

# Lysimeter als Bestandteil eines technischen Versuchskonzeptes zur Simulation der Erderwärmung im Grünland

Markus Herndl<sup>1\*</sup>, Erich. M. Pötsch<sup>1</sup>, Andreas Bohner<sup>1</sup> und Matthias Kandolf<sup>1</sup>

## Zusammenfassung

Die Vermeidung von Klimawandel bzw. die Anpassung an Erderwärmung sind heute nicht mehr nur Schlagworte, sondern beeinflussen neben der nationalen auch die internationale Politik und Wirtschaft. In Österreich gibt es zahlreiche Forschungsvorhaben und Programme die auf eine nationale Klimaanpassungsstrategie hin zielen. In der Landwirtschaft und hier vor allem in der Grünlandwirtschaft zeigte das Jahr 2003 (mit dessen Trockenheit), wie sensitiv dieses System auf Temperaturanstieg bzw. Niederschlagsänderung reagiert. Um die weiteren Auswirkungen von Erderwärmung auf Grünland heute schon möglichst real abschätzen zu können, sind Versuchskonzepte erforderlich, die eine Simulation der zentralen Faktoren der Erderwärmung ermöglichen. Am LFZ Raumberg-Gumpenstein wurde im Jahr 2010 ein technisches Versuchskonzept („Lysi-T-FACE“) erstellt, das eine Erwärmung mittels Infrarot-Heizungssystem, eine Erhöhung der CO<sub>2</sub>-Konzentration der Luft mittels miniFACE-System und zugleich die Messung der Auswirkungen dieser beiden Faktoren im Boden mittels eines Lysimeter-Systems ermöglicht. Dazu wurde in einem Feldversuch ein Versuchsaufbau installiert, der zwei gesteigerte Temperatur- bzw. zwei CO<sub>2</sub>-Konzentrations-szenarien unter Freilandbedingungen auf 24 Wirtschaftsgrünlandparzellen bietet. Eine Faktorkombination wird dabei auf sechs Lysimetern untersucht, um spezifische Informationen über Wasser- und Nährstoffkreisläufe unter den zu erwarteten künftigen Klimabedingungen zu bekommen. Dieses technische Versuchskonzept soll eine umfassende Bewertung der Folgen der Erderwärmung erlauben und zukünftig interdisziplinäre Projekte im Bereich Klimafolgenforschung ermöglichen. Schlussendlich sollen die erzielten Resultate dazu dienen, konkrete Anpassungsstrategien für die Grünlandbewirtschaftung unter zukünftigen Klimabedingungen zu entwickeln.

*Schlagwörter:* Erderwärmung, Klimafolgenforschung, miniFACE, T-FACE, Feldlysimeter

## Summary

The avoidance of climate change and accordingly the adjustment at global warming are today no longer only key words, but affect beside national also international policy and economy. In Austria numerous research projects and programs focus on a national climatic adjustment strategy. In agriculture and particularly in grassland management the year 2003 (with its dryness) showed, how sensitive this system reacts to temperature rise and accordingly to change of precipitation. In order to be able to measure further effects of global warming on grassland, an experimental concept is necessary that makes simulation of factors for global warming possible. At AREC Raumberg-Gumpenstein in 2010 a technical experimental concept („Lysi-T-FACE“) was developed, that enables i) heating up by means of an infrared heating system ii) enhancing the CO<sub>2</sub> content of the air by means of a miniFACE system and iii) measuring the effects of the two factors in the soil by means of lysimeters. For that purpose, an experimental setup was established in a field experiment, which provides two increased temperature and accordingly two CO<sub>2</sub> concentration scenarios under open-field conditions at 24 grassland plots. One factor combination thereby will be examined on six lysimeters to get information about water and nutrient fluxes under expected future conditions. This technical experimental concept permits a comprehensive evaluation of consequences to global warming and will allow future interdisciplinary projects within the range of climatic consequences research. Finally, the obtained results should help to develop adjustment strategies for grassland management under future climatic conditions.

*Keywords:* global warming, climate impact study, miniFACE, T-FACE, field lysimeter

## Einleitung

Erderwärmung wird als beobachteter Anstieg der Durchschnittstemperatur der erdnahen Atmosphäre und der Meere, sowie deren künftig erwarteter Anstieg bezeichnet und scheint eines der wichtigsten Themen des 21. Jahrhunderts zu werden. Die durchschnittliche globale Oberflächentem-

peratur hat sich im letzten Jahrhundert um ca. 1° C erhöht (IPCC 2007). Die atmosphärische CO<sub>2</sub>-Konzentration hat sich im etwa gleichen Zeitraum von 280 µmol mol<sup>-1</sup> (aus präindustrieller Zeit) auf derzeit ca. 380 µmol mol<sup>-1</sup> erhöht und könnte je nach Prognosemodell bis zum Ende des 21. Jahrhunderts 730 bis 1020 µmol mol<sup>-1</sup> erreichen, was zu einem Temperaturanstieg von 1,1 bis zu 6,4° C führen

