

Publizierbarer Endbericht

Gilt für Studien aus der Programmlinie Forschung

A) Projektdaten

Allgemeines zum Projekt	
Kurztitel:	Climagrocycle
Langtitel:	Consequences of climate change for agroecosystem Carbon and Nitrogen cycling
Zitiervorschlag:	Miloczki, J., Wawra, A., Berthold, H., Hösch, J., Prommer, J., Krammer, C., Murer, E., Strauss, P., Bruckner, A., Hood-Nowotny, R., Baumgarten, A., Spiegel, H., Leitner, S., Formayer, H. Watzinger, A. (2020). Climagrocycle. Consequences of climate change for agroecosystem Carbon and Nitrogen cycling. Endbericht.
Programm inkl. Jahr:	ACRP 9th Call for Proposals, 2016
Dauer:	01.04.2017 bis 30.09.2020
KoordinatorIn/ ProjekteinreicherIn:	AGES GmbH, Österreichische Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit GmbH
Kontaktperson Name:	Julia Miloczki
Kontaktperson Adresse:	Spargelfeldstraße 191 1220 Wien
Kontaktpers. Telefon:	+43 50555 - 34124
Kontaktperson E-Mail:	julia.miloczki@ages.at
Projekt- und KooperationspartnerIn (inkl. Bundesland):	BAW – Bundesamt für Wasserwirtschaft (NÖ) BOKU – Universität für Bodenkultur (Wien)
Schlagwörter:	Klimawandel, Nährstoffkreislauf, Isotopic labelling, Bodenwasserhaushalt, Bodenorganismen
Projektgesamtkosten:	267.529 €
Fördersumme:	241.906 €
Klimafonds-Nr:	B670 301
Erstellt am:	22.12.2020

B) Projektübersicht

1 Kurzfassung

Böden spielen eine wesentliche Rolle im globalen Kohlenstoff (C)-Kreislauf, da sie den größten Pool an terrestrischem C enthalten, und haben somit einen direkten Einfluss auf das Klima. Die Erhaltung der Ökosystemleistung "C-Speicher" der Böden ist daher ein wichtiger Aspekt des Klimaschutzes. Die komplexen Wechselwirkungen zwischen Temperatur, Niederschlag, Pflanzenwachstum und Nährstoffkreislauf sowie regionale Unterschiede und verschiedenen Bodentypen erschweren jedoch die Vorhersage der Auswirkungen des Klimawandels auf Böden und Pflanzenproduktion. Im Projekt "Climagrocycle" wurden die kombinierten Effekte von veränderten Niederschlägen und Bodentypen auf den Nährstoffkreislauf, das Pflanzenwachstum und das Bodenleben in der AGES-Lysimeteranlage in Wien untersucht.

Diese Anlage besteht aus 18 Gravitationslysimetern, welche die drei Hauptbodentypen des Marchfeldes repräsentieren, nämlich seichtgründigen Tschernosem (Ps), tiefgründigen Tschernosem (Ch) und Feuchtschwarzerde (Pg). Die Hälfte der Lysimeter wurde nach den aktuellen Niederschlagsmustern bewässert ("current") und die andere Hälfte nach dem für den Zeitraum 2071-2100 im pannonischen Raum prognostizierten Niederschlagsmuster, das Dürreperioden und Starkregenereignisse simuliert ("predicted"). Die Fruchtfolge in den Lysimetern bestand aus Sommerweizen, Zwischenfrucht Senf, Sommergerste und Winterweizen.

Mineralisierungsraten und Nährstoffkreisläufe wurden mit markiertem Stickstoff (N) und Kohlenstoff (^{15}N , ^{13}C) bewertet, die mit gemulchter Senfbiomasse in die oberen 10 cm des Bodens in einem umrahmten Segment ($0,25 \text{ m}^2$) der Lysimeter mit Ps- und Ch-Böden im Frühjahr 2018 eingearbeitet wurden. Gasförmige Emissionen, Boden-, Pflanzen- und Grundwasserproben wurden während der gesamten Vegetationsperiode 2018 und 2019 gesammelt und mit Hilfe der Isotopenverhältnis-Massenspektrometrie und einem im Feld installierten ^{15}N - N_2O -Isotopen-Laserspektrometer analysiert. Collembola und Oribatida wurden manuell ausgewertet und nach der Extraktion mit einer Berlese-Tullgren-Apparatur gezählt.

Die Simulation des Wasserhaushalts und des Stickstofftransports in verschiedenen Tiefen für jedes Lysimeter wurde mit dem Modell STOTRASIM durchgeführt. Die Ergebnisse zeigten eine reduzierte Wasserspeicherkapazität von Ps und reduzierte Erträge, doch das Grundwasser wurde in diesem Bodentyp aufgefüllt. Im Gegensatz dazu speicherten Pg und Ch Wasser und produzierten höhere Erträge, aber nach zwei Jahren mit reduzierten Niederschlägen wurde das Grundwasserreservoir nicht mehr aufgefüllt. Im Vergleich zum aktuellen Szenario waren die modellierten Erträge von Sommerweizen unter den vorhergesagten Niederschlägen niedriger, im Durchschnitt um 32 % für Pg, 42 % für Ps und 25 % für Ch. Die Erträge von Sommergerste im vorhergesagten Szenario waren im Vergleich zum aktuellen Szenario mit 11% für Ch und Pg und mit 21% für Ps niedriger. Die berechneten Erträge

von Winterweizen im vorhergesagten Szenario waren im Vergleich zum aktuellen Szenario um 17% niedriger für Ch und 5% niedriger für Pg und um 2% höher für Ps. Der geringe Unterschied dürfte darauf beruhen, dass in der Anwuchsphase (Okt. 18 – März. 19) im vorhergesagten Szenario sogar mehr Regen errechnet wurde, als im aktuellen. Ansonsten war der Wasserstressfaktor für den Bodentyp Ps sehr hoch.

In Bezug auf die gemessenen Pflanzenerträge führten Trockenperioden zu einem signifikanten Rückgang der Biomasseproduktion von Korn und Spreu und tendenziell zu einer Abnahme der Strohbiomasse. In ähnlicher Weise nahm die Beikrautbiomasse in den Lysimetern unter dem vorhergesagten Niederschlagsszenario signifikant ab, während wir keinen eindeutigen Effekt auf die Abundanz der Beikrautarten feststellen konnten. Die Stickstoffnutzungseffizienz wurde nur im Jahr 2017 in Pg signifikant vom Niederschlag beeinflusst und war bei Winterweizen am höchsten (2019). Tendenziell war die Zersetzung unter dem vorhergesagten Niederschlag in Ch und Pg langsamer, was darauf hindeutet, dass das Niederschlagsmuster unterschiedliche Effekte auf die Zersetzung organischen Materials in verschieden strukturierten Böden hat.

Hinsichtlich der Reaktionen der Mesofauna fanden wir signifikante Auswirkungen sowohl des Bodentyps als auch der Bewässerung auf die Gesamtzahl der Oribatiden-Milben, wobei sich in Ch-Böden etwa dreimal mehr Individuen befanden als in Ps-Böden, was auf günstige Bedingungen für Milben schließen lässt.

Die mikrobielle Gemeinschaft im Boden, die mit hoher taxonomischer Auflösung (Stamm, Klasse und Ordnung) analysiert wurde, verhielt sich resistent gegenüber dem Niederschlagsregime. Allerdings zeigte das Isotopenmarkierungs-Experiment, dass mikrobielle Nährstoffkreisläufe, wie z.B. die Mineralisierung von frisch zugegebenem Gründünger und die Denitrifikation, unter dem vorhergesagten Niederschlagsregime verlangsamt werden. Die verringerte Pflanzenproduktion bedingte eine verringerte Stickstoffaufnahme durch die Pflanzen, welche wiederum zu einer Anreicherung von verfügbarem mineralisierten Stickstoff im Boden führte. Wir schätzten die Abnahme der pflanzlichen Biomasse und somit der Stickstoffaufnahme und des Kohlenstoffeintrags als Folge des vorhergesagten Niederschlagsmusters als den dominierenden Faktor im Kohlen- und Stickstoffkreislauf ein. Die Auswirkung des verringerten Abbaus organischer Substanz wurde nachgewiesen, ist aber von sekundärer Bedeutung. Die Heterogenität zwischen den Lysimetern und die geringe Anzahl an Replikaten erlaubten jedoch keine Quantifizierung des veränderten Kohlenstoff- und Stickstoffumsatzes im Boden/Pflanzensystem.

Da Trockenheit der häufigste abiotische Stressfaktor in Ost- und Mitteleuropa ist, der enorme Ertragseinbußen verursachen kann, tragen unsere Ergebnisse zur Erforschung des Klimawandels und der Ernährungssicherheit bei. Weitere Studien zu den Auswirkungen des Klimawandels auf Agrarökosysteme sind erforderlich, wobei lokale pedoklimatische Unterschiede zu berücksichtigen sind und besonderes Augenmerk auf Bewässerungsstrategien liegen sollte.

2 Executive Summary

Soils play an essential role in the global carbon (C) cycle, containing the largest pool of terrestrial C, and consequently have a direct effect on the climate. Preserving the soils' ecosystem service "C storage" is thus an important aspect of climate protection. However, the complex interactions between temperature, precipitation, plant growth and nutrient cycling, as well as variations between regions and different soil types make the prediction of the combined effects of climate change on soils and crop growth difficult and stresses the importance of investigating these interactions. In the project "Climagrocycle", the combined effects of altered precipitation and soil types on nutrient cycling, plant growth and soil biota were investigated in the AGES lysimeter facility in Vienna. This facility consists of 18 gravitation lysimeters representing the three main soil types of the Marchfeld region, namely calcaric phaeozem (Ps), calcic chernozem (Ch) and gleyic phaeozem (Pg). Half of the lysimeters were irrigated according to current precipitation patterns ("current scenario") and half were irrigated according to the precipitation pattern predicted for the period 2071-2100 in the Pannonian region, simulating drought periods and heavy rain events ("predicted scenario"). Spring wheat, spring barley and winter wheat were cultivated in all lysimeters in 2017, 2018 and 2019, respectively.

Mineralisation rates and nutrient cycling was assessed with labelled nitrogen (N) and carbon (^{15}N , ^{13}C), which were incorporated with mustard residues into the upper 10 cm of topsoil in a small framed segment (0.25 m²) of lysimeters containing Ps and Ch soils in spring 2018. Soil water was collected when available and gas samples (CO₂, N₂O) were taken regularly in the field. Collembola and Oribatida were picked manually and counted after extraction through a Berlese-Tullgren apparatus.

The simulation of the water balance and nitrogen transport in different depths for every Lysimeter was performed by the model STOTRASIM. The results showed a reduced water storage capacity of Ps and reduced yields, but the groundwater was recharged. In contrast, Pg and Ch stored water and produced higher yields, but after two years of reduced precipitation, the groundwater reservoir was no longer refilled.

Compared with the current scenario, the modelled yields of summer wheat under predicted precipitation were lower, on average by 32% for Pg, 42% for Ps and 25% for Ch. The yields of summer barley in the predicted scenario were lower compared to the current scenario with 11% for Ch and Pg and with 21% for Ps.

The computed yields of winter wheat in the predicted scenario were 17% lower for Ch and 5% lower for Pg and 2% higher for Ps, compared to the current scenario.

This might be due to the higher rain sum for the predicted than the current scenario during the plant growth period. Otherwise, the water stress factor was very high for soil type Ps.

With respect to measured plant yields, drought events resulted in a significant decline in biomass production of grain and chaff and tended to decrease straw biomass. Similarly, weed biomass decreased significantly under the predicted rainfall scenario, whereas we did not find a clear effect on weed species abundance in the lysimeters.

Nitrogen use efficiency was significantly influenced by precipitation only in 2017 in Pg and was found to be highest in winter wheat (2019). Decomposition of organic material tended to be slower under predicted precipitation in Ch and Pg soils compared to the sandy Ps, indicating an effect of soil structure on decomposition.

Regarding the responses of mesofauna, we found significant effects of both soil type and irrigation on the total number of oribatid mites and approximately three times more individuals were located in Ch than in Ps soil, suggesting favourable conditions for mites.

The soil microbial community monitored at high taxonomic resolution (phylum, class and order) behaved resistant to the precipitation regime. However, microbial mediated nutrient transfer processes, such as mineralisation of freshly added green manure and denitrification, were slowed down under the predicted precipitation regime, as exemplified in the stable isotope labelling experiment. Additionally, decreased crop production will likely result in reduced nitrogen uptake by plants, leading to a prolonged availability of nitrogen added through plant residues. We estimated the reduction in plant biomass (nitrogen uptake and carbon input) to be the dominant factor controlling the soil carbon and nitrogen cycle. Decrease of the organic matter decomposition as a result of the predicted rainfall pattern was confirmed, but estimated to be of secondary importance. Unfortunately, heterogeneity between lysimeters and low number of replicates did not allow the quantification of the changes in the soil carbon and nitrogen turnover.

Since drought is the most common abiotic stress factor in Eastern and Central Europe, which can cause enormous yield losses, our results contribute to climate change research and food security. Further research on climate change effects on nutrient dynamics, soil (water) processes and soil plant interactions is needed, taking into consideration local pedoclimatic characteristics. Particular attention should be given, for example, to optimising irrigation strategies, increasing the resilience of cropping systems to climate change, and soil water and nutrient dynamics under climate change.

