

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 Irdning-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 Versuchspartzellen einem mehrwöchigen Trockenstress ausgesetzt wurden. Diese Versuchspartzellen erhielten in diesen 8 Wochen nur knapp 40 mm Niederschlag im Vergleich zu 250 mm, die den Partzellen 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 dürregetressten Partzellen 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).

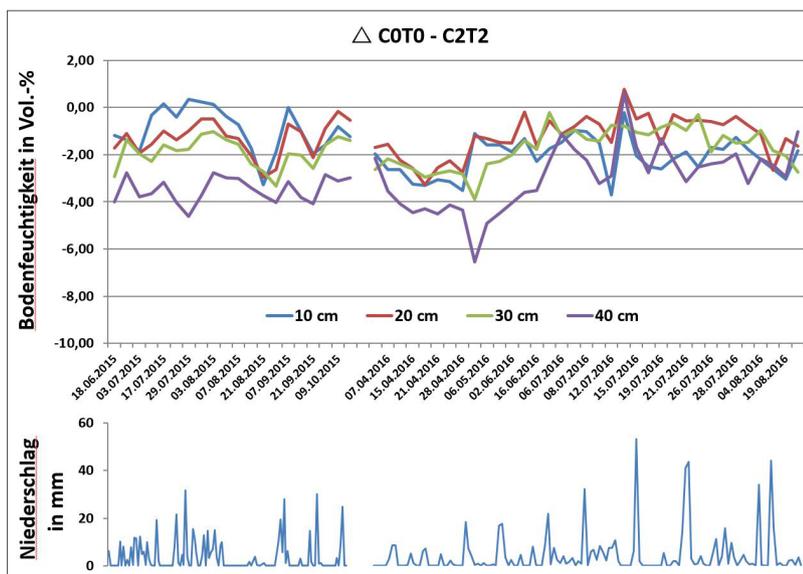


Abbildung 1: Differenz im Bodenwassergehalt zwischen ambienten (C0T0) und zukünftigen (C2T2) Klimabedingungen bei natürlichen Niederschlagsverhältnissen in zwei unterschiedlichen Beobachtungsperioden.

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.

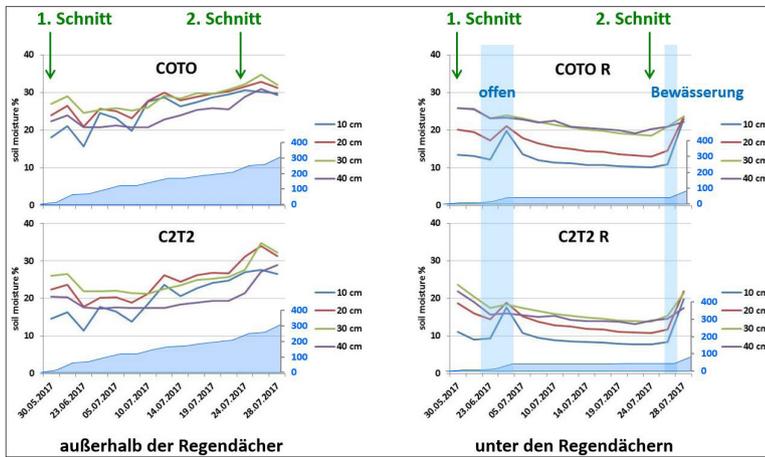


Abbildung 2: Verlauf des Bodenwassergehaltes unter ambienten (C0T0) und zukünftigen (C2T2) Klimabedingungen bei natürlichen Niederschlagsverhältnissen (linke Hälfte) und unter simulierten Dürrebedingungen (rechte Hälfte) im Versuchsjahr 2017.

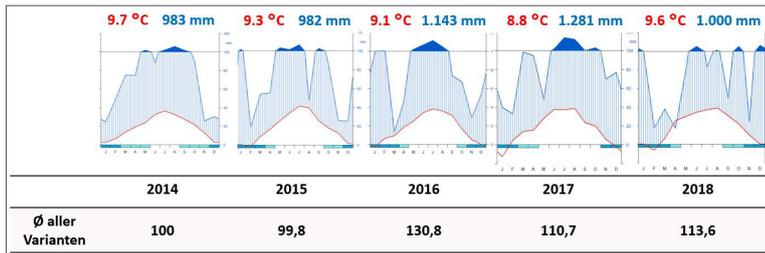


Abbildung 3: Witterungs- und Ertragsverlauf im Versuchszeitraum 2014 – 2018 (Basisjahr 2014).

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

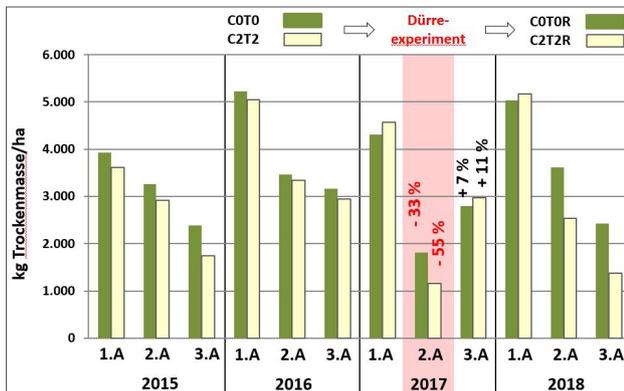


Abbildung 4: Ertragsverlauf der Varianten im Versuchszeitraum 2015 – 2018 mit dem Dürreexperiment zum 2. Aufwuchs 2017 (die beiden Varianten erhalten ab diesem Zeitpunkt eine eigene Codierung).

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 dürregepressten 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 dürregepressten 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 dürregepressten 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 dürregepressten 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 dürregepressten 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.