



22. Alpenländisches Expertenforum

Trockenheit als neue Herausforderung der
Grünlandbewirtschaftung

08. November 2022

HBLFA Raumberg-Gumpenstein

22. Alpenländisches Expertenforum

Trockenheit als neue Herausforderung der
Grünlandbewirtschaftung

Impressum

Medieninhaber und Herausgeber:
HBLFA Raumberg-Gumpenstein
Landwirtschaft
Raumberg 38, A-8952 Irdning-Donnersbachtal
raumberg-gumpenstein.at
Für den Inhalt verantwortlich:
die AutorInnen
Gestaltung: Brigitte Marold
ISBN-13: 978-3-902849-98-4
Alle Rechte vorbehalten
Irdning-Donnersbachtal 2022

Inhaltsverzeichnis

Erkenntnisse zu Klimawandelfolgen und Anpassung aus dem Weltklimabericht 2022	5
B. Bednar-Friedl	
Klimawandel und Entwicklung von Extremereignissen mit Fokus auf Trockenheit	9
K. Haslinger	
Auswirkungen von Dürren auf den Boden- und Grundwasserhaushalt	13
S. Birk	
Sommerdürre und die Resilienz von Grünland im globalen Wandel	17
M. Bahn und das ClimGrass-Team	
Bodenwasserflüsse in Trockenperioden unter Klimawandelbedingungen	23
M. Herndl, M. Vremec und M. Schink	
Auswirkungen von Trockenheit auf Grünlandertrag und Futterqualität	27
A. Schaumberger, A. Klingler und M. Herndl	
Anpassungsmöglichkeiten der Grünlandwirtschaft an die Trockenheit	31
A. Klingler, L. Gaier, W. Starz und A. Schaumberger	
Anforderungen an den Pflanzenbestand: Mischungen, Arten und Sorten	35
L. Gaier, W. Graiss und B. Krautzer	
Erfahrungen zur Bewässerung von Grünland im Alpenraum	39
G. Peratoner und M. Thalheimer	

Erkenntnisse zu Klimawandelfolgen und Anpassung aus dem Weltklimabericht 2022

Birgit Bednar-Friedl^{1*}

Zusammenfassung

Bereits heute hat der Klimawandel weitreichende Folgen auf Europas Natur, Bevölkerung, Infrastruktur und Wirtschaft. In Zukunft sind es v.a. vier Hauptrisiken die vom Klimawandel verursacht werden: Auswirkungen durch Hitze auf die menschliche Gesundheit und Ökosysteme; landwirtschaftliche Ernteaufschläge durch Trockenheit in Verbindung mit Hitze; Wasserknappheit; sowie Überflutungen an Küsten, Flüssen und durch Starkregen. Obwohl Europa weltweit führend ist bei der Anpassung an den Klimawandel und es besteht umfangreiches Wissen über die Wirksamkeit und Machbarkeit von unterschiedlichsten Maßnahmen. Dennoch besteht eine Lücke zwischen Anpassungsbedarf und Stand der Umsetzung. Bei starker globaler Erwärmung sind zudem einige Anpassungsmaßnahmen durch die Verfügbarkeit von Wasser und Land nicht oder nur eingeschränkt nutzbar. Umfassender Klimaschutz ist daher zentral.

Schlagwörter: Klimawandelfolgen, Europa, Anpassung

Die globale Durchschnittstemperatur hat sich bereits um rund 1.1°C gegenüber der vorindustriellen Zeit erwärmt. Der vom Menschen verursachte Klimawandel wirkt sich bereits heute auf viele Wetter- und Klimaextreme in allen Regionen der Welt aus – in Form von Hitzewellen, Starkniederschlägen, Dürren und tropischen Wirbelstürmen. Mit der zunehmenden globalen Erwärmung kommt es zu einer Zunahme in der Häufigkeit und Intensität von Hitzeextremen, Starkniederschlägen sowie regional zu Zunahmen von Trockenheit und Dürren, eine Zunahme des Anteils heftiger tropischer Wirbelstürme sowie Rückgänge des arktischen Meereises, von Schneebedeckung und Permafrost (IPCC 2021).

Bereits bei einer Erwärmung von derzeit 1,1°C kommt es zu weitreichenden Folgen für Ökosysteme, Infrastruktur, und menschliche Gesundheit – auch in Europa (IPCC 2022, Bednar-Friedl et al. 2022). Für Europa sind es v.a. vier Hauptrisiken, mit denen sich Politik, Wirtschaft und Gesellschaft in den nächsten Jahrzehnten auseinandersetzen werden müssen (Bednar-Friedl et al. 2022) (*Abbildung 1*):

- Auswirkungen durch Hitze auf die menschliche Gesundheit und Ökosysteme,
- Landwirtschaftliche Ernteaufschläge durch Trockenheit in Verbindung mit Hitze
- Wasserknappheit
- Überflutungen an Küsten, Flüssen und durch Starkregen.

Die Zahl der Todesfälle und Menschen mit Hitzestress steigt bei 3 °C um das Zwei- bis Dreifache gegenüber 1,5 °C globaler Erwärmung. Risikofolgen werden in Süd-, West- und Mitteleuropa sowie in europäischen Städten schneller schwerwiegend. Der Temperaturanstieg wird den geeigneten Lebensraum für terrestrische und marine Ökosysteme verringern und ihre Zusammensetzung irreversibel verändern, mit zunehmenden Auswirkungen über 2 °C globaler Erwärmung. Waldbrandgefährdete Gebiete werden sich über ganz Europa ausdehnen und die Biodiversität und Kohlenstoffsinken bedrohen (Bednar-Friedl et al. 2022).

¹ Universität Graz, Institut für Volkswirtschaftslehre, Universitätsstraße 15, A-8010 GRAZ und Wegener Center für Klima und Globalen Wandel, Brandhofgasse 5, A-8010 GRAZ

* Ansprechpartner: Dr. Birgit Bednar-Friedl, email: birgit.friedl@uni-graz.at

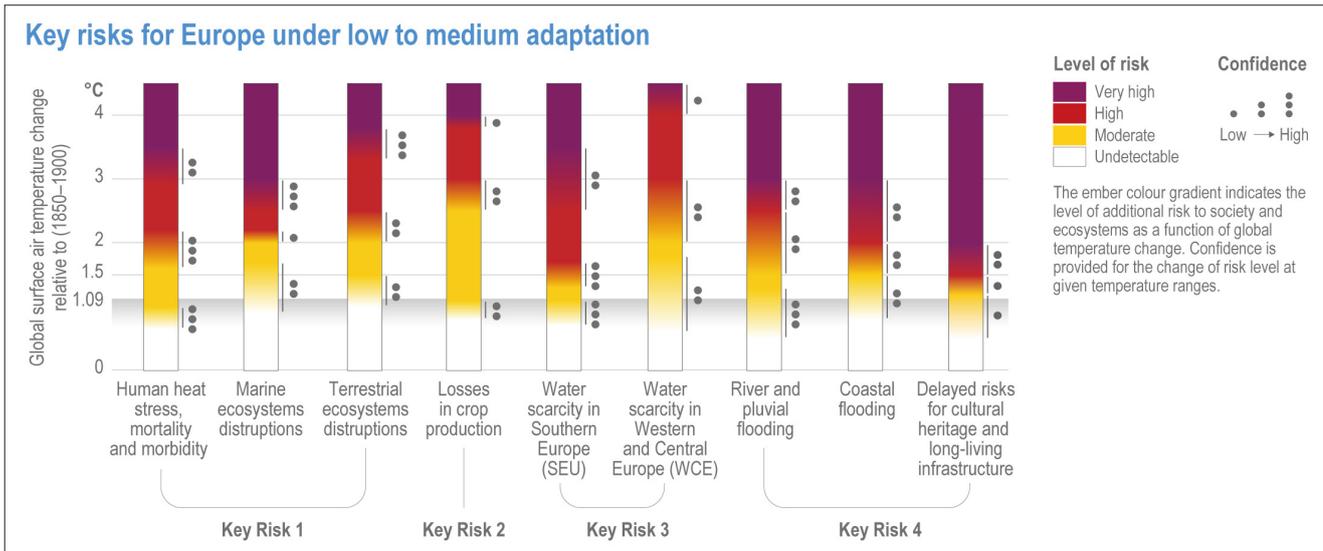


Abbildung 1: Die 4 Hauptrisiken für Europa. Quelle: IPCC (2022), Abbildung 13-28.

Aufgrund einer Kombination aus Hitze und Trockenheit werden für die meisten europäischen landwirtschaftlichen Produktionsgebiete im 21. Jahrhundert erhebliche Produktionsverluste prognostiziert. Ertragsverluste von 50 % für Mais werden als Reaktion auf eine Erhöhung der globalen Durchschnittstemperatur um 3 °C prognostiziert, insbesondere in Südosteuropa. Während Bewässerung eine effektive Anpassungsoption für die Landwirtschaft ist, wird die Anpassung durch Bewässerung zunehmend durch die Wasserverfügbarkeit eingeschränkt, insbesondere bei einer Erwärmung über 3 °C (Bednar-Friedl et al. 2022).

Bei 2 °C globaler Erwärmung wird mehr als ein Drittel der Bevölkerung in Südeuropa Wasserknappheit ausgesetzt sein; bei 3 °C globaler Erwärmung verdoppelt sich dieses Risiko in Südeuropa und breitet sich auf West- und Mitteleuropa sowie zahlreiche europäische Städte aus. Gleichzeitig wird die Anpassung aufgrund geophysikalischer und technologischer Grenzen zunehmend schwieriger; harte Grenzen der Anpassung werden wahrscheinlich zuerst in Teilen Südeuropas erreicht (Bednar-Friedl et al. 2022).

Aufgrund von Erwärmung, Niederschlagsänderungen und Meeresspiegelanstieg werden die Risiken für Menschen und Infrastrukturen durch Überschwemmungen an Küsten und entlang von Flüssen in Europa zunehmen. Die Risiken von Überschwemmungen werden mit dem zunehmenden Tempo von des Meeresspiegelanstiegs an Europas Küsten zunehmen. Über 3 °C globaler Erwärmung können sich die Schäden, deren Kosten und die von Niederschlägen und Überschwemmungen betroffenen Menschen verdoppeln. Hochwasserschäden an Küsten werden sich bis zum Ende des 21. Jahrhunderts mindestens verzehnfachen, und sogar noch mehr oder früher mit momentan bestehenden Anpassungs- und Minderungsmaßnahmen.

Es gibt heute ein wachsendes Spektrum an Anpassungsmöglichkeiten, um zukünftigen Klimarisiken zu begegnen. Beispiele für effektive Anpassungsmaßnahmen an landwirtschaftliche Ertragsausfälle sind eine ganzjährige Vegetationsbedeckung, Verbesserungen in der Trockenresistenz der Kulturpflanzen, Veränderungen in Saat- und Erntezeitpunkten sowie Diversifizierung, Agroökologie und Agroforstwirtschaft. Bewässerung sehr effektiv, aber insbesondere bei einer Erwärmung über 3 °C beschränkt durch die Wasserverfügbarkeit. Wasserknappheit kann sowohl durch nachfrageseitige Maßnahmen (Effizienzverbesserungen, Vermeidung von Verlusten, Bepreisung) als auch durch angebotsseitige Maßnahmen (Wasserspeicherung, Wiederverwendung von Regen- und Brauchwasser), Dürre-Frühwarnsysteme sowie Landnutzungsänderungen begegnet werden. Große bauliche Maßnahmen sowie Landnutzungsänderungen sind jedoch durch lange Vorlauf-

zeiten gekennzeichnet und müssen daher frühzeitig angebahnt werden (Bednar-Friedl et al. 2022)

In vielen Teilen Europas reichen bestehende und geplante Anpassungsmaßnahmen nicht aus, um das Restrisiko zu vermeiden, insbesondere oberhalb von 1,5 °C globaler Erwärmung. Das Restrisiko kann zu Verlusten von Lebensräumen und Ökosystemleistungen, hitzebedingten Todesfällen, Ernteaussfällen, Wasserrationierung während Dürren in Südeuropa sowie Landverlust führen. Oberhalb von 3 °C globaler Erwärmung ist eine Kombination aus vielen, vielleicht sogar allen Anpassungsoptionen erforderlich, einschließlich transformativer Änderungen, um das Restrisiko zu reduzieren.

Insbesondere bei einer Erwärmung von 3 °C und mehr kommt es zu Grenzen der Anpassung: viele Anpassungsmaßnahmen erfordern Wasser und Land – beides Faktoren, die bei starker Erwärmung nicht ausreichend verfügbar sein werden. Gesellschaftliche Ausverhandlungsprozesse werden klären müssen, welche Gruppen, Sektoren und Regionen knappe Ressourcen bekommen und welche nicht (Bednar-Friedl et al. 2022).

Europa ist im Bereich Anpassung global gesehen Vorreiter: es gibt in allen Mitgliedsstaaten Anpassungsstrategien und Pläne, Abschätzungen über die zentralen Risiken und Wissen über erforderliche Maßnahmen, es gibt viele erfolgreiche Pilotprojekte, beispielsweise das Themse-Hochwasserprojekt in London. Dennoch hinkt die Umsetzung dem Wissen hinterher: Ausreichende Anpassung scheitert u.a. an einer unzureichenden Mobilisierung von Finanzmitteln, fehlendem Engagement und geringem Dringlichkeitsbewusstsein. Staatliche Anreize (beispielsweise Empfehlung zur Integration von Klimarisiko in das finanzielle Reporting) und Druck seitens der Aktionäre oder von Konsument:innen fördern Anpassung in der Privatwirtschaft (Bednar-Friedl et al. 2022).

Im Pariser Klimaabkommen haben sich 2015 alle Staaten verpflichtet, dass die globale Erwärmung auf möglichst 1.5 °C limitiert werden soll. Gelingt diese Transformation nicht, werden wir die Welt, wie wir sie heute kennen, in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts unwiederbringlich verloren haben (IPCC 2022). Nicht-Handeln in der Klimapolitik entzieht uns die Lebensgrundlage und trägt zur globalen Ungleichheit bei – mit möglichen Rückwirkungen auf die Stabilität der Weltordnung, wie auch im Risikobericht des Weltwirtschaftsforums betont wird (World Economic Forum 2022).

Literatur

IPCC (2021) Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 3–32, doi:10.1017/9781009157896.001.

IPCC (2022) Summary for Policymakers [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem (eds.)]. In: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 3-33, doi:10.1017/9781009325844.001.

Bednar-Friedl B., Biesbroek R., Schmidt D.N., Alexander P., Børsheim K.Y., Carnicer J., Georgopoulou E., Haasnoot M., Le Cozannet G., Lionello P., Lipka O., Möllmann C., Muccione V., Mustonen T., Piepenburg D., Whitmarsh L. (2022) Europe. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 1817-1927, doi:10.1017/9781009325844.015.

Bezner Kerr R., Hasegawa T., Lasco R., Bhatt I., Deryng D., Farrell A., Gurney-Smith H., Ju H., Lluich-Cota S., Meza F., Nelson G., Neufeldt H., Thornton P. (2022) Food, Fibre, and Other Ecosystem Products. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 713-906, doi:10.1017/9781009325844.007.

World Economic Forum (2022) *The Global Risks Report 2022*, 17th Edition, Geneva, ISBN 978-2-940631-09-4.

Klimawandel und Entwicklung von Extremereignissen mit Fokus auf Trockenheit

Klaus Haslinger^{1*}

Eine Vielzahl an extremen Wetterereignissen hat in den letzten Jahren zu zahlreichen sozioökonomischen und ökologischen Schäden geführt. Die Kategorie Trockenheit und Dürre war dabei jene mit den höchsten Schadenssummen, wobei der Sektor Landwirtschaft am stärksten betroffen war (Österreichische Hagelversicherung 2022). Dürre ist daher ein Phänomen welches in den letzten Jahren zusehends an Aufmerksamkeit gewonnen, und zum Teil ein neues Problembewusstsein geschaffen hat, auch in Bezug auf geänderte klimatische Bedingungen.

Im globalen Maßstab hat die bodennahe Lufttemperatur in den letzten 160 Jahren um ca. 1 °C zugenommen (IPCC 2021). Für Österreich und dem Großteil der europäischen Landmasse ist dieser Anstieg mit etwas mehr als 2 °C etwa doppelt so groß, wobei dieser vor allem in den letzten Jahrzehnten markant war (Abbildung 1).

Der Anstieg der Mitteltemperatur hat zum Teil Einfluss auf die Ausbildung von Extremereignissen im regionalen Kontext. Vor allem jene die direkt durch die Temperatur gesteuert sind, sind stark mit dem generellen Erwärmungstrend im Einklang. Hier sei vor allem die Zunahme an Hitzetagen (Chimani et al. 2016) bei gleichzeitiger Abnahme an Frosttagen zu nennen. Abgesehen von Änderungen der Temperaturextreme, zeigt sich auch ein Trend hin zu intensiveren Niederschlägen. Vor allem auf täglicher Skala ist diese Zunahme robust durch die Datenbasis abgebildet (Chimani et al. 2016), bei sub-tägliche Zeitskalen ist der Befund noch nicht eindeutig, wobei jedoch einige Analysen einen Trend nachweisen (Westra et al. 2014).