3 Hintergrund und Zielsetzung

3.1 Ausgangssituation & Motivation des Projekts

Böden spielen eine wesentliche Rolle im Kohlenstoff (C)-Kreislauf, da sie den größten Vorrat an terrestrischem Kohlenstoff enthalten, und haben daher einen direkten Einfluss auf das Klima. Die Menge an CO₂, die jedes Jahr aus den Böden in die Atmosphäre gelangt, übersteigt die durch fossile Brennstoffe verursachten Emissionen erheblich, doch in der Regel werden auch die gleichen Mengen von den Böden aufgenommen. Die Erhaltung der Ökosystemdienstleistung "C-Speicherung" der Böden ist daher ein wichtiger Aspekt des Klimaschutzes. Daher kann eine geeignete Bodenbewirtschaftung dazu beitragen, die Menge des aufgenommenen Kohlenstoffs zu erhalten und/oder zu erhöhen und damit den Klimaschutz zu unterstützen. Jedoch machen die komplexen Wechselwirkungen zwischen Temperatur, Feuchtigkeit, Pflanzenwachstum und -abbau sowie Unterschiede zwischen Regionen und verschiedenen Bodentypen die Vorhersage der kombinierten Auswirkungen des Klimawandels auf Böden schwierig und unterstreichen die Bedeutung der Erforschung dieser Wechselwirkungen und eines langfristigen Boden-Monitorings. Die Untersuchung dieser Wechselbeziehungen wird in Lysimeteranlagen ermöglicht, da sie kontrollierte Bedingungen und ausgewählte Niederschlagsregime gewähren.

3.2 Ziele des Projekts

Übergeordnetes Ziel der Studie war es zu analysieren, wie unterschiedliche Niederschlagsszenarien (aktueller vs. prognostizierter Niederschlag) und verschiedene Bodentypen den Nährstoffumsatz im Boden und die nachfolgende Pflanzenaufnahme mineralisierter organischer Substanz beeinflussen. Die Studie wurde in der Lysimeteranlage der AGES in Wien durchgeführt, welche die drei wichtigsten Bodentypen der Region Marchfeld enthält. Untersucht wurden Parameter, welche die Mineralisierung von organischem Material, die Abundanz und Diversität ausgewählter Boden-Mesofauna und die mikrobielle Bodenaktivität in Kombination mit Wachstum und Produktion von Nutzpflanzen und Beikräutern beeinflussen. Die Einarbeitung von ¹³C- und ¹⁵N-markiertem Pflanzenmaterial lieferte Einblicke in die Mineralisierungsraten und Nährstoffzyklen des Systems. Im Hinblick auf bodenhydrologische Fragen wurde die Prognose des Bodenwasser- und Nitratregimes und des Ernteertrags für die beiden Niederschlagsszenarien und drei Bodentypen mit dem Modell STOTRASIM angestrebt.

4 Projektinhalt und Ergebnisse

4.1 Vorhersage des Bodenwasser- und Nitrathaushalts und der Ernteerträge

(adaptiert übernommen von Krammer (2020))

Modellierung Sickerwasser

Die mit STOTRASIM errechneten Sickerwassermengen sind für beide Szenarien und drei Bodentypen in Abbildung 8 und Abbildung 9 im Anhang dargestellt.

Die durchschnittliche Regenmenge im Zeitintervall 2017 – 2019 beträgt 431 mm für die Variante „current“ und 342 mm für die Variante „predicted“ (Tabelle 1). Die höchste Menge an Sickerwasser (in 220 cm Bodentiefe) im Zeitintervall 2017 – 2019 wurde im Profil des Bodentyps Pg (Feuchtschwarzerde) gefunden als in den Bodenprofilen von Ps (seichtgründiger Phaeozem) und Ch (tiefgründiger Phaeozem). Zwischen den verschiedenen Regenszenarien traten keine Unterschiede in der Sickerwassermenge auf.

Tabelle 1: Mittlere Sickerwassermengen der Jahre 2017 – 2019 der Szenarien „current“ und „predicted“ (mm/a)

Bodentyp	Pg		Ps		Ch	
variants 2017-2019	“curr”	“pred”	“curr”	“pred”	“curr”	“pred”
rain & irrigation (mm)	426	337	433	344	435	344
Et (mm)	476	392	451	363	494	411
seepage (mm)	6.2	6.4	5.6	5.6	3.0	3.0

Im Zeitraum 2017 – 2019 nahm die Menge an Sickerwasser kontinuierlich ab (Tabelle 10). Es ergab sich folgende Reihung der Sickerwassermengen: Pg > Ch > Ps im Jahr 2017, Ps > Pg > Ch im Jahr 2018 und Ps > Ch > Pg im Jahr 2019. Dies betraf sowohl die Variante „current“ als auch die Variante „predicted“. Beim Vergleich der Sickerwassermenge für beide Szenarien muss festgestellt werden, dass das Regenmuster des „predicted“ Szenarios in den Jahren 2017 und 2018 für den Bodentyp Pg im Vergleich zum „current“ Szenario höhere Werte ergab.

Berechnete Bodenwassergehalte

Aufgrund seiner geringen Feldkapazität wies der Ps-Boden im Vergleich zu den anderen Böden einen geringeren Wassergehalt auf. Der höchste Wassergehalt wurde in Pg gefunden, gefolgt von Ch. Zu Beginn des Versuchs betrug der Wassergehalt des Bodenprofils für beide Szenarien 250 mm für Ps, 505 mm für Ch und 641 mm für Pg. In der kurzen Zeit nach Beginn des Versuchs im Jahr 2017 zeigte der Bodenwassergehalt für alle drei Bodentypen einen abnehmenden Trend. Die

geringe Niederschlagsmenge, der Pflanzenwasserbedarf während der Vegetationsperiode sowie die Evapotranspiration führten zu einer Reduzierung des Bodenwassergehalts. Der Bodenwassergehalt für Boden Ps lag bereits zu Beginn des Versuchs unter dem Wert der nutzbaren Feldkapazität (Tabelle 2). Für die Bodentypen Ch und Pg blieb der Wasserbedarf der Pflanzen bis zum Ende des Versuchs gedeckt.

Tabelle 2: Bodenwassereigenschaften (0-180 cm), nach Stenitzer & Hösch (2007). FK: Feldkapazität. nFK: nutzbare Feldkapazität.

Bodentyp	FK (mm)	nFK (mm)
Ch	587	423
Pg	632	373
Ps	322	262

Die Pflanzen, die auf dem Bodentyp Ps angebaut wurden, litten unter Wasserstress und ihre Wurzeln erreichten nur eine Tiefe von 40 cm. Im Vergleich zum Beginn des Versuchs war der Bodenwassergehalt für beide Szenarios am Ende niedriger und ergab eine Menge von 177 – 176 mm für Ps, 495 - 482 mm für Pg und 333 - 293 mm für Ch. Der zeitliche Verlauf des Wassergehalts und der Wurzeltiefen der Nutzpflanzen ist in den Abbildung 10 bis Abbildung 12 im Anhang dargestellt.

Modellierter Nitrattransport und Stickstoffbilanz

Die Berechnung der potentiellen N-Verluste und NO_3 -Konzentrationen (Tabelle 11) zeigte, dass die Gesamtmenge der N-Verluste in der Bilanzierungstiefe in beiden Szenarien und für alle Bodentypen (Ch, Pg und Ps) Null war. Dies bedeutet, dass die Perkolation so gering war, dass der Massentransport nicht die im Modell für die Wasser- und Massentransportbilanz angenommene Tiefe erreichte. Die vom Modell für unterschiedliche Bodentiefe simulierte NO_3 -Konzentration (in mg / l) zeigt, dass in einer maximalen Bodentiefe von 1,40 m in den Bodentypen Ps und Ch, gerade noch sehr niedrige N-Werte zu finden sind, für den Boden Pg liegt diese maximale Tiefe mit verfügbarem Stickstoff bei 1,90 m. Die berechneten maximalen Wurzeltiefen während unseres Experiments erreichten 40 cm für Ps, 135 cm für Ch und 181 für Pg. Die modellierten N-Verluste ergaben ein Maximum im dritten Versuchsjahr. Im „predicted“ Szenario sind die Werte im Vergleich zum „current“ Szenario niedriger. Unter Berücksichtigung der NO_3 -Konzentrationen in 90 cm Bodentiefe und deren Einstufung von den höchsten zu den niedrigsten Verlusten ergibt sich die Reihung Pg > Ch > Ps.

Die durchschnittlichen N-Bilanzen, basierend auf Erträgen, Düngung und N-Auswaschung sind in Tabelle 12 (Anhang) angegeben. Im Jahr 2017 wurden für alle drei Bodentypen (Sommerweizen) positive N-Bilanzen berechnet, was darauf hinweist, dass die Pflanzen Nitrat aus den Bodenreserven entnommen haben.

Modellierte Erträge

Alle drei in diesem Experiment getesteten Kulturpflanzenarten reagieren auf Niederschlagsmuster, Wasserstress und Bodentypen, wie in

Tabelle 3 und Abbildung 13 dargestellt. Der Wasserstressfaktor von STOTRASIM gilt als pflanzenspezifisch und ist ein Maß für den Wassermangel. Es sollte interpretiert werden als:

Stressfaktor < 1 Bodenwasser fehlt

Stressfaktor = 1 es steht genügend Bodenwasser zur Verfügung (100%).

Die durchschnittlichen Erträge des Bodentyps Ps sind im Vergleich zu Ch und Pg konstant niedriger. Die Erträge des „predicted“ Szenarios waren im Vergleich zum „current“ Szenario im Allgemeinen niedriger. Für beide Szenarien ist der niedrigste Wasserstress auf dem Bodentyp Ch und der höchste auf Ps zu finden. Im Vergleich zum „current“ Szenario sind die Erträge von Sommerweizen im „predicted“ Szenario niedriger, durchschnittlich um 32% für Pg, 42% für Ps und 25% für Ch. Die Erträge von Sommergerste im „predicted“ Szenario sind niedriger als im „current“ Szenario und zwar um 11% für Ch und Pg und 21% für Ps. Winterweizen weist im „predicted“ Szenario 2% höhere Erträge für Ps und niedrigere Erträge (17%) für Ch und Pg (5%) im Vergleich zum „current“ Szenario auf.

Tabelle 3: Berechnete Erträge (kg TM/ha) und Stressfaktor

	Jahr	2017		2018		2019	
Boden-typ	Lys	Sommer Weizen	Stress-faktor	Sommer Gerste	Stress-faktor	Winter Weizen	Stress-faktor
Current							
Pg	CF02	6457	0,88	7265	0,98	6682	0,95
Pg	CF08	6457	0,88	6926	0,95	6396	0,94
Pq	CF14	6457	0,88	6600	0,92	6252	0,94
Ps	CS04	4168	0,63	5318	0,57	3283	0,67
Ps	CS10	4168	0,63	5770	0,71	3475	0,69
Ps	CS16	4168	0,63	5840	0,74	3524	0,69
Ch	CT06	7886	0,99	7453	1,00	7719	1,00
Ch	CT12	7886	0,99	7783	1,00	7962	1,00
Ch	CT18	7889	0,99	8081	1,00	8554	1,00
Predicted							
Pq	DF05	4395	0,66	6415	0,95	6259	0,95

Pg	DF11	4395	0,66	5662	0,81	5783	0,93
Pg	DF17	4395	0,66	6354	0,93	6259	0,95
Ps	DS01	2431	0,37	4558	0,40	3423	0,66
Ps	DS07	2431	0,37	4521	0,28	3524	0,21
Ps	DS13	2431	0,37	4337	0,32	3413	0,20
Ch	DT03	5926	0,75	7032	1,00	6913	0,99
Ch	DT09	5926	0,75	6821	0,99	6514	0,97
Ch	DT15	5926	0,75	6845	0,99	6554	0,97

4.2 Auswirkungen von Niederschlagsszenarien auf Nutzpflanzen, Beikräuter, Mesofauna und Zersetzung

Reaktion von Nutzpflanzen auf prognostizierte Niederschlagsmuster

Die Daten zur pflanzlichen Biomasse wurden auf Basis des Trockengewichts berechnet und durch Kombination der Ernten von gelabelten und nicht gelabelten Parzellen jedes Lysimeters aufsummiert und als Gramm Biomasse pro Quadratmeter, getrennt nach Halm, Korn und Spreu, angegeben. Aufgrund schlechter Pflanzenleistung und technischer Probleme mit den Lysimetern, die mit tiefgründigem Phäozem (Pg) befüllt waren, wurden Pflanzen dieses Bodentyps nur 2017 und 2019 geerntet; Pflanzen von sandigem Phäozem (Ps) und Chernozem- (Ch) wurden 2017, 2018 und 2019 geerntet. Winterweizen übertrifft die Ernten von Sommerweizen und Sommergerste auf allen Bodentypen und unter beiden Niederschlagsregimen bei weitem.

