur

- Herndl, M.; E.M. Pötsch, A. Bohner und M. Kandolf (2011): Lysimeter als Bestandteil eines technischen Versuchskonzeptes zur Simulation der Erderwärmung im Grünland. 14. Gumpensteiner Lysimetertagung 2011, LFZ Raumberg-Gumpenstein.
- ZAMG (2018): HISTALP Jahresbericht 2018. URL: <https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/news/histalp/histalp-oesterreich-jahresbericht-2018> (Stand: 20.02.2018).