In Bezug auf Dürre ist die Attribution zum globalen Klimawandel weniger eindeutig. Im letzten Assessment Report des IPCC (IPCC 2021) ist nur in den Kategorien landwirtschaftliche Dürre (Bodenfeuchte) und ökologische Dürre (Vegetation) ein positiver Trend zu verzeichnen, für die Kategorien meteorologische und hydrologische Dürre zeigen sich keine eindeutigen Trends. Für Österreich lässt sich im Langfristkontext ein leicht negativer Trend in der Kategorie meteorologische Dürre, ausgedrückt durch den Index der klimatischen Wasserbilanz (Vicente-Serrano et al. 2010), erkennen (Abbildung 2). Vor allem seit der sehr feuchten Phase zu Beginn des 20. Jahrhunderts zeichnet sich ein negativer Trend ab. Die Bilanzgröße Niederschlag zeigt allerdings keine Änderung

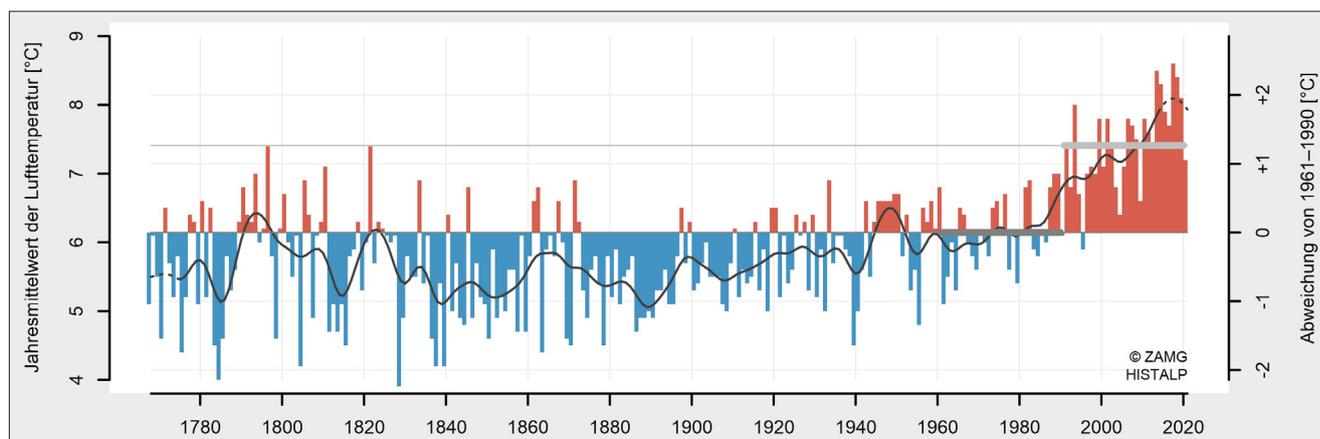


Abbildung 1: Anomalien der Jahresmitteltemperatur in Österreich in Bezug zum Mittel 1961-1990, farbige Balken: Jahreswerte, schwarze Linie: Gauß'scher Tiefpassfilter (20 Jahre); ZAMG 2022.

¹ Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG), Abteilung Klimaforschung, Hohe Warte 38, A-1190 WIEN

* Ansprechpartner: Dr. Klaus Haslinger, email: klaus.haslinger@zamg.ac.at

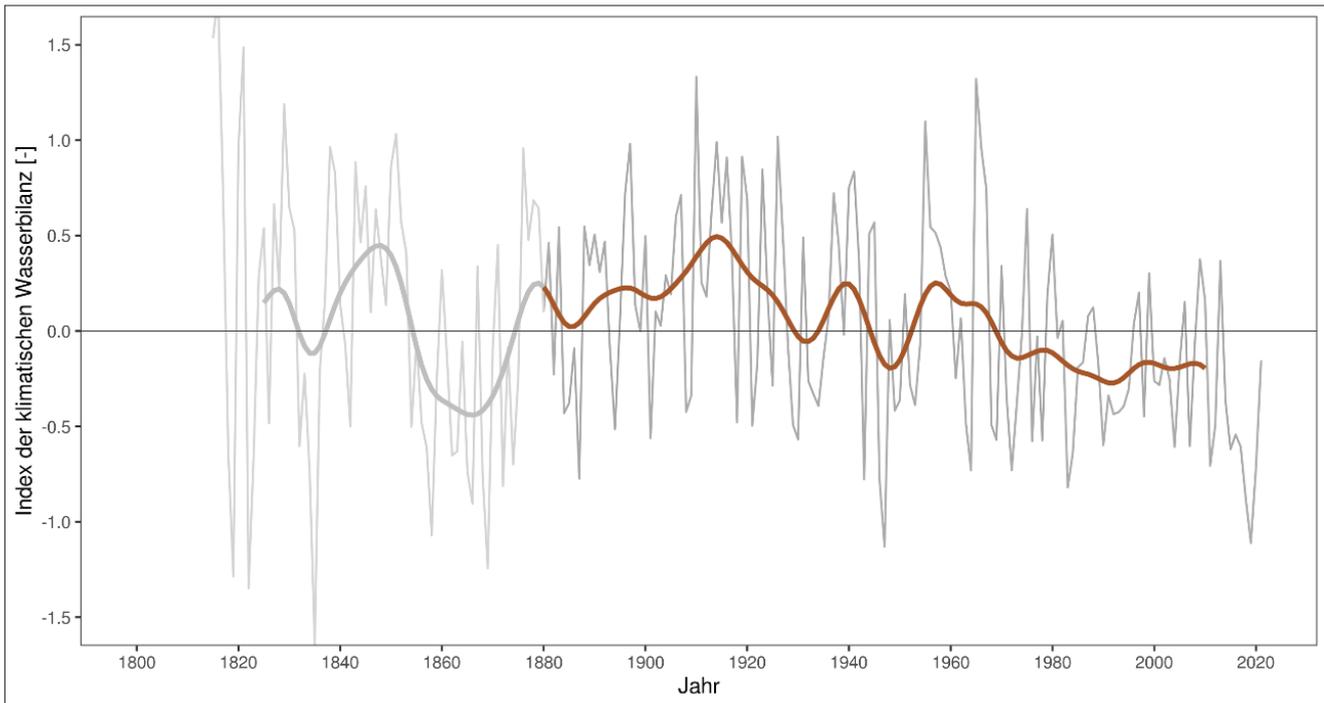


Abbildung 2: Index der klimatischen Wasserbilanz für Österreich, graue Linie: Jahreswerte, braune Linie: Gauß'scher Tiefpassfilter (20 Jahre); hellgrauer Bereich: geringere Dichte an Messstationen vor 1880. Datenquelle: HISTALP (www.zamg.ac.at/histalp), Darstellung: ZAMG.

über diesen Zeitraum (Brunetti et al. 2006). Demgegenüber ist ein eindeutiger positiver Trend in der potenziellen Evapotranspiration (PET) aufgrund steigender Temperaturen zu erkennen. Dieser ist auch für den leicht negativen Trend in der klimatischen Wasserbilanz verantwortlich. Änderungen der PET in den letzten 40 Jahren lassen sich in erster Linie durch einen Anstieg der Globalstrahlung (ca. 80% Anteil) und einen Anstieg der Lufttemperatur (ca. 20% Anteil) erklären, die relative Luftfeuchtigkeit und die mittlere Windgeschwindigkeit haben in diesem Zeitraum keinen signifikanten Einfluss auf die Änderungen der PET (Duethmann & Blöschl 2018).

Wie sich die Gefahr für Dürreereignisse in Zukunft gestalten wird, kann mit regionalisierten Klimaszenarien abgeschätzt werden, wobei unterschiedliche Emissionsszenarien zugrunde gelegt werden. Es werden meist drei Szenarien betrachtet, RCP8.5 („der fossile Weg“, mit weiterer Steigerung der Treibhausgasemissionen), RCP4.5 („der etablierte Weg“, mit der Umsetzung aktueller Klimaschutzbemühungen) und RCP2.6 („Paris Ziel“, mit einer baldigen und deutlichen Reduktion von Treibhausgasemissionen). Auswertungen der nationalen Klimaszenarien für Österreich (OEKS15, Chimani et al. 2016) zeigen je nach Szenario einen mittleren Temperaturanstieg von +1,2 bis +4,0 °C für den Zeitraum 2071-2100 im Vergleich zu 1971-2000. Änderungen der Jahresniederschlagssumme liegen zwischen +10 und +4%, wobei eine Verschiebung in den Jahreszeiten simuliert wird, mit einem Anstieg der Winter- und Frühjahrsniederschläge bei gleichbleibenden bis leicht abnehmenden Sommerniederschlägen.

Die mittlere klimatische Wasserbilanz in einer ganzjährigen Betrachtung wird bis Ende des 21. Jahrhunderts über alle Szenarien und über Österreich gemittelt leicht ansteigen (Haslinger et al. 2022). Ein durch eine weitere Temperaturzunahme induzierter Anstieg der PET wird dabei durch die allgemeine Zunahme der Jahresniederschlagssumme (über) kompensiert.

Bei der Betrachtung der Eintrittswahrscheinlichkeit für extreme Dürresituationen zeigt sich jedoch ein etwas differenzierteres Bild. In einer aktuellen Studie (Haslinger et al. 2022) wurde die Jährlichkeit des Dürreereignisses von 2003 abgeschätzt und danach

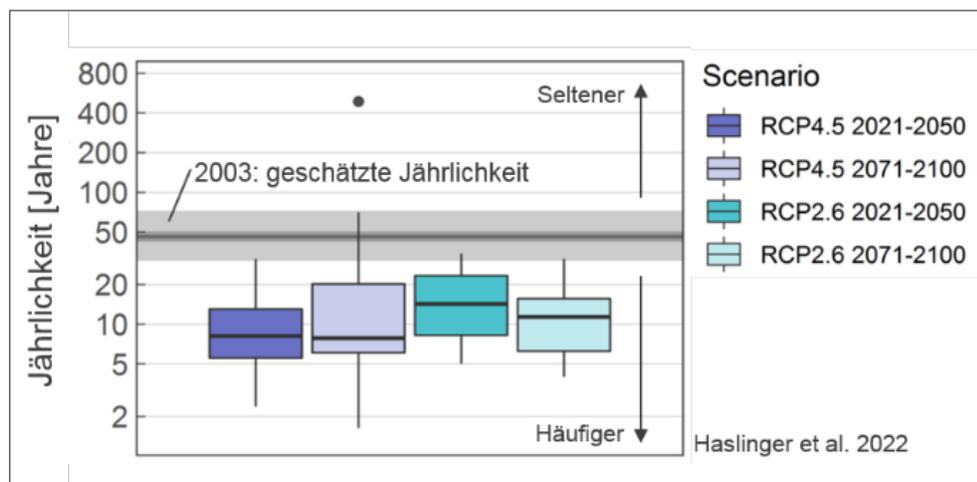


Abbildung 3: Änderung der Jährlichkeit eines Ereignisses von 2003 unter Annahme unterschiedlicher Emissionsszenarien (RCP4.5: blau, RCP2.6: türkis) und Zeiträumen (2021-2050: kräftig, 2071-2100: blass); grauer Balken: geschätzte Jährlichkeit des Ereignisses im Klima von 1981-2010; die Boxplots geben die Schwankungsbreite der Modellrealisationen wieder, der schwarze Balken zeigt den Median. (verändert nach Haslinger et al. 2022).

die Jährlichkeit des Ereignisses auf Basis der Klimaszenarien berechnet. Für die Vergangenheit wurde dabei für 2003 eine Jährlichkeit von ca. 50 Jahren ermittelt. Unter zukünftigen Klimabedingungen sinkt die Jährlichkeit deutlich und rangiert zwischen 8 und 15 Jahren im Ensemble Median über unterschiedlichen Zeiträumen und Emissionsszenarien (Abbildung 3). Die Ursache liegt in einem, durch den Klimawandel bedingten, Anstieg der Jahr-zu-Jahr Variabilität der saisonalen Niederschlagssummen (Ukkola et al. 2020). Mit einem Verbreitern der Wahrscheinlichkeitsdichte in Zukunft steigt somit zwingend auch die Wahrscheinlichkeit für extreme Ereignisse im Vergleich zur Vergangenheit. Dieser Umstand verdeutlicht, dass trotz im Mittel eher steigender Niederschläge die Gefahr für Dürreschäden zunimmt, und dass schon jetzt entsprechende Maßnahmen für eine verantwortungsvolle Nutzung der Ressource Wasser umzusetzen sind, um potentielle Nutzungskonflikte zu minimieren.

Literatur

Brunetti M., Maugeri M., Nanni T., Auer I., Böhm R., Schöner W. (2006) Precipitation variability and changes in the greater Alpine region over the 1800–2003 period. *Journal of Geophysical Research*, 111, D11107. <https://doi.org/10.1029/2005JD006674>.

Chimani B., Heinrich G., Hofstätter M., Kerschbaumer M., Kienberger S., Leuprecht A., Lexer A., Peßenteiner S., Poetsch M.S., Salzmann M., Spiekermann R., Switanek M., Truhetz H. (2016) Endbericht ÖKS15 - Klimaszenarien für Österreich - Daten - Methoden - Klimaanalyse. Projektbericht. <https://data.ccca.ac.at/dataset/a4ec86ca-eeae-4457-b0c7-78eed6b71c05>.

Duethmann D., Blöschl G. (2018) Why has catchment evaporation increased in the past 40 years? A data-based study in Austria. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 1–24. <https://doi.org/10.5194/hess-2018-129>.

Haslinger K., Schöner W., Abermann J., Laaha G., Andre K., Olefs M., Koch R. (2022) Contradictory signal in future surface water availability in Austria: Increase on average vs. higher probability of droughts [Preprint]. *Atmospheric, Meteorological and Climatological Hazards*. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2022-191>.

IPCC (2021) Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, In press, doi:10.1017/9781009157896.

Österreichische Hagelversicherung (2022, August 12) Dürre und Verbauungen gefährden Grundwasserspiegel, Seen, Flüsse und Agrarflächen. <https://www.hagel.at/presseaussendungen/duerre-und-verbauung/>

Ukkola A.M., De Kauwe M.G., Roderick M.L., Abramowitz G., Pitman A.J. (2020) Robust Future Changes in Meteorological Drought in CMIP6 Projections Despite Uncertainty in Precipitation. *Geophysical Research Letters*, 47(11). <https://doi.org/10.1029/2020GL087820>.

Vicente-Serrano S.M., Beguería S., López-Moreno J.I. (2010) A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal of Climate*, 23(7), 1696–1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>.

Westra S., Fowler H.J., Evans J.P., Alexander L.V., Berg P., Johnson F., Kendon E.J., Lenderink G., Roberts N.M. (2014) Future changes to the intensity and frequency of short-duration extreme rainfall: FUTURE INTENSITY OF SUB-DAILY RAINFALL. *Reviews of Geophysics*, 52(3), 522–555. <https://doi.org/10.1002/2014RG000464>.

Auswirkungen von Dürren auf den Boden- und Grundwasserhaushalt

Steffen Birk^{1*}

Zusammenfassung

In humiden Gebirgsregionen mit energielimitierter Verdunstung führen Niederschlagsdefizite zu Bodenwasserdefiziten, jedoch nicht unmittelbar zu einem Rückgang der Verdunstung. Wenn die Dürre von erhöhter Einstrahlung bzw. Temperatur begleitet ist, kann die Verdunstung sogar erhöht sein und das Wasserdefizit verstärken. Unter diesen Bedingungen führen Dürren vor allem zu einer Abnahme des Abflusses, also verringerter Sickerwassermenge bzw. Grundwasserneubildung. Der Grundwasserabfluss reagiert oft gedämpft und verzögert, sodass sich kurze Dürreperioden mit geringen Wasserdefiziten kaum auswirken. Zahlreiche kleine Niederschlagsdefizite können jedoch zu wenigen großen Dürren im Grundwasser akkumulieren. Sollte infolge des Klimawandels eine Verschiebung von energielimitierten zu wasserlimitierten Bedingungen erfolgen, wäre künftig in Dürren mit einer stärkeren Verringerung der Verdunstung und damit eventuell abnehmender Produktivität von Ökosystemen zu rechnen.

Schlagwörter: Verdunstung, grünes Wasser, blaues Wasser, landwirtschaftliche Dürre, Grundwasserdürre

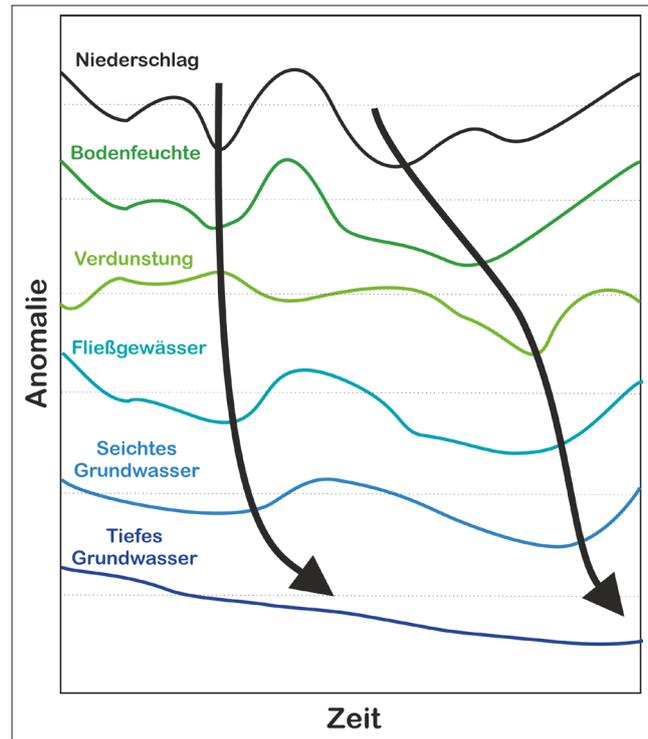
Dürren haben ihren Ausgangspunkt meist in ausbleibenden oder ungewöhnlich geringen Niederschlägen. Solche **meteorologischen Dürren** können sich mehr oder weniger verzögert und gedämpft in andere Komponenten des Wasserkreislaufs fortpflanzen (*Abbildung 1*). Führen sie zu Defiziten im Bodenwasser und damit in weiterer Folge potenziell zu Auswirkungen auf den landwirtschaftlichen Ertrag spricht man von **landwirtschaftlicher Dürre**, führen sie zu einer Verringerung im Abfluss der Fließgewässer von **hydrologischer Dürre** bzw. im Falle eines Rückgangs von Grundwasserständen auch von **Grundwasserdürre**. Dürren können also sowohl Wasserflüsse bzw. -speicher betreffen, die der Produktion von Biomasse und damit dem Erhalt von Ökosystemen und der Nahrungsmittelerzeugung dienen („grünes Wasser“), als auch solche in Grundwasserleitern und Fließgewässern („blaues Wasser“), die für die Wasser- und Energieversorgung von großer Bedeutung sind (Falkenmark und Rockström 2006, Orth und Destouni 2018). Ziel dieses Beitrags ist die Diskussion der Fortpflanzung und Auswirkungen von Dürren in den unterschiedlichen Komponenten des Wasserkreislaufs.

