

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

Erich M. Pötsch<sup>1\*</sup>, Markus Herndl<sup>1</sup>, Michael Bahn<sup>2</sup>, Andreas Schaumberger<sup>1</sup>, Medardus Schweiger<sup>1</sup>, Matthias Kandolf<sup>1</sup>, David Reinthaler<sup>2</sup>, Martina Schink<sup>1</sup> und Manuel Adelwöhrer<sup>1</sup>

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 CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-Anstiegs auf Böden und Pflanzen schon seit einigen Jahrzehnten untersucht. Um den CO<sub>2</sub>-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).

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

<sup>2</sup> 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  $\text{CO}_2$ -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  $\text{CO}_2$ -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 gantztägig 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  $\text{CO}_2$ -Konzentration der Atmosphäre wird ebenfalls in drei Abstufungen geprüft und zwar ambient (= C0, das entspricht der jeweils aktuellen  $\text{CO}_2$ -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  $50\text{ W/m}^2$  erreicht wird und nur innerhalb der Vegetationsperiode von März bis Ende November. Ab einer Windgeschwindigkeit von  $1,5\text{ m/sec}$  wird die  $\text{CO}_2$ -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  $\text{CO}_2$  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  $\text{CO}_2$  weist eine gegenüber dem atmosphärischen  $\text{CO}_2$  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  $\text{CO}_2$  zur Verfügung steht. Jede einzelne Charge wird beprobt und sowohl die Qualität des zugesetzten als auch des ambienten  $\text{CO}_2$  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  $\text{CO}_2$ -Zufuhr erfolgt auf Basis von Sensormessungen im Zentrum der Begasungsringe und wird über Proportionalventile mittels der Steuerungssoftware „LabView“ (National Instruments) gesteuert.

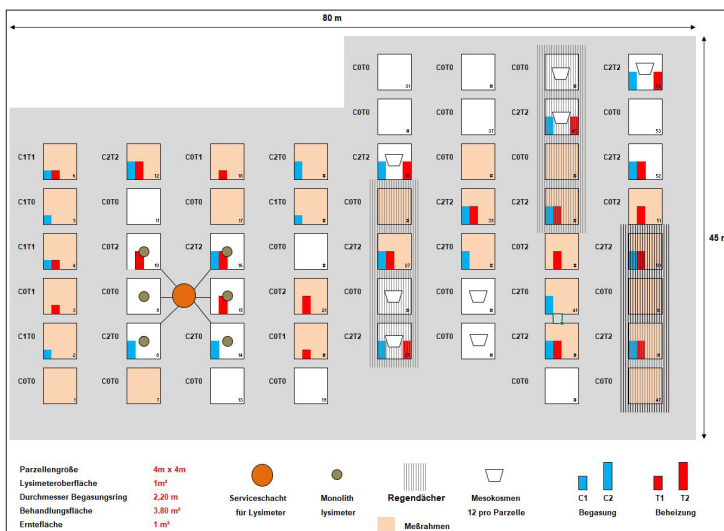


Abbildung 1: Schematische Darstellung der ClimGrass-Versuchsanlage.

## 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  $\text{CO}_2$ -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

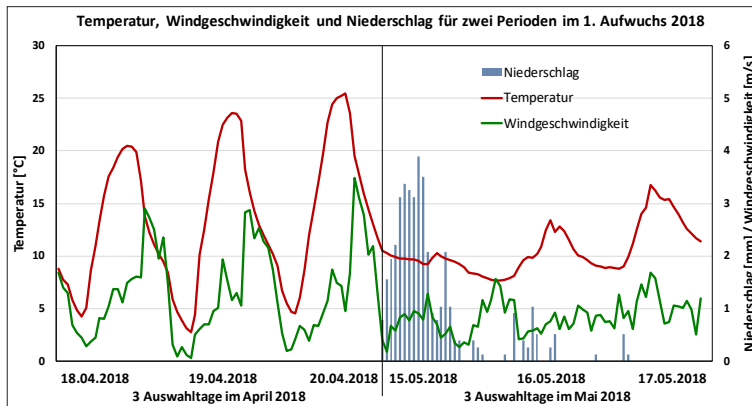


Abbildung 2: Witterungsverlauf in zwei ausgewählten Testperioden im April und Mai 2018.