Die Ernteerträge von Halm, Korn und Spreu waren ungleichmäßig von Niederschlagsregime und Bodentyp pro Jahr und damit von der Kulturart betroffen. Allerdings führten Trockenereignisse erwartungsgemäß immer zu einem deutlichen Rückgang der Biomasseproduktion. Unabhängig von der Pflanzenart nahmen Spreu- und Körnerbiomasse unter Trockenstress signifikant ab, und auch die Halmbiomasse nahm tendenziell unter trockenen Bedingungen ab. Die Kornproduktion war auf Ch-Boden am höchsten, vermutlich aufgrund der höheren Wasserhalte- und Nährstoffbereitstellungskapazität dieses Bodentyps (Tataw et al. 2016). Dies wird auch durch die höhere Aggregatstabilität in Ch im Vergleich zu den anderen Bodentypen unterstützt (Anhang Tabelle 16), da dieser Parameter für die Infiltration und den Nährstoffkreislauf entscheidend ist.

Insgesamt unterschieden sich die Ernteverluste, berechnet als prozentualer Verlust an Pflanzenbiomasse jeder Pflanzenkomponente in den „predicted“ Lysimetern relativ zu den „current“ Lysimetern, nicht zwischen den Jahren und Bodentypen. Die folgenden Ergebnisse konzentrieren sich hauptsächlich auf Ps- und Ch-Lysimeter aufgrund der oben erwähnten Probleme mit den Pg-Lysimetern und als Folge

davon deren Ausschluss aus dem Isotopenexperiment. Obwohl die Produktion von Kornbiomasse als Reaktion auf die Trockenheit signifikant zurückging, änderte sich der Stickstoffgehalt des Korns zwischen den aktuellen und den vorhergesagten Niederschlagsmustern nicht, was auf keinen Qualitätsverlust des Korns hinweist.

Reaktion der Beikräuter auf prognostizierte Niederschläge

Beikräuter wurden von Hand geerntet und ihre Biomasse (in den Jahren 2018 und 2019) und Artenzahl (2017, 2018 und 2019) wurden pro Lysimeterparzelle bestimmt, um die Auswirkungen von Bodentyp und Niederschlag zu bewerten. Insgesamt war die Beikrautbiomasse im Jahr 2019 deutlich geringer (2 - 44 g DW/m²) als im Jahr 2018 (44 - 215 g DW/m²) und es wurden signifikante Effekte für das Probenahmejahr und das Niederschlagsszenario gefunden. Das Niederschlagsregime hatte auch im Jahr 2019 einen signifikanten Effekt mit sehr großen Unterschieden in den Bodentypen Ch und Ps (Abbildung 1). Im Jahr 2018 erkannte man eine Tendenz, dass das prognostizierte Szenario eine geringere Beikrautbiomasse aufweist als das aktuelle Szenario. Folglich hemmten die eingeschränkten Wasserbedingungen im vorhergesagten Szenario das Wachstum der Beikräuter, vergleichbar mit dem Wachstum der Nutzpflanzen in unserem Projekt.

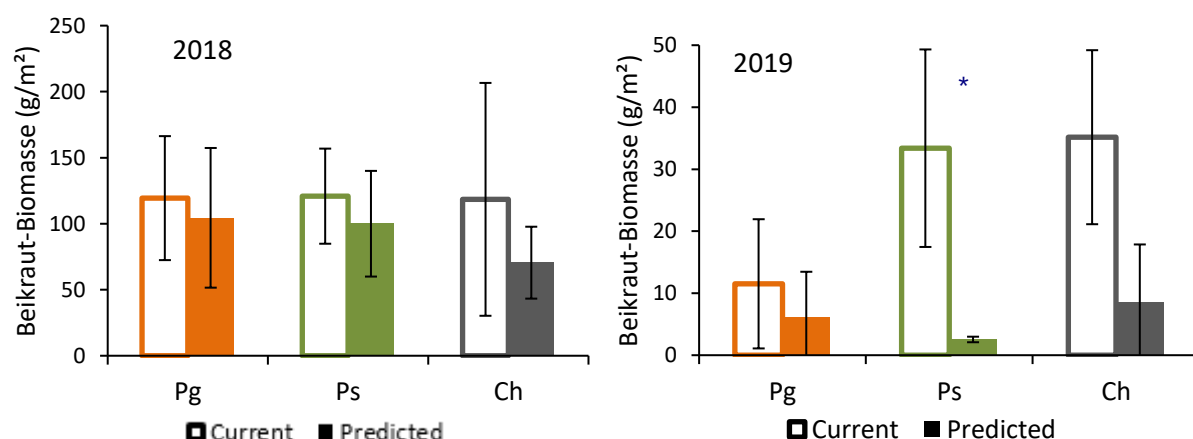


Abbildung 1. Beikraut-Biomasse pro Bodentyp und Niederschlagsszenario in 2018 und 2019. Signifikante Unterschiede sind mit einem Sternchen gekennzeichnet

Hinsichtlich der Abundanz der Beikräuter (Anzahl verschiedener Beikrautarten pro Bodentyp und Niederschlagsszenario) wurden zwischen den Jahren unterschiedliche Trends festgestellt. In den Jahren 2017 und 2018 brachte das Zukunftsszenario tendenziell mehr Arten hervor, während im Jahr 2019 die Abundanz im aktuellen Szenario in Pg und Ps höher war (Tabelle 4). Dieser Unterschied könnte auf einen kombinierten Effekt aus den Konkurrenzfähigkeiten der Pflanzen und den Witterungsbedingungen zurückzuführen sein. In Bezug auf den Bodentyp wuchsen 2017 und 2018 mehr Arten in Ch als in Pg und Ps. Zusammenfassend lässt sich

sagen, dass es weder einen eindeutigen Einfluss des Niederschlags noch des Bodentyps auf die Abundanz der Beikräuter zu geben scheint. Die identifizierten Unkrautarten pro Bodentyp sind im Anhang in Tabelle 13 aufgelistet.

Tabelle 4. Im Sommer 2017, 2018 und 2019 ermittelte Abundanz von Unkräutern für verschiedene Bodentypen unter aktuellen und zukünftigen Niederschlagsmustern.

crop (year)	soil					
	Pg		Ps		Ch	
	C	D	C	D	C	D
summer wheat (2017)	7	4	4	6	9	11
summer barley (2018)	9	10	7	8	11	11
winter wheat (2019)	13	9	14	10	11	11

Stickstoffkreislauf durch Nutzpflanzen unter verschiedenen Szenarien

Die Nährstoffaufnahme kann als Maß für die Reaktion der Pflanzen auf Bewirtschaftung und/oder Umweltbedingungen interpretiert werden. In unseren Experimenten wurde die Stickstoffaufnahme durch Nutzpflanzen weder durch die Niederschlagsbehandlung noch durch den Boden signifikant beeinflusst. Die Stickstoffaufnahme der Pflanzen nahm jedoch mit der Zeit signifikant zu und war im Jahr 2019 am höchsten, was den Anstieg der Produktivität von Sommerweizen über Sommergerste zu Winterweizen widerspiegelt, unabhängig vom Niederschlagsregime.

Die Stickstoffnutzungseffizienz (NUE) wurde als Prozentsatz des N-Düngers berechnet, der von der Pflanze aufgenommen wurde ($NUE = N\text{-Abfuhr} / N\text{-Düngung}$). Zum einen waren große Unterschiede der NUE zwischen den Jahren zu sehen, wobei sie im Sommerweizen 2017 am niedrigsten ist (Tabelle 5). Die NUE ist im Jahr mit der höchsten N-Düngergabe (2019) am höchsten, was dem üblichen Effekt der abnehmenden NUE bei steigender N-Düngung widerspricht (Spiegel et al., 2020). Dies könnte auf die hohen Temperaturen im Jahr 2017 und die daraus resultierende hohe Evapotranspiration zurückzuführen sein, die die Nährstoffaufnahme durch die Pflanzen behindert, als auch durch die bessere Wassernutzung von Winterweizen.

Zum anderen gibt es einen allgemeinen Trend, dass die NUE des aktuellen Szenarios höher ist als die des prognostizierten Szenarios, wobei dieser nur für Pg im Jahr 2017 signifikant ist ($p < 0,01$). Dieser Effekt steht im Einklang mit den Erwartungen, da das Bodenwasser für den Nährstofftransport verantwortlich ist und unter trockenen Bedingungen der Nährstofftransport und damit die Nährstoffaufnahme gehemmt werden. Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass der prognostizierte Trockenstress unter klimatischen Veränderungen negative Auswirkungen auf die Nährstoffnutzungseffizienz und den Ernteertrag haben wird (wie bereits hier ge-

zeigt). Die Unterschiede zwischen den Bodentypen sind im Jahresverlauf nicht kohärent, wobei diese Interpretation aufgrund fehlender N-Werte für Pg in 2018 und 2019 unvollständig ist.

Tabelle 5: Stickstoffnutzungseffizienz (%) pro Jahr. Angegeben sind die Durchschnittswerte (Standardabweichung in Klammern) von N-Abfuhr/N-Düngung. Signifikante Unterschiede zwischen den Niederschlagsszenarien sind fett gedruckt.

crop (year)	soil					
	Pg		Ps		Ch	
	C	D	C	D	C	D
summer wheat (2017)	33 (7)	10 (2)	42 (18)	22 (17)	23 (7)	9 (9)
	p<0.01					
summer barley (2018)			81 (44)	39 (31)	94 (25)	68 (21)
winter wheat (2019)			115 (18)	79 (14)	115 (29)	139 (58)

Mögliche Auswirkungen auf die Zersetzung

Die Zersetzung, als Bindeglied zwischen Bodenbiota und Nährstoffverfügbarkeit, ist empfindlich gegenüber Temperatur- und Feuchtigkeitsbedingungen. Hinsichtlich der Zersetzungsparameter, gemessen mit dem Teebeutel-Index (TBI) im Frühjahr 2019, wurde der Stabilisierungsfaktor S signifikant vom Niederschlag beeinflusst ($p<0,05$) und unterschied sich signifikant zwischen den Böden Ps und Pg ($p<0,01$) (Anhang Tabelle 15). Die Bodentypen Ch und Pg zeigten ein ähnliches Verhalten mit höheren S im vorhergesagten Szenario (Tabelle6), was darauf hindeutet, dass unter trockenen Bedingungen in diesen Böden mehr labiles organisches Material stabilisiert wird. Ergänzend dazu ist die Zersetzungsrate k im trockenen Szenario in diesen beiden Bodentypen niedriger, was bedeutet, dass die Zersetzung langsamer abläuft als im aktuellen Szenario. Sehr trockene Böden können die Zersetzung aufgrund ungünstiger Bedingungen für Mikroorganismen verlangsamen (Schimel, 2018). Diese Unterschiede sind jedoch nicht signifikant. Im sandigen Boden (Ps) schien die Zersetzung unter den vorhergesagten Bedingungen schneller zu erfolgen. Aus früheren Ergebnissen des TBI in verschiedenen pedoklimatischen Zonen ist bekannt, dass die Bodentextur einen erheblichen Einfluss auf k hat, was den Unterschied zwischen den Bodentypen hier erklären könnte.

Tabelle 6. Stabilisierungsfaktor (S) und Abbaurate (k) als Proxy für die Zersetzung in den Lysimetern, analysiert pro Bodentyp und Niederschlagsszenario. C: aktueller Niederschlag. D: prognostizierter Niederschlag.

	Soil					
	Pg		Ps		Ch	
	C	D	C	D	C	D
Stabilisation factor (S)	0.42 (0.018)	0.45 (0.013)	0.356 (0.015)	0.038 (0.039)	0.38 (0.024)	0.43 (0.038)
Decomposition rate (k)	0.015 (0.0015)	0.013 (0.004)	0.017 (0.0017)	0.017 (0.0008)	0.016 (0.003)	0.015 (0.002)

Im Hinblick auf andere Bodenparametern wurden pH-Wert, Magnesium, Natrium und C:N-Verhältnis signifikant ($p < 0.05$) vom Niederschlag beeinflusst (Anhang Tabelle 16). Darüber hinaus ist die Aggregatstabilität bei vorhergesagtem Niederschlag tendenziell höher, was auf die geringere Störung durch Regenereignisse zurückzuführen sein könnte, wodurch die Bodenaggregate erhalten bleiben. Der Bodentyp hatte einen signifikanten ($p < 0.05$) Einfluss auf TOC, Humusgehalt, Gesamt-N, Kalzium, Magnesium, Natrium, Kationenaustauschkapazität und C:N-Verhältnis, wobei Ch für viele Parameter die höchsten Werte aufwies. Diese Ergebnisse untermauern die höhere Pflanzenproduktionskapazität dieses Bodentyps, auch unter trockenen Bedingungen.

Reaktion ausgewählter Mesofauna auf Niederschlagsszenarien unter verschiedenen Bodentypen

Insgesamt wurden 9023 Collembola und 3138 Oribatida gezählt. Die Abundanz von Collembolen wurde von einer übermäßig großen Probe im Frühjahr 2018 dominiert (predicted Szenario, Boden Ch, Abbildung 2). Hier entfielen allein auf ein Lysimeter 2.751 Individuen, d. h. ca. 30 % aller gefundenen Individuen. Abgesehen von diesem Ausreißer gab es keine eindeutigen Unterschiede in der Anzahl der Collembolen aufgrund von Bodentyp oder Behandlung (Abbildung 2). Ein generalisiertes lineares gemischtes Modell der $\log_{10}$ -transformierten Abundanzen ergab jedoch einen signifikanten Effekt des Bodentyps, aber nicht der Bewässerung oder der Boden/Bewässerungs-Interaktion (R-Package glmmTMB 1.0.1, zufälliger Effekt: Probenahmedatum, Gauß-Familie; Anhang Tabelle 17).

