

8. Umweltökologisches Symposium

Klimaschutz und Klimawandelanpassung

22. und 23. März 2022

HBLFA Raumberg-Gumpenstein

Bericht

8. Umweltökologisches Symposium

Herausgeber:

Höhere Bundeslehr- und Forschungsanstalt für Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein,

A-8952 Irdning-Donnersbachtal

Druck, Verlag und © 2022

ISBN-13: 978-3-902849-90-8

ISSN: 1818-7722

8. Umweltökologisches Symposium 2022

Klimaschutz und Klimawandelanpassung

Irdning-Donnersbachtal 2022

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: 978-3-902849-90-8
Alle Rechte vorbehalten
Irdning-Donnersbachtal 2022

Inhaltsverzeichnis

Klimawandelanpassung und Klimaschutz: Herausforderungen für Österreichs Landwirtschaft.	5
N. Mitterböck	
Klimawandelauswirkungen auf die Landwirtschaft in der Schweiz und Möglichkeiten der Anpassung.	9
A. Holzkämper	
Landnutzung im Klimawandel: Herausforderungen für eine zukunftsfähige Landwirtschaft.	15
I. Meyer	
Moorstrategie Österreich 2030+ - Moore und Torfböden unter dem Aspekt des Klimawandels.	21
J. Lorenz, Ch. Schröck und S. Glatzel	
Klimawandel versus Landschaftswandel - was sind die Ursachen der Erosion im HOAL Petzenkirchen?	27
P. Strauss	
Boden.Pioniere: Optimierung des Bodenwasserhaushalts durch Humusaufbau.	33
G. Bodner, K. Keiblinger, O. Tsae-Tun, S. Winkler und Th. Weninger	
Boden.Pioniere: Humusaufbau-Potenziale innovativer Ackerbaubetriebe in Österreich.	39
K. M. Keiblinger, Ch. Rosinger, S. Huber, D. Luger und G. Bodner	
Kann Humusaufbau in der Österreichischen Landwirtschaft das Klima retten? - Potenziale und Zertifizierung.	45
F. X. Hölzl	
Klimafitter Ackerbau aus und für die Praxis.	51
J. Maßwohl	
Klimawandelanpassungsstrategien im Dauergrünland	57
A. Bohner	
Lachgas und N₂-Emissionen intensiv bewirtschafteter Weiden in den australischen Subtropen.	63
J. Friedl, K. M. Keiblinger, C. Scheer, D. W. Rowlings	
Nachhaltige Nutztierhaltung: mehr als nur Treibhausgase.	69
S. J. Hörtenhuber, M. Seiringer-Gaubinger, W. Knaus, V. Größbacher, W. Zollitsch	

Wirtschaftsdüngermanagement NEU im Hinblick auf Klimaschutz und Klimawandelanpassung.	79
A. Pöllinger-Zierler und A. Zentner	
ARGE Ammosafe - Emissionsarme Düngung durch Nährstoffrückgewinnung.	85
Ch. Werni	
DIE WASSERSCHUTZBAUERN: Boden- und Wasserschutz im Kreislauf gedacht.	91
A. Oswald	
Klimaschutz und Klimawandelanpassung - Maßnahmen der Boden.Wasser.Schutz.-Beratung in Oberösterreich.	95
Th. Wallner	

Klimawandelanpassung und Klimaschutz: Herausforderungen für Österreichs Landwirtschaft

Nora Mitterböck^{1*}

Zusammenfassung

Aufgrund verschiedener Klima-Initiativen der Europäischen Union, wie das Europäische Klimagesetz sowie die rechtlichen Regelungen des Pakets „Fit for 55“, hat die österreichische Landwirtschaft in Zukunft deutlich strengere Klimaschutzziele zu erwarten.

Schlagwörter: Europäische Union; Rechtsvorschläge; Treibhausgase; Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft; Kohlenstoffkreisläufe

Summary

Due to various climate initiatives of the European Union, such as the European Climate Law as well as the legal regulations of the „Fit for 55“ package, Austrian agriculture has to expect significantly stricter climate protection targets in the future.

Keywords: European Union; legal proposals; greenhouse gases; land use, land-use change and forestry; carbon cycles

In diesem Beitrag werden verschiedene Klima-Initiativen der Europäischen Union, die für Österreichs Landwirtschaft wesentlich sind, kurz dargestellt.

Das **Europäische Klimagesetz** (EU) 2021/1119 ist seit Juli 2021 gültig und schafft einen Rahmen für die Verwirklichung der Klimaneutralität in der EU bis 2050. Für diese Zielerreichung wurde im EU-Klimagesetz ein neues Reduktionsziel für die Treibhausgas-Emissionen festgesetzt. Bis 2030 müssen die THG-Emissionen gegenüber dem Vergleichsjahr 1990 netto um mindestens 55% reduziert werden. Zum Thema der Klimawandelanpassung wurde im EU-Klimagesetz die Wichtigkeit der Verbesserung der Anpassungsfähigkeit, die Stärkung der Widerstandsfähigkeit und die Verringerung der Anfälligkeit gegenüber Klimaänderungen betont.

Das **Paket „Fit for 55“** wurde Mitte Juli 2021 von der Europäischen Kommission vorgelegt. Es handelt sich um ein umfangreiches Rechtssetzungspaket der Europäischen Kommission, wodurch die Europäische Union in die Lage versetzt werden soll, bis zum Jahr 2030 das Klimaziel von „netto mindestens 55%“ Treibhausgasreduktion gegenüber 1990 zu erreichen. Es umfasst insgesamt 12 Vorschläge für Rechtsakte, darunter u.a. die Emissionshandels-Richtlinie (ETS), die Effort Sharing-VO, die LULUCF-VO (Land Use, Land-Use Change & Forestry), die Richtlinien für Erneuerbare Energie bzw. Energieeffizienz. Die Zielanpassung aus dem Europäischen Klimagesetz von gegenwärtig -40% auf -55% betrifft unmittelbar insbesondere die ETS-Richtlinie, die Effort-Sharing- sowie die LULUCF-VO; die übrigen Rechtsakte tragen aber wesentlich zur Zielerreichung bei, etwa durch die Erhöhung der Ziele für Erneuerbare und Energieeffizienz. Im Bereich der Landwirtschaft sind v.a. die Vorschläge zur Effort Sharing-VO und zur LULUCF-VO relevant.

Der Vorschlag der **Effort Sharing-VO** umfasst weiterhin jene Sektoren, die nicht dem gegenwärtigen EU-Emissionshandelssystem unterliegen. Somit bleibt ein unveränderter

¹ Abteilung VI/I - Allgemeine Klimapolitik, Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, Stubenbastei 5, A-1010 WIEN

* Ansprechpartner: DI Nora Mitterböck, email: nora.mitterboeck@bmk.gv.at

Anwendungsbereich, obwohl ab 2025/2026 für Straßenverkehr und Gebäude ein EU-weites Emissionshandelssystem (separat) geschaffen wird. Das EU-weite Gesamtziel für die Effort Sharing Sektoren wird von -30% auf -40% bis 2030 gegenüber 2005 angehoben. Die Berechnung für die Mitgliedstaaten erfolgt gemäß der aktuellen Aufteilungs-Methodik. Bei einer Zielbandbreite von -10% für Bulgarien bis -50% für Länder wie Deutschland oder Dänemark, wird das Ziel für Österreich von gegenwärtig -36% auf -48% angehoben. Die Zielaufteilung zwischen den betroffenen Sektoren (u.a. der Sektor Landwirtschaft) wird national festgelegt werden.

Der Vorschlag zur **LULUCF-VO** beinhaltet eine Überarbeitung der bestehenden Verordnung. Es wurde ein EU-Ziel einer Netto-Senke von 310 Mt CO_{2a} im Jahr 2030 im Einklang mit dem EU-Klimagesetz festgesetzt. Für den Zeitraum 2021-25 gibt es kaum Änderungen in den Anrechnungsregeln von LULUCF. Ab 2026 erfolgt jedoch ein Umstieg auf ein System im Einklang mit der Treibhausgasinventur für den Sektor LULUCF. Von 2026 bis 2030 wird ein jährlicher Zielpfad festgelegt, beginnend im Jahr 2022 mit dem Durchschnitt der Netto-LULUCF-Senke der Jahre 2021-2023 und ansteigend auf 5,65 Mio. t CO_{2a} im Jahr 2030 für Österreich, als Beitrag zum EU-Ziel für 2030.

Mit der Umsetzung dieser Rechtsvorschlage in den Mitgliedstaaten werden auch auf die österreichische Landwirtschaft strengere Klimaschutzziele zukommen, aber auch weitere Fortschritte im Zusammenhang mit der Anpassung an den Klimawandel nötig sein. Aufgrund der Begebenheiten in der landwirtschaftlichen Produktion wird eine komplette Reduktion der TGH, wie Methan und Lachgas, auf Null nicht möglich sein. Dennoch werden Maßnahmen, um den notwendigen Beitrag zum Klimaschutz zu leisten, erforderlich sein.

Mögliche Klimaschutzmaßnahmen im Sektor Landwirtschaft (Aussagen im NEKP 2019)

- Humuserhaltung und -aufbau (Änderung der Bewirtschaftungsmethoden im Ackerland)
- Erhaltung von Dauergrünland (Umbruchsverbot)
- Optimiertes Düngemanagement (durch weniger Stickstoff im System v.a. Reduktion von Lachgas, aber auch von Ammoniak <-> Luftreinhaltung)
- Anpassungen in der Tierhaltung (vermehrte Weidehaltung, optimierte Fütterung)
- Ausbau der land- und forstwirtschaftlichen Bioenergieproduktion -> Vergärung von Wirtschaftsdüngern in Biogas-Verwertungsschiene
- Treibstoffumstellung

Auswahl von Maßnahmen zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels:

- Nachhaltiger Aufbau des Bodens und Sicherung der Bodenfruchtbarkeit, Aufbau und langfristige Stabilisierung eines optimalen Humusgehaltes; Förderung des Bodenlebens
- Etablierung und Förderung von wassersparenden Bewässerungssystemen
- Züchtung und gezielter Einsatz von hitzetoleranten Pflanzen, Auswahl geeigneter Kulturpflanzen für die jeweiligen Standortbedingungen
- Verbesserung der agrarologischen Situation und Erhalt der natürlichen Biodiversität durch Reduktion von Windangriffsflachen und Bodenerosion
- Förderung des Tierschutzes und der Tiergesundheit unter veränderten klimatischen Verhältnissen
- Entwicklung eines angepassten Futterungsmanagements (v.a. ausreichende Versorgung mit Mineralstoffen) bei Hitze
- Ausrichten der Klimatisierung von Stallungen an steigende thermische Belastung im Sommer

Eine weitere EU-Klima-Initiative ist die „Carbon-Farming-Initiative“. Mitte Dezember 2021 hat die Europäische Kommission eine **Mitteilung zu nachhaltigen Kohlenstoffkreislaufen**

veröffentlicht, in der dargelegt wird, wie der Abbau von CO₂ aus der Atmosphäre erhöht werden kann. Um bis spätestens 2050 Klimaneutralität und anschließend negative Emissionen zu erreichen, muss die EU den CO₂-Abbau verstärken und nachhaltige Kohlenstoffkreisläufe schaffen. Dazu muss die EU ihre Abhängigkeit von fossilem Kohlenstoff drastisch verringern, die klimaeffiziente Landwirtschaft ausbauen, um mehr Kohlenstoff in der Natur zu speichern, und industrielle Lösungen fördern, um CO₂ nachhaltig und nachprüfbar zu entfernen und zu recyceln. Unter dem Titel „Klimaeffiziente Landwirtschaft“ soll ein grünes Geschäftsmodell entwickelt werden, mit dem Landbewirtschafter für verbesserte Landbewirtschaftungsmethoden belohnt werden, die zu einer Kohlenstoffbindung in Ökosystemen führen und die Freisetzung von Kohlendioxid in die Atmosphäre verringern. In der Mitteilung werden folgende mögliche Bereiche angeführt:

- Aufforstung und Wiederaufforstung nach ökologischen Grundsätzen
- Wiederaufforstung, Wiedervernässung und Erhaltung von Torfgebieten und Feuchtgebieten
- Einsatz von Methoden zur konservierenden Bodenbearbeitung, Verwendung von Zwischenfrüchten und Deckpflanzen wie Hülsenfrüchten, Raps, Roggen und Wicken
- Gezielte Umwandlung von Ackerflächen in Brachland oder von stillgelegten Flächen in Dauergrünland
- Agrarforstwirtschaft und andere Formen des landwirtschaftlichen Mischbetriebs

Die Europäische Kommission wird bis Ende 2022 einen EU-Rechtsrahmen für die Zertifizierung des CO₂-Abbaus vorschlagen. Mit den Zertifizierungsvorschriften sollen wissenschaftlich solide Anforderungen an die transparente Messung, Überwachung und Überprüfung des aus der Atmosphäre entfernten Kohlendioxids sowie die Berichterstattung darüber festgelegt werden.

Klimawandelauswirkungen auf die Landwirtschaft in der Schweiz und Möglichkeiten der Anpassung

Annelie Holzkämper^{1*}

Zusammenfassung

Der Klimawandel ist kein neues Phänomen, sondern schon seit einigen Jahrzehnten mess- und spürbar. Auch landwirtschaftliche Produktion in der Schweiz ist von diesem Phänomen betroffen. Die Auswirkungen sind zwar nicht per se negativ, aber dennoch stellen sie die Branche vor wachsende Herausforderungen: zunehmender Sommertrockenheit, Hitze, und wachsenden Schädlingsrisiken, die für die Zukunft erwartet werden, muss mit entsprechenden Anpassungsmassnahmen begegnet werden. Neben der Zunahme an Bewässerung zur Reduktion von Trockenheitsrisiken kommt der Wahl und Züchtung klimaangepasster Sorten und Kulturen in dem Zusammenhang eine hohe Bedeutung zu.

Schlagwörter: Klimarisiken, Klimaprojektionen, klimaangepasste Sorten, klimaangepasste Kulturen, Bewässerung

Summary

Climate change is not a new phenomenon, but has been measurable and perceptible for several decades. Agricultural production in Switzerland is also affected by this phenomenon. Although the effects are not negative per se, they nevertheless present the sector with growing challenges: increasing summer drought, heat, and growing pest risks expected in the future must be countered with appropriate adaptation measures. In addition to increasing irrigation to reduce drought risks, the selection and breeding of climate-adapted varieties and crops is of great importance in that respect.

Keywords: climate risks, climate projections, climate-adapted varieties, climate-adapted crops, irrigation

Steigende Temperaturen, wechselnde Niederschlagsverhältnisse und ihre bisherigen Auswirkungen auf die Landwirtschaft

Seit Anfang des 20. Jahrhunderts ist die durchschnittliche Temperatur um etwas mehr als 2 °C gestiegen (MeteoSchweiz). Diese Erwärmung hatte Einfluss auf die Vegetationsentwicklung, was sich zum Beispiel in Tendenzen zur früheren Blüte im Grünland und bei Dauerkulturen in diesem Zeitraum widerspiegelt (z.B. Vuffray et al. 2016). Gemäss Schätzungen der MeteoSchweiz auf Basis phänologischer Daten unterschiedlicher Pflanzenarten kam es so über die letzten drei Jahrzehnte zu einer Verfrühung des Frühlungseintritts um etwa 5 Tage im Vergleich zu den 1960er, -70er und -80er Jahren (Frühlingsindex MeteoSchweiz). Insgesamt tragen steigende Temperaturen zu einer Verlängerung der Vegetationsperiode bei, nicht nur, weil das Wachstum früher beginnen kann, sondern auch weil es länger andauert. Signifikante Trends einer Verlängerung der Wachstumsperiode im Schweizer Mittelland wurde von Calanca and Holzkämper 2010

¹ Agroscope, Gruppe Klima und Landwirtschaft, Fachbereich Agrarökologie und Umwelt, Reckenholzstr. 191, CH-8046 ZÜRICH

* Ansprechpartner: Dr. Annelie Holzkämper, email: annelie.holzkaemper@agroscope.admin.ch

aufgezeigt. Für die Produktivität von Grünland ist diese Entwicklung grundsätzlich vorteilhaft. In extremen Trockenjahren der jüngeren Vergangenheit war die Produktivität von Grünland allerdings jeweils stark dezimiert. Ertragseinbrüche mussten in diesen Extremjahren durch höhere Futtermittelimporte ausgeglichen werden. Auch im Rebbau hatten bisherige Temperaturzunahmen bereits merklichen Einfluss auf die Mostqualität und es ergaben sich Potentiale für den Anbau von Rebsorten mit höheren Temperaturansprüchen (Holzkämper et al. 2013). Im Vergleich zum Grünlandbau sind Trockenheitsperioden im Rebbau grundsätzlich weniger problematisch. Sie führen zwar zu geringeren Ertragsmengen, aber dafür zeichnen sich die Erträge in diesen Jahren oft durch ausgesprochen hohe Qualität aus. Im Ackerbau können sich Trockenheitsextreme einzelner Jahre je nach Kultur und dem zeitlichen Auftreten der Trockenperiode sehr unterschiedlich auswirken. Von Sommertrockenheit werden die Erträge der Wintergetreide in aller Regel wenig beeinträchtigt, weil sie sich in dieser Periode bereits in der späten Reifephase befinden oder sogar schon geerntet wurden. Sommerkulturen wie Kartoffeln, Zuckerrübe oder auch Mais sind durch Sommertrockenheit viel stärker beeinträchtigt und deshalb vielfach von Zusatzbewässerung abhängig.

Neben Trockenheitslimitierungen sind aber auch Ertragslimitierungen durch hohe Niederschlagsmengen unter aktuellen Bedingungen keine Seltenheit. Dies zeigt sich zum Beispiel in signifikanten negativen Korrelationen zwischen Winterweizenerträgen und Niederschlagsmengen im Winter und Frühjahr (Price 2020). Der belegte statistische Zusammenhang kann auf unterschiedliche Mechanismen zurückzuführen sein. Eine wichtige Rolle könnte dabei spielen, dass niederschlagsreiche Perioden häufig mit Strahlungsdefiziten einhergehen, die die photosynthetische Aktivität und damit den Biomassenzuwachs einschränken. Zudem wird eine Vielzahl von Pflanzenkrankheiten durch feuchte Bedingungen begünstigt, was wiederum Ertragsreduktionen zur Folge haben kann. Schliesslich kann auch ein Mangel an Sauerstoff in wassergesättigten Böden dazu führen, dass Wurzeln absterben und die Produktivität der Pflanzen eingeschränkt wird.

Zukünftiger Klimawandel und seine weiteren Auswirkungen auf die Landwirtschaft in der Schweiz

Gemäss Klimaprojektionen wird sich der Erwärmungstrend in Zukunft weiter fortsetzen. Mit Klimaschutz (RCP2.6) sind bis zum Ende des Jahrhunderts Temperaturerhöhungen um 1.5°C wahrscheinlich; ohne Klimaschutz (RCP8.5) muss sogar mit einer Erwärmung um 5°C gerechnet werden. Gleichzeitig ändert sich die Niederschlagsverteilung über das Jahr: im Sommer werden die Niederschläge ohne Klimaschutz bis 2100 um etwa 20% abnehmen (5% mit Klimaschutz), während Niederschlagsmengen im Winter und Frühling um 15 bzw. 4% zunehmen (mit Klimaschutz 5 bzw. 0%) (NCCS 2018).

Mit den weiter ansteigenden Temperaturen ist somit auch für die Zukunft eine weitere Verlängerung der Vegetationsperiode zu erwarten, die zu einer potentiellen Steigerung der Grünlandproduktivität beitragen kann sofern Limitierungen durch Trockenheit nicht überwiegen. Darüber hinaus eröffnen sich mit steigenden Temperaturen auch Potentiale für den Anbau von wärmebedürftigen Nischenkulturen wie Quinoa, weisse Lupine, Kichererbsen oder Mandel (Heinz 2021). Grundsätzlich reduziert sich die Häufigkeit extrem tiefer Temperaturen mit dem Temperaturanstieg; allerdings muss das nicht zwangsläufig mit einer Reduktion des Auftretens von Frostschäden einhergehen, wenn man bedenkt, dass sensitive Entwicklungsphasen wie das Knospenschwellen sich bei Erwärmung verfrühen (Meier et al. 2018). Klare negative Auswirkungen bringt die Temperaturerhöhung im Hinblick auf Risiken durch Schadinsekten mit sich: diese verursachen potentiell grössere Schäden, weil sie unter wärmeren Bedingungen mehr Generationen bilden können (Stöckli et al. 2012, Grünig et al. 2020a, Grünig et al. 2020b). Für viele der aktuell dominierenden Ackerkulturen sind mit weiterem Temperaturanstieg auch grundsätzlich negative Auswirkungen auf Erträge zu befürchten: zum einen reduziert

eine beschleunigte phänologische Entwicklung – insbesondere in der Reifephase - die Potentialerträge, weil über die verkürzte Periode weniger Biomasse akkumuliert werden kann; zum anderen ist zu erwarten das das Risiko von Limitierungen durch Hitzestress zunimmt. Trotz der sich fortsetzenden Tendenz zu einer Verfrühung sensitiver Stadien wie der Blüteperiode, schätzen Studien sowohl für Mais also auch für Winterweizen Zunahmen der kritischen Exposition dieser Kulturen gegenüber Hitzestress (Holzkämper und Fuhrer 2015, Rogger et al. 2021).

Mit abnehmenden Sommerniederschlägen ist zusätzlich mit dem vermehrten Auftreten von Trockenheitsrisiken zu rechnen, die sich insbesondere im Futterbau und beim Anbau von Sommerkulturen bemerkbar machen werden (Moulin und Calanca 2021).

Mit den projizierten Zunahmen der Niederschlagsmengen im Winter und Frühjahr ist für die Zukunft nicht zu erwarten, dass aktuell relevante Ertragslimitierungen von Winterweizen durch Strahlungsdefizite, Krankheitsdruck und Sauerstoffstress an Bedeutung verlieren. Im Gegenteil steht sogar eine Zunahme dieser Limitierungen zu befürchten.

Handlungsoptionen zur Klimaanpassung

Je nach Bedeutung einzelner Limitierungen für eine landwirtschaftliche Kultur oder Produktionsform in einer bestimmten Region sind unterschiedliche Massnahmen zur Anpassung an den Klimawandel sinnvoll. Eine naheliegende Möglichkeit der Anpassung an Trockenheitslimitierungen liegt in der Bewässerung betroffener Kulturen (Fuhrer und Calanca 2014). Da die Schweiz ein sehr wasserreiches Land ist, werden in vielen Regionen der Schweiz auch unter Klimawandel ausreichende Wasserressourcen für die Bewässerung zur Verfügung stehen, auch wenn die Verfügbarkeit von Bewässerungswasser aus kleinen und mittleren Flüssen im Alpenvorland unter Klimawandel abnehmen wird (Brunner et al. 2019, Linder 2021). Für Kulturen mit hoher Wertschöpfung wird eine Zunahme an Bewässerung wahrscheinlich rentabel sein. Dabei muss sich die Wahl der Anbauregionen für diese Kulturen dann aber entweder an der Verfügbarkeit von Wasserressourcen orientieren, oder es muss ein wesentlicher Mehraufwand für die Etablierung von Bewässerungsinfrastruktur betrieben werden, um Wasser aus entfernteren grossen Quellen wie Seen nutzen zu können. Für Kulturen mit geringerer Wertschöpfung mag sich solch ein zusätzlicher Aufwand nicht rentieren, so dass auf andere Formen der Anpassung wie Änderungen der Kultur- und Sortenwahl ausgewichen werden muss. Zum Beispiel sind Winterkulturen im Vergleich zu Sommerkulturen weniger anfällig gegenüber Trockenheit, weil kritische Entwicklungsstadien wie die Blüteperiode in der Regel zum Zeitpunkt eintretender Sommertrockenheit bereits überwunden sind (Klein et al. 2014, Holzkämper et al. 2020). Dieser Vorteil einer frühen Abreife kann auch bei Sommerkulturen zur Vermeidung von zukünftigem Trockenheits- und Hitzestress beitragen (Holzkämper 2020). Die Anpassung durch Sortenwahl und darüber hinaus durch Züchtung kann einerseits auf diese Frühreife ausgerichtet sein; andererseits können morphologische oder physiologische Eigenschaften, die zur Anpassung an Trocken- und Hitzestress beitragen, im Fokus stehen (Suter et al. 2017, Friedli et al. 2019). Vor dem Hintergrund zunehmender Winter- und Frühjahrsniederschläge ist auch die Problematik feuchtebedingter Ertragslimitierungen nicht zu vernachlässigen. Der Züchtung von Resistenzen gegenüber Pilzkrankheiten und Entwicklung von nachhaltigen Pflanzenschutzmitteln kommt in dem Zusammenhang eine besondere Bedeutung zu (Bellameche et al. 2020, Wuest et al. 2021).

Fazit

Insgesamt sind zu erwartende Klimawandelauswirkungen auf die Schweizer Landwirtschaft moderat im Vergleich zu anderen Regionen der Erde (z.B. der mediterrane Raum und der globale Süden). Nichtsdestotrotz müssen die zu erwartenden Änderungen durch Anpassungen in der Bewirtschaftung abgefangen werden, um die Agrarproduktivität zu

erhalten oder gegebenenfalls sogar zu erhöhen. Dazu bedarf es einer vorausschauenden Forschung und Züchtung, sowie auch einer langfristigen Ressourcenplanung, die die zu erwartenden klimatischen Änderungen mit in Betracht zieht (z.B. im Kontext landwirtschaftlicher Wassernutzung, siehe z.B. Schmocker-Fackel et al. 2021).

Referenzen

- Bellameche F., Pedrazzini C., Mauch-Mani B., Mascher F. (2020) Efficiency of biological and chemical inducers for controlling *Septoria tritici* leaf blotch (STB) on wheat (*Triticum aestivum* L.). *European Journal of Plant Pathology* 158, 99-109.
- Brunner M.I., Björnson Gurung A., Zappa M., Zekollari H., Farinotti D., Stähli M. (2019) Present and future water scarcity in Switzerland: Potential for alleviation through reservoirs and lakes. *Sci. Total Environ.* 666, 1033-1047.
- Calanca P., Holzkämper A. (2010) Agrarmeteorologische Bedingungen im Schweizer Mittelland von 1864 bis 2050. *Agrarforschung Schweiz* 1, 320-325.
- Friedli C.N., Abiven S., Fossati D., Hund A. (2019) Modern wheat semi-dwarfs root deep on demand: response of rooting depth to drought in a set of Swiss era wheats covering 100 years of breeding. *Euphytica* 215.
- Fuhrer J., Calanca P. (2014) Irrigation requirement and available water supply under changing climatic conditions. *Agrarforschung Schweiz* 5, 256-263.
- Grünig M., Calanca P., Mazzi D., Pellissier L. (2020a) Inflection point in climatic suitability of insect pest species in Europe suggests non-linear responses to climate change. *Global Change Biology* 26, 6338-6349.
- Grünig M., Mazzi D., Calanca P., Karger D.N., Pellissier L. (2020b) Crop and forest pest metawebs shift towards increased linkage and suitability overlap under climate change. *Communications Biology* 3.
- Heinz M. (2021) Prospects of Cultivating Alternative Crops in a Changing Climate in Switzerland. Oeschger Centre for Climate Change Research. University of Bern, Bern, p. 82.
- Holzkämper A. (2020) Varietal adaptations matter for agricultural water use – a simulation study on grain maize in Western Switzerland. *Agric. Water Manage.* 237, 106202.
- Holzkämper A., Hund A., Fossati D. (2020) Saisonalitätsänderungen und die Folgen für die Landwirtschaft. *Klimawandel und Jahreszeiten*, Bern, Switzerland, p. 2.
- Holzkämper A., Fuhrer J. (2015) Wie sich der Klimawandel auf den Maisanbau in der Schweiz auswirkt. *Agrarforschung* 6, 440-447.
- Holzkämper A., Fuhrer J., Frei C. (2013) Temperaturtrends und Rebbau in der Schweiz. *Schweizer Zeitschrift für Obst- und Weinbau* 1, 6-9.
- Klein T., Holzkämper A., Calanca P., Fuhrer J. (2014) Adaptation options under climate change for multifunctional agriculture: a simulation study for western Switzerland. *Regional Environmental Change* 14, 167-184.
- Linder Z. (2021) Climate change impacts on irrigation water resource availability from rivers in Switzerland. Oeschger Centre for Climate Change Research. University of Bern, Bern, p. 84.
- Meier M., Fuhrer J., Holzkämper A. (2018) Changing risk of spring frost damage in grapevines due to climate change? A case study in the Swiss Rhone Valley. *International Journal of Biometeorology* 62, 991-1002.
- Moulin T., Calanca P. (2021) Modelling the response of permanent grasslands to climate change. *Fourrages* (246): 11-20.
- NCCS, 2018. CH2018 - Climate Scenarios for Switzerland. In: Services, N.C.f.C. (Ed.), Technical Report. National Centre for Climate Services, Zurich.

- Price R. (2020) Attribution of Winter Wheat Yield Variability to Climate Drivers in Switzerland. Oeschger Center for Climate Change Research. University of Bern, Bern, p. 56.
- Rogger J., Hund A., Fossati D., Holzkämper A. (2021) Can Swiss wheat varieties escape future heat stress? *European Journal of Agronomy* 131, 126394.
- Schmocker-Fackel P., Hüsler F., Oosenbrug E., Lanz K., Zahner S., Wieser E. (2021) Hydro-CH2018-Synthesis Report: Effects of climate change on Swiss water bodies. In: (FOEN), F.O.f.t.E. (Ed.), *Environmental Studies*. Federal Office for the Environment (FOEN), p. 134.
- Stöckli S., Samietz J., Hirschi M., Spirig C., Rotach M., Calanca P. (2012) Einfluss der Klimaänderung auf den Apfelwickler. *Schweizer Zeitschrift für Obst- und Weinbau* 19.
- Suter M., Hofer D., Lüscher A. (2017) Drought resistance of functionally different forage species is related to their nitrogen acquisition and deficiency. *Grassland Science in Europe* 22, 431-433.
- Vuffray Z., Deléglise C., Amaudruz M., Jeangros B., Mosimann E., Meisser M. (2016) Phänologische Entwicklung von Mähwiesen – 21 Beobachtungsjahre. *AgrarForschung* 7, 322-329.
- Wuest S.E., Peter R., Niklaus P.A. (2021) Ecological and evolutionary approaches to improving crop variety mixtures. *Nature Ecology & Evolution* 5, 1068-1077.

Landnutzung im Klimawandel: Herausforderungen für eine zukunftsfähige Landwirtschaft

Ina Meyer^{1*}

Zusammenfassung

Der Agrarsektor ist von den Auswirkungen des Klimawandels direkt betroffen und trägt zugleich zur Freisetzung von Treibhausgasen (THG) bei. Nicht nachhaltige Bodenbewirtschaftungspraktiken gefährden zunehmend die Resilienz und Produktivität landwirtschaftlicher Böden. Landwirtschaft steht folglich im Fokus des Klimaschutzes. Die Sequestrierung von Kohlenstoff durch Humusaufbau gewinnt in der Diskussion über terrestrische Kohlenstoffsinken an Bedeutung. Ein zentraler Indikator für die Qualität des Bodens ist der organische Kohlenstoffgehalt (SOC), der erhöht werden sollte. Managementpraktiken zur Wiederherstellung denaturierter Böden sowie die Renaturierung von Mooren können den SOC Bestand steigern. Der ökologische Landbau flankiert durch eine Umstellung von Ernährungsgewohnheiten hin zu geringem Fleischkonsum kann zu einer erheblichen Verringerung von insbesondere Nicht-CO₂-THG Emissionen der Landwirtschaft beitragen. Diese Maßnahmen sollten im Sinne einer zukunftsfähigen Landwirtschaft gefördert werden.

Schlagwörter: Bodenkohlenstoff, Kohlenstoffsinken in Böden, biologische Landwirtschaft, Fleischkonsum, Ökologisierung der Landwirtschaft

Summary

The agricultural sector is directly affected by the impacts of climate change, and, at the same time, contributes to the release of greenhouse gas (GHG) emissions. Unsustainable soil management practices are increasingly threatening the resilience and productivity of agricultural soils. Consequently, agriculture is a central target for climate protection strategies. Here, carbon sequestration through humus build-up is gaining importance in the discussion of terrestrial carbon sinks. A key indicator of soil quality is the soil organic carbon (SOC) content which should be enhanced. Management practices to restore denatured soils as well as of renaturation of peatlands can increase SOC stocks. Organic agricultural practices flanked by dietary changes towards low meat consumption can contribute to significant reductions, especially in non-CO₂ GHG emissions from agriculture. These measures should be incentivized in the pursuit of sustainable agriculture.

Keywords: soil organic carbon, soil organic carbon sinks, organic farming, meat consumption, sustainable agriculture

Einleitung

Land und seine Böden sind Grundlage für die Produktion von Nahrungs- und Futtermitteln, von Biomasse für die Energiegewinnung sowie für andere Ökosystemleistungen wie die Regulierung der Wasserqualität und -menge, für Erosions- und Hitzeschutz, die Erhaltung der Biodiversität und die Abschwächung des Klimawandels durch die Bindung von Kohlenstoff im Boden.

¹ Österreichisches Institut für Wirtschaftsforschung (WIFO), Arsenal Objekt 20, A-1030 WIEN

* Ansprechpartner: Dr. Ina Meyer, email: ina.meyer@wifo.ac.at

Die zunehmende Konkurrenz um Land resultiert in Landnutzungsänderungen. Nicht nachhaltige Praktiken und Schadstoffeinträge verursachen dabei Bodendegradation in verschiedenen Formen (physisch, chemisch und biologisch). Die wichtigsten direkten Ursachen für Bodendegradation, d.h. vom Menschen verursachte Prozesse, die zum Rückgang biologischer Vielfalt und Ökosystemfunktionen oder -leistungen der Böden führen, sind intensive Land- und Forstwirtschaft, Urbanisierung, Infrastrukturausbau und Rohstoffabbau sowie der Klimawandel (IPBES 2018). Land- und Bodendegradation ziehen wirtschaftliche Folgen nach sich, denn sie zerstören das Naturkapital, das die wohlfahrtsrelevanten Ökosystemleistungen hervorbringt. Die Kosten für die Vermeidung von Schäden sind bedeutend geringer (EEA 2020), woraus sich akuter Handlungsbedarf ableitet.

Der Agrarsektor ist von den Auswirkungen des Klimawandels direkt betroffen und trägt zugleich zur Freisetzung von Treibhausgasen bei. Der Klimawandel beeinflusst die landwirtschaftliche Produktivität vor allem durch wärmere Mittel- und Extremtemperaturen, veränderte Niederschlagsregime und erhöhte CO₂-Konzentrationen in der Atmosphäre. Dies wirkt sich z.T. bereits heute nachteilig auf die Ernährungssicherheit aus. Bis 2050 wird ein Rückgang der Ernteerträge um durchschnittlich 10 %, in bestimmten Regionen um bis zu 50 % prognostiziert (IPBES 2018, Jägermeyr et al. 2021, Mbow 2019). Nach Angaben des IPCC¹ werden etwa ein Viertel aller anthropogenen THG Emissionen weltweit durch die Land- und Forstwirtschaft sowie durch Landnutzungsänderungen (AFOLU²) verursacht.³ Der Landwirtschaft kommt daher eine bedeutende Rolle für den Klimaschutz zu.

Aktivitäten in der Landwirtschaft wirken sich direkt auf die Bodenqualität aus und beeinflussen Bodenerosion, Verdichtung, Gehalt an organischer Substanz, biologische Vielfalt, Bodenverschmutzung (Rückstände von Pflanzenschutzmitteln, Mineraldünger) oder Versalzung (EEIG 2021). Ein wichtiger Indikator für die Qualität des Bodens ist der organische Kohlenstoffgehalt (SOC – soil organic carbon). Organischer Kohlenstoff im Boden verbessert die Bodenstruktur und erhöht das Wasserrückhaltevermögen. Abfluss und Erosion werden so verhindert. Ein Verlust an SOC kann die Fähigkeit des Bodens einschränken, Nährstoffe für eine nachhaltige Pflanzenproduktion zu liefern. Atmosphärisches CO₂ kann als Kohlenstoff in der Vegetation und in den Böden der terrestrischen Ökosysteme gespeichert werden. Landbasierte Kohlenstoffbindung ist ein wichtiger Baustein einer globalen Klimaschutzstrategie (Lal 2004) und einer zukunftsfähigen Landwirtschaft.

Das EU-Klimapaket strebt u.a. eine Anpassung der EU-Verordnung über Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (LULUCF 2018/841) an, mit dem Ziel, das Potential an Kohlenstoffsinken zu erhöhen. Bis 2030 sollen Kohlenstoffsinken in Höhe von 310 Mio.t CO_{2eq} geschaffen werden und ab 2035 der AFOLU Sektor klimaneutral sein, einschließlich der Nicht-CO₂-Emissionen, etwa Methan aus der Tierhaltung. Es wird eine verschärfte Verpflichtung der Mitgliedsstaaten zur Vorlage integrierter Klimaschutzpläne für den Landsektor angestrebt.

Kohlenstoffsequestrierung in Böden

Die Sequestrierung von Kohlenstoff bzw. die Erhöhung des SOC Bestandes durch Humusaufbau spielt auch aufgrund zahlreicher damit verbundener positiver Effekte auf andere Ökosystemleistungen eine wichtige Rolle bei der Diskussion über terrestrische Kohlenstoffsinken und Klimaschutz. Globale Klimamodelle zeigen, dass das Pariser Klimaziel nur mit negativen Emissionen, d. h. mit der Entfernung von Kohlenstoff aus der Atmosphäre, erreicht werden kann (Lal 2004). Die Größe des SOC-Pools ist auch einer

¹ Intergovernmental Panel on Climate Change

² Agriculture, Forestry, and other Land Use

³ <https://unfccc.int/topics/land-use/workstreams/land-use-land-use-change-and-forestry-lulucf>

von mehreren Qualitätsmaßstäben für die pflanzliche Produktion und die nationale und regionale Ernährungssicherheit (Baumgarten et al. 2021).

Konzepte zur klimaschonenden Bewirtschaftung von Ackerland werden im Rahmen der „4 per mille soils for food security and climate“ Initiative diskutiert (Rumpel et al. 2018, Minasny et al. 2017, Chabbi et al. 2017). Diese Initiative wurde auf der Pariser Klimakonferenz ins Leben gerufen mit dem Ziel, den globalen Bestand an organischer Substanz im Boden um durchschnittlich 0,4 % pro Jahr zu steigern. Die Bodenart (Moore, Gebirge, Wüsten), die oberirdische Vegetation, das Klima und die Geschwindigkeit, mit der die Bodenorganismen den Kohlenstoff verwerten, beeinflussen die Sequestrierungsrate. Eine Studie über den globalen SOC-Bestand in Böden zeigt, dass einige Ackerflächen einen Gehalt aufweisen, der unterhalb kritischer Grenzen liegt (Stockmann et al. 2015). Eine erfolgreiche „4-per-mille“-Strategie kann hier ansetzen und den SOC-Gehalt in degradierten Gebieten durch Ausbringung von Gründüngung, speziellen Fruchtfolgen, Anbau von Deckfrüchten und Kontrolle der Beweidung wiederherstellen.

