

# Einfluss erhöhter Temperatur und CO<sub>2</sub>-Konzentration auf den Bodenwasserhaushalt im Dauergrünland

Veronika Slawitsch<sup>1\*</sup>, Markus Herndl<sup>2</sup>, Andreas Schaumberger<sup>2</sup>, Erich M. Pötsch<sup>2</sup> und Steffen Birk<sup>1</sup>

## Zusammenfassung

Die nach dem aktuellsten Sonderbericht IPCC 2018 prognostizierten Veränderungen hinsichtlich Temperatur und CO<sub>2</sub>-Konzentration werden sich nachhaltig auf den Alpenraum auswirken. Die Kenntnis möglicher Änderungen der Wasserbilanz trägt maßgeblich zum Verständnis des Klimawandeleinflusses auf den Wasserkreislauf und in weiterer Folge auf das Pflanzenwachstum und damit die Bewirtschaftung landwirtschaftlicher Flächen bei. An der HBLFA Raumberg-Gumpenstein können im Rahmen des ClimGrass-Experimentes Auswirkungen veränderter Klimavariablen auf die Wasserbilanz von Grünlandböden quantifiziert werden. Dabei werden Wasserbilanzgrößen von Grünlandflächen, welche mit Infrarotstrahler beheizt bzw. mit CO<sub>2</sub> begast oder unter natürlichen Bedingungen behandelt werden, mit Hilfe von wägbaren Lysimetern ermittelt.

Mit den Lysimeterdaten lassen sich für die Vegetationsperioden des für das derzeitige Klima etwa typischen Jahres 2016 sowie des an der Alpennordseite außergewöhnlich trockenen Jahres 2018 Sickerwasserraten an den beheizten Parzellen von 66 mm bzw. 2 mm, an den begasteten Parzellen hingegen von 315 mm bzw. 16 mm errechnen. Die kombinierten Parzellen mit Temperaturerhöhung sowie CO<sub>2</sub>-Erhöhung liefern für denselben Zeitraum Sickerwasserraten von 93 mm bzw. 1 mm und damit um 116 mm bzw. 8 mm weniger als die Referenzparzelle. Das Jahr 2018, welches als wärmstes Jahr in der 251-jährigen Messgeschichte der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik aufscheint, weist demnach äußerst geringe Sickerwasserraten für alle Behandlungsvarianten auf, zudem wird auf der beheizten Parzelle erstmals seit Beginn der Messungen über die Vegetationsperiode hinweg ein Defizit des Niederschlags gegenüber der Evapotranspiration errechnet.

*Schlagwörter:* Klimawandel, Grünland, Lysimeter, Wasserbilanz, Evapotranspiration

## Summary

The predicted changes of the recent IPCC 2018 report regarding temperature and CO<sub>2</sub>-concentration will have lasting impacts on the alpine region. The information on potential changes of the water balance contribute significantly to the understanding of the climate change impact on the hydrological cycle and furthermore on the plant growth and thereby to the management of agricultural sites.

Within the framework of the ClimGrass-experiment at the AREC Raumberg-Gumpenstein, impacts of changing climate variables on the water balance of grassland soils can be quantified. Water balance parameters of grassland plots, which are heated with infrared heaters as well fumigated with CO<sub>2</sub> or treated under ambient conditions, will be determined using weighable lysimeters.

Using the lysimeter data, the amount of seepage during the vegetation period is calculated for the year 2016, which is typical for the current climate, as well as for the year 2018, which was exceedingly dry in the northern alps. The seepage obtains for 2016 and 2018 amounts to 66 mm and 2 mm, respectively, on the heated plots and 315 mm and 16 mm, respectively, on the fumigated ones. For these two years, the plots with both temperature increase and CO<sub>2</sub>-increase provide seepage water amounts of 93 mm and 1 mm, respectively, and therefore 116 mm and 8 mm less than on the reference plot. Accordingly, the year 2018, as the warmest year in the last 251 years of measurement, shows extremely low amounts of seepage and correspondingly high evapotranspiration rates on all different treatment plots. Furthermore, for the first time ever on the heated plots, a deficit of precipitation against evapotranspiration is calculated over the whole vegetation period

*Keywords:* Climate Change, Grassland, Lysimeter, Water balance, Evapotranspiration

## Einleitung

Der Klimawandel ist eine der großen Herausforderungen des 21. Jahrhunderts. Die stärksten Auswirkungen des Klimawandels werden dabei weniger kurzfristig, sondern mittel- und langfristig auftreten. Die vom IPCC 2018 prognostizierten veränderten Klimabedingungen in Form von

erhöhten CO<sub>2</sub>-Konzentrationen, erhöhten Temperaturen und verstärktem Auftreten von Wetterextremen werden sich nachhaltig auf alle Ökosysteme auswirken und die Stabilität und Anpassungsfähigkeit der Ökosysteme gefährden.

Österreich ist geprägt von landwirtschaftlich genutzten Flächen, von denen etwa 70% im klimatisch und topographisch benachteiligten Berggebiet liegen (Schaumberger 2011).

<sup>1</sup> Universität Graz, NAWI Graz Geozentrum, Institut für Erdwissenschaften, Heinrichstraße 26, A-8010 GRAZ

<sup>2</sup> Höhere Bundeslehr- und Forschungsanstalt Raumberg-Gumpenstein, Institut für Pflanzenbau und Kulturlandschaft, Raumberg 38, A-8952 IRDNING-DONNERSBACHTAL

\* Ansprechpartner: Veronika Slawitsch, veronika.slawitsch@edu.uni-graz.at



Berggebiete und landwirtschaftlich geprägte Regionen zählen dabei zu den verwundbarsten Gebieten, in denen mit weitreichenden Folgen des Klimawandels zu rechnen ist. Seit rund 1880 erfahren wir hier eine Temperaturzunahme von nahezu 2 °C verglichen mit einer globalen Erwärmung von 0,85 °C (APCC 2014). Der aktuellste IPCC Sonderbericht 2018 geht zwischen 2030 und 2052 von einem weiteren Anstieg der globalen Erwärmung um +1,5°C aus, wenn diese mit der aktuellen Geschwindigkeit weiter zunimmt.