Ob und in welchem Ausmaß sich meteorologische zu landwirtschaftlichen Dürren entwickeln, hängt nicht nur vom Niederschlagsgeschehen ab, sondern auch vom Verlauf der Verdunstung. Im humiden Alpenraum ist die Verdunstung meist energielimitiert. Daher ist die tatsächliche Verdunstung vor Beginn und während des ersten Stadiums von Dürreperioden in der Regel nicht durch eine begrenzte Wasserverfügbarkeit limitiert, sondern durch die verfügbare Strahlungsenergie (bzw. niedrige Lufttemperatur). Da meteorologische Dürren oft mit Wetterlagen verbunden sind, in denen die Einstrahlung und damit auch die Lufttemperatur und die potenzielle Verdunstung erhöht sind, kann die tatsächliche Verdunstung am Beginn der Dürre zunächst sogar erhöht sein, obwohl die Bodenfeuchte abnimmt (*Abbildung 1*). Erst bei länger anhaltender Dürre ist die Verdunstung aufgrund des weiter zunehmenden Bodenwasserdefizits

¹ Institut für Erdwissenschaften, NAWI Graz Geozentrum, Universität Graz, Heinrichstraße 26, A-8010 GRAZ

* Ansprechpartner: Univ.-Prof. Dr. Steffen Birk, email: steffen.birk@uni-graz.at

Abbildung 1: Fortpflanzung von Niederschlagsdefiziten zu Anomalien in anderen Flüssen bzw. Speichern des Wasserkreislaufs (verändert nach Changnon, 1987).



schließlich wasserlimitiert und nimmt ab. Wie Orth und Destouni (2018) zeigen, ergibt sich selbst in trockeneren Regionen eine gegenüber dem Rückgang der Bodenfeuchte erhebliche Verzögerung in der Abnahme der Verdunstung, der „grüne“ Wasserfluss bleibt also in kurzen Dürren bzw. im ersten Stadium längerer Dürreperioden relativ unbeeinflusst.

Im Unterschied zur stark verzögerten Abnahme der Verdunstung, reagieren die „blauen“ Wasserflüsse rascher auf meteorologische Dürren (Orth und Destouni 2018). Dieses Verhalten zeigt sich beispielsweise in Auswirkungen der trockenen Witterung des Jahres 2018 auf die Sickerwassermengen an einem montanen Grünlandstandort (Forstner et al. 2021). Unter den energielimitierten Bedingungen am Standort Raumberg-Gumpenstein wurde ein deutlicher Rückgang der Sickerwassermengen in Lysimetern festgestellt, während die in der Vegetationsperiode 2018 ermittelte Verdunstung keinen nennenswerten Rückgang aufgrund der Trockenheit zeigte.

Die meteorologische Dürre hatte im obigen Beispiel also kaum Auswirkungen auf den „grünen“ Wasserfluss, führte jedoch über den Rückgang der Sickerwassermengen zu einer verminderten Grundwasserneubildung, die letztlich eine Abnahme von Grundwasserständen und damit auch einen verminderten Grundwasserabfluss zur Folge haben muss. Im Unterschied zum schnellen Ansprechen der Bodenfeuchte, zeigt das Grundwasser jedoch typischerweise ein verzögertes und gedämpftes Verhalten. Die höchsten Korrelationen zwischen Niederschlagshöhen und Grundwasserständen zeigen sich, wenn über mehrere Monate kumulierte Niederschläge betrachtet werden, und im Falle tiefer Grundwasservorkommen treten manchmal zeitliche Verschiebungen zwischen den Dürremaxima auf (Kumar et al. 2016, Haas und Birk 2017). Kurzzeitige Defizite im Niederschlag führen also nicht unmittelbar zu Grundwasserdürren. Daher nimmt die Anzahl der Dürren vom Niederschlag zum Grundwasser ab. Allerdings können die jeweils geringen Defizite aus zahlreichen meteorologischen Dürren zu wenigen, aber schwerwiegenderen Dürren im Grundwasserabfluss akkumulieren. Die Häufigkeitsverteilung verschiebt sich also von vielen kleinen Dürren in Niederschlag und Grundwasserneubildung zu wenigen, aber größeren Dürren im Grundwasserabfluss (Peters et al. 2005).

Während bei energielimitierter Verdunstung das aus meteorologischen Dürren resultierende Wasserdefizit zunächst vor allem die „blauen“ Wasserflüsse vermindert, kann unter wasserlimitierten Bedingungen auch die Verdunstung abnehmen. Das veranschaulichen Untersuchungen, bei denen Lysimeter aus einem Gebiet mit energielimitierter Verdunstung an einen tiefer gelegenen, niederschlagsärmeren und wärmeren Standort versetzt wurden (Forstner et al. 2021). Das Wasserdefizit im Jahr 2018 wurde am tiefer gelegenen, wasserlimitierten Standort vor allem durch eine verringerte Verdunstung, verbunden mit einer stärkeren Abnahme des Bodenwasserspeichers, kompensiert. Am höher gelegenen, energielimitierten Standort wurde dagegen ein Teil des Wasserdefizits durch eine Abnahme der Sickerwassermenge kompensiert und die Verdunstung war weniger stark vermindert. Ob die Verdunstung energie- oder wasserlimitiert ist bestimmt also wesentlich die Aufteilung des Wasserdefizits auf „grüne“ und „blaue“ Wasserflüsse. Aufgrund des Klimawandels wird eine zunehmende Verschiebung hin zu wasserlimitierten Bedingungen erwartet (Denissen et al. 2022). Sollte dies in derzeit noch energielimitierten Alpenregionen eintreten, wäre mit einer verstärkten Auswirkung von Dürren auf „grüne“ Wasserflüsse und damit verbunden auch verringerter Produktivität von Ökosystemen zu rechnen.

Danksagung

Diese Arbeit wurde durch das Forschungsprogramm Earth System Sciences der Österreichischen Akademie der Wissenschaften gefördert.

Literatur

- Changnon S.A. (1987) Detecting drought conditions in Illinois. Illinois State Water Survey, Champaign, Circular 169.
- Denissen J.M.C., Teuling A.J., Pitman A.J., Koirala S., Migliavacca M., Li W., Reichstein M., Winkler A.J., Zhan C., Orth R. (2022) Widespread shift from ecosystem energy to water limitation with climate change. *Nature Climate Change* 12 (7), 677-684.
- Falkenmark M., Rockström J. (2006) The new blue and green water paradigm: breaking new ground for water resources planning and management. *J. Water Resour. Plan. Manag.* 132, 129-132.
- Forstner V., Groh J., Vremec M., Herndl M., Vereecken H., Gerke H.H., Birk S., Pütz T. (2021) Response of water fluxes and biomass production to climate change in permanent grassland soil ecosystems. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 25 (12): 6087-6106.
- Haas J.C., Birk S. (2017) Characterizing the spatiotemporal variability of groundwater levels of alluvial aquifers in different settings using drought indices. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 21 (5), 2421-2448.
- Kumar R., Musuuza, J.L., Van Loon A.F., Teuling A.J., Barthel R., Ten Broek J., Mai J., Samaniego L., Attinger S. (2016) Multiscale evaluation of the Standardized Precipitation Index as a groundwater drought indicator. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 20 (3), 1117-1131.
- Orth R., Destouni G. (2018) Drought reduces blue-water fluxes more strongly than green-water fluxes in Europe. *Nature Communications* 9 (1), art. no. 3602.
- Peters E., Van Lanen H.A.J., Torfs P.J.J.F., Bier G. (2006) Drought in groundwater - Drought distribution and performance indicators. *J. Hydrol.* 306 (1-4), 302-317.

Sommerdürre und die Resilienz von Grünland im globalen Wandel

Michael Bahn^{1*} und das ClimGrass-Team^{**}

Grünland ist in vielen Teilen Europas von großer Bedeutung für die Landwirtschaft und liefert insgesamt eine Reihe wichtiger Ökosystemleistungen (Schils et al. 2022). In Österreich stellt Grünland mit 1,34 Mio. ha die flächenmäßig wichtigste Kulturart dar. Wie alle Lebensräume in Österreich ist Grünland einem deutlich rascheren und stärkeren Klimawandel ausgesetzt als im globalen Durchschnitt (Gobiet et al. 2014). Eine zunehmende Verschlechterung der klimatischen Wasserbilanz begünstigt dabei auch das vermehrte Auftreten von Dürreereignissen, die sich in den kommenden Jahrzehnten deutlich verstärken werden (IPCC 2021). Zahlreiche Studien weisen darauf hin, dass Dürreereignisse je nach Zeitpunkt des Auftretens und Intensität zu einem deutlichen Rückgang des Grünlandertrags führen können. Bislang gibt es aber noch kaum Untersuchungen dazu, wie sich die in den kommenden Jahrzehnten erwartete Erhöhung der Lufttemperatur in Kombination mit der zunehmenden CO₂-Konzentration der Atmosphäre auf die Resilienz von Grünland bei Sommerdürre auswirkt.

Das ClimGrass-Experiment in Raumberg-Gumpenstein, ursprünglich als Experiment zur Untersuchung der Auswirkungen von Klimaerwärmung und erhöhtem atmosphärischen CO₂ (eCO₂) auf Grünland geplant, wurde gemeinsam mit der Universität Innsbruck um den Faktor Trockenheit erweitert, sodass seit 2014 auf 54 Versuchspartzellen die einzelnen und kombinierten Effekte von Erwärmung, eCO₂ und Dürreereignissen untersucht werden können (Abbildung 1; Piepho et al. 2017, Pötsch et al. 2021). Dabei werden neben der Produktivität auch die ihr zugrundeliegenden biogeochemischen Prozesse hinsichtlich der Kohlenstoffdynamik und Stickstoffumsätze, sowie die damit verbundenen Treibhausgasemissionen und der Wasserhaushalt im Detail analysiert.

Die vorliegenden Ergebnisse von ClimGrass zeigen, dass Erwärmung das Wachstum von Grünland v.a. im Frühjahr beschleunigt und den Ertrag erhöht, während eCO₂ einen geringen Einfluss hat. Dürre führt zu starken Ertragseinbußen, die in einem Zukunftsszenario bei +3°C und +300 ppm CO₂ noch ausgeprägter sind. Andererseits kommt es in einem künftigen Szenario bei eCO₂ zur Beschleunigung des Wiederaufwuchses nach einer Dürre. In gleicher Weise sind auch CO₂-aufnahme und -abgaberraten aus dem Grünland bei Dürre im Zukunftsszenario stärker eingeschränkt und erholen sich nach Wiederbefeuchtung schneller als unter aktuellen Klimabedingungen (Meeran et al. 2021, Reinthaler et al. 2021).

Die Boden-Mikroorganismen zeigen in ihrer Aktivität starke saisonale Schwankungen und sind durch Erwärmung und eCO₂ kaum, aber durch Dürre stark beeinflusst (Seneca et al. 2020, Simon et al. 2020, Maxwell et al. 2022). Dadurch führt Dürre bzw. die darauffolgende Wiederbefeuchtung des Bodens durch einen Starkniederschlag zu einer Beschleunigung der Umsetzung von Stickstoff, was den Wiederaufwuchs des Pflanzenbestands begünstigen kann. Die vermehrte mikrobielle Umsetzung von Stickstoff nach Dürre kann auch die Emissionen von Lachgas, einem starken Treibhausgas, vorübergehend deutlich erhöhen (Harris et al. 2021).

Hinsichtlich der Bestandesverdunstung und Grundwasserneubildung zeigte das ClimGrass-Experiment, dass Erwärmung die Verdunstung verstärkt und die Versickerung reduziert, während eCO₂ den umgekehrten Effekt hat. In Kombination der beiden Faktoren überwiegt der Effekt der Erwärmung (Forstner et al. 2021). Dürre reduziert sowohl die Verdunstung als auch die Versickerung, und dieser Effekt wird im Zukunftsszenario verstärkt. Nach Ende der Dürre braucht es vor allem bei künftigen Klimabedingungen

¹ Institut für Ökologie, Universität Innsbruck, Sternwartestraße 15, A-6020 INNSBRUCK

* Ansprechpartner: Univ.Prof. Dr. Michael Bahn, email: michael.bahn@uibk.ac.at

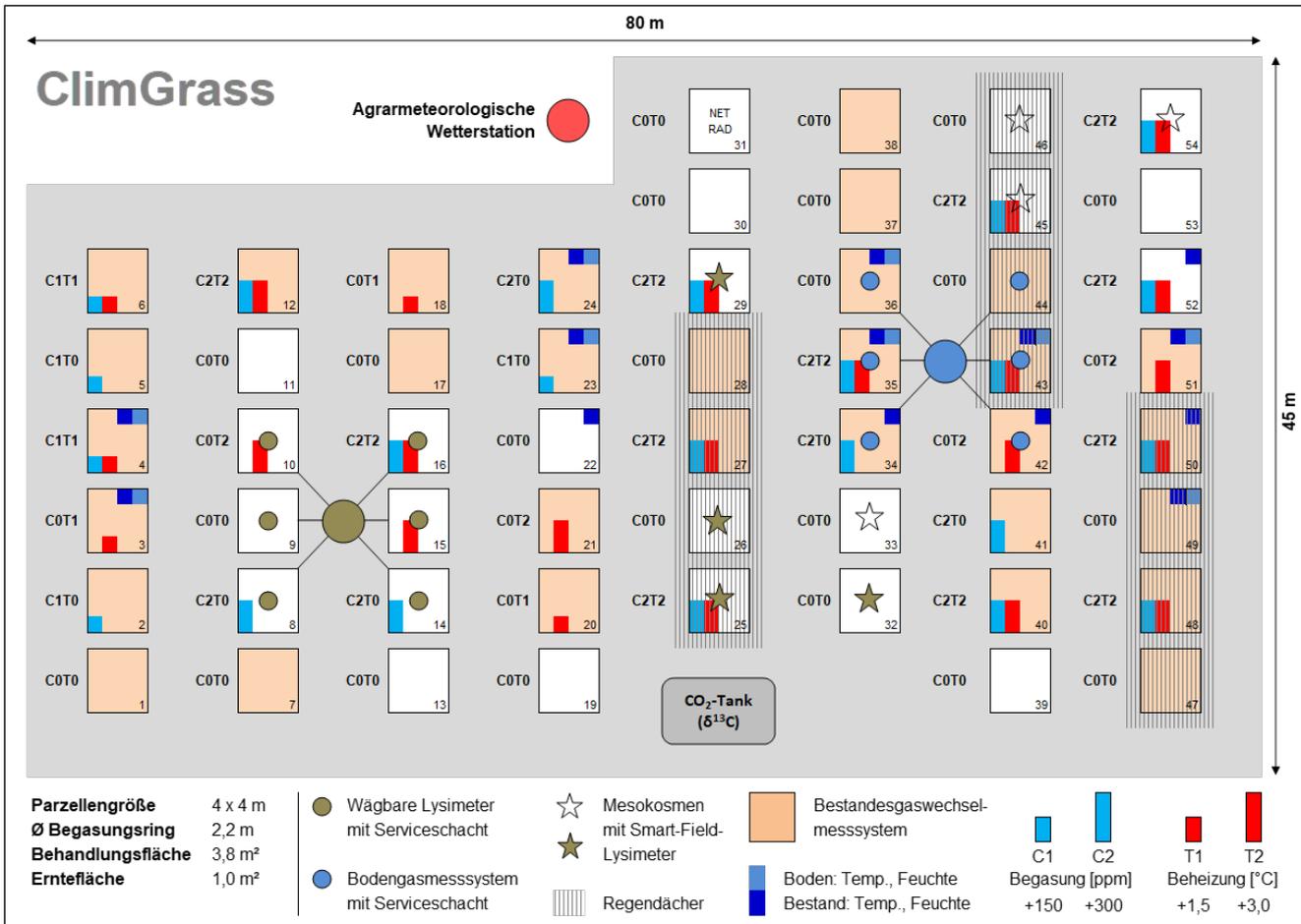


Abbildung 1: Schematische Darstellung der ClimGrass-Versuchsanlage (Stand 2022). Versuchspartellen umfassen Kontrollpartellen (C0T0), sowie mit CO₂ begaste Partellen (C1: +150 ppm, C2: +300 ppm CO₂) und mit Infrarotstrahlern beheizte Partellen (T1: +1,5° C, T2: +3° C). Zur Simulation von Dürre sind dynamische Regendächer installiert. 10 Partellen sind mit Lysimetern ausgestattet, in 6 Partellen werden im Bodenprofil Treibhausgase analysiert. In ausgewählten Partellen werden in Mesokosmen Zusatzversuche durchgeführt.

mehrere Wochen bis Monate, bis die Wasserversorgung im Boden wieder dem Normalniveau entspricht.

Insgesamt zeigt sich durch das ClimGrass-Experiment also, dass im Vergleich der untersuchten Faktoren Dürreereignisse den stärksten Einfluss auf die Produktivität und Stoffkreisläufe haben und dass in einem realistischen Zukunftsszenario Dürreeffekte verstärkt werden, aber auch die Erholung von Grünland rascher erfolgt. Wichtige Forschungsthemen für die Zukunft betreffen die Frage von kritischen Schwellenwerten der Dürreintensität und die Auswirkung wiederkehrender Dürreereignisse (Grünzweig et al. 2022, Müller et al. 2022, Ingrisch et al. 2023) sowie die Frage, welche Anpassungsmaßnahmen erfolgen können und müssen, um die Versorgungsleistung von Grünland im globalen Wandel aufrecht zu halten.