Der Schutz von Mooren hat in diesem Zusammenhang oberste Priorität. Während in anderen Landökosystemen Kohlenstoff für eine begrenzte Zeit eingespeichert und nach Absterben der Pflanzen wieder freigesetzt wird, kann in Mooren der Kohlenstoff als Torf langfristig gespeichert werden. Mooren enthalten weltweit zwischen 26 % und 44 % des gesamten Bodenkohlenstoffs, obwohl nur 3 bis 4 % der Landfläche von Mooren bedeckt sind. Dennoch wurden 10 bis 20 % der weltweiten Torfgebiete entwässert oder verbrannt und in landwirtschaftliche Flächen umgewandelt, insbesondere in tropischen Gebieten. Um Moore zu schützen, müssen das Abbrennen von Torfgebieten reguliert, ihre Nutzung in der Landwirtschaft eingestellt und Maßnahmen geplant werden, die den Torf durch anhaltende Nässe erhalten bzw. wieder vernässen. Geschädigte Moore setzen den gespeicherten Kohlenstoff sukzessive wieder frei und sind für etwa 6 bis 7 % der globalen CO₂ Emissionen verantwortlich. Nach Indonesien ist die EU der weltweit zweitgrößte CO₂-Emittent aus degradierten Mooren. Innerhalb der EU ist Deutschland der größte Emittent (BMUV 2021). Naturnahe nicht entwässerte Moore sind für den Arten- und Biotopschutz sowie für den Landschaftswasserhaushalt von Bedeutung.

Bewährte Techniken in der Landwirtschaft für eine Förderung der Kohlenstoffaufnahme sind die ganzjährige Bepflanzung des Bodens, die Zugabe von Ernterückständen wie Mulch, Stroh oder Kompost und die Minimierung von Bodenbearbeitungsmethoden wie Pflügen. Die Böden brauchen regelmäßige Zufuhr von organischem Material. Agroforstliche Systeme, Hecken und Feuchtgebiete können den Bodenkohlenstoff erhöhen. Regionale Strategien zur Erhöhung des Bodenkohlenstoffs müssen unter Berücksichtigung lokaler Bodentypen, klimatischer Bedingungen, der Geschwindigkeit des Klimawandels und sozioökonomischer Kontexte entwickelt sowie gesetzte Maßnahmen unter Einsatz von Technologie (Stichprobenkontrollen oder Fernerkundung) regelmäßig überprüft und evaluiert werden.

Ökologischer Landbau und Ernährungsgewohnheiten

Alternative Bewirtschaftungsformen wie der ökologische Landbau bieten sich an, THG Emissionen aus der agrarischen Landnutzung zu reduzieren und das Ernährungssystem nachhaltiger und resilienter zu gestalten. Ein wichtiger potenzieller Beitrag ökologisch bewirtschafteter Systeme liegt in der sorgfältigen Bewirtschaftung der Nährstoffe und der Verringerung der N₂O-Emissionen aus den Böden durch Vermeidung der Stickstoffdüngung. Das Anbausystem greift überwiegend auf betriebsinterne Ressourcen zurück und vermeidet großteils den Einsatz von externen Hilfsstoffen, wie z.B. auch von Sojafuttermitteln aus Tropenwaldregionen, die in der Kritik stehen, zur Entwaldung und somit zu beträchtlichen THG Emissionen und zur Vernichtung von Senken zu führen. Im ökologischen Landbau werden folglich weniger fossile und mineralische Ressourcen verbraucht. Damit bietet die ökologische Landwirtschaft Alternativen zu energieintensiven

Produktionsmitteln wie synthetischen Düngemitteln. Diese sind ebenso wie Pestizide verboten (El-Hage Scialabba, Müller-Lindenlauf 2010).

Einer Meta-Studie von Skinner et al. (2014) zufolge liegen die N₂O-Emissionen des ökologischen Landbaus bezogen auf die Fläche ackerbaulich genutzter Böden aufgrund des Verzichts auf N-Mineraldünger um 497±162kg CO_{2eq}/ha/a geringer. Die ertragsbezogenen N₂O-Emissionen liegen hingegen um 41±34kg CO_{2eq}/ha/a höher. Dieses schlechtere Abschneiden des Biolandbaus liegt im geringeren Ertrag pro Hektar im Ackerbau begründet, was auf den ersten Blick gegen diese Bewirtschaftungsform spricht. Die Differenz in der Produktivität ist jedoch in hohem Maße kontextabhängig und wird von den System- und Standortmerkmalen sowie den Kulturen beeinflusst (Seufert et al. 2012).

Aufgrund seiner geringeren Produktivität ist der Biolandbau bei gleichem Produktionsoutput auf eine größere Landfläche angewiesen. Hier können systemübergreifende Ansätze wie Änderungen der Ernährungsgewohnheiten, insbesondere ein geringerer Konsum von tierischem Eiweiß ansetzen und die Nachteile eines höheren Flächenbedarfs ausgleichen und zudem zu erheblich geringeren landwirtschaftlichen Emissionen beitragen (Eisen, Brown 2022). Ernährungsgewohnheiten spielen in der Etablierung einer nachhaltigen Landnutzung für die Produktion von Nahrungsmitteln eine zunehmend wichtige Rolle.

Der Biolandbau erbringt eine Vielzahl von erwünschten Ökosystemleistungen über den Klimaschutz hinaus, welche bisher nicht eingepreist sind und welche diejenigen der konventionellen Landwirtschaft übersteigen. Die stetig wachsende Nachfrage nach biologisch erzeugten Lebensmitteln zusammen mit der Förderung aus der 2. Säule der GAP ermöglichen einer steigenden Zahl von Betrieben in dieser Wertschöpfungskette eine wirtschaftliche Existenz sowie innovative Ansätze zu etablieren (ZKL 2021).

Fazit

Die bedeutenden Vorteile des Aufbaus und Erhalts des Humus für eine klimaresiliente und nachhaltige Landwirtschaft, für die Ertragsfähigkeit ihrer Böden und die Ernährungssicherheit, machen die Steigerung des SOC-Gehaltes zu einem zentralen agrarökologischen Handlungsfeld (ZKL 2021). Ziel einer Strategie für eine nachhaltige, d.h. zukunftsfähige Landwirtschaft sollte ein Portfolio an Maßnahmen sein, das sowohl angebotsseitige Managementpraktiken zur Steigerung des SOC Gehalts denaturierter Böden, für den Schutz von Mooren, sowie alternative Bewirtschaftungspraktiken wie den Biolandbau, als auch nachfrageseitige Ansätze, insbesondere Veränderungen im Konsumentenverhalten hinsichtlich einer reduzierten Nachfrage nach tierischen Lebensmitteln, beinhalten.

Aufgrund des öffentlichen Gut Charakters dieser Leistungen bedarf es eines verstärkten Angebotes von zielgerichteten öffentlich finanzierten Fördermaßnahmen. Agrarsubventionen sollten grundsätzlich an ökologische Verbesserungen geknüpft werden und auf multifunktionale und resiliente Produktionssysteme setzen. Flächenbasierte Direktzahlungen sollten in Zahlungen für Ökosystemleistungen umgewandelt werden. Ziel sollte es sein, das Ernährungssystem und die landwirtschaftliche Produktion so umzugestalten, dass die Degradierung landwirtschaftlicher Böden und steigende volkswirtschaftliche Kosten vermieden werden. Insgesamt ergibt sich daraus das Ziel einer Abkehr von der industriellen Landwirtschaft durch ihre umfassende Ökologisierung.

Literatur

Baumgarten A., Haslmayr H.-P., Schwarz M., Huber S., Weiss P., Obersteiner E., Aust G., Enschlich M., Horvath D., Leitgeb E., Foldal C., Rodlauer C., Böhner A., Spiegel H., Jandl R. (2021) Organic soil carbon in Austria – Status quo and foreseeable trends, *Geoderma*, Volume 402, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115214>

BMUV (2021) Nationale Moorschutzstrategie, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit Deutschland, https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Naturschutz/nationale_moorschutz_strategie_bf.pdf

Chabbi A., Lehmann J., Ciais P., Loescher H.W., Cotrufo M.F., Don A., SanClements M., Schipper L., Six J., Smith P., Rumpel C. (2017) Aligning agriculture and climate policy. *Nature Climate Change* 7, 307–309.

EEA (2020) State of nature in the EU - Results from reporting under the nature directives 2013-2018, EEA Report, ISBN 978-92-9480-260-6.

EEA (2019) The European environment - state and outlook 2020, Publications Office of the European Union, Luxembourg, doi: 10.2800/96749.

EEIG ALLIANCE ENVIRONNEMENT (2021) Evaluation support study on the impact of the CAP on sustainable management of the soil, Executive summary, European Union, doi: 10.2762/487172.

Eisen M.B., Brown P.O. (2022) Rapid global phaseout of animal agriculture has the potential to stabilize green-house gas levels for 30 years and offset 68 percent of CO₂ emissions this century, *PLOS Climate* 1(2), <https://doi.org/10.1371/journal.pclm.0000010>

El-Hage Scialabba E., Müller-Lindenlauf M. (2010) Organic agriculture in climate change, *Renewable Agriculture and Food Systems*: 25(2); 158–169, doi:10.1017/S1742170510000116.

IPBES (2018) Summary for policymakers of the assessment report on land degradation and restoration of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, Bonn, Germany.

Jägermeyr J., Müller C., Ruane A.C. et al. (2021) Climate impacts on global agriculture emerge earlier in new generation of climate and crop models. *Nature Food*. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00400-y>.

Lal R. (2004) Soil Carbon Sequestration to Mitigate Climate Change, *Geoderma* 123(1-2):1-22, DOI:10.1016/j.geoderma.2004.01.032

Mbow C. et al. (2019) Food Security. In: Special Report on Climate Change and Land, (eds P.R. Shukla et al., IPCC), J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.- O. Portner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (eds.)).

Minasny B. et al. (2017) Soil carbon 4 per mille, *Geoderma* 292 (2017) 59–86, ISSN 0016-7061, doi: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.002>.

Nemecek T., Dubois D., Huguenin-Elie O., Gaillard G. (2011) Life cycle assessment of Swiss farming systems: Integrated and organic farming. *Agricultural Systems* 104, 217–232. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2010.10.002>.

Rumpel C., Amiraslani F., Koutika L.-S., Smith P., Whitehead D., Wollenberg E. (2018) Put more carbon in soils to meet Paris climate pledges. *Nature* 564, 32–34.

Seufert V., Ramankutty N., Foley J.A. (2012) Comparing the yields of organic and conventional agriculture. *Nature* 485, 229–232. <https://doi.org/10.1038/nature11069>

Shukla P., Skea J., Slade R., Van Diemen R., Haughey E., Malley J., Pathak M., Pereira J.P. (Eds.) (2019) IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystem, chap. Technical Summary, 37–74.

Stockmann U., Padarian J., McBratney A., Minasny B., de Brogniez D., Montanarella L., Hong S.Y., Rawlins B.G., Field D.J. (2015) Global soil organic carbon assessment. *Glob. Food Sec.* 6, 9–16.

WBGU (2020) Landwende im Anthropozän: Von der Konkurrenz zur Integration, Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen, Berlin.

ZKL (2021) Zukunft Landwirtschaft. Eine gesamtgesellschaftliche Aufgabe. Empfehlungen der Zukunftskommission Landwirtschaft, Rangsdorf.

Moorstrategie Österreich 2030+ - Moore und Torfböden unter dem Aspekt des Klimawandels

Julia Lorenz^{1*}, Christian Schröck² und Stephan Glatzel³

Zusammenfassung

Moore gehören zu den Feuchtgebieten und sind einzigartige Ökosysteme mit vielfältigen Qualitäten und Aufgaben. Sie sind Kohlenstoffspeicher, schützen vor Hochwasser, sichern unser Trinkwasser und erzählen als Archive der Kulturgeschichte spannende Geschichten über längst vergangene Zeiten. Leider sind viele von ihnen bereits verschwunden oder stark gestört und haben sich so von Kohlenstoffsinken zu Treibhausgasquellen verwandelt. Die Moorstrategie Österreich 2030+ trägt dazu bei, den qualitativen und quantitativen Rückgang dieser Flächen zu stoppen, gestörte Moore in allen ihren ökologischen Funktionen wiederherzustellen und so diese wertvollen Lebensräume und ihre Kohlenstoff- und Wasserspeicherfunktion auch für zukünftige Generationen zu erhalten.

Schlagwörter: Feuchtgebiet, Kohlenstoffsinke, Treibhausgasquelle, Klimawandelanpassung, Hochwasserrisikomanagement

Summary

Peatlands belong to wetlands and are unique ecosystems with diverse qualities and tasks. They are carbon sinks, protect against floods, secure our drinking water and, as archives of cultural history, tell exciting stories about bygone times. Unfortunately, many of them have already disappeared or are badly disturbed, turning from carbon sinks to greenhouse gas sources. The Peatland Strategy Austria 2030+ aims to stop the qualitative and quantitative decline of these areas, to restore disturbed peatlands in all their ecological functions and thus to preserve these valuable habitats and their carbon and water storage function for future generations.

Keywords: wetland, carbon sink, greenhouse gas source, climate change adaptation, flood risk management

Einleitung

Moore erfüllen wichtige Aufgaben für die Gesellschaft: Sie sind einzigartige Landschaften und als solche, Lebensraum von spezialisierten Tier- und Pflanzenarten. Moore leisten aber auch ihren Beitrag zum Hochwasserrisikomanagement. Intakte Moore können Wasser wie ein Schwamm speichern und sorgen auf diese Weise für die Retention von Wasser in der Fläche. Dies ist angesichts des erhöhten Aufkommens von Wetterextremen, wie Starkregenereignisse, aber auch Trockenheit und Dürreperioden in Folge des Klimawandels, von immer größer werdender Relevanz. Durch ihre Fähigkeit, Nähr- und Schadstoffe aufzunehmen, tragen sie außerdem positiv zu einem langfristigen Gewässerschutz bei. Man bezeichnet Moore daher auch als Nieren der Landschaft. Ebenso spielen Moore in der aktuellen Treibhausgasdiskussion eine wichtige Rolle. In ihrem Torfkörper werden enorme Mengen an Kohlenstoff gespeichert. Aber nicht nur das, im Torf werden auch

¹ Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus - Abteilung I/6, Hochwasserrisikomanagement, Marxergasse 2, A-1030 WIEN; ² OÖ Landes-Kultur GmbH und IG Moorschutz; ³ Universität Wien, Institut für Geographie und Regionalforschung

* Ansprechpartner: DI Julia Lorenz, email: julia.lorenz@bmlrt.gv.at

Pollen konserviert, die uns wichtige Informationen über die nacheiszeitliche Geschichte der Naturraumentwicklung und Landnutzung liefern. Dies ist der Grund, wieso wir Moore als lebendige Archive betrachten. Nicht zu vergessen ist die Erholungsfunktion, die von Mooren ausgeht.

All diese Leistungen können Moore allerdings nur dann erfüllen, wenn sie in ihrer Funktion nicht gestört sind. Jedoch gehören Moore zu den äußerst sensiblen Ökosystemen. Sie sind über sehr lange Zeiträume entstanden – die Akkumulierung von einem Meter Torf braucht in etwa 1.000 Jahre – und können somit nicht kurzfristig wiederhergestellt werden. Daher ist es umso wichtiger, die verbliebenen Moore zu bewahren und Verschlechterungen zu verhindern.

Ohne Wasser kein Moor

Laut aktuellem Bericht zu den Erhaltungszuständen der Lebensraumtypen entsprechend der Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie reichen die Zustände der Moore Österreichs von ungünstig bis schlecht. Eine der größten Gefahren für Moore ist die Entwässerung, wodurch diesen Flächen oft das lebensnotwendige Wasser entzogen wird. Gründe dafür sind in erster Linie Verbauung und Nutzbarmachung von Flächen für die Land- und Forstwirtschaft, aber auch die Fließgewässerregulierung verschärft diesen Prozess. Daneben führen Eutrophierung, klimawandelbedingte Trockenheit, Nutzungsaufgabe, aber auch die Nutzung dieser Flächen zu touristischen Zwecken zu einer steten Verschlechterung der österreichischen Moore. Zurück bleiben sogenannte Torfböden, also ehemalige Moore, auf denen, durch die Bodennutzung, keine natürliche Moorvegetation mehr vorhanden ist. Nur durch eine zukunftsorientierte Zusammenarbeit aller relevanter AkteurInnen kann der Zustand der Moore und Torfböden in Österreich verbessert werden.



Abbildung 1: Blick auf das Ursprunger Moor (Salzburg) nach der Renaturierung © J. Lorenz.



Abbildung 2: Kohlenstoffhaushalt eines natürlichen Moores (links) und eines entwässerten Torfbodens (rechts) aus der Moorstrategie Österreich 2030+ (BMLRT, 2022).

Moore und Torfböden im Klimawandel

In intakten Mooren entzieht die Moorvegetation der Atmosphäre Kohlendioxid (CO₂) und das Moor wird zu einer Kohlenstoff-Senke. Der Sauerstoffmangel im Moor bedingt aber auch, dass die gehemmten Abbauprozesse Methan (CH₄) freisetzen. Da die Methan-Freisetzung naturnaher Moore im Sinn der Klimawirksamkeit oft deren CO₂-Speicherung kompensiert, verhalten sich naturnahe Moore im Wesentlichen klimaneutral bis leicht klimapositiv. In Torfböden hingegen sorgen sauerstoffgebundene Abbauprozesse, unter Mithilfe einer mooruntypischen Bodenfauna und moorfremden Vegetation, dass der, im Moor, gespeicherte Kohlenstoff sehr schnell abgebaut und als Kohlendioxid freigesetzt wird. Gleichzeitig entsteht im schlecht sauerstoffversorgten Wasser der Entwässerungsgräben weiterhin Methan, das an die Atmosphäre abgegeben wird (s. *Abbildung 2*).

Aus Österreich liegen nur aus dem Pürgschachen Moor (Steiermark) Messungen zur Treibhausgasfreisetzung und -speicherung vor (Drollinger et al. 2019). Sie zeigen, dass Hochmoore in Österreich bei standortgemäß hohem Wasserspiegel das Klima kühlen, Entwässerungen im landwirtschaftlich genutzten Umland der Moore hingegen diese zu einer Treibhausgasquelle umwandeln. Weltweit sind Moore im Durchschnitt treibhausgasneutral, beherbergen aber das Potential, bei Entwässerung zu Torfböden und erheblichen Treibhausgasquellen zu werden. Im Sinne des Klimaschutzes gilt es daher in erster Linie, die Kohlenstoffspeicherung von naturnahen Mooren zu erhalten. Dies wird durch den Verzicht auf Entwässerung und Abtorfung sowie durch die Sicherstellung der Wasserversorgung im Moor selbst und in dessen Umland erreicht.

Die Moorstrategie Österreich 2030+

Die Ziele der Moorstrategie setzen genau hier an. Konkret trägt die Moorstrategie Österreich 2030+ dazu bei, folgende Ziele zu erreichen:

- Naturnahe Moore und ihre Ökosystemleistungen zu erhalten
- Geschädigte Moore und ihre Ökosystemleistungen wiederherzustellen
- Eine nachhaltige Nutzung von Torfböden als ehemalige Moore zu fördern, um die Treibhausgasemissionen zu vermindern und den Wasserrückhalt zu erhöhen
- Die Bedeutung der Moore und Torfböden in der Öffentlichkeit bekanntzumachen
- Zu gemeinsamem Handeln zu motivieren, um diese einzigartigen Lebensräume zu schützen

Die Moorstrategie Österreich 2030+ ist eine umfangreiche, österreichweit abgestimmte Broschüre, die zum einen die Moorschutzarbeit in der Verwaltung unterstützt, zum anderen Bewusstseinsbildung über die Rolle von Mooren und Torfböden in der Politik bis hin zur breiten Öffentlichkeit betreibt. Der Erstellungsprozess bringt aber letztendlich

Abbildung 3: Umweltbilanz von Mooren (inkl. Anmooren) und Torfböden (inkl. Anmoorböden) © IG Moorschutz.



nicht nur ein Papier hervor, die Moorstrategie soll den Dialog und die Zusammenarbeit zwischen den zuständigen Fachbereichen und Personenkreisen, wie Verwaltung, GrundeigentümerInnen, Bewirtschaftenden oder Naturschutzbeauftragten, sicherstellen.

Die Strategie behandelt Moore und Torfböden. Sie schließt naturnahe Moore mit torfbildender Vegetation ebenso ein wie ehemalige Moore, von denen nur mehr der Torfboden verblieben ist (Torfböden) (s. *Abbildung 3*). In einer fachlichen Einleitung erfährt die Leserin bzw. der Leser Informationen zu Mooren und Torfböden sowie deren Verbreitung in Österreich und in welchem Erhaltungszustand sie sich befinden. Es wird auf ihre Bedeutung für den Landschaftswasserhaushalt, den Klimaschutz und weitere Ökosystemleistungen eingegangen. Dass bei der Moorschutzarbeit in Österreich nicht bei null begonnen wird, veranschaulichen zahlreiche Best-Practice-Beispiele, die sowohl einen Einblick über die Breite der Maßnahmen als auch die unterschiedlichen geografischen Voraussetzungen geben.

Wie nun künftig die Arbeit mit und der Schutz und die Entwicklung von Mooren und Torfböden in Österreich erfolgen soll, geben Ziele und Maßnahmen vor, welche sich nach folgenden sechs Schwerpunkten richten:

- Die **Schaffung grundlegender Voraussetzungen** zum Schutz der Moore und Torfböden, wie bspw. die fachübergreifende Zusammenarbeit beteiligter AkteurInnen oder die Berücksichtigung der Bedeutung dieser Flächen in der Klimapolitik und Wasserwirtschaft
- Die **Sicherung der Moore** durch Unterschutzstellung, Wiederherstellung und moorverträgliche Bewirtschaftungsformen
- Die **Sicherung und Entwicklung der Torfböden**. Ihre Funktion als Pufferzone für intakte Moore zu nutzen, sie vor Überbauung zu schützen und ihre Entwicklung zu fördern.
- Die **Reduktion des heimischen Torfabbaus** und der Einfuhr von Torf sowie verstärkte **Verwendung von torffreien Produkten** im Gartenbau
- Die **Bewusstseinsbildung** über die Bedeutung von Mooren und Torfböden bei der Verwaltung über GrundeigentümerInnen bis hin zu Bildungseinrichtungen
- Den **Ausbau des Fachwissens**, um genaue Kenntnis über Verbreitung, Zustand, Entwicklung und Funktionen von Mooren und Torfböden zu erlangen

Der Bezug zwischen Strategie und entscheidender Umsetzung wird durch die Aktionspläne der Bundesländer und des Bundes mit Zielausrichtung und Maßnahmenswerpunkten bis 2030 und darüber hinaus hergestellt.

Die Erarbeitung der Moorstrategie Österreich 2030+ erfolgte durch das Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus (BMLRT) gemeinsam mit den Bundesländern, mit fachlicher Unterstützung der Universität Wien, der Interessensgemeinschaft Moorschutz sowie relevanten NGOs. Begleitet wurde der Prozess durch das Büro Rosinak & Partner. Der Erstellungsprozess startete im Herbst 2020. Ein erster Entwurf wurde mit einem breiten Kreis von AkteurlInnen im Rahmen von Workshops und Informationsveranstaltungen in den Bundesländern abgestimmt. Dabei wurden alle relevanten Fachbereiche wie Naturschutz, Land-, Forst- und Wasserwirtschaft und Raumplanung eingebunden. Ein bundesweites Moor-Dialogforum im Herbst 2021 rundet den Beteiligungsprozess ab. Dadurch konnte eine breite Zustimmung und ein gemeinsames Bekenntnis zur Moorstrategie hergestellt werden. Die Moorstrategie Österreich 2030+ wurde anlässlich des Weltfeuchtgebietstags am 2. Februar 2022 veröffentlicht und steht auf der Homepage des Bundesministeriums für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus zum Download zur Verfügung.

Literatur

Drollinger S., Maier A., Glatzel S. (2019) Interannual and seasonal variability in carbon dioxide and methane fluxes of a pine peat bog in the Eastern Alps, Austria. *Agricultural and Forest Meteorology* 275, 69-78.

Klimawandel versus Landschaftswandel - was sind die Ursachen der Erosion im HOAL Petzenkirchen?

Peter Strauss^{1*}

Zusammenfassung

Belastbare (messbare) Daten zum Vergleich der Bedeutung des Klimawandels und der landwirtschaftlichen Intensivierung auf die Bodenerosion sind nur selten verfügbar, vor allem weil langfristige Datensätze dazu nicht vorhanden sind. Umso erfreulicher ist es, dass im „Hydrological Open Air Laboratory (HOAL) Petzenkirchen“ bereits Mitte der 1940-er Jahre wesentliche Datensätze zur Bearbeitung dieser Fragen gesammelt wurden. Dazu wurde nun ein Vergleich von Sedimentkonzentrationen und Sedimentfrachten und auch die Auswertung von Landnutzungsinformation sowie zeitlich detaillierter Niederschlagsinformation für zwei Beobachtungszeiträume (Periode I von 1945-1954, sowie Periode II von 2002-2017) durchgeführt. Die Sedimentausträge aus dem HOAL waren für die betrachteten Zeiträume signifikant unterschiedlich, in der Periode I wurden mittlere jährliche Sedimentfrachten von 12 Tonnen gemessen, für die Periode II waren es 64 Tonnen jährlich. Eine Veränderung der Erosivität der Niederschläge fand für den Untersuchungszeitraum nicht statt, vielmehr wurden die Änderung der Fruchtartenzusammensetzung und, als wesentlicher Faktor, die Strukturänderung der landwirtschaftlichen Schläge als Treiber dieser Entwicklung identifiziert.

Schlagwörter: Erosion, Sedimentfracht, Strukturwandel, Fruchtarten, Erosivität der Niederschläge, Abfluss

Summary

Information to compare the relative effects of climate change and agricultural intensification on soil erosion is scarce because long term data sets on the topic are usually unavailable. Fortunately, in the Hydrological Open Air Laboratory (HOAL) Petzenkirchen soil erosion and management data have been collected since the 1940ies. Using these data, an evaluation of sediment concentrations and loads and land use data and precipitation was carried out for two periods (period I 1945-1954 and period II 2002-2017). The sediment loads of the two periods were significantly different. In period I, mean annual sediment loads of 12 tons/year were measured. In period II, the sediment load amounted to 64 tons/year. No difference between the periods was measured for rainfall erosivity. Thus, the main drivers for the erosion dynamics were significant changes in crop statistics and landscape structure.

Keywords: Erosion, Sediment load, landscape structure, crop statistics, rainfall erosivity, water flow

Einleitung

Der Einfluss bereits gemessener oder zukünftig prognostizierter Klimaveränderungen auf das Ausmaß von Bodenerosion und Sedimentaustträgen ist gegenwärtig ein häufig untersuchtes Phänomen, ebenso die Wirkung von Landnutzungs- oder Landbewirt-

¹ Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt, Bundesamt für Wasserwirtschaft, Pollnbergstraße 1, A-3252 PETZENKIRCHEN

* Ansprechpartner: Dr. Peter Strauss, email: peter.strauss@baw.at

schaftungsänderungen (z.B. Scholz et al. 2008, Mullan et al. 2019 oder Zhang et al. 2021). Geringe Aufmerksamkeit wurde bisher der Wirkung von Strukturänderungen in der Landschaft zuteil, obwohl es durch den Industrialisierungsprozess, der im landwirtschaftlichen Sektor seit Ende des zweiten Weltkrieges massiv stattgefunden hat, zu einer signifikanten Änderung von Schlaggrößen und damit einhergehend auch zu einem enormen Strukturverlust gekommen ist (Devaty et al. 2019). Letztendlich stellt sich die Frage, ob und in welchem Ausmaß die Faktoren Klimawandel, Landnutzungswandel und Strukturwandel Einfluss auf die Bodenerosion und den Stofftransport haben.

Um diesen Sachverhalt zu untersuchen, bieten sich die Daten des hydrologischen Einzugsgebietes „HOAL“ Petzenkirchen an, das unmittelbar seit Gründung des damaligen Bundesversuchsinstitutes für Kulturtechnik und technische Bodenkunde (heute Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt) im Jahr 1945 untersucht wurde.

Daten und Methodik

Das „Hydrological Open Air Laboratory (HOAL) Petzenkirchen“ liegt im NÖ Alpenvorland auf ungefähr 300 m Seehöhe. Es erstreckt sich auf einer Fläche von 66 ha, die langjährige durchschnittliche jährliche Niederschlagsmenge liegt bei 746 mm (1946-2006) und die mittlere Lufttemperatur (1946-2006) liegt bei 8,8°C. Geologisch ist das HOAL Petzenkirchen im Wesentlichen der Molasse zu zuordnen. Die Böden können als Braunerden und hydromorph beeinflusste Böden (Gleye, Pseudogleye, Anmoor) charakterisiert werden.

Die Basis für diese Auswertung bilden die Untersuchungsergebnisse der beiden Perioden 1945-1954 und 2002-2017. Dazu standen für die erste Periode Abflussmesswerte (Thomsonwehr und Schwimmschreibpegel) zur Verfügung, während der zweiten Messperiode wurden die Abflüsse über ein Messwehr mit Ultraschall bestimmt (H-Flume). Während die Probenahme für die Bestimmung der Sedimentkonzentration in der ersten Periode händisch erfolgte (in 2-3 tägigem Intervall), wurde sie in der zweiten Periode über automatische Probensammler ermittelt. Für beide Perioden erfolgte eine zeitlich hochaufgelöste Bestimmung der Niederschläge und ihrer Intensität, sowie eine detaillierte Erfassung der angebauten Fruchtarten. Details zu den umfangreichen Messmethoden im HOAL Petzenkirchen finden sich bei Blöschl et al. (2016).

Ergebnisse

Sedimentfrachten

Die Berechnung der Sedimentfrachten wurde über Regressionsbeziehungen zwischen Abfluss und Sedimentkonzentration durchgeführt, wobei für jede Periode eine Aufteilung in Vegetationszeit und Winter vorgenommen wurde. Für die Vegetationszeit wurde in Periode I ein mittlerer monatlicher Sedimentaustrag von 0,8 t berechnet, im Vergleich dazu lag der Austrag für Periode II bei 6,3 Tonnen Sediment pro Monat. Für die vegetationslose Zeit lag der mittlere Sedimentaustrag pro Monat in Periode I bei 1,3 im Vergleich zur Periode II mit 5,4 Tonnen/Monat. Insgesamt steht damit einem Sedimentaustrag von 12 Tonnen/Jahr in der Periode I einem Sedimentaustrag von 64 Tonnen/Jahr in der Periode II gegenüber.

Klima

Als Indikator für mögliche Effekte des Klimawandels wurden die Niederschlagsverhältnisse, sowie die Erosivitätsdichte der Niederschläge herangezogen. Die Erosivitätsdichte ist definiert als Erosivität des Niederschlags pro mm Niederschlag. Wie in *Abbildung 1* ersichtlich, weist die Erosivitätsdichte der Niederschläge ein für Österreich bekanntes Muster auf (Johannsen 2022), mit deutlichen Anstiegen der Erosivität mit Beginn der

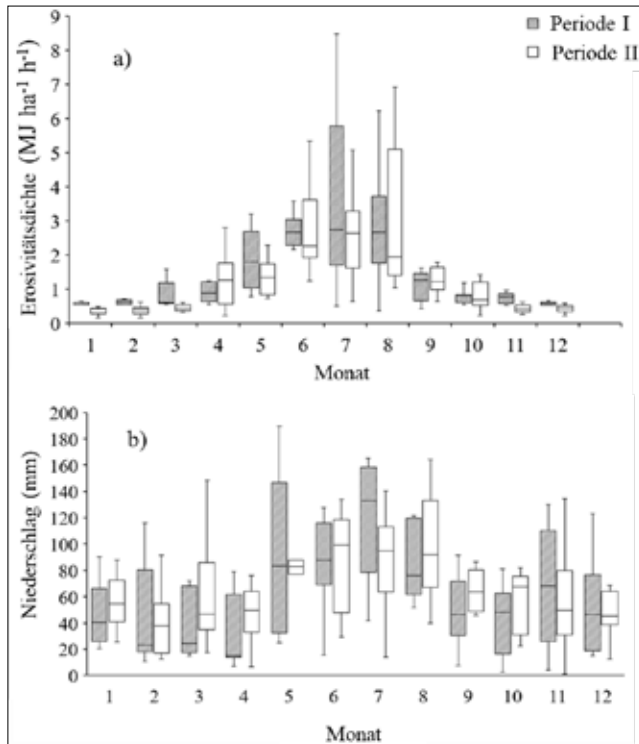


Abbildung 1: Monatliche Erosivitätsdichte und Niederschläge im Vergleich der Untersuchungsperioden I (1945-1954) und II (2002-2017).

Vegetationszeit, und auch für den monatlichen Niederschlag in den Monaten Mai-August erkennbar, allerdings - und das ist für diese Auswertung von Bedeutung - unterscheiden sich die beiden Untersuchungsperioden nicht signifikant. Eine wesentliche Wirkung dieser Faktoren auf die geänderten Sedimentausträge ist also nicht zu erwarten.

Landnutzung und Parzellenstruktur

Wie *Abbildung 2* und *Tabelle 1* zeigen, hat sich die prozentuelle Verteilung einzelner Landnutzungsarten über den Untersuchungszeitraum von mehr als 70 Jahren nur in einigen Bereichen geändert, einer Abnahme des Grünlandanteils steht eine Zunahme

Abbildung 2: Landnutzungsstruktur im HOAL Petzenkirchen, a) Periode I, b) Periode II.

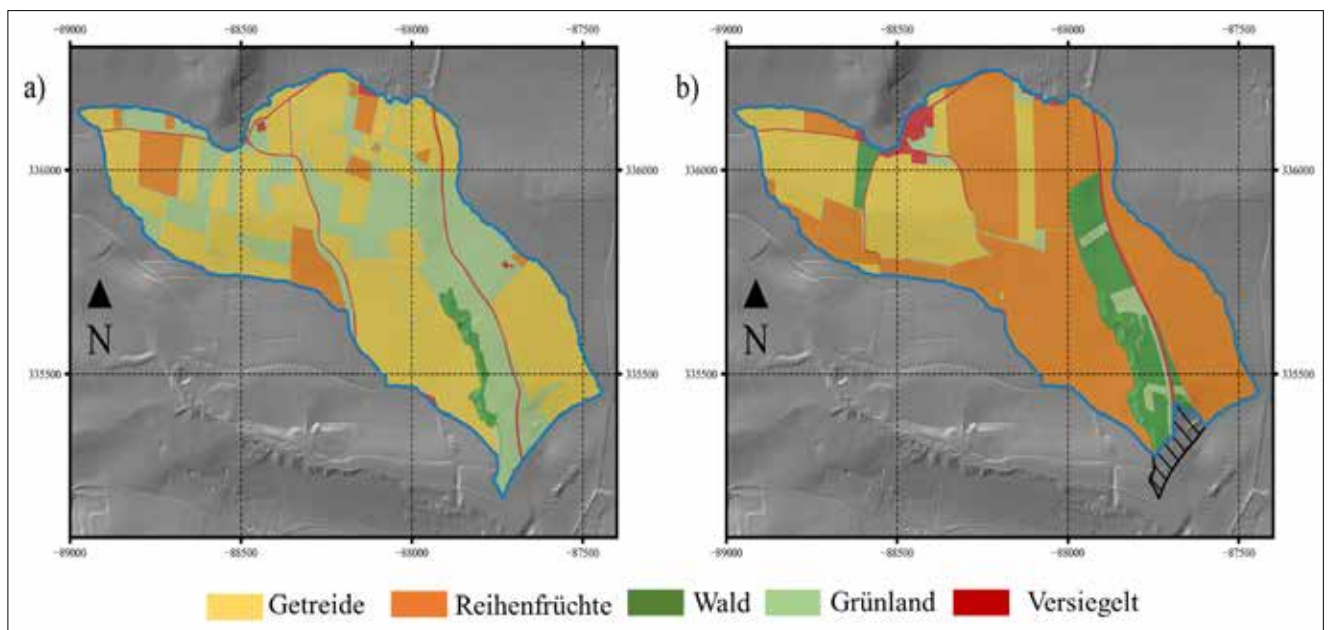


Tabelle 1: Kennwerte der Landnutzung für die zwei Untersuchungszeiträume (Periode I und II); N = Anzahl der Schläge, Dichte = Anzahl der Schläge pro ha, Größe = mittlere Fläche in ha pro Landnutzungstyp, Fläche = in % der Gesamtfläche.

Landnutzung	Parzellenstruktur							
	Periode I				Periode II			
	N	Dichte	Größe	Fläche	N	Dichte	Größe	Fläche
Acker	70-111*	1.7-2.0	0.5-0.6	73-82	21-33	0.3-0.6	1.7-2.7	81-82
Grünland	70-81	5.2-7.2	0.1-0.2	14-22	6	0.9	1.1	3-4
Wald	1	-	1.2	1.8	7	1	1.0	10.5-11
Versiegelt	17	12.9	0.1	2	17	7.3	0.1	2.4

* Die Anzahl der Schläge variierte in den verschiedenen Jahren.

des Waldanteils gegenüber, der Ackeranteil und auch die verbaute Fläche erfuhren keine wesentliche Änderung. In Bezug auf das Erosionsrisiko bedeutet dies, dass ein wesentlicher Einfluss der Landnutzung unwahrscheinlich ist.

Betrachtet man allerdings die Änderung der Größenverhältnisse der Schläge, zeigt sich, dass hier wesentliche Veränderungen stattgefunden haben. So nahm z.B. die mittlere Größe der als Acker genutzten Flächen im Untersuchungszeitraum um eine Größenordnung des 3- bis 4-fachen zu. Dies führte naturgemäß zu einer Reduktion der Anzahl der Schläge. Berechnet man die Auswirkung dieser Größenänderungen mit einem Erosionsmodell (hier wurde als einfache Abschätzung die bekannte USLE verwendet), so zeigt sich, dass aufgrund dieser Größenänderungen mit einer Zunahme der Bodenerosion um ca. 30% gerechnet werden muss.

Fruchtartenstatistik

Abbildung 3 zeigt die Nutzartenverteilung der im HOAL Petzenkirchen angebauten Feldfrüchte beispielhaft für die Jahre 1948 und 2008. Hier wird ein markanter Unterschied sichtbar, der im Wesentlichen von einer durch Feldfutter dominierten Nutzung in der Periode I hin zu einer durch Maisanbau dominierten Nutzung für die Periode II charakterisiert ist. Dies bedeutet natürlich auch eine wesentliche Verschlechterung für das Erosionsrisiko. Betrachtet man diese Änderungen wiederum aus der Sicht des Erosionsmodells USLE, (durch eine Änderung beim Management-Faktor), so erhöht sich der Bodenabtrag durch die geänderte Nutzung in der Periode II um ca. 100%.

Gesamtbetrachtung

Einer gemessenen Änderung der Sedimentfracht von ungefähr 400 % plus zwischen den beiden Messperioden steht eine insgesamt Änderung des Erosionsrisikos bei Modell-

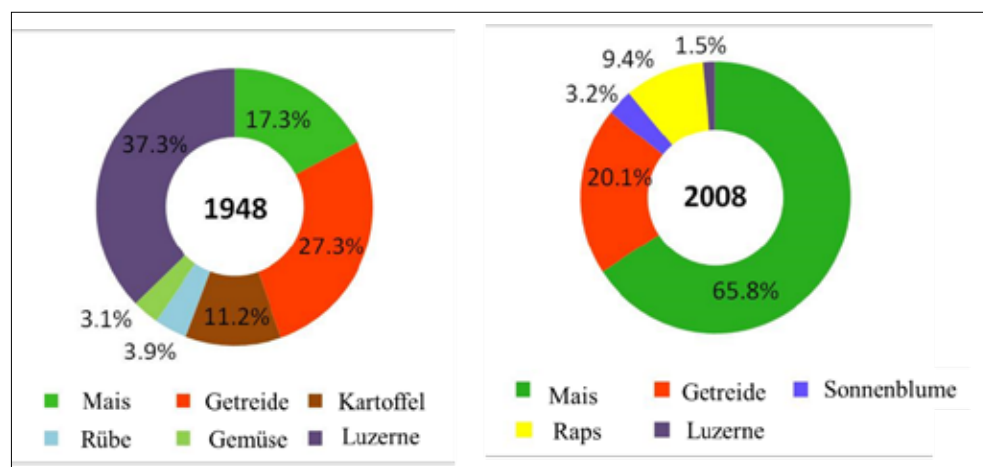


Abbildung 3: Fruchtartenstatistik im Vergleich der Periode I und Periode II.

betrachtung in einer Größenordnung von plus 130% gegenüber. Hier zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen Messungen und modellhafter Betrachtung, die auf die Konzeption des Modellansatzes als schlagbezogene Anwendung hinweisen. Die USLE wurde ja nicht als Modell für Einzugsgebietsbetrachtungen und Sedimentausträge entwickelt, sondern zur Ermittlung des Bodenabtrags einzelner Schläge. Diesem Konzept folgend ist nicht vorgesehen, eine erodierte Menge und Bodenmaterial durch ein Einzugsgebiet zu bewegen. Daher werden in diesem Modell derartige Prozesse nicht abgebildet. Dementsprechend ist zu erwarten, dass die Effekte, die durch die Größenänderungen der Schläge und dadurch fehlende Retentionsmöglichkeiten (Ackerraine, Gebüsche etc...) erfolgen, durch die USLE nicht abgebildet werden können. Bei näheren Auswertungen des Transportgeschehens für die beiden Untersuchungsperioden (siehe Wang et al. 2022) zeigt sich daher auch, dass die Bedeutung der Schlaggrößen besonders bei großen Erosionsereignissen im Vergleich bedeutender ist, als die Fruchtartenverteilung.