Solch ein Anstieg der Temperatur und CO<sub>2</sub>-Konzentration lässt in Österreich markante Veränderungen sowohl in ökonomischer als auch in ökologischer Weise erwarten. Ökonomische Auswirkungen des Klimawandels werden überwiegend durch extreme Wetterereignisse und außergewöhnliche Witterungsperioden bestimmt, aber auch durch graduelle Temperatur- und Niederschlagsänderungen. Ökologische Auswirkungen veränderter Wetterbedingungen könnten sich in der Beeinträchtigung von Bodenfunktionen wie Bodenfruchtbarkeit, Wasser- und Nährstoffspeicherkapazität sowie in Humusabbau und Erosion äußern.

Auf landwirtschaftlich genutzten Grünlandflächen wird der Klimawandel mit den prognostizierten erhöhten Temperaturen sowie unterschiedlichen Niederschlagsverteilungen, zu Veränderungen der Wachstumsbedingungen und damit zu Veränderungen in der Produktion von hochwertigem Grundfutter für eine standortangepasste und nachhaltige Viehwirtschaft führen.

In dieser Arbeit sollen daher die Auswirkungen der Änderungen von Klimafaktoren hinsichtlich des Bodenwasserhaushaltes an alpinen Grünlandflächen quantifiziert werden.

Um das notwendige Verständnis des in Zukunft veränderten Bodenwasserhaushaltes auf Grünlandflächen zu erhalten, werden die Wasserbilanzgrößen während der Vegetationsperiode quantifiziert.

Zu diesem Zweck werden Daten von Lysimetern sowohl unter natürlichen (ambienten) Bedingungen (C0T0) als auch unter zukünftigen Bedingungen mit erhöhten Temperaturen (C0T2), erhöhten CO<sub>2</sub>-Konzentrationen (C2T0) und einer Kombination von beiden (C2T2) ausgewertet. Die Daten werden für die Vegetationsperioden 2016, als ein repräsentatives Durchschnittsjahr, sowie für die Vegetationsperiode 2018, als das wärmste gemessene Jahr in der 251-jährigen Messgeschichte der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG), berechnet sowie für alle unterschiedlichen Behandlungsstufen miteinander verglichen.

## Material und Methoden

### *Versuchskonzept*

In dieser Arbeit wird der Einfluss von Klimafaktoren auf die Bodenhydrologie anhand eines Klimamanipulationsexperimentes untersucht. Dabei wird die Umgebungsluft mit CO<sub>2</sub> angereichert (FACE) und damit die Vegetation erhöhten CO<sub>2</sub>-Konzentrationen ausgesetzt (Miglietta et al. 2001). Zur Untersuchung von Effekten hinsichtlich erhöhter Temperaturen wird die FACE-Technik mit Infrarotstrahlern ergänzt (T-FACE) (Parton et al. 2007, Kimball et al. 2008). Aufbauend auf diesem Konzept wurde an der Höheren Bundeslehr- und Forschungsanstalt Raumberg-Gumpenstein in der Steiermark (Österreich) ein System mit Lysimetern auf

T-FACE-Flächen entwickelt (Lysi-T-FACE), um die Effekte von erhöhten Temperaturen und CO<sub>2</sub>-Konzentrationen auf bodenhydrologische Prozesse und Parameter quantifizieren zu können (Herndl et al. 2011).

Die Durchschnittstemperatur am Standort der HBLFA Raumberg-Gumpenstein (710 m.ü.A) beträgt 8,2 °C, die jährliche durchschnittliche Niederschlagsmenge 1056 mm und die Dauer der Vegetationsperiode durchschnittlich 162 Tage (Schaumberger 2011). Beim Bodentyp handelt es sich um eine tiefgründige Braunerde. Der am Klimamanipulationsexperiment (ClimGrass-Anlage) etablierte Grünlandbestand ist eine Dauerwiesenmischung B, welche dreimal jährlich geerntet wird und eine mineralische NPK-Düngung erfährt. Der Pflanzenbestand wird durch Knautgras (*Dactylis glomerata*), Glatthafer (*Arrhenatherum elatius*) und Goldhafer (*Trisetum flavescens*) dominiert. Aufgrund der meteorologischen und vegetationstechnischen Faktoren ist die HBLFA Raumberg-Gumpenstein ein repräsentativer Standort für eine alpine Dauergrünlandwirtschaft.

An der ClimGrass-Anlage werden prognostizierte Erhöhungen von Temperatur und CO<sub>2</sub>-Konzentration sowie Trockenperioden auf insgesamt 54 Versuchspartellen in unterschiedlichen Abstufungen und Kombinationen simuliert (Temperatur: ambient, +1,5°C, +3°C; CO<sub>2</sub>-Konzentration: ambient, +150 ppm, +300 ppm) (*Abbildung 1*).

Die Beheizung der Versuchspartellen erfolgt mit jeweils sechs Infrarotstrahlern, die mit CO<sub>2</sub> angereicherte Umgebungsluft strömt über einen zentralen Begasungsring in den Pflanzenbestand.

Für die Fragestellung zur Untersuchung des Klimawandeleinflusses auf den Wasserhaushalt an Grünlandflächen werden sechs der Versuchspartellen verwendet, welche mit wägbaren Monolithlysimetern (je 1 m<sup>2</sup> Oberfläche und 1,5 m Tiefe) ausgestattet sind und über einen zentralen Messschacht serviert werden (*Abbildung 2*).

Die Lysimeter beinhalten eine Sensorausstattung, die TDR-Trime-Sonden pico32 (IMKO GmbH) zur Bodenfeuchtebestimmung sowie mit Temperaturerfassung kombinierte Tensiometer T8-30 (METER Group AG) zur Bestimmung des Matrixpotentials in 10 cm, 30 cm und 50 cm Tiefe umfasst. Die Sickerwassererfassung erfolgt über einen 50 Liter-Tank.