Literatur

ClimGrass-Publikationen in internationalen Zeitschriften

Maxwell T.L., Canarini A., Bogdanovic I., Böckle T., Martin V., Noll L., Prommer J., Séneca J., Simon E., Piepho H.-P., Herndl M., Pötsch E.M., Kaiser C., Richter A., Bahn M., Wanek W. (2022) Contrasting drivers of belowground nitrogen cycling in a montane grassland

exposed to a multifactorial global change experiment with elevated CO₂, warming, and drought. *Global Change Biology* 28 (7): 2425-2441. doi.org/10.1111/gcb.16035

Forstner V., Groh J., Vremec M., Herndl M., Vereecken H., Gerke H.H., Birk S., Pütz T. (2021) Response of water fluxes and biomass production to climate change in permanent grassland soil ecosystems. *Hydrology and Earth System Science* 25; 6087-6106.

Meeran K., Ingrisch J., Reinthaler D., Canarini A., Müller L., Pötsch E.M., Richter A., Wanek W., Bahn M. (2021) Warming and elevated CO₂ intensify drought and recovery responses of grassland carbon allocation to soil respiration. *Global Change Biology* 27: 3230-3243, doi.org/10.1111/gcb.15628

Reinthaler D., Harris E., Pötsch E.M., Herndl M., Richter A., Wachter H., Bahn M. (2021) Responses of grassland soil CO₂ production and fluxes to drought are shifted in a warmer climate under elevated CO₂. *Soil Biology and Biochemistry* 163, 108436. doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108436

Wilfahrt P.A., Schweiger A.H., Abrantes N., Arfin-Khan M.A.S., Bahn M., Berauer B.J., Bierbaumer M., Djukic I., Dusseldorp M., Eibes P., Estiarte M., Hessberg A., Holub P., Ingrisch J., Schmidt I.K., Kesic L., Klem K., Kröel-Dulay G., Larsen K.S., Löhmus K., Mänd P., Orbán I., Orlovic S., Peñuelas J., Reinthaler D., Radujković D., Schuchardt M., Schweiger J.M.-I., Stojnic S., Tietema A., Urban O., Vicca S., Jentsch A. (2021) Disentangling climate from soil nutrient effects on plant biomass production using a multispecies phytometer. *Ecosphere* 12 (8). doi.org/10.1002/ecs2.3719

Séneca J., Pjevac P., Canarini A., Zioutis C., Herbold C., Prommer J., Wanek W., Bahn M., Pötsch E., Wagner M., Richter A. (2020) The effects of climate change on inorganic nitrogen cycling communities in grasslands. *The ISME Journal*, 14: 3038-3053. doi.org/10.1038/s41396-020-00735-7

Simon E., Canarini A., Martin V., Séneca J., Böckle T., Reinthaler D., Pötsch E., Piepho H., Bahn M., Wanek W., Richter A. (2020) Microbial growth and carbon use efficiency show seasonal responses in a multifactorial climate change experiment. *Communications Biology* 3, 584. doi.org/10.1038/s42003-020-01317-1

Thonicke K., Bahn M., Lavorel S., Bardgett R.D., Erb K., Giamberini M., Reichstein M., Vollan B., Rammig A. (2020) Advancing the understanding of adaptive capacity of social-ecological systems to absorb climate extremes. *Earth's Future* 8 (2) e2019EF001221, doi.org/10.1029/2019EF001221

Deltedesco E., Keiblinger K.M., Naynar M., Piepho H.P., Gorfer M., Herndl M., Bahn M., Pötsch E.M., Zechmeister-Boltenstern S. (2019) Trace gas fluxes from managed grassland soil subject to multifactorial climate change manipulation. *Applied Soil Ecology* 137: 1-11. doi.org/10.1016/j.apsoil.2018.12.023

Pötsch E.M., Herndl M., Bahn M., Schaumberger A., Schweiger M., Kandolf M., Reinthaler D., Schink M., Adelwöhrer M. (2019) ClimGrass – ein innovatives Freilandexperiment zur Erforschung der Folgen des Klimawandels im Grünland. 21. Alpenländisches Expertenforum 2019, 3-10

Piepho H.P., Herndl M., Pötsch E.M., Bahn M. (2017) Designing an experiment with quantitative treatment factors to study the effects of climate change. *Journal of Agronomy and Crop Science* 203: 584-592. doi.org/10.1111/jac.12225

Weitere internationale Publikationen aus dem Projektkonsortium mit Bezug zu ClimGrass

Grünzweig J.M., De Boeck H.J., Rey A., Santos M.J., Adam O., Bahn M. et al. (2022) Dryland mechanisms could widely control ecosystem functioning in a drier and warmer world. *Nature Ecology & Evolution* 6: 1064-1076.

Ingrisch J., Umlauf N., Bahn M.: Functional thresholds alter the relationship of plant resistance and recovery to drought. *Ecology* (accepted).

Müller L.M., Bahn M. (2022) Drought legacies and ecosystem responses to subsequent drought. *Global Change Biology* 28 (17): 5086-5103. doi.org/10.1111/gcb.16270.

Kröel-Dulay G., Mojzes A., Sztár K., Bahn M., Batáry P., Beier C., Bilton M., Boeck H.J. de, Dukes J.S., Estiarte M., Holub P., Jentsch A., Schmidt I.K., Kreyling J., Reinsch S., Larsen K.S., Sternberg M., Tielbörger K., Tietema A., Vicca S., Peñuelas J. (2022) Field experiments underestimate aboveground biomass response to drought. *Nature Ecology & Evolution* 6 (5): 540-545. doi.org/10.1038/s41559-022-01685-3

Harris E., Diaz-Pines E., Stoll E., Schloter M., Schulz S., Duffner C., Li K., Moore K.L., Ingrisch J., Reinthaler D., Zechmeister-Boltenstern S., Glatzel S., Brüggemann N., Bahn M. (2021) Denitrifying pathways dominate nitrous oxide emissions from managed grassland during drought and rewetting. *Science Advances* 7/6, doi: 10.1126/sciadv.abb7118

Ogle K., Liu Y., Vicca S., Bahn M. (2021) A hierarchical, multivariate meta-analysis approach to synthesising global change experiments. *New Phytologist* 231: 2382-2394. doi.org/10.1111/nph.17562

Rammig A., Bahn M., Vera C., Knoke T., Paul C., Volla B., Erb K., Bardgett R.D., Lavorel S., Thonicke K. (2020) Adaptive capacity of coupled social-ecological systems to absorb climate extremes. In: Sillmann J., Sippel S., Russo S. (Eds.) *Climate Extremes and Their Implications for Impact and Risk Assessment*. Elsevier, ISBN 978-0-12-814895-2; https://doi.org/10.1016/B978-0-12-81489

Bahn M., Ingrisch J., Jentsch A. (2019) Grünlandnutzung. In: Wohlgemuth T., Jentsch A., Seidl R. (Eds.), *Störungsökologie* (UTB 5018). Verlag Haupt, Stuttgart, p. 304-324.

Alvarez G., Shahzad T., Andanson L., Bahn M., Wallenstein M.D., Fontaine S. (2018) Catalytic power of enzymes decreases with temperature: New insights for understanding soil C cycling and microbial ecology under warming. *Global Change Biology* 24: 4238-4250, doi: 10.1111/gcb.14281

Bahn M., Ingrisch J. (2018) Accounting for Complexity in Resilience Comparisons: A Reply to Yeung and Richardson, and Further Considerations. *Trends in Ecology and Evolution* 33: 649-651. doi.org/10.1016/j.tree.2018.06.006

Craven D., Eisenhauer N., Pearse W.D., Hautier Y., Isbell F., Roscher C., Bahn M. et al. (2018) Multiple facets of biodiversity drive the diversity-stability relationship. *Nature Ecology & Evolution* 2/10, pp. 1579-1587.

Ingrisch J., Bahn M. (2018) Towards a comparable quantification of resilience. Trends in Ecology and Evolution 33: 251-259. doi.org/10.1016/j.tree.2018.01.013

Weitere zitierte Referenzen

Gobiet et al. (2014) 21st century climate change in the European Alps - a review. Science of the Total Environment 493, 1138-1151. 10.1016/j.scitotenv.2013.07.050

IPCC (2021) Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

Schils R.L.M. et al. (2022) Permanent grasslands in Europe: land use change and intensification decrease their multifunctionality. Agriculture Ecosystems and Environment, 330, 107891, 10.1016/j.agee.2022.107891

** ClimGrass-Team

(¹⁻⁵ beziehen sich auf die Mitwirkung in den jeweiligen nachstehend gelisteten Projekten)

Michael Bahn ¹⁻⁵, David Reinthaler ¹⁻³, Jesse Radolinski ⁵, Kathiravan Meeran, Maud Tissink ⁵, Johannes Ingrisch ², Eliza Harris ⁴, Elena Stoll ⁴, Lisa Capponi ^{1,5}, Lumnesh Joseph ⁵, Johannes Cunow ⁵, Gil Putz ², Claudia Gstir ², Mario Deutschmann ¹⁻⁵, Herbert Wachter ¹⁻⁵ (Universität Innsbruck)

Erich Pötsch ¹⁻⁵, Andreas Schaumberger ¹⁻⁵, Markus Herndl ¹⁻⁵, Andreas Klingler ^{1,5}, Medardus Schweiger ¹⁻⁵, Matthias Kandolf ¹⁻⁵, Manuel Adelwöhrer ¹⁻⁵ (AREC Raumberg-Gumpenstein)

Andreas Richter ², Alberto Canarini ², Wolfgang Wanek ^{2,4}, Joana Seneca ², Eva Simon ², Tania Maxwell ², Moritz Morlock ², Ivana Bogdanovic ² (Universität Wien)

Sophie Zechmeister-Boltenstern ³⁻⁴, Evi Deteldesco ³, Katharina Keiblinger ³, Eugenio Diaz-Pines ³⁻⁴, Christine Stumpp ⁵ (Universität für Bodenkultur)

Hanspeter Piepho ²⁻³ (Universität Hohenheim)

Steffen Birk ⁵, Matevz Vremec ⁵, Veronika Forstner ⁵, Birgit Bednar-Friedl ⁵ (Graz)

Mirco Migliavacca ², Sönke Zähle ⁵, Silvia Caldararu ⁵ (Max Planck Institut für Biogeochemie Jena)

Ansgar Kahmen ⁵ (Universität Basel)

Christiane Werner ⁵, Angelika Kübert ⁵ (Universität Freiburg)

Nicolas Brüggemann ⁵ (FZ Jülich)

Martha Stangl ⁵ (Climate Change Center Austria)

Projekte

- Infrastrukturprojekte Bund-Bundesländerkooperation (gefördert durch BMLRT und zahlreiche Bundesländer; ClimGrass: 2014, ClimGrassEco: 2015-2016, ClimGrass-Thermo: 2020-2021, PI: M. Bahn)
- ClimGrass (gefördert durch FWF, 2016-2020, PI: M. Bahn, A. Richter, W. Wanek)
- ExtremeGrass (gefördert durch ACRP, 2016-2019, PI: S. Zechmeister-Boltenstern)
- NitroTrace (gefördert durch FWF, 2018-2023, PI: E. Harris, M. Bahn)
- ClimGrassHydro (ÖAW, 2019-2023, PI: M. Bahn, S. Birk)

Bodenwasserflüsse in Trockenperioden unter Klimawandelbedingungen

Markus Herndl^{1*}, Matevž Vremec² und Martina Schink¹

Zusammenfassung

Das Grünland hat einen sehr hohen Wasserbedarf und wird dadurch in Zukunft im Zuge der Klimaerwärmung für trockenheitsbedingte Ertragsverluste anfälliger sein. Kenntnisse von Zusammenhängen zu Bodenwasserflüssen und Ertragsdynamik im Grünland werden daher immer wichtiger. Um erste Resultate dazu im inneralpinen Grünland zu erhalten, wurde im Jahr 2021 auf der ClimGrass-Anlage an der HBLFA Raumberg-Gumpenstein auf Versuchspartellen und Lysimetern eine Erhöhung von Temperatur und CO₂-Konzentration unter einer 10-wöchigen Trockenperiode simuliert. Das Fernhalten des Niederschlags (314 mm) im Versuchszeitraum, hatte vor allem unter Klimawandelbedingungen einen erheblichen Einfluss auf den Bodenwassergehalt der auf nahezu 10 Vol% in 30 cm Bodentiefe sank. Diese Reduktion von Bodenwasser hatte auch einen Einfluss auf die Verdunstung und den Ertrag, die dadurch um rund 50 und 60% im Vergleich zur Kontrolle reduziert wurden. Betrachtet man die Bodenwasserspeicheränderung der Klimawandelvariante, zeigt sich von Beginn bis zum Ende der Dürre ein Bodenwasserverlust von 118 mm. Würde man den Startpunkt für eine mögliche Bewässerung mit 50% nFK setzen und neben der Auffüllung des Speichers auch noch die zusätzliche Verdunstung berücksichtigen, ergibt sich dadurch ein potenzieller Bewässerungsbedarf bis zum Dürreende von 127 mm. Diese Ergebnisse können als Basis für weitere Untersuchungen zu Bewässerung im Grünland dienen.

Schlagwörter: Verdunstung, Grünland, Klimawandel, Trockenheit, Bodenwasser

Einleitung

Eine langanhaltende Trockenperiode (Dürre) ist ein abnormaler Wassermangel an der Schnittstelle zwischen Boden und Atmosphäre. Sie beginnt mit einer Verringerung der Niederschläge (meteorologische Trockenheit) und kann sich bei anhaltender Trockenheit auf die Bodenfeuchtigkeit (landwirtschaftliche Trockenheit) und den Abfluss von Flüssen, Seen und Grundwasser (hydrologische Trockenheit) ausweiten (Berg und Sheffield 2018). Dürren könnten im Zuge des Klimawandels häufiger werden und stellen die Landwirtschaft auch in Österreich vor große Herausforderungen. Aufgrund der vergleichsweise schlechten Wassernutzungseffizienz von Grünland werden in Zukunft traditionelle Grünlandgebiete, in denen es in der Vergangenheit ausreichend geregnet hat, für trockenheitsbedingte Ertragsverluste anfälliger sein (IPCC 2014). Die Auswirkungen von Trockenheit auf das Pflanzenwachstum hängen stark von der Ausbreitung von Niederschlagsdefiziten im Boden ab. Veränderungen der Bodenfeuchtigkeit, die durch künftige Klimaveränderungen verursacht werden, können weitreichende Auswirkungen auf die Struktur und Dynamik von Grünlandökosystemen haben (Jasper et al. 2006). Daher sind detaillierte Kenntnisse über die Variabilität der Bodenwasserflüsse von wesentlicher Bedeutung für das Verständnis der klimabedingten Veränderungen, vor allem im Zusammenhang mit Erträgen. Ziel dieser Studie ist, erste Ergebnisse zu Änderungen in

¹ Institut für Pflanzenbau und Kulturlandschaft, HBLFA Raumberg-Gumpenstein, Raumberg 38, A-8952 IRDNING-DONNERSBACHTAL

² Institut für Erdwissenschaften, Universität Graz, Heinrichstraße 26, 8010 GRAZ

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

Bodenfeuchte, Verdunstung und Bodenwasserflüssen in Trockenperioden unter Klimawandelbedingungen zu erhalten und mögliche Implikationen zu Ertrag und potentieller Bewässerung zu erkennen.

Material und Methoden

Dürreexperiment in ClimGrass

Auf der ClimGrass-Anlage an der HBLFA Raumberg-Gumpenstein können im Dauergrünland auf insgesamt 54 Versuchspartellen Erhöhungen von Temperatur und CO₂-Konzentration sowie Trockenperioden in unterschiedlichen Abstufungen und Kombinationen simuliert werden (Pötsch et al. 2019). Im Jahr 2021 wurde für den Zeitraum des 2. Aufwuchses (27. Mai bis 03. August) mit Hilfe der Regendächer ein Dürreexperiment durchgeführt, bei dem insgesamt 12 Versuchspartellen einem mehrwöchigen Trockenstress ausgesetzt wurden. In diesen knapp 10 Wochen erhielten die Versuchspartellen außerhalb der Regendächer 314 mm Regen wobei die Partellen innerhalb frei von Niederschlag gehalten wurden.

Lysimeter

Der Einfluss von Dürre (COT0D) bzw. der zusätzliche Effekt von erhöhten Temperaturen (+3°C) und erhöhten (+300 ppm) CO₂-Konzentrationen (C2T2D) auf die Bodenwasserflüsse wird anhand von vier Smart-Field Lysimetern (Fa. Meter Group AG; *Abbildung 1*) bestimmt, wobei eines der Lysimeter als Kontrolle verwendet wird (COT0). Der wägbare Lysimeter besteht aus einem Bodenmonolithen mit 0,07 m² Oberfläche und 60 cm Tiefe. Die Sensorausstattung ist auf die Tiefen 10, 30 und 50 cm konzentriert und umfasst 5TE Sonden (Meter Group AG) zur Bodenwassergehaltsmessung sowie mit Temperaturerfassung kombinierte Tensiometer TEROS 21 (Meter Group AG) zur Bestimmung des Matrixpotentials. Die Sickerwassererfassung erfolgt über einen 5-Liter-Tank und eine Waage, die grammgenau den Sickerwasseraustrag erfassen kann. Der Einsatz einer bidirektionalen Pumpe sowie einer Saugplatte an der Unterseite des Lysimeters und Tensiometer im Freiland in gleicher Tiefe, ermöglichen feldidentische Wasserflüsse an der Unterkante der Bodensäule (Unold und Fank 2008).