Eine bedeutende Rolle des Klimawandels für die Änderung der Sedimentmengen war in dieser Auswertung nicht vorhanden, dies bedeutet aber nicht, dass dies für einen anderen Auswertungszeitraum als den hier dargestellten ebenso gilt. Für zukünftige Entwicklungen ist vielmehr davon auszugehen, dass zusätzlich zu den hier beschriebenen Einflüssen auch noch die durch den Klimawandel gesteuerten Änderungen für den Sedimentaustrag bedeutend werden.

Literatur

Blöschl G., Blaschke A.P., Broer M., Bucher C., Carr G., Chen X., Eder A., Exner-Kittridge M., Farnleitner A., Flores-Orozco A., Haas P., Hogan P., Kazemi Amiri A., Oismüller M., Parajka J., Silasari R., Stadler P., Strauss P., Vreugdenhil M., Wagner W., Zessner M. (2016) The Hydrological Open Air Laboratory (HOAL) in Petzenkirchen: a hypotheses driven observatory. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 12, 6683–6753. <https://doi.org/10.5194/hessd-12-6683-2015>

Devátý J., Dostál T., Hösl R., Krása J., Strauss P. (2019) Effects of historical land use and land pattern changes on soil erosion - Case studies from Lower Austria and Central Bohemia. *Land Use Policy*, 82, 674–685. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.11.058>

Johannsen L., Schmaltz E., Klik A., Mitrovits O., Strauss P. (submitted) An update of the spatial and temporal variability of rainfall erosivity (R-factor) for the main agricultural production zones of Austria.

Scholz G., Quinton J.N., Strauss P. (2008) Soil erosion from sugar beet in Central Europe in response to climate change induced seasonal precipitation variations. *CATENA* 72, 91–105. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2007.04.005>

Wang S.P., McVicar T.R., Zhang Z.Q., Brunner T., Strauss P. (2020) Globally partitioning the simultaneous impacts of climate-induced and human-induced changes on catchment streamflow: A review and meta-analysis. *Journal of Hydrology*. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125387>

Wang S.P., Strauss P., Krammer C., Schmaltz E., Szeles B., Blöschl G. (submitted): Agricultural intensification vs climate change: What drives long-term changes of sediment load?

Boden.Pioniere: Optimierung des Bodenwasserhaushalts durch Humusaufbau

Gernot Bodner^{1*}, Katharina Keiblinger², Orracha Tsae-Tun², Samuel Winkler¹ und Thomas Weninger³

Zusammenfassung

Humusaufbau ist derzeit eine wichtige Zielsetzung als Beitrag zum Klimaschutz. Für den Ackerbau steht jedoch vor allem die Wirkung des Humus für die Klimawandelanpassung im Fokus. In einem Vergleich von Betrieben mit bodengesundheitsorientierten Systemen, Flächen unter Standardbewirtschaftung und natürlichen Referenzflächen wurde daher die Veränderung des Boden-Porensystems untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass durch humusaufbauende Bewirtschaftung das Volumen an wasserspeichernden Mittelporen erhöht wurde. Der wasserlösliche Kohlenstoff und das Verhältnis von organischem Kohlenstoff zu Ton zeigten deutliche Zusammenhänge mit funktionell wichtigen Porenräumen. Eine Herausforderung ist die tendenzielle Verringerung der Grobporen bei Minimierung mechanischer Lockerung, da biologische Lockerung dies auf Ackerflächen in geringerem Ausmaß kompensieren kann als auf ständig bewachsenen natürlichen Referenzflächen. Die Ergebnisse zeigen, dass eine auf Bodengesundheit orientierte Bewirtschaftung Bodenfunktionen mit hoher Relevanz für Klimawandelanpassung und nachhaltige Ertragssicherung optimieren kann.

Schlagwörter: Humusaufbau, Porengrößenverteilung, Pionierbetriebe, Bodenstruktur

Summary

The increase in soil organic carbon (SOC) storage is currently a focus of climate change mitigation in agriculture. For farmers, however, the main aim of SOC management is climate change adaptation. Based on an on-farm comparison of soil health oriented pioneers systems with conventional standard systems and natural reference sites, changes in soil pore system were analysed. It was shown that pioneer systems enhanced the volume of water-storing pores. Parameters with a strong influence on soil structure, such as water-soluble carbon, were revealed as key drivers to increase functionally important pore spaces for water storage and soil microbiology. With minimized mechanical loosening, pioneer systems tend to reduce the coarse pore volume. Biological loosening is less effective to mitigate macropore loss in agricultural fields compared to permanently vegetated sites. The overall results show that soil health-oriented management can optimize biological soil functions with relevance for climate change adaptation and sustainable yield.

Keywords: Soil organic carbon storage, pore size distribution, pioneer farms, soil structure

¹ Institut für Pflanzenbau, Universität für Bodenkultur Wien, Konrad-Lorenz Straße 24, A-3430 TULLN; ² Institut für Bodenforschung, Universität für Bodenkultur Wien, Peter-Jordan-Straße 82, A-1190 WIEN; ³ Bundesamt für Wasserwirtschaft, Pollnbergstraße 1, A-3252 PETZENKIRCHEN

* Ansprechpartner: Dr. Gernot Bodner, email: gernot.bodner@boku.ac.at

Einleitung

Mit dem Green Deal hat die Europäische Union eine Strategie zur Klimaneutralität bis 2050 formuliert. Um dieses Ziel zu erreichen, sollen neben der Reduktion der Treibhausgasemissionen auch Senkenpotentiale genutzt werden. Für den Sektor Landwirtschaft wird die Möglichkeit diskutiert, über Humusaufbau der Atmosphäre CO_2 zu entziehen („carbon farming“). Die 4 ‰-Initiative der Pariser Klimakonferenz COP 2015 schlägt vor, durch eine jährliche Steigerung der organischen Kohlenstoff-Vorräte um 4 ‰ die Emissionen aus der Verbrennung fossiler Energien im Boden abzapfeln (Minasny et al. 2017).

Neben kritischen Diskussionen um die wissenschaftlichen Grundlagen (z.B. De Vries et al. 2018) und quantitativen Zielsetzungen (z.B. Wiesmeier et al. 2020) der 4 ‰-Initiative, stellt sich die Frage, ob und wie eine ausreichende Teilnahme landwirtschaftlicher Betriebe an humusaufbauenden Maßnahmen erreichbar ist. Studien zeigten, dass für Landwirte Klimaschutz-Förderprogramme nur eine geringe Motivation für Managementänderung sind, sondern vielmehr Erwartungen nach ertragsrelevanten Bodenfruchtbarkeitseffekten und verbesserter Witterungsanpassung durch Humusaufbau relevant sind.

Dabei steht das Porensystem im Mittelpunkt, da seine bodenphysikalischen Funktionen für Luft- und Wasserhaushalt zentrale Ertrag bestimmende Faktoren sind. Durch den engen Zusammenhang von organischer Bodensubstanz, Bodenleben und Bodenstruktur kann Humusaufbau die Anpassung von Ackerböden an Witterungsextreme wie Trockenheit und Starkregen verbessern. Die Architektur des Porensystems hat auch große Bedeutung als Lebensraum von Mikroorganismen und Auswirkungen auf die Dauerhaftigkeit von Humus (Lehmann et al. 2020).

Ziel der vorliegenden Arbeit war die Untersuchung von Auswirkungen bodenaufbauender Bewirtschaftungssysteme im Vergleich zu praxisüblichem Management auf das Porensystem des Bodens sowie der Zusammenhänge von funktionellen Porenräumen mit bewirtschaftungsbedingten Veränderungen der organischen Bodensubstanz und Bodenbiologie.

Material und Methoden

Die Untersuchungen erfolgten mit einem systemorientierten On-farm Ansatz auf 21 Standorten in Niederösterreich und Burgenland. Beprobte wurden jeweils drei angrenzende Flächen gleichen Bodentyps und Bodenart. Eine Fläche (Pionier) war für zumindest fünf Jahre unter „bodenaufbauender“ Bewirtschaftung. Gemeinsam war den Pioniersystemen ein intensiver Zwischenfruchtbau mit dem Ziel möglichst kurzer Brachezeiten und eine minimierte Bearbeitungsintensität. Weitere standort- und betriebsabhängige Systemelemente waren Unter-/Begleitsaaten, organische Dünger, weite Fruchtfolgen und Biostimulanzien. Als Vergleich (Standard) wurde eine angrenzende standortüblich bewirtschaftete Fläche beprobt. Als Referenz für den natürlichen Bodenzustand dienten Flächen mit dauerhaftem Vegetationsbewuchs ohne landwirtschaftliche Nutzung (Ackerland, Dauerwiese, Hecken).

Für die hier gezeigten Parameter wurden ausschließlich Proben aus der obersten Bodenschicht (0-5 cm) herangezogen, wo die deutlichsten Einflüsse der Bewirtschaftung zu erwarten sind. Die Bestimmung der Porengrößenverteilung erfolgte an Stechzylinderproben (250 cm^3) mittels Evaporationsmethode. In Anlehnung an Weninger et al. (2019) wurden diskrete Porenklassen bestimmt, denen wichtige bodenphysikalische und bodenbiologische Funktionen zugeordnet werden können.

Die Bestimmung des Humusgehalts erfolgte nach ÖNORM L 1050. Die wasserlösliche organische Substanz (DOM) wurde photometrisch nach Brandstetter et al. (1996) ermittelt. Für die bodenbiologische Charakterisierung der Standorte und Systeme wurde die mikrobielle Biomasse über Chloroform-Fumigation-Extraktion (DIN ISO 14240-2) und mikrobielle Enzyme nach Deng et al. (2013) erfasst.

Ergebnisse und Diskussion

Die Standorte lagen mehrheitlich im nordöstlichen Flach- und Hügelland in der semi-ariden bis sub-humiden Klimazone (30 % < 600 mm, 45 % 600-650 mm, 25 % > 650 mm; *Abbildung 1*). Die Bodentypen reichten von schweren Feuchtschwarzerden und Anmooren mit hohem Ausgangshumusgehalt > 4 % (19 % der Standorte) bis zu sehr leichten Fels- und Lockersedimentbraunerden und Rankern mit texturbedingt geringen Humuswerten < 2 % (24 % der Standorte).

Abbildung 2 zeigt die Bedeutung verschiedener Porengrößenklassen für verschiedene physikalische und Lebensraumfunktionen des Bodens.

Besonders Grob- bis Mittelporen sind für einen gesunden Boden von zentraler Bedeutung. Bodenphysikalisch sind Poren mit einem Radius > 10 mm wesentlich für Lufthaushalt sowie rasche Infiltration von Niederschlägen, während der Porenraum zwischen 10 und 0,2 mm die pflanzenverfügbare Wassermenge bestimmt. Die Lebensraumfunktion für Mikroorganismen findet vorwiegend in Porenräumen > 0,2 mm statt. Pflanzenwurzeln besiedeln Porenkanäle bis zu einem Durchmesser von ca. 50 mm, im Falle von Wurzelhaaren bis ca. 10 mm (Watt et al. 2006, Ottow 2011). Während Grobporen bei leichten relativ

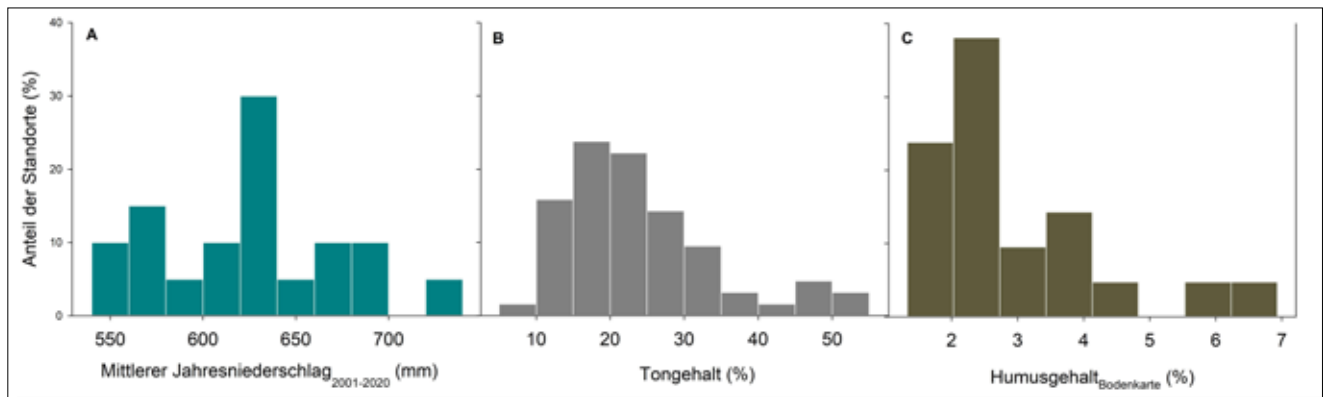


Abbildung 1: Verteilung der Untersuchungsfläche nach den Standorteigenschaften A Jahresniederschlag, B Tongehalt und C Humusgehalt nach Werten der österreichischen Bodenkarte.

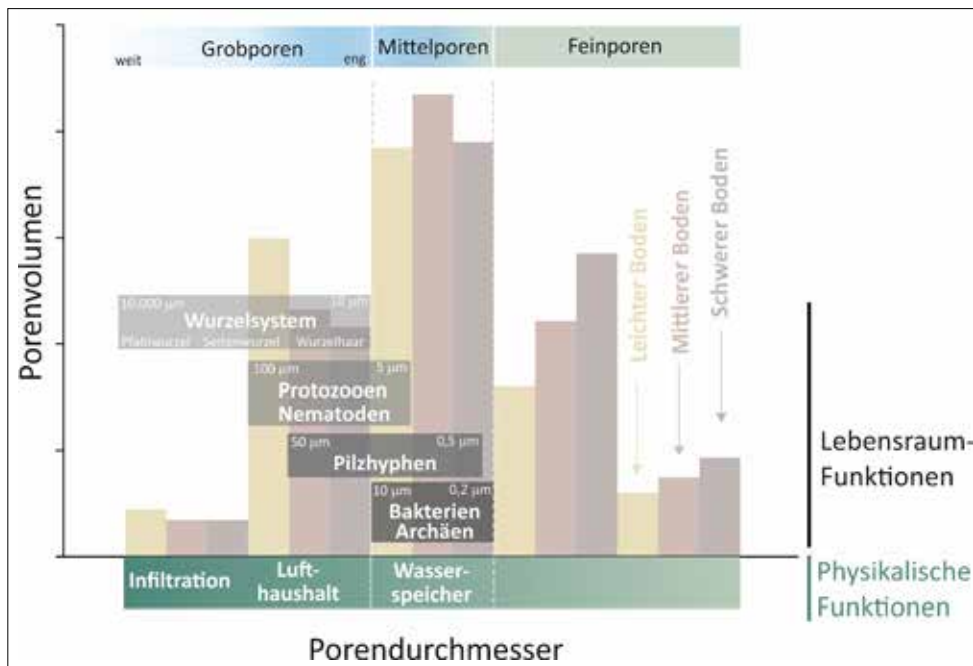


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Porenverteilung bei leichten (Beispiel: Felsbraunerde, Eisgarn), mittleren (Beispiel: Tschernosem, Grübern) und schweren Böden (Beispiel: Feuchtschwarzerde, Moosbrunn) und deren Funktionen für bodenphysikalische Eigenschaften und als Lebensraum für Bodenorganismen und Pflanzenwurzeln.

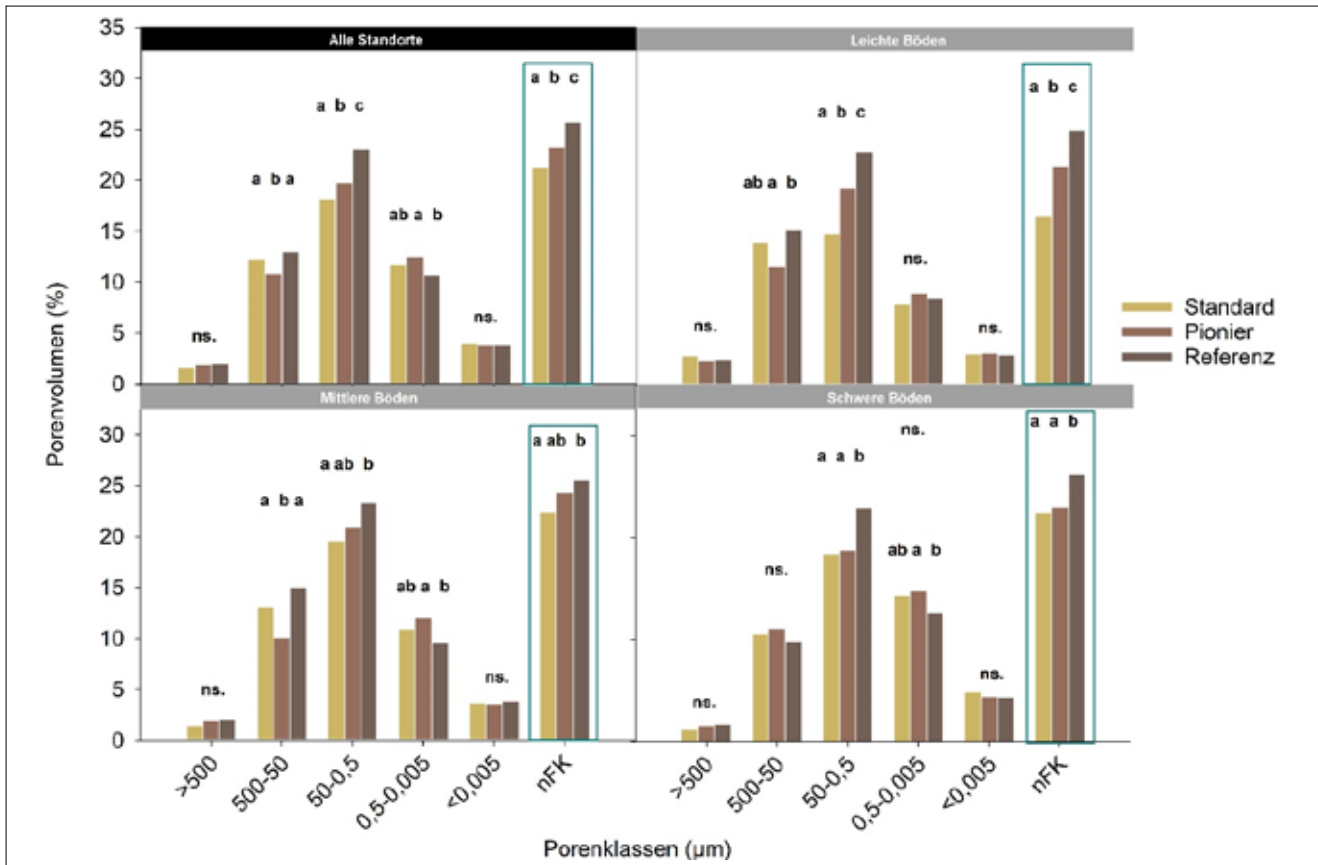


Abbildung 3: Einfluss von bodenaufbauenden Systemen (Pionier) im Vergleich zu Standardmanagement (Standard) und natürlicher Referenz auf verschiedene Porengrößen-Klassen (nFK nutzbare Feldkapazität) in Abhängigkeit der Bodenschwere. (Verschiedene Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede $p < 0,05$; ns. nicht signifikant).

zu mittleren und schweren Böden dominieren, verschiebt sich dies bei den Feinporen zu den tonreichen Standorten. Schluff-dominierte Böden weisen das höchste Volumen an Mittelporen auf.

Abbildung 3 zeigt den Einfluss der Landnutzung auf die verschiedenen Porenräume. Nutzungsbedingte Veränderungen sind vor allem in der Porengrößenklasse zwischen 500 und 0,005 mm zu beobachten, mit der deutlichsten Differenzierung im Bereich der Mittelporen (50-0,5 mm). Mit zunehmender Bodenschwere nehmen die Unterschiede ab. Bodenaufbauende Pioniersysteme erhöhen hauptsächlich den – funktionell wichtigen – Bereich der Mittelporen, während eine Abnahme des Grobporenvolumens (500-50 mm) zu beobachten ist. Dies ist wahrscheinlich auf die geringere Intensität der mechanischen Lockerung zurückzuführen, die nicht vollständig durch biologische Lockerungsprozesse kompensiert wird, wie dies bei der natürlichen Referenz stattfindet.

In Abbildung 4A und 4B ist der Einfluss der organischen Bodensubstanz auf das Mittelporenvolumen dargestellt. Abbildung 4C zeigt den Zusammenhang des C_{org} -Ton-Verhältnisses mit der Summe an Grob- und Mittelporen (500-0,5 mm).

Das Volumen an Speicherporen erhöht sich pro Einheit C_{org} um 0,6 Vol. % (=0,6 mm H_2O pro 100 mm Bodentiefe). Auch Minasny und McBratney (2018) fanden in einer Meta-studie ähnliche Werte für die Veränderung der pflanzenverfügbaren Wassermenge mit steigendem C_{org} (zwischen 0,7-1,0 mm H_2O pro 100 mm Bodentiefe). Der Zusammenhang mit dem wasserlöslichen organischen Kohlstoff (DOC) zeigte ein höheres Bestimmtheitsmaß. Der für Bodenleben und Bodenstruktur bedeutende DOC scheint daher, trotz des geringen Anteils am Gesamtkohlenstoff ($\bar{1},1 \pm 0,6$ %), eine bedeutende Rolle für die wasserspeichernden Mittelporen zu spielen. Auch Abbildung 4C gibt einen Hinweis, dass

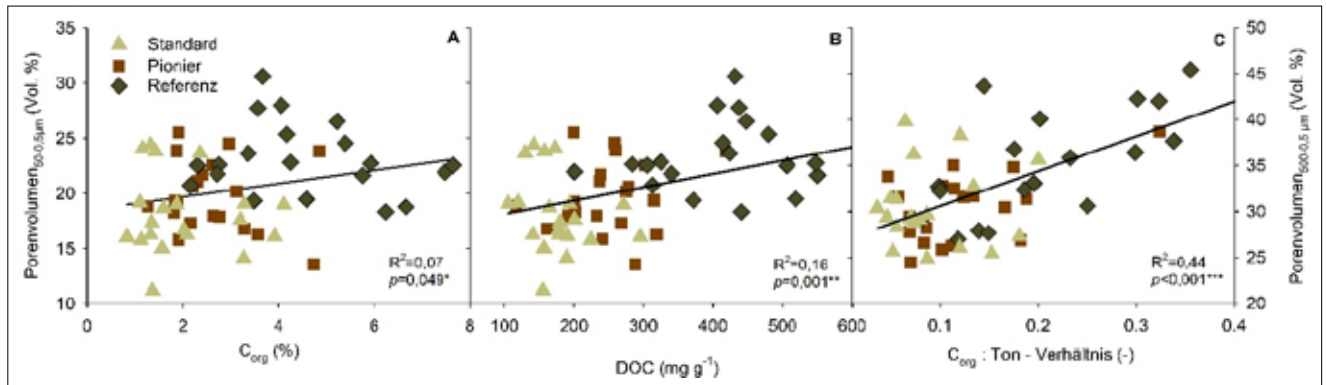


Abbildung 4: Zusammenhang der organischen Bodensubstanz (A: C_{org} Gesamter organischer Kohlenstoff; B: DOC Wasserlöslicher organischer Kohlenstoff; C: Verhältnis organischer Kohlenstoff zu Tongehalt) mit funktionell wichtigen Porenräumen im Boden (A und B enge Grobporen - Mittelporen 50 - 0,5 mm; C Grob und Mittelporen 500 - 0,5 mm).

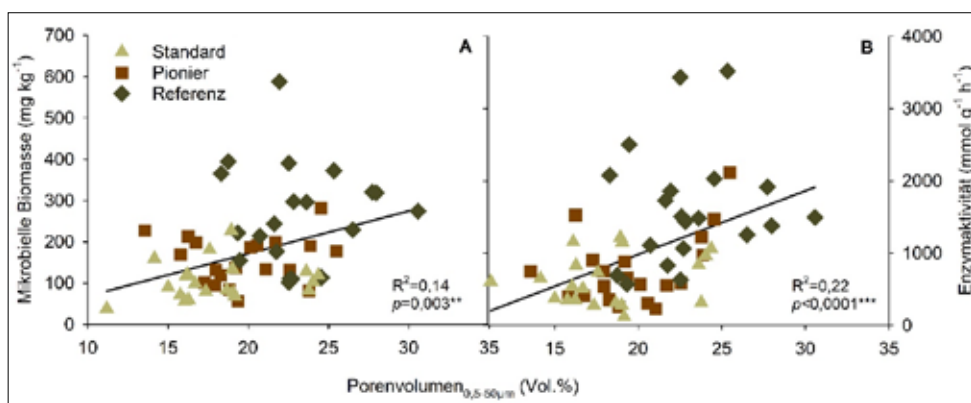


Abbildung 5: Einfluss des Volumens an Mittelporen auf bodenbiologische Parameter (A: Mikrobielle Biomasse; B: Enzymaktivität) als Indikator der Lebensraumfunktion der Bodenporen.

der Zusammenhang zwischen C_{org} und Porenraum im Wesentlichen über die Struktur vermittelt ist. Das Verhältnis von C_{org} :Ton ist ein guter Indikator für die Bodenstrukturqualität (Johannes et al. 2017). Dementsprechend zeigte sich ein starker Zusammenhang des strukturbedingten Sekundärporensystems (500 und 0,5 mm) mit diesem Indikator. Die Ergebnisse unterstreichen, dass weniger der Humus als solcher im Fokus sein sollte, als vielmehr bodenbiologische Prozesse zur Optimierung relevanter Bodenfunktionen. Die Bedeutung der Bodenporen als Lebensraum ist in *Abbildung 5* dargestellt. Je höher das Volumen an Poren im Größenbereich 50-0,5 mm, desto höher die mikrobielle Biomasse sowie die Aktivität mikrobieller Enzyme. Der Einfluss der Mittelporen auf bodenbiologischer Aktivität zeigte sich auch in anderen Arbeiten, etwa bei Strong et al. (2004) hinsichtlich der mikrobiellen Umsetzung von Kohlenstoff mit einem Maximum im Porenbereich zwischen 15-60 mm.

Schlussfolgerungen

Es konnte gezeigt werden, dass Bewirtschaftungssysteme mit Fokus auf Bodengesundheit und Humusaufbau wasserspeichernde Mittelporen erhöhen können. Dabei scheint nicht Humus als solcher wesentlich zu sein, sondern vor allem bodenstrukturelevante organische Substanzen und (mikro)biologische Prozesse. Mittelporen als biologischer Lebensraum und physikalischer Funktionsraum für Pflanzenwachstum hängen damit untrennbar zusammen. Als Herausforderung ist das Management der luftführenden Grobporen zu sehen. Hier zeigte sich, dass es für ackerbauliche Pioniersysteme im Vergleich zu ständig bewachsenen natürlichen Flächen schwierig ist, den Verlust an Grobporen aufgrund verringerter mechanischer Lockerung ausreichend durch biologische Lockerung zu kompensieren.

Danksagung

Die Forschungsarbeiten werden finanziell unterstützt durch die Gesellschaft für Forschungsförderung Niederösterreich (Projekt Nr. FTI 19-002) sowie den Umweltfonds - Fonds zur Förderung einer nachhaltigen Entwicklung der Region rund um den Flughafen Wien.

Literatur

Brandstetter A., Sletten R.S., Mentler A., Wenzel W.W. (1996) Estimating dissolved organic carbon in natural waters by UV absorbance (254 nm). *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 159, 605-607.

De Vries W. (2018) Soil carbon 4 per mille: A good initiative but let's manage not only the soil but also the expectations: Comment on Minasny et al. (2017). *Geoderma* 292, 59-86.

Deng S., Popova I.E., Dick L., Dick R. (2013) Bench scale and microplate format assay of soil enzyme activities using spectroscopic and fluorometric approaches. *App. Soil Ecol.* 64, 84-90.

Johannes A., Matter A., Schulin R., Weisskopf P., Baveye P.C., Boivin P. (2017) Optimal organic carbon values for soil structure quality of arable soils. Does clay content matter? *Geoderma* 302, 14-21.

Lehmann J. et al. (2020) Persistence of soil organic carbon caused by functional complexity. *Nature Geoscience* 13, 529-534.

Minasny B. et al. (2017) Soil carbon 4 per mille. *Geoderma* 292, 59-86.

Minasny B., McBratney A.B. (2018) Limited effect of organic matter on soil available water capacity. *Europ. J. Soil Sci.* 69, 39-47.

Ottow J. (2011) *Mikrobiologie von Böden*. Springer, Berlin, Heidelberg.

Strong D.T., Wever H.D., Merckx R., Recous S. (2004) Spatial location of carbon decomposition in the soil pore system. *Europ. J. Soil Sci.* 55, 739-750.

Watt M., Silk W.K., Passioura J.B. (2006) Rates of root and organism growth, soil conditions, and temporal and spatial development of the rhizosphere. *Ann. Bot.* 97, 839-855.

Weninger T., Kreiselmeier J., Chandrasekhar P., Julich S., Feger K.H., Schwärzel K., Bodner G., Schwen A. (2019) Effects of tillage intensity on pore system and physical quality of silt-textured soils detected by multiple methods. *Soil Research*, 57(7), 703-711.

Wiesmeier M., Mayer S., Burmeister J., Hübner R., Kögel-Knabner I. (2020) Feasibility of the 4 per 1000 initiative in Bavaria: A reality check of agricultural soil management and carbon sequestration scenarios. *Geoderma* 369, 114333.

Boden.Pioniere: Humusaufbau-Potenziale innovativer Ackerbaubetriebe in Österreich

Katharina M. Keiblinger^{1*}, Christoph Rosinger^{1,2}, Sabine Huber², David Luger² und Gernot Bodner²

Zusammenfassung

Humusaufbau ist von entscheidender Bedeutung für die Landwirtschaft für die Bodengesundheit und die Anpassung an den Klimawandel. In einer großangelegten Studie auf Betrieben wurde an 21 Standorten der Vergleich von Pionierbetrieben mit, Nachbarflächen unter Standardbewirtschaftung und natürlichen Referenzflächen hinsichtlich Humusaufbau Potential und Bodengesundheit untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass durch Maßnahmen der Pionierbetriebe, der Humusgehalt vor allem in leichteren Böden signifikant gesteigert werden konnte. Das Verhältnis organischen Kohlenstoffs zu Ton zeigt deutliche Verbesserung der Bodenstruktur in leichten und mittleren Böden. Die Pionierbetriebe konnten auch eine positive Wirkung auf die mikrobielle Biomasse und Nekromasse erwirtschaften. Die Ergebnisse zeigen, dass es Humusaufbaupotentiale gibt, die von der Bodentextur abhängig sind und auch die biologischen Bodenfunktionen durch diese Maßnahmen optimiert werden können.

Schlagwörter: organische Substanz, mikrobielle Biomasse, Aminosucker, Nekromasse, Pionierbetriebe

Summary

The increase in soil organic carbon (SOC) storage is critical to agriculture for soil health and climate change adaptation. On-farm studies including 21 locations in Austria were conducted to investigate soil health oriented pioneers systems with conventional standard systems and natural reference sites. It could be shown that SOC storage significantly increases in pioneer systems, especially at sites with lighter soil texture. In particular, a parameter indicative for good soil structure, the organic carbon to clay ratio, significantly improved for pioneer systems in light and medium textured soils. The soil health-oriented management in pioneer farms was also able to generate positive effects on microbial biomass and necromass. The results show that there is potential for SOC storage that depends on the soil texture and that biological soil functions can also be optimized through these measures that are highly relevant for climate change adaptation and sustainable yield.

Keywords: Soil organic matter, microbial biomass, amino sugars, necromass, pioneer farms

Einleitung

Der organische Kohlenstoff im Boden ist ein primärer Indikator für die Bodengesundheit und ist von entscheidender Bedeutung für Nahrungsmittelproduktion, Treibhausgasbilanz, Klimaschutz und Anpassung an den Klimawandel. Die Dynamik des Humusgehalts wird durch das Gleichgewicht zwischen Kohlenstoffeinträgen (z. B. Ernterückstände und or-

¹ Institut für Bodenforschung, Universität für Bodenkultur Wien, Peter-Jordan-Straße 82, A-1190 WIEN; ² Institut für Pflanzenbau, Universität für Bodenkultur Wien, Konrad-Lorenz Straße 24, A-3430 TULLN

* Ansprechpartner: Dr. Katharina M. Keiblinger, email: katharina.keiblinger@boku.ac.at

ganische Düngemittel) und -austrägen (z. B. Zersetzung und Erosion) unter langfristigen konstanten Umwelt- und Managementbedingungen bestimmt. Durch den Landnutzung und Klimawandel hat sich dieses Gleichgewicht entscheidend verändert und besonders in Ackerböden zu einer Abnahme der Humusvorräte geführt (Sanderman et al. 2017). In diesem Zusammenhang zielen vermehrt globale, europäische und nationale Initiativen auf eine Erhöhung der Humusgehalte in Ackerböden als Beitrag zu Klimaschutz und Klimawandelanpassung (z.B. COP15 4 Promille – Initiative; Minansny et al., 2016).

Landwirtschaftlich genutzte Böden enthalten im Mittel weniger Humus als Böden unter Grünland, Forst oder natürlicher Vegetation (Poeplau und Don 2015). Das Kohlenstoff-sättigungsdefizit landwirtschaftlicher Böden impliziert, dass durch Managementänderung potenziell Kohlenstoff aus dem atmosphärischen CO₂ als Humus gebunden werden kann (Lal 2018). Es gilt daher praktische Ansätze zu finden, die zur Verbesserung der Kohlenstoffspeicherung in landwirtschaftlich genutzten Böden führen, ohne die Bereitstellung anderer Ökosystemleistungen (z.B. Produktionsfunktion) negativ zu beeinflussen. Da Landbewirtschaftung immer ein Systemansatz ist, bieten sich on-farm Untersuchungen an, um realistische Humusaufbaupotenziale im Ackerbau abzuschätzen.

Eine effektive Strategie des Humusaufbaus muss auf aktuellen Erkenntnissen der zugrundeliegenden Prozesse der Bildung und Stabilisierung von der organischen Bodensubstanz aufbauen (z.B. Sokol et al. 2019). Dabei spielt besonders für den stabilen, mineral-gebundenen Humus die mikrobielle Biomasse und deren Überreste (Nekromasse) eine wichtige Rolle (Kallenbach et al., 2016). Der Anteil mikrobieller Nekromasse kann bei mehr als 50 % des Bodenkohlenstoffs liegen (Liang et al. 2019).

In laufenden Forschungsarbeiten werden Humusaufbaupotenziale und zugrundeliegende Prozesse in bodengesundheits-orientierten Bewirtschaftungssystemen im Vergleich zu herkömmlicher Bewirtschaftung und Flächen unter natürlicher Vegetation untersucht. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es (1) die erzielbaren Steigerungen der Humusmengen bei humusaufbauenden Bewirtschaftungssystemen zu zeigen, und (2) die Veränderungen in mikrobiellen Parametern zu zeigen, denen eine zentrale Rolle für den Aufbau stabiler organischer Bodensubstanz zukommt.

Material und Methoden

Die Untersuchungen fanden auf 21 Standorten in Niederösterreich und dem Burgenland statt, die repräsentativ für die pedo-klimatische Produktionsbedingungen in Ostösterreich sind. Dabei wurden angrenzende Flächen mit gleichen Grundbodeneigenschaften beprobt, die sich in der Nutzung unterschieden: (A) Pionierflächen von Betrieben mit innovativen Bodenmanagementsystemen, die darauf abzielen, die Bodenfruchtbarkeit zu verbessern und die Humusvorräte zu erhöhen; (B) Flächen unter praxisüblicher Bewirtschaftung ohne besonderen Fokus auf Humusaufbau; und (C) naturnahe Referenzflächen mit dauerhafter Vegetation ohne landwirtschaftliche Nutzung (z.B. Ackerrand, Dauerwiese, Hecken). Die auf den Pionierflächen angewendeten Systeme integrieren, je nach Betriebstyp und Standort, u.a. den Einsatz von organischen Düngemitteln (Kompost, Wirtschaftsdünger), Anbau von biodiversen Zwischenfrüchten, vielfältige Fruchtfolgen und reduzierte Bodenbearbeitung. Die Bodenproben wurden bis zu einer Tiefe von 35 cm in drei Tiefenstufen entnommen und anschließend im Labor analysiert.

Die Gesamtkohlenstoffkonzentration im Boden wurde nach ÖNORM L 1050 analysiert. Mit Hilfe der Lagerungsdichte wurde die Humusmenge im Boden ermittelt. Die mikrobielle Biomasse wurde mittels Chloroform-Fumigations Extraktion nach (Vance et al. 1987) gemessen. Die mikrobielle Nekromasse wird über die Aminosäure Glukosamin, Galaktosamin, Mannosamin und Muraminsäure bestimmt, die Extraktion erfolgte wie in Appuhn et al. (2004) beschrieben und die Messung einer modifizierten Protokoll von (Indorf et al. 2011).

Ergebnisse und Diskussion

Wie in *Abbildung 1* zu erkennen ist, gibt es einen Trend zu höheren Kohlenstoffgehalten in den Proben der Bodenpioniere, die für leichte Böden stärker ausgeprägt ist als bei schweren Böden. Die seminatürlichen Referenz unterscheidet sich klar von der Standardbewirtschaftung und zeigt generell die höchsten Kohlenstoffgehalte. Prozentuell gesehen ist die Steigerungsrate an Kohlenstoff in den leichten Böden am höchsten (Steigerung von 37% der Pioniersysteme zu den Standardsystemen), während die mittleren Böden eine durchschnittliche Erhöhung von 26% erreichten. Die Steigerungen liegen auf einem ähnlichen Niveau wie jene in der globalen Metastudie von Xu et al. (2020) für kombinierte Maßnahmen.