### *Lysimeterdaten*

Die an der ClimGrass-Anlage eingebauten Lysimeter sind ein hochauflösendes technisches System. Die Masse der Bodensäule wird auf 100 g genau gemessen, was einer Wassersäule von 0,1 mm entspricht; die Auflösung der Sickerwassermenge beträgt 10 g, was einer Auflösung von 0,01 mm entspricht. Anhand der Massezunahme sowie der Massenabnahme können die Wasserhaushaltsgrößen Niederschlag N, Evapotranspiration ET, Sickerwasser SW, Speicheränderung ΔS sowie die abgesetzten Niederschläge in Form von Tau und Reif (Groh & Slawitsch et al. 2018) mit höchster Auflösung bestimmt werden.

Die Grundlage für die Berechnung der Wasserbilanzgrößen ist eine geeignete Datenkorrektur sowie Datenaufbereitung. Nach der automatischen Filterung von technischen Grenzwerten und Eliminierung von „Error Codes“ erfolgt die Datenkontrolle über manuelle Korrekturen sowie mit der von Peters et al. 2017 entwickelten Filtermethode AWAT (Adaptive Window and Adaptive Threshold Filter).

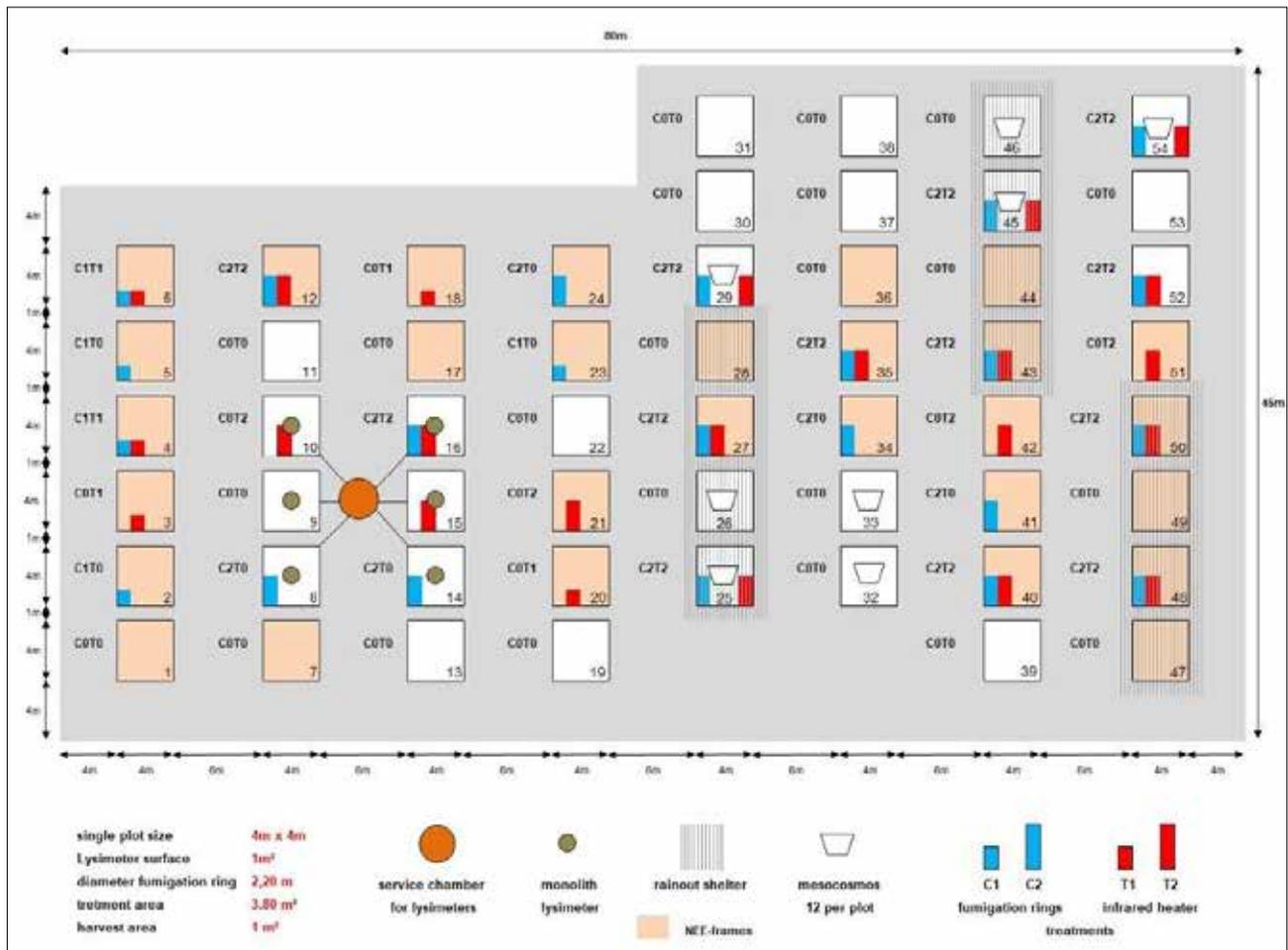


Abbildung 1: Versuchsplan der ClimGrass-Anlage an der HBLFA Raumberg- Gumpenstein (Pötsch et al. 2019).