Ergebnisse und Diskussion

Bodenwassergehalt und Verdunstung

Das Fernhalten des Niederschlags (314 mm) im Versuchszeitraum hatte vor allem bei der Klimawandelvariante (C2T2D) einen erheblichen Einfluss auf den Bodenwassergehalt

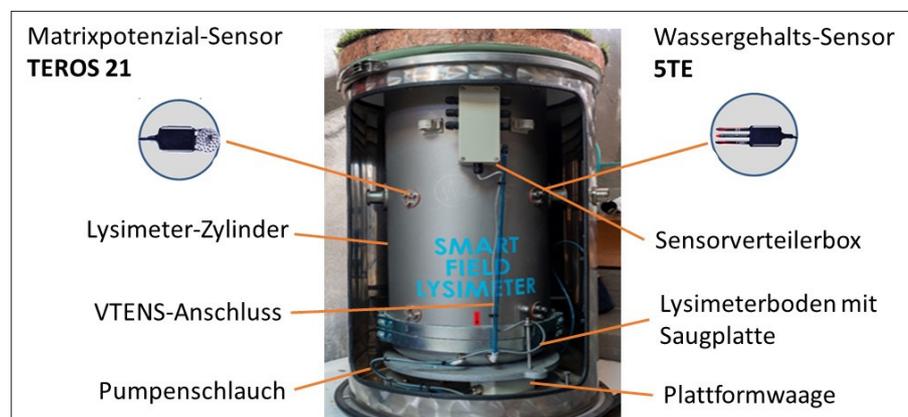


Abbildung 1: Sensorausstattung bzw. Schnitt durch den Smart Field Lysimeter (angepasst aus Smart Field Lysimeter User Manual, Meter Group AG).

in 30 cm (Abbildung 2). Dieser sank bis zum Zeitpunkt der Beendigung der Dürre auf nahezu 10%, was dem Permanenten Welkepunkt bei der im Versuch vorherrschenden Bodenart entspricht. Im Vergleich dazu zeigt jene Variante die nur die Dürre erfahren hat (COTOD), einen Bodenwassergehalt zu diesem Zeitpunkt von 17%. Diese Reduktion von Bodenwasser hatte auch einen Einfluss auf die Verdunstung, die unter den Regendächern im Dürrezeitraum um rund 20% und mit zusätzlicher Temperatur- und CO₂-Erhöhung um 50% reduziert wurde. Da bei natürlich induzierter Trockenheit meist auch die Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit und die Sonnenscheindauer und damit das Sättigungsdefizit der Luft steigen würde, würde auch die Verdunstung steigen. Dieser Effekt kann durch die Versuchsanstellung nicht simuliert werden, da die Flächen unter den Regendächern zwar einem Regen- und Oberflächendampfdruckdefizit ausgesetzt sind, aber dennoch einem ähnlichen Umgebungsdampfdruck. Wie Teuling et al. 2013 in seiner Studie zeigt, nimmt die Verdunstung bei Trockenheit in den meisten Regionen Europas zu was er als „Trocken-Paradoxon“ bezeichnet. Der Einfluss der Abnahme des Bodenwassergehalts auf den Trockenmasseertrag zeigte sich aber deutlich, da bei der COTOD-Variante der Ertrag fast halbiert und durch die zusätzliche Temperatur- und CO₂-Erhöhung nochmals um ein Viertel reduziert wurde (Abbildung 2). Die Studie von Forstner et al. 2022 zeigte für das gleiche, an sich nicht wasserlimitierende Untersuchungsgebiet, im Jahr 2019 Ertragsreduktion unter ähnlich verringerten Bodenwassergehalten und weist auf eine Tendenz von der Energie- zur Wasserlimitierung, bei der der erhöhte Verdunstungsbedarf der Atmosphäre die Trockenheit des Bodens verschärft und damit potenziell negative Auswirkungen auf den Ertrag hat, hin.

Bodenwasserspeicher und Bewässerungsbedarf

Betrachtet man die Bodenwasserspeicheränderung der einzelnen Varianten über die Dürreperiode, zeigt sich von Beginn bis zum Ende der Dürre ein Bodenwasserverlust von 132 mm für die COTOD-Variante und 118 mm für C2T2D-Variante. Setzt man für eine mögliche Bewässerung den Startpunkt mit 50% nFK an (Lüttger et al. 2005) und geht davon aus, dass neben der Auffüllung des Speichers auch noch die zusätzliche Verdunstung berücksichtigt werden muss, ergibt sich ein Bewässerungsbedarf bis zum Dürreende von 44 mm für die COTOD-Variante und 127 mm für die C2T2D-Variante (Abbildung 3). Wenn man den Bedarf wöchentlich summiert, würden sich Beregnungsmengen zwischen 5-30

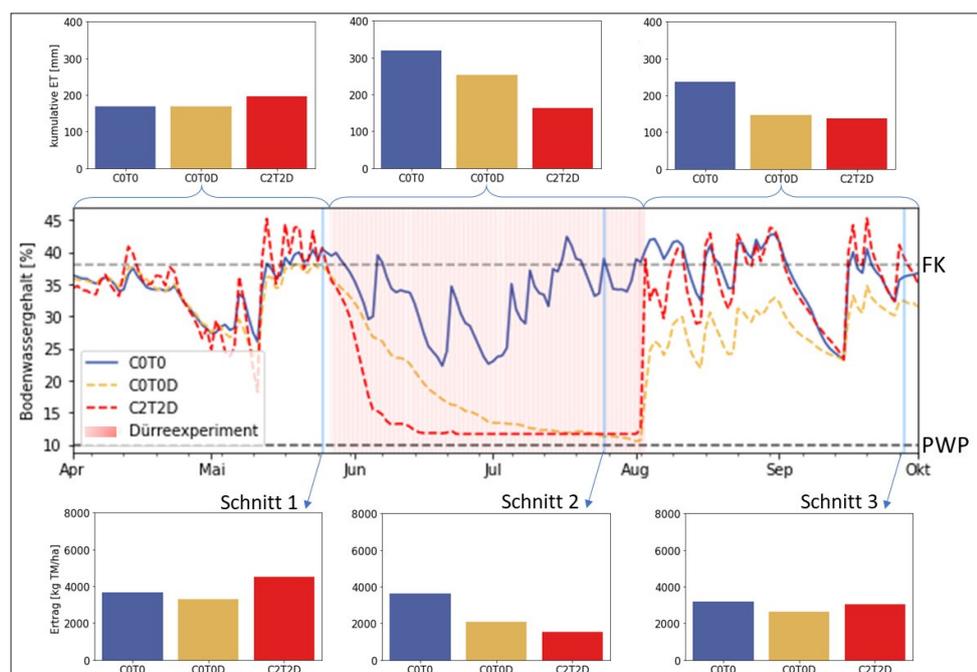
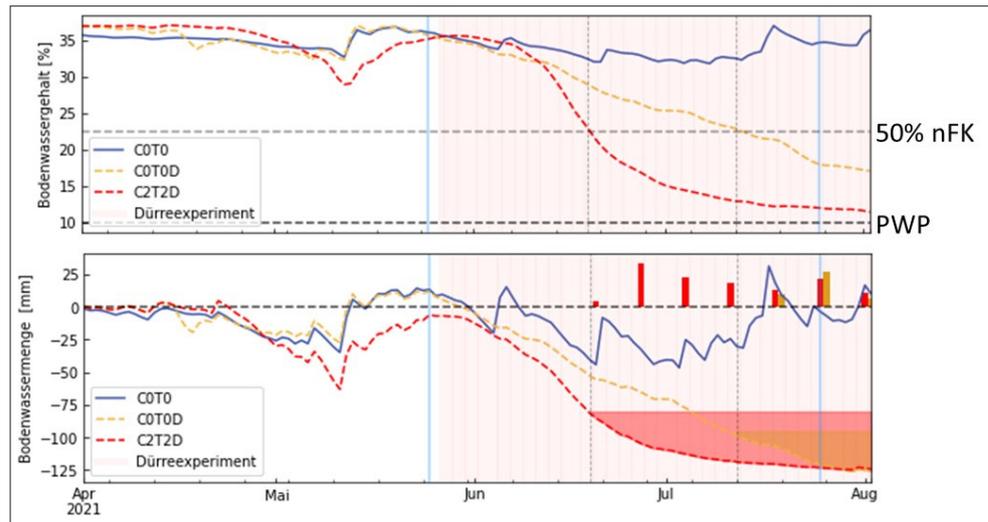


Abbildung 2: Mittlerer Bodenwassergehalt (Vol%) in 30 cm Bodentiefe bzw. kumulative Evapotranspiration (ET, mm) und Trockenmasseertrag (kg TM/ha) der jeweiligen Versuchsvarianten über den Versuchszeitraum April-Oktober 2021. FK = Feldkapazität, PWP = Permanent Welkepunkt

Abbildung 3: Mittlerer Bodenwassergehalt (Vol%) in 30 cm Bodentiefe, Änderung der Bodenwasserspeichermenge (mm) bzw. potentieller wöchentlicher Bewässerungsbedarf (mm) der jeweiligen Versuchsvarianten über den Versuchszeitraum April-Oktober 2021. nFk = nutzbare Feldkapazität, PWP = Permanenter Welkepunkt



mm pro Woche ergeben was gut mit Erfahrungen aus Südtirol zusammenpasst (Prünster 2020). Wöchentliche, im fixen Turnus verabreichte Gaben von 20 bis 25 mm waren in dieser Studie in der Regel ausreichend. Natürlich ist eine Beregnung, bei welcher Wasser nur bei Erreichen einer gewissen Saugspannung im Boden (z.B. 300 mbar) verabreicht wird bedarfsgerechter, jedoch die Experimente aus Südtirol zeigen denselben Ertrag wie bei denen die nach fixem Turnus beregnet wurden.

Literatur

Berg A., Sheffield J. (2018) Climate Change and Drought: the Soil Moisture Perspective. *Curr Clim Change Rep* 4, 180-191.

Forstner V., Vremec M., Herndl M., Birk S. (2022) Impacts of dry spells on soil moisture and yield anomalies at a montane- managed grassland site – a lysimeter climate experiment, *Ecohydrology*, under review.

IPCC (2014) Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

Jasper K., Calanca P., Fuhrer J. (2006) Changes in summertime soil water patterns in complex terrain due to climate change. In *Journal of Hydrology* (327), 550-563.

Prünster T. (2020) Bewässerung der Berglandwirtschaft in Südtirol. 47. Viehwirtschaftliche Fachtagung, HBLFA Raumberg-Gumpenstein, 01.-02. April 2020, 109-113.

Pötsch E.M., Herndl M., Schaumberger A., Schweiger M., Resch R., Adelwöhrer M. (2019) Auswirkung zukünftiger Klimabedingungen auf Ertrag und Futterqualität im Grünland. 21. Alpenländisches Expertenforum zum Thema 'Klimawandel im Alpenraum – Auswirkungen auf das Ökosystem Grünland und dessen Bewirtschaftung', HBLFA Raumberg- Gumpenstein, 26.-27. März 2019, 49-54.

Lüttger A., Dittmann B., Sourell H. (2005) Leitfaden zur Beregnung landwirtschaftlicher Kulturen. Schriftenreihe des Landesamtes für Verbraucherschutz, Landwirtschaft und Flurneuordnung, Bd. 6, Heft IV, Potsdam.

Teuling A.J., Van Loon A.F., Seneviratne S.I., Lehner I., Aubinet M., Heinesch B., Bernhofer C., Grünwald T., Prasse H., Spank U. (2013) Evapotranspiration amplifies European summer drought, *Geophys. Res. Lett.*, 40, 2071-2075.

Unold G.v., Fank J. (2008) Modular Design of Field Lysimeters for Specific Application Needs. *Water Air Soil Pollution*, 8:233-242.

Auswirkungen von Trockenheit auf Grünlandertrag und Futterqualität

Andreas Schaumberger^{1*}, Andreas Klingler¹ und Markus Herndl¹

Zusammenfassung

Der Klimawandel bringt zunehmend Wetterextreme mit sich, die besonders die Landwirtschaft treffen. Unter den vielen negativen Auswirkungen ist Trockenheit mit ihrem großflächigen Auftreten auch im Grünland dominierten Berggebiet eine Gefahr, die in den letzten Jahren deutlich zugenommen hat. Unter Trockenstress leidende Pflanzenbestände führen zu deutlichen Ertragsrückgängen, die unter zukünftigen Klimabedingungen noch deutlicher ausfallen werden. Während Wassermangel die Futterqualität kaum beeinflusst, gilt es, den Ertrag auch während solcher extremen Witterungsbedingungen durch geeignete Anpassungsmaßnahmen zu stabilisieren. Mit der Versuchsanlage ClimGrass untersuchen wir die Auswirkungen von Trockenperioden auf verschiedene Eigenschaften eines Dauergrünlandbestandes im direkten Vergleich zwischen aktuellem und zukünftigem Klima. Die Erkenntnisse daraus dienen als Grundlage für gezielte Anpassungsmaßnahmen.

Schlagwörter: Grünlandertrag, Futterqualität, Rohproteingehalt, ADL, Blattflächenindex

Einleitung

Die Kulturlandschaft des Alpenraumes ist traditionell von Grünlandflächen mit unterschiedlichster Nutzungsintensität geprägt. Die Bewirtschaftung reicht von extensiven Weiden auf Almen bis hin zu einer intensiven Schnittnutzung in den Gunstlagen des Alpenvorlandes. In Abhängigkeit der jeweiligen Standortfaktoren wie Boden, Klima und Topographie und einer darauf abgestimmten Nutzungsintensität ist ein Dauergrünlandbestand in der Lage, sich über eine entsprechende Artenzusammensetzung an eine Vielzahl verschiedener Umwelt- und Bewirtschaftungsbedingungen anzupassen. Allen Grünlandnutzungsformen gemeinsam ist jedoch ein vergleichsweise großer Wasserbedarf, der bei etwa 700 bis 800 mm Jahresniederschlag liegt (Bohner und Eder 2006). In der Vergangenheit war dieser im Bergland durch ausreichend und regelmäßig verteilte Niederschläge in der Regel auch gedeckt. Mit der Klimaveränderung, von welcher der Alpenraum in besonderem Maß betroffen ist, steigen nicht nur die Mittelwerte der Temperatur, sondern es häufen sich auch extreme Wetterlagen, die gravierende Auswirkungen auf eine kontinuierliche Wasserversorgung haben (IPCC, 2016, ÖKS15, 2016). Während einerseits die Temperaturen zunehmen und damit der Wasserverbrauch über die Evapotranspiration steigt, verteilen sich die Niederschläge andererseits immer öfter unregelmäßig über die Vegetationsperiode. Auf Starkniederschläge folgen längere niederschlagsfreie Perioden oder es verschieben sich Niederschläge in Monate, die für das Pflanzenwachstum weniger relevant sind (Eitzinger et al. 2009). Mit höheren Temperaturen und unregelmäßig verteilten Niederschlägen nimmt auch die Häufigkeit extremer und anhaltender Dürreperioden zu, die in den letzten Jahren auch zunehmend das Berggebiet und damit die typischen Grünlandregionen erreichen. Die durch Trockenheit verursachten Schäden und Ertragsrückgänge im Grünland betreffen oft große Regionen und gefährden dort eine durchgehende Futterversorgung des Viehbestandes.

¹ Institut für Pflanzenbau und Kulturlandschaft, HBLFA Raumberg-Gumpenstein, Raumberg 38, A-8952 IRDNING-DONNERSBACHTAL

* Ansprechpartner: Dr. Andreas Schaumberger, email: andreas.schaumberger@raumberg-gumpenstein.at

Für eine zielgerichtete und effektive Adaption der Grünlandbewirtschaftung an klimabedingte Veränderungen ist es vorteilhaft, die Auswirkungen künftiger Trockenperioden auf Grünlanderträge und Futterqualitäten möglichst gut zu kennen. Dürreexperimente an der HBLFA Raumberg-Gumpenstein liefern dazu wichtige Erkenntnisse.

Material und Methoden

Um die Wirkung einer Dürreperiode in einem zukünftigen Klima mit aktuellen Bedingungen vergleichen zu können, braucht es eine Versuchsanlage, mit der zukünftiges Klima im Freiland simuliert werden kann. Als experimentelle Infrastruktur steht dafür die Anlage ClimGrass an der HBLFA Raumberg-Gumpenstein zur Verfügung, in der mit einer einzigartigen Kombination der Faktoren Temperatur (Infrarotheizung), CO₂-Konzentration (Begasungsringe) und Dürre (Regendächer) die Folgen des Klimawandels auf das Ökosystem Grünland seit 2014 systematisch untersucht werden.

Die auf Referenzparzellen gemessene CO₂-Konzentration (C0) wird dabei auf einigen Parzellen im Rahmen der Dürreexperimente um +300 ppm (C2), die Referenztemperatur (T0) um +3,0 °C (T2) erhöht. Während die Temperaturbeaufschlagung beinahe ganzjährig angebracht wird, erfolgt die Zuführung von CO₂ mit unterscheidbarer Isotopensignatur ($\delta^{13}C$) nur tagsüber und ausschließlich in der Vegetationsperiode. Die Trockenexperimente finden auf insgesamt 12 Versuchspartzen unter drei Regendächern für die beiden Klimavarianten C0T0R und C2T2R statt. Sämtliche Versuchspartzen werden als Dauerwiese mit drei Schnitten pro Jahr und gleicher Düngung bewirtschaftet. Innerhalb des Begasungsringes befinden sich auf jeder Parzelle definierte Bereiche für die verschiedenen Beobachtungen und Messungen, zu der am Ende eines jeden Aufwuchses eine exakte Versuchsernte mit anschließender chemischer Analyse gehört.

Die hier vorgestellten Ergebnisse beziehen sich auf Trockenexperimente während des zweiten Aufwuchses in den Jahren 2017, 2020 und 2021. Dafür wurden die mittels Regensensor gesteuerten Dächer bei Niederschlagsereignissen bis zur Ernte des zweiten Aufwuchses (Ende Juli) geschlossen. Im Jahr 2017 wurden auf diese Weise an 49 Tagen insgesamt 307 mm, im Jahr 2020 an 43 Tagen 156 mm und 2021 an 67 Tagen 268 mm Niederschlag abgehalten. Die statistische Analyse umfasste die Varianten C0T0, C0T0R sowie C2T2 und C2T2R mit jeweils 4 Wiederholungen. Wir untersuchten den Einfluss von Trockenheit, den Jahreseffekt und deren Wechselwirkung mittels Glimmix-Prozedur in SAS (Version 9.4, SAS Institute Inc.). Um die Korrelation in den zeitlichen Messwiederholungen zu berücksichtigen, wurde ein allgemeines lineares gemischtes Modell verwendet.