Um die Unterschiede in der Bodentextur hinsichtlich des Kohlenstoffgehalts und der optimalen Bodenstruktur zu berücksichtigen, haben Schweizer Forscher ein C_{org} :Ton-Verhältnis von 0,1 als definiert, das eine gute Bodenstruktur beschreibt. Werte deutlich kleiner 0,1 weisen auf Strukturdegradation hin, ab 0,125 und darüber liegt eine optimale Bodenstruktur vor (Johannes et al. 2017). In Humusgehalten ($\text{Humus} = 1,72 \times C_{org}$) hieße das: ein leichter Boden (15 % Ton) sollte etwa 1,7 %, ein mittlerer Boden (20 % Ton) 3,4 % und ein schwerer Boden (30 % Ton) 5,2 % Humus haben, um eine optimale Struktur zu sichern. Je höher der Wert desto optimaler wird die Bodenstruktur gesehen. Dieses Verhältnis ist in *Abbildung 2* für leichte, mittlere und schwere Böden dargestellt und

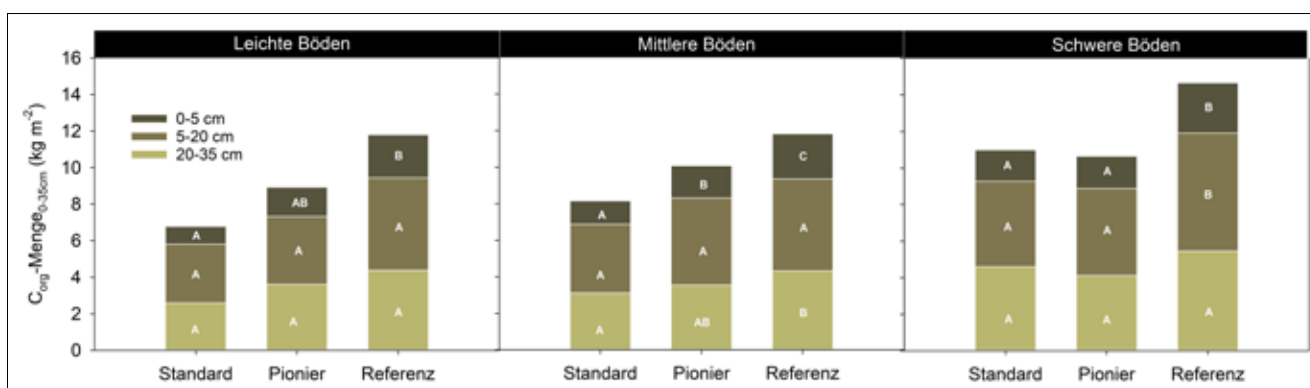


Abbildung 1: Gestapeltes Säulendiagramm des organischen Kohlenstoff Vorrats von Standard, Pionier und Referenz bis zu 35 cm Bodentiefe für leichte (links), mittlere (Mitte) und schwere Böden (rechts). Der Oberboden 0-5 cm ist in dunkelbrauner Farbe dargestellt, mittelbraun ist der Anteil der Bodentiefe zwischen 5-20 cm, und in hellbraun 20-35 cm. Die Großbuchstaben zeigen signifikante Unterschiede innerhalb der jeweiligen Tiefenstufe.

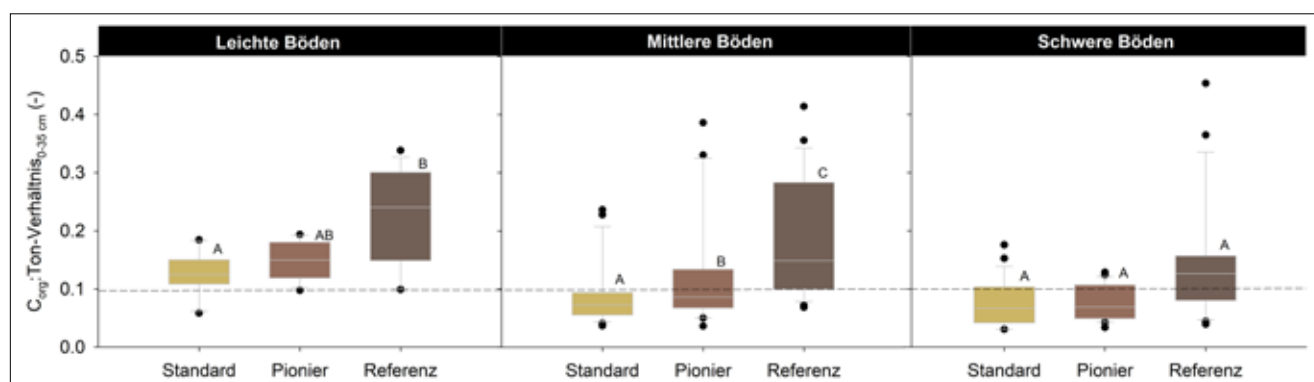


Abbildung 2: Boxplot des Verhältnisses von organischem Kohlenstoff zu Tongehalt von Standard, Pionier und Referenz bis zu 35 cm Bodentiefe für leichte (links), mittlere (mitte) und schwere Böden (rechts). Die Großbuchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Systemen.

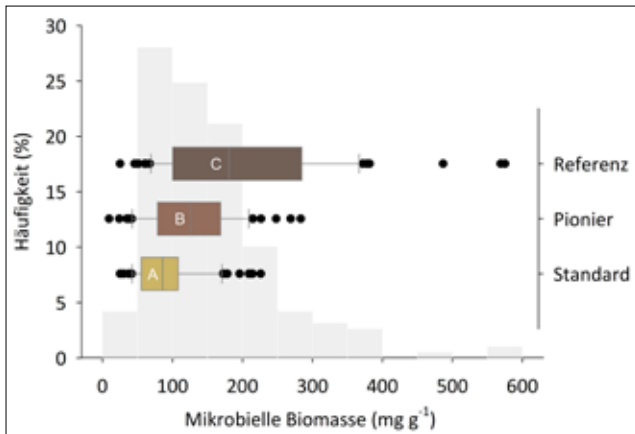


Abbildung 3: Boxplot der mikrobiellen Biomasse von Standard, Pionier und Referenz in Relation zur Häufigkeit wie oft der Wertebereich innerhalb der Messwerte vorkommt. Die Großbuchstaben zeigen signifikante Unterschiede (t-test) zwischen den Systemen.

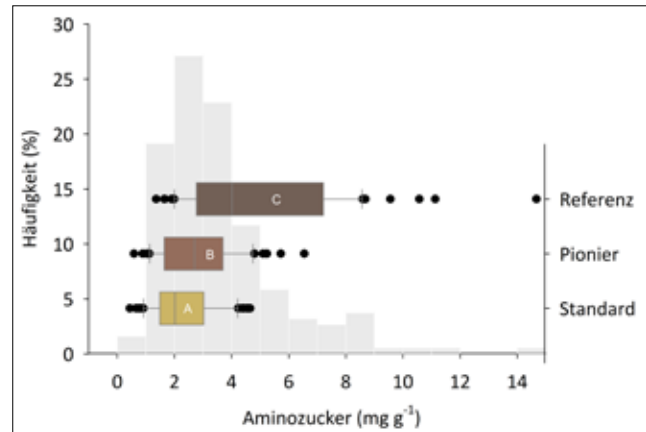


Abbildung 4: Boxplot der mikrobiellen Nekromasse (Aminozucker) von Standard, Pionier und Referenz in Relation zur Häufigkeit wie oft der Wertebereich innerhalb der Messwerte vorkommt. Die Großbuchstaben zeigen signifikante Unterschiede (t-test) zwischen den Systemen.

zeigt für die leichten Böden eine Differenzierung der Systeme Referenz und Standard, und generell ein C_{org} :Ton-Verhältnis, das für eine gute Bodenstruktur ausreichend ist. Während für die mittleren Böden ein signifikanter Unterschied für alle drei Systeme zu erkennen ist, ist das Pioniersystem im angestrebten Bereich, und das Standardsystem darunter, bzw. das Referenzsystem deutlich darüber. Hingegen weisen die schweren Böden keine signifikanten Unterschiede zwischen den Systemen auf und vergleichsweise geringe Werte.

Der Ton-Humuskomplex spielt für einen fruchtbaren Boden eine große Rolle und wird heute als „mineral-assoziierte organische Substanz“ bezeichnet. Neben den Tonteilchen sind hier auch andere geladene Mineraloberflächen wie Eisenoxide und -hydroxide inkludiert und stellen dabei laut aktuellsten Erkenntnissen den stabilsten Pool dar. Für die Bildung ist die mikrobielle Biomasse und deren Überreste nach dem Absterben, die sogenannte Nekromasse wesentlich (Liang et al. 2019, Sokol et al. 2019). Der mikrobiell gebundene Kohlenstoff ist bezogen auf den Bodenkohlenstoff vergleichsweise gering, mit etwa 1% aber ein wichtiger Bodengesundheitsindex. Die Abundanz der Mikroorganismen deutet auf ein hohes Potenzial für natürliche Nährstoffmobilisierung sowie Stickstofffixierung hin und ist auch für den Aufbau von stabiler organischer Substanz wesentlich. In *Abbildung 3* ist ersichtlich, daß die Boden.Pioniere eine Steigerung der mikrobiellen Biomasse um ~41% im Vergleich zur Standardbewirtschaftung erreichen, und die Referenz um 97% höhere Werte aufwies. Dies ist vergleichbar mit einer aktuellen Metastudie, die kombinierte Effekte von Zwischenfrüchten, konservierender Bodenbearbeitung und organischer Düngung in Bio-Systemen untersuchten und eine mittlere Steigerung der mikrobiellen Biomasse von 30% ermittelte (Crystal-Orneals et al. 2021).

Die mikrobielle Nekromasse (gemessen in Form von Aminozucker, *Abbildung 4*) weist eine ähnliche Verteilung auf, mit leicht reduzierten Steigerungsraten von +29% in den Pioniersystemen und +86% in den Referenzsystemen.

Insgesamt zeigen die Untersuchungen, dass durch innovative Bewirtschaftungssysteme die Humusgehalte in Ackerböden gesteigert werden können, wengleich selbst bei stark Bodengesundheits-orientiertem Management Werte in natürlichen Ökosystemen nicht erreichbar sind. Als wichtiges Element einer verbesserten Bodengesundheit zeigte sich die Förderung der Bodenmikrobiologie, die im Zentrum der Prozesse von Humusaufbau, Bodenstrukturstabilisierung und Nährstoffnutzungseffizient in Agrar-ökosystemen steht.

Literatur

Appuhn A., Joergensen RG., Rauchbuch M., Scheller E., Wilke B. (2004) The automated determination of glucosamine, galactosamine, muramic acid, and mannosamine in soil and root hydrolysates by HPLC. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 167 (1):17-21.

Crystal-Ornelas R., Resham T., Tully KL. (2021) Soil organic carbon is affected by organic amendments, conservation tillage, and cover cropping in organic farming systems: A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 312: 107356.

Indorf C., Dyckmans J., Khan KS., Joergensen RG. (2011) Optimisation of amino sugar quantification by HPLC in soil and plant hydrolysates. *Biology and Fertility of Soils* 47 (4):387-396. doi:10.1007/s00374-011-0545-5

Kallenbach C., Frey S., Grandy A. (2016) Direct evidence for microbial-derived soil organic matter formation and its ecophysiological controls. *Nat Commun* 7, 13630.

Poeplau C., Don A. (2015) Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops—A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 2015, 200:33-41.

Lal R. (2018) Digging deeper: A holistic perspective of factors affecting soil organic carbon sequestration in agroecosystems. *Global Change Biology*, 24(8), 3285-3301.

Liang C., Amelung W., Lehmann J., Kästner M. (2019) Quantitative assessment of microbial necromass contribution to soil organic matter. *Glob Change Biol.*, 25: 3578-3590.

Minasny B., Malone BP., McBratney AB., Angers DA., Arrouays D., Chambers A., Chaplot V., Chen Z-S., Cheng K., Das BS. (2017) Soil carbon 4 per mille. *Geoderma*, 292:59-86.

Sanderman J., Hengl T., Fiske GJ. (2017) Soil carbon debt of 12,000 years of human land use. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(36), 9575-9580.

Sokol NW., Sanderman J., Bradford MA. (2019) Pathways of mineral-associated soil organic matter formation: Integrating the role of plant carbon source, chemistry, and point of entry. *Glob Change Biol.*, 25: 12-24.

Vance ED., Brookes PC., Jenkinson DS. (1987) An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biology & Biochemistry* 19, 703-707.

Xu S., Sheng C., Tian C. (2020) Changing soil carbon: influencing factors, sequestration strategy and research direction. *Carbon Balance Manage* 15, 2.

Kann Humusaufbau in der Österreichischen Landwirtschaft das Klima retten? - Potenziale und Zertifizierung

Franz Xaver Hölzl^{1*}

Entwicklung und Beurteilung der Humusgehalte

Auswertungen der AGES zeigen, dass im Zeitraum von 1990 bis 2015 die Humusgehalte der österreichischen Ackerflächen gesteigert werden konnten. Dies ist vorrangig auf die durchwegs vielgliedrigen Fruchtfolgen auf den österreichischen Betrieben und diverse ÖPUL-Maßnahmen, insbesondere auf den verstärkten Zwischenfruchtanbau inklusive Mulch- und Direktsaatsysteme, zurückzuführen. Dieser Humusanstieg befindet sich im Vergleich des Zeitraums 1991 bis 1955 mit dem von 2006 bis 2009 aber in einem begrenzten Umfang, nämlich um +0,12 Prozent im Wald- und Mühlviertel, um +0,29 Prozent im Alpenvorland und um 0,34 Prozent im nordöstlichen Flach- und Hügelland (AGES 2010).

Laut Daten von AGES-Versuchen liegt das Humussteigerungspotenzial im Zeitraum von 20 Jahren bei bestimmten Bewirtschaftungsänderungen wie jährliche Stallmist- oder Kompostgaben, Belassen der Ernterückstände, Minimalbodenbearbeitung oder Umstellung der Fruchtfolge nur bei wenigen Zehntelprozentpunkten (Dersch 2022).

Die höchsten Humusgehalte werden auf Ackerflächen erreicht, wenn Feldfutter, Klee gras, Futtergräser oder Wechselwiesen mehrjährig in der Fruchtfolge enthalten sind. Bei den anderen Maßnahmen wie Zwischenfruchtbau, organische Düngung, reduzierte Bodenbearbeitung etc. ist der humusaufbauende Effekt bedeutend geringer (Dersch 2013).

Laut den Ergebnissen der von der BWSB durchgeführten oberösterreichischen Landesbodenuntersuchung 2009 unterscheiden sich die Humusgehalte der Regionen in Oberösterreich deutlich, mit dem niedrigsten Mittelwert im Alpenvorland von 3,3 Prozent und dem höchsten Wert in den Voralpen mit 4,9 Prozent. Dies ist auf die klimatischen Unterschiede (vor allem aufgrund der Höhenlage) und die unterschiedlichen Kulturarten zurückzuführen.

In den Hochlagen des Mühlviertels zeigt sich eine große Bandbreite der Gehalte. Dies ist auf die einerseits hohen Feldfutter- und Wechselwiesenanteile (Humusgehalte zwischen 5 Prozent und 7 Prozent) und andererseits auf das langjährige Fehlen von Feldfutter in der Fruchtfolge (Humusgehalte zwischen 2 Prozent und 3 Prozent) zurückzuführen. Auf den leichten Mühlviertler Granit-Verwitterungsböden ist offenbar ohne Feldfutter in der Fruchtfolge der Humusgehalt nur sehr schwer im anzustrebenden Bereich zu halten. Im Alpenvorland und in den Mittellagen des Mühlviertels sind die Verteilungen ähnlich. Bei biologisch bewirtschafteten Flächen ist durch den höheren Anteil an Feldfutterpflanzen und den geringen Maisanteil der Humusgehalt um 0,1 Prozent bis 0,3 Prozent höher als auf konventionellen.

Im Alpenvorland steigt der Humusgehalt auf Ackerland mit zunehmendem GVE-Bestand von 3,2 Prozent auf bis 3,4 Prozent, im Mühlviertel von 3,3 Prozent auf bis zu 3,7 Prozent an. Dabei sind die Effekte bei Rinderhaltung ausgeprägter als bei Schweinehaltung (Dersch et al. 2013).

Die Humusgehalte haben sich in den letzten Jahrzehnten erhöht und liegen bei den österreichischen Ackerflächen auf einem guten Niveau. So hat sich beispielsweise in der Traun-Enns-Platte der Median der Humusgehalte von ca. 2,8 Prozent im Zeitraum 1991 bis 1995 auf etwa 3,1 Prozent im Zeitraum 2006 bis 2011 erhöht. Im Zeitraum 2015 bis 2018 ist jedoch ein leichter Rückgang auf 3,0 Prozent festzustellen. Im

¹ Boden.Wasser.Schutz.Beratung, Landwirtschaftskammer Oberösterreich, Auf der Gugl 3, A-4021 LINZ

* Ansprechpartner: DI Franz Xaver Hölzl, email: franz.hoelzl@lk-ooe.at

Marchfeld hat sich der Median der Humusgehalte von 2,6 Prozent im Zeitraum 1991 bis 1995 auf 2,8 Prozent im Zeitraum 2006 bis 2011 und auf 2,9 Prozent im Zeitraum 2015 bis 2018 erhöht. Im Tullner Feld kann die gleiche Entwicklung beim Median der Humusgehalte 2,2 Prozent im Zeitraum 1991 bis 1995, mit 2,6 Prozent im Zeitraum 2006 bis 2011 und 2,75 Prozent im Zeitraum 2015 bis 2018 beobachtet werden. Dabei kann festgestellt werden, dass sich auch im Osten Österreichs der Anstieg der Humusgehalte in den letzten Jahren abflacht. Die Steigerungen der C_{org} -Vorräte liegen im Verlauf der letzten 25 Jahre zwischen 2,5 und 7,5 t/ha, das entspricht im Mittel einer C_{org} -Akkumulation von ca. 100 bis 300 kg/ha und Jahr. Höhere Steigerungen sind bei standörtlich niedrigeren Humusgehalten möglich. Bei bereits mittleren bis höheren Humusgehalten ist auch die Stabilisierung auf diesem Niveau positiv zu bewerten (Dersch 2020).

Gesicherte C-Speicherung nur bei bestimmten Bedingungen möglich

Von einer künftig gesicherten C-Sequestrierung kann nur bei bestimmten Bedingungen ausgegangen werden. Dies ist nur der Fall, wenn eine **Landnutzungsänderung** in Form einer Umwandlung von Acker in Grünland, von Acker in Wald oder von Acker in eine dauerhaft mit einer Gründedeckung bewachsenen Dauerkultur wie Aroniabeere, Walnuss oder dergleichen erfolgt. Dieses Potenzial ist aber als sehr gering einzuschätzen.

Die Humusgehalte im **Grünland** sind vorrangig von den klimatischen und bodenbedingten Verhältnissen (Tiefgründigkeit, Bodenschwere, Feuchtigkeit, Exposition, ...) geprägt und grundsätzlich nur bedingt durch die Bewirtschaftung wie Nutzungshäufigkeit und Düngung beeinflussbar. Darüber hinaus besteht in dieser Thematik erheblicher Forschungsbedarf. Die diskutierte Wiedervernässung von dränagierten Flächen ist aus landwirtschaftlicher Sicht (Verlust der einzelbetrieblichen Produktionsgrundlage, [naturschutz-]rechtliche Festlegung für die nächsten Generationen, etc.) äußerst kritisch zu sehen.

Darüber hinaus wirkt sich der ständige Verlust an landwirtschaftlicher Nutzfläche durch **Flächenverbrauch** für Infrastruktur und Siedlungsraum negativ auf das C-Sequestrierungspotenzial aus.

Um bei **Ackernutzung** in Zukunft – ausgehend vom bereits erreichten guten Niveau – von einer gesicherten C-Sequestrierung sprechen zu können, müssen zahlreiche Unsicherheiten berücksichtigt werden, die in der Folge kurz dargestellt werden.

- **Erosions-Unsicherheit:** Die offensichtlichen klimatischen Veränderungen haben zu einer höheren Intensität der Unwetter geführt. Durch ein Extremereignis in Form eines Starkniederschlages zu einem aus ackerbaulicher Sicht ungünstigen Zeitpunkt kann die humusschonende Bewirtschaftung von Jahrzehnten durch Bodenabtrag mit einem Schlag zunichtegemacht werden.
- **Produktions-Unsicherheit:** Die aktuelle Diskussion im Pflanzenschutz- und Düngemittelbereich (Green Deal, Farm-to-Fork, ...) ist einer gesicherten humussteigernden Bewirtschaftung nicht zuträglich. Österreich hat im internationalen Vergleich niedrige Stickstoffbilanzsalden. Muss von diesem niedrigen Niveau ausgehend noch einmal die Düngung reduziert werden, führt dies zu einer reduzierten Ertragssicherheit. Geringere Erträge sind mit niedrigeren Ernte- und Wurzelrückständen und damit einer geringeren Zufuhr an organischer Substanz verbunden. Fallen auch weiterhin viele Pflanzenschutzmittel weg, so ist dies oftmals mit einer höheren Intensität an Bodenbearbeitung verbunden. „*Bodenbearbeitung wird in nächster Zeit aufgrund fehlender Betriebsmittel (Herbizide und Insektizide) zu einer immer wichtigeren phytosanitären Maßnahme!*“ (Zitat Dr. Marion Seiter, LK OÖ).
- **Klima-Unsicherheit:** Die steigenden Temperaturen haben offensichtlich zu einer Verlängerung der Vegetationsperiode geführt. Dies erhöht die biologisch aktive

Zeit im Jahr und damit die Mineralisierungsrate. Kann dies nicht durch gesicherte höhere Erträge kompensiert werden, führt dies bei gleichbleibender Bewirtschaftung unweigerlich zu einem niedrigeren Humusniveau. Will man unter den neuen Klimabedingungen dieses niedrigere Humusniveau wieder auf das ursprüngliche erhöhen, bedarf dies eines erheblich höheren Aufwands in Form einer gesteigerten Zufuhr an organischer Masse unter Berücksichtigung der Verlagerungsproblematik. Unter Verlagerung wird hier verstanden, dass es sich um keine C-Sequestrierung handelt, wenn von einer Fläche organische Masse weggenommen wird und ohne Stabilisierung auf einer anderen Fläche konzentriert aufgebracht wird (Sedy 2015).

- *Permanenz-Unsicherheit:* Es ist unter den geänderten klimatischen Verhältnissen und den geforderten Rahmenbedingungen in der Bewirtschaftung ungewiss, wie lange organischer Kohlenstoff im Boden stabil bleibt und nicht mineralisiert beziehungsweise freigesetzt wird. Denn der positive Effekt des C_{org} -Aufbaus ist vollständig reversibel (Wiesmeier 2020). In diesem Zusammenhang ist jedenfalls ein Zeithorizont zu definieren, in welchem ein C_{org} -Gehalt im Boden aufgebaut beziehungsweise gesichert auf dem Niveau gehalten wird. Fünf oder zehn Jahre erscheinen definitiv als ein viel zu geringer Zeithorizont, 30 Jahre, 100 Jahre bis hin zur sogenannten Ewigkeitsklausel werden diskutiert (Wiesmeier 2020).
- *Nachweis-Unsicherheit, C-Sättigungs-Unsicherheit und Humus-Zertifizierung:* Es ist davon auszugehen, dass eine C-Sequestrierung nachgewiesen werden muss. Aktuell wird der Ansatz eines analytischen Nachweises mittels Bodenuntersuchung verfolgt. Dabei muss eine Probenahme-Unsicherheit bedacht werden, die sich einerseits in einer erheblichen kleinräumigen Varianz der C_{org} -Gehalte auf der Beprobungsfläche sowie in Abweichungen bei Wiederholungs-Beprobungen – zeitlich (Jahreszeit, Bodenverhältnisse) und räumlich –, andererseits in der oftmals fehlenden Definition der Beprobungstiefe widerspiegelt. Darüber hinaus ist es erforderlich, dass für eine Ermittlung des C_{org} -Gehaltes pro Hektar die Lagerungsdichte und der Grobanteil bekannt sind. Zusätzlich ist die Analysetoleranz im Labor, sofern man die Analyse-methode selbst definiert hat, zu berücksichtigen.

Erfahrungsgemäß liegen allein diese Unsicherheiten bei den aktuellen privatwirtschaftlichen Zertifizierungssystemen, die in der Regel einen Marketingansatz verfolgen, schon über den oben angesprochenen Humussteigerungspotenzialen von 20 Jahren. Somit bleiben häufig das Risiko und die Kosten für die Probenahme, Analytik und Abwicklung beim Landwirt hängen.

Aufgrund der Bodeneigenschaften und der bisherigen humusfördernden Bewirtschaftung kann es sein, dass man sich bereits nahe der standortspezifischen Humussättigung befindet. Daher ist bei derartigen Verhältnissen ein weiterer Humusaufbau nur ganz schwer zu erreichen und analytisch noch schwieriger nachzuweisen. Humusaufbau wäre eigentlich nur dann relativ leicht erreichbar und lukrativ beziehungsweise leichter nachzuweisen, wenn vorher Humus entsprechend abgebaut worden ist. Diese Tatsache ist bezüglich Klimaschutz aus fachlicher Sicht zu hinterfragen und stellt bezüglich Zertifizierung ein gravierendes Fairnessproblem dar.

„Um den C_{org} -Vorrat eines Standortes auf ein höheres Niveau anzuheben, muss die jährliche C-Zufuhr dauerhaft erhöht werden. Die Intensität der C_{org} -Akkumulation lässt dabei mit der Zeit nach, da bei erhöhtem C_{org} -Vorrat auch ein erhöhter Abbau stattfindet. Die Kurve der C_{org} -Akkumulation nähert sich schließlich einem neuen Gleichgewicht an. Damit erfolgt zu Beginn eine deutlich bessere Verwertung der Kohlenstoffzufuhr, das heißt eine schnellere C_{org} -Akkumulation als kurz vor Erreichen des neuen Gleichgewichtes (hohe Effektivität des C-Eintrags). Um die Speichergroße konstant auf dem neuen Niveau zu halten, ist daher dauerhaft ein höherer C-Eintrag erforderlich als vor Beginn der Maßnahme. Der Zeitraum bis zur Erreichung eines neuen Fließgleichgewichts hängt vom Standort und der Bewirtschaftungsmaßnahme ab und kann stark variieren“ (Wiesmeier 2020).

Humuswirtschaft mit Hausverstand

Standortangepasste optimale Humusgehalte haben zahlreiche Vorteile in der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung (Wasser- und Nährstoffspeicherkapazität, Aggregatstabilität samt reduziertem Erosionsrisiko, Bodenleben und Bodenfruchtbarkeit, ...). Gerade in der Mineralisierung liegt der Hauptnutzen in der landwirtschaftlichen Bodennutzung bezüglich Bodenfruchtbarkeit und Ertragssicherheit.

Im Falle einer übermäßigen Steigerung der Humusgehalte durch Aufbringung von enormen Mengen an organischen Substraten ist jedenfalls das Risiko der erhöhten Nährstoffverluste (z.B. Nitrataustrag ins Grundwasser) zu beachten.

Wird auf der anderen Seite alles einer C-Sequestrierung (Vernässung, Erhöhung des C-N-Verhältnisses, ...) untergeordnet, ist dies unweigerlich mit niedrigeren Erträgen verbunden. Sollte dies zu einer Reduktion der nationalen Eigenversorgung mit Lebens- und Futtermitteln und daraus resultierend zu einer Erhöhung des Importbedarfes führen, so ist dies als kontraproduktiv zu bezeichnen. In diesem Zusammenhang wird auf die hohen Produktionsstandards (Düngung, Pflanzenschutz, Züchtungsfortschritt, Ernte, Lagerung, Verarbeitung, Wasserverbrauch), die Produktions-Effizienz (Aufwand pro Kilogramm produziertem Produkt) in Österreich sowie auf die ökonomischen und sicherheitspolitischen Aspekte hingewiesen.

Resumee und Zusammenfassung

Grundsätzlich sind alle Instrumente und Systeme zu begrüßen, die Maßnahmen zum Humusaufbau bis zu einem standortspezifischen Optimum in der Bewirtschaftungspraxis implementieren. Der freiwillige analysebezogene Zertifikatshandel kann auch ein derartiges Instrument sein, wenn alle Unsicherheiten klar und transparent dargestellt und vermittelt werden! Passiert das nicht, wird der analysebezogene Zertifikatshandel aufgrund der Risiken und Kosten kritisch gesehen.

Bedeutend zielführender wird die Beurteilung beziehungsweise Honorierung einer maßnahmenbezogenen, humuserhaltenden, oder -steigernden Bewirtschaftung erachtet. Maßnahmen wie Fruchtfolgen mit Feldfutter, Leguminosen und Begrünung, keine Abfuhr von Ernterückständen, organische Düngung, reduzierte Bodenbearbeitung und Direktsaat, mineralische Düngung und dergleichen werden teilweise durch GAP-Vorgaben und durch diverse ÖPUL-Maßnahmen (Bio, UBB, Begrünung/System Immergrün, Mulch- und Direktsaat beziehungsweise Strip-Till, ...) abgedeckt. Darüber hinausgehende nachweislich humussteigernde Maßnahmen sollten berechtigterweise honoriert werden. Die Humusbilanzierung kann ein praktikables Instrument sein, die Gesamtheit der Maßnahmen ohne die hohen Analysekosten samt Unsicherheiten zu beurteilen.

Da eine substanzielle C-Sequestrierung in der landwirtschaftlichen Bodennutzung von zahlreichen Unsicherheiten behaftet ist, dabei insbesondere auch ökonomische und ökologische Aspekte zu berücksichtigen sind, ist letztendlich das Potenzial als gering einzuschätzen.

Literatur

AGES (2010) ÖPUL-Evaluierung – Auswirkungen von ÖPUL-Maßnahmen auf die Nährstoffverfügbarkeit österreichischer Böden. Wien, März 2010.

Dersch G. et al. (2013) Humusgehalt, Säuregrad und pflanzenverfügbare Phosphor und Kaliumgehalte auf Acker- und Grünland in Oberösterreich: Aktueller Status auf Basis der Landesbodenuntersuchungsaktion 2009 in Abhängigkeit von Region, Betriebstyp (Tierhaltung und/oder Marktfruchtbetrieb), Bewirtschaftungsform (konventionell vs. biologisch)

und weiterer ÖPUL-Maßnahmen sowie Ableitung von Entwicklungstrends seit Einführung des ÖPUL auf Basis von Bodendaten aus der Praxis von den Perioden 1991-1995 und 2008-2011 und der Bodenzustandsinventur OÖ 1993. Wien 2013.

Dersch G. (2022) Entwicklung der Humusgehalte auf Ackerland: ÖPUL-Evaluierung seit 1991 und in Versuchen mit langjähriger unterschiedlicher Bewirtschaftung. Webinar 2022.

Sedy K. et al. (2015) Austrian Carbon Calculator. Wien 2015.

Wiesmeier M. et al. (2020) CO₂-Zertifikate für die Festlegung atmosphärischen Kohlenstoffs in Böden: Methoden, Maßnahmen und Grenzen. München Mai 2020.

Klimafitter Ackerbau aus und für die Praxis

Johannes Maßwohl^{1*}

Zusammenfassung

Die überwiegend negativen Folgen des Klimawandels für die Landwirtschaft sind bereits deutlich ersichtlich. Starkniederschläge mit starken Erosionen, Verschlammungen und Überflutungen und lange Trockenzeiten sowie hohe Temperaturen bedrohen das hohe Ertragspotential im steirischen Ackerbauggebiet.

Die Landwirtschaftskammer Steiermark hat deshalb im Jahr 2019 das Kompetenzzentrum für Acker, Humus und Erosionsschutz in der Bezirkskammer Südoststeiermark installiert. Ziel dieses Kompetenzzentrums ist es Maßnahmen für den klimafitten Ackerbau und Anpassungen an den Klimawandel im Pflanzenbau zu erarbeiten und möglichst breit in die Praxis umzusetzen. Herzstück dieses Kompetenzzentrums ist die Zusammenarbeit spezialisierter Landwirte im Humusaufbau und Erosionsschutz und Beratern, um wissenschaftliche Erkenntnisse mit Erfahrungen der Landwirte zu verbinden.

Summary

The mainly negative effects of the climate change on agriculture are clearly noticeable. Heavy rain, followed up by erosions, flooding and long dry seasons and high temperatures, threaten the potential of high harvest yields in the Styrian agriculture territories.

In 2019 the Landwirtschaftskammer Steiermark (Chamber of Agriculture in Styria) created for that reason the competence center for crop production, humus and prevention of soil erosions in the south-east of Styria. The goal of this department is to make the agriculture ready for climate change. The most important part of this department is the cooperation with farmers who are specialized in increasing humus and prevention of soil erosions for combine scientific research with the experiences of the farmers to get the best results.

Einleitung

Die Landwirtschaft ist durch Hitze, Trockenheit und Starkniederschläge Hauptbetroffene des Klimawandels. Humusaufbau und klimafitter Boden sind eine Notwendigkeit der Landwirtschaft für die Zukunft. Nicht weil es Strategien der EU wie der Green Deal oder Farm to Fork das vorschreiben. Nein, einfach deshalb, weil es uns die Bodenfruchtbarkeit und Ertragssicherheit in Zeiten des Klimawandels erhalten kann.

Das 2019 installierte Kompetenzzentrum für Acker, Humus und Erosionsschutz (KAHE) ist eine Einrichtung der Landwirtschaftskammer Steiermark. Aufgabe des Zentrums ist die Förderung des Humusaufbaus und der Bodenfruchtbarkeit als Maßnahmen, um die Herausforderungen des Klimawandels zu bewältigen und die Ernährung der Bevölkerung sicherzustellen. Weiters sind die Themen Bodenverdichtung und Erosion von zentraler Bedeutung in der Beratung.

¹ Landwirtschaftskammer Steiermark, Bezirkskammer Südoststeiermark, Franz-Josef-Straße 4, A-8330 FELDBACH

* Ansprechpartner: DI Johannes Maßwohl, email: johannes.maszwohl@lk-stmk.at

Konzeption des KAHE

Wissenschaftliche Publikationen über humusaufbauende oder bodenfruchtbarkeitsfördernde Bewirtschaftungssysteme haben oftmals nur für die eng abgesteckten Rahmenbedingungen der Studien volle Gültigkeit. Unterschiedliche klimatische Bedingungen, Fruchtfolgen, Bodentypen oder die maschinelle Ausstattung der Betriebe beeinflussen die praktische Umsetzung erheblich. Um wissenschaftliche Erkenntnisse auf den – im wahrsten Sinne des Wortes – Boden zu bringen braucht es Praktiker vor Ort.

In der Konzeption des KAHE hat man deshalb ein zentrales Element zwischen Wissenschaft und breiter Umsetzung in den steirischen Ackerbau - das Praktikerforum - eingesetzt. Das Praktikerforum ist eine Gruppe von Landwirten die auf ihren Betrieben humusaufbauende Systeme oder Erosionsschutzmaßnahmen erfolgreich umsetzen. Gleichzeitig sind sie in ihrer Region auch Multiplikatoren und stellen ihre Ackerflächen für Versuche, Feldbegehungen oder Besichtigungen zur Verfügung.

Im Februar 2020 wurde das Praktikerforum mit 30 Landwirten gegründet. Ende 2021 sind 70 Betriebe im Praktikerforum aktiv eingebunden. Die Betriebe sind über eine Social Media Plattform „kurzgeschaltet“ in der sie die eigenen Erfahrungen und Systeme kommunizieren. Fotos, Videos und Textbeiträge zu Humusaufbau, Erosionsereignissen oder Begrünungen erzeugen ein breites Bild der vielfältigen Maßnahmen die auf diesen Betrieben umgesetzt werden. Eine Eigenschaft die alle Gruppenmitglieder aufweisen ist die Suche nach neuen, dem Standort und dem Betriebszweig angepassten Wegen zum klimafitten Ackerbau. Diese Eigenschaft und Bereitschaft gemeinsam neue Wege zu gehen macht diese engagierte Gruppe unverzichtbar für die Beratungstätigkeit des Kompetenzzentrums.

Projekt Krümelstar

Das Projekt begibt sich auf die Suche nach optimalen, klimafitten Böden im steirischen Ackerbaugebiet. Dazu wurden 120 Ackerböden von Praktikerforumslandwirten untersucht. Neben umfangreichen chemischen Untersuchungen wurden schwerpunktmäßig auch bodenphysikalische Untersuchungen (Penetrometermessungen, Lagerungsdichte, Spatenprobe, Infiltrationsmessungen) durchgeführt. Aus den Analyse- und Bewirtschaftungsdaten können Rückschlüsse auf die Bewirtschaftungserfordernisse für klimafitte Ackerböden abgeleitet und in der Beratung verwendet werden.

Die Auswertung von 120 Bodenproben zeigt durchschnittliche Humusgehalte mit 2,8 %, wobei der Schwankungsbereich die Werte 1,4 bis 5,4 % umfasst. Die Bodenarten reichen von sandigen bis zu stark tonigen Böden und stellen die Bandbreite der untersuchten Böden im Projekt Krümelstar dar (siehe *Tabelle 1*).

Erste Auswertungen bestätigen einen eindeutigen Zusammenhang zwischen Humus- und Stickstoffgehalt. Steigende Humusgehalte bedeuten auch steigende Stickstoffgehalte im Boden (siehe *Abbildung 1*).

Die C/N-Verhältnisse der Böden zeigen zwar einen leicht steigenden Trend mit höheren Humusgehalten, der überwiegende Teil der C/N-Verhältnisse liegt aber um den Mittelwert (9,4:1) im Bereich 8-12:1 (siehe *Abbildung 2*). Extremwerte von 4:1 bzw. 24:1 sind sicherlich auf ihre Stabilität nochmals zu überprüfen, könnten aber unter Berücksichtigung von Fruchtfolge, Bodenart und Bodenbearbeitung wertvolle Hinweise auf die Humusstabilität liefern.

Durch die bodenphysikalischen Messungen im Projekt werden Verdichtungshorizonte erhoben und die Wasserleitfähigkeit bestimmt. Verdichtungshorizonte lassen sich klassisch in Bodentiefen von 25 bis 40 cm feststellen und können als klassische Pflugsohlen angesprochen werden. Aber auch Verdichtungen in Bodentiefen von 15 bis 20 cm sind zu finden. Diese oberflächennahen Verdichtungen dürften auf reduzierte Bodenbearbeitung mittels Grubber oder Scheibeneggen zurückzuführen sein.

Tabelle 1: Analysenergebnisse aus dem Projekt Krümelstar.