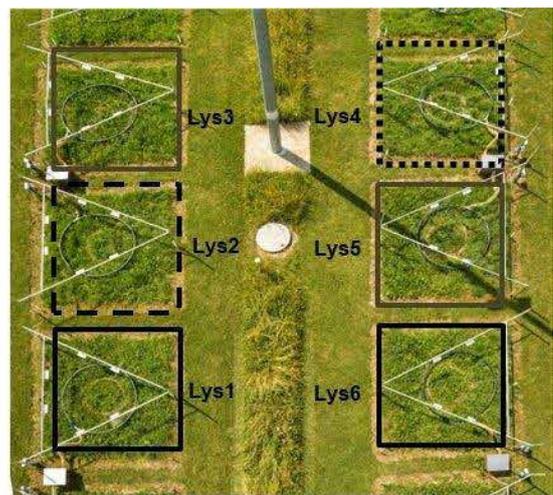
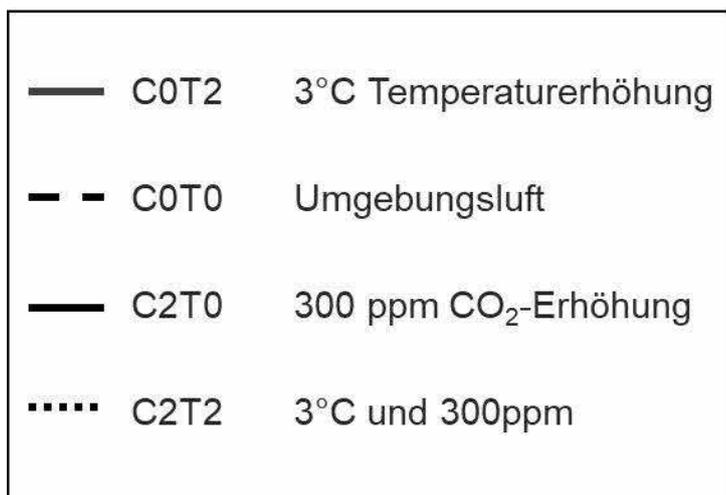


Abbildung 2: Lysimeterkombinationen an der ClimGrass-Anlage.

Dabei wird im ersten Schritt die Speicheränderung  $\Delta S$  [kg] und der Sickerwasserausfluss  $SW$  [kg] täglich beobachtet, unrealistische, fehlerbehaftete Werte eliminiert und Lücken mit Interpolationsmethoden gefüllt. Die hauptsächlich auftretenden Fehler sind bei Kammermessungen, Erntearbeiten oder Wartungsarbeiten zu verzeichnen (Slawitsch et al. 2016).

Im zweiten Schritt wird die Filtermethode AWAT auf alle fehlerbehafteten Daten angewandt, um der großen Herausforderung der Verarbeitung schwacher Signale unter starkem Rauschen gerecht zu werden. Für die AWAT-Methode werden die Summe der kumulativen Flüsse von  $\Delta S$  und  $SW$  beginnend mit einem Zeitpunkt  $t_1$  und einem Anfangszeitpunkt  $t_0$  mit einer benutzerdefinierten Fensterbreite einge-

geben und daraus die Parameter  $N$  und  $ET$  berechnet. Die Grundannahme der Berechnung von  $N$  und  $ET$  besteht darin, dass in einem kurzen Zeitschritt entweder Niederschlag oder Evapotranspiration, jedoch nicht beides zugleich stattfindet. Aufgrund dieser Annahme wird jede Änderung der Summe aus  $\Delta S$  und  $SW$  als  $ET$  oder  $N$  interpretiert (Gleichung 1).

Gleichung 1:

$$N = \Delta S + SW \text{ wenn } \Delta S + SW > 0 \text{ bzw. } N = 0 \text{ wenn } \Delta S + SW \leq 0$$

$$ET = \Delta S + SW \text{ wenn } \Delta S + SW < 0 \text{ bzw. } ET = 0 \text{ wenn } \Delta S + SW \geq 0$$

Dabei sollen eine Überschätzung sowie Unterschätzung von  $N$  und  $ET$  vermieden werden (Peters et al. 2016). Aufgrund der Geometrie des Lysimeters und der Dichte des Wassers ist der kumulierte Fluss in kg gleich dem kumulierten Fluss in mm (Peters et al. 2016).

Im Falle von fehlenden Lysimetergewichten (Speicheränderung  $\Delta S$ ) sowie Sickerwasserausflüssen ( $SW$ ) und dadurch nicht möglich zu berechnenden Niederschlägen und/oder Evapotranspirationen wird der fehlende Niederschlagswert von einer ca. 100 m nördlich der ClimGrass-Anlage gelegenen Wetterstation der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) herangezogen. Die Evapotranspiration wird nach der Penman Monteith Gleichung (Allen et al. 2006) mit den dafür wesentlichen meteorologischen Parametern, gemessen an der ZAMG Wetterstation am Standort, berechnet.

Nach einem abschließenden Plausibilitätscheck erfolgt die Analyse der Wasserbilanzgrößen  $N$ ,  $ET$ ,  $SW$  und  $\Delta S$  sowie die Berechnung der Wasserbilanz in unterschiedlichsten zeitlichen Auflösungen (Gleichung 2).

Gleichung 2:

$$N - ET - SW \pm \Delta S = 0$$

## Ergebnisse und Diskussion

Der Vergleich der Wasserbilanzgrößen der unterschiedlich behandelten Varianten zeigt in den Vegetationsperioden 2016 und 2018 deutliche Unterschiede in den Evapotranspirations- und Sickerwassermengen. Die Niederschlagsmen-

gen hingegen fallen auf allen Parzellen erwartungsgemäß recht ähnlich aus. Aufgrund der geringeren nächtlichen Taubildungen an beheizten Parzellen, ergeben sich aber auch beim Niederschlag Unterschiede von bis zu 10%.

Die kumulative Evapotranspiration liegt in der Vegetationsperiode 2016 an der beheizten und begasten Variante (C2T2) bei 687 mm und demnach um knapp 90 mm höher als am Referenzlysimeter (C0T0). Die rein beheizte Variante (C0T2) liefert noch höhere Evapotranspirationsmengen von 734 mm, die unbeheizte, aber begaste Variante (C2T0) eine Evapotranspiration von nur 548 mm (Abbildung 3).