<sup>1</sup> Lehr- und Forschungszentrum für Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein, Raumberg 38, A-8952 IRDNING

\* Ansprechpartner: Dr. Markus Herndl, [markus.herndl@raumberg-gumpenstein.at](mailto:markus.herndl@raumberg-gumpenstein.at)

könnte (SOLOMON 2007, IPCC 2007). Untersuchungen von CASTY et al. (2005) zeigen für den alpinen Raum im letzten Jahrzehnt eine überdurchschnittliche Erwärmung und bestätigen im Allgemeinen die Sensitivität dieses Raumes auf klimatische Änderungen. Die Empfindlichkeit von Grünland auf Temperatur- und Niederschlagsänderungen hat in Österreich vor allem das Jahr 2003 gezeigt. In einigen Regionen kam es zu schweren Schäden und zeitweiligem Futtermangel, in anderen Gebieten (v.a. im inneralpinen Bereich) konnten hingegen Höchstertträge erzielt werden.

Wissenschaftlich werden die Auswirkungen von Temperatur- und  $\text{CO}_2$ -Anstieg auf Boden und vor allem auf Pflanzen schon seit den 60er Jahren untersucht. Diese Experimente wurden meist unter künstlichen Bedingungen in Klimakammern und Gewächshäusern betrieben was einige Nachteile wie veränderte Luftzirkulation, Beschattung etc. mit sich bringt (z.B. KIMBALL et al. 1997). Um den  $\text{CO}_2$ -Effekt unter Freilandbedingungen testen zu können, haben sich in den letzten Jahren zwei Methoden durchgesetzt: „Open-top chambers“ (OTC) und „Free-Air Carbon Dioxide Enrichment“ (FACE) wobei FACE in nahezu allen Kulturarten über den Globus hinweg eingesetzt wurde und wird (<http://public.ornl.gov/face>). Um den Einfluss von Temperaturerhöhung im Feld simulieren zu können, gibt es auch einige Ansätze wie z.B. Bodenerwärmung mit Heizschlangen oder Erwärmung über Abdeckung (BEIER et al. 2004, INESON et al. 1998). Der erfolgversprechendste Ansatz um Faktoren der Erderwärmung in Feldversuchen simulieren zu können, ist die Erwärmung der Vegetation mit Infrarotheizung in Kombination mit einer FACE-Begasungsanlage – T-FACE (PARTON et al. 2007).

Zur Beschreibung und Untersuchung von Wasser- bzw. Nährstoffkreisläufen im Boden haben sich Lysimeter als

geeignete Messtechnik erwiesen. Im Projekt „TERENO“ ([www.tereno.net](http://www.tereno.net)) wird eine Lysimeter-Systemlösung zum Studium des Langzeiteinflusses des globalen Klimawandels von Ökosystemen sowie zur Analyse von Interaktionen und Reaktionen zwischen Boden, Vegetation und Atmosphäre verwendet. Dabei werden Bodenmonolithe aus höher liegenden Standorten in tiefer liegende Standorte versetzt, um so den natürlichen Temperatur-/Niederschlagsgradienten zur Simulation der zu erwartenden Klimaänderung auszunutzen.

Unter Berücksichtigung der zahlreichen Methoden zur Simulation von Faktoren des Klimawandels bzw. zur Messung deren Auswirkungen sowie der Voraussetzungen, diese Technik im Grünland einsetzen zu können, wurde ein technisches Versuchskonzept entwickelt, das im folgenden Beitrag beschrieben und erklärt wird. Mit Hilfe dieses Konzeptes soll es möglich sein, Fragen zu Anpassungsstrategien an die Erderwärmung im Grünland unter möglichst realen Bedingungen im Feldversuch zu beantworten.

## Versuchskonzept zur Simulation der Erderwärmung im Grünland

### Lysi-T-FACE

Im Versuchskonzept „Lysi-T-FACE“ werden drei technische Konzepte kombiniert um eine umfassende Bewertung des Einflusses der Faktoren der Erderwärmung auf Grünland unter Freilandbedingungen zu bekommen: (i) Infrarot-Heizungssystem zur Simulation von Erwärmung, (ii) miniFACE-System zur Simulation des Anstiegs der  $\text{CO}_2$ -Konzentration der Luft und (iii) eine Lysimeter-Systemlösung, um Wasser- und Nährstoffkreisläufe unter