Parameter	Mittelwert	Min	Max	StAbw.
Summe aust. Kationen in cmol/kg	15,81	9,00	26,76	3,92
aust. Calcium	12,43	6,50	21,90	3,29
aust. Kalium	0,58	0,17	1,56	0,26
aust. Magnesium	2,37	< 0,89	6,50	1,11
aust. Natrium	0,09	0,02	0,23	0,05
pH (CaCl ₂)	6,12	4,50	7,20	0,43
Humus (Trockenverbrennung)	2,8	1,4	5,4	0,7
Stickstoff n. Kjeldahl in %	0,17	0,09	0,30	0,03
C:N Verhältnis	9,35	3,7	23,9	2,17
nachlieferbarer Stickstoff	54	5	117	24
P (CAL) in mg/100 g	78	10	200	48
K (CAL) in mg/100 g	206	58	600	100
Mg (Schachtschabel) in mg/100 g	187	54	490	78
K : Mg Verhältnis	1,27	0,27	6,28	0,91
Fe löslich in mg/1000g	354	65	848	147
Cu löslich in mg/1000g	5,4	2,0	49,1	6,6
Mn löslich in mg/1000g	228	20	443	75
Zn löslich in mg/1000g	3,7	0,0	11,6	2,4
Sand	31	8	67	11
Schluff	46	15	66	9
Ton	23	10	42	6

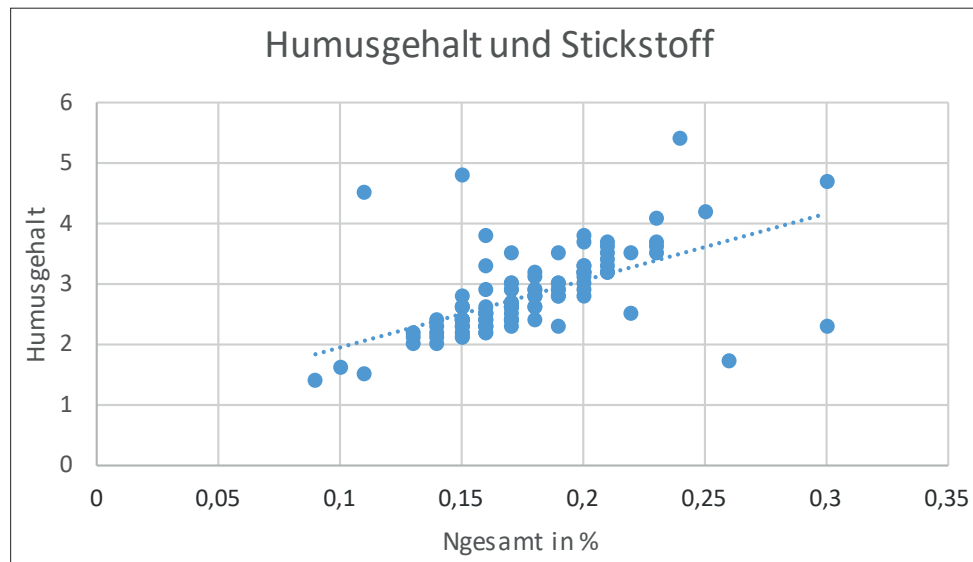
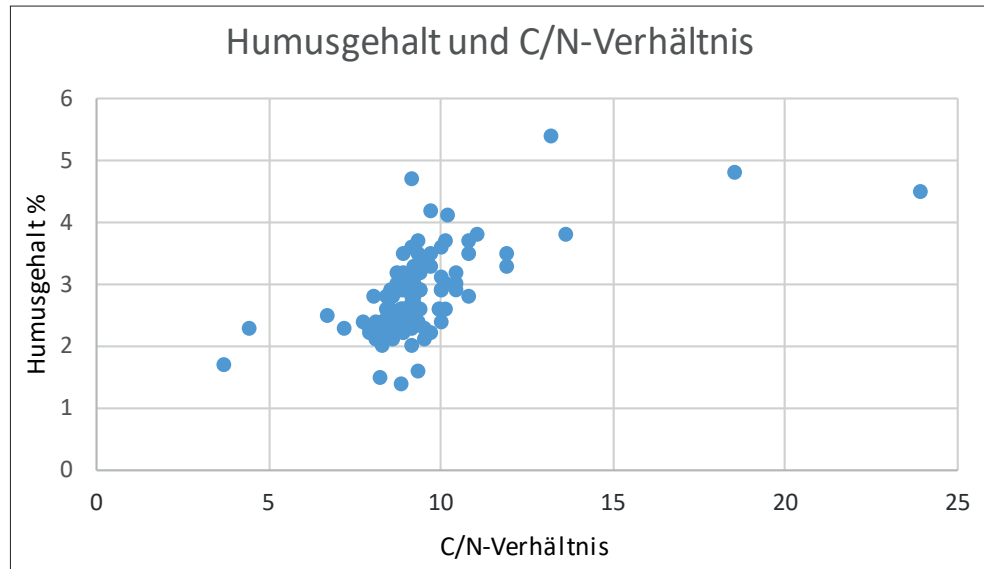


Abbildung 1: Zusammenhang zwischen Humus- und Stickstoffgehalten im Projekt Krümelstar.

Klimafitter Ackerbau und Praxisversuche

Ziel des klimafitten Ackerbaus ist der Erhalt und die Förderung der Bodenfruchtbarkeit durch ein ausgewogenes Nährstoffverhältnis, Vermeidung von Bodenverdichtungen, Humusanreicherung und Erosionsschutz. Dazu kommen hohe Nährstoffeffizienz der eingesetzten organischen und mineralischen Düngemittel und klima- und standortangepasste Fruchtfolgen.

Abbildung 2: Zusammenhang zwischen Humus- und C/N-Verhältnis im Projekt Krümelstar..



Eigenschaften die klimafitte Böden aufweisen sollen sind insbesondere

- optimale Luft- und Wasserverhältnisse
- hohes Nährstoffspeichervermögen
- gute Nährstoffverfügbarkeit
- hohe Bodenstabilität in Hinblick auf Erosionsgefährdung, Verschlammungsneigung und Befahrbarkeit
- hohe Infiltrationsrate und Wasserleitfähigkeit in den Unterboden.

Die Mitglieder des Praktikerforums sind sehr engagiert im Versuchswesen. Eigene Versuche und Versuche die von den Mitarbeitern des Kompetenzzentrums begleitet werden bringen wertvolle Hinweise für den klimafitten Ackerbau auf unterschiedlichen Böden. Als Beispiel seien hier Begrünungs- und Erosionsschutzversuche, Humusaufbau oder die Vermeidung von Bodenverdichtungen genannt.

Im Jahr 2021 wurde, hier beispielhaft genannt, ein solcher Versuch in der Südoststeiermark zur Beseitigung von Bodenverdichtungen angelegt. Starke Bodenverdichtungen bis 45 cm Bodentiefe auf einem schluffigen Lehm bildete die Ausgangssituation. Mittels Tiefengrubber wurde im Juli versucht unter trockenen Bedingungen die Verdichtungen aufzubrechen und mit einer sofortigen Eingrünung mit einer betriebseigenen Begrünungsmischung des Landwirts die Lockerung zu stabilisieren. Vor der Tiefengrubberarbeit wurden die Verdichtungen auch messtechnische mit dem Penetrologger und der Messung der Lagerungsdichte festgestellt. Ebenso im November auf dem begrüneten Boden (siehe *Abbildung 3*). Die Penetrologgerdiagramme zeigen vor den gesetzten Maßnahmen überwiegend Eindringwiderstände über 2 MPa. Ein Wurzelwachstum ist bei starken Verdichtungen wie im vorliegenden Fall nur mehr eingeschränkt möglich. Luft- und Wasserhaushalt sind gestört und die Wasserleitfähigkeit des Bodens ist gehemmt.

Die durchgeführten Maßnahmen scheinen erfolgreich zu sein. Anhand der Penetrometermessung lässt sich dies auch nachvollziehen. Auch die Durchwurzelung der gelockerten Verdichtungshorizonte der Begrünungsmischung bis in eine Bodentiefe von 45 – 50 cm lässt auf eine dauerhafte Lockerung und Stabilisierung des Gefüges schließen.

Fazit

Klimafitter Ackerbau, Humusaufbau und Erosionsschutz sind in der landwirtschaftlichen Praxis angekommen. Die Anzahl der Landwirte die sich mit diesen Themen beschäftigen

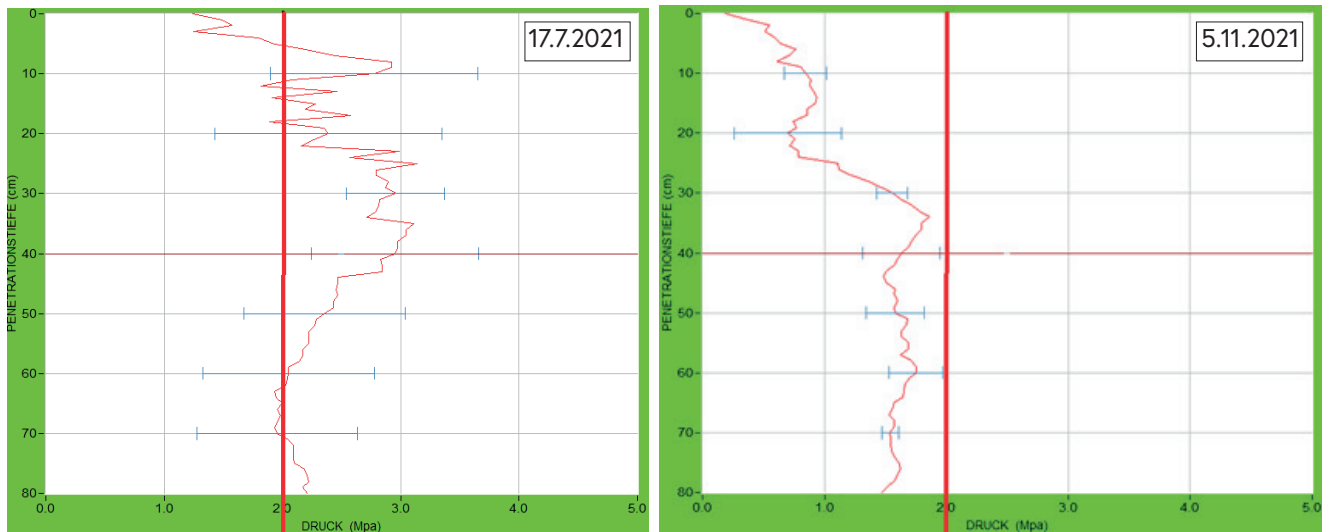


Abbildung 3: Penetrologerdiagramme vor dem Tiefengrubbereinsatz und im Herbst mit Begrünung.

und in den eigenen Betrieb integrieren steigt merklich an. Humusaufbauende Maßnahmen und Erosionsschutz bringen aber nicht nur Vorteile, sondern auch Herausforderungen in der Bewirtschaftung der Ackerflächen. Steigender Unkraut- und Schädlingsdruck, Schwierigkeiten bei der Beseitigung von winterharten Gründecken oder verspätete Anbauzeitpunkte. Um diese Herausforderungen mit all ihren Einflussfaktoren wie Bodentypen, Klima, Fruchtfolge, Bodenbearbeitung, Betriebszweigausrichtung, etc. zu meistern braucht es Praktiker, die die unterschiedlichen Strategien zum klimafitten Ackerbau auch auf breite Umsetzbarkeit testen. Die Landwirte des Praktikerforums erfüllen diese Aufgabe aktuell mit hoher Professionalität und großem Engagement.

Literatur

Pollhammer J., Sundl M. (2021) Tiefenlockerung nach Wintergetreide, BK-Aktuell Südoststeiermark, Ausgabe Dezember 2021, 10-11.

Scheffer/Schachtschabel (2018) Lehrbuch der Bodenkunde, 17. Auflage.

Klimawandelanpassungsstrategien im Dauergrünland

Andreas Bohner^{1*}

Zusammenfassung

Dürreperioden mit erheblichen Ertragsminderungen werden in Zukunft vor allem in den Sommermonaten Juni, Juli und August vermehrt auftreten. Daher sind Strategien zur Anpassung an den Klimawandel auch im Dauergrünland notwendig. Die Erhöhung der Wasserinfiltration im Boden, die Verbesserung der Durchwurzelbarkeit des Bodens, die Steigerung der Durchwurzelungstiefe, die Erhöhung der Pflanzenartenvielfalt und die Verringerung der Verdunstungsverluste sind wichtige Maßnahmen zur Minderung von Trockenschäden im Dauergrünland.

Schlagwörter: Klimawandel, Nutzungsintensität, Trockenschäden, Bodenverdunstung, Durchwurzelung

Summary

In the future, summer drought with a significant decrease in forage yield will occur more frequently. Therefore, mitigation strategies in permanent grassland are necessary. The increase in soil water infiltration, the enhancement of root penetration, the increase in rooting depth, the increase in plant species richness and the reduction in soil evaporation are important measures to mitigate drought damages in permanent grassland.

Keywords: climate change, intensity of utilisation, drought damages, soil evaporation, root penetration

Die aktuellen Klimaszenarien (Chimani et al. 2016) zeigen für Österreich in den nächsten Jahrzehnten eine weitere Zunahme der Jahrestemperatur um zumindest 1 °C. Vor allem im Sommer wird eine stärkere Erwärmung prognostiziert. Für den Winter wird eine Zunahme des Niederschlags und für den Sommer eine gleichbleibende Niederschlagsmenge vorhergesagt. Allerdings sind beim Niederschlag deutliche regionale Unterschiede zu erwarten. Hitze- und Dürreperioden werden in Zukunft vor allem in den Sommermonaten Juni, Juli und August häufiger auftreten, länger andauern und heftiger ausfallen. Verantwortlich hierfür ist der Temperaturanstieg im Sommer und die damit verbundene Zunahme der Verdunstung des im Boden gespeicherten Wassers bei gleichbleibender Niederschlagsmenge. Auch Starkniederschläge werden zunehmen, weil durch Erwärmung der maximale Wasserdampfgehalt in der Atmosphäre ansteigt. Bei Starkregen kann der Boden das Niederschlagswasser schlechter aufnehmen als bei Dauerregen mit geringer Ergiebigkeit, wodurch die Gefahr von Trockenschäden weiter steigt.

Generell vermindert Wassermangel die Löslichkeit, Mobilität und Bioverfügbarkeit von Pflanzennährelementen im Boden (Barber 1995). Anhaltende Trockenheit bewirkt bei vielen Bodenorganismen (insbesondere Bodenbakterien) eine niedrige Aktivität (Jamieson et al. 1998). Dies führt zu einer geringeren Stickstoffverfügbarkeit für Pflanzen, zu einer niedrigeren Stickstoffkonzentration in den Blättern, zu einem geringeren Eiweißgehalt im Futter (Deléglise et al. 2015) und zu einem gehemmten Wachstum der hochwertigen Futtergräser. Trockenheitstolerante Kräuter können sich daher im Pflanzenbestand infolge geringerer Gräserkonkurrenz ansiedeln oder stark ausbreiten. Bei anhaltender

¹ HBLFA Raumberg-Gumpenstein, Abt. Umweltökologie, Raumberg 38, A-8952 IRDNING-DONNERSBACHTAL

* Ansprechpartner: Dr. Andreas Bohner, email: andreas.bohner@raumberg-gumpenstein.at

Trockenheit sinkt das Blatt-Halm-Verhältnis und Nährelemente werden aus den Blättern in die Wurzeln verlagert, wodurch die Futterqualität weiter sinkt. Außerdem entstehen Lücken in der Grasnarbe durch das Absterben von trockenheitsempfindlichen Pflanzen. Die Ansiedlung von Moosen und/oder trockenheitstoleranten, niedrigwüchsigen Samenunkräutern (z.B. Quendel-Sandkraut, Frühlings-Hungerblümchen) wird aufgrund des Stickstoffmangels im Boden gefördert. Unerwünschte Gräser wie Gewöhnliche Quecke, Weiche Trespe, Acker-Hühnerhirse und Borstenhirse-Arten profitieren ebenfalls von trockenheitsbedingten Vegetationslücken. Leguminosen können Luftstickstoff binden und sind daher vom Stickstoffgehalt des Bodens weitgehend unabhängig. Bei einer schlechten Stickstoffverfügbarkeit im Boden haben sie einen Wettbewerbsvorteil vor allem gegenüber Futtergräsern. Durch Erhöhung des Leguminosenanteils im Pflanzenbestand kann die Stickstoffernährung der Futtergräser verbessert werden, weil durch Abbau der stickstoffreichen Leguminosenwurzeln der mineralische Stickstoffgehalt im Boden größer wird (Hofer et al. 2016). Trockenheitsbedingte Ertrags- und Futterqualitätseinbußen werden dadurch abgepuffert. Trockenheitstolerante Leguminosen im Wirtschaftsgrünland sind Luzerne, Wiesen-Rotklee, Wiesen-Esparsette, Wiesen-Hornklee und Hopfenklee. Relativ trockenheitsempfindlich ist der Weißklee, insbesondere bei hoher Nutzungsintensität (Deléglise et al. 2015). Trockenheitstolerante Futtergräser sind Wiesen-Rispe, Wiesen-Knautgras, Rot-Schwingel, Schmalblatt-Rispe, Rohr-Schwingel, Glatthafer und Wiesen-Goldhafer. Ihre Förderung im Pflanzenbestand ist eine wichtige Klimawandelanpassungsstrategie.

Grundwasserbeeinflusste Böden (z.B. Gley, Augley, Auboden, Anmoor) können ungünstige Klimaverhältnisse (geringe jährliche Niederschlagsmenge, ungünstige Niederschlagsverteilung) kompensieren, wenn die Pflanzenwurzeln das Grundwasser erreichen oder ihren Wasserbedarf aus dem kapillar aufsteigenden Grundwasser decken. Je nach Bodenart variiert der kapillare Aufstieg des Grundwassers zwischen ca. 30 cm (sandreiche Böden) und 100 cm (schluffreiche Böden). Dürreperioden können in den Sommermonaten eine deutliche Grundwasserabsenkung verursachen. Insbesondere auf sandreichen Böden kann dies zu erheblichen Ertragsminderungen führen, wenn die Pflanzenwurzeln den Anschluss an das Grundwasser verlieren. Auf drainierten Flächen kann durch Verschließen der Drainagerohre oder durch Unterlassen der Erneuerung nicht mehr funktionstüchtiger Drainageeinrichtungen ein starkes Absinken der Grundwasserstände im Sommer verhindert werden.

Auf trockenheitsgefährdeten Standorten ist eine rasche Wasserinfiltration im Boden besonders wichtig. Das Wasseraufnahmevermögen und die Wasserleitfähigkeit von Böden sind maßgeblich von der Anzahl, Stabilität und Kontinuität der Grobporen im Boden abhängig. Vor allem tiefreichende, vertikal verlaufende Wurzel- und Regenwurmgänge erhöhen die Wasserinfiltration im Boden. Pfahlwurzelpflanzen (z.B. Wiesen-Löwenzahn, Wiesen-Bärenklau) bilden Grobporen mit einem Porenradius über 10 mm, die bis in eine Tiefe von mehr als 2 m reichen. Sie verbessern dadurch die Versickerung von Niederschlags- und Schneeschmelzwasser im Boden. Durch Bodenverdichtung wird die Anzahl der Grobporen im Boden stark vermindert und die Porenkontinuität wird unterbrochen. Die negativen Folgen sind eine verringerte Wasserinfiltration und Wasserleitfähigkeit des Bodens, Staunässe sowie bei Starkregen ein erhöhter Oberflächenabfluss in Hanglagen. Die Auffüllung der Wasservorräte im Boden bei der Schneeschmelze oder bei einem Niederschlagsereignis und der kapillare Aufstieg von Wasser im Boden werden beeinträchtigt. Die Austrocknung der obersten Bodenschichten wird dadurch begünstigt. Außerdem wird durch Bodenverdichtung das Längenwachstum der Wurzeln gehemmt und die Durchwurzelbarkeit des Bodens wird vermindert. Die Pflanzenverfügbarkeit des im Boden gespeicherten Wassers wird somit durch Bodenverdichtung stark eingeschränkt. Folglich sollte eine Bodenverdichtung soweit wie möglich vermieden werden. Die Förderung von Pfahlwurzelpflanzen und Regenwürmern sowie die Erhaltung oder Schaffung einer krümeligen Struktur im Oberboden sind wichtige Maßnahmen um Trockenschäden und Ertragseinbußen in Zukunft zu minimieren.

Die Pflanzenverfügbarkeit des Wassers hängt sehr wesentlich von der Durchwurzelung des Bodens ab. Je gleichmäßiger, intensiver und tieferreichender der Boden durchwurzelt ist, desto mehr Wasser können die Grünlandpflanzen aus dem Boden aufnehmen. Eine geringe Tiefendurchwurzelung ist vor allem auf trockenheitsgefährdeten Standorten ein Nachteil, weil die Wasservorräte in tieferen Bodenschichten und kapillar aufsteigendes Grundwasser für das Pflanzenwachstum nicht genutzt werden. Zu den wichtigsten Klimawandelanpassungsstrategien zählt daher die Verbesserung der Durchwurzelbarkeit des Bodens und die Steigerung der effektiven Durchwurzelungstiefe.

Die Pflanzenarten haben unterschiedliche Wurzelsysteme (Sobotik et al. 2020). Flachwurzler durchwurzeln die oberste Bodenschicht (0-10 cm) sehr intensiv. Sie nehmen Wasser schnell aus dem Oberboden auf. Flachwurzler können die Wasservorräte im Unterboden nicht nutzen und sind daher auf regelmäßige Niederschläge angewiesen. Tiefwurzler erreichen eine Wurzeltiefe über 50 cm. Sie decken ihren Wasserbedarf auch aus tieferen Bodenschichten und nutzen kapillar aufsteigendes Grundwasser. Daher überstehen Tiefwurzler Dürreperioden besser als Flachwurzler. Grünlandpflanzen mit einer besonders großen Wurzeltiefe (über 150 cm) sind Groß-Bibernelle, Wiesen-Bärenklau, Wiesen-Flockenblume, Wiesen-Löwenzahn, Wiesen-Witwenblume, Pastinak und Rohr-Schwingel (Kutschera und Lichtenegger 1982, 1992).

Artenreiche Magerwiesen haben eine deutlich höhere Wurzelmasse und eine stärkere Durchwurzelung des Unterbodens als vergleichbare artenärmere Fettwiesen (Abbildung 1). Die bessere Tiefendurchwurzelung macht sie resistenter gegenüber Trockenschäden. Generell wird durch Nutzungsintensivierung das Wurzelwachstum gehemmt, Wurzelmasse, Wurzellänge und Wurzeltiefe werden reduziert (Bohner und Herndl 2011). Die Trockenheitstoleranz von Pflanzen und Pflanzenbeständen wird dadurch vermindert. Vor allem eine intensive Weidenutzung führt zu einer starken Konzentration der Wurzelmasse auf die oberste Bodenschicht und zu einer schlechten Durchwurzelung des Unterbodens. Viele Übernutzungszeiger (z.B. Gewöhnliches Rispengras) und Bodenverdichtungszeiger (z.B. Einjahrs-Rispengras) sind Flachwurzler mit hoher Empfindlichkeit gegenüber Trockenheit. Wenn Flachwurzler im Pflanzenbestand dominieren, ist die Konkurrenz um Bodenwasser zwischen den Pflanzen wegen der intensiven Durchwurzelung der obersten Bodenschicht sehr hoch. Daher leiden Pflanzenbestände mit einem hohen Anteil an Gewöhnlichem Rispengras oder Einjahrs-Rispengras besonders schnell unter Trockenheit. Durch ein ausgewogenes Verhältnis von Flach- und Tiefwurzlern im Pflanzenbestand kann die Ertragssicherheit erhöht werden, weil dadurch die Wasservorräte im Boden von den Grünlandpflanzen infolge geringerer Wurzelkonkurrenz besser genutzt werden.

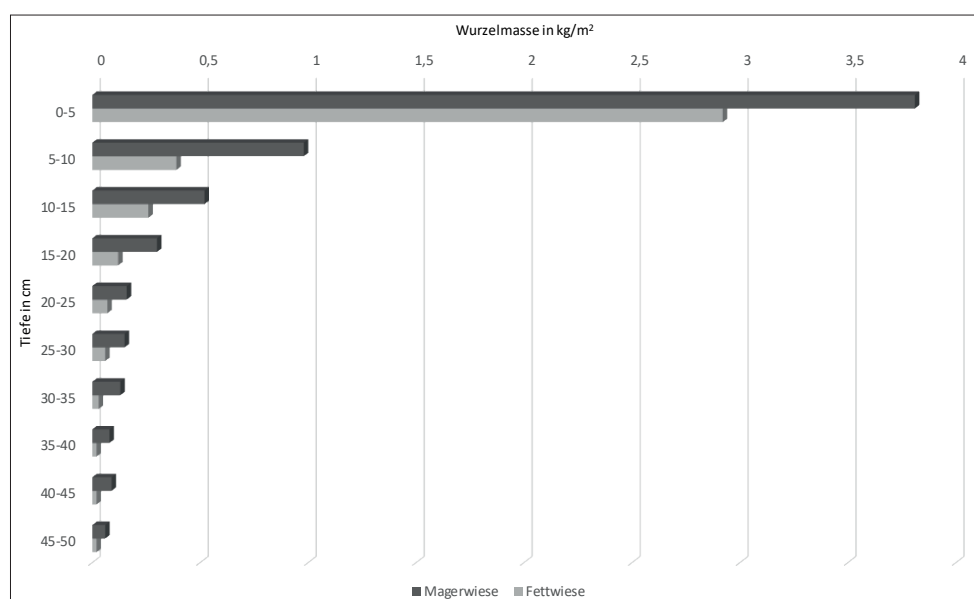


Abbildung 1: Durchwurzelungsvergleich zwischen einer einschnittigen, artenreichen Magerwiese und einer dreischnittigen, artenärmeren Fettwiese auf einem halbtrockenen Standort.

Mittels Nachsaat kann das Verhältnis von Flach- und Tiefwurzlern im Pflanzenbestand optimiert werden.

Auf Vielschnittwiesen (mehr als 4 Nutzungen pro Jahr) und Intensivweiden (Kurzrasenweide, Portionsweide) ist durch Verminderung der Nutzungsintensität eine Förderung des Längenwachstums der Wurzeln möglich. Wenn dadurch die Wurzeltiefe um 10 cm gesteigert wird, steht den Pflanzen aus dem Unterboden ca. 20 mm mehr Wasser zur Verfügung. Damit kann der Wasserbedarf der Grünlandvegetation von ca. 7 Tagen gedeckt werden.

Die Wasserspeicherkapazität im Boden kann insbesondere in sandreichen Böden durch Erhöhung des Humusgehaltes verbessert werden (Minasny und McBratney 2018). Allerdings ist der Effekt in humusreichen Dauergrünlandböden meist relativ gering, weil der Humusgehalt durch praxisübliche Bewirtschaftungsmaßnahmen nur sehr langsam und geringfügig erhöht werden kann (Bohner et al. 2016). Folglich ist Humusaufbau in typischen Dauergrünlandböden keine primäre Klimawandelanpassungsstrategie. In humusarmen Planieböden hingegen zählt der Humusaufbau zu den wichtigsten Bewirtschaftungsmaßnahmen.

Da eine Grünlandbewässerung mit einem erheblichen finanziellen Aufwand verbunden ist und die Ressource Wasser in Trockengebieten allmählich zu einem knappen Gut wird, ist die Grünlandbewässerung keine geeignete Klimawandelanpassungsstrategie im österreichischen Dauergrünland.

Mit Hilfe von arbuskulären Mykorrhizapilzen können Grünlandpflanzen Wasser und mineralische Nährelemente (insbesondere Phosphor und Stickstoff) besser aus dem Boden aufnehmen. Die dünnen Pilzhyphen (Durchmesser: 2-6 μm) können in Bodenhohlräume eindringen, die für Wurzelhaare (Durchmesser: 10-40 μm) nicht mehr zugänglich sind. Arbuskuläre Mykorrhizapilze erhöhen somit die Trockenheitstoleranz der Grünlandpflanzen (Augé 2001). Allerdings wird durch Bodenverdichtung und Bewirtschaftungsintensivierung der Mykorrhizierungsgrad der Pflanzenwurzeln stark reduziert (Bohner et al. 2004). Mykorrhizapilze können daher trockenheitsbedingte Ertrags- und Futterqualitätseinbußen nur bei extensiver Bewirtschaftung abpuffern.

Es gibt in Österreich nur wenige hochwertige Grünlandpflanzen, die anhaltende Trockenheit und eine hohe Nutzungsintensität tolerieren (z.B. Wiesen-Rispe, Wiesen-Knaulgras). Daher ist auf trockenheitsgefährdeten Standorten eine ständig intensive Nutzung nicht ratsam, weil intensiv nutzbare Grünlandpflanzen weitgehend fehlen. Im Intensivgrünland dominieren meist einige wenige raschwüchsige Arten mit relativ geringer Trockenheitstoleranz (z.B. Raigräser, Gewöhnliches Rispengras). Deshalb verursachen Dürreperioden im artenarmen, meist gräserdominierten Intensivgrünland besonders starke Ertragseinbußen. Artenreiche Pflanzenbestände mit einem ausgewogenen Verhältnis von Gräsern, Kräutern und Leguminosen (50-60 % Gräseranteil) hingegen können trockenheitsbedingte Ertragseinbußen besser abpuffern, die jährlichen Ertragsschwankungen sind in der Regel geringer (Vogel et al. 2012) und sie erholen sich rascher von Trockenschäden (Kreyling et al. 2017), weil trockenheitstolerante Arten im Pflanzenbestand oft bereits vorhanden sind. Je artenreicher ein Pflanzenbestand ist, umso größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass der trockenheitsbedingte Rückgang oder das Absterben von trockenheitsempfindlichen Arten durch eine gleichzeitige Zunahme des Deckungsgrades bereits vorhandener, trockenheitstoleranter Arten kompensiert wird. Auf Vielschnittwiesen und Intensivweiden kann daher durch Erhöhung der Pflanzenartenvielfalt (Verminderung der Nutzungsintensität, Nachsaat mit trockenheitstoleranten Arten) die Ertragssicherheit gesteigert werden.

Die Empfindlichkeit von Dauergrünland gegenüber Trockenheit hängt stark von der Nutzungsintensität ab (Vogel et al. 2012). Eine hohe Nutzungsintensität bewirkt während der Vegetationsperiode häufig (bei Vielschnittwiesen) oder langfristig (bei Kurzrasenweiden) eine niedrige Bestandeshöhe. Dies fördert die Bodenverdunstung und Austrocknung des Oberbodens, weil die Temperatur an der Bodenoberfläche mit abnehmender Vegetationshöhe ansteigt und die Windgeschwindigkeit in Bodennähe

zunimmt. Daher sind vor allem Kurzrasenweiden aber auch Vielschnittwiesen besonders stark von Ertragseinbußen und Trockenschäden betroffen. Nutzungsintensität, Schnittzeitpunkt, Schnitthöhe und Weideaufwuchshöhe sollten immer an den Standort und an die Witterung angepasst werden. Häufige und lang anhaltende Trockenheit schließen eine hohe Nutzungsintensität aus. Trockene und halbtrockene Standorte müssen wegen des niedrigeren Ertragspotenzials extensiver bewirtschaftet werden als vergleichbare frische oder feuchte Standorte. Bei ständig zu hoher Nutzungsintensität breiten sich unerwünschte Pflanzenarten wie beispielsweise Mittlerer Wegerich im Pflanzenbestand stark aus. Generell sollte während einer extremen Hitze- und Dürreperiode weder gemäht noch intensiv beweidet werden, weil es dann zum „Ausbrennen der Grasnarbe“ kommen kann. Auf trockenheitsgefährdeten Standorten sollte eine Schnitthöhe (Stoppellänge) von 8 cm nicht unterschritten werden. Dadurch werden Verdunstungsverluste minimiert und das Bodenleben wird gefördert. Durch eine daraus resultierende bessere Wasserversorgung und Stickstoffverfügbarkeit im Boden wird das Regenerationsvermögen der Pflanzen nach der Mahd (Wiederaustrieb neuer Blätter) deutlich erhöht. Auf Vielschnittwiesen kann durch eine Verminderung der jährlichen Schnitthäufigkeit die Bestandeshöhe vorübergehend erhöht werden. Auf Intensivweiden ist eine zeitweilig höhere Aufwuchshöhe durch eine integrierte Schnittnutzung (Mähweidenutzung) oder durch längere Weideruhephasen zwischen den Weidegängen möglich. Damit sinkt das Risiko für Trockenschäden und Ertragseinbußen, weil die Bodenverdunstung verringert wird. Generell ist in Trockengebieten die Kurzrasenweide aufgrund der ständig niedrigen Bestandeshöhe kein geeignetes Weidesystem; günstiger wäre ein Koppelweidesystem oder die Mähweidenutzung. Auf trockenheitsgefährdeten Standorten ist auch ein Mulchschnitt eine geeignete Maßnahme zur Verminderung der Bodenverdunstung und Förderung des Bodenlebens. Wind verstärkt die Bodenverdunstung. Auf windexponierten Grünlandflächen können Verdunstungsverluste durch Anpflanzung von Windschutzhecken verringert werden. Außerdem wird dadurch die Biodiversität in der Kulturlandschaft gesteigert. Lücken in der Grasnarbe fördern ebenfalls die Bodenverdunstung. Daher sollten Lücken durch Nachsaat mit kleebetonten Mischungen rasch geschlossen werden.

Literatur

Augé R.M. (2001) Water relations, drought and vesicular-arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Mycorrhiza* 11, 3-42.

Barber S.A. (1995) Soil nutrient bioavailability. 2nd edition. John Wiley & Sons, New York, 414 S.

Bohner A., Baumgarten, A., Kovacs G., Öhlinger R. (2004) Einfluss der Düngung auf den P-Kreislauf in Grünlandökosystemen. *Mitteilungen der Österreichischen Bodenkundlichen Gesellschaft*, Heft 70, 5-9.

Bohner A., Herndl M. (2011) Einfluss einer Nutzungsintensivierung auf Wurzelmasse und Wurzelverteilung im Grünlandboden. 1. Tagung der Österreichischen Gesellschaft für Wurzelforschung, LFZ Raumberg-Gumpenstein, 35-44.

Bohner A., Foldal C., Jandl R. (2016) Kohlenstoffspeicherung in Grünlandökosystemen – eine Fallstudie aus dem österreichischen Berggebiet. *Die Bodenkultur* 67, 225-238.

Chimani B. et al. (2016) ÖKS15-Klimaszenarien für Österreich. Daten, Methoden und Klimaanalyse. Projektendbericht, Wien.

Deléglise C., Meisser M., Mosimann E., Spiegelberger T., Signarbieux C., Jeangros B. und Buttler A. (2015) Drought-induced shifts in plant traits, yields and nutritive value under

realistic grazing and mowing managements in a mountain grassland. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 213, 94-104.

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

Jamieson N., Barraclough D., Unkovich M., Monaghan R. (1998) Soil N dynamics in a natural calcareous grassland under a changing climate. *Biology and Fertility of Soils*, 267-273.

Kreyling J. et al. (2017) Species richness effects on grassland recovery from drought depend on community productivity in a multisite experiment. *Ecology Letters* 20, 1405-1413.

Kutschera L., Lichtenegger E. (1982) *Wurzelatlas mitteleuropäischer Grünlandpflanzen. Band 1, Monocotyledonae.* Gustav Fischer Verlag, Stuttgart und New York, 516 S.

Kutschera L., Lichtenegger E. (1992) *Wurzelatlas mitteleuropäischer Grünlandpflanzen. Band 2, Pteridophyta und Dicotyledoneae.* Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, Jena und New York, 851 S.

Minasny B., McBratney A. (2018) Limited effect of organic matter on soil available water capacity. *European Journal of Soil Science* 69, 39-47.

Sobotik M., Eberwein R.K., Bodner G., Stangl R. und Loiskandl W. (2020) *Pflanzenwurzeln.* DLG Verlag, Frankfurt am Main, 314 S.

Vogel A., Scherer-Lorenzen M., Weigelt A. (2012) Grassland resistance and resilience after drought depends on management intensity and species richness. *Plos One* 7: e36992.

Lachgas und N₂-Emissionen intensiv bewirtschafteter Weiden in den australischen Subtropen

Johannes Friedl^{1*}, Katharina M. Keiblinger², Clemens Scheer³,
David W. Rowlings¹

Zusammenfassung

Niederschläge und Bewässerung können erhöhte Denitrifikationsverluste in der Form von Lachgas (N₂O) und Distickstoff (N₂) Emissionen von Weideböden zur Folge haben. Lachgas ist ein starkes Treibhausgas, während die gesamten N₂O und N₂ Emissionen einen Verlust von verfügbarem Stickstoff (N) im Boden darstellen. Trotz ihrer Bedeutung für die Stickstoff- und Treibhausgasbilanz von Agrarökosystemen gibt es nur sehr wenige *in-situ* Messungen von sowohl N₂O als auch N₂ Emissionen. Dieser Beitrag umfasst eine Serie von Feldstudien zu N₂O und N₂ Emissionen von Milchviehweiden in den australischen Subtropen. Im Besonderen wurde untersucht wie unterschiedliches Management bei Düngung und Bewässerung zur Verringerung von Denitrifikationsverlusten beitragen kann. Die gewonnenen Daten liefern die Grundlage für die Validierung von Simulationsmodellen, um Langzeitwirkungen landwirtschaftlicher Praxis auf Milchviehweiden auf klimaschädliche N₂O Emissionen abschätzen zu können.

Schlagwörter: Klimawandel, Denitrifikation, Benetzungs- und Trocknungszyklen, Boden-Gas Diffusivität, Abundanz funktioneller N-Gene

Summary

Rainfall and irrigation cause denitrification losses in the form of nitrous oxide (N₂O) and dinitrogen (N₂) emissions from pasture soils. Nitrous oxide is a potent greenhouse gas, while total N₂O and N₂ emissions represent a loss of available nitrogen (N) from the soil. *In situ* measurements of both N₂O and N₂ are rare, despite their importance to N budgets and the greenhouse gas balance of agroecosystems. This paper presents our research on N₂O and N₂ emissions from dairy pastures in the Australian subtropics. A series of field studies examined factors determining the temporal and spatial distribution and magnitude of denitrification rates. Furthermore, measures to reduce denitrification losses were investigated that include fertilisation and irrigation. The data obtained provide the basis for predictions using simulation models that examine the long-term effects of agricultural practices on dairy pastures.

Keywords: climate change, denitrification, wetting and drying, soil gas diffusivity, functional gene abundance

Einleitung

Niederschläge und Bewässerung erhöhen den Wassergehalt von Weideböden und verringern damit den Sauerstoffgehalt im Boden. Die Reduktion von verfügbarem Nitrat

¹ Centre for Agriculture and the Bioeconomy, Queensland University of Technology, Brisbane, Australia; ² University of Natural Resources and Life Sciences Vienna, Department of Forest and Soil Sciences, Institute of Soil Research, Vienna, Austria; ³ Institute for Meteorology and Climate Research (IMK-IFU) Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Garmisch-Partenkirchen, Germany

* Ansprechpartner: Dr. Johannes Friedl, email: johannes.friedl@qut.edu.au

kann unter diesen Bedingungen zu erhöhten Lachgas (N_2O) Emissionen führen. Lachgas ist ein starkes Treibhausgas und trägt zum Ozonabbau in der Stratosphäre bei. Die weitere Reduktion von N_2O zu Distickstoff (N_2) über den mikrobiellen Prozess der Denitrifikation wandelt reaktiven Stickstoff (N) in atmosphärischen N um und schließt somit den N-Kreislauf. Lachgas und N_2 Emissionen werden durch komplexe Rückkopplungen zwischen N- und Kohlenstoff- (C) Substratverfügbarkeit, Temperatur, den pH-Wert und Sauerstoff- (O_2) Gehalt des Bodens und der physiologischen Reaktion der mikrobiellen Bodengemeinschaft auf diese Faktoren bestimmt. Der Wassergehalt des Bodens spielt dabei eine wichtige Rolle, da er sowohl Substratdiffusion als auch die Diffusion von Gasen innerhalb des Bodens und damit die mikrobielle Produktion und Diffusion von N_2O und N_2 im Boden bestimmt. Überdies beeinflusst die Bodenfeuchte den mikrobiellen O_2 Verbrauch, der ebenfalls Denitrifikation begünstigen kann. Diese Faktoren beeinflussen das Ausmaß, den zeitlichen Verlauf, sowie das Verhältnis von $N_2O:N_2$ der gasförmigen Verluste aus der Denitrifikation. In weidebasierten Milchviehbetrieben in den subtropischen Regionen von Queensland und dem nördlichen New South Wales sind hohe Bewässerungsmengen und N Düngergaben erforderlich, um die Produktion aufrechtzuerhalten. Gesamtverluste von ausgebrachtem Dünger auf subtropischen Weiden können bis zu 40 % betragen, was mehr als 125 kg N ha^{-1} pro Jahr⁻¹ entspricht. Diese N-Verluste werden aufgrund der hohen Niederschläge in der Region, und aufgrund mangelnder Evidenz für N-Auswaschung, vor allem Denitrifikation zugeschrieben (Rowlings et al. 2016). Direkte Messungen von N_2O und N_2 Emissionen unter *in-situ* Bedingungen sind jedoch aufgrund der methodischen Schwierigkeiten selten und das Ausmaß von Denitrifikationsverlusten und deren zeitliches Auftreten in Verbindung mit Bewässerung, Niederschlag und N Düngung, stellen eine wesentliche Unbekannte der N Budgets dieser Agrarökosysteme dar.