Dementsprechend zeigen die gemessenen Sickerwassermengen von April bis Oktober 2016 deutliche Unterschiede an den unterschiedlich behandelten Lysimetern. Die Variante C2T2 erzielt Mengen von 93 mm, ähnlich der C0T2-Variante mit 66 mm, das Referenzlysimeter C0T0 weist hingegen Sickerwassermengen von 209 mm auf, das C2T0 behandelte Lysimeter sogar über 300 mm.

Die Niederschläge liegen an der C2T2-Variante bei 792 mm, bei der C0T0 ergeben sich 821 mm. Die Differenz von rund 30 mm lässt sich durch die an der beheizten und begasten C2T2-Variante errechnete nächtliche Evaporation erklären: Gegenüber den unbeheizten Lysimetern erhöht die Beheizung die nächtliche Evaporation und vermindert damit den abgesetzten Niederschlag (Tau).

In Summe ergibt sich an der C2T2-Variante ein Überschuss des jährlichen Niederschlags gegenüber der Evapotranspiration von 105 mm, während die für das Referenzlysimeter C0T0 berechnete Differenz 233 mm beträgt. Die C0T2-Variante liegt dagegen bei nur 57 mm, die höchsten Werte werden bei der begasten, aber unbeheizten C2T0-Variante errechnet mit 330 mm. Die gesamte Vegetationsperiode 2016 zeichnet sich demnach (wie auch jene in den Jahren 2015 und 2017) bei allen unterschiedlichen Behandlungsstufen durch einen deutlichen Überschuss des Niederschlags gegenüber der Evapotranspiration aus, was einer für das inneralpine Dauergrünland typischen positiven klimatischen Wasserbilanz entspricht (Abbildung 4).

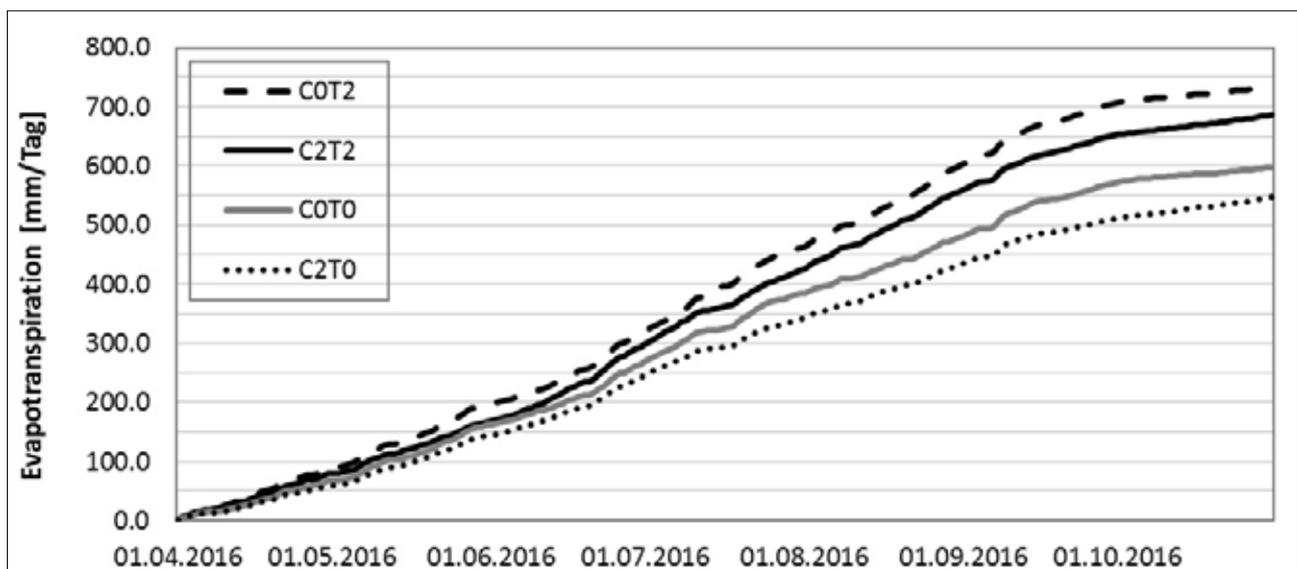


Abbildung 3: Kumulative (durchschnittliche) Evapotranspiration in der Vegetationsperiode 2016 an allen vier unterschiedlichen Behandlungsstufen (C2T2/C0T0/C0T2/C2T0).