Ergebnisse und Diskussion

Die Erträge in den einzelnen Versuchsjahren weisen deutliche Unterschiede auf. *Abbildung 1* zeigt die mittleren Trockenmasseerträge der jeweils vier Wiederholungen für die einzelnen Aufwüchse (1 bis 3) in den Versuchsjahren 2017, 2020 und 2021, die einem Referenzjahr (2016) gegenübergestellt werden. Für jeden Aufwuchs wird der Ertrag unter dem Einfluss des aktuellen (C0T0) und des zukünftigen Klimas (C2T2) unterschieden. Zusätzlich wird während des zweiten Aufwuchses in Varianten unter den Regendächern (C0T0R und C2T2R), also jene Partzen, die einer künstlichen Trockenheit ausgesetzt waren, und außerhalb (C0T0 und C2T2) unterschieden.

Bei den Erträgen der zweiten Aufwüchse zeigt sich eine markante Abstufung zwischen den trockengestressten und den ausreichend mit Wasser versorgten Grünlandbeständen. In allen drei Versuchsjahren ist der Ertragsrückgang bei Trockenstress in einem zukünftigen Klima (C2T2R) noch stärker ausgeprägt als bei Stress unter aktuellen Bedingungen (C0T0R). In allen Versuchsjahren zeigt sich eine sehr gute Erholung im dritten Aufwuchs.

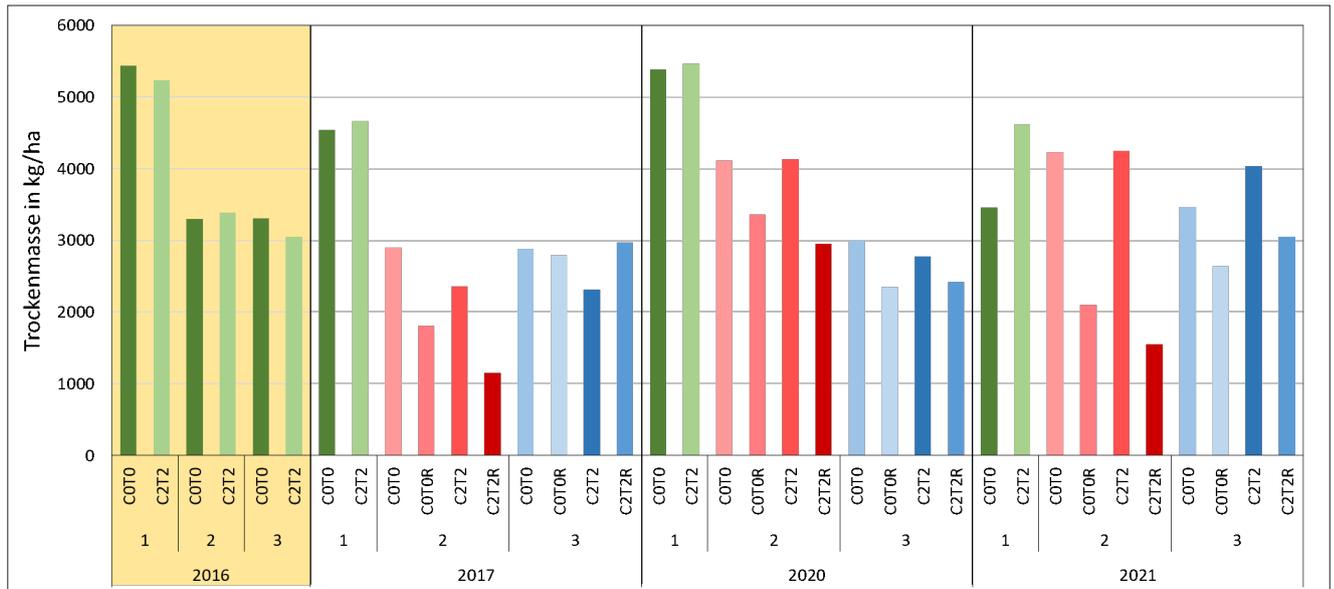


Abbildung 1: Trockenmasseerträge in den Jahren 2017, 2020 und 2021 mit Dürresimulation während des zweiten Aufwuchses sowie das Referenzjahr 2016 mit direktem Vergleich zwischen gegenwärtigem (COT0, COT0R) und zukünftigem (C2T2, C2T2R) Klima ohne und mit Trockenstress (R).

In Ergänzung zur Darstellung der Ertragsmittelwerte für die unterschiedlichen Varianten in den einzelnen Aufwüchsen der Versuchsjahre (Abbildung 1) werden einzelne Parameter für die untersuchten Varianten in Abbildung 2 einer statistischen Analyse unterzogen.

Der bereits in Abbildung 1 offensichtliche Unterschied im Trockenmasse-Ertrag zwischen den trockengestressten Parzellen (COT0R und C2T2R) und den Varianten COT0 und C2T2 ist, wie in Abbildung 2 dargestellt, statistisch signifikant. Während sich der Trockenstress zwischen aktuellem und zukünftigem Klima in den Ertragsunterschieden deutlich zeigt, ist in den nicht-gestressten Varianten kein signifikanter Unterschied zwischen den unterschiedlichen Klimabedingungen festzustellen.

Wie die Auswertung der Rohproteingehalte (XP) zeigt, gibt es zwischen allen Varianten keine signifikanten Unterschiede, d.h. ein trockengestresster Bestand weist zwar deutlich geringere Trockenmasseerträge auf, dessen Qualität entspricht jedoch der eines vitalen Grünlandbestandes. Beim Ligningehalt (ADL) zeigen die trockengestressten Bestände geringere Werte auf, was darauf hinweist, dass die stressbedingte Einschränkung vegetativen Wachstums, auch eine verminderte Einlagerung von Lignin zur Folge hat. Dieses eingeschränkte Wachstum lässt sich auch gut anhand des vierten untersuchten Parameters, dem Blattflächenindex (gemessen mit einem Accu-PAR LP-80), beobachten. Während beim ADL kaum Unterschiede zwischen aktuellem und zukünftigem Klima festzustellen sind, entsprechen die Unterschiede in der Blattfläche den Trockenmasseerträgen.

Schlussfolgerungen

Trockenheit führt zu einer deutlichen Abnahme der Trockenmasseerträge im Grünland, die unter zukünftigen Klimabedingungen noch wesentlich stärker wirkt und einen Ertragsrückgang um weitere 20 % erwarten lässt. Die Futterqualität nimmt hingegen kaum ab und wird durch Trockenstress wenig beeinflusst. Die Wuchshöhe von trockengestressten Beständen ist signifikant niedriger und in Kombination mit dem niedrigeren Ligningehalt lässt dies auf einen geringeren Stängelanteil und eine Verschiebung des Artenspektrums schließen. Das Augenmerk einer Adaption an den Klimawandel liegt darin, die durch Trockenstress verursachten Ertragsrückgänge möglichst gering zu halten, indem immer häufiger auftretende Dürreperioden bestmöglich überbrückt werden. Ziel ist eine aus-

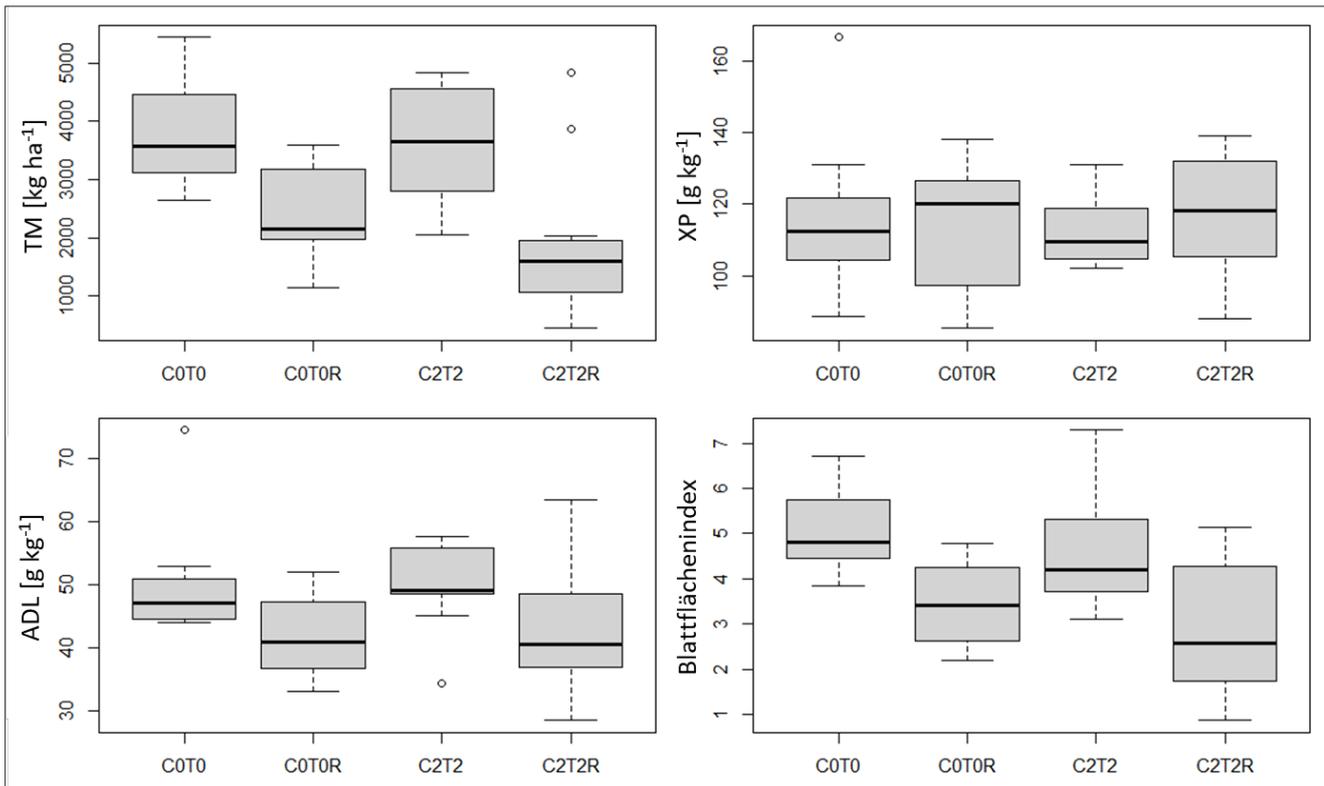


Abbildung 2: Trockenmasseertrag, Rohproteingehalt, ADL-Gehalt und Blattflächenindex (LAI) unter gegenwärtigem (C0T0, C0T0R) und zukünftigem (C2T2, C2T2R) Klima ohne und mit Trockenstress (R).

reichende Grundfütterversorgung eines angepassten Viehbestandes durch Maßnahmen, die sowohl den Pflanzenbestand als auch die Bewirtschaftung betreffen.

Literatur

Bohner A., Eder G. (2006) Boden- und Grundwasserschutz im Wirtschaftsgrünland. Umweltprogramme für die Landwirtschaft, Irdning, HBLFA Raumberg-Gumpenstein, 7.-8. März 2006, 53-64.

Eitzinger J., Kersebaum K.C., Formayer H. (2009) Landwirtschaft im Klimawandel: Auswirkungen und Anpassungsstrategien für die Land- und Forstwirtschaft in Mitteleuropa, Agrimedia GmbH, Wien, 376 S.

IPCC (2016) Klimaänderung 2014: Synthesebericht, Beitrag der Arbeitsgruppen I, II und III zum Fünften Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderung (IPCC), Deutsche IPCC Koordinierungsstelle, Bonn, 164 S.

ÖKS15 (2016) Klimaszenarien für Österreich, Daten - Methoden - Klimanalyse. ÖKS15-Arbeitsgruppe, Wien, 358 S.

Anpassungsmöglichkeiten der Grünlandwirtschaft an die Trockenheit

Andreas Klingler^{1*}, Lukas Gaier¹, Walter Starz² und Andreas Schaumberger¹

Zusammenfassung

Dauergrünland besitzt bei standortgerechter Bewirtschaftung die Fähigkeit sich rasch an veränderte Umweltbedingungen anzupassen. Durch die kurzfristigen, klimawandelbedingten Veränderungen ist jedoch ein aktives Eingreifen, welches von der Änderung der Nutzungshäufigkeit mit darauf abgestimmter Nährstoffversorgung bis hin zum Einsatz von trockenheitsresistenten Sorten und Mischungen reicht, notwendig, um weiterhin eine erfolgreiche Grünlandbewirtschaftung gewährleisten zu können. Almen stellen in Österreich zudem eine wertvolle Flächenressource dar, die vor allem in von Trockenheit geprägten Phasen einen entsprechenden Grundfutterpuffer bereitstellen. Generell gilt es, eine möglichst flexible Bewirtschaftungsweise anzustreben, um das Management an die jeweilige Situation rasch anpassen zu können.

Schlagwörter: Klimawandel, Dürre, Bewirtschaftung, Bestandesführung, Weide

Einleitung

Das Grünland wird ebenso wie viele andere Ökosysteme künftig beträchtlich mit den Auswirkungen des Klimawandels konfrontiert sein. Neben dem Temperaturanstieg bringt der Klimawandel eine Reihe von tiefgreifenden Änderungen für das Grünland mit sich. Vor allem die Wetterextreme und hier im Besonderen die Trockenheit hat einen großen Einfluss auf das Wachstumsgeschehen der heimischen Grünlandbestände. Die Bewirtschaftung und der Pflanzenbestand beeinflussen die Resistenz und die Resilienz eines Dauergrünlandes nach Dürren maßgeblich (Vogel et al. 2012). Für die heimische Landwirtschaft stellt sich nun die Frage, wie ein optimales Grünlandmanagement unter den künftigen Bedingungen aussieht und wie auf Extremsituationen am besten reagiert werden kann.

Nutzung und Düngung

Nutzung und Düngung sind neben der laufenden Bestandespflege die zentralen Bewirtschaftungsfaktoren und bieten die Möglichkeit, auf veränderte Bedingungen rasch und direkt zu reagieren. Immer häufiger ist Grünland von anhaltender Trockenheit betroffen, die teilweise zu erheblichen Ertragsausfällen führt. Die Resistenz und Resilienz der Pflanzenbestände hängt dabei sehr stark vom ursprünglichen Artenspektrum bei der Anlage sowie deren Veränderung als Folge einer standortgerechten Bewirtschaftung hinsichtlich Nutzungshäufigkeit und Düngungsintensität ab. Mit den höheren Temperaturen, längeren Vegetationsphasen und bei ausreichender Wasserverfügbarkeit ergibt sich die Möglichkeit, die Schnitthäufigkeit zu erhöhen und zusammen mit der Düngung so anzupassen, dass durch rechtzeitige Nutzung eine entsprechende Grundfutterqualität erhalten bleibt und mit einer höheren Schnittanzahl auch das Risiko von dürre- oder schädlingsbedingten Ertragsausfällen auf mehrere Aufwüchse verteilt

¹ Institut für Pflanzenbau und Kulturlandschaft, HBLFA Raumberg-Gumpenstein, Raumberg 38, A-8952 IRDNING-DONNERSBACHTAL, ² Institut für Biologische Landwirtschaft und Biodiversität der Nutztiere, HBLFA Raumberg-Gumpenstein, Raumberg 38, A-8952 IRDNING-DONNERSBACHTAL

* Ansprechpartner: DI Andreas Klingler, email: andreas.klingler@raumberg-gumpenstein.at

werden kann. Andererseits führt eine häufige Nutzung zur Ausbildung eines seichtgründigeren Wurzelsystems, fördert weniger trockenheitsresistente Grünlandarten und benötigt deutlich mehr Niederschlag. Eine Nutzungsintensivierung sollte deshalb nur auf Standorten mit ausreichender Wasserversorgung in Betracht gezogen werden. Auf trockenheitsgefährdeten Standorten kann eine Extensivierung der Bewirtschaftung zur Steigerung der Artenvielfalt und zur verstärkten Wurzelbildung, auch im Bereich des Unterbodens, eine geeignete Adaption sein. Erfolgt jedoch keine Anpassung der Bewirtschaftungsintensität, so werden höhere Temperaturen speziell in wärmeren Jahren auch in Regionen mit ausreichenden, aber ungünstig verteilten Niederschlägen zu Ertragsrückgängen führen. Dies ist unter anderem auf Veränderungen des Pflanzenbestandes zurückzuführen, wo sich zwar trockenolerante Gräserarten wie Knautgras oder Glatthafer stärker durchsetzen, der Anteil an Futtergräsern jedoch insgesamt abnimmt und hauptsächlich durch anpassungsfähigere Kräuter ersetzt wird. Tritt dazu auch Dürre auf, reduziert sich der Ertrag noch einmal deutlich stärker, als dies unter den aktuellen klimatischen Bedingungen der Fall ist. Auswertungen des ClimGrass-Experiments (Pötsch et al. 2019b) zeigen, dass der Trockenmasseertrag vor allem bei einer starken Klimaveränderung ohne Anpassungsmaßnahmen künftig sowohl unter Normal- als auch noch stärker unter Extrembedingungen zurückgeht. Die Veränderung des Futterwertes zeigt kein einheitliches Bild, jedoch eine starke Abhängigkeit vom jeweiligen Pflanzenbestand. Eine optimale Nährstoffversorgung der weniger dürregefährdeten Aufwüchse im Frühjahr und Herbst, sorgt für eine optimale Ertragsausnutzung dieser Aufwüchse und erhöht dadurch insgesamt die Ertragsstabilität. Des Weiteren sollte auf trockenheitsgefährdeten Standorten eine Mindestschnittshöhe von ca. 8 cm nicht unterschritten werden. Dadurch kann die Evaporation vermindert und der Wiederaustrieb aufgrund der größeren verbliebenen Assimilationsfläche beschleunigt werden. Aufgrund der großen Schwankungsbreite der Witterungsverläufe, gilt es künftig vor allem die Variabilität und auch Flexibilität in der Bewirtschaftung zu erhöhen, um zielgerichtet auf die jeweilige Situation reagieren zu können.