Dieser Beitrag gibt einen Überblick über die Forschungstätigkeit zu N_2O und N_2 Emissionen im Rahmen des Projekts „More Profit for Nitrogen“, gefördert von Dairy Australia, auf einem kommerziellen Milchviehbetrieb in Casino, New South Wales (28.865°E, 152.874°S). Der Boden am Standort ist ein Tonboden (Vertisol, WRB) mit > 50% Tongehalt, 4.2% organischem C und 0.4% Gesamtstickstoffgehalt. Das Klima ist feucht-subtropisch, mit einer durchschnittlichen Jahrestemperatur von 20 °C. Die durchschnittliche Jahresniederschlagsmenge beträgt 1045 mm, jedoch ist die Schwankungsbreite groß und Niederschläge, die den monatlichen Durchschnitt um 400 mm übersteigen, sind durchaus üblich. Der durchschnittliche Viehbesatz liegt bei 5 Rindern ha^{-1} . Im Durchschnitt weiden 210 Rinder alle 14-21 Tage 12 Stunden lang auf einer Fläche von 1,2 ha^{-1} . Die Felder werden in der Regel in einem zwei- bis dreiwöchigen Zyklus von Anfang Mai bis Mitte November beweidet und gedüngt, wobei die Bewässerung nach der Düngung erfolgt. Die N-Düngergaben liegen zwischen 1-2 $kg N ha^{-1} Tag^{-1}$ und werden als Harnstoff ausgebracht, was einem durchschnittlichen Düngemiteleinsatz von 340 kg N ha^{-1} pro Jahr⁻¹ entspricht. Die im Sommer dominierende Kikuyu-Weide (*Pennisetum clandestinum*) wird in der Regel Ende April gemulcht und mit einjährigem Weidelgras (*Lolium perenne*) eingesät.

Räumliche und zeitliche Variabilität von N_2O Emissionen

Messungen der N_2O Emissionen über drei Jahre zeigten durchschnittliche N_2O Verluste von $9.3 \text{ kg } N_2O\text{-N } ha^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$, was 2% des aufgebrauchten N Düngers entsprach. Die N_2O -Emissionen reagierten nicht linear auf die zunehmende Nitratverfügbarkeit im Boden und die Gesamtniederschlagsmenge. Unmittelbar nach der Beweidung wurden höhere N_2O -Emissionen beobachtet, was wahrscheinlich auf die vermehrte Deposition von Urin und Dung, die erhöhte Bodenverdichtung und die geringe N-Aufnahme durch Pflanzen zurückzuführen ist. Die räumliche Verteilung der N_2O -Flüsse und des Nitratgehalts im Boden spiegelte die Auswirkungen der Beweidung und der N-Deposition in der Form von Exkrementen wider, wobei die N_2O -Flüsse in der Nähe von Weidegattern 11-mal höher waren als auf der Weide (De Rosa et al. 2020). Auf Wegen, rund um Tränken

und in schattigen Bereichen kann die hohe Konzentration von Rindern zu vermehrtem N Eintrag und damit zu deutlich höheren N_2O Emissionen führen. Mitchell et al. (2021) zeigte, dass N_2O Emissionen von diesen „N Hotspots“ 9-mal höher waren als von der Weide und dass 3% der Betriebsfläche für 28% des Treibhausgas Budgets verantwortlich sind. Diese Studien unterstreichen die Notwendigkeit, die räumliche N- Variabilität in Milchviehweidesystemen zu berücksichtigen. Die Integration räumlichen Managements ist jedoch schwierig, da in der gängigen Praxis Bereiche mit hoher N Deposition und ohne N Pflanzenaufnahme unvermeidbar sind und herkömmliche Strategien wie Nitrifikationsinhibitoren nicht greifen.

Emissionen von N_2 und N_2O nach intensivem Regen

Ziel dieser Studie war es, Denitrifikationsverluste mittels der ^{15}N gas Fluss Methode abzuschätzen und die Wirksamkeit des Nitrifikationsinhibitors 3,4-Dimethylpyrazolosphat (DMPP) zur Verringerung von N_2 - und N_2O -Emissionen nach starken Niederschlägen zu untersuchen. Emissionen wurden über drei Wochen nach der Ausbringung von ^{15}N -Harnstoff ($36,8 \text{ kg N ha}^{-1}$) mit und ohne DMPP gemessen. 10 Tage nach der Düngung wurde ein intensives Niederschlagsereignis simuliert, um gesättigte Bedingungen im Oberboden zu schaffen. Das Niederschlagsereignis führte zu einem geringen Anstieg von N_2O -Emissionen, während im Gegensatz dazu N_2 -Flüsse von über $5 \text{ kg N}_2\text{-N ha}^{-1} \text{ Tag}^{-1}$ gemessen wurden. Das Hauptprodukt der kumulativen Denitrifikationsverluste war, mit mehr als 95%, N_2 . Diese Resultate zeigen, dass N_2O unter gesättigten Bedingungen kein robuster Indikator für Denitrifikationsverluste ist, da der hohe Wassergehalt im Boden die vollständige Denitrifikation hin zu N_2 begünstigt. Gesamtverluste von mehr als $21 \text{ kg N}_2\text{-N ha}^{-1}$ über einen Zeitraum von 21 Tagen zeigen, dass intensiv bewirtschaftete Weiden eine bedeutende Quelle für N_2 -Emissionen darstellen. Das Ausmaß und die zeitliche Variabilität der N_2 -Verluste spiegeln sowohl die verringerte Gasdiffusionsfähigkeit des Bodens und den mikrobiellen Sauerstoffverbrauch wider. Der Einsatz von DMPP verringerte N_2 -Verluste um mehr als 70% hatte jedoch keine Auswirkungen auf die N_2O -Emissionen. Damit konnte in dieser Studie erstmals anhand feldbasierter Daten nachgewiesen werden, dass DMPP N_2 -Emissionen erheblich verringern kann. Die Reduktion von agronomisch bedeutsamen N_2 -Verlusten unterstreicht das Potenzial von DMPP, die Auswirkungen erhöhter Niederschlagsintensität auf die Denitrifikationsverluste abzuschwächen und dadurch die N-Nutzungseffizienz intensiv bewirtschafteter Weiden zu verbessern (Friedl et al. 2017). Diese Resultate sind konsistent mit Ergebnissen von Rowlings et al. (2016): Diese Studie zeigte, dass 40% (125 kg N ha^{-1}) des aufgebrauchten N Düngers in einem Jahr dauerhaft verloren gingen. Durch die Kombination des Nitrifikationsinhibitors DMPP mit reduzierten N Düngergaben konnten diese Verluste um über 80 kg N ha^{-1} reduziert werden, ohne die Biomasse oder den N-Ertrag negativ zu beeinflussen.

Effekte von Bewässerungsfrequenz auf N_2O und N_2 Emissionen

Die negative Korrelation zwischen Boden-Gas Diffusivität (DP/DO) und N_2O (Clough et al. 2020) deutet darauf hin, dass Maßnahmen, die die Belüftung des Bodens, also DP/DO, erhöhen, die Bildung von anaeroben Bereichen in Böden reduzieren und damit N_2O - und N_2 -Emissionen begrenzen können. Wir untersuchten daher die Auswirkungen erhöhter Bewässerungsfrequenz, d. h. häufigere und kleinere Bewässerungsereignisse im Vergleich zu großen und seltenen Ereignissen, auf die Höhe und das relative Verhältnis von N_2O und N_2 Emissionen. Die Versuchsanordnung bestand aus drei Bewässerungsvarianten: Die Bewässerungsmenge wurde über die Evapotranspirationsrate bestimmt und auf einmal (niedrige Frequenz – LF), oder aufgeteilt in zwei (mittlere Frequenz - MF) oder vier separate Bewässerungsereignisse (hohe Frequenz - HF) über 20 Tage aufgebracht. In einem ersten Versuch wurden N_2O Emissionen von gedüngten Parzellen über 9 Monate mit



Abbildung 1: Versuchsanordnung auf einem Milchviehbetrieb in Casino, Northern New South Wales, Australien, mit einer vollautomatisierten Bewässerungsanlage, pneumatischen Treibhausgas Messkammern, Bodenfeuchtesensoren und schwenkbaren Dächern.

einem vollautomatisierten Treibhausgas Monitoring System in hoher zeitlicher Auflösung gemessen (Abbildung 1). Die aufgebrachten Wassermengen zielten auf unterschiedliche Frequenz bei gleicher kumulativer Bewässerung unter Berücksichtigung der Niederschläge ab. Erhöhte Bewässerungsfrequenz (MF und HF) reduzierte N_2O Emissionen um 40% gegenüber LF, ohne negative Effekte auf Biomasse oder N-Ertrag. Trotz signifikanter Unterschiede bei den Verlusten stand ein Großteil dieser Varianz nicht in direktem Zusammenhang mit einzelnen Bewässerungsereignissen, sondern war auf einen „Langzeit Effekt“ zurückzuführen, der während nachfolgender intensiver Niederschlagsereignisse beobachtet wurde (Mumford et al. 2019).

In darauffolgenden Versuchen in der Weidelgras Saison (Winter) wurden daher Dächer auf den Versuchsfeldern installiert, um den Effekt der Bewässerung isoliert zu untersuchen. Kumulative N_2O Emissionen über einen Zeitraum von 60 Tagen unter konventioneller Bewässerung, also niedriger Bewässerungsfrequenz (LF), betragen $0.96 \pm 0.4 \text{ kg N-N}_2\text{O ha}^{-1}$ von N gedüngten Parzellen und $1.7 \pm 0.6 \text{ kg N-N}_2\text{O}$ von Parzellen mit simulierter Urindeposition. Erhöhte Bewässerungsfrequenz (MF und HF) reduzierte N_2O Emissionen um 60% auf den N gedüngten Parzellen und um 35% auf den Parzellen mit simulierter Urindeposition. Es ist jedoch anzumerken, dass dieser Effekt aufgrund der hohen Streuung nur bei einem P Wert von 0.1 signifikant war, was die Signifikanz der Resultate in Frage stellt und auf Effekte hindeutet, die den physikalischen Effekt der Boden Gas Diffusivität (DP/DO) in Abhängigkeit der Bewässerungsfrequenz überlagern.

Am Ende der Weidelgras Saison wurde ein weiterer Versuch durchgeführt, der den Effekt von niedriger (LF) und erhöhte Bewässerungsfrequenz (HF) auf Denitrifikationsverluste, also N_2 und N_2O von gedüngten Parzellen, untersuchte. Um die Auswirkungen von Langzeitfolgen zu überprüfen, wurde am Ende des Versuchs ein großes Niederschlagsereignis simuliert (100 mm). Über einen Zeitraum von 15 Tagen wurden unabhängig von der Bewässerungshäufigkeit im Durchschnitt $7.9 \pm 2.7 \text{ kg N}_2+\text{N}_2\text{O-N ha}^{-1}$ emittiert, wobei N_2O 25 % der Gesamtemissionen ausmachte. Wiederholte, kleine Bewässerungsmengen erzeugten die gleiche Menge an $N_2+\text{N}_2\text{O}$ -Verlusten wie ein einzelnes, großes Bewässerungsereignis. Das Niederschlagsereignis führte zu einem Anstieg der N_2O Emissionen, jedoch war die Zunahme bei hoher Bewässerungsfrequenz (HF) geringer als bei niedriger Bewässerungsfrequenz, wodurch sich das Verhältnis $N_2O/(N_2O+N_2)$ in Richtung N_2 verschob. Unsere Ergebnisse deuten darauf hin, dass die verringerte Gasdiffusion im Boden in erster Linie die N_2O - und N_2 -Emissionen nach starken Nieder-

schlägen oder hohen Bewässerungsmengen bestimmt. Mikrobieller O_2 -Verbrauch scheint jedoch der bestimmende Faktor für N_2O - und N_2 -Emissionen nach kleinen, wiederholten Bewässerungs- oder Niederschlagsereignissen zu sein, vor allem in Weideböden mit hohem N-Umsatz. Die Häufigkeit von funktionellen Marker Genen für den N-Kreislauf unterschied sich nicht zwischen den Bewässerungsvarianten, was darauf hindeutet, dass die N- und C-Verfügbarkeit und nicht das Vorkommen der funktionellen N Gene das Ausmaß und die $N_2O:N_2$ -Verteilung nach Regenfällen bestimmt.

Die Ergebnisse der Bewässerungsversuche, wie auch die Resultate von parallelen ^{15}N Studien, die den Verbleib von ^{15}N Dünger im Boden und in der Pflanze untersuchten, deuten darauf hin, dass eine erhöhte Bewässerungshäufigkeit Treibhausgasemissionen in der Form von N_2O , nicht aber das Gesamtausmaß der N_2O - und N_2 -Emissionen von intensiv bewirtschafteten Weiden, verringern kann. Im Gegensatz dazu ermöglicht die Reduktion von Denitrifikationsverlusten durch den Nitrifikationsinhibitor DMPP eine Verringerung der N-Düngermengen bei gleichbleibenden Weideerträgen. Dies kann den Preisaufschlag für DMPP (20%) ausgleichen und somit einen Anreiz bieten, N Austräge von intensiv bewirtschafteten Weiden mit schwerwiegenden agronomischen und ökologischen Folgen zu verringern.

Literatur

De Rosa D., Rowlings D.W., Fulkerson B., Scheer C., Friedl J., Labadz M., Grace P.R. (2020) Field-scale management and environmental drivers of N_2O emissions from pasture-based dairy systems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 117, 299-315.

Friedl J., Scheer C., Rowlings D.W., Mumford M.T., Grace P.R. (2017) The nitrification inhibitor DMPP (3,4-dimethylpyrazole phosphate) reduces N_2 emissions from intensively managed pastures in subtropical Australia. *Soil Biology and Biochemistry* 108, 55-64.

Mitchell E., De Rosa D., Grace P., Rowlings D. (2021) Herd concentration areas create greenhouse gas hotspots. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 121, 15-26.

Mumford M.T., Rowlings D.W., Scheer C., De Rosa D., Grace P.R. (2019) Effect of irrigation scheduling on nitrous oxide emissions in intensively managed pastures. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 272, 126-134.

Rowlings D.W., Scheer C., Liu S., Grace P.R. (2016) Annual nitrogen dynamics and urea fertilizer recoveries from a dairy pasture using ^{15}N ; effect of nitrification inhibitor DMPP and reduced application rates. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 216, 216-225.

Nachhaltige Nutztierhaltung: mehr als nur Treibhausgase

Stefan J. Hörtenhuber^{1*}, Martin Seiringer-Gaubinger¹, Wilhelm Knaus¹,
Verena Größbacher¹, Werner Zollitsch¹

Zusammenfassung

Tierhaltung ist mit negativen Umweltwirkungen wie Treibhausgasemissionen (THG), aber auch positiven Ökosystemleistungen und sozio-ökonomischen Leistungen verbunden. Sie verursacht etwa 8 % der österreichischen THG-Emissionen, die Sequestrierung durch Wälder kann einen Teil davon kompensieren. Für das Ziel eines klimaneutralen „Landsektors“ (Land- und Forstwirtschaft) bis 2035 sind noch große Anstrengungen nötig, eine gewisse Reduktion des Tierbestands erscheint nötig. Im EU-Vergleich weisen österreichische tierische Produkte etwa ein Viertel geringere CO₂-e auf. Die CO₂-Erwärmungsäquivalente nach der Methode GWP* zeigen, dass eine kontinuierliche leichte Abnahme der CH₄-Emissionen eine Umkehr des Temperaturanstiegs bewirken kann. Die heimische Tierhaltung erbringt viele positive Leistungen, insbesondere durch Dauergrünlandnutzung, u.a. betreffend Schutz von Böden, Biodiversität, Wasserqualität, Ernährungssicherung, Einkommen und Erhaltung von Infrastruktur in ländlichen Regionen. Die zukünftige Tierhaltung soll vermehrt Synergien von positiven Ökosystemleistungen mit reduzierten THG-Emissionen anstreben.

Schlagwörter: THG, CO₂-e, GWP*, Ökosystemleistungen

Summary

Livestock farming causes negative environmental impacts such as greenhouse gas (GHG) emissions, but also provides positive ecosystem services and socio-economic benefits. Livestock farming accounts for about 8 % of Austria's GHG emissions, sequestration by forests can only compensate for a part of this. For the goal of a climate-neutral land sector by 2035, great efforts are still needed and a certain reduction of livestock numbers seems necessary. In an EU-wide comparison, Austrian livestock production shows about 25% lower CO₂-e. The CO₂ warming equivalents according to the GWP* method show that a continuous slight decrease in CH₄ emissions can reverse the temperature increase. Austrian livestock production provides many positive services, especially through permanent grassland use, for example regarding soil protection, biodiversity and water quality, food security, income and maintenance of infrastructure in rural regions. Future livestock production should increasingly tackle synergies of positive ecosystem services with reduced GHG emissions.

Keywords: GHG, CO₂-e, GWP*, ecosystem services

Klimawandel und andere Nachhaltigkeitsaspekte

Klimawandelfolgen und die Begrenzung klimarelevanter Emissionen werden als eine der größten Herausforderungen für anthropogene und natürliche biologische Systeme gesehen (Steffen et al. 2015).

¹ Institut für Nutztierwissenschaften, Universität für Bodenkultur Wien, Gregor-Mendel-Straße 33, 1180 WIEN

* Ansprechpartner: Dr. Stefan J. Hörtenhuber, email: stefan.hoertenhuber@boku.ac.at

Daneben werden in verschiedenen Studien weitere Umweltaspekte häufig genannt: Biodiversität, Landnutzung, Schad- und Nährstoffemissionen (N und P) sowie Wassernutzung (Steffen et al. 2015, Raworth 2017, Rockström et al. 2021).

Raworth (2017) definierte mit der „Doughnut economy“ ein Konzept, gemäß dem sich eine lebenswerte Gesellschaft innerhalb sozialer und planetarer Grenzen entfaltet. Zu bereits adressierten ökologischen Punkten kommen soziale Aspekte wie Gleichberechtigung oder politische Partizipation, Einkommen und Wohlstand.

Bei einigen sozio-ökonomischen Kriterien wie Ernährungssicherung, Arbeitsplätze und Einkommen oder Gesundheit leistet die Nutztierhaltung weltweit einen wichtigen Beitrag: 40 % der globalen landwirtschaftlichen Wertschöpfung kommen von der Tierhaltung (Salmon et al. 2020). Mindestens 600 Millionen Kleinbauern in Ländern des globalen Südens sind direkt auf Lebensmittel, zusätzliche Einkünfte und weitere Ökosystemleistungen von ihren Tieren angewiesen; 34 % des weltweit konsumierten Eiweißes sind tierischer Herkunft, meist von vergleichsweise hoher Qualität (FAO 2020). Ökosystemleistungen mit weltweiter Bedeutung beinhalten u.a. den Erhalt des fruchtbaren, erosionsarmen Graslands mit wichtigen Funktionen wie Kohlenstoff (C)-Speicherung und Förderung von Biodiversität (Leroy et al. 2018, Ryschawy et al. 2017).

Andererseits tragen Nutztiere zur Überschreitung planetarer Grenzen bei, wobei Land(über)nutzung und Klimawirkungen besonders hervorstechen. Weltweit beansprucht die Tierhaltung etwa 80 % der landwirtschaftlichen Flächen, produziert darauf allerdings nur 20 % der Nahrungsenergie (Ritchie 2020, Wirsenius 2010). Hinsichtlich Klimarelevanz stehen Nutztiere und insbesondere Wiederkäuer sowohl innerhalb der Landwirtschaft als auch im Vergleich mit anderen Sektoren im Zentrum der Kritik. U.a. weisen Twine (2021) und Willett et al. (2019) darauf hin, dass eine drastische Änderung der Ernährungsgewohnheiten mit mehr pflanzlichen Lebensmitteln in den Ländern des globalen Nordens dringend erforderlich sei, um eine Lebensmittelversorgung innerhalb planetarer Belastungsgrenzen zu ermöglichen.

Zwar ist die globale Tierhaltung nicht der einzige, aber ein wesentlicher Verursacher anthropogener CH_4 -Emissionen: 32 % der Methanemissionen stammen aus der Tierhaltung, 35 % aus Öl- und Gasförderung sowie Kohlebergbau (bis zur Distribution der fossilen Energie), 20 % von Mülldeponien und 8 % aus Reisanbau. Die UNEP (2021) empfiehlt, dass ein Sechstel bis ein Siebtel der bis zum Jahr 2030 einzusparenden CH_4 -Emissionen in der Tierhaltung erbracht werden.

Wir wollen im Folgenden erörtern, wie hoch die Relevanz der österreichischen Tierhaltung betreffend negativer Klimawirkungen sowie positiver Ökosystemleistungen und sozio-ökonomischen Folgewirkungen ist.

Klimawirkungen der österreichischen Nutztierhaltung

Auch in Österreich ist die Tierhaltung durch CH_4 -Emissionen für 6 % der CO_2 -Äquivalente (CO_2 -e) verantwortlich (siehe Anderl et al. 2021; GWP_{100} für das Jahr 2019); Milchkühe weisen den größten Anteil auf. CH_4 -Emissionen aus anderen Sektoren tragen nur 2 % zu CO_2 -e bei. Über die Hälfte der nationalen N_2O -Emissionen stehen über Futterbau und Wirtschaftsdünger mit der Tierhaltung in enger Verbindung, diese machen 4 % der nationalen CO_2 -e (Anderl et al. 2021; GWP_{100} für das Jahr 2019) aus. In Summe stammen damit ca. 10 % der CO_2 -e aus dem Sektor Landwirtschaft, davon über 8 % aus der Tierhaltung, wobei Emissionen aus anderen Sektoren, beispielsweise Vorleistungen der Industrie (u.a. zur Herstellung von Handelsdünger), aus Transporten und Feldarbeit nicht berücksichtigt sind.

Seit 1990 konnten nicht nur die Emissionen gesenkt, sondern auch die Produktivität erhöht werden, wodurch die CO_2 -e je Einheit bewirtschafteter Fläche und je Produkteinheit für fast alle Erzeugnisse gesunken sind. Eine Ausnahme bildet Rindfleisch, dessen Erzeugung durch den Ausbau der Mutterkuhhaltung etwas „extensiver“ aber „emissionsintensiver“

wurde. Je kg Milch konnten die CO₂-e von 1990 bis 2019 um ganze 32 % gesenkt werden (siehe Anderl et al. 2021, Statistik Austria 2021 ab).

Das Ziel der Klimaneutralität, wie es unter anderem mit der „LULUCF“-Verordnung der EU (2018/841) bis zum Jahr 2035 für den „Landsektor“ (Land- und Forstwirtschaft, Landnutzung und Landnutzungsänderungen) vorgesehen ist, scheint schwierig zu erreichen. Neben der CO₂-Sequestrierung in Wäldern (Anderl et al. 2021) sind Anstrengungen zur Emissionsminderung in der Tierhaltung, u.a. durch eine Verminderung der Tierbestände, nötig.

Einfacher wäre unter österreichischen Bedingungen die „Klimaneutralität“ zu erreichen und obendrein wäre es eine brauchbarere Bewertung hinsichtlich z.B. Klimazielen des Pariser Abkommens, wenn nicht die CO₂-e des GWP₁₀₀ bewertet würden, sondern die „CO₂-Erwärmungsäquivalente“ (CO₂-we) nach der Methode GWP* (Allen et al. 2018, Smith et al. 2021). Während das GWP₁₀₀ die Wirkung einer Emission auf den Strahlungsantrieb (in W je m²) misst, berücksichtigt das GWP* auch die Änderungen aktueller CH₄-Emissionen im Verhältnis zum Abbau der historischen Emissionen und bezieht sich direkt auf den durch die Emission verursachten Temperaturanstieg. Anders als CO₂ und N₂O reichert sich CH₄ bei gleichbleibender Emissionsintensität nicht in der Atmosphäre an, weil es nach durchschnittlich 12 Jahren wieder abgebaut wird. Bei einem kontinuierlichen leichten Rückgang des kurzlebigen THGs CH₄ ist sein Beitrag zur Temperaturerwärmung null bzw. „neutral“. Eine stärkere CH₄-Reduktion, wie sie über viele Jahre für Österreich sichtbar ist, kompensiert auch Teile des Temperaturanstiegs, der durch N₂O- und CO₂-Emissionen verursacht wird.

Die GWP*-Methode zeigt jedoch auch, dass ein Anstieg der CH₄-Emissionen eine hohe Klimawirkung aufweist. Für „neues“, zusätzlich emittiertes CH₄ macht der Umrechnungsfaktor des GWP* (die CO₂-we) in den ersten 20 Jahren etwa das Vierfache des GWP₁₀₀-Faktors (CO₂-e) aus. Daraus ergibt sich eine hohe Relevanz der CH₄-Emissionen, sowohl für negative Folgen als auch mögliche Minderungsoptionen. Unabhängig davon, ob die Klimawirkungen mit dem GWP₁₀₀ oder dem GWP* bewertet werden: ein Rückgang des CH₄ aus der Tierhaltung ist erforderlich, um Klimaziele wie sie z.B. im Pariser Klimaabkommen formuliert wurden, zu realisieren.

Erreicht werden können die reduzierten CH₄- und N₂O-Emissionen aus der Tierhaltung mit Maßnahmen, wie sie in *Tabelle 1* beschrieben werden. Manche der Minderungsoptionen gehen auch mit einer verbesserten Anpassung gegenüber Klimawandelfolgen einher, z.B. N-Fixierung durch Leguminosen, die den Humusgehalt und damit die Wasserspeicherkapazität der Böden erhöht.

Im internationalen Vergleich liegen die CO₂-e österreichischer tierischer Produkte relativ niedrig. Modifizierte Ergebnisse nach Leip et al. (2010) mit aktualisierten Umrechnungsfaktoren für CH₄ und N₂O zeigen, dass österreichische Erzeugnisse trotz großer Variabilität und Unsicherheiten numerisch deutlich geringere Emissionen als EU-Durchschnittswerte aufweisen; dies gilt bspw. für Milch (-24 %) ähnlich wie für Rindfleisch (-25 %) oder Schweinefleisch (-23 %). Viele der in *Tabelle 1* adressierten Minderungsoptionen sind in der heimischen Tierhaltung zumindest teilweise bereits umgesetzt, wie der Verzicht auf kritische Sojakomponenten bei der Milch- und der Eierzeugung. Trotzdem sollten weitere Emissionsreduktionen – möglichst gleichzeitig mit der Realisierung weiterer positiver Leistungen – umgesetzt werden.

In einem StartClim-Projekt wurden Faktoren zur Verbesserung der Widerstandsfähigkeit von Rinder- und Schweinebetrieben gegenüber Klimawandelfolgen definiert (*Abbildung 1*; Hörtenhuber und Zollitsch 2014). Der Versorgung mit Futter und Wasser kommt neben einem Hitzestress-vermindernden Haltungssystem eine wichtige Rolle zu. Synergien zu reduzierten THG-Emissionen, z.B. durch die Anpassung von Rationen zur Reduktion der CH₄-Verluste und den Anbau spezifischer Kulturen, die u.a. aufgrund eines reduzierten Düngereinsatzes mit geringen Lachgasemissionen verbunden sind, sind möglichst auszunutzen.

Maßnahme	Quellen
Alle Nutztierarten: Ersatz kritischer Futtermittel, v.a. von Soja(produkten) aus Südamerika mit Emissionen durch Landnutzungsänderungen	Bellarby et al. (2012); Hörtenhuber et al. (2010, 2011); Sasu-Boakye et al. (2014)
Alle Nutztierarten: Kofermentation des Wirtschaftsdüngers in einer Biogasanlage – Reduktion CH ₄ -Emissionen und Ersatz fossiler Energie	Hörtenhuber et al. (2010); Oehmichen et al. (2021)
Alle Nutztierarten: Emissionsmindernde Stallhaltungssysteme (z.B. Einstreusysteme mit regelmäßiger Entmistung, evtl. Kompoststall) und Wirtschaftsdüngerbehandlung wie Separierung, Ansäuerung, evtl. Kompostierung	Emmerling et al. (2020); Fillingham et al. (2017); Kupper et al. (2020)
Alle Nutztierarten: Reduktion der N-Saldi (Hoftorbilanzen), N-Fixierung durch Leguminosen statt synthetischer N-Handelsdünger	u.a. Hörtenhuber et al. (2013) für Milchrinder
Wiederkäuer: pflanzliche und synthetische Futtermittelzusatzstoffe zur Verminderung der enterogenen CH ₄ -Bildung	Abecia et al. (2018); Ballard et al. (2011); Belanche et al. (2020); Van Wesemael et al. (2019)
Rinder: Erhöhung Weideanteil (Wirtschaftsdüngerlagerung entfällt, Verminderung NH ₃ -Emissionen; verbesserte Futterqualität und damit Verminderung enterogener CH ₄ -Bildung, Leistungsanstieg)	Hörtenhuber et al. (2010); Steinwidder et al. (2018)
Rinder: Erhöhung Grundfutterqualität mit CH ₄ -Reduktion aus enterogener Fermentation, Produktivitätsanstieg	Beauchemin et al. (2011); Hörtenhuber et al. (2010); Knapp et al. (2014)
Milchkühe: Erhöhung Lebens- bzw. Lebenstagsleistung (Verdünnung THGe aus Aufzucht und durch Erhaltungsbedarf bedingt)	Hörtenhuber et al. (2010)

Tabelle 1: Relevante Maßnahmen der Treibhausgas-minderung für die österreichische Nutztierhaltung.

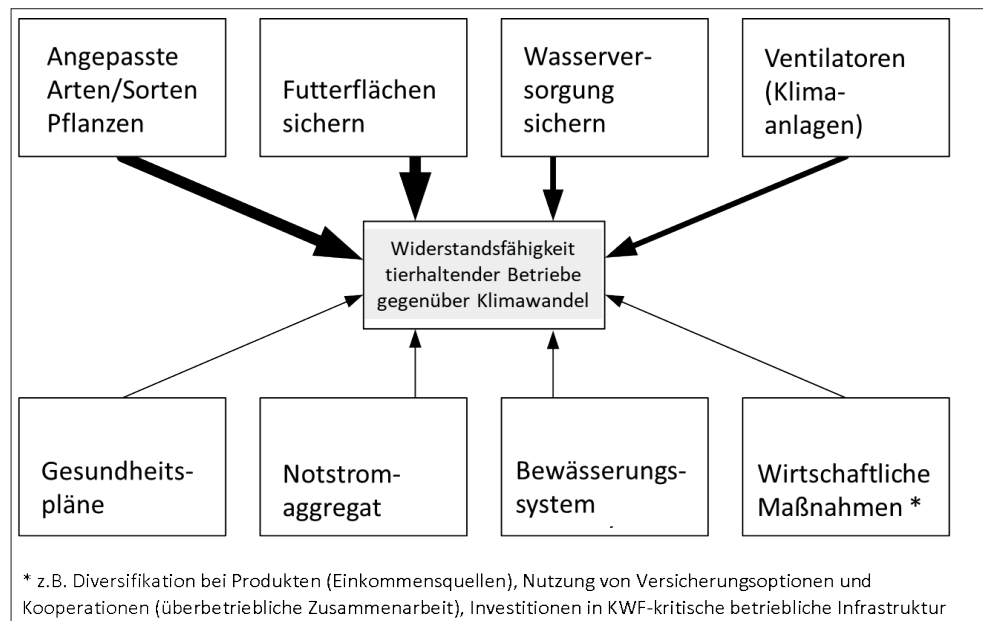


Abbildung 1: Resilienzfördernde Maßnahmen gegenüber Klimawandelfolgen (KWF) für Rinder- und Schweinebetriebe.

Ökosystemleistungen und sozio-ökonomische Wirkungen der österreichischen Tierhaltung

Extensive und semi-intensive Wiederkäuer-Produktionssysteme in Österreich erbringen mit der Nutzung von Dauergrünland eine Reihe von Ökosystemleistungen. Bewirtschaftetes Dauergrünland ist durch den dauerhaften Bewuchs erosionsstabiler als Ackerkulturen (Zessner et al. 2016), es schützt damit Böden und vermindert auch Lawinenabgänge (Tasser et al. 2003). Ebenso halten österreichische Dauergrünlandböden deutlich mehr Kohlenstoff (C) als Ackerböden (Gerzabek et al. 2003, Strebl et al. 2002, Anderl et al. 2021): Je Hektar sind in den oberen 30 cm des Bodens bei Dauergrünland durchschnittlich 70 t C und bei Ackerland 50 t C gespeichert. Durchschnittliches Dauer-

grünland bindet über den gesamten Bodenhorizont (C in Boden und Vegetation im Mittel der Aufwuchsperiode) nach eigenen Berechnungen auf Basis von Daten in Houghton und Hackler (2001) knapp 200 t C pro ha und ist damit vergleichbar mit durchschnittlichem Wald in unseren Breiten.

Tierhaltung ist bei Nutzung von Dauergrünland auch für hohe Trinkwasserqualitäten durch bspw. geringen Austrag von Nitrat vorteilhaft. Nach Eder et al. (2015) werden lediglich 3 % des auf Dauergrünland ausgebrachten N in Grund- und Oberflächengewässer ausgewaschen, während es bei Ackerland 28 % sind.

Die kleinstrukturierten landwirtschaftlichen Flächen Österreichs weisen, u.a. durch heimisches Dauergrünland, hohes Potenzial für einen Erholungswert und für Biodiversität auf (Schirpke et al. 2019, Stotten 2021). Besonders viele alpine und subalpine Flächen sind als „high nature value farmland“ (HNVF; „Biodiversitätsflächen“) ausgewiesen. HNVF-Flächen sind naturnahe landwirtschaftliche Flächen, d.h. Flächen außer Nutzung wie Ackerbrachen, oder Streuwiesen, Hutweiden, Almflächen, Bergmäher sowie ein- oder extensive zweimähdige Wiesen und Flächen mit Landschaftselementen. Neben extensiv genutzten Dauergrünlandflächen tragen auch extensiv bewirtschaftete Ackerflächen, z.B. extensiv genutzte Luzerne- und Feldfutterflächen, zu einem hohen Biodiversitätsgrad bei. Im Jahr 2018 machten HNVF-Flächen bei einer Invekos-Datenabfrage 34 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche aus, nach Holzer et al. (2019) konzentriert sich ein hohes Biodiversitätsvorkommen, gemessen an Heuschrecken und Tagfaltern, allerdings nur auf je ca. 5 % der Acker- und Grünlandfläche. Eine wichtige Funktion der Biodiversität für die Landwirtschaft ist die Bestäubung durch Insekten, z.B. Wildbienen, Hummeln oder Schwebfliegen. Studien zeigen bei einer Reihe landwirtschaftlicher Kulturen, u.a. bei Soja- und Ackerbohne oder Raps einen Rückgang der Erträge und der Ertragsstabilität, wenn diese Bestäuber nicht mehr vorhanden sind (Klein et al. 2007, Palmer et al. 2009).

Im Gegensatz zur intensiven Rindermast (maisbasierte Stier- und Kalbinnenmast) und der Mast von Schweinen oder Geflügel weisen Dauergrünland-basierte Produktionssysteme wie Jungrinder-, Kalbinnen- und Ochsenmast zwar einen hohen gesamten Flächenbedarf, aber einen geringen Ackerflächenbedarf je Produkteinheit und damit eine geringe Lebensmittelkonkurrenz bzw. eine hohe Lebensmittelkonversionseffizienz (LKE) auf. Während nach Ertl et al. (2016) die Erzeugung von Geflügel-, Schweine- und Stierfleisch im österreichischen Durchschnitt deutlich mehr humanernährungstaugliches Eiweiß verbraucht als in den Produkten enthalten ist, bilanzieren v.a. Milchrinder positiv in Hinblick auf die Bereitstellung von Eiweiß für die menschliche Ernährung.

Durch die Tierhaltung werden in peripheren Gebieten, beispielsweise in Kombination mit (Agro-) Tourismus und anderen Aktivitäten, Arbeitsplätze erhalten und die Bevölkerungsdichte, die Infrastruktur und kommunale Aktivitäten aufrechterhalten (Stotten 2021). Im internationalen Vergleich wird in Österreich mit einem Anteil von der tierischen Produktion von 47 % der agrarischen Wertschöpfung ein relativ hoher Wert erzielt (Statistik Austria 2021c).

Schlussfolgerungen

Trotz des verhältnismäßig starken Beitrags der Nutztierhaltung zu landwirtschaftlichen THG-Emissionen ist diese ein wichtiger Bestandteil der heimischen Landwirtschaft. Neben den Umweltwirkungen ist Tierhaltung mit vielen positiven Ökosystemleistungen bzw. sozio-ökonomischen Leistungen verbunden. Insofern erscheint ihre Erhaltung und Weiterentwicklung wichtig. Letztere soll weitere Emissionsreduktionen beinhalten, um die angepeilten Klimaziele zu erreichen und ihren Beitrag zu einem möglichst klimaneutralen „Landsektor“ zu leisten. Insbesondere sind solche Minderungsmaßnahmen anzustreben, die Synergien zu Ökosystemleistungen und sozio-ökonomischen Leistungen sowie Anpassungen an Klimawandelfolgen ermöglichen.

Literatur

- Abecia L., Martínez-Fernandez G., Waddams K., Martín-García A.I., Pinloche E., Creevey C.J., Denman S.E., Newbold C.J., Yáñez-Ruiz D.R. (2018) Analysis of the Rumen Microbiome and Metabolome to Study the Effect of an Antimethanogenic Treatment Applied in Early Life of Kid Goats. *Frontiers in Microbiology*, 9. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.02227>
- Allen M.R., Shine K.P., Fuglestedt J.S., Millar R.J., Cain M., Frame D.J., Macey A.H. (2018) A solution to the misrepresentations of CO₂-equivalent emissions of short-lived climate pollutants under ambitious mitigation. *Npj Climate and Atmospheric Science*, 1(1), 16. <https://doi.org/10.1038/s41612-018-0026-8>
- Ballard V., Aubert T., Tristant D., Schmidely P. (2011) Effects of plants extracts on methane production and milk yield for dairy cows. 18, 141.
- Beauchemin K.A., Janzen H.H., Little S.M., McAllister T. A., McGinn S.M. (2011) Mitigation of greenhouse gas emissions from beef production in western Canada – Evaluation using farm-based life cycle assessment. *Animal Feed Science and Technology*, 166–167, 663–677. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2011.04.047>
- Belanche A., Newbold C., Morgavi D., Bach A., Zweifel B., Yáñez-Ruiz D. (2020) A Meta-analysis Describing the Effects of the Essential oils Blend Agolin Ruminant on Performance, Rumen Fermentation and Methane Emissions in Dairy Cows. *Animals*, 10(4), 620. <https://doi.org/10.3390/ani10040620>
- Bellarby J., Tirado R., Leip A., Weiss F., Lesschen J.P., Smith P. (2013) Livestock greenhouse gas emissions and mitigation potential in Europe. *Global Change Biology*, 19(1), 3–18. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2012.02786.x>
- Eder A., Blöschl G., Feichtinger F., Herndl M., Klammler G., Hösch J., Erhart E., Strauss P. (2015) Indirect nitrogen losses of managed soils contributing to greenhouse emissions of agricultural areas in Austria: results from lysimeter studies. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 101(3), 351–364. <https://doi.org/10.1007/s10705-015-9682-9>
- Emmerling C., Krein A., Junk J. (2020) Meta-Analysis of Strategies to Reduce NH₃ Emissions from Slurries in European Agriculture and Consequences for Greenhouse Gas Emissions. *Agronomy*, 10(11), 1633. <https://doi.org/10.3390/agronomy10111633>
- Ertl P., Steinwidder A., Schönauer M., Krimberger K., Knaus W., Zollitsch W. (2016) Net food production of different livestock: A national analysis for Austria including relative occupation of different land categories / Netto-Lebensmittelproduktion der Nutztierhaltung: Eine nationale Analyse für Österreich inklusive relativer Flächenbeanspruchung. *Die Bodenkultur: Journal of Land Management, Food and Environment*, 67(2), 91–103. <https://doi.org/https://doi.org/10.1515/boku-2016-0009>
- FAO (Food and Agriculture Organisation of the United Nations). (2020) Nutrition and livestock. FAO. <https://doi.org/10.4060/ca7348en>
- Fillingham M.A., VanderZaag A.C., Burt S., Baldé H., Ngwabie N.M., Smith W., Hakami A., Wagner-Riddle C., Bittman S., MacDonald D. (2017) Greenhouse gas and ammonia

emissions from production of compost bedding on a dairy farm. *Waste Management*, 70, 45–52. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.09.013>

Gerzabek M.H., Strebl F., Tulipan M., Schwarz S. (2005) Quantification of organic carbon pools for Austria's agricultural soils using a soil information system. *Canadian Journal of Soil Science*, 85(Special Issue), 491–498. <https://doi.org/10.4141/S04-083>

Holzer T., Zuna-Kratky T., Bieringer G. (2019) Bewertung der Wirkung relevanter LE-Maßnahmen auf Heuschrecken und Tagfalter als Indikatorarten für Biodiversität (p. 58). <https://info.bmlrt.gv.at/dam/jcr:e50d0c0e-8dd2-4a63-8af2-61102051f107/Studie%202:%20Evaluierung%20Wirkung%20C3%96PUL-Ma%C3%9Fnahmen%20Heuschrecken%20und%20Tagfalter.pdf>

Hörtenhuber S.J., Lindenthal T., Zollitsch W. (2011) Reduction of greenhouse gas emissions from feed supply chains by utilizing regionally produced protein sources: the case of Austrian dairy production. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 91(6), 1118–1127. <https://doi.org/10.1002/jsfa.4293>

Hörtenhuber S., Lindenthal T., Amon B., Markut T., Kirner L., Zollitsch W. (2010) Greenhouse gas emissions from selected Austrian dairy production systems - model calculations considering the effects of land use change. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 25(4), 316–329. <https://doi.org/10.1017/S1742170510000025>

Hörtenhuber S., Zollitsch W. (2014) Entwicklung einer Bewertungsmethode für die Effekte des Klimawandels auf Produktion und Tierwohl sowie die Anpassungsfähigkeit der Nutztierhaltung, Endbericht von StartClim 2014.B [Endbericht von StartClim]. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Bundesministerium für Wissenschaft und Forschung, Österreichische Bundesforste AG, Land Oberösterreich. Auftragnehmer: Universität für Bodenkultur, Institut für Nutztierwissenschaften., Wien.