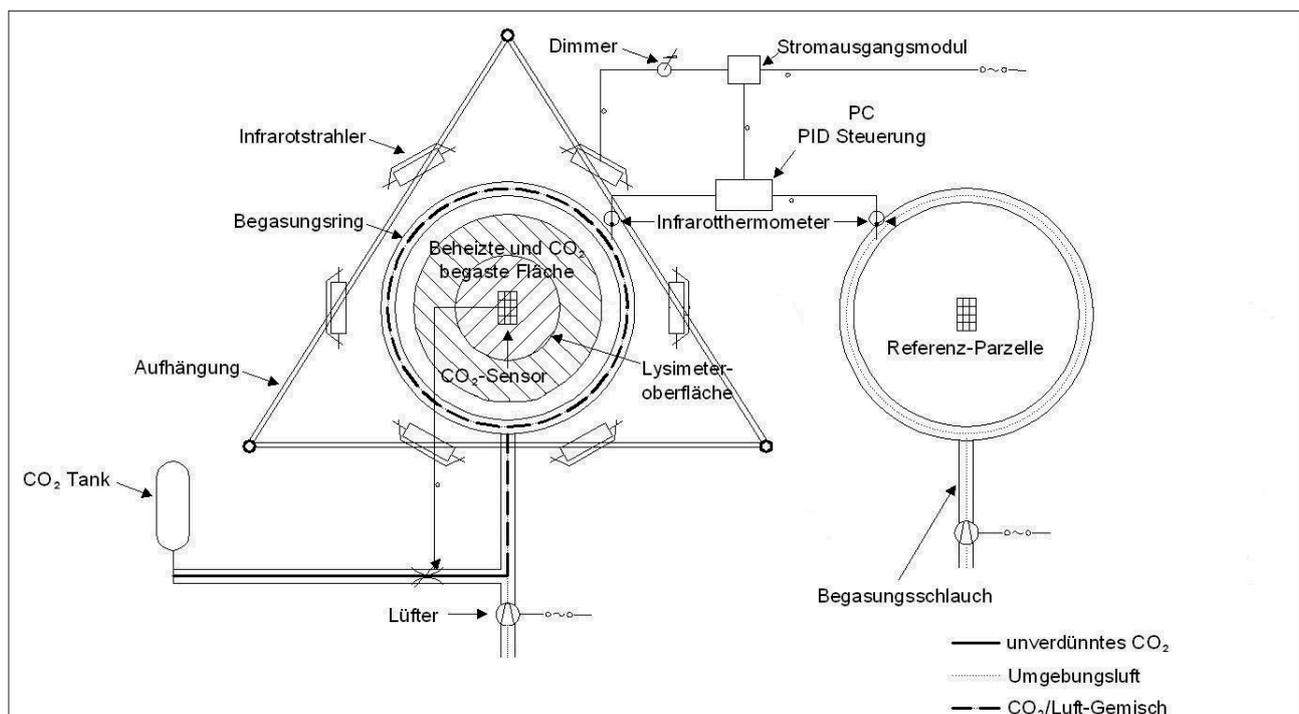
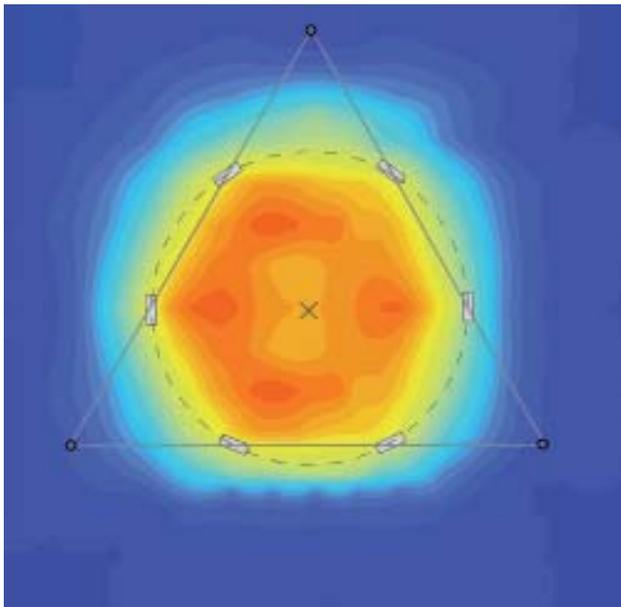


Abbildung 1: Schematische Darstellung des technischen Versuchskonzeptes „Lysi-T-FACE“ (aus HERNDL et al. 2010)



$W m^{-2}$	51–60	121–130	191–200
0–10	61–70	131–140	201–210
11–20	71–80	141–150	211–220
21–30	81–90	151–160	221–230
31–40	91–100	161–170	231–240
41–50	101–110	171–180	241–250
	111–120	181–190	

Abbildung 2a: Gemessene Verteilung der thermischen Strahlung über dem Pflanzenbestand der Infrarotstrahleranordnung (aus KIMBALL et al. 2008)

den simulierten Bedingungen messtechnisch beschreiben zu können (Abbildung 1).