Die wärmeren Temperaturen, mildere Winter und längere Vegetationsperioden eröffnen auf alten Dauergrünlandstandorten zusehends auch alternative ackerbauliche Nutzungen. Ein Dauergrünland Umbruch stellt allerdings aufgrund der wichtigen ökologischen Funktionen des Dauergrünlandes, sowie einer erhöhten Erosionsgefahr nach einem Umbruch keine geeignete Anpassungsmöglichkeit dar. Zudem regt eine intensive Bodenbearbeitung die Mineralisierung im Boden stark an, was wieder einen vermehrten Humusabbau zur Folge hat. Dies hat einerseits direkte negative Effekte für das Klima zur Folge und führt auch zu einer nachhaltigen Verringerung der Bodenfruchtbarkeit und der Wasserspeicherkapazität.

Beweidung

Je intensiver die Weidenutzung auf einer Fläche erfolgt, desto empfindlicher reagiert das System auf Trockenperioden. Eine Voraussetzung für die Kurzrasenweide ist eine gleichmäßige Niederschlagsverteilung. Durch die regelmäßige Entblätterung verfügt der Bestand über ein sehr seichtes Wurzelsystem. Bereits die Umstellung auf ein Koppelweidesystem, führt zu günstigeren Bedingungen. Längere Ruhezeiten zwischen den Koppelauftrieben wirken sich in Trockenperioden positiv aus. Die Zielwuchshöhe beim Eintrieb in die Koppel sollte dabei zwischen 15 und 20 cm liegen. Solche Bestände verfügen über ein leicht tiefer reichendes Wurzelsystem und beschatten den Boden, was die Verdunstung aus dem Boden reduziert. Ebenfalls stellen aufgewachsene Koppeln einen Futtervorrat für Trockenperioden dar, sofern der Betreib genügend Reservekoppeln für solche Perioden eingeplant hat. Das Bio-Institut der HBLFA Raumberg- Gumpenstein führte 2010 auf einem Bio-Betrieb in Niederösterreich (360 m Seehöhe, 745 mm mittlerer Jahresniederschlag und 9,1 °C Jahresdurchschnittstemperatur) einen Vergleichsversuch zu Kurzrasen- und Koppelweide durch. Auf dem langjährig als Kurzrasenweide genutzten

Englisch Raygras-Wiesenrispengras-Weißklee-Bestand wurden beide Weidesysteme simuliert. Die Kurzrasenweide erzielte dabei einen Trockenmasseertrag von 7,8 t/ha und die Koppelweide von 10,6 t/ha. Im Vergleich zum langjährigen Mittel waren die Niederschläge im Versuchsjahr mit 853 mm zwar etwas höher, jedoch war die Verteilung während der Vegetationsperiode ungünstig. Durch die Betrachtung der TM-Zuwachskurve wird deutlich, dass die Koppelweide in den niederschlagsärmeren Perioden höhere Zuwachsraten erzielte und generell einen gleichmäßigeren Zuwachs erreichte. Neu diskutierte Weidestrategien, wie Mob Grazing sind nur für Betriebe mit extremen Trockenheiten und unter 700 mm Jahresniederschlag für eine Beweidung mit Masttieren geeignet. Beim Mob Grazing werden für wenige Stunden extrem hohe Besatzdichten von 100.000 kg/ha bzw. 200 GVE/ha erreicht. Gänzlich anders als bei den üblichen Weidesystemen werden die Tiere in ausgewachsene und hohe Bestände eingetrieben. Dabei soll nicht nur Futter gefressen werden, sondern auch bewusst Pflanzenmasse niedergetrampelt werden. Die so entstehende Mulchschicht soll dabei die Evaporation reduzieren und durch den organischen Bestandesabfall langfristig Humus aufbauen

Bestandessanierung

Trockengestresste Pflanzenbestände regenerieren im Grünland rasch und in Folgeaufwüchsen stellt sich durch erhöhte Stickstoffverfügbarkeit, stärkere Wurzelbildung sowie Reserveeinlagerungen ein kompensatorischer Mehrertrag ein (Hofer et al. 2016), allerdings nur dann, wenn auf Trockenheit ausreichend Niederschläge folgen. Führt eine längere und intensive Dürre zu irreversiblen Schäden, sodass keine natürliche Regeneration des Pflanzenbestandes möglich ist, wird eine Nachsaat oder sogar eine Neuansaat notwendig, vorzugsweise mit trockenoleranten Arten bzw. Mischungen (Pötsch et al. 2019a).

Das Saatgut sollte hierbei in Abhängigkeit des Standortes und der Nutzungsintensität gewählt werden. Vor allem auf gestressten Standorten ist es wichtig, Saatgut höchster Qualität mit einer entsprechenden Breite an Mischungspartnern zu verwenden, um für künftige Dürreperioden gut vorbereitet zu sein. In trockenheitsgefährdeten Gebieten hat sich der Spätsommer/Herbst als der geeignetste Termin für eine Bestandesverbesserung herausgestellt. Die geringere Konkurrenzkraft der Altnarbe, die geringere Dürregefahr sowie der zunehmende Niederschlag in Form von Tau begünstigen die Grünlandsanierung zu diesem Zeitpunkt. Allerdings muss bei zu späten Aussatterminen die Gefahr von Frühfrösten, im speziellen für die Leguminosen, beachtet werden. Um den Erfolg der Grünlandverbesserung sicherstellen zu können, sollte eine frühzeitige Nutzung des Folgeaufwuchses (Schröpfungsschnitt) stattfinden, um die Altnarbe kurz zu halten und die Bestockung der Gräser zu fördern.

Verstärkte Almbewirtschaftung

Mit einem Flächenausmaß von gut 300.000 Hektar stellen die österreichischen Almfutterflächen eine wichtige, in den letzten Jahren jedoch immer weniger genutzte Ressource für die landwirtschaftliche Produktion dar (BML 2022). Die Veränderung der klimatischen Bedingungen beeinflussen die standortspezifische Produktivität von Almfutterflächen deutlich und führen auch zu starken Vegetationsveränderungen, welche zusammen mit nach wie vor abnehmenden Auftriebszahlen zusehends zur Verstrauchung, Verbuschung und anschließender Verwaldung führen. Die Weideflächen auf den Almen stellen einen wichtigen Beitrag zum Ausgleich von Ertragsdefiziten dar und sorgen in dürregeplagten Regionen für einen entscheidenden Raufutterpuffer. Die Almfutterflächen gilt es deshalb mit Hilfe einer entsprechenden Bestoßung bzw. Schwendmaßnahmen offenzuhalten. Für pflanzliche und tierische Arten, die an kühlere Bedingungen angepasst sind, dienen die höher gelegenen Flächen zusätzlich als wichtiges Rückzugsgebiet.

Generell erfordert das höhere Risiko von Ertragsausfällen neben den genannten Maßnahmen eine optimale und auch vorrausschauende Abstimmung zwischen Ertragsniveau

und Tierbestand, bei der auch eine entsprechende Futterreserve berücksichtigt werden sollte.

Literatur

BML (2022) Grüner Bericht 2022 - Die Situation der österreichischen Land- und Forstwirtschaft, Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus, Wien, 288 S.

Hofer D., Suter M., Haughey E., Finn J.A., Hoekstra N.J., Buchmann N., Lüscher A. (2016) Yield of temperate forage grassland species is either largely resistant or resilient to experimental summer drought. *Journal of Applied Ecology* 53 (4), 1023-1034.

Pötsch E.M., Herndl M., Schaumberger A., Schweiger M., Resch R., Adelwöhrer M. (2019a) Auswirkung zukünftiger Klimabedingungen auf Ertrag und Futterqualität im Grünland. 21. Alpenländisches Expertenforum zum Thema „Klimawandel im Alpenraum - Auswirkungen auf das Ökosystem Grünland und dessen Bewirtschaftung“, Gumpenstein, HBLFA Raumberg-Gumpenstein, 26.-27. März 2019, 49-54.

Pötsch E.M., Herndl M., Bahn M., Schaumberger A., Schweiger M., Kandolf M., Reinthaler D., Schink M., Adelwöhrer M. (2019b) ClimGrass – ein innovatives Freilandexperiment zur Erforschung der Folgen des Klimawandels im Grünland. 21. Alpenländisches Expertenforum zum Thema „Klimawandel im Alpenraum - Auswirkungen auf das Ökosystem Grünland und dessen Bewirtschaftung“, Gumpenstein, HBLFA Raumberg-Gumpenstein, 26.-27. März 2019, 3-10.

Vogel A., Scherer-Lorenzen M., Weigelt A. (2012) Grassland Resistance and Resilience after Drought Depends on Management Intensity and Species Richness. *PLoS ONE* 7 (5), e36992..

Anforderungen an den Pflanzenbestand: Mischungen, Arten und Sorten

Lukas Gaier^{1*}, Wilhelm Graiss¹ und Bernhard Krautzer¹

Zusammenfassung

Ein leistungsfähiger, dem Standort angepasster Dauergrünlandbestand ist eine der zentralen Grundlagen für eine nachhaltige und wirtschaftlich erfolgreiche tierische Produktion. Dieser gerät durch die klimatischen Veränderungen, vor allem durch die damit verbundenen Trockenperioden zunehmend unter Druck. Aus diesem Grund ist es sinnvoll das Artenspektrum in Richtung trockenheitstoleranteren Arten weiter zu entwickeln. Zudem ist es sinnvoll, neben bereits in Mischungen eingesetzten Arten, das Spektrum zu erweitern. Der Einsatz dieser „neuen“ Arten im Dauergrünland bedarf vorheriger wissenschaftlicher Untersuchungen, um negativen Auswirkungen auf den Bestand und der Futterqualität vorzubeugen. Auch auf Sortenebene im Bereich der Züchtung und der Sortenwertprüfungen muss in Zukunft auch besonderes Augenmerk auf die Trockenheitstoleranz gelegt werden. Um die Umsetzung dieser Anforderungen für die Landwirtschaft praxisgerecht zu gestalten, ist der Einsatz von Qualitäts-Saatgutmischungen, welche laufend angepasst werden, unerlässlich.

Schlagwörter: Trockenheitstoleranz, Saatgutmischungen, Grünlandarten, Pflanzenzüchtung

Idealer Pflanzenbestand

Ein leistungsfähiger, dem Standort angepasster Dauergrünlandbestand ist eine der zentralen Grundlagen für eine nachhaltige und wirtschaftlich erfolgreiche tierische Produktion. Die Basis dafür bildet eine dichte Grasnarbe mit einem möglichst geringen Anteil an offenem und somit unproduktivem Boden. Um stabile, qualitativ und quantitativ gute Erträge erreichen zu können, ist ein ausgewogenes Verhältnis der Artengruppen (Gräser, Leguminosen und Kräuter) unerlässlich. Diese haben dabei jeweils spezifische Aufgaben hinsichtlich der Ertrags- und Qualitätsbildung, sowie der Resilienzsteigerung gegenüber biotischen und abiotischen Stressoren. Die Gräser bilden dabei das Grundgerüst des Bestandes, sie bieten nicht nur die nötige Ertragsfähigkeit und Sicherheit, sondern weisen auch einen hohen Energiegehalt auf. Leguminosen verbessern durch ihre Symbiose mit den stickstoffbindenden Knöllchenbakterien die Stickstoffversorgung des Grünlandes. Neben der sehr guten Futterqualität steigern sie ebenso wie die Kräuter den Mineralstoffgehalt des Grundfutters. Die Kräuter steigern aufgrund ihrer guten Anpassungsfähigkeit wesentlich die Resilienz eines Grünlandbestandes. Wobei es sich bei den im Bestand vorkommenden Kräutern um Futterkräuter handeln soll und nicht um Giftpflanzen oder unerwünschte Arten. Die Zusammensetzung ist abhängig von der Bewirtschaftungsart und -intensität der Fläche. Bei einem mittelintensiven Schnittregime soll ein Verhältnis von 50-70% Gräser, 10-30% Leguminosen und < 30% Kräutern angestrebt werden. Bei vier- oder mehrschnittigem Grünland kann sich das Verhältnis weiter in Richtung der Gräser, zu Lasten des Kräuteranteils, verschieben.

¹ Institut für Pflanzenbau und Kulturlandschaft, HBLFA Raumberg-Gumpenstein, Raumberg 38, A-8952 IRDNING-DONNERSBACHTAL

* Ansprechpartner: DI Lukas Gaier, email: lukas.gaier@raumberg-gumpenstein.at

Anpassungsmöglichkeiten der Artengruppen

Durch die klimatischen Veränderungen und damit verbundenen Trockenperioden gerät dieser „Idealbestand“ zunehmend unter Druck. Besonders das Gräsergerüst leidet, da sich der Hauptwurzelanteil vieler, für das Wirtschaftsgrünland bedeutender, Grasarten in den oberen Bodenschichten befindet. Aus diesem Grund ist auf dürregefährdeten Standorten die Zusammensetzung von Saatgutmischungen hin zu trockenheitstoleranteren Arten wie dem Knäulgras (*Dactylis glomerata*) zu verschieben. Soll die ebenfalls trockenheitstolerante Wiesenrispe (*Poa pratensis*) gefördert werden, ist es zweckdienlich sie aufgrund ihrer langsamen Jugendentwicklung als Einzelkomponente nachzusäen. Auch ist das Artenspektrum für Dauergrünlandgräser in Mischungen in Zukunft möglicherweise zu erweitern. So könnten beispielsweise „neue“, bisher weniger verwendete Arten wie der Rohrschwengel (*Festuca arundinacea*) oder Festulolium in das Artenspektrum der Mischungen mitaufgenommen werden. Der Einsatz dieser Arten im Dauergrünland bedarf allerdings vorheriger wissenschaftlicher Untersuchungen, um negativen Auswirkungen auf den Bestand und der Futterqualität vorzubeugen. Derzeit läuft ein österreichweiter Versuch, bei dem diese Arten auf sieben Standorten über fünf Jahre hinweg auf ihre Ertragsfähigkeit, ihre Qualitätsparameter und auch auf ihr Verhalten in Dauergrünlandmischungen untersucht werden.

Neben der Anpassung des Gräserpektrums kommt auch den Leguminosen besondere Bedeutung zu. Aufgrund ihres teilweise sehr tief reichenden Wurzelsystems, von bis zu 209 cm beim Rotklee und bis 365 cm bei der Luzerne (Kutschera 1960), sind sie in der Lage Bodenwasser auch aus tieferen Bodenschichten zu nutzen. Beim Rotklee ist dabei zu beachten, dass diese Art bei intensiver Nutzung nur kurzfristig im Bestand erhalten bleibt. Somit ist hier eine regelmäßige Nachsaat empfehlenswert um den Anteil im Bestand hoch zu halten. Auch ein vermehrter Einsatz der Luzerne (*Medicago sativa*) oder der Bastard-Luzerne (*Medicago varia*) im Dauergrünland kann angedacht werden. Diese haben zwar hohe Ansprüche an den Boden, die Kulturführung und die Futterkonservierung, sind aber für trockenheitsgefährdete Lagen ideal um niederschlagsarme Phasen zwischen dem 2. und 3. Schnitt zu überbrücken und eine Futterproduktion zu gewährleisten. Dabei können sowohl Luzernereinbestände als auch Luzernegrasmischungen zum Einsatz kommen. Diese Luzernegrasbestände sind reich an Protein und bei einer vierschnittigen Nutzung auch ausdauernd. Im Gegensatz zum Rotklee ist eine Über- oder Nachsaat mit Luzerne aufgrund ihrer anfänglichen geringen Konkurrenzkraft nicht zu empfehlen (Frühwirth et al. 2022). Für das extensiv genutzte Grünland können der Hornklee (*Lotus corniculatus*), aber auch blattreiche Zuchtformen der Saat-Esparsette (*Onobrychis viciifolia*) als trockenheitstolerante Arten empfohlen werden.

Kräuter wurden bis dato in Saatgutmischungen für das Wirtschaftsgrünland in Mitteleuropa nicht, oder nur in sehr geringem Ausmaß berücksichtigt. In Zukunft könnte es allerdings sinnvoll sein, aufgrund ihrer teilweise stark ausgeprägten Trockenheitstoleranz ein verstärktes Augenmerk auf sie zu legen. Als besonders aussichtsreich gelten hier Zuchtsorten der Gemeinen Wegwarte (*Cichorium intybus*) und des Spitzwegerichs (*Plantago lanceolata*). Ergebnisse aus Neuseeland zeigten positive Effekte auf die Ausdauer und die Verunkrautung von intensiv genutzten Weiden durch den Einsatz dieser Arten (Tozer et al. 2016). Derzeit laufen auch in Europa verschiedene Studien (Boland et al. 2022, Golińska et al. 2022) zu deren Einsatz. Auch in Österreich wurde eine Versuchsreihe auf Wiesen und Weiden angelegt um die Auswirkungen des Einsatzes dieser Arten auf den Pflanzenbestand, die Ausdauer und die Ertragsfähigkeit zu untersuchen.

Weitere Maßnahmen

Auf Sortenebene muss in Zukunft auch besonderes Augenmerk auf die Trockenheitstoleranz gelegt werden. Dazu kann es notwendig sein, zu amtlichen Sortenwertprüfungen zusätzliche Untersuchungen unter teilweise kontrollierten Bedingungen (beispielsweise

Versuche mit simuliertem Trockenstress) durchzuführen. Auf der Ebene der Pflanzenzüchtung müssen die Vertreter aller Artengruppen hinsichtlich ihrer Trockenheitstoleranz, aber auch ihrer Resistenzen gegenüber (regional) neu auftretender Krankheiten, verbessert werden. Verlängerte Vegetationsperioden können bei Verzicht auf eine erhöhte Nutzungsfrequenz auch zu längeren Aufwuchsperioden führen. Dazu sind Sorten mit hoher Nutzungselastizität, die ihre Qualität über einen längeren Zeitpunkt halten können, besonders geeignet. Auch solche Eigenschaften gilt es in Wertprüfungen zu erheben.