Hörtenhuber S., Kirner L., Neumayr C., Quendler E., Strauss A., Drapela T., Zollitsch W. (2013) Integrative Bewertung von Merkmalen der ökologischen, ökonomischen und sozial-ethischen Nachhaltigkeit landwirtschaftlicher Produktionssysteme am Beispiel von Milchproduktionssystemen (p. 232). Universität für Bodenkultur - Department für Nachhaltige Agrarsysteme. https://dafne.at/content/report_release/750fba6e-e7b1-4c7f-9c53-61d1459fad26_0.pdf

Houghton R.A., Hackler J.L. (2001) Carbon Flux to the Atmosphere from Land-Use Changes: 1850 to 1990. Carbon Dioxide Information Analysis Center, U.S. Department of Energy, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, U.S.A.

Klein A.-M., Vaissière B.E., Cane J.H., Steffan-Dewenter I., Cunningham S.A., Kremen C., Tscharntke T. (2007) Importance of pollinators in changing landscapes for world crops. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 274(1608), 303–313. <https://doi.org/10.1098/rspb.2006.3721>

Knapp J.R., Laur G.L., Vadas P.A., Weiss W.P., Tricarico J.M. (2014) Invited review: Enteric methane in dairy cattle production: Quantifying the opportunities and impact of

reducing emissions. *Journal of Dairy Science*, 97(6), 3231–3261. <https://doi.org/10.3168/jds.2013-7234>

Kupper T., Häni C., Neftel A., Kincaid C., Bühler M., Amon B., VanderZaag A. (2020) Ammonia and greenhouse gas emissions from slurry storage - A review. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 300, 106963. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.106963>

Leip A., Weiss F., Wassenaar T., Perez I., Fellmann T., Loudjani P., Tubiello F., Grandgirard D., Monni S., Biala K. (2010) Evaluation of the livestock sector's contribution to the EU greenhouse gas emissions (GGELS). European Commission, Joint Research Centre. https://agritrop.cirad.fr/558780/1/document_558780.pdf

Leroy G., Hoffmann I., From T., Hiemstra S.J., Gandini G. (2018) Perception of livestock ecosystem services in grazing areas. *Animal*, 12(12), 2627–2638. <https://doi.org/10.1017/S1751731118001027>

Oehmichen K., Majer S., Thrän D. (2021) Biomethane from Manure, Agricultural Residues and Biowaste-GHG Mitigation Potential from Residue-Based Biomethane in the European Transport Sector. *Sustainability*, 13(24), 14007. <https://doi.org/10.3390/su132414007>

Palmer R.G., Perez P.T., Ortiz-Perez E., Maalouf F., Suso M.J. (2009) The role of crop-pollinator relationships in breeding for pollinator-friendly legumes: from a breeding perspective. *Euphytica*, 170(1–2), 35–52. <https://doi.org/10.1007/s10681-009-9953-0>

Raworth K. (2017) A Doughnut for the Anthropocene: humanity's compass in the 21st century. *The Lancet Planetary Health*, 1(2), e48–e49. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(17\)30028-1](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(17)30028-1)

Ritchie H. (2020) Our World in Data - How much of the world's land would we need in order to feed the global population with the average diet of a given country? <https://ourworldindata.org/agricultural-land-by-global-diets>

Rockström J., Gupta J., Lenton T.M., Qin D., Lade S.J., Abrams J.F., Jacobson L., Rocha J.C., Zimm C., Bai X., Bala G., Bringezu S., Broadgate W., Bunn S.E., DeClerck F., Ebi K.L., Gong P., Gordon C., Kanie N., ... Winkelmann R. (2021) Identifying a Safe and Just Corridor for People and the Planet. *Earth's Future*, 9(4). <https://doi.org/10.1029/2020EF001866>

Ryschawy J., Disenhaus C., Bertrand S., Allaire G., Aznar O., Plantureux S., Josien E., Guinot C., Lasseur J., Perrot C., Tchakerian E., Aubert C., Tichit M. (2017) Assessing multiple goods and services derived from livestock farming on a nation-wide gradient. *Animal*, 11(10), 1861–1872. <https://doi.org/10.1017/S1751731117000829>

Salmon G.R., MacLeod M., Claxton J.R., Pica Ciamarra U., Robinson T., Duncan A., Peters A.R. (2020) Exploring the landscape of livestock 'Facts.' *Global Food Security*, 25, 100329. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2019.100329>

Sasu-Boakye Y., Cederberg C., Wirsenius S. (2014) Localising livestock protein feed production and the impact on land use and greenhouse gas emissions. *Animal*, 8(8), 1339–1348. <https://doi.org/10.1017/S1751731114001293>

Smith M.A., Cain M., Allen M.R. (2021) Further improvement of warming-equivalent emissions calculation. *Npj Climate and Atmospheric Science*, 4(1), 19. <https://doi.org/10.1038/s41612-021-00169-8>

Statistik Austria. (2021a) Milch. Kuhmilcherzeugung und -verwendung 2020. https://www.statistik.at/web_de/statistiken/wirtschaft/land_und_forstwirtschaft/viehbestand_tierische_erzeugung/milch/index.html

Statistik Austria. (2021b) Versorgungsbilanz für Fleisch nach Arten 2020 - Schlachtgewicht in Tonnen (Supply balance for meat by livestock species 2020 - Slaughter weight in tonnes). https://www.statistik.at/wcm/idc/idcplg?IdcService=GET_PDF_FILE&RevisionSelectionMethod=LatestReleased&dDocName=022374

Statistik Austria. (2021c) Landwirtschaftliche Gesamtrechnung. https://www.statistik.at/web_de/statistiken/wirtschaft/land_und_forstwirtschaft/gesamtrechnung/landwirtschaftliche_gesamtrechnung/index.html

Steffen W., Richardson K., Rockstrom J., Cornell S.E., Fetzer I., Bennett E.M., Biggs R., Carpenter S.R., de Vries W., de Wit C.A., Folke C., Gerten D., Heinke J., Mace G.M., Persson L.M., Ramanathan V., Reyers B., Sorlin S. (2015) Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science*, 347(6223), 1259855–1259855. <https://doi.org/10.1126/science.1259855>

Steinwider A., Starz W., Rohrer H., Husler J., Pfister R. (2018) Milchflächenleistung von Bio-Milchkühen bei Vollweide- oder Silagefütterung im Berggebiet Österreichs. *Züchtungskunde*, 90(3), 218–239.

Stotten R. (2021) The role of farm diversification and peasant habitus for farm resilience in mountain areas: the case of the Ötztal valley, Austria. *International Journal of Social Economics*, 48(7), 947–964. <https://doi.org/10.1108/IJSE-12-2019-0756>

Strebl F., Gebetsroither E., Orthofer R. (2002) Greenhouse gas emissions from agricultural soils in Austria (p. 69). ARC Seibersdorf Research GmbH. https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:34077871

Tasser E., Mader M., Tappeiner U. (2003) Effects of land use in alpine grasslands on the probability of landslides. *Basic and Applied Ecology*, 4(3), 271–280. <https://doi.org/10.1078/1439-1791-00153>

Twine R. (2021) Emissions from Animal Agriculture-16.5% Is the New Minimum Figure. *Sustainability*, 13(11), 6276. <https://doi.org/10.3390/su13116276>

Anderl et al. (Umweltbundesamt; 2021) Austria's National Inventory Report 2021 (Band 0761; p. 807). Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/rep0761.pdf>

United Nations Environment Programme and Climate and Clean Air Coalition. (UNEP; 2021) Global Methane Assessment: Benefits and Costs of Mitigating Methane Emissions (p. 170). <https://www.unep.org/resources/report/global-methane-assessment-benefits-and-costs-mitigating-methane-emissions>

Van Wesemael D., Vandaele L., Ampe B., Cattrysse H., Duval S., Kindermann M., Fievez V., De Campeneere S., Peiren N. (2019) Reducing enteric methane emissions from dairy cattle: Two ways to supplement 3-nitrooxypropanol. *Journal of Dairy Science*, 102(2), 1780–1787. <https://doi.org/10.3168/jds.2018-14534>

Willett W., Rockström J., Loken B., Springmann M., Lang T., Vermeulen S., Garnett T., Tilman D., DeClerck F., Wood A., Jonell M., Clark M., Gordon L.J., Fanzo J., Hawkes C., Zurayk R., Rivera J.A., De Vries W., Majele Sibanda L., ... Murray C.J.L. (2019) Food in the Anthropocene: the EAT–Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. *The Lancet*, 393(10170), 447–492. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(18\)31788-4](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(18)31788-4)

Wirsenius S., Azar C., Berndes G. (2010) How much land is needed for global food production under scenarios of dietary changes and livestock productivity increases in 2030? *Agricultural Systems*, 103(9), 621–638. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2010.07.005>

Zessner M., Hepp G., Zoboli O., Manonelles O.M., Kuderna M., Weinberger C., Gabriel O. (2016) Erstellung und Evaluierung eines Prognosetools zur Quantifizierung von Maßnahmenwirksamkeiten im Bereich der Nährstoffeinträge in Oberösterreichische Oberflächengewässer. - Bericht im Auftrag des Amtes der Oö. Landesregierung (p. 132).

Wirtschaftsdüngermanagement NEU im Hinblick auf Klimaschutz und Klimawandelanpassung

Alfred Pöllinger-Zierler^{1*} und Andreas Zentner¹

Zusammenfassung

Entlang der Wirtschaftsdünger-Kette, vom Stall, über die Lagerung bis zur Ausbringung entstehen Emissionen. Gasförmige und flüssige Stickstoff- und Kohlenstoffverbindungen können verloren gehen. Methan (CH₄) und Lachgas (N₂O) sind unmittelbar den treibhausgasrelevanten Emissionen zuzuordnen. Ammoniak ist zwar kein unmittelbar relevantes Treibhausgas, dennoch mit dem Stickstoffkreislauf und damit den Lachgasemissionen verbunden. Im Stall tragen alle Maßnahmen zur Emissionsminderung bei, die helfen die Lauf- und Fressgänge trocken und sauber zu halten. Maßnahmen im Rinderstall dazu sind: 3 % geneigte Laufgangflächen mit Harnsammelrinne, erhöhte Fressstände oder Stallungen mit Festmistsystem. Die Güllelagerabdeckung ist eine weitere Reduktionsmaßnahme, ebenso wie die Kompostierung von Festmist. Wirtschaftsdüngergetragene Biogasanlagen tragen zu einem noch größeren Anteil an der Reduktion von treibhausgasrelevanten Emissionen bei. Die Gülleverdünnung mit Wasser und die Gülleseparierung zählen zu den wichtigsten Behandlungsverfahren von Gülle um die Emissionen von Ammoniak, Methan und Lachgas über die weitere Prozesskette (Lagerung-Ausbringung) zu reduzieren. Calciumcyanamid als Güllezusatzmittel reduziert die Methanemissionen bei der Wirtschaftsdüngerlagerung um bis zu 80 %. Bei der Wirtschaftsdüngerausbringung wirkt die bodennahe Ausbringtechnik durch die verbesserte Ausbringgenauigkeit emissionsmindernd. Die Weidehaltung hat ein wesentlich größeres Potenzial zur Emissionsreduktion beitragen zu können.

Summary

Emissions are produced along the manure chain, from the barn to storage and application of manure – gaseous and liquid nitrogen and carbon compounds can be lost. Methane (CH₄) and nitrous oxide (N₂O) are directly assigned to the greenhouse gas emissions. Although ammonia is not a directly relevant greenhouse gas, it is linked to the nitrogen cycle and thus to nitrous oxide emissions. In the barn, all measures that are suitable to keep the walking and feeding areas dry and clean also contribute to reducing gaseous emissions. Measures in the cattle barn are: 3 % sloped walking alleys with urine collection channel, raised feeding stalls or loose housing with straw yard system. Covering the liquid manure store and the composting of solid manure are reduction measures as well. Biogas plants make an even greater contribution to reducing greenhouse gas emissions. Calcium cyanamide as a slurry additive reduces methane emissions from slurry storage by up to 80%. Slurry dilution with water and slurry separation are the most important manure treatment processes to reduce emissions of ammonia, methane and nitrous oxide over the further process chain (storage-spreading). Calcium cyanamide as a slurry additive reduces methane emissions from slurry storage by up to 80%. Low-emission (NH₃) spreading techniques (e.g. trailing hoses, trailing shoes or shallow injection) improve spreading precision and therefore could help to reduce greenhouse gas emissions. Grazing has a much greater potential to contribute to reducing emissions.

¹ HBLFA Raumberg-Gumpenstein, A-8952 IRDNING-DONNERSBACHTAL

* Ansprechpartner: DI Alfred Pöllinger-Zierler, email: alfred.poellinger-zierler@raumberg-gumpenstein.at

Einleitung

Unsere Wirtschaftsdünger (Stallmist, Jauche und Gülle) sind Mehrnährstoffdünger, die hinsichtlich ihrer Eigenschaften und damit auch Düngerwirkung unterschiedlich zu beurteilen und einzusetzen sind. Aufgrund der extrem stark gestiegenen Energiepreise hat sich die Wertigkeit der hofeigenen Wirtschaftsdünger nochmals stark erhöht. Pro verloren gegangenen Kilogramm Stickstoff in die Luft (NH_3 oder N_2O), oder durch Auswaschung im Boden (NO_3), ist ein Wert von zwei bis 2,5 Euro zu kalkulieren (siehe dazu auch *Tabelle 1*). Dementsprechend ist der sachgerechte und effiziente (geringstmögliche Nährstoffverluste) Umgang mit den hofeigenen Wirtschaftsdüngern nicht nur aus umweltökologischen Gründen ein Gebot der Stunde. Aus Wirtschaftsdüngern entweichen entlang ihrer Verwertungskette (Anfall – Lagerung – Ausbringung – Düngerwirkung/Nährstoffspeicherung) allerdings auch klimawirksame Gase. Das sind vor allem Methan und Lachgas und als indirekt klimawirksames Gas auch Ammoniak. Aber auch die Anwendung der Wirtschaftsdünger (Technik und Management) ist im Hinblick an den Klimawandel entsprechend anzupassen.

In *Abbildung 1* ist die Entwicklung der treibhausgasrelevanten Emissionen aus der Landwirtschaft von 1990 bis 2019, aufgetrennt nach den Subkategorien

A. - wiederkaubedingte Emissionen,

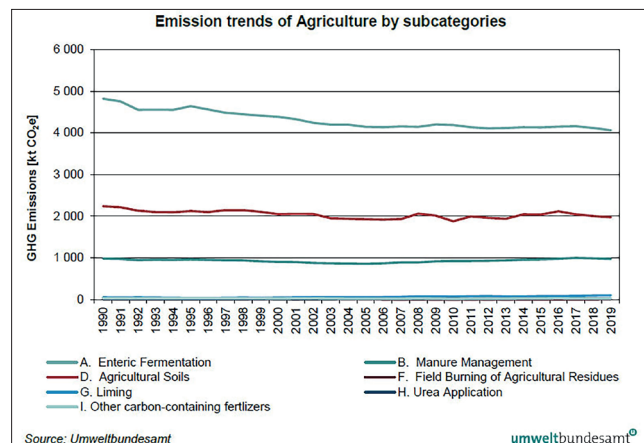
B. - Wirtschaftsdüngermanagement (Wirtschaftsdüngerlagerung) und

D. - landwirtschaftliche Böden (Lachgasemissionen) dargestellt (Umweltbundesamt, report0761, 2021). Die Berechnungen der klimawirksamen Emissionen werden nach den IPCC Guidelines aus dem Jahre 2006 durchgeführt. In den Bereichen wiederkauenbedingte (Methan) und bodenbedingte (Lachgas) Emissionen kam es in diesem Zeitraum zu einer Reduktion der Emissionen um 15,7 und 11,9 %. Diese Tatsache ist zum einen auf die Reduktion der Tierzahlen, insbesondere bei den großen Wiederkäuern (Rinder), zurück zu führen und zum anderen auf die Reduktion der Stickstoffdüngerniveaus im

Tabelle 1: Durchschnittliche Nährstoffgehalte und Wert von Rottemist und Rindergülle im Vergleich (Starz 2017, ergänzt Pöllinger-Zierler 2022).

Düngerart (Milchkühe inkl. Nachzucht)	TM-Gehalt %	N-Gehalt kg/m^3 inkl. Lagerverluste	N-Gehalt kg/m^3 inkl. Lager- und Ausbringungsverluste	P-Gehalt kg/m^3	K-Gehalt kg/m^3	Geschätzter Wert in € pro m^3
Rottemist	25-40	4,4	4,0	1,8	7,6	12-15
Gülle unverdünnt	10	3,9	3,4	0,9	5,4	10-12
Gülle 1:1 verdünnt mit Wasser	5	2,0	1,7	0,4	2,7	5-6

Abbildung 1: Treibhausgasrelevante Emissionstrends in Österreich aus der Landwirtschaft nach Subkategorien von 1990 bis 2019 (Quelle: report0761 UBA 2021).



Zuge der Nitratrictline (1991) inklusive der Novellierungen und dazu erlassenen Verordnungen. Bezogen auf die Menge an klimawirksamen Gasen sind über 50 % den verdauungsbedingten Methanemissionen zuzuordnen. Der Anteil der unmittelbar dem Wirtschaftsdüngermanagement laut dieser Nomenklatur zuordenbaren klimawirksamen Emissionen liegt bei nur rund 14 %. Dabei wird nur die Lagerung der Wirtschaftsdünger für die Berechnungen einbezogen. Im Rahmen einer LCA Analyse werden die treibhausgasrelevanten Emissionen allerdings auch aus der Stallhaltung (Laufgänge und Treibmistkanäle) und im Zusammenhang mit der Anwendung der Wirtschaftsdünger berücksichtigt (Kappel 2020). Damit bekommt der Bereich Wirtschaftsdüngermanagement ein deutlich stärkeres Gewicht.

Letztendlich geht es darum sämtliche Emissionen entlang der Produktionskette und hier im speziellen entlang der Wirtschaftsdünger-Kette so gering wie möglich zu halten um umweltökologische, klimarelevante und ökonomische Negativfolgen zu verhindern.

Wirtschaftsdüngermanagement im Rinderstall

Um sowohl die Ammoniak- als auch treibhausgasrelevanten Emissionen im Bereich der Stallhaltung zu reduzieren, sind alle Aktivitäten sinnvoll, mit denen es gelingt saubere und möglichst trockene Oberflächen zu erhalten. Dabei ist auch den gestiegenen Anforderungen seitens des Tierwohls mit erhöhtem und differenzierten Flächenangebot für die Bewegung der Tiere Rechnung zu tragen. Auf planbefestigten Flächen gelingt ein rascher Harnabfluss mit einer 3 %ig geneigten Lauffläche hin zu einer Harnsammelrinne. Wichtig dabei ist allerdings auch ein entsprechend hohes Reinigungsintervall durch das jeweilige Entmistungssystem. Auf Spaltenböden wird mit einer Verminderung des Perforationsanteils experimentiert um dadurch die Emissionen auf den Bewegungsflächen, aber auch unterhalb der Bewegungsflächen (Treibmistkanäle) zu reduzieren. Hierzu fehlen allerdings noch die wissenschaftlichen Belege für die emissionsmindernde Wirkung. An diesen wird derzeit intensiv gearbeitet. Mit erhöhten Fressständen kann der Anteil der verschmutzten emissionsaktiven Oberflächen im Stall reduziert werden. Mit diesen baulichen Maßnahmen lassen sich Ammoniak- und treibhausgasrelevanten Emissionen reduzieren.

Beim Wirtschaftsdüngersystem Festmist inkl. Jauche, wurden über die gesamte Prozesskette (Stall-Lagerung-Ausbringung) geringere treibhausgasrelevanten Emissionen gemessen (Kappel 2020). Die Entscheidung für oder gegen ein Wirtschaftsdüngersystem wird allerdings überwiegend von der Frage der Ressourcenverfügbarkeit von Einstreumaterial und von arbeitswirtschaftlichen Gesichtspunkten geprägt. Um die Systeme auch aus der Sicht der Ammoniakemissionen im Optimum zu halten sind große Einstreumengen erforderlich. Die Lauf- und Liegeflächen müssen trocken und sauber gehalten werden. Wird dabei Einstreumenge gespart, erhöht sich die Emissionsaktivität deutlich.

Eine gezielte Temperaturführung (Sommerluftkühlung) in den Stallungen (Rinder, Schweine,...) führt ebenfalls zu geringeren Ammoniak- und Methanfreisetzungen. Beide Prozesse sind auch sehr stark temperaturabhängig.

Wirtschaftsdüngerlagerung und -behandlung

Flüssige Wirtschaftsdünger sind in Zukunft nur mehr in geschlossenen Behältnissen zu lagern. Damit reduzieren sich sowohl die Ammoniak- als auch die treibhausgaswirksamen Methan- und Lachgasemissionen. Die Biomethanisierung der Wirtschaftsdünger in Biogasanlagen wäre die effizienteste Möglichkeit die angesprochenen Emissionen zu reduzieren. Aufgrund der hohen Investitionskosten für die Errichtung derartiger Anlagen, verbunden mit der geringen Gasausbeute aus rein wirtschaftsdüngergetragenen Biogasanlagen, lässt sich kein wirtschaftlich begründbarer Anlagenbetrieb erreichen. In Deutschland wird derzeit an einer Studie zum luftdichten Abschluss von Flüssigmistsam-

Tabelle 2: Kumulierte Gasfreisetzung in kg je Variante (Rohgülle und behandelte Gülle) bezogen auf 180 kg Rohgülle (Zentner et al. 2021).

Güllebehandlung	Parameter			
	CH ₄	CO ₂	N ₂ O	NH ₃
Rohgülle	0,464	4,441	0,010	0,482
Gülle + 3 kg/m ³ Eminex	0,052	3,294	0,003	0,644

melanlagen gearbeitet, um die Emissionen aus der Lagerung analog von Biogasanlagen reduzieren zu können. Hierbei wird die Umsetzbarkeit und das Potenzial zur Emissionsreduktion abgeschätzt.

Die Behandlung der im Stall anfallenden und gesammelten Wirtschaftsdünger wurde und wird von verschiedenen Forschungsgruppen bearbeitet. Eine Möglichkeit zur Minderung der treibhausgasrelevanten Emissionen (Methan und Lachgas) bei der Lagerung der Rindergülle konnte durch die Separierung von Fest- und Flüssiganteil gemessen werden (Amon et al. 2001). Durch die Zugabe von Amalgerol und PenacG als Güllezusatzmittel konnten weder die Ammoniak- noch die treibhausgasrelevanten Emissionen reduziert werden. Weiter wurde in diesen Versuchen der negative Effekt von Güllelagerabdeckungen mittels Strohecke aufgrund erhöhter Lachgasemissionen gemessen. In diesen Stroh-Gülle gemischen wechseln sich oxidierende und reduzierte Bedingungen laufend ab und begünstigen dadurch die Bildung von Lachgas.

In einer Untersuchung an der HBLFA Raumberg-Gumpenstein konnten durch den Zusatz von 3 kg Eminex (ein Kalkstickstoff (Calciumcyanamid)) pro m³ Rindergülle die Methanemissionen über die 2-monatige Lager- und Messdauer um rund 80 % reduziert werden (Zentner et al. 2021). Negativ aufgefallen war dabei nur eine leicht erhöhte Ammoniakabgasung aus den Versuchsbehältern der mit Eminex behandelten Gülle (siehe *Tabelle 2*).

Amon et al. (2017) kommen in ihrer Studie zum Schluss, dass auch die Ansäuerung von Gülle nicht nur zur Reduktion von Ammoniak, sondern auch von Methan (29–74 %) und Lachgas (21–55 %) führt. In dieser Sparte wird derzeit auch an der HBLFA Raumberg-Gumpenstein, gemeinsam mit der LFL Bayern geforscht um natürliche Absäuerungen der flüssigen Wirtschaftsdünger zu erreichen. Glucose, Melasse und Molkeprodukte scheinen hier Potenzial zu haben Allerdings führen diese Zusätze in den bisherigen Versuchsdurchgängen zu einer verstärkten unangenehmen Geruchsentwicklung. Eine Absäuerung mit Schwefelsäure wird aus Gründen der problematischen Handhabung auf den Betrieben derzeit nicht näher untersucht.

Wirtschaftsdüngerausbringung

Bei der Wirtschaftsdüngerausbringung spielen die Methan- und Lachgasemissionen bei, und unmittelbar nach der Ausbringung im Vergleich zu den Ammoniakemissionen eine eher untergeordnete Rolle. Dennoch konnte in den Versuchen von Amon et al. 2001 nachgewiesen werden, dass separierte Gülle im Vergleich zu Rohgülle deutlich geringere Methanemissionen verursacht. Der höhere Energieaufwand zur Separierung der Gülle wird durch den deutlich geringen Homogenisierungs- und Pumpaufwand nach mündlichen Mitteilungen von Univ.-Prof. Thomas Amon egalisiert. Somit kann gesamtsystemisch betrachtet von einer geeigneten Maßnahme zur Reduktion der treibhausgasrelevanten Emissionen ausgegangen werden. Bezogen auf Ammoniak ist die Gülleseparierung von Rindergülle im Hinblick auf die Ausbringung ebenfalls positiv zu beurteilen. In der OLI (Österreichische Luftschadstoffinventur des Umweltbundesamtes) wird mit einem 20 %igen Minderungsfaktor bei der Flüssigmistausbringung von Rindergülle gerechnet. Erreicht wird dieses Ergebnis aufgrund der deutlich besseren Infiltrationseigenschaften der Dünngülle. Muss Gülle über größere Strecken zur Ausbringung transportiert werden, ist die Gülleseparierung bereits bei durchschnittlichen Feldhofentfernungen von 5 km aufgrund reduzierter Transportkosten auch ökonomisch sinnvoll. Eine ähnliche Wirkung zeigt auch

die Verdünnung der Gülle mit Wasser von 1:1. Diese Maßnahme ist insbesondere bei arrondierter Betriebslage eine Option zur Reduktion von gasförmigen Emissionen (CH_4 , N_2O und NH_3) aus den Wirtschaftsdüngern.

Die im Zusammenhang mit Ammoniakemissionsreduktion hocheffiziente bodennahe Gülleausbringetechnik (Schleppschlauch, Schleppschuh und seichte Injektion) ist in Bezug auf treibhausgasrelevante Emissionen etwas differenzierter zu betrachten. Zum einen sind der höhere Aufwand hinsichtlich der Maschinenbauteile und des zusätzlichen Gewichtes (Verteilergestänge) und damit verbunden höhere Treibstoffverbrauch zu berücksichtigen. Emissionsmindernd wirkt die erhöhte Verteilgenauigkeit – gezielte Bedarfsdüngung.

Im Zusammenhang mit der Lachgasbildung ist wichtig, dass flüssige und feste Wirtschaftsdünger nicht tief in den Boden eingearbeitet werden. Insbesondere bei schweren Böden entsteht dabei im Zuge des Umbauprozesses der stickstoffhaltigen Wirtschaftsdünger wiederum durch den Wechsel von oxidierenden und reduzierenden Bedingungen vermehrt Lachgas. Dabei ist insbesondere der Umbauprozess von Ammonium zu Nitrat betroffen. Deshalb wird in Österreich die Tiefeninjektion von Flüssigmist zur Reduktion von Ammoniakemissionen nicht forciert.

Die Weidehaltung hat neben den tierwohlbegründeten positiven Eigenschaften auch einen stark emissionsreduzierenden Effekt. Sowohl Ammoniak-, als auch Methan und Lachgasemissionen werden aufgrund des getrennten Anfalls von Kot und Harn, durch die Weidehaltung stark reduziert. Vor allem werden aber auch treibhausgasrelevante Emissionen durch den verringerten Maschineneinsatz – geringere Mengen an Grundfutterreserven müssen maschinell geerntet und konserviert werden – als auch durch die effizientere Grundfütternutzung reduziert (Kappel 2020, Fritz et al. 2021).

Literatur

Amon B., Moitzi G., Wagner-Alt C., Kryvoruchko V., Amon Th., Boxberger J. (2001) Methane, Nitrous Oxide and Ammonia Emissions from Management of Liquid and Solid Manures, Final Report 2001, Universität für Bodenkultur, Wien.

Amon B., Fröhlich M., Ramusch M., Amon Th., Boxberger J., Winiwarter W. (2007) Reclip:tom: Forschung zum Klimaschutz, Landtechnik 6/2006, 382-383.

Amon B., Winiwarter W., Mohankumar S.E.P. (2017) Greenhouse Gas and Ammonia Emissions from Different Stages of Liquid Manure Management Chains: Abatement Options and Emission Interactions, Journal of Environmental Quality (J ENVIRON QUAL).

Fritz C., Grassauer F., Terler G. (2021) Abschätzung von Treibhausgas-Vermeidungskosten: Methodik und Anwendung am Beispiel eines erhöhten Weidefutteranteils auf rinderhaltenden Betrieben in Österreich, Austrian Journal of Agricultural Economics and Rural Studies, Vol 30.4, 19-26.

Kappel M. (2020) Ökobilanzierung von Milchviehstallsystemen im österreichischen Berggebiet – Vergleich von Anbindehaltung und Laufstall-Weide-Systemen mit besonderer Berücksichtigung des Wirtschaftsdüngermanagements, Masterarbeit an der Universität für Bodenkultur, Wien.

Nitratrichtlinie (1991) RICHTLINIE DES RATES vom 12. Dezember 1991 zum Schutz der Gewässer vor Verunreinigung durch Nitrat aus landwirtschaftlichen Quellen. (91/676/EWG) (ABl. L 375 vom 31.12.1991).

Umweltbundesamt (2021): AUSTRIA'S NATIONAL INVENTORY REPORT 2021. Submission under the United Nations Framework Convention on Climate Change and under the Kyoto Protocol. REP-0761, ISBN 978-3-99004-583-1.

Zentner A., Pöllinger A., Winkler S. (2021) Ergebnisbericht zur Gülleuntersuchung des Additives „Eminex“ (Kalkstickstoff-Granulat-Calciumcyanamid/Aufbereitungshilfsmittel für Gülle und Biogasgärreste zur Methanreduktion), HBLFA Raumberg-Gumpenstein, Irdning.

ARGE Ammosafe - Emissionsarme Düngung durch Nährstoffrückgewinnung

Christian Werni^{1*}

Zusammenfassung

Die steigenden Umweltschutzanforderungen an die LandwirtInnen brauchen neue Lösungsansätze, die über das bisherige Maß hinausgehen. Eine spezielle Herausforderung ist dabei die Reduktion der Ammoniakemissionen (NEC-Richtlinie). Zusätzlich sind unangenehme Gerüche zu beseitigen, um die soziale Verträglichkeit der Güllewirtschaft zu verbessern. Das EIP-Projekt Ammosafe, welches vom Bund, den Ländern und der Europäischen Union gefördert und durch innovationsfreudige Landwirte mitgetragen wird, könnte in diesem Zusammenhang zukunftsweisend sein. Die entwickelte Aufbereitungsanlage entzieht der Gülle den Ammoniumstickstoff, sodass sie nach der Aufbereitung fast nur noch organisch gebundenen Stickstoff enthält. Das hilft, Stickstoff und Geruchsemissionen während der Ausbringung zu reduzieren und die Nährstoffeffizienz auf den Betrieben zu verbessern. Der entfernte Stickstoff kann sehr konzentriert gelagert und zur Zeit des höchsten Bedarfes ausgebracht werden. Die erwartete Verminderung der Stickstoffeinträge in das Grundwasser soll durch Feldversuche bestätigt werden. Darüber hinaus werden die zeitlich bedingten stofflichen Veränderungen sowie die Geruchsbelastung der behandelten Gülle gemessen und beobachtet.

Schlagwörter: Ammoniak, Grundwasserschutz, Gülleaufbereitung, Kreislaufwirtschaft, Nährstoffausnutzung

Summary

The increasing environmental protection demands on farmers require new approaches to solutions that go beyond the previous level. A special challenge is the reduction of ammonia emissions (NEC Directive). In addition, unpleasant odours must be eliminated in order to improve the social compatibility of manure management. The EIP project Ammosafe, which is funded by the federal government, the federal states and the European Union and supported by innovative farmers, could be forward-looking in this context. The processing plant developed removes the ammonium nitrogen from the slurry, so that after processing it contains almost only organically bound nitrogen. This helps to reduce nitrogen and odour emissions during spreading and improve nutrient efficiency on farms. The removed nitrogen can be stored in a very concentrated form and applied at the time of highest demand. The expected reduction of nitrogen inputs to groundwater will be confirmed by field trials. In addition, the material changes over time and the odour load of the treated manure will be measured and observed.

Keywords: Ammonia, groundwater protection, slurry treatment, circular economy, nutrient utilisation

¹ Landwirtschaftskammer Steiermark, Hamerlinggasse 3, A-8010 GRAZ

* Ansprechpartner: Bakk. rer. nat. MSc. Christian Werni, email: christian.werni@lk-stmk.at

Ausgangssituation

Die steigenden Umweltschutzanforderungen, die Landwirtinnen und Landwirte erfüllen müssen, brauchen neue Lösungsansätze, die über das bisherige Maß hinausgehen. Vor allem tierhaltende landwirtschaftliche Betriebe werden mit ständigen Änderungen und Verschärfungen der Rahmenbedingungen vor immer größere Herausforderungen gestellt. Darüber hinaus gilt es, die soziale Verträglichkeit der Güllewirtschaft durch die Vermeidung unangenehmer Gerüche zu verbessern. Eine spezielle Herausforderung ist dabei die Reduktion der Ammoniakemissionen, um die vorgegebenen Grenzwerte der NEC-Richtlinie zu bewerkstelligen. Mit den bis dato eingesetzten Maßnahmen werden die Grenzwerte nur schwer einzuhalten sein.

Während des Nutzungskreislaufes von Wirtschaftsdünger, vor allem bei der Ausbringung von Gülle unter nicht idealen Bedingungen, können zum Teil hohe Nährstoffmengen durch Emissionen in Luft und Grundwasser verloren gehen.

Zur Reduktion der Umweltbelastung werden immer strengere Auflagen bezüglich der Düngeobergrenzen sowie der erlaubten Ausbringungszeiträume beschlossen, wie dies zum Beispiel bereits in Grundwasserschutzgebieten der Fall ist. Das kann auf den landwirtschaftlichen Betrieben zu einer Lagerknappheit und einer Zunahme von Arbeitspitzen führen.

Darüber hinaus ist die Steigerung von Effektivität und Effizienz der Wirtschaftsdüngeranwendung aufgrund der neuesten Entwicklungen am Düngemittelmarkt dringend geboten. Die Situation am Rohstoffmarkt – insbesondere am Gasmarkt – hat wesentlich zu einer Verknappung und einer massiven Preissteigerung bei Stickstoffdüngern geführt. Dem Rückgang des Stickstoffangebots (Mineraldünger) kann durch eine Optimierung von innerbetrieblichen Nährstoffkreisläufen in landwirtschaftlichen Betrieben entgegen gewirkt werden.

Das EIP-Projekt Ammosafe, welches vom Bund, den Ländern und der Europäischen Union gefördert und durch innovationsfreudige Landwirte mitgetragen wird, könnte in diesem Zusammenhang zukunftsweisend sein. Hierbei wird eine neue Art der Gülleaufbereitung geprüft, bei der mithilfe einer mobilen Anlage der leicht verfügbare Ammoniumstickstoff aus der Gülle entfernt wird.

Ziele

Grundsätzlich soll dieses innovative System die Umweltverträglichkeit sowie die Wirtschaftsdüngerlogistik auf den Betrieben verbessern. Die Anforderungen in den Bereichen Grundwasserschutz, Luftreinhaltung, Bodenschutz und Sozialverträglichkeit müssen erfüllt werden. Die Anwendbarkeit soll dabei aber nicht nur auf Österreich beschränkt, sondern auch international gegeben sein. Die konkreten Ziele des Projektes lauten wie folgt:

- Bereitstellung eines praktisch umsetzbaren, kostengünstigen und mobilen Verfahrens zur Wirtschaftsdüngeranfertigung
- positive Beeinflussung (im Sinn einer Verminderung) der Emissionen in das Grundwasser und die Luft im Vergleich zu unbehandelter Gülle, was zu einer signifikanten Erhöhung der Umweltverträglichkeit führt
- Verbesserung des gesellschaftlichen Bildes der Landwirtschaft durch die Verminderung der Geruchsbelastung als Folge der Gülleaufbereitung
- Erhöhung der Nährstoffeffizienz am landwirtschaftlichen Betrieb und die damit verbundene Schonung natürlicher Ressourcen
- größere zeitliche Flexibilität bei der Ausbringung der Gülle, was zu einer Aufweitung des Zeitfensters führt. Dadurch kann man ungünstigen Witterungsverhältnissen besser ausweichen und damit bodenschonender arbeiten

- Minderung von Arbeitsspitzen, die durch zu enge Zeitfenster entstehen
- bestehende Lagerkapazitäten können bei einer Aufweitung des Zeitfensters ausreichen und brauchen nicht erweitert zu werden
- Prüfung der Wirtschaftlichkeit des Verfahrens.

Aufbereitungsanlage

Zur Abtrennung des Ammoniaks aus der Gülle wurde eine mobile Anlage konzipiert und von der Bauer GmbH gefertigt. Vom Institut für Chemische Verfahrenstechnik und Umwelttechnik der TU Graz wurde ein Konzept, basierend auf Vorversuchen, für den gesamten Aufbereitungsprozess vorgelegt. Auf Grundlage dieses Konzepts wurden von Mitarbeitern der Bauer GmbH, der TU Graz und der LK Steiermark die Anforderungen, aber auch die technischen Grenzen der Anlage diskutiert und definiert. Das Grundprinzip war dabei, den Ammoniak durch eine pH-Wert- und eine Temperaturerhöhung aus der Gülle auszutreiben und ihn mit Hilfe von Schwefelsäure in ein Düngemittel (Ammoniumsulfat) umzuwandeln. *Abbildung 1* zeigt die betriebsbereite Aufbereitungsanlage.