### Infrarot-Heizungssystem

Wie bereits erwähnt, gibt es einige Ansätze um Temperaturanstieg und dessen Folgen auf die Vegetation zu simulieren. Die Erwärmung des Pflanzenbestandes mit Infrarotstrahlern, die über dem Bestand montiert sind hat dabei einige Vorteile wie z.B. dass der Heizeffekt mittels Infrarotstrahlung annähernd gleich der solaren Strahlung verläuft oder auch die in Feldversuchen nachgewiesene Energieeffizienz (KIMBALL et al. 2008). Die hexagonale Anordnung der Infrarotstrahler in einem definierten Winkel über und seitlich des zu erwärmenden Pflanzenbestandes hat sich dabei als effizient herausgestellt. Die Befestigung auf einem höhenverstellbaren Gestell gewährleistet zusätzlich, dass die zu erwärmende Fläche wuchshöhenabhängig gleichmäßig bestrahlt werden kann (Abbildung 2a).

Im Versuchskonzept „Lysi-T-FACE“ soll neben der Auswirkung der Erwärmung auf den Pflanzenbestand auch der Einfluss der Erwärmung auf die Verlängerung der Vegetationsdauer ermittelt werden. Dazu muss das Infrarot-Heizungssystem das ganze Jahr in Betrieb sein und daher die Strahler auch dementsprechend witterungsunempfindlich ausgeführt sein (Abbildung 2b). Bei den Infrarotstrahlern handelt es sich um Keramikstrahler (Mor Electric Heating



Abbildung 2b: Anordnung der Infrarotstrahler auf einem höhenverstellbaren Alugestänge im Versuchsgelände des technischen Versuchskonzeptes „Lysi-T-FACE“

Association) die vergleichsweise wenig Licht emittieren. Die Regelung erfolgt über Dimmer, die von der Steuerungssoftware LABVIEW (National Instruments) gesteuert werden. Dabei wird die Oberflächentemperatur einer Vergleichsfläche mittels Infrarotthermometer gemessen und die angestrebte Erwärmung für die Versuchsfläche dazu addiert und nachgeregelt.

### miniFACE-System

Um Pflanzen mit gesteigerter  $CO_2$ -Konzentration der Luft unter Freilandbedingungen zu begasen, haben sich in den letzten 20 Jahren FACE-Anlagen bewährt. Um den  $CO_2$ -Verbrauch bzw. den Flächenbedarf relativ gering zu halten, wird auf so genannte miniFACE-Systeme, die relativ geringe Begasungsflächen (von wenigen Quadratmetern) begasen, zurück gegriffen. Das miniFACE-System, das im technischen Versuchskonzept „Lysi-T-FACE“ verwendet wird, ist ähnlich jener Anlage, die seit 1998 im Helmholtz-zentrum München auf Grünland erfolgreich betrieben wird (WINKLER und HERBST 2004). Es besitzt Belüftungsringe, die jeweils eine Fläche von  $3 m^2$  umfassen und aus einem perforierten Kunststoffrohr bestehen. In den unbegasten Varianten wird durch einen Ring Umgebungsluft geblasen, in der begasten Variante wird die umschlossene Fläche einer erhöhten  $CO_2$ -Konzentration ausgesetzt, indem die Luft unmittelbar vor dem Ring mit  $CO_2$  angereichert wird. Die Regelung der  $CO_2$ -Zudosierung erfolgt auf Basis von Sensormessungen im Zentrum des Ringes und wird über Proportionalventile von der Steuerungssoftware LABVIEW (National Instruments) gesteuert.

### Lysimeter-System

Um Wasser- und Stoffflüsse im System Atmosphäre-Pflanze-Boden untersuchen zu können, gelten Lysimeter bzw. Lysimeter-Systemlösungen mit dementsprechender Sensorausstattung als vielfach erprobtes und gängiges technisches Hilfsmittel. Neuerungen wie aufgehängte Wägezellen, Gehäusung zur feldidentischen Temperaturdynamik sowie die Verwendung eines Saugkerzenrechs (VON UNOLD