Dem Landwirt kann schwer zugemutet werden, ständig über die sortenspezifischen Eigenschaften der im Grünland verwendeten Arten und (ständig wechselnden) Sorten informiert zu sein. Gerade deswegen ist es wichtig, dass sich die zuständigen Fachexperten aus Forschung, Beratung und der Saatgutwirtschaft regelmäßig dazu austauschen. Dabei werden die neuen Erkenntnisse und Prüfergebnisse evaluiert und diskutiert und schließlich in praxisgerechten Mischungsempfehlungen zusammengefasst (<https://gruenland-viehwirtschaft.at>). Diesen aktuellen Stand der empfohlenen Sorten und Saatgutmischungen findet man im jährlich überarbeiteten Handbuch für Qualitäts-Saatgutmischungen der Österreichischen Arbeitsgemeinschaft für Grünland und Viehwirtschaft (ÖAG). Die darin empfohlenen Saatgutmischungen für Dauergrünland, Weide, Nachsaat und Feldfutterbau garantieren höchsten Qualitätsertrag bei maximaler Ausdauer und richten sich stets nach den drei Eckpfeilern der Saatgutqualität für Grünlandmischungen:

- Einhaltung des empfohlenen Österreichischen Mischungsrahmens, um sicher zu stellen, dass je nach Klimagebiet, Standort und Nutzungsart bzw. -intensität die richtigen Arten im richtigen Verhältnis enthalten sind.
- Ausschließlich Verwendung von Sorten, die unter österreichischen Standorts- und Klimabedingungen langjährig auf Ertrag, Qualität und Ausdauer geprüft sind. Nur solche Sorten (ÖAG Sortenliste, Österreichische Sortenliste) garantieren in der Praxis auch den Erfolg.
- Nur garantiert ampferfreies Saatgut darf verwendet werden!

Literatur

Boland T.M., Godwin F., Baker S., Lynch M.B., Evans A.C.O., Murphy P.M., Kelly A.K. (2022) Multispecies swards improve animal growth and performance at slaughter in a dairy calf to beef production system Grassland at the heart of circular and sustainable food systems, Caen, France.

Frühwirth P., Tiefenthaler F., Resch R., Hendler M., Krautzer B. (2022) Die Luzerne – Eine Eiweißfutterpflanze mit Zukunft (ÖAG-Info, Issue).

Golińska B., Paszkowski A., Goliński P. (2022) Inclusion of chicory in grass-clover mixtures enhances leys productivity and herbage quality compared to monocultures Grassland at the heart of circular and sustainable food systems, Caen, France.

Kutschera L. (1960) Wurzelatlas mitteleuropäischer Ackerunkräuter und Kulturpflanzen. DLG-Verlags-GmbH.

Tozer K.N., Barker G.M., Cameron C.A., Wilson D., Loick N. (2016) Effects of including forage herbs in grass–legume mixtures on persistence of intensively managed pastures sampled across three age categories and five regions. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 59(3), 250-268. <https://doi.org/10.1080/00288233.2016.1188831>.

Erfahrungen zur Bewässerung von Grünland im Alpenraum

Giovanni Peratoner^{1*} und Martin Thalheimer¹

Zusammenfassung

Im Alpenraum hat die Bewässerung bewiesen, Schwankungen des Futterertrags unter trockenen Bedingungen stabilisieren zu können. Eine bedarfsgerechte Bewässerung liefert vergleichbare Erträge wie diejenige nach fixem Turnus und führt zu einer deutlich größeren Effizienz der Wassergaben. Aus Umweltgründen wäre sie daher wünschenswert, aber sie ist in der Praxis zurzeit wenig verbreitet. Die Futterqualität wird von der Beregnung leicht verschlechtert, aber bei Parametern, welche Qualität und Menge kombinieren, wird der positive Effekt der Bewässerung deutlich. Systematische Effekte der Beregnung auf einzelne Pflanzenarten sind nur in wenigen Fällen beobachtet worden (z. B. Zunahme von *Poa trivialis* und der Leguminosen) und es gibt in der Literatur keine Hinweise auf gravierende Verminderungen der Artenvielfalt bei mäßiger Bewässerung.

Schlagwörter: Beregnung, Effizienz, Futterertrag, Futterqualität, botanische Zusammensetzung

Einleitung

Die Bewässerung von Grünland wurde in Bergregionen nur in sehr niederschlagarmen Gebieten historisch praktiziert, wie zum Beispiel in Form von Berieselung mittels Waale im Vinschgau (Südtirol, Italien), einem inneralpinen Tal mit jährlichen Niederschlägen unter 500 mm/Jahr. Die wiederkehrenden Trockenereignisse der letzten Jahrzehnte haben allerdings im Alpenraum zu einer Verbreitung der Grünlandbewässerung mit moderner Technik und seit Beginn der 1990er Jahre zu Untersuchungen des Effektes der Beregnung auf verschiedene futterbaulich und ökologisch relevante Aspekte geführt. Für Südtirol sind keine genauen Zahlen hinsichtlich der aktuell bewässerten Fläche bekannt, aber aktuelle Schätzungen gehen von etwa 26-43 % der Wiesenfläche bzw. von 8-14 % der gesamten Grünlandfläche aus (Tappeiner et al. 2020). Dieser Beitrag fasst in Kurzform das vorliegende Wissen zum Effekt der Bewässerung im Grünland auf Futterertrag, Futterqualität und Entwicklung der botanischen Zusammensetzung zusammen.

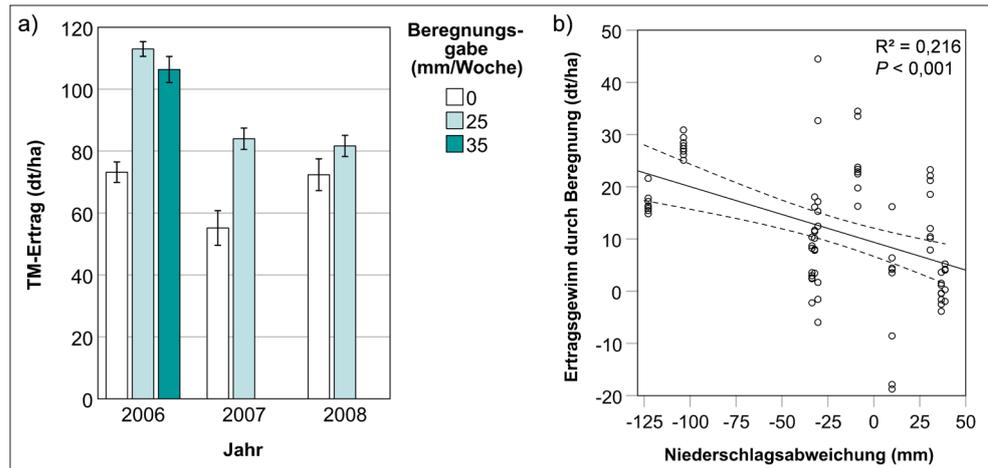
Beregnung und Ertrag

Futterproduktionsverluste in Jahren mit ausgeprägter Trockenheit sind am stärksten bei leichten, flachgründigen Böden mit hohem Skelettanteil an Südhängen zu erwarten. In Feldversuchen, die von 2006 bis 2008 in Südtirol an dreischnittigen Goldhaferwiesen durchgeführt wurden, war der Ertrag der unbewässerten Flächen in den zwei ersten Untersuchungsjahren etwa bei zwei Drittel jener der bewässerten Wiesen, mit wöchentlichen Wassergaben von 25 mm/Woche in festem Turnus (Peratoner et al. 2009). In diesem Versuch bewirkte eine Erhöhung der Standardwassergabe auf 35 mm/Woche (*Abbildung 1a*) oder eine Teilung der Gaben auf zwei wöchentlichen Ereignissen keine weitere Verbesserung des Ertrags. Im niederschlagsreichen Jahr 2008 bewirkte stattdessen die wöchentliche Beregnung keine Ertragszunahme. Diese Ergebnisse stimmen relativ gut mit jener aus einer vierjährigen Versuchsreihe in der Schweiz mit Ertragszunahmen zwischen 13 % und 50 % je nach Standort und Jahr überein (Troxler et al. 1992).

¹ Versuchszentrum Laimburg, Laimburg 6, Pfatten, I-39040 AUER

* Ansprechpartner: Dr. Giovanni Peratoner, email: giovanni.peratoner@laimburg.it

Abbildung 1: a) Effekt verschiedener Beregnungsgaben auf den TM-Ertrag von Dauerpflanzen in Südtirol (Mittelwert \pm Standardfehler) und b) Beziehung zwischen der jeweiligen Niederschlagsabweichung zum langjährigen Niederschlagsmittelwert und dem Ertragsgewinn durch die Beregnung (Quelle: Peratoner et al. 2009).



Es ist aber naheliegend, dass Bewässerungszeitpunkt und verabreichte Wassermenge in erster Linie von der Kombination der Pflanzen- und Bodeneigenschaften (Wurzeltiefe, nutzbare Feldkapazität und Steinanteil) und des jeweiligen Wetterverlaufs abhängen, so dass keine allgemein gültige Angabe bezüglich der optimalen Standardgabe möglich ist. Deswegen ist neben der Quantifizierung des Ertragsgewinns auch die Effizienz der eingesetzten Wassermenge, auch im Sinne eines bewussten Umgangs mit den Wasserressourcen, sehr relevant. Setzt man bei den Daten aus dem Südtiroler Versuch (Peratoner et al. 2009) den Ertragszuwachs (Differenz zwischen dem Ertrag bewässerter und unbewässerter Kontrollflächen) in Beziehung zur Niederschlagsabweichung (Differenz zwischen dem verfügbaren Niederschlag im jeweiligen Jahr und dem gesamten langjährigen Niederschlag für den gleichen Zeitraum), ist eine Zunahme der Effizienz der Wassernutzung mit zunehmender Wasserknappheit sichtbar (Abbildung 1). Das deutet darauf hin, dass die Beregnung nach Bedarf die optimale Lösung für die Erhöhung der Effizienz der Beregnung ohne zu erwartende Ertragsverluste wäre. Dies beweisen deutlich Versuche aus der Schweiz (Calame et al. 1992), bei denen die Effizienz der Wassergaben genau ermittelt wurde. Wassergaben nach fixem Turnus und einem Wasseraufwand zwischen 20 und 30 mm/Woche (inklusive höherer Wassergaben, die mit niedriger Häufigkeit verabreicht wurden) wurden einer bedarfsgerechten Beregnung gegenübergestellt, die aus einer Wassergabe von 40 mm bei der Überschreitung von 300 mbar Saugspannung im Boden bestand. Die bedarfsgerechte Beregnung erzielte einen durchschnittlichen Mehrertrag von 1,15 kg TM/m³ Wasser, während die Mehrerträge der Behandlungen mit fixem Turnus zwischen 0,5 und 0,8 kg TM/m³ Wasser lagen.

Die praktische Umsetzung der bedarfsgerechten Bewässerung innerhalb genossenschaftlich organisierter Bewässerungsstrukturen erfordert vor allem die flexible Verfügbarkeit von Wasser für die Bewässerung im Gegensatz zu den üblicherweise starren, zeitlich relativ weit auseinander liegenden Bewässerungsturnussen, die mit der oben beschriebenen bedarfsgerechten Bewässerung kaum vereinbar sind. Was die kontinuierliche und sorgfältige Beobachtung der Entwicklung der Saugspannung im Boden mittels Tensiometer betrifft, stehen verschiedene technische Lösungen zur Verfügung, wobei neuere technische Entwicklungen auch eine automatische Übertragung der Messwerte in Echtzeit oder eine vollautomatische Steuerung der Wasserzufuhr ermöglichen.

Beregnung und Futterqualität

Hinsichtlich der Futterqualität ist eine leichte Zunahme der Faserkomponente (NDF und ADF) sowie eine geringe Abnahme von Rohprotein und Energiekonzentration durch die Beregnung zu erwarten (Peratoner et al. 2009, Troxler et al. 1992, Dumont et al. 2015). Dieser Effekt ist vermutlich auf die reduzierte Bildung von Stängeln und Halmen bei

Tabelle 1: Effekt der Beregnung auf Futterqualität, Protein- und Energieertrag. Mittelwerte über Standorte und Beregnungsmengen der Jahre 2006 und 2007. RP = Rohprotein, RF = Rohfaser. Datenquelle: Peratoner et al. 2009 (Mittelwert über die Jahre 2006 und 2007)

Aufwuchs	Beregnung	RP (g/kg TM)	RF (g/kg TM)	NDF (g/kg TM)	ADF (g/kg TM)	NEL (MJ/kg)	Proteinertrag (kg/ha)	Energieertrag (GJ/ha)
Erster Schnitt	ja	136,8	284,5	521,6	349,8	5,62	552,0	22,6
	nein	149,5	270,3	503,3	339,8	5,78	497,2	19,4
Folgeschnitte	ja	162,1	273,2	486,1	342,6	5,62	554,3	19,2
	nein	169,2	250,2	452,2	309,2	5,87	362,4	12,6

Pflanzen mit Wassermangel mit einer entsprechenden Verschiebung des Blatt-zu-Stängel-Verhältnisses zurückzuführen. Sobald die Qualität aber mit der Quantität kombiniert wird (Proteinertrag und Energieertrag), wird der durchaus positive Effekt der Bewässerung deutlich erkennbar (Tabelle 1).

Beregnung und botanische Zusammensetzung

In der wissenschaftlichen Literatur ist die Information zu den Änderungen in der Zusammensetzung des Pflanzenbestandes, die von der Bewässerung in produktionsorientierten Wiesen im Berggebiet hervorgerufen werden, gering. Feldversuche an zwei Standorten in der Schweiz (Troxler et al. 1992) zeigten, dass die Ertragsanteile von *Poa trivialis* und *Poa supina*, *Taraxacum officinale* und der funktionellen Gruppe der Leguminosen durch die Beregnung zunahm, während *Festuca rubra* und *Elymus repens* abnahmen. Für andere Arten, wie *Dactylis glomerata* und *Trisetum flavescens*, war kein allgemeiner Effekt festzustellen. Diese Ergebnisse werden zum Teil bestätigt von der Auswertung der Daten aus 202 Vegetationsaufnahmen kurz vor dem ersten Schnitt von Wirtschaftswiesen (ca. 700 bis 1600 m Meereshöhe, zwei bis fünf Schnitte/Jahr), von denen knapp die Hälfte beregnet wurde (Peratoner et al. 2017): Unter Berücksichtigung auch des Nährstoffeintrags konnte ein Effekt der Beregnung nur für vier Arten und eine Artengruppe (Leguminosen) nachgewiesen werden, obwohl im Durchschnitt aller Jahre und Standorte die Effekte gering waren. Die Beregnung bewirkte eine allgemeine durchschnittliche Abnahme des Ertragsanteils von *Dactylis glomerata* (-2,3 %) sowie eine Zunahme von *Lolium perenne* (+2,5 %), *Poa trivialis* (+1,9 %), *Rumex acetosa* (+0,8 %) und der Leguminosen (+2,2 %) (Tabelle 1). Somit wurde die in der Tendenz fördernde Wirkung der Beregnung auf *Poa trivialis* und Leguminosen bestätigt, die bereits im Versuch in der Schweiz beobachtet worden war. Bei *Dactylis glomerata* (eher trockenheitstolerant) und *Lolium perenne* (wenig trockenheitstolerant) handelt es sich vermutlich um Verschiebungen der zwei Arten, während *Poa trivialis* als Flachwurzler von einer verbesserten Wasserversorgung vermutlich begünstigt wird. Keine allgemeine Abnahme der Artenvielfalt wurde in extensiv bewirtschafteten Wiesen durch eine mäßige Beregnung (20 mm/Woche) beobachtet (Lessard-Therrien et al. 2017, Boch et al. 2021).

Literatur

Boch S., Kurtogullari Y., Allan E., Lessard-Therrien M., Rieder N.S., Fischer M., Martínez De León G., Arlettaz R., Humbert J.-Y. (2021) Effects of fertilization and irrigation on vascular plant species richness, functional composition and yield in mountain grasslands. *Journal of Environmental Management* 279, 111629.

Calame F., Troxler J., Jeangros B. (1992) Bestimmung der Wassermenge für eine optimale Beregnung von Naturwiesen im Goms (Oberwallis). *Landwirtschaft Schweiz* 5 (4), 181-187.

- Dumont B., Andueza D., Niderkorn V., Lüscher A., Porqueddu C., Picon-Cochard C. (2015) A meta-analysis of climate change effects on forage quality in grasslands: specificities of mountain and Mediterranean areas. *Grass and Forage Science* 70, 239-254.
- Jensen K.B., Waldron B.L., Peel M.D., Robins J.G. (2010) Nutritive value of herbage of five semi-irrigated pasture species across an irrigation gradient. *Grass and Forage Science* 65, 92-101.
- Lessard-Therrien M., Humbert J.-Y., Arlettaz R. (2017) Experiment-based recommendations for biodiversity-friendly management of mountain hay meadows. *Applied Vegetation Science* 20 (3), 352-362.
- Peratoner G., Gottardi S., Figl U., Kasal A., Bodner A., Thalheimer M. (2009) Einfluss der Beregnung auf Futterertrag und -qualität von Bergwiesen in Südtirol. In: C. Berendonk und G. Riehl (Hg.): *Futterbau und Klimawandel: Grünlandbewirtschaftung als Senke und Quelle für Treibhausgase*. 53. Jahrestagung der AGGF vom 27.-29. August 2009 in Kleve. Kleve: Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen (Mitteilungen der Arbeitsgemeinschaft Grünland und Futterbau, 10), S. 135-138.
- Peratoner G., Vitalone L., Pramsohler M., Kasal A. (2017) Effect of irrigation and N fertilisation on the botanical composition of mountain grassland. *Grassland Science in Europe* 22, 212-214.
- Tappeiner U., Marsoner T., Niedrist G. (2020) *Landwirtschaftsreport zur Nachhaltigkeit Südtirol*. Eurac Research. Bozen, Italien.
- Troxler J., Jeangros B., Calame F. (1992) Einfluss der Beregnung auf den Pflanzenbestand, den Futterertrag und den Nährwert von Naturwiesen im Goms (Oberwallis). *Landwirtschaft Schweiz* 5 (3), 109-116.

Bericht

22. Alpenländisches Expertenforum

Herausgeber:

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

Druck, Verlag und © 2022

ISBN-13: 978-3-902849-98-4

ISSN: 1818-7722