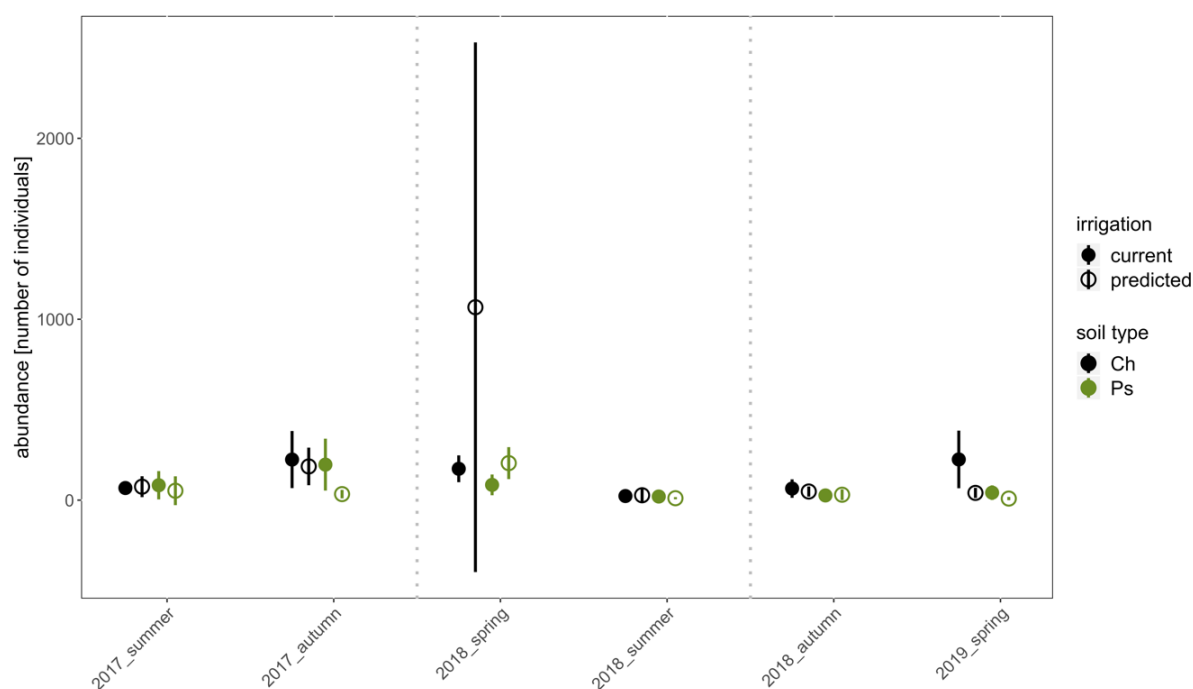


Abbildung 2. Anzahl der Collembolen in Ch und Ps Boden je Niederschlagsszenario. Die Punkte sind Durchschnittswerte (Mittelwerte) von jeweils drei Lysimetern, und die Linien geben die Standardabweichungen an.

Im Gegensatz zu den Collembolen fanden wir konsistente und signifikante Auswirkungen sowohl der Bodenart als auch der Bewässerung auf die Gesamtzahl der Hornmilben (Abbildung 3, Anhang Tabelle 18). Unter Berücksichtigung aller Beprobungstermine ergaben der Ch-Boden etwa dreimal mehr Individuen als der Ps-Boden (2.344 bzw. 794 Individuen) und das aktuelle Szenario 1,6-mal mehr Individuen als das prognostizierte Szenario (1.951 bzw. 1.187 Individuen; Abbildung 5).

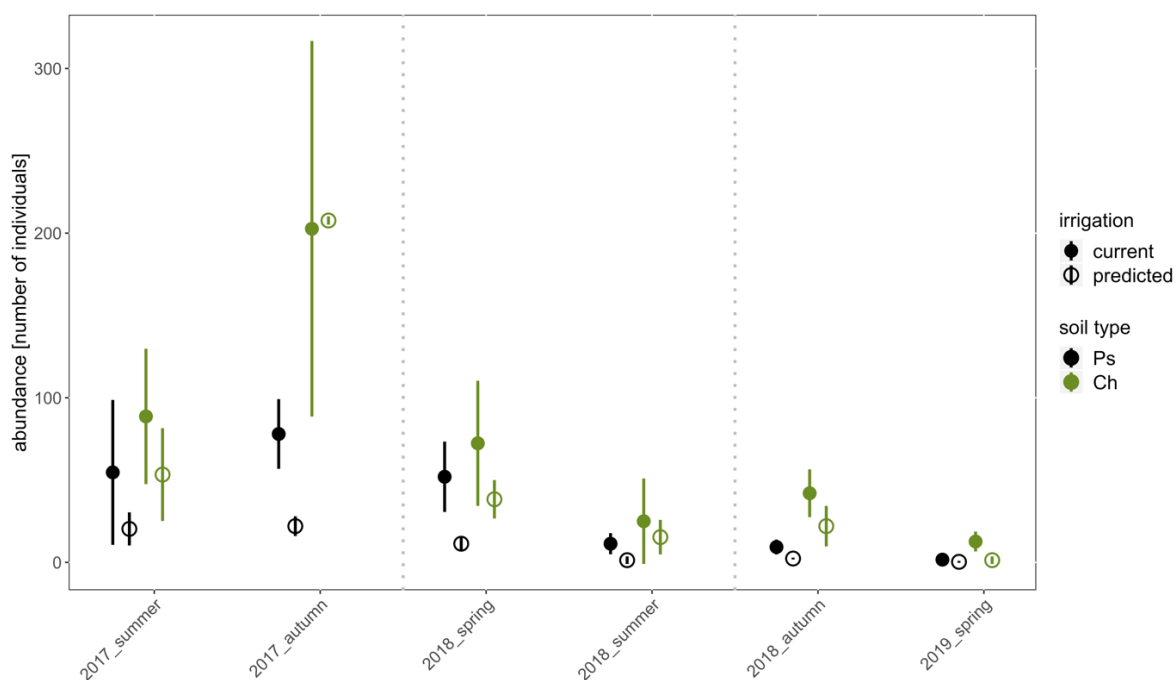


Abbildung 3. Die Anzahl der Oribatida in Ch und Ps Boden je Niederschlagsszenario. Die Punkte sind Durchschnittswerte (Mittelwerte) von jeweils drei Lysimetern, und die Linien geben die Standardabweichungen an.

Insgesamt wurden neun Hornmilbenarten gesammelt (Abbildung 4; Anhang Tabelle 19). Im Vorgängerprojekt LYSTRAT (2011 - 2013), in dem wir die gleiche Methodik anwendeten, fanden wir 26 Arten. Somit sank der Artenreichtum um etwa 66 %, unabhängig von der Bewässerungsbehandlung. Alle in diesem Projekt gefundenen Arten wurden auch in LYSTRAT gemeldet.

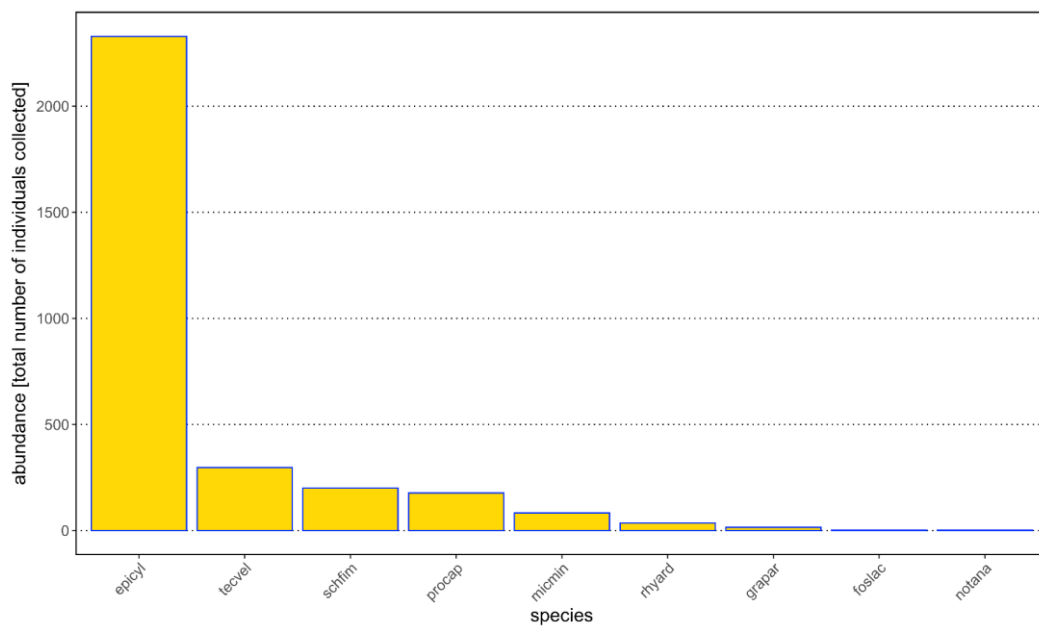


Abbildung 4. Verteilung der Oribatidenarten. Die Abkürzungen setzen sich aus den ersten drei Buchstaben der jeweiligen Gattungs- und Artnamen zusammen.

Trotz großer Überlappung der verbindenden Polygone zeigt der Hauptkomponentenplot, dass sich die Zusammensetzung der neun Oribatidenarten in Bezug auf Bodentyp und Bewässerungsbehandlung unterscheiden (Abbildung 5). Für das aktuelle Szenario waren die Arthropodengemeinschaften der beiden untersuchten Bodentypen klar getrennt (schwarze Punkte in Abbildung 5). Im Gegensatz dazu näherten sich die beiden Gemeinschaften des prognostizierten Szenarios einander an und überlappten bis zu einem gewissen Grad. Dies deutet darauf hin, dass das vorhergesagte Niederschlagsszenario zu einer Angleichung der Faunen verschiedener Bodentypen führen kann, d.h. dass die Eigenschaften der Niederschlagsregime für die Bestimmung der edaphischen Mikroarthropodenfauna wichtiger werden können als die Bodeneigenschaften. In einem nüchternen Test stellt sich jedoch heraus, dass nur der Boden einen signifikanten Einfluss auf die Ähnlichkeit der Oribatidenmilben-Zusammensetzung ausübt, nicht aber die Bewässerung und die Boden/Bewässerungs-Interaktion (Anhang Tabelle 20).

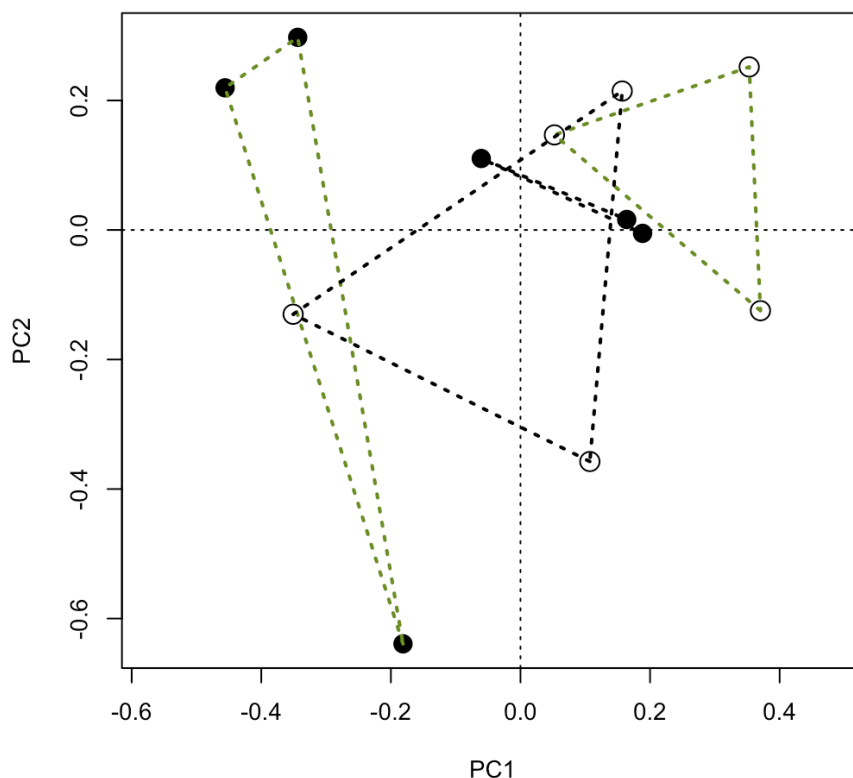


Abbildung 5. Hauptkomponentenplot der Oribatidenmilben-Zusammensetzung. Jeder Punkt repräsentiert ein experimentelles Lysimeter (sechs gemittelte Probenahmedaten). Vor der Analyse wurden die Abundanzen nach Hellinger transformiert, um den Einfluss der dominanten Arten zu reduzieren. Für Farben und Symbole siehe Abbildung 4.