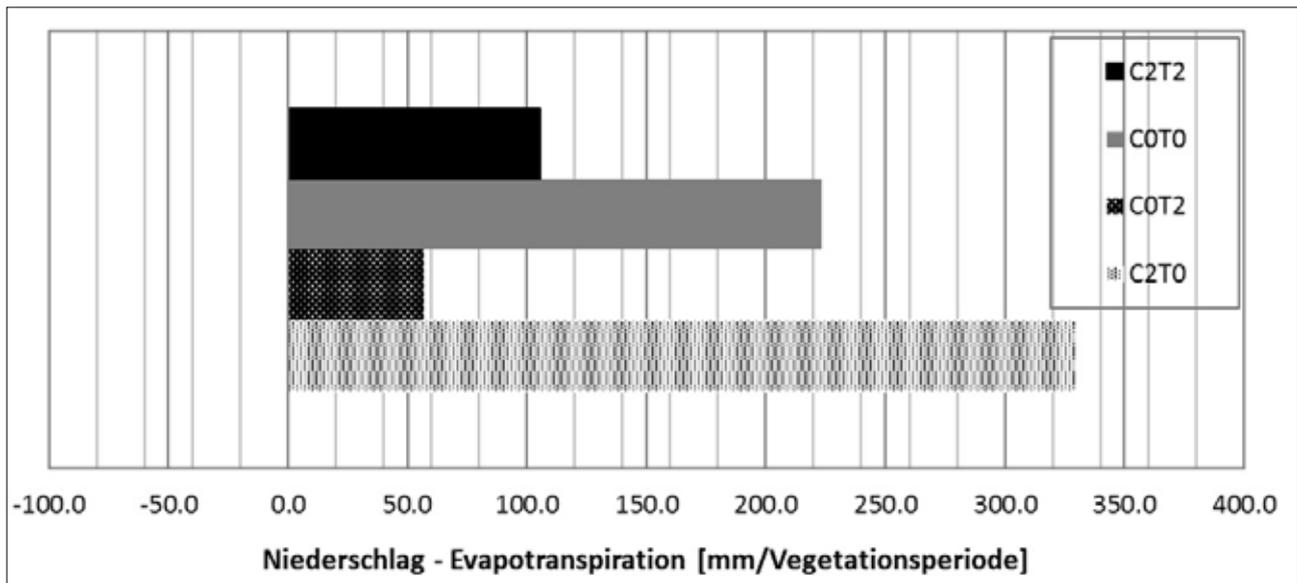


Abbildung 4: Absolute Differenz aus Niederschlag minus Evapotranspiration in der Vegetationsperiode 2016 an allen vier unterschiedlichen Behandlungsstufen (C2T2/C0T0/C0T2/C2T0).

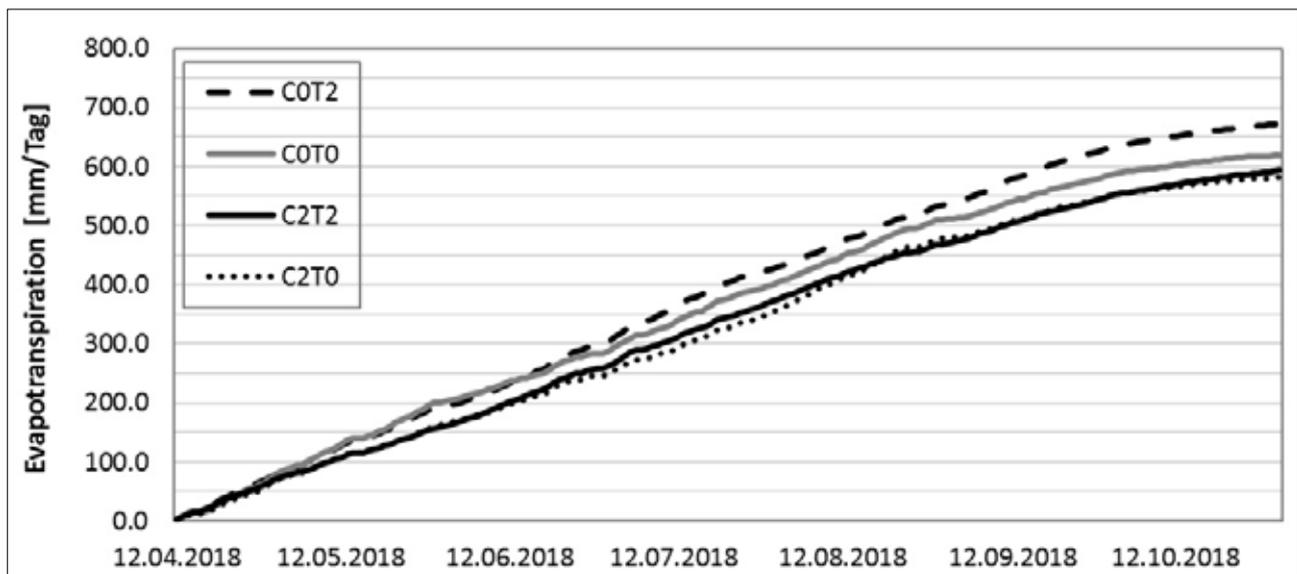


Abbildung 5: Kumulative (durchschnittliche) Evapotranspiration in der Vegetationsperiode 2018 an allen vier unterschiedlichen Behandlungsstufen (C2T2/C0T0/C0T2/C2T0).

Die für das Jahr 2016 auf den unterschiedlich behandelten Lysimetern erhaltenen Werte der Wasserbilanzgrößen verdeutlichen den Einfluss erhöhter Temperaturen und/oder erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentrationen an einem alpinen Grünlandstandort unter den derzeit typischen Witterungsbedingungen. Die Temperaturerhöhung verstärkt die Evapotranspiration (bzw. auch nächtliche Evaporation) und vermindert entsprechend die Sickerwassermenge, während sich bei erhöhten CO<sub>2</sub>-Konzentrationen die Evapotranspiration (bzw. auch nächtliche Evaporation) verringert und die Sickerwassermenge erhöht. Die Kombination beider Faktoren führt unter den 2016 gegebenen Bedingungen in Summe zu einer geringeren Wasserverfügbarkeit, das heißt der Effekt der Temperaturerhöhung scheint zu überwiegen.

Der Sommer 2018, geprägt durch seit dem Frühjahr langanhaltende Schönwetterperioden verbunden mit ungewöhn-

lich hohen Temperaturen und geringen Niederschlägen speziell nördlich des Alpenhauptkammes, zeigt an der C2T2-Variante Evapotranspirationen von 594 mm, die C0T0-Variante liefert hingegen in dieser Periode etwas höhere Mengen von 620 mm (Abbildung 5).

Die von April bis Oktober 2018 gemessenen Sickerwassermengen sind aufgrund einer langanhaltenden Trockenperiode an allen Lysimetern gering. Die Sickerwassermengen betragen an der C2T2-Variante nur 1 mm, die C0T0-Variante liefert 9 mm. An der C0T2-Variante werden 2 mm, an der C2T0-Variante 16 mm ermittelt.

Für die Niederschläge werden am C2T2 behandelten Lysimeter 605 mm gemessen, wovon 85 mm allein an einem einzigen Tag im Oktober fielen. Die unbeheizte C0T0-Variante ergibt um 24 mm mehr, aufgrund des hier in den Sommernächten auftretenden abgesetzten Niederschlags in Form von Tau.