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 CO<sub>2</sub>-Konzentration, gemessen in 2 m Höhe schwankt in den beiden Testperioden zwischen

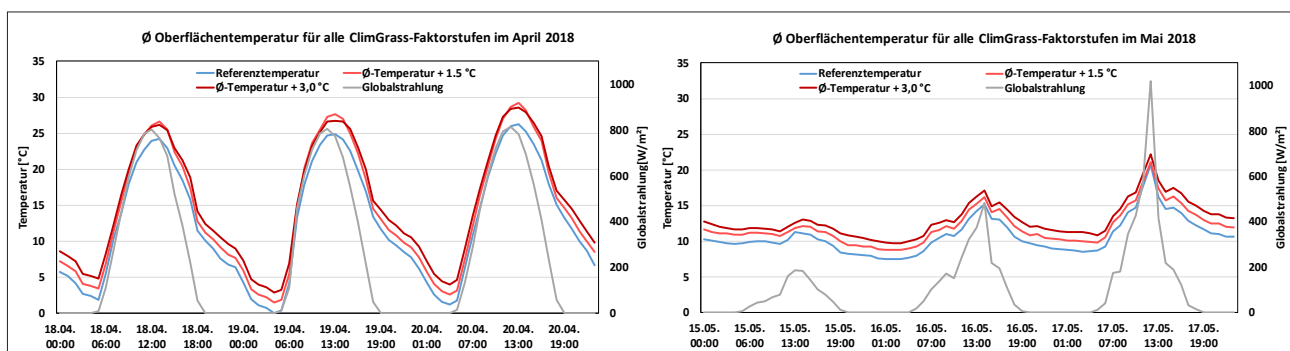


Abbildung 3: Verlauf der Globalstrahlung sowie der Oberflächentemperatur für die Temperaturvarianten T0, T1 und T2 in den beiden je dreitägigen Testperioden.

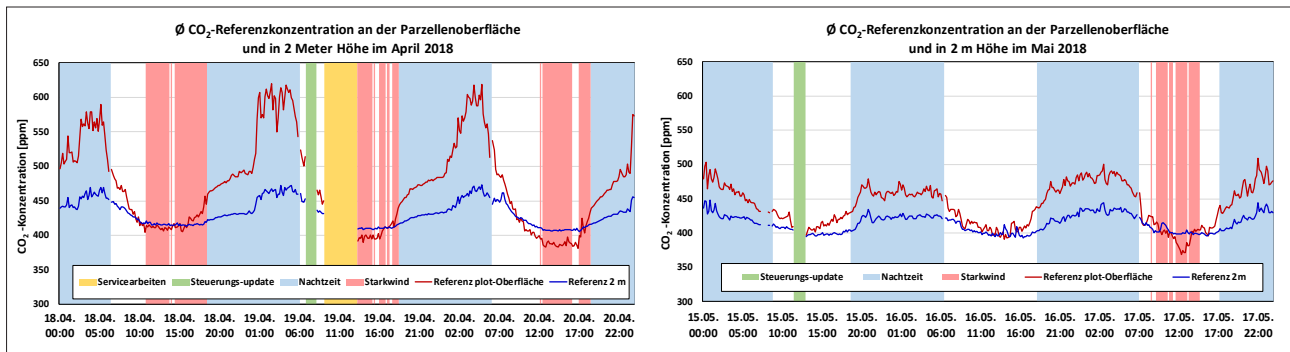


Abbildung 4: Verlauf der CO<sub>2</sub>-Konzentration in den beiden Testperioden (Referenzkonzentration in der Atmosphäre = blau, Konzentration in unbegasteten Referenzparzellen = rot).

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 CO<sub>2</sub>-Sensoren, die damit auch einen sehr guten Einblick über den Tagesgang der am Standort Gumpenstein vorliegenden atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration liefern. Die bodennah gemessene CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-Werten höher als die ambiente 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 m<sup>2</sup> 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

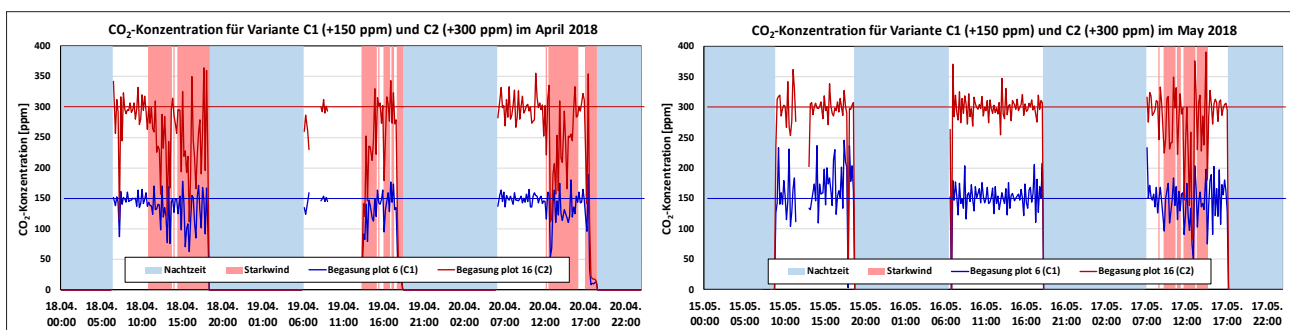


Abbildung 5: Verlauf der CO<sub>2</sub>-Beaufschlagung für die Begasungsvarianten C1 und C2 in den beiden je dreitägigen Testperioden.