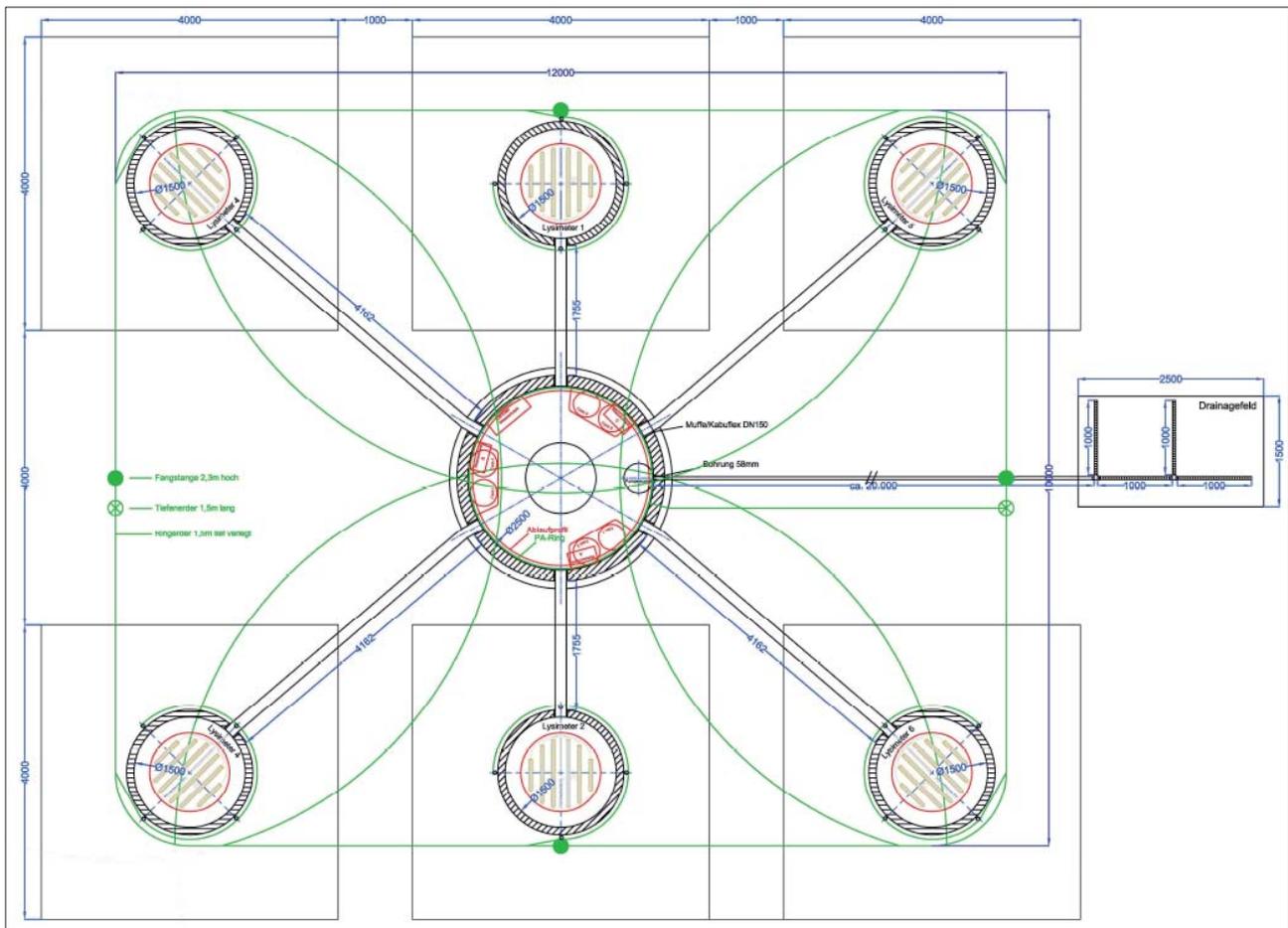


Abbildung 3: Schematische Ansicht des Lysimeter-Systems des technischen Versuchskonzeptes „Lysi-T-FACE“

2008), tragen zu immer genaueren Messwerten sowie zum Einsatz für immer vernetztere wissenschaftliche Fragestellungen bei. Das Lysimeter-System im technischen Versuchskonzept „Lysi-T-FACE“ ergibt ein Lysimeterhexagon, das linear angeordnet ist und aus sechs Bodenmonolithen mit je 1 m<sup>2</sup> Oberfläche und 1,5 m Tiefe besteht (Abbildung 3). Die Sensorausstattung der wägbaren Lysimeter ist auf die Tiefen 10, 30 und 50 cm konzentriert und umfasst TDR-Trime Sonden pico32 (IMKO GmbH) zur Bodenfeuchtebestimmung sowie mit Temperaturerfassung kombinierte Tensiometer T8-30 (UMS GmbH) zur Bestimmung des Matrixpotentials. Die Sickerwassererfassung erfolgt über einen 50 Liter-Tank und eine Waage, die grammgenu den Sickerwasseraustrag erfassen kann. Der Einsatz einer bidirektionalen Pumpe sowie eines Saugkerzenrechs an der Unterseite des Lysimeters und Tensiometer im Freiland in gleicher Tiefe, ermöglichen die automatische Nachführung der unteren Randbedingung bei feldidentischen Bedingungen (VON UNOLD 2008, STEINS 2008, Abbildung 4).