2.3 Bodenmikroorganismen und Stickstoffkreislauf

Wie bereits oben beschrieben, nahm die Pflanzenbiomasse unter dem vorhergesagten Niederschlagsregime signifikant ab. Dies kann auf Trockenstress zurückgeführt werden, wie der Anstieg des $\delta^{13}\text{C}$ -Wertes, ein Indikator für die Spaltöffnungsleitfähigkeit, zeigt. Die $\delta^{13}\text{C}$ -Werte waren auch in Ps höher als in Ch, wobei letzterer eine höhere Wasserhaltekapazität des Bodens aufweist. Die $\delta^{15}\text{N}$ -Werte der geernteten Pflanzen unterschieden sich nicht zwischen dem aktuellen und dem prognostizierten Szenario, was auf den ersten Blick darauf hindeutet, dass die Zersetzung von ^{15}N -markiertem Gründünger (Senf) und die ^{15}N -Aufnahme durch die Pflanzen nicht durch das Niederschlagsregime beeinflusst wurde. Die Aufnahme von ^{15}N aus dem Wirtschaftsdünger war in Chernozem signifikant erhöht. Dies bestätigt den schnelleren N-Zyklus in Ch als in Ps.

Alle Analysen zur Beurteilung des Einflusses des veränderten Niederschlagsmusters auf die Bodenmikroorganismen und den Kohlenstoff- und Stickstoffkreislauf wurden ausschließlich für Ps und Ch Böden durchgeführt (siehe Methoden).

Einfluss des Klimawandels auf die mikrobielle Gemeinschaft im Boden

Es gab keinen Einfluss des Niederschlagsregimes auf einzelne mikrobielle PLFAs im Boden, während ihre Abundanz von Boden und Zeit beeinflusst wurde. Wie aufgrund des höheren Gehalts an organischer Substanz erwartet, war die mikrobielle

Biomasse, mit Ausnahme der Pilze, im Ch höher. Die gesamte mikrobielle Biomasse war hoch und die PLFA-Verteilung vergleichbar mit derjenigen, die für landwirtschaftliche Böden beobachtet wurde (Anders et al., 2013; Watzinger et al., 2014). Im PLFA-Muster wurden keine Hinweise auf Wasserstress, z.B. Zunahme von grampositiven / gramnegativen Bakterien, Zunahme der Cy-Stress-Biomarker, festgestellt. Das Vorhandensein von Pilzen war unabhängig von der Bodenqualität, was ihre Robustheit gegenüber möglichen Nährstoff- und Wassermängeln bestätigt.

Die PLFAs wurden auch durch die Zeit beeinflusst, stiegen aber durch die Zugabe der Gründüngung im April 2018 nicht signifikant an. Die Zugabe von leicht verfügbaren Pflanzenresten kann die mikrobielle Biomasse im Boden erhöhen (Djukic et al., 2013; Stemmer et al., 2007). In unserem Versuch war die zugegebene Menge an Senf gering ($0,2 \text{ g kg}^{-1}$) und führte nicht zu einer signifikanten Erhöhung des Kohlenstoff- und Stickstoffgehalts im Boden. Wir könnten aber auch annehmen, dass die Verfügbarkeit von organischer Substanz nicht der primär limitierende Faktor für das mikrobielle Wachstum im Boden war.

Stickstoffmineralisierung und Aufnahme durch Bodenmikroorganismen und Pflanzen

Der Stickstoffgehalt im Boden war im Ch-Boden signifikant höher als im Ps-Boden, was die allgemein höhere Bodenfruchtbarkeit des Ch widerspiegelt. Dies galt auch für Nitrat, nicht aber für Ammonium, das sich nicht signifikant zwischen den Böden unterschied. Keiner der gemessenen Boden-Stickstoff-Pools (Gesamtstickstoff, Ammonium und Nitrat) wurde durch die Niederschlagsbehandlung beeinflusst. Allerdings waren die $\delta^{15}\text{N}$ -Werte des Bodens unter Trockenstress höher, was entweder auf einen langsameren Abbau des Pflanzendüngers, eine geringere Aufnahme von mineralisiertem Senf-N durch die Pflanzen oder geringere Stickstoffverluste durch Auswaschung oder gasförmige Verluste bei reduziertem Niederschlag hinweist.

Leider wurde die Bestimmung der Nitratauswaschung dadurch erschwert, dass nur wenige Proben aus den Lysimetern für die Bodenwasseranalyse entnommen werden konnten, was eine statistische Auswertung unmöglich machte. Am Tag des Starkregenereignisses wies das aktuelle Szenario beider Bodentypen jedoch etwas höhere $\delta^{15}\text{NO}_3$ -Werte und Nitratkonzentrationen auf, was auf einen langsameren Abbau und eine geringere Nitrifikation unter trockeneren Bodenbedingungen hindeuten könnte. Andererseits kann eine erhöhte Auswaschung unter trockeneren Bedingungen nicht ausgeschlossen werden, da sich möglicherweise Risse im Oberboden bilden können, die bekanntermaßen den bevorzugten Wasserfluss und damit die Auswaschungsraten erhöhen (APCC 2014).

Das trockene, prognostizierte Szenario reduzierte die N_2O -Emissionen über einen Bestimmungszeitraum von zwei Jahren (2018, 2019) deutlich. Die wichtigsten Faktoren, die die N_2O -Emissionen aus dem Boden steuern, sind die Verfügbarkeit von

Substrat (Stickstoff), der Wasser- und Sauerstoffgehalt im Boden sowie die Bodentemperatur und der pH-Wert. Die beobachteten geringeren N_2O -Emissionen des Bodens unter Trockenheitsbedingungen stimmen mit mehreren Studien überein, in denen festgestellt wurde, dass trockene Böden geringere N_2O -Emissionen aufweisen als feuchte Böden (Homyak et al., 2017). Geringere N_2O -Emissionen unter trockeneren Bodenbedingungen können außerdem das Ergebnis einer reduzierten mikrobiellen Biomasse und/oder mikrobiellen Aktivität sein. Während die mikrobielle Biomasse des Bodens durch die Niederschlagsbehandlung in dieser Studie nicht beeinflusst wurde, nahm die mikrobielle Aktivität des Bodens unter Trockenheit ab, was durch signifikant niedrigere Bodenatmungsraten gezeigt wurde. Da die leicht verfügbaren N-Pools im Boden (Nitrat und Ammonium) nicht durch den Niederschlag beeinflusst wurden, könnte die Denitrifikation im Vergleich zu mikrobiellen Prozessen, die die N-Versorgung des Bodens steuern, empfindlicher auf Trockenheit reagieren. Geringere Denitrifikationsraten in trockenen und aeroben Umgebungen spiegeln auch die engere phylogenetische Verteilung von Denitrifikanten im Vergleich zu N-mineralisierenden Mikroorganismen wider, von denen erstere feuchtere und anaerobere Bedingungen benötigen, um hohe Raten an metabolischer Aktivität aufrechtzuerhalten (Lennon et al., 2012).

Ein langsamerer Abbau des Pflanzenmaterials (Dünger) unter Trockenheit würde wiederum einen schnelleren Dungabbau und höhere Stickstoffmineralisierungs- und Nitrifikationsraten in den Kontrollböden implizieren, was jedoch durch die Isotopensignaturen des Bodennitrats und des mikrobiellen Stickstoffs im Boden, die von der Niederschlagsbehandlung unbeeinflusst waren, nicht bestätigt werden konnte. Der Abbau des ausgebrachten organischen Düngers scheint also in dieser Studie eher unbeeinflusst vom Niederschlag zu sein. Dies zeigt sich auch in der N-Aufnahme durch die Kulturpflanzen, die sich zwischen Kontroll- und Dürrebedingungen nicht unterschied, aber mit der Zeit signifikant anstieg und 2019 am höchsten war, was den Anstieg der Produktivität von Sommerweizen über Sommergerste zu Winterweizen widerspiegelt, unabhängig vom Niederschlagsregime.

Analysen der Blätter der Nutzpflanzen untermauern diese Ergebnisse und lassen zusätzlich Rückschlüsse auf das Muster des Gründungsabbaus zu. Obwohl die Blatt-N-Gehalte im Ch-Boden höher waren, wahrscheinlich aufgrund der inhärent höheren Fruchtbarkeit dieses Bodentyps, wurden sie in den beiden Jahren (2018, 2019) des Isotopenmarkierungsversuchs nicht durch die Niederschlagsbehandlung beeinflusst. Die $\delta^{15}\text{N}$ -Werte der Blätter reagierten im Jahr 2018 nicht auf die Trockenheit, waren aber im Jahr 2019 signifikant höher. Dies könnte das Ergebnis einer Akkumulation von Nährstoffen in trockeneren Böden im Jahr 2018 sein, die für die Pflanzen im prognostizierten Szenario besser verfügbar waren als in der Kontrollbehandlung im folgenden Jahr 2019. Dieses Muster spiegelt sich auch im prozentualen Anteil der vom Senf stammenden ^{15}N -Aufnahme in den Pflanzenblättern wider, die wiederum von der Niederschlagsbehandlung im Jahr 2018 unbeeinflusst war, aber unter der Trockenheit im Jahr 2019 signifikant höher war.

Es ist bekannt, dass das natürliche Vorkommen von N in Böden und Pflanzen sowohl auf lokaler als auch auf globaler Ebene mit dem Niederschlag und der Temperatur korreliert, wobei insbesondere der Niederschlag eine Kontrolle erster Ordnung auf die $\delta^{15}\text{N}$ -Werte von Ökosystemen ausübt (Amundson et al., 2003). Es wurde gezeigt, dass eine höhere Wasserverfügbarkeit aufgrund höherer Niederschlagsraten zu effizienteren Ökosystemen in Bezug auf N-erhaltende und -recycelnde Prozesse führt, was eine geringere auf N-Verlusten basierende Isotopenfraktionierung zur Folge hat und somit dazu führt, dass die Stickstoff-Isotopensignaturen von Böden und Pflanzen im Vergleich zu trockeneren Ökosystemen niedriger sind. Jedoch wurden weder Pflanzen- noch Boden- $\delta^{15}\text{N}$ -Werte im Lysimeterkompartiment außerhalb der Isotopenmarkierungsfläche durch das Niederschlagsexperiment beeinflusst. Zusammenfassend und am wichtigsten ist, dass in dieser Studie keine schwerwiegenden Stickstoffverluste im Ökosystem aufgrund von Trockenstress beobachtet wurden.

Kohlenstoffmineralisierung in Böden und Identifizierung von zersetzenden Bodenmikroorganismen

Wie im Falle des Stickstoffs war der Bodenkohlenstoff im Ch-Boden signifikant höher als im Ps-Boden, was wiederum die hohe Fruchtbarkeit dieses Bodentyps bestätigt. Allerdings reagierten die $\delta^{13}\text{C}$ -Werte des Bodens in den markierten Parzellen nicht auf die Niederschlagsbehandlung. Die kurzfristige Mineralisierung von Senf, wie sie durch die CO_2 -Emission und ihren $\delta^{13}\text{C}$ -Wert nachgewiesen wurde, war unter dem aktuellen Niederschlagsregime signifikant höher. In Ps war der Beitrag der Gründüngung zur gesamten CO_2 -Emission höher als in Ch, was auf den geringeren Gehalt an organischer Substanz in Ps zurückzuführen ist.

Die mikrobielle Anabolisierung von gelabeltem Senf begann in allen mikrobiellen Gruppen innerhalb von Stunden nach der Zugabe, wahrscheinlich aufgrund des Vorhandenseins von leicht verfügbarem und breit nutzbarem C des Senfs. Außergewöhnlich hohe anfängliche $\delta^{13}\text{C}$ -Werte der PLFAs 16:0, 18:0, 18:2 ω 6,9c und 18:1 ω 9c wurden jedoch zu 27 %, 15 %, 13 % und 15 % auf die Zugabe von PLFAs mit der Senfpflanze zurückgeführt, die offenbar von Pilzen befallen war. Im zweiten Jahr wurde der vom Senf stammende Kohlenstoff immer noch abgebaut (hauptsächlich durch Pilze) und / oder in der mikrobiellen Gemeinschaft rezykliert. Die $\delta^{13}\text{C}$ -Werte der bakteriellen PLFAs waren im Ps generell höher, was auf den geringeren Gehalt an organischer Bodensubstanz und damit auf den bevorzugten biologischen Abbau der ausgebrachten Gründüngung zurückzuführen ist. Die Pilze waren im Ps weniger am Stoffwechsel der Gründüngung beteiligt als im Ch. Nur eine PLFA (15:0) wurde durch das Niederschlagsregime signifikant beeinflusst, aber dieser Einfluss auf den Bruttokohlenstoffkreislauf ist vernachlässigbar. Der prozentuale Anteil von Senf-abgeleiteten mikrobiellen PLFAs dokumentiert die Beteiligung verschiedener mikrobieller Gruppen am Gründüngungsabbau, unabhän-

gig von ihrer Abundanz. Grampositive Bakterien und Pilze waren stärker am Kohlenstoffkreislauf beteiligt, ungeachtet der hohen Abundanz gramnegativer Bakterien in den Böden.