Wie bereits oben erwähnt, ist das Ziel der Aufbereitungsanlage, den leicht löslichen Ammoniumstickstoff aus der Gülle zu entfernen. Dafür wird die Gülle im ersten Arbeitsschritt durch eine Schneckenpresse separiert. Dadurch entstehen eine Flüssig- und eine Festphase. Die Flüssigphase wird weiter in die Aufbereitungsanlage gepumpt. Hier wird sie auf ca. 60 °C erhitzt und gleichzeitig mit Branntkalk vermengt, um die notwendige pH-Wert Erhöhung auf mindestens zwölf zu erreichen. Dadurch wird der leicht lösliche Ammoniumstickstoff zu Ammoniak und gasförmig aus der Gülle ausgetrieben. Dieses Gas wird dann in der Anlage weiterbefördert und schlussendlich mit Schwefelsäure behandelt (gestrippt) und der Stickstoff wird als Ammoniumsulfat gebunden. Die hergestellte Ammoniumsulfatlösung kann einfach gelagert werden und später während der Hauptvegetation, zur Zeit des höchsten Bedarfs, gezielt gedüngt werden. Dazu gibt es folgende Möglichkeiten:

- Beimengung knapp vor Ausbringung der Gülle
- Ausbringung über eine Feldspritze (Vorsicht, da die Ammoniumsulfatlösung sauer ist) direkt auf den Boden
- Anwendung des neuen CULTAN-Verfahrens.

Um die Funktion und Effizienz des Prozesses zu überprüfen, wurden im Laufe des Betriebes kontinuierlich mehrere Parameter erhoben. Gemessen wurden Temperatur der Gülle, pH-Wert der Gülle- und Schwefelsäure und der Ammonium-Stickstoffgehalt in



Abbildung 1: Betriebsbereite Aufbereitungsanlage, © LK Steiermark.



Abbildung 2: Feldlabor zur Prozessüberwachung, © LK Steiermark.

der Gülle. Die Ermittlung des Ammonium-Stickstoff-Gehaltes erfolgte über eine photometrische Messung, siehe *Abbildung 2*.

Die aufbereitete Gülle enthält fast nur noch organisch gebundenen und somit langsam verfügbaren Stickstoff. Diese Gülle unterliegt daher einer verringerten Gefahr der Auswaschung und Ausgasung, sodass eine größere Flexibilität bei der Ausbringung möglich ist. Das entstandene Feststoffseparat ist einfach zu lagern und kann entweder als Einstreu oder zur Bodenverbesserung verwendet werden.

Um die Aufbereitungsanlage zwischen den Versuchsdurchgängen verfahrenstechnisch zu optimieren, war sie mit Sensoren ausgestattet, mit deren Hilfe die wesentlichsten Abläufe überwacht und gesteuert werden konnten. Durch eine Verfeinerung der Sensorik wären hier noch weitere verfahrenstechnische Verbesserungen möglich.

Feldversuche und Güllelabor

Im Rahmen des Projekts wurden an zwei Standorten mit unterschiedlicher Bodenbeschaffenheit Exaktversuche (vollständig randomisierte Blockanlage mit sechs verschiedenen Düngevarianten in vierfacher Wiederholung) angelegt, in denen unterschiedlich behandelte Güllen mit Rohgülle und einer reinen Mineraldüngervariante (0-Variante) verglichen wurden. Die Anbaudüngung erfolgte mit den Güllevarianten (abgesehen von der 0-Variante) und die mineralische Stickstoff-Ergänzungsdüngung erfolgte dann im Vier- bis Sechsstadium. Schlussendlich bekamen aber alle Varianten die gleiche Menge an Stickstoff. Folgend ein Überblick über die unterschiedlichen Varianten:

- 0-Variante (reine Mineraldüngervariante)
- Gülle unbehandelt ($25\text{m}^3/\text{ha}$)
- Gülle separiert & gestrippt (1. Variante mit $15\text{m}^3/\text{ha}$, 2. Variante mit $25\text{m}^3/\text{ha}$)
- (2019) Gülle separiert & gestrippt inkl. Biokohle (1. Variante mit $15\text{m}^3/\text{ha}$, 2. Variante mit $25\text{m}^3/\text{ha}$)
- (2020 und 2021) Gülle separiert & halb gestrippt (1. Variante mit $15\text{m}^3/\text{ha}$, 2. Variante mit $25\text{m}^3/\text{ha}$).

Die Vermischung mit der Biokohle hat während des Prozesses sowie bei der Ausbringung erhebliche Probleme verursacht, da sich Leitungen und Ventile durch die teils grob vermahlene Kohle verlegten. Außerdem haben die Ergebnisse der Raumberg-Gumpenstein Research & Development nachgewiesen, dass die Kohlevarianten zudem eine erhöhte Ammoniakausgasung gegenüber der gestrippten Variante ohne Kohle aufwiesen, weswegen der angedachte positive Effekt nicht eingetreten ist. Als Ersatzvariante wurde eine separierte & halb gestrippte Gülle festgelegt, welche nach der Behandlung mit der Pilotanlage ca. die Hälfte des ursprünglichen Ammoniakgehaltes aufweist (wieder einmal mit $15\text{m}^3/\text{ha}$ und einmal $25\text{m}^3/\text{ha}$).

Zur Überprüfung der Auswirkungen auf das Sickerwasser (und damit der Grundwasserqualität) wurden stationär Saugkerzen in 40 und 70 cm Tiefe eingebaut (siehe *Abbildung 3*) und in 14tägigen Abständen beprobt und im Labor der Abteilung 15 des Landes Steiermark analysiert. Die Messwerte wurden auch den Ergebnissen der standortspezifischen N-Bilanzrechnungen (Aufwand minus Entzug) und den Messwerten mehrerer N_{min} -Beprobungen der Böden gegenübergestellt. Um die Aussagekraft der erhobenen Daten noch weiter zu erhöhen, wurden zusätzlich zu den Saugkerzen jeweils auch noch zwei Bodenfeuchtesensoren je Versuchsstandort eingebaut (siehe *Abbildung 4*).

Darüber hinaus haben die Mitarbeiter der Raumberg-Gumpenstein Research & Development die zeitlich bedingten stofflichen Veränderungen sowie die Geruchsbelastung der Güllevarianten während einer längeren Lagerung beobachtet und gemessen, denn an der Raumberg-Gumpenstein Research & Development steht die erste österreichische Prüfanlage (Güllemittellabor) für Güllezusatzmittel, welche seit dem Frühjahr 2020 in



Abbildung 3: Einbau Saugkerzenanlage, © LK Steiermark.



Abbildung 4: Einbau Bodenfeuchtesensoren, © LK Steiermark.

Betrieb ist. Für die im Rahmen des Projekts angestrebte Zielerreichung wurden folgende Parameter erhoben:

- pH-Wert
- Temperatur (Gülle, Außenluft)
- Luftgeschwindigkeit
- relative Luftfeuchtigkeit.

Ergebnisse und Ausblick

Ursprünglich waren zwei Gülleaufbereitungsdurchgänge geplant. Im ersten Versuchsjahr konnte bereits eine Entfernungsrates des Ammoniumstickstoffs von 84 % erreicht werden, was eine Absenkung des Ausgangswertes von 3,28 g/kg auf 0,53 g/kg bedeutet. Im zweiten Versuchsjahr konnten wir die Entfernungsrates des Ammoniumstickstoffs noch weiter, auf bis zu 94 %, erhöhen. Außerdem konnte die dafür benötigte Zeit auch deutlich verringert werden. Um die Aussagen der ersten beiden Versuchsreihen zu verifizieren und auch um die Wirtschaftlichkeitsberechnungen noch genauer durchführen zu können, war ein zusätzlicher dritter Gülleaufbereitungsdurchgang notwendig. Ziel war es, mit der Optimierung der Gülleaufbereitungsanlage eine Effizienzsteigerung zu erlangen. Die dafür gesetzten Maßnahmen führten dazu, dass die Zeit zur Erreichung der gewünschten Prozessparameter stark verkürzt wurde. Gleichzeitig konnte die benötigte Kalkmenge zum Erreichen des benötigten pH-Wertes verringert werden. Darüber hinaus gelang es, die Stripptung des Ammoniaks aus der Gülle zu beschleunigen. Die Ergebnisse im Zuge der Gülleaufbereitung sind durchaus vielversprechend, allerdings sind weitere verfahrenstechnische Verbesserungen der Aufbereitungsanlage notwendig, damit tatsächlich ein flächendeckender Einsatz möglich wird.

Aus pflanzenbaulicher Sicht waren die Ergebnisse der Düngungsversuche durchwegs positiv, denn die Anwendung der gestripten Gülle hatte keinerlei negative Auswirkungen auf die erhobenen pflanzenbaulichen Kennzahlen im Vergleich zu den Kontrollvarianten. Im dritten Versuchsjahr konnte beim Körnermais beobachtet werden, dass die N-Effizienz bei den behandelten Güllevarianten (höhere Eiweißgehalte) besser war, als bei den unbehandelten Güllen. Die erwartete Verminderung der Stickstoffeinträge in das Grundwasser deutet sich auch schon in den Auswertungen der Wasserproben an. Die endgültigen Ergebnisse liegen aber noch nicht vor, da dies erst möglich ist, wenn alle erforderlichen Daten aus dem Projekt vorliegen und ausgewertet, aufbereitet sowie interpretiert wurden. Aufgrund des zusätzlichen dritten Gülleaufbereitungsdurchgangs und den damit verbundenen hinzukommenden Daten verschiebt sich dies noch näher in Richtung Projektende. Außerdem werden die Saugkerzen noch bis Projektende weiter beprobt und analysiert. Die gesamten Projektergebnisse werden dann im Endbericht

und die daraus resultierenden Empfehlungen und Handlungsanleitungen in Form einer Broschüre dargestellt.

Die Untersuchungen der Raumberg-Gumpenstein Research & Development zeigten durchaus stimmige Ergebnisse und konnten die deutliche Geruchsreduktion der aufbereiteten Güllen bestätigen. Auch das Vorhaben, mit der Aufbereitungsanlage der Gülle den leicht löslichen Ammoniumstickstoff zu entziehen, konnte bestätigt werden. Aufgrund der zum Strippen notwendigen pH-Wert-Erhöhung sind für die Ausbringung der gestrippten Güllen Maßnahmen zur Vermeidung übermäßiger Ammoniakabgasungen am Feld zu setzen.

Im Zuge des Projekts werden auch die sozioökonomischen Potenziale der entwickelten Aufbereitungsanlage vom Institut für Nachhaltige Wirtschaftsentwicklung der BOKU untersucht. Viele der dafür benötigten Parameter wurden bereits während der drei Aufbereitungsdurchgänge erhoben. Eine weitere Grundlage für die sozioökonomischen Begleitforschungen ist die ökonomische Bewertung der Investitions- und Prozesskosten. Dafür waren eine verfahrenstechnische Detailplanung und Spezifikation einer praxistauglichen Anlagengröße und Leistung sowie die Definition einzelner Anlagenkomponenten notwendig. Diese benötigte Detailplanung wurde im Dezember 2021 durchgeführt. Aktuell ist die Wirtschaftlichkeitsprüfung in Arbeit und die Ergebnisse werden auch im Zuge des Endberichts und der Broschüre dargestellt.

Projektpartner

Die Landwirtschaftskammer Steiermark übernimmt im Rahmen des Projekts die Lead-Partnerschaft. Ein weiteres Projektmitglied ist die Bauer GmbH, welche ein internationales Unternehmen in den Bereichen Beregnung, Separation, Gülletechnik sowie auch in der Abwassertechnik im nicht landwirtschaftlichen Bereich ist. Zusätzlich zur Fa. Bauer sind noch drei landwirtschaftliche Betriebe Teil der Operationellen Gruppe (OG). Gemeinsam bilden diese 5 Projektpartner die ARGE Ammosafe. Weitere Projektpartner sind:

- Das Institut für Chemische Verfahrenstechnik und Umwelttechnik der TU Graz
- Das Institut für Nachhaltige Wirtschaftsentwicklung der BOKU Wien
- Raumberg-Gumpenstein Research & Development
- Die Abteilung 15 des Landes Steiermark
- Die Landwirtschaftskammer Niederösterreich

DIE WASSERSCHUTZBAUERN: Boden- und Wasserschutz im Kreislauf gedacht

Andreas Oswald^{1*}

Zusammenfassung

Im Jahr 2021 wurde das Projekt „Unser Boden - Unser Leben“ in der Steiermark umgesetzt. Es wurden Maßnahmen zur Begleitung und Unterstützung von Landwirt*Innen in den Bereichen Boden- und Grundwasserschutz, Humusaufbau und Bodenfruchtbarkeit ergriffen. Andererseits wurden diese Maßnahmen sowie die Leistungen die von den Landwirt*Innen diesbezüglich bereits erbracht werden, in umfassender Öffentlichkeitsarbeit dargestellt und kommuniziert. Die Bewusstseinsbildung in der Bevölkerung zu den Themen Bodenfruchtbarkeit, Humusaufbau und nachhaltige Landwirtschaft stand dabei im Fokus. Die Umsetzung des Projektes fand in intensiver Zusammenarbeit mit dem Verein „DIE WASSERSCHUTZBAUERN“ statt- ein gemeinnütziger Verein der vorrangig aus Landwirt*Innen besteht. Durch diese Kombination wird der Praxisbezug gewährleistet und die langfristige Effektivität der Maßnahmen erhöht.

Schlagwörter: Humusaufbau, Schulungen, Bewusstseinsbildung

Summary

In 2021, the project “Our Soil – Our Life“ was implemented in Styria. Measures to support farmers with soil and groundwater protection as well as humus formation and soil fertility were taken. At the same time, these measures as well as the performances already rendered by the farmers were depicted in comprehensive public relation activities. Awareness raising for soil fertility, humus formation, and sustainable agriculture were the focus of these activities. The project was implemented in close cooperation with the association “DIE WASSERSCHUTZBAUERN” (literal Water-protecting Farmers), a non-profit association, consisting primarily of farmers. By means of this combination, practical relevance was insured and the longevity of the measures increased.

Keywords: Humus formation, training, raising of awareness

Einleitung

Neben dem quantitativen Flächenschutz (Bodenversiegelung) ist der qualitative Bodenschutz von großer Bedeutung. Nur so können die vielfältigen Bodenfunktionen erhalten werden, um langfristig eine Grundlage für die Nahrungsversorgung sowie sauberes Grundwasser zur Verfügung zu haben. Damit verbunden ist insbesondere der Erhalt der organischen Bodensubstanz (Humus), die wesentlich zu einem gesunden Boden beiträgt und in der Lage ist, Wasser zu speichern und den Pflanzen bei Bedarf zur Verfügung zu stellen. Gleichzeitig speichert Humus durch die hohe spezifische Oberfläche Nährstoffe (z.B. Stickstoff), und bewahrt diese vor einer Auswaschung ins Grundwasser (Hatfield et al. 2017).

¹ Landwirtschaftskammer Steiermark, Referat Gartenbau, Hamerlinggasse 3, A-8010 GRAZ

* Ansprechpartner: DI Andreas Oswald, email: andreas.oswald@lk-stmk.at

Ausgangssituation

Den Betrieben der Genuss Region Grazer Krauthäuptel ist es, u.a. durch die Lage im Bereich des Grundwasserschutzgebietes Graz bis Bad Radkersburg, zum Anliegen geworden, besonders bodenschonend zu wirtschaften. Diverse Begrünungen und Zwischenfrüchte spielen dabei schon lange eine große Rolle. Aus den gesammelten positiven Erfahrungen heraus entstand der Wunsch, sich mit anderen Betrieben in und außerhalb der Region zu vernetzen und die gesammelten Erfahrungen zu teilen. In 2jähriger Vorbereitungsarbeit wurde das Projekt „Unser Boden - Unser Leben“ entworfen, das im Jahr 2021 umgesetzt wurde. Als Projektgruppe hat sich der Verein „DIE WASSERSCHUTZBAUERN“ formiert, der auf Basis dieses Projektes auch in Zukunft in den beschriebenen Bereichen tätig sein wird, und so einen Beitrag zum Erhalt eines gesunden Bodens leisten möchte.

Das Projekt

Dem Verein DIE WASSERSCHUTZBAUERN ist es ein Anliegen, Landwirt*Innen beim Humusaufbau, sowie dem Boden- und Wasserschutz zu unterstützen. Das soll durch Beiträge aus Wissenschaft und Forschung, fachliche Beratung der Landwirtschaftskammer und die Vernetzung und intensiven Austausch gelingen. Untersaaten, Begrünungen und schonende Bodenbearbeitung stehen dabei im Fokus, um beim Humusaufbau und damit Wasserschutz zu unterstützen. Zu diesem Zweck wurden im Jahr 2021 mehrere Feldbegehungen durchgeführt. Um einen besseren Einblick in die eigene Bewirtschaftungsweise zu bekommen, wurden Seminare zur Humusbilanzierung angeboten, und jeder Betrieb konnte eine betriebseigene Humusbilanz erstellen. Dies ermöglicht eine Einschätzung der eigenen Fruchtfolge/Düngung und gegebenenfalls eine Anpassung hin zu einer Humus-mehrenden Bewirtschaftung. Boden- sowie Wasseruntersuchungen und eine Düngebilanzierung rundeten die Aktivitäten ab.

Gleichzeitig ist es ein großes Anliegen, über Leistungen die von Landwirt*Innen zum Humusaufbau und Grundwasserschutz schon erbracht werden zu informieren. Denn der boden- und grundwasserschonende Anbau von Begrünungen hat nicht nur hohen ge-



Abbildung 1: Feldbegehung zu Untersaaten im Ölkürbis. © A. Oswald

sellschaftlichen Wert- er ist auch mit Kosten und Aufwand verbunden. Viele steirische Landwirt*Innen achten seit Jahren darauf, ihren Boden lebendig zu erhalten, und somit nachfolgenden Generationen eine Lebensgrundlage zu bieten.

Durch die Projektpartner Umweltbildungszentrum Steiermark sowie den Wasserverband Umland Graz wurden mit Schulen Workshops und Exkursionen durchgeführt. So erhielten bereits Kinder die Möglichkeit, sich mit den Themen Bodenleben und Grundwasser auseinanderzusetzen. Vom Umweltbildungszentrum Steiermark wurden darüber hinaus Unterrichtsmaterialien entwickelt, die künftig an Schulen zur selbstständigen Erarbeitung des Themas zur Verfügung gestellt werden können. Wurzelschaukästen bieten die Möglichkeit, unterirdische Entwicklungen langfristig mitzuverfolgen.

An 2 Standorten (Gössendorf und Premstätten) wurde je ein Lehrpfad erstellt, der z.B. die Themen Humusaufbau, Grundwasserschutz und Flächenversiegelung aufgreift und in aktuellen Zahlen darstellt. Dabei soll verdeutlicht werden, dass Boden abseits der Nahrungsmittelproduktion wichtige Funktionen hat, die durch die Arbeit der Landwirt*Innen erhalten werden.

Um dies noch deutlicher sichtbar zu machen, wurde eine Auszeichnung für landwirtschaftliche Betriebe geschaffen. Betriebe, die nachweislich eine positive Humusbilanz haben, werden in Zusammenarbeit mit der Landwirtschaftskammer Steiermark zu „WASSERSCHUTZBAUERN“ ausgezeichnet. So können sie den Aufwand in der Bewirtschaftung sowie dessen gesellschaftlichen Wert klar aufzeigen.

Um die Initiative lokal zu verankern und langfristig zu erhalten, wurde eine weitere Auszeichnung geschaffen: die Auszeichnung Wasserschutzgemeinde. Diese können alle Gemeinden erlangen, die besondere Maßnahmen zum Boden- und Grundwasserschutz ergreifen. Das Rahmenkonzept sieht vor, dass die Gemeinde allen landwirtschaftlichen Betrieben, die Mitglied im Verein der WASSERSCHUTZBAUERN sind, jährlich einen Zuschuss zum Einkauf von Begrünungssaatgut bezahlt. Im Gegenzug wird die Gemeinde als Wasserschutzgemeinde ausgezeichnet- um die Zusammenarbeit in der Öffentlichkeit darzustellen. Im Zuge dessen soll auch eine weitere Vernetzung und Austausch zwischen den Landwirt*Innen, Bewohnern, der Gemeinde und weiteren Parteien (Wasserversorger, Jäger usw.) stattfinden. So können lokale Schwerpunkte, wie beispielsweise Biodiversität oder Kreislaufwirtschaft, gesetzt werden. Über dieses Rahmenkonzept hinaus, sind individuelle Aktivitäten möglich.



Abbildung 2: Auszeichnung Wasserschutzgemeinde Gössendorf/Eröffnung Bodenlehrpfad. © A. Danner

Ausblick

Das Projekt hat im vergangenen Jahr guten Anklang gefunden. Die Aktivitäten werden nach Möglichkeit und dem Wunsch der beteiligten Betriebe sowie Gemeinden fortgesetzt. So sollen weitere Landwirt*Innen erreicht und begleitet werden. Auch die Öffentlichkeitsarbeit wird weiter Teil der Aktivitäten sein, da erfolgreiche Maßnahmen nur im Schulterschluss zwischen allen Betroffenen gesetzt werden können.

Literatur

Hatfield J., Sauer T., Cruse R. (2017) Chapter One - Soil: The Forgotten Piece of the Water, Food, Energy Nexus. *Advances in Agronomy* Vol 143, 1-46.

Klimaschutz und Klimawandelanpassung - Maßnahmen der Boden.Wasser.Schutz.-Beratung in Oberösterreich

Thomas Wallner^{1*}

Zusammenfassung

Die Boden.Wasser.Schutz.Beratung (LK OÖ) beschäftigt sich mit der Umsetzung von Maßnahmen, die auf Basis des Klimaschutzes bzw. auf Grund der Klimawandelanpassung notwendig werden. Im Rahmen der 56 Arbeitskreise Boden.Wasser.Schutz und bei Informationsveranstaltungen mit Ortsbauernschaften, Fachtagungen sowie mit Hilfe von Versuchen bzw. in Fachartikeln werden Möglichkeiten aufgezeigt, wie sich Bäuerinnen und Bauern an den Herausforderungen des Klimawandels anpassen können. Der Schwerpunkt liegt dabei in der Umsetzung neuer Anbaumethoden, wie z.B. Extensiver Begrünungsanbau, Untersaaten, Mulch- und Direktsaatverfahren bei Hackfrüchten sowie im Anbau neuer Kulturen, z.B. Hirse, die mit dem Klimawandel besser zurechtkommen.

Schlagwörter: Starkregen, Bodenschutz, Arbeitskreise

Summary

The Boden.Wasser.Schutz.Beratung (agricultural chamber Upper Austria) is engaged with the implementation of measures, which get necessary to adapt to climate change and climate protection. We provide our farmers information how they can handle the future challenges due to climate change by our 56 working groups Boden.Wasser.Schutz, talks with the so called „Ortsbauernschaft“, expert conferences, field trials and professional articles.

Therefore we mainly focus on introducing new cropping systems like extensive methods of catch crop cultivation, intercropping or mulch-based cropping systems and new arable crops that are more drought resistant as sorghum.

Keywords: climate change, soil protection

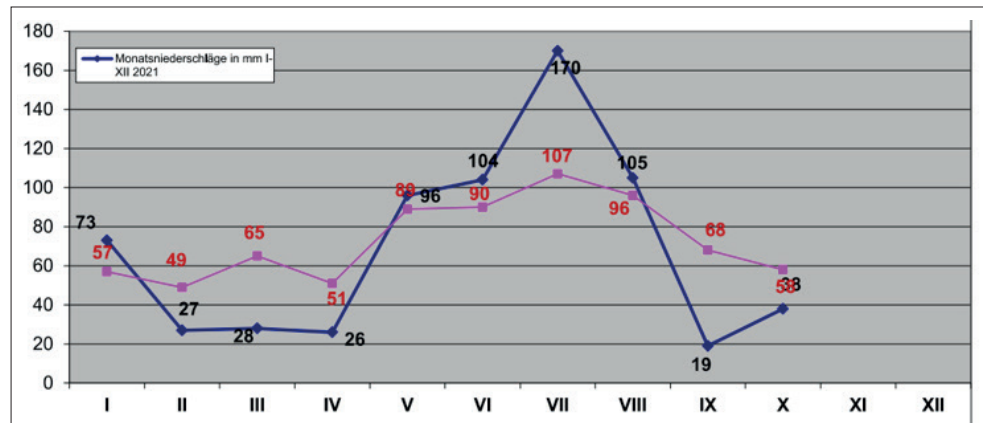
Die Boden.Wasser.Schutz.Beratung arbeitet im Auftrag des Landes OÖ an der Schnittstelle Landwirtschaft und Boden- bzw. Wasserschutz, wobei sich das fachliche Spektrum immer mehr auf das komplexe Thema Ressourcenschutz und Klimawandel (z.B. neue Kulturen wie z.B. Hirse) erweitert. Dabei wird überwiegend den Ansprüchen der Gesellschaft entsprochen, wohl wissend, dass die Boden.Wasser.Schutz.Beratung auch den Anforderungen der produzierenden Landwirtschaft gerecht werden muss.

Ein Schwerpunkt in der Beratung sind die 56 Arbeitskreise Boden.Wasser.Schutz. Die Themen in den Arbeitskreisen umfassen neben spezifischen Informationen zum Thema Boden- und Gewässerschutz Fragen zu optimierter Produktionstechnik (Anbau, Düngung, Pflanzenschutz, Zwischenfruchtbau) und Themen wie z.B. Bodenbearbeitung und Humusaufbau sowie Fragen zum Biolandbau und Klima (NEC-Richtlinie) und zur Klimawandelanpassung. Weiterführende Informationen können aus den jährlichen Geschäftsberichten entnommen werden, die unter www.bwsb.at zum Download bereit stehen.

¹ Landwirtschaftskammer OÖ, Boden.Wasser.Schutz.Beratung, Auf der Gugl 3, A-4021 LINZ

* Ansprechpartner: DI Thomas Wallner, email: bwsb@lk-ooe.at

Abbildung 1: Niederschlagswerte Oberösterreich (Linz) von Jänner 2021 - Oktober 2021 im Vergleich zum langjährigen Durchschnitt (Quelle: ZAMG).



Ein optimales Klima ist eine der wichtigsten Grundlagen für die erfolgreiche landwirtschaftliche Produktion. Aber vor allem in den vergangenen Jahren haben die Bäuerinnen und Bauern oft einen sorgenvollen Blick zum Himmel richten müssen. Der Klimawandel ist nicht mehr nur am Papier feststellbar, sondern für uns alle spürbar geworden. Im Jahr 2021 vernichteten beispielsweise Hagelunwetter auf dramatische Weise die wachsende Ernte auf Äckern und Wiesen, zerstörten Dächer und Fassaden von Haus und Hof. In den Jahren davor war es eher der regionale auftretende Wassermangel, der bei vielen Betrieben in einer Dürremeldung an ihre Versicherung endete. In der *Abbildung 1* ist ersichtlich, wie ungleich und sprunghaft sich als Beispiel die Niederschlagsverteilung in Oberösterreich (Linz) im Jahr 2021 dargestellt hat.

Der Landwirtschaftsbereich ist unmittelbar von diesen Ereignissen des Klimawandels betroffen. Hitze, Kälte, Trockenheit und Nässe haben sofortige Auswirkungen auf das Pflanzenwachstum. Der Landwirtschaftsbereich ist auch selbst Verursacher von klimaschädlichen Einflüssen (Treibhausgase), hat aber zugleich die Möglichkeiten, Lösungen anzubieten oder mindestens Reduktionsmaßnahmen einzusetzen.

Die Boden.Wasser.Schutz.Beratung hat sich seit einigen Jahren diesem Tätigungsfeld angenommen und sehr zielführende Maßnahmen und Lösungen für die Landwirtschaft entwickelt. Wichtig für eine breite Umsetzung durch die Landwirte und Landwirtinnen ist deren ergebnisorientierte, aber einfache und praxisnahe Handhabung.

Ein wesentlicher Beratungsschwerpunkt ist der Schutz der Oberflächengewässer vor Bodeneintrag durch Verminderung von Erosionen.

Unsere Böden dienen als CO₂-Speicher, das Gas gilt als klimarelevant. Ein Boden mit hohem Humusanteil kann viel CO₂ speichern, d.h. dass Dauergrünlandflächen oft mehr CO₂ einlagern können als Ackerböden. Je mehr Humusanteil ein Boden aufweist, umso attraktiver gilt er für das Bodenleben, umso besser ist das Wasserspeichervermögen und daher umso weniger anfällig ist der Boden für Erosionen.

Nachfolgend eine Auswahl von Maßnahmen zur Klimawandelanpassung:

- Extensiver Begrünungsanbau

Um die Humusgehalte am Acker zu steigern strebt man eine möglichst dauerhafte Bodenbedeckung durch Pflanzen an – eine gut entwickelte Zwischenfrucht ist oft das erste Mittel der Wahl. Doch auch bei den Begrünungen gibt es gravierende Unterschiede, die die Boden.Wasser.Schutz.Beratung im Rahmen zahlreicher Versuche aufzeigt. Eine gute Variante ist der „Extensive Begrünungsanbau“, z.B. die Mähdruschsaat. Hierbei wird direkt vor, bei oder nach der Getreideernte das Saatgut am Feld verteilt. Dies kann einerseits mit einem (pneumatischen) Düngerstreuer/Feinsamenstreuer vor der Ernte erfolgen, mit einem Feinsamenstreuer am Mähdröschler montiert direkt bei der Ernte geschehen oder im Anschluss an die Ernte als Direktsaat oder Striegelsaat. In Zukunft könnte der Zwischenfruchtanbau auch von einer Drohne, z.B. kurz vor der Getreideernte, übernommen werden. Versuche dazu sind in Planung.

Kultur	kg/ha	Mischungsanteil in %
Sommerwicke	10	6,3%
Alexandrinerklee	6	24%
Phacelia	3,5	26,9%
Mungo	0,5	5%
Sonnenblume	2	40%
Öllein	4	10%
Rauhafer	8	8%
Sorghum	5	33,3%
Summe kg/ha	39	
entspricht einer Saatstärke von		153,5%

Tabelle 1: Mischungsvorschlag für die Mähdruschsaat.

Das Stroh kann am Feld belassen werden, sollte aber fein gehäckselt sein. Wichtig ist nur eine gleichmäßige lockere Verteilung, das schafft optimale Keimbedingungen unter der Strohdecke. Zu beachten ist außerdem, dass vielfältige Mischungspartner verwendet werden (als Absicherung) und die Saatstärke um gut 30 – 50 % erhöht wird (siehe *Tabelle 1*).

Die Vorteile liegen auf der Hand: die Bodenbearbeitung entfällt und das spart Zeit und Kosten; der frühe Begrünungszeitraum ermöglicht ein längeres Wachstum der Begrünungskulturen; es erfolgt keine wendende Bodenbearbeitung und der Erosionsschutz ist dauerhaft gegeben; das Stickstoff-Auswaschungsrisiko entfällt fast.

- Untersaaten bei Mais

Eine weitere Möglichkeit bietet eine Untersaat, welche nicht nur Erosion verhindern kann, sondern auch ungenützte Bodenfläche bei Körnermais erschließt und Nährstoffe in organischer Substanz binden kann. Die Boden.Wasser.Schutz.Beratung testet jährlich verschiedene Untersaatvarianten und ermittelt positive, aber auch negative Auswirkungen auf Körnermais.

Bei der Anlage einer Untersaat steht die Schaffung eines aktiven Erosionsschutzes und eine bestmögliche Unkrautunterdrückung durch eine flächendeckende Bodenbedeckung im Vordergrund. Zusätzlich werden Nährstoffe zwischen den Reihen gespeichert, deren Auswaschung eine Gefahr für das Grundwasser darstellen könnte. Durch diese Aufschließung der ungenützten Fläche wird eine positive Auswirkung auf das Bodenleben und die Humusbilanz gewährleistet. Hinzu kommt, dass eine erfolgreiche Etablierung von Untersaaten die Tragfähigkeit der Böden erhöht und somit vor Strukturschäden bei späten Erntebedingungen schützen kann. Nicht zuletzt kann eine Untersaat eine mögliche Nahrungsquelle für Insekten und Wildtiere liefern und somit für eine Steigerung der Biodiversität sorgen.

- Maisbegleitsaaten

Wenn im Herbst die Felder nicht mehr begrünt werden können, zB nach Mais, dann stellt sich im Frühjahr die Frage des Erosionsschutzes. Der Maisanbau ist ohne Erosionsschutz nicht mehr denkbar. Mit Maisbegleitsaaten wurde in den letzten Jahren versucht, gefährdete Flächen bzw. bevorzugte Abflussbereiche bei Starkregenereignissen vor Erosion zu schützen. Die Boden.Wasser.Schutz.Beratung hat gemeinsam mit Landwirten in den letzten Jahren Versuche mit Maisbegleitsaaten durchgeführt. Dabei werden der Mais und die Begleitsaaten (z.B. Weizen, Hafer, u.a.) gleichzeitig oder kurz vor dem Mais angebaut.

Der Boden wird dadurch vor Erosion geschützt, bis der Mais selber den Boden durchwurzelt und bedeckt. Mais reagiert aber sehr empfindlich auf Konkurrenz. Die Fragen sind also: Was, wann und in welcher Saatstärke eignet sich als Begleitsaat. Die Begleitsaat soll dann im Zuge der chemischen Unkrautbekämpfung in ihrem Wachstum gestoppt werden und mit ihren abgestorbenen Pflanzen- und Wurzelmassen noch weitere Wochen den Erosionsschutz erfüllen.

Eine Maisbegleitsaat als generelle Maßnahme ist nicht Ziel der Versuche. Auf gefährdeten Flächen ist der Schutz vor Abschwemmung und Verlust von wertvollen Nährstoffen und Humus jedoch eine ganz wichtige Maßnahme. Begleitsaaten können eine gute Mulch- oder Direktsaat nicht ersetzen.

- Raps-Begleitsaaten

Durch Begleitsaaten im Raps werden im Wesentlichen zwei Ziele verfolgt: Reduzierung des Stickstoff-Düngeaufwandes durch Fixierung von Luftstickstoff durch Leguminosen und Reduktion des Pflanzenschutzaufwandes durch Vergrämung bzw. Ablenkung von Schadinsekten und Unkrautunterdrückung.

Es gilt noch weitere Erfahrungen zu sammeln, ob sich die prognostizierten Vorteile, nämlich Reduktion der Düngung, Unkrautunterdrückung (Vermeidung der auswaschungsgefährdeten Wirkstoffe Metazachlor (z.B. Butisan) und Dimethachlor (z.B. Colzor trio)), Steigerung der Winterhärte, Förderung von Bodenpilzen – Mykorrhiza, Steigerung der Biodiversität, etc. auch tatsächlich einstellen.

- Klimawandel – Hirse eine pflanzenbauliche Alternative, Projekt Klimatech

Weizen ist das wichtigste Getreide für Brot und (Fein-)Backwaren in Österreich. Der Klimawandel führt zu sehr langen heißen und trockenen Phasen, wie auch im Frühjahr 2020. Darunter leidet die Weizenqualität, aber auch die Erträge. Der geerntete Weizen enthält dann zu viel Eiweiß – sozusagen „zu viel des Guten“. Dadurch werden die Teige von Backwaren superelastisch – in der Fachsprache heißt das „bockig“. 75 Prozent des 2018 in Österreich geernteten Weizens wies für Backwaren zu hohe Proteingehalte, v.a. Glutenmengen auf.

Bei Brot und Gebäck wird die Backqualität durch Zugabe von Enzymen erhalten. Für Feinbackwaren (Kekse, Waffeln, Kuchen) ist dieses Mehl jedoch kaum mehr einsetzbar (hier gibt es schon den sog. Kekeweizen).

Im von der Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) geförderten Projekt Klimatech wird daher geforscht, wie Hirse und alternative Getreidefrüchte – die in Österreich auch unter Trockenbedingungen sehr gut wachsen – vermahlen und weiterverarbeitet werden können. Diese Mehle werden dann gemeinsam mit dem zu „kleberstarken“ Weizen zu stabilen Teigen verarbeitet.

Hirsemehl (von vornherein glutenfrei = ohne Kleber) dient da als Verdünnung des Mehls, um die Backqualität für Feinbackwaren zu erhalten bzw. zu steigern. Außerdem verbessert sich der Geschmack, es kann weniger Zucker beigemischt werden und das Frischhaltevermögen steigt.

Hirsens sind Kulturpflanzen, die ihren Ursprung im Mittelmeerraum und den südlichen Ländern Asiens haben. Jährlich werden weltweit etwa 90 Mio. Tonnen Hirse geerntet. Vor allem in Afrika und Asien ist Hirse heute noch eine der wichtigsten Getreidepflanzen. Aufgrund ihrer Abstammung kommt diese Kultur sehr gut mit trockenen und heißen Bedingungen zurecht und liefert auch in Trockenjahren stabile Erträge.

Die Boden.Wasser.Schutz.Beratung führt seit einigen Jahren die Landessortenversuche mit Sorghumhirse durch. Dabei werden verschiedene Sorten auf unterschiedlichen Standorten in Oberösterreich getestet und mittels Kerndrusch auf Ertrag ausgewertet.

Für das Forschungsprojekt „Klimatech“ wurde im Jahr 2020 Ernteware vom Versuchsstandort in Hörsching zur Verfügung gestellt. Diese wurde im Labor der HTLLMT Wels und BOKU Wien einer umfassenden Analyse unterzogen. Dabei stellten gewisse Sorten ihr Potenzial im Speisesektor deutlich unter Beweis. Es konnten auch schon einige Backwerke, wie z.B. Linzertorte, rein auf Basis von Hirse hergestellt werden.

Für den österreichischen Markt steckt die Hirse noch in den Kinderschuhen. Hierzulande werden ca. 7.500 Hektar Hirsens angebaut. Darum wird verstärkt auf Öffentlichkeitsarbeit gesetzt, um über den Mehrwert dieser Kultur aufzuklären. Neben zahlreichen Publikationen wurde am 7. November 2020 im ORF-Format „Land und Leute“ ein österreichweiter Beitrag mit dem Titel „Robuste Hirse“ ausgestrahlt.

Sowohl das Projekt als auch der Landessortenversuch werden in den nächsten Jahren fortgeführt. Als pflanzenbauliche Alternative, die auch in Backwaren ihre Verwendung findet, kann die Hirse eine mögliche Lösung auf sich ändernde klimatische Bedingungen bieten. Die Qualität der Produkte ist ausgezeichnet und vielleicht finden sich schon bald erste Backwaren mit Hirse in den heimischen Supermarktregalen.

- ERWINN – Erosions- und Wasserschutzinnovationsprojekt im Innviertel

Die Feinsediment- und Phosphorbelastung der oberösterreichischen Fließgewässer stellt gerade im Hinblick auf die starke Zunahme von Starkregenereignissen ein relevantes wasserwirtschaftliches und ökologisches Problem dar. So liegen z.B. die Phosphatphosphorkonzentrationen bei ca. einem Drittel der Gewässer Oberösterreichs über den Richtwerten für die Einhaltung des guten Gewässerzustandes. Die landwirtschaftliche Erosion stellt den Haupteintragspfad für Feinsedimente dar. Dieser Eintragspfad ist auch in den meisten Gewässern mit Überschreitung der Richtwerte für Phosphatphosphorkonzentrationen hauptverantwortlich für die Phosphoremissionen. Bei diesem Projekt geht es um die Erarbeitung von Grundlagen für Detailuntersuchungen zur Maßnahmenevaluierung von Erosionsschutzmaßnahmen in einem Pilotgebiet im Innviertel (OÖ). Um die Praktikabilität notwendiger, weitergehender Maßnahmenstrategien zu erproben, und ihre Wirksamkeit zu quantifizieren, sollen sie in einer Pilotregion getestet werden. Dabei sollen zahlreiche Erfahrungen aus der Sicht von Landwirtschaft, Beratung und Wissenschaft gesammelt werden.