## Feldversuch

### Versuchsstandort

Das technische Versuchskonzept ist in einer ersten Phase im Jahr 2010 am Lehr- und Forschungszentrum Raumberg-Gumpenstein, Irnding, Österreich entwickelt worden. In der

zweiten Phase (2011-2017) sollen umfassende Feldversuche zu Fragestellungen hinsichtlich der Auswirkungen von Erderwärmung auf Grünland durchgeführt werden.

### Versuchsdesign

Im Feldversuch soll ein Wirtschaftsgrünlandpflanzenbestand (Dauerwiese B; Tabelle 1) einer Faktorkombination von zwei erhöhten Temperaturstufen und zwei gesteigerten CO<sub>2</sub>-Konzentrationen der Luft ausgesetzt werden. Im Versuchsfeld werden dabei die Hauptfaktoren in einem 3x3 Faktordesign auf 24 Grünlandparzellen aufgeteilt, wobei eine Faktorkombination auf dem Lysimeterhexagon vertreten ist (Abbildung 5). Die Bodenmonolithen wurden nahe der Versuchsfläche entnommen und sind damit mit der sehr homogenen restlichen Versuchsfläche vergleichbar. Der Bodentyp im Versuchsfeld ist eine Braunerde mit einem A-Horizont von 0-30 cm, einem B-Horizont bis ca. 100 cm und einem C-Horizont >100 cm. Die vorherrschende Bodenart ist über alle Horizonte lehmiger Sand mit einem pH-Wert von durchschnittlich 5,7. Die Nährstoffversorgung liegt bei allen Makronährstoffen im Bereich der Versorgungsstufe C (= ausreichend).

### Versuchsfragestellungen

Mit dem entwickelten technischen Versuchskonzept zur Simulation der Faktoren der Erderwärmung bzw. der Mes-

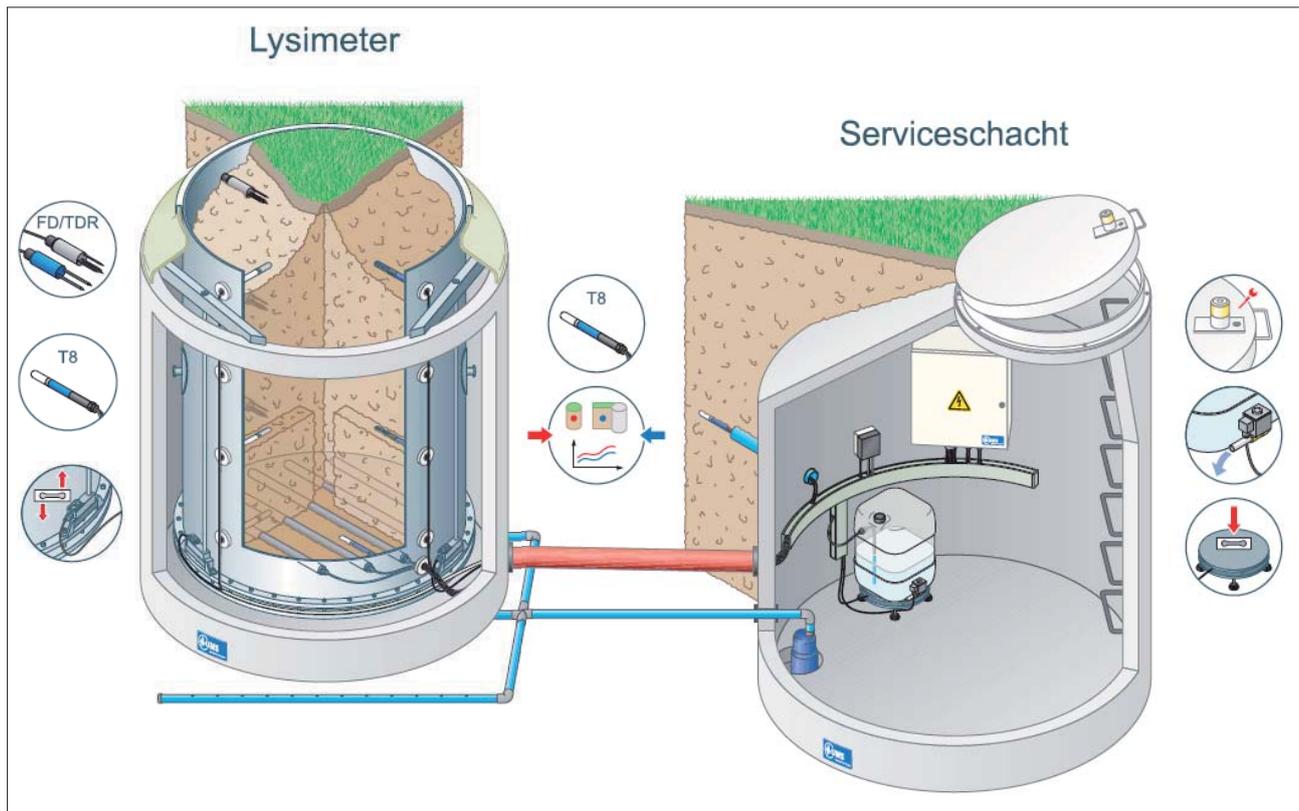


Abbildung 4: Sensorausstattung bzw. Schnitt durch den Lysimeter und den Serviceschacht des technischen Versuchskonzeptes „Lysi-T-FACE“