Verknüpfung der mikrobiellen und Mineralisierungsdaten mit den Daten der Mesofauna, des Bodens und der Pflanzen

Im Gegensatz zur Auswirkung von Wasserstress auf die Pflanzenbiomasse wurden die mikrobielle Biomasse des Bodens und die identifizierten Gruppen (PLFAs) nicht durch das Niederschlagsregime beeinflusst, was möglicherweise auf die geringe taxonomische Auflösung der PLFA-Gruppierung zurückzuführen ist. Dennoch war die fehlende Reaktion innerhalb der Zusammensetzung der mikrobiellen Bodengemeinschaft auf das veränderte Niederschlagsregime erstaunlich, da sich Verschiebungen in der mikrobiellen Gemeinschaft durch Umwelteinflüsse im Allgemeinen gut im PLFA-Muster des Bodens widerspiegeln (Orwin et al., 2018; Ramsey et al., 2006). Neben den mikrobiellen Bodengemeinschaften wurde auch die Mesofauna des Bodens (Collembola und Oribatida) gezählt und ein signifikanter Einfluss des Niederschlagsregimes auf die Individuenzahl der Oribatida erkannt. Die taxonomische Auflösung der Oribatida ist viel geringer als die der PLFAs. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Einfluss der Niederschlagsänderung, der auf der Ebene der Arten (Pflanzen) und der Ordnung (Oribatida) sichtbar ist, bei der niedrigeren taxonomischen Auflösung (PLFA, Collembola) verschwand. Dies spiegelt sehr schön die bereits bekannte Erkenntnis wider, dass sich eine genetisch vielfältige Gemeinschaft leichter an Umweltstress anpassen kann als eine einzelne Art oder Gruppe mit geringem Artenreichtum. Alle verschiedenen Domänen (Pflanzen, Mesofauna, Bodenmikroorganismen) zeigten eine höhere Biomasse / Individuen in dem fruchtbareren landwirtschaftlichen Boden, dem Ch.

Die Funktion der mikrobiellen Gemeinschaft, organisches Material zu mineralisieren und Nährstoffe umzuwandeln, wirkt sich direkt auf die bodenkundlichen Eigenschaften (Nährstoffzusammensetzung) aus. Da die mikrobielle Biomasse und die Zusammensetzung der Gemeinschaft nicht durch das Niederschlagsregime beeinflusst wurden, wollten wir sehen, ob eine Auswirkung auf ihre Funktion sichtbar war. Geringere Niederschläge reduzierten sowohl die Mineralisierung der Gründüngung in der Anfangsphase und auch die Denitrifikation signifikant. Die verlangsamte Mineralisierung von neu hinzugefügtem Gründünger in Verbindung mit einer geringeren Stickstoffaufnahme aufgrund des verminderten Pflanzenwachstums führte zu einer erhöhten Retention von ^{15}N aus dem Gründünger im Boden, das dann im nächsten Jahr von den Pflanzen aufgenommen wurde.

5 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Klimawandel und Boden sind eng miteinander verknüpft. Die verringerten Niederschläge und die steigenden Temperaturen haben Auswirkungen auf den Bodenwasserhaushalt. Wie die Ergebnisse des STOTRASIM-Modells zeigen, verfügt der seichtgründige Phaeozem (Ps) über eine verringerte Wasserspeicherkapazität und verringerte Erträge. Im Gegensatz dazu speichern Feuchtschwarzerde (Pg) und tiefgründiger Phaeozem (Ch) Wasser und die Erträge sind höher, aber nach zwei Jahren mit reduzierten Niederschlägen wird das Grundwasserreservoir nicht mehr aufgefüllt.

Im Vergleich zum aktuellen Szenario sind die modellierten Erträge von Sommerweizen unter den vorhergesagten Niederschlägen niedriger, im Durchschnitt um 32% für Pg, 42% für Ps und 25% für Ch. Die Erträge von Sommergerste im prognostizierten Szenario sind im Vergleich zum aktuellen Szenario um 11% für Ch und Pg und um 21% für Ps niedriger. Die berechneten Erträge von Winterweizen im vorhergesagten Szenario sind im Vergleich zum aktuellen Szenario um 17% niedriger für Ch und 5% niedriger für Pg und 2% höher für Ps. Dies könnte die Auswirkung des Regens während der Wachstumsperiode sein. Ansonsten ist der Wasserstressfaktor für den Bodentyp Ps sehr hoch.

Die trockenen Bedingungen des prognostizierten Szenarios führten zu einem signifikanten Rückgang der Biomasseproduktion von Korn und Spreu und tendenziell zu einer Abnahme der Strohbiomasse. Böden mit hoher Wasserhalte- und Nährstoffbereitstellungskapazität spielen unter trockenen Bedingungen eine wichtige Rolle, wie man an den Ergebnissen der Kornbiomasse erkennen konnte, die in Ch-Boden am höchsten war. In ähnlicher Weise nahm die Beikrautbiomasse im Szenario mit zukünftigen Niederschlägen signifikant ab, während wir keinen eindeutigen Effekt auf die Abundanz der Unkrautarten in den Lysimetern feststellen konnten.

Die Stickstoffnutzungseffizienz wurde durch das Niederschlagsszenario nur im Jahr 2017 in Pg signifikant beeinflusst und war im Winterweizen 2019 am höchsten. Dies könnte auf die besseren Wassernutzungskapazitäten der Kultur und/oder auf günstigere allgemeine Wachstumsbedingungen (Nährstoffverfügbarkeit, Temperatur, Wasserverfügbarkeit) zurückzuführen sein. Die Zersetzung zeigte einen Trend, unter den vorhergesagten Bedingungen in Ch- und Pg-Böden langsamer zu sein, was auf einen Einfluss der Bodenstruktur auf die Zersetzung hinweist.

In Bezug auf die Reaktionen der Mesofauna fanden wir signifikante Auswirkungen sowohl des Bodentyps als auch der Bewässerung auf die Gesamtzahl der Hornmilben und es befanden sich etwa dreimal mehr Individuen in Ch- als in Ps-Böden, was auf günstige Bedingungen für Milben schließen lässt. Wir fanden Hinweise darauf, dass das vorhergesagte Niederschlagsszenario zu einer Angleichung zwischen den Gemeinschaften der verschiedenen Bodentypen führen würde, die jedoch nicht signifikant waren.

Die mit niedriger taxonomischer Auflösung (Stamm, Klasse und Ordnung) beobachtete mikrobielle Bodengemeinschaft verhielt sich resistent gegenüber dem Niederschlagsregime. Ihre Funktion, die mikrobiell vermittelten Nährstofftransferprozesse, wie z. B. die Mineralisierung von frisch zugegebener Gründüngung und die Denitrifikation, wurden jedoch unter dem vorhergesagten Niederschlagsregime verlangsamt. Diese Verringerung wurde durch den Einsatz eines Experiments zur Markierung stabiler Isotope sichtbar gemacht. Zusätzlich wird die verringerte Pflanzenproduktion wahrscheinlich zu einer verringerten Stickstoffaufnahme durch die Pflanzen führen, was zu einer verlängerten Verfügbarkeit von Stickstoff führt, der mit Pflanzenresten / Gründüngung zugegeben wurde. Wir schätzten, dass die Verringerung der Pflanzenbiomasse (Stickstoffaufnahme und Kohlenstoffeintrag) der dominierende Faktor ist, der den Kohlenstoff- und Stickstoffkreislauf im Boden steuert. Die Verringerung des Abbaus der organischen Substanz als Folge des vorhergesagten Niederschlagsmusters wurde bestätigt, aber als zweitrangig eingeschätzt. Leider war es aufgrund der Heterogenität zwischen den Lysimetern und der geringen Anzahl von Wiederholungen nicht möglich, die Veränderungen im Kohlenstoff- und Stickstoffumsatz des Bodens zu quantifizieren.

Aus wissenschaftlicher und ökologischer Sicht sollte man über die Sensitivität und Anwendbarkeit von Bodenmonitoring-Parametern zur Erkennung von Auswirkungen des Klimawandels diskutieren. Auf den ersten Blick scheint es einfach zu sein, da zum Beispiel sowohl der Wassergehalt als auch die Temperatur mikrobielle Prozesse im Boden direkt steuern. Es war jedoch nicht so einfach, die Auswirkungen auf den Kohlenstoff- und Stickstoffkreislauf zu bestätigen und zu quantifizieren. Beide Kreisläufe sind hochkomplex und redundant, was wahrscheinlich der Grund für ihre Resistenz gegenüber Niederschlagsänderungen war. Eine Auswirkung wurde bei einer hohen taxonomischen Auflösung und bei der Ausrichtung auf einen spezifischen Prozess, der von wenigen Mikroorganismen durchgeführt wird (geringe Biodiversität), gesehen. Eine Schlussfolgerung könnte sein, auf Artniveau und spezifische Prozesse zu überwachen, um die Auswirkungen des Klimawandels zu erkennen. Zusätzlich zu dem damit verbundenen hohen Arbeitsaufwand stellt sich die Frage: Sind die Auswirkungen auf der Ebene der Arten und spezifischen Prozesse stark genug, um den gesamten Kohlenstoff- und Stickstoffkreislauf im Boden zu verändern? Zusätzlich war in dieser Studie noch ein weiterer Faktor von großer Bedeutung. Die Heterogenität zwischen den Replikaten war hoch, möglicherweise ähnlich dem, was wir in einer Feldsituation erwarten könnten. Die Anzahl der Replikate und die zeitliche Auflösung der Probenahme müssen erhöht werden, um signifikante Unterschiede zu bestätigen. Eine geeignete Lösung könnte darin bestehen, wenige Parameter zu beobachten, diese aber im Gegenzug häufiger zu beproben. Geeignete Parameter sollten einen kleinen, aber häufig genutzten Kohlenstoff- und Stickstoffpool abbilden, der möglicherweise mikrobiell gut umgesetzt wird. So ermöglicht zum Beispiel, die Markierung von frisch zugegebenen Pflanzenresten mit ^{13}C und ^{15}N den gesamten Kohlenstoff-Stickstoff-Fluss im Boden von den Flüssen mit hohem Umsatz (frisches Pflanzenmaterial) zu entkoppeln; bei letz-

terem sind Veränderungen innerhalb kürzerer Zeiträume sichtbar. Wir haben diesen Ansatz erfolgreich angewandt. Wir können aus unseren Ergebnissen schließen, dass der verfügbare ^{15}N - NO_3 -Pool ein guter Kandidat sein könnte, um in zukünftigen Experimenten Veränderungen im Stickstoffkreislauf zu quantifizieren. Für den Kohlenstoffkreislauf erwies sich ^{13}C - CO_2 als empfindlich, aber es ist eine hohe räumliche und zeitliche Auflösung für die Probenahme erforderlich, was den Einsatz von Lasergeräten für Online-Konzentrations- und Isotopenmessungen nahelegt.

Trockenheit kann als häufigster abiotischer Stressfaktor in Ost- und Mitteleuropa - insbesondere durch reduzierte Sommerniederschläge - zu einer Verringerung des Pflanzenwachstums und damit zu enormen Ertragsverlusten führen (Flamm et al., 2012; Majer et al., 2008). Aufgrund der gleichbleibenden bis abnehmenden Sommerniederschläge in Verbindung mit einer ganzjährigen Erwärmung werden verringerte Ertragspotentiale erwartet, vor allem in trockenen und warmen Tieflagen wie dem Marchfeld und auf Böden mit niedriger Wasserspeicherkapazität (Eitzinger et al., 2013). Diese prognostizierte Verschärfung der knappen Wasserverfügbarkeit für Nutzpflanzen macht den Niederschlag, der in unserer Studie ausgewertet wurde, zu einem ertragslimitierenden Faktor der zukünftigen Pflanzenproduktion. Unsere Ergebnisse können daher als relevant für die Forschung zum Klimawandel angesehen werden.

Die Ergebnisse dieser Lysimeter-Studie und der Modellrechnungen geben Aufschluss über die Auswirkungen einer Änderung der Fruchtfolge oder des Bewässerungsmusters in der landwirtschaftlichen Praxis. Die Feldversuche in den Lysimetern wurden auf einer kleinen Fläche durchgeführt, weshalb ein Upscaling auf größere Felder und das Testen der Klimawandelresistenz verschiedener Kulturen und Anbausysteme erforderlich ist. Eine effiziente Wassernutzung beim Anbau von Kulturpflanzen, aber auch eine optimierte Düngung, der Anbau geeigneter Kulturpflanzen und Sorten sowie ein besserer Pflanzenschutz könnten zur Lösung künftiger Probleme der Ernährungssicherheit beitragen.

Empfehlung für das Pflanzenmanagement

Die meteorologischen Szenarien für die nächsten Jahrzehnte deuten darauf hin, dass heute bereits trockenen Regionen noch trockener werden, die Lufttemperatur steigt und dadurch die Bodentemperatur beeinflusst. Einige Pflanzen haben einen höheren Wasserbedarf als andere, und es ist zu hinterfragen, wie resistent aktuelle Sorten gegen höhere Bodentemperaturen sind. Empfehlungen für das landwirtschaftliche Management sollten die Anfangsbedingungen der Bodenfeuchtigkeit berücksichtigen. Die Empfehlungen sind in den nachfolgenden 3 Fällen beschrieben:

Fall I. Keine Bewässerung: Pflanzen, die gegen hohe Temperaturen und Trockenheit resistent sind, sollten auf Böden wie dem Ps-Typ verwendet werden. Die Eigenschaften von Pg und Ch ermöglichen die Verwendung für Nutzpflanzen. Wie die

Bodentypen Pg und Ch auf längere Zeiträume mit reduzierter Niederschlagsmenge reagieren, könnte Gegenstand weiterer Studien sein.