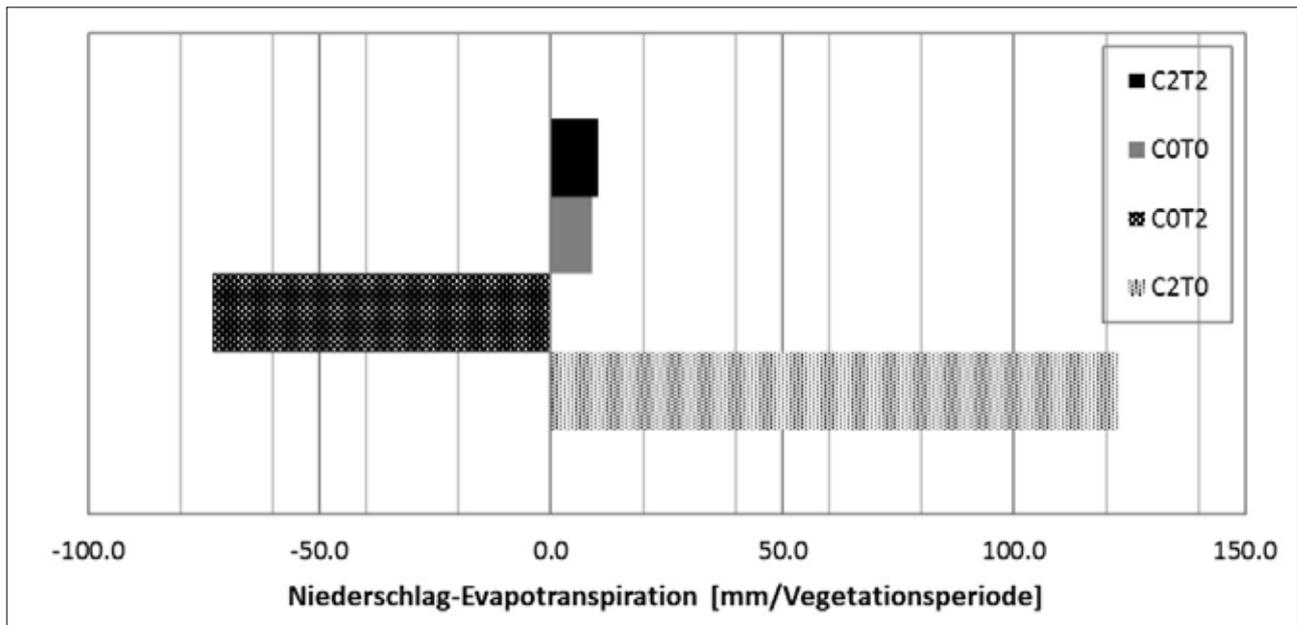


Abbildung 6: Absolute Differenz aus Niederschlag minus Evapotranspiration in der Vegetationsperiode 2018 an allen vier unterschiedlichen Behandlungsstufen (C2T2/C0T0/C0T2/C2T0).

Die Differenz zwischen Niederschlag und Evapotranspiration ist in dieser Periode äußerst knapp positiv und beträgt an der C2T2-Variante 10 mm sowie an der C0T0-Variante 9 mm. Seit Beginn der Messungen wird an der C0T2-Variante erstmals ein Defizit des Niederschlags gegenüber der Evapotranspiration beobachtet, sodass eine negative klimatische Wasserbilanz von -73 mm erzielt wird. Das Wasser verdunstete an dieser Parzelle also in weitaus größeren Mengen als Niederschlag fiel. Das C2T0 behandelte Lysimeter erhält dagegen einen Niederschlagsüberschuss (positive klimatische Wasserbilanz) von +123 mm (Abbildung 6).

Das Jahr 2018 unterscheidet sich von den durch das Jahr 2016 repräsentierten typischen Witterungsbedingungen an diesem alpinen Standort in zweierlei Weise. Zum einen weisen die Sommermonate von April bis Oktober 2018 eine um 2°C höhere Durchschnittstemperatur auf als im Referenzzeitraum 1981-2010. Zum anderen sind die Niederschlagsmengen 2018 ungewöhnlich gering; beispielsweise ergibt sich aus den hier beschriebenen Lysimeterdaten ein Unterschied von knapp 200 mm gegenüber den berechneten Lysimeterdaten von 2016 und gegenüber dem langjährigen Mittel (an nördlich des Alpenhauptkammes gelegenen Wetterstationen) von bis zu 300 mm. Die klimatische Wasserbilanz wird also sowohl durch eine infolge erhöhte Temperatur verstärkte Evapotranspiration als auch durch geringere Niederschläge verringert, sodass nahezu keine Sickerwasserbildung möglich ist.

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. Bemerkenswerterweise ergibt sich aber bei der Kombination von Beheizung und CO<sub>2</sub>-Begasung ein geringer Überschuss des Niederschlags gegenüber der Evapotranspiration, der etwa dem der Referenzparzelle entspricht. Unter den extremen Bedingungen des Jahres 2018

scheint also der Effekt der erhöhten CO<sub>2</sub>-Konzentration jenen der Temperaturerhöhung etwa zu kompensieren. Auch der vergleichsweise hohe Niederschlagsüberschuss auf den begasten, aber unbeheizten Parzellen unterstützt dies und legt nahe, dass der verdunstungsmindernde Effekt erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentrationen unter ungewöhnlich trockenen und warmen Witterungsbedingungen an Bedeutung gewinnt.