Tabelle 1: Arten und Sorten und dessen Anteil in der Dauerwiesenmischung B

Art	Sorte	Anteil in der Mischung [%]
<i>Alopecurus pratensis</i>	Gufi	5,3
<i>Arrhenatherum elatius</i>	Arone	18,5
<i>Dactylis glomerata</i>	Tandem	5
<i>Festuca rubra</i>	Condor	5,3
<i>Festuca pratensis</i>	Cosmolit	16
<i>Lolium perenne</i>	Guru	4,5
<i>Phleum pratense</i>	Tiller	7,1
<i>Poa pratensis</i>	Balin/Limagie	10,7/10,7
<i>Trisetum flavescens</i>	Gunther	3,6
<i>Trifolium repens</i>	SW Hebe	5,8
<i>Lotus corniculatus</i>	Oberhaunstädter	7,5

sung der Auswirkungen sollen im Wesentlichen folgende Versuchsfragestellungen im Feldversuch beantwortet werden:

#### Pflanzenwachstum/Bestandeszusammensetzung

- Gesteigerter/Verringerter Biomassezuwachs/Ertrag
- Veränderung der Bestandeszusammensetzung
- Erhöhung/Verringerung des Anteils von Unkräutern

#### Futterqualität

- Reduktion/Erhöhung des Proteingehalts, Verdaulichkeit und Energiekonzentration
- Veränderung der Bestandeszusammensetzung und dessen Einfluss auf die Futterqualität

#### Bodennährstoffe

- langfristige Abnahme/Zunahme von löslichen Formen von Bodennährstoffen v.a. von Stickstoff und Phosphor
- Veränderungen im Wasser-, Kohlenstoff- und Stickstoffkreislauf

#### Bewirtschaftung

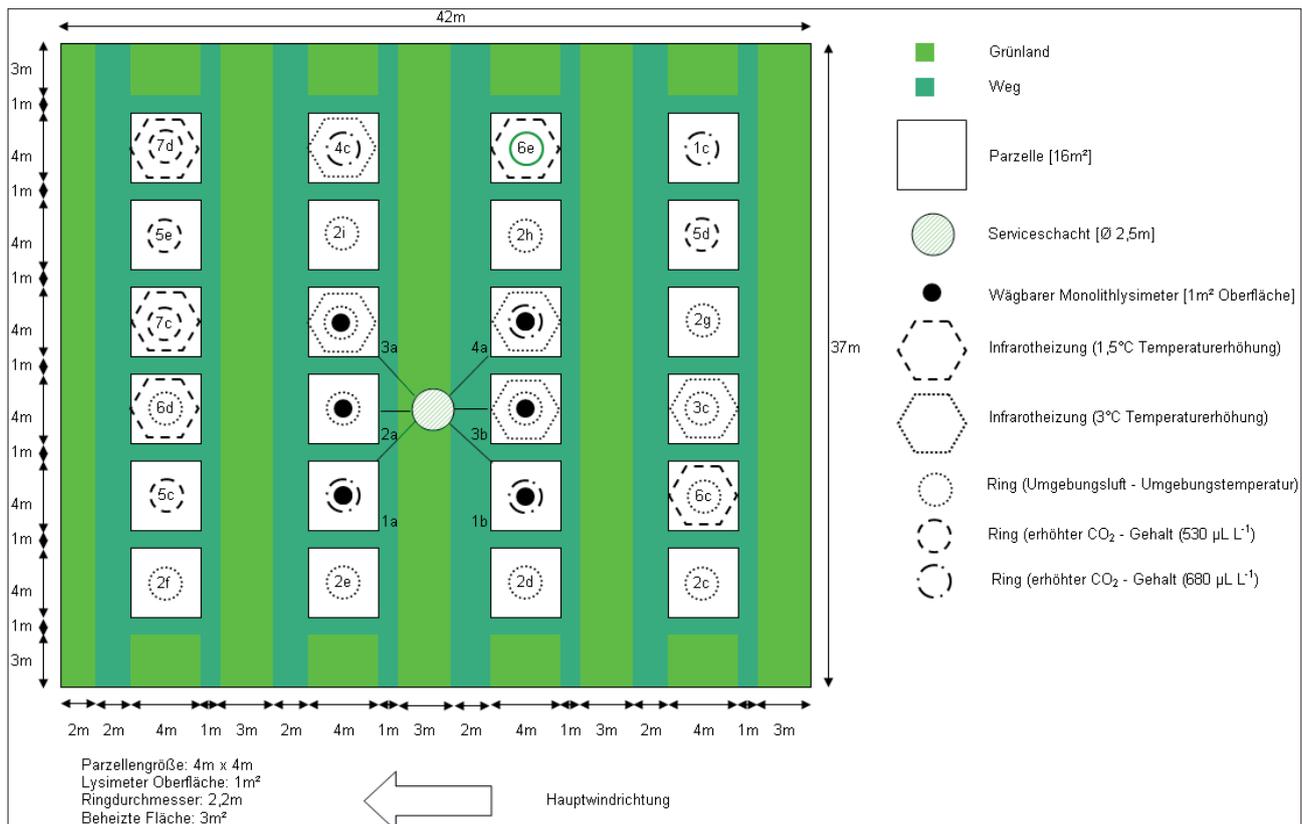
- Anpassung von Bewirtschaftungsmaßnahmen (Besatzdichte/GVE Bestand, Zuchtmaterial, Grünlandsorten, Düngung, Grünlanderneuerung etc.)