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 m<sup>2</sup> erfordert hinsichtlich des ambitionierten Erhebungsspektrums eine genau festgelegte räumliche Unterteilung und Vorgangsweise (Abbildung 7). Die eigentliche Behandlungsfläche zur Begasung/Be-

heizung umfasst 3,8 m<sup>2</sup>, also knapp 1/4 der gesamten Versuchspartelle. Ein Bereich von 0,55 m<sup>2</sup> 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 m<sup>2</sup> 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-

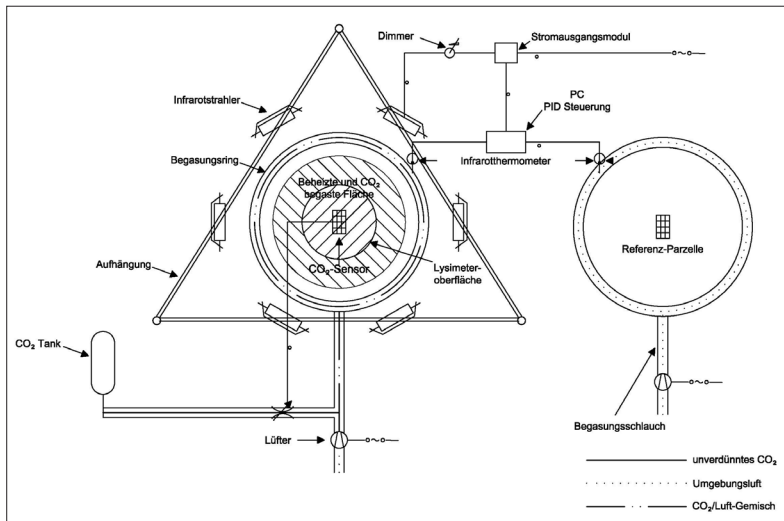


Abbildung 6: Schematische Darstellung der Beheizungs- und Begasungstechnik in Kombination mit einem Monolithlysimeter (aus Herndl et al., 2010).

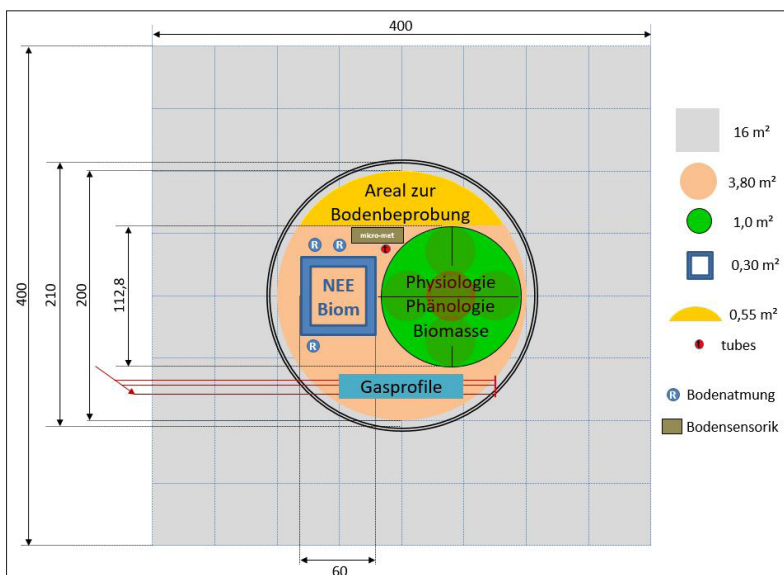


Abbildung 7: Schematische Darstellung einer Versuchspartelle mit Erhebungs- und Beprobungsarealen.

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 CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-Sensorik untergebracht sind.

Auf zwei unbehandelten Partzen (C0T0) sind automatische Klimakammern installiert, mit deren Hilfe im Intervall von 15 Minuten eine kontinuierliche Erfassung der CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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.– Beiträge z. Hydrogeologie, 56, Graz.
- Winkler, J.B. and M. Herbst (2004): Do plants of a semi-natural grassland community benefit from long-term CO<sub>2</sub> enrichment? *Basic and Applied Ecology*, 5 (2), 131-143.