Fall II. Bewässerung: Bei einer doppelten Menge Wasser und ähnlichen Düngemengen könnten auf allen drei in diesem Experiment betrachteten Bodentypen sehr gute Erträge erzielt werden. Der Bodenwasserspeicher wird ebenso wie das Grundwasser nachgefüllt. Eine effiziente Wassernutzung beim Anbau von Kulturpflanzen, aber auch eine optimierte Düngung, der Anbau geeigneter Kulturpflanzen und Sorten sowie ein besserer Pflanzenschutz könnten dazu beitragen, die Probleme der Ernährungssicherheit zu lösen. Dies kann allerdings zu Schwierigkeiten bei Ansprüchen anderer Nutzer führen, die um verfügbare Wasserressourcen konkurrieren.

Fall III. Keine Bewässerung und kein Regen (Worst-Case-Szenario): Hier müssen neue Sorten und Arten getestet werden, die in einem mit Savannen vergleichbaren Klima wachsen können.

C) Projektdetails

6 Methodik

6.1 Projektstruktur

Die Lysimeteranlage der AGES besteht aus 18 gefüllten Gravitationslysimetern, die die drei Hauptbodentypen des Marchfeldes repräsentieren: seichtgründiger Tschernosem (Ps), tiefgründiger Tschernosem (Ch), sowie eine tiefgründige Feuchtschwarzerde (Pg). Der Niederschlag wurde mit einer Präzisions-Bewässerungsanlage simuliert.

Für das "aktuelle" / "current" Szenario wurden neun der Lysimeterkerne (3 Bodentypen in dreifacher Wiederholung) entsprechend dem aktuellen Niederschlagsmuster bewässert, das aus dem 30-jährigen mittleren Niederschlag (Menge und Verteilung) in Großenzersdorf, Marchfeld, berechnet wurde. Die Mengen betrugen 285 bis 350 mm pro Jahr plus natürliche Niederschläge im Winter (Anhang Tabelle 10). Die anderen neun Lysimeterkerne im Szenario "prognostiziert" / „predicted“ wurden entsprechend dem für den Zeitraum 2071 bis 2100 vorhergesagten Niederschlagsmuster im pannonischen Raum bewässert, wobei Trockenperioden und Starkregenereignisse simuliert wurden. Dieses Szenario wurde von Dr. Herbert Formayer (Institut für Meteorologie, BOKU, Wien) erstellt und führte zu 20 - 30 % weniger Niederschlag als das aktuelle Szenario (Anhang Tabelle 9).

Die Lysimeterstation wurde während der Vegetationsperiode von März bis November mit einem Folientunnel abgedeckt und blieb im Winter unbedeckt (Vermeidung von eingefrorenen Wasserleitungen). Die Fruchtfolge und das Ernterückstandsmanagement während des Projektes wurden gemäß Tabelle 7 umgesetzt.

Tabelle 7. Fruchtfolge und Bewirtschaftung der Lysimeter

	Aussaat	Ernte	Ernterückstände
2017: Sommerweizen	04.04.2017	20.07.2017	Stroh entfernt
Zwischenfrucht: Senf	24.08.2017	07.03.2018	Senfbiomasse geerntet und getrocknet, und am 09.04.2018 in den Boden eingearbeitet.
2018: Sommergerste	09.04.2018	23.07.2018	Stroh entfernt
2019: Winterweizen	11.10.2018	03.07.2019	Stroh eingearbeitet

Vor der Aussaat und nach der Ernte wurde der Boden mit einem Spaten oder einer Gartenkralle gewendet („gepflügt“). In allen Lysimetern wurden die Bodennährstoffkonzentrationen regelmäßig gemessen und die Düngung erfolgte nach den offiziellen Standardempfehlungen (Richtlinie für die sachgerechte Düngung,

Tabelle 8). Es wurden regelmäßig Sichtkontrollen auf Schädlingsbefall durchgeführt, um mögliche Schadinsekten rechtzeitig zu bemerken und entsprechende Maßnahmen ergreifen zu können. Während dieses Projekts blieben die Lysimeter

von Schadinsekten verschont. Allerdings waren Unkräuter zahlreich vorhanden, die manuell ohne den Einsatz von Pestiziden entfernt wurden, um mögliche Auswirkungen auf die mikrobielle Gemeinschaft im Boden zu vermeiden.

Tabelle 8. Aufgebrachte Düngemengen in den Jahren 2017, 2018 und 2019 in den Lysimetern.

	2017	2018	2019		
	04.04.2017	08.05.2018	20.03.2019	16.04.2019	16.05.2019
	kg N/ha	kg N/ha	kg N/ha	kg N/ha	kg N/ha
Ps	40	50	35	45	40
Pg	55	50	40	65	45
Ch	55	50	40	65	45

6.2 Bodenhydrologische Analysen

(adaptiert übernommen von Krammer (2020))

STOTRASIM (Stenitzer, 1988, 2004, Feichtinger, 1998) ist ein gekoppeltes Modell, das aus einem Bodenwasserhaushaltsteil und einem Stofftransportteil besteht. Der Bodenwasserhaushaltsteil SIMWASER wurde entwickelt um eindimensionale vertikale Strömung von Wasser in einem Bodenprofil mit beliebiger Fruchtfolge auf täglicher Basis zu beschreiben (Stastna & Stenitzer, 2005). Wasserhaushalt und Pflanzenwachstum werden über die physiologische Wechselwirkung der Assimilation und Transpiration verbunden. Der Stofftransportteil berechnet die Stickstoffdynamik der landwirtschaftlich genutzten Böden auf Tagesbasis. Als Eingangsdaten in STOTRASIM wurden folgende Parameter übernommen:

- Tägliche Klimadaten (Temperatur, relative Feuchte, Globalstrahlung, Windgeschwindigkeit und Niederschlag) – bei den Niederschlägen wurden die systematischen Messfehler berücksichtigt.
- Boden (Horizonte der Bodenprofile, Bodenbeschaffenheit, pF- und Ku-Kurven als Funktion des Matrixpotentials für jeden Horizont).
- Bodenmanagement (Fruchtfolge, Dünger (Art und Menge), Bewässerung, Anbau- und Erntedatum, Pflugtiefe).

Basierend auf den Ergebnissen der Überprüfung der künstlichen Bewässerungsmenge wurde die täglich gemessene Bewässerung von 2017 – 2019 für beide Varianten („current“ und „predicted“) für alle Lysimeter korrigiert (Anhang: Tabelle 9, Abbildung 6, Abbildung 7), und die Modellierung wurde 18 Mal durchgeführt. Die Kalibrierung des Modells STOTRASIM war bereits in dem vorangehenden Projekt LYSTRAT (2011-2013) mit denselben Lysimetern durchgeführt worden. Die berechneten Ergebnisse für drei Bodentypen (Ps, Ch und Pg) und 18 Lysimeter sind als Tageswerte angegeben.

6.3 Feldarbeit und Messungen

Mineralisierungsraten und Nährstoffkreisläufe wurden mit markiertem Stickstoff und Kohlenstoff (^{13}C , ^{15}N) untersucht. Dazu wurden isotopisch markierte (^{13}C , ^{15}N markierte) Senfrückstände in die oberen 10 cm des Oberbodens in einem kleinen umrahmten Segment ($0,25 \text{ m}^2$) der Lysimeter mit Ps und Ch Böden im Frühjahr 2018 eingearbeitet. Lysimeter des Pg Bodens wurden aufgrund technischer Probleme mit den Lysimetereinrichtungen von dem Isotopenmarkierungsexperiment ausgeschlossen.

Die Markierung von Senf wurde in einer kontrollierten Laborumgebung in einem Gewächshaus durchgeführt (siehe unten).

Während der gesamten Projektdauer wurden wiederholt Bodenproben bis zu einer Tiefe von 10 cm mit einem Metallbodenbohrer (0,6 cm Durchmesser) entnommen. Die Häufigkeit der Bodenprobenahme und die Art der beprobten Böden sind im Anhang Tabelle 21 zu finden.

In den Jahren 2018 und 2019 wurden Bodenwasserproben, wann immer verfügbar, in verschiedenen Bodentiefen von 10 cm bis 250 cm Tiefe aus vorinstallierten Saugnäpfen und durch Auffangen von Drainagewasser am Boden des Lysimeters entnommen. Gasproben wurden regelmäßig im Feld genommen, um einen Einblick in die Dynamik der Bodenatmung (CO_2 -Messungen) und N_2O -Gasflüsse zu erhalten. Oberirdische Pflanzenbiomasse wurde während des Wachstums beprobt und am Ende der Vegetationsperiode geerntet und zur Bestimmung der Pflanzenbiomasse und für weitere Analysen im Labor gesammelt.

6.4 Laboranalysen und Experimente

Markierter Senf wurde hergestellt, indem vorkultivierte Senfpflanzen mit einer ^{15}N -markierten Mikronährstofflösung bewässert wurden und die Pflanzen in einer gasdichten Kammer gehalten wurden, die mit ^{13}C -markiertem CO_2 gefüllt war. Die endgültigen Delta-Werte von ^{13}C - und ^{15}N -markiertem Senfmulch betrugen 65 ± 12 bzw. $170 \pm 10 \text{ ‰}$.

Die oberirdische Pflanzenbiomasse wurde während des Wachstums und nach der Ernte bestimmt und, wenn möglich, in drei verschiedene Pflanzenkomponenten - Stroh, Korn und Spreu - getrennt. Der Gehalt und die Isotopenzusammensetzung von C und N aller Pflanzenkomponenten sowohl der unmarkierten als auch der markierten Lysimeterparzellen wurden mittels Elementaranalysator - Isotopenverhältnis-Massenspektrometrie (EA-IRMS; Elementaranalysator gekoppelt an Delta V Advantage, Thermo Scientific, Deutschland) analysiert.

Der Wassergehalt des Bodens wurde gravimetrisch bestimmt, nachdem der frische Boden 24 Stunden lang bei 105 °C getrocknet wurde. Der C- und N-Gehalt und die Isotopenzusammensetzung des Bodens wurden anhand der Pflanzenproben analysiert. Boden- NO_3 und $-\text{NH}_4$ wurden aus Bodenproben mit $0,5 \text{ M K}_2\text{SO}_4$ extrahiert.

Mittels der Mikrodiffusionsmethode (Heiling et al., 2006) wurden NH_4 und NO_3 sequentiell in Säurefallen aufgefangen, die dann mittels EA-IRMS auf den N-Gehalt und die ^{15}N -Signatur analysiert wurden. Die mikrobielle Biomasse wurde durch Vorextraktion und anschließende Chloroform - K_2SO_4 - Extraktion bestimmt. Der mikrobielle N-Gehalt und die $\delta^{15}\text{N}$ -Werte wurden mittels Purge-and-Trap-IRMS (PT-IRMS, Gasbench II Headspace Analyzer gekoppelt an Delta V Advantage, Thermo Fisher, Bremen, Deutschland) nach dem Verfahren von Lachouani et al. (2010) gemessen. Um den C-Gehalt und die $\delta^{13}\text{C}$ -Werte der mikrobiellen Biomasse des Bodens zu erhalten, wurde ein Teil der mit Chloroform behandelten Extrakte getrocknet und für EA-IRMS-Analysen gewogen. Die Nitratkonzentrationen des Bodenwassers wurden kolorimetrisch mit dem VCl_3 /Griess-Assay bestimmt (Hood-Nowotny et al., 2010). Die $\delta^{15}\text{N}$ -Werte des Wassernitrats wurden wie bei der mikrobiellen $\delta^{15}\text{N}$ -Bestimmung mittels PT-IRMS analysiert. Um die Auswirkungen von Trockenheit auf die Zusammensetzung der mikrobiellen Bodengemeinschaft zu untersuchen, wurden Phospholipidfettsäuren (PLFAs), die primären Lipide in den Zellmembranen der Bodenmikrobiota, analysiert (Watzinger, 2015; Watzinger und Hood-Nowotny, 2019).

Die N_2O -Flüsse im Boden wurden auf allen Lysimeter-Parzellen mit einem Isotopen- N_2O -Analysator von Los Gatos Research (Modell 914-0027, unter Verwendung von Off-Axis Integrated Cavity Output Spectroscopy (OA-ICOS)), der für 30 Minuten an eine gasdichte Kammer angeschlossen war, gemessen. Luftproben wurden von jedem Lysimeter zu 4 Probenahmezeiten (0, 10, 20, 30 min) entnommen und die Konzentrationen und $\delta^{13}\text{C}$ -Werte von CO_2 wurden mittels Gaschromatographie (GC)-IRMS (Thermo Fisher Trace GC Ultra verbunden mit IRMS, Thermo Fisher Delta V Advantage) bestimmt. Mit Hilfe der Keeling-Plots wurden die emittierten $\delta^{13}\text{C}$ - CO_2 -Werte des Bodens bestimmt (Keeling, 1958), und die CO_2 Emissionen des Bodens berechnet.

Die Zersetzung wurde mit dem Teebeutel-Index (TBI) nach Keuskamp et al. (2013) gemessen. Triplikate jeder Teesorte (Grüner Tee, Rooibos) wurden in allen Lysimetern am 18. April vergraben und am 3. Juli 2019 wieder ausgegraben.