## Schlussfolgerungen

Die Klimaerwärmung ist besonders in alpinen Gebieten aufgrund der vertikalen Höhengliederung, welche verschiedene Klimazonen umfasst, stark ausgeprägt. Das Jahr 2018 weist in den Monaten von April bis Oktober am Untersuchungsstandort eine um 2°C höhere Durchschnittstemperatur als im Referenzzeitraum 1981-2010 auf, zugleich werden nördlich des Alpenhauptkammes gegenüber dem langjährigen Durchschnitt bis zu mehr als 300 mm geringere Niederschlagsmengen beobachtet. Dementsprechend werden im Jahr 2018 nur Sickerwassermengen von wenigen Millimetern ermittelt, beispielsweise beim Referenzlysimeter 9 mm, beim beheizten und CO<sub>2</sub> begasten Lysimeter sogar nur 1 mm. Die Lysimetauswertungen zeigen sowohl durch den Vergleich des Jahres 2018 mit dem etwa typischen Witterungsbedingungen repräsentierenden Jahr 2016 als auch durch den Vergleich von beheizten und unbeheizten Varianten, dass erhöhte Temperaturen die Evapotranspiration auf alpinem Dauergrünland verstärken und damit zu einer Abnahme der klimatischen Wasserbilanz führen. Die Trockenheit im Jahr 2018 verstärkt diesen Effekt und führt zu ungewöhnlich niedrigen Matrixpotentialen und geringen Bodenwassergehalten.

Die Auswertung der Wasserbilanzen von Lysimetern, die mit CO<sub>2</sub> begast werden, zeigt, dass die negativen Effekte von Erwärmung und Trockenheit auf die klimatische Wasserbilanz durch die verdunstungsmindernde Wirkung erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentrationen zumindest teilweise kompensiert werden kann. Der Effekt erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentrationen

auf die Wasserbilanz scheint besonders unter den extremen Witterungsbedingungen des Jahres 2018 ausgeprägt, ist jedoch weniger stark unter den für das derzeitige Klima eher typischen Verhältnissen des Jahres 2016.

Die möglichen negativen Auswirkungen der Klimaerwärmung in Bezug auf den Bodenwasserhaushalt werden durch die hier aufgezeigten Folgen der zuletzt beobachteten langanhaltenden Wetterlagen im Jahr 2018 mit extremen Trockenheitsperioden im Sommer veranschaulicht. Die Kombination von hohen Temperaturen und ausbleibenden Niederschlägen kann offenbar auch an grundsätzlich wasserreichen, alpinen Standorten zumindest temporär zu Defiziten in der klimatischen Wasserbilanz führen, deren Folgen für alpine Ökosysteme und die Landwirtschaft weiterer Untersuchung bedürfen.

Die aus dieser Untersuchung erhaltenen Informationen über Auswirkungen von veränderten Klimabedingungen auf Wasserbilanzgrößen alpiner Grünlandflächen sollen weiterführend verwendet werden, um auf wichtige Maßnahmen für das Pflanzenwachstum und damit der Bewirtschaftung schließen zu können. Insbesondere ist damit zu rechnen, dass sich als Folge der veränderten Klimabedingungen und der dadurch veränderten Wasserbilanz das Pflanzenwachstum und damit auch die Wasseraufnahme durch die Wurzeln sowie die bodenhydraulischen Eigenschaften ändern. Die Ergebnisse dieser Arbeit tragen daher dazu bei, hydrologische Modelle zu entwickeln, welche klimainduzierte Veränderungen im Boden, in der Vegetation und Bodennutzung berücksichtigen.

## Danksagungen

Die technische Anlage wurde mit Mitteln der HBLFA Raumberg-Gumpenstein bzw. des BMLFUW finanziert. Weiters danken wir METER Group AG (München, Deutschland) für die Errichtung der Lysimeterstation sowie bei der Mithilfe der Einrichtung der Infrarot- und Begasungsanlage. Das Dissertationsprojekt wurde von der Österreichischen Akademie der Wissenschaften an Veronika Slawitsch verliehen.

## Literatur

- Allen R.G. et al. (2006) A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ETo by the FAO56 Penman-Monteith method. *Agricultural Water Management* 81(1–2), 1-22.
- 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., Slawitsch V., Herndl M., Graf A., Vereecken H., Pütz T. (2018) Determining dew and hoar frost formation for a low mountain range and alpine grassland site by weighable lysimeter. *Journal of Hydrology*, 372-381.
- Herndl M., Pötsch E.M., Bohner A., Kandolf M. (2011) Lysimeter als Bestandteil eines technischen Versuchskonzeptes zur Simulation der Erderwärmung im Grünland. *Gumpensteiner Lysimetertagung* 14, 119-126.
- IPCC (2018) Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger. In: 1,5 °C globale Erwärmung. Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, ProClim, Österreichisches Umweltbundesamt, Bonn/Bern/Wien, November 2018.
- Kimball B.A., Conley M.M., Wang S., Lin X., Luo C., Morgan J., Smith, D. (2008) Infrared heater arrays for warming ecosystem field plots. *Global Change Biology* 14 (2), 309-320.
- Miglietta F., Peressotti A., Vaccari F.P., Zaldei A., de Angelis P., Scarascia Mugnozza G. (2001) Free-air CO<sub>2</sub> enrichment (FACE) of a poplar plantation: the POPFACE fumigation system. *New Phytologist* 150, 465-476.
- Parton W. J., Morgan J. A., Wang G., Del Grosso S. (2007) Projected ecosystem impact of the Prairie Heating and CO<sub>2</sub> Enrichment experiment. *New Phytologist* 174 (4), 823-834.
- Peters A., Nehls T., Wessolek G. (2016) Technical note: Improving the AWAT filter with interpolation schemes for advanced processing of high resolution data. *Hydrological Earth System Sciences* 20 (6), 2309-2315.
- Peters A., Groh J., Schrader F., Durner W., Vereecken H., Pütz T. (2017) Towards an unbiased filter routine to determine precipitation and evapotranspiration from high precision lysimeter measurements. *Journal of Hydrology* 549, 731-740.
- Pötsch E.M., Herndl M., Schaumberger A. (2019) Produktivität von Grünland unter zukünftigen Klimabedingungen. 25. Österreichische Wintertagung, 23-25.
- Schaumberger A. (2011) Räumliche Modelle zur Vegetations- und Ertragsdynamik im Wirtschaftsgrünland. Dissertation, Technische Universität Graz, 264 pp.
- Slawitsch V., Birk S., Herndl M. (2016) A lysimeter-based approach to quantify the impact of climate change on soil hydrological processes. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 18, EGU2016-15838.