#### Danksagung

Die technische Anlage wurde mit Mitteln der HBLFA Raumberg-Gumpenstein bzw. des BMLFUW finanziert. Weiters danken wir der Firma UMS GmbH, München für die Errichtung der Lysimeterstation sowie bei der Mithilfe der Einrichtung der Infrarot- und Begasungsanlage.

#### 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 nighttime warming. *Ecosystems*, 7, 583-597.
- CASTY, C., H. WANNER, J. LUTERBACHER, J. ESPER and R. BOEHM, 2005: Temperature and precipitation variability in the European Alps since 1500. *International Journal of Climatology*, 25, 1855-1880.
- HERNDL, M., E. PÖTSCH, J.W. WHITE, B. KIMBALL, H.P. PIEPHO, M. KANDOLF, A. BOHNER, A. SCHAUMBERGER, R. RESCH,



Nummer	Behandlung	Wiederholung	Beschreibung
1	erhöhter CO <sub>2</sub> - Gehalt (680 µL L <sup>-1</sup> CO <sub>2</sub> ) x Umgebungstemperatur	a	Lysimeter
2	Umgebungsluft x Umgebungstemperatur	b	Lysimeter
3	3°C Temperaturerhöhung x Umgebungsluft	c	Feldparzelle
4	erhöhter CO <sub>2</sub> - Gehalt (680 µL L <sup>-1</sup> CO <sub>2</sub> ) x 3°C Temperaturerhöhung	d	Feldparzelle
5	erhöhter CO <sub>2</sub> - Gehalt (530 µL L <sup>-1</sup> CO <sub>2</sub> ) x Umgebungstemperatur	e	Feldparzelle
6	1,5°C Temperaturerhöhung x Umgebungsluft	f	Feldparzelle
7	erhöhter CO <sub>2</sub> - Gehalt (530 µL L <sup>-1</sup> CO <sub>2</sub> ) x 1,5°C Temperaturerhöhung	g	Feldparzelle
		h	Feldparzelle
		i	Feldparzelle

Abbildung 5: Feldversuchsplan mit den unterschiedlichen Varianten des technischen Versuchskonzeptes „Lysi-T-FACE“

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.

INESON, P., K. TAYLOR, A.F. HARRISON, J. POSKITT, D.G. BENHAM, E. TIPPING and C. WOOF, 1998: Effects of climate change on nitrogen dynamics in upland soils. 2. A warming study. Global Change Biology, 4, 153-161.

IPCC, 2007: Klimaänderung 2007: Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger, IPCC, Bern/Wien/Berlin, 89 S.

KIMBALL, B.A., J. PINTER, G.W. WALL, R.L. GARCIA, R.L. LAMORTE, P.M.C. JAK, K.F.A. FRUMAU and 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.

KIMBALL, B.A., M.M. CONLEY, S. WANG, X. LIN, C. LUO, J. MORGAN and D. SMITH, 2008: Infrared heater arrays for warming ecosystem field plots. Global Change Biology, 14, 309-320.

PARTON, W.J., J.A. MORGAN, W. GUIMING and S.J. DEL GROSSO, 2007: Projected Ecosystem Impact of the Prairie Heating and CO<sub>2</sub> Enrichment Experiment. New Phytologist, 174, 823-834.

SOLOMON, S., 2007: Technical summary. In Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Annual Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (eds. S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor & H.L. Miller), p. 996. Cambridge University Press, Cambridge, UK/New York, NY, USA.

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 – Model-  
lierung – 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.