Für die Beurteilung der Auswirkungen auf Collembola (Springschwänze) und Oribatida (Hornmilben) wurden die Lysimeter der Bodentypen Ps und Ch an sechs Terminen beprobt (2017-07-26, 2017-09-19, 2018-05-18, 2018-07-16, 2018-09-14, 2019-05-14). An jedem Termin wurden fünf Bodenproben aus jedem Lysimeter entnommen, ins Labor gebracht und in einem Berlese-Tullgren-Gerät extrahiert. Die fünf Proben jedes Lysimeters wurden vermischt und die Collembola und Oribatida manuell aus den aufbereiteten Proben gepickt. Die Collembola wurden gezählt und als Gruppe analysiert, und die Oribatida wurden auf Artniveau identifiziert und gezählt. In diesem Bericht werden die Rohzahlen angegeben (Individuen pro fünf Bodenproben) und durch Multiplikation dieser Zahlen mit 84,56 erhält man die Individuen pro m^2 .

7 Arbeits- und Zeitplan

Tasks	1st year				2nd year				3rd year				4th year			
	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
Management of experimental site (WP1): Cultivation and irrigation (including modelling)																
Soil hydrology (WP2): Sampling & Analysis																
Soil zoology (WP3): Sampling																
Soil zoology (WP3): Analysis																
Decomposition (WP3): Measurement & Analysis																
Carbon and Nitrogen mineralisation (WP4): Labelling of green manure																
Carbon and Nitrogen mineralisation (WP4): Application of labelled green manure																
Carbon and Nitrogen (WP4) Mineralisation experiment: Sampling & analysis																
Carbon and Nitrogen mineralisation (WP4): Report																
Stakeholder workshop (WP5)																
Reports (WP5)																
Coordination (WP5)																

8 Publikationen und Disseminierungsaktivitäten

2017

9.-10.05.2017	Helene Berthold	Lysimetertagung	Gumpenstein
14.-15.11.2017	Helene Berthold	Bodenforum, Poster	Tulln
24.-25.11.2017	Andrea Watzinger	SINA, 15th Stable Isotope Network Austria Meeting	Vienna

2018

23.-25.04.2018	Helene Berthold	Klimatag 2018	Salzburg
17.- 21.06.2018	Helene Berthold	Poster Conference on Ecology of Soil Microorganisms – ESM	Helsinki, Finland
22.-23.11.2018	Andrea Watzinger, Andreea Spiridon	Poster SINA, 16th Stable Isotope Network Austria	Graz

2019

25.03.2019	Andreas Baumgarten Anna Wawra	Lysimeter-Führung für HBLA Gartenbau Schönbrunn	AGES Lysimeteranlage, Wien
29.03.2019	Andreas Baumgarten	Lysimeter-Führung für Uni Wien	AGES Lysimeteranlage, Wien
7.-12.04.2019	Andrea Watzinger	EGU General Assembly 2019, poster	Vienna
29.04.2019	Anna Wawra	Lysimeter-Führung für HAUP	AGES Lysimeteranlage, Wien
24.-26.04.2019	Anna Wawra	Klimatag Wien, Poster & Presentation in front of steering committee, distribution of printed leaflets (copy of the poster)	AGES Lysimeteranlage, Wien
21.-22.05.2019	Anna Wawra	Lysimetertagung, Presentation	Irdning, HBLFA Gumpenstein
27.-28.05.2019	Anna Wawra	ALVA Tagung, Presentation	AGES Lysimeteranlage, Wien
7. – 12.07.2019	Andrea Watzinger	Isotopes 2019, presentation	Raintenhaslach

2020

31.01.2020	Anna Wawra	Lysimeter-Führung für BOKU	AGES Lysimeteranlage, Wien
23.01.2020	Anna Wawra	Lysimeter-Führung für HAUP	AGES Lysimeteranlage, Wien
11.09.2020	Andrea Watzinger	Stakeholder Workshop, presentation of results	AGES
19.11.2020	Andreas Baumgarten	LehrerInnen-Fortbildung PH Niederösterreich, Präsentation	online

Publikationen:

Beitrag Kapitel 5.1.2 „Lysimeter“ von Anna Wawra in:

Englisch, M., Markart, G., Kohl, B., Kogelbauer, I., Lechner, V., Nagl, F., Niedertscheider, K. (2020). 5 Messstelle: Plan/Design/Theorie. In: BMLRT Sektion I - Wasserwirtschaft, Abteilung I/3 – Wasserhaushalt (Hrsg.). Wasser im Boden. Wien.

Masterarbeiten innerhalb des Projektes:

- Weronika Kisielinska (2019). *The role mesofauna play in the carbon cycle of agricultural soils, determined using carbon isotope signatures of soil extractable fatty acids*. University of Warsaw.
- Andreea Spiridon (2019). *Consequences of future precipitation patterns for agroecosystem C and N cycling - a stable isotope labelling study*. University of Vienna.

Literatur

- Amundson, R., Austin, A.T., Schuur, E.A.G., Yoo, K., Matzek, V., Kendall, C., Uebersax, A., Brenner, D., Baisden, W.T., 2003. Global patterns of the isotopic composition of soil and plant nitrogen. *Global Biogeochemical Cycles* 17. doi:10.1029/2002GB001903
- Anders, E., Watzinger, A., Rempt, F., Kitzler, B., Wimmer, B., Zehetner, F., Zechmeister-Boltenstern, S., Soja, G., 2013. Biochar affects the structure rather than the total biomass of microbial communities in temperate soils. *Agriculture and Food Science* 22, 404–423.
- BÖHM, K., 1996: Lysimeteranlage Hirschstetten: erste Ergebnisse der Sickerwasseranalysen. Bericht über die 6. Gumpensteiner Lysimetertagung. BAL-Gumpenstein, A-8952 Irdning, 47-53.
- Djukic, I., Zehetner, F., Watzinger, A., Horacek, M., Gerzabek, M.H., 2013. In situ carbon turnover dynamics and the role of soil microorganisms therein: a climate warming study in an Alpine ecosystem. *FEMS Microbiology Ecology* 83, 112–24. doi:10.1111/j.1574-6941.2012.01449.x
- Eitzinger, J., Trnka, M., Semerádová, D., Thaler, S., Svobodová, E., Hlavinka, P., Šiška, B., Takáč, J., Malatinská, L., Nováková, M., Dubrovský, M., & Žalud, Z. (2013). Regional climate change impacts on agricultural crop production in Central and Eastern Europe – hotspots, regional differences and common trends. *The Journal of Agricultural Science*, 151(6), 787–812.
- Flamm, C., Engel, C., & Pauk, J. (2012). Einfluss von Trockenheit auf pflanzenbauliche Parameter, Ertrag und Qualität bei Winterweizen. ALVA Jahrestagung 2012.
- Food and Agriculture Organization (FAO). 1996. Prospects to 2010: Agricultural Resources and Yields in Developing Countries. p. 26-36. In: Volume 1, Technical Background Documents 1-5. World Food Summit, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- FEICHTINGER, F., 1998: STOTRASIM – Ein Modell zur Simulation der Stickstoffdynamik in der ungesättigten Zone eines Ackerstandortes. In: BUNDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT [HRSG] (1998): Modelle für die gesättigte und ungesättigte Bodenzone. Schriftenreihe des Bundesamtes für Wasserwirtschaft, Band 7, 14-41, Wien.
- Heiling, M., Arrillaga, J., Hood-Nowotny, R., Videla, X., 2006. Preparation of ammonium-15N and nitrate-15N samples by microdiffusion for isotope ratio analysis by optical emission spectrometry. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 37, 337–346. doi:10.1080/00103620500439931
- Homyak, P.M., Allison, S.D., Huxman, T.E., Goulden, M.L., Treseder, K.K., 2017. Effects of Drought Manipulation on Soil Nitrogen Cycling: A Meta-Analysis. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 122, 3260–3272. doi:10.1002/2017JG004146
- Hood-Nowotny, R., Umana, N.H.-N., Inselbacher, E., Oswald-Lachouani, P., Wanek, W., 2010. Alternative Methods for Measuring Inorganic, Organic, and Total Dissolved Nitrogen in Soil. *Soil Science Society of America Journal* 74, 1018–1027. doi:10.2136/sssaj2009.0389
- Keeling, C., 1958. The concentration and isotopic abundance of atmospheric carbon dioxide in rural areas. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 13, 322–334.
- Keuskamp, Joost A., et al. "Tea Bag Index: a novel approach to collect uniform decomposition data across ecosystems." *Methods in Ecology and Evolution* 4.11 (2013): 1070-1075.
- Krammer, C. & Strauss, P. (2020). CLIMAGROCYCLE. Project report. WP.2 Quantify the climate change influence on soil water regime (plant water stress, seepage water), as well on nitrate-nitrogen regime and crop yield for the typical soils of the region. Bundesamt für Wasserwirtschaft.
- Lachouani, P., Frank, A.H., Wanek, W., 2010. A suite of sensitive chemical methods to determine the $\delta^{15}\text{N}$ of ammonium, nitrate and total dissolved N in soil extracts. *Rapid Communications in Mass Spectrometry* 24, 3615–3623. doi:10.1002/rcm.4798
- Lennon, J.T., Aanderud, Z.T., Lehmkuhl, B.K., Schoolmaster, D.R., 2012. Mapping the niche space of soil microorganisms using taxonomy and traits. *Ecology* 93, 1867–1879. doi:10.1890/11-1745.1
- Majer, P., Sass, L., Lelley, T., Cseuz, L., Vass, I., Dudits, D., & Pauk, J. (2008). Testing drought tolerance of wheat by a complex stress diagnostic system installed in greenhouse. *Biologica Szegediensis*, 52(1), 97–100.

- Orwin, K.H., Dickie, I.A., Holdaway, R., Wood, J.R., 2018. A comparison of the ability of PLFA and 16S rRNA gene metabarcoding to resolve soil community change and predict ecosystem functions. *Soil Biology and Biochemistry* 117, 27–35. doi:10.1016/j.soilbio.2017.10.036
- Ramsey, P.W., Rillig, M.C., Feris, K.P., Holben, W.E., Gannon, J.E., 2006. Choice of methods for soil microbial community analysis: PLFA maximizes power compared to CLPP and PCR-based approaches. *Pedobiologia* 50, 275–280. doi:10.1016/j.pedobi.2006.03.003
- Schimel, J. P. (2018). Life in dry soils: effects of drought on soil microbial communities and processes. *Annual review of ecology, evolution, and systematics*, 49, 409-432.
- STASTNA, M., STENITZER, E., 2005: SIMWASER model as a tool for the assessment of soil water balance. *PLANT SOIL ENVIRON.*, 51, 2005 (8): 343–350
- Stemmer, M., Watzinger, A., Blochberger, K., Haberhauer, G., Gerzabek, M.H., 2007. Linking dynamics of soil microbial phospholipid fatty acids to carbon mineralization in a ¹³C natural abundance experiment: Impact of heavy metals and acid rain. *Soil Biology and Biochemistry* 39, 3177–3186.
- STENITZER, E., 1988: Ein numerisches Modell zur Simulation des Bodenwasserhaushaltes und des Pflanzenenertrages eines Standortes. *Mitt. aus der Bundesanstalt für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt*, Nr. 31, Petzenkirchen.
- STENITZER, E., 2004: SIMWASER A numerical model on soil water balance and plant growth. IKT Report Nr. 5, Selbstverlag. S. 13-16.
- STENITZER E. und HÖSCH J., 2007: Die Lysimeteranlage Hirschstetten als Grundlage zur Erfassung der Grundwasserneubildung im Marchfeld. 12. Gumpensteiner Lysimetertagung, 17. und 18. April.
- Spiegel, Heide et al. "Toward Improved Nitrogen Fertilization with Precision Farming Based on Sensor and Satellite Technologies." *Women in Precision Agriculture*. Springer, Cham, 2020. 69-83.
- Tataw, James Tabi, et al. "Climate change induced rainfall patterns affect wheat productivity and agroecosystem functioning dependent on soil types." *Ecological research* 31.2 (2016): 203-212.
- UNGERSBÖCK, M., AUER, I., RUBEL, F., SCHÖNER, W. und. SKOMOROWSKI, P., 2001: Zur Korrektur des Systematischen Fehlers bei der Niederschlagsmessung. Anwendung des Verfahrens für die ÖKLIM Karten. DACH-Meteorologentagung, 18. -21. Sep. 2001, Wien / Österreich
- Watzinger, A., 2015. Microbial phospholipid biomarkers and stable isotope methods help reveal soil functions. *Soil Biology and Biochemistry* 86, 98–107. doi:10.1016/j.soilbio.2015.03.019
- Watzinger, A., Feichtmair, S., Kitzler, B., Zehetner, F., Kloss, S., Wimmer, B., Zechmeister-Boltenstern, S., Soja, G., 2014. Soil microbial communities responded to biochar application in temperate soils and slowly metabolized ¹³C-labelled biochar as revealed by ¹³C PLFA analyses: results from a short-term incubation and pot experiment: Response of soil. *European Journal of Soil Science* 65, 40–51. doi:10.1111/ejss.12100
- Watzinger, A., Hood-Nowotny, R., 2019. Stable Isotope Probing of Microbial Phospholipid Fatty Acids in Environmental Samples, in: Dumont, M.G., García, M.H. (Eds.), *Stable Isotope Probing*. Humana Press, USA, pp. 45–55. doi:10.1007/978-1-4939-9721-3

ANHANG

Tabelle 9: Monatlicher mittlerer Regen und Bewässerung

	Regen (mm)	Bew. "curr." (mm)	Bew. "pred." (mm)
2017			
1	3.4		
2	16.9		
3	22.6		
4	48.6		
5		57.8	39
6		78.5	44.7
7		32.7	33.2
8		45.3	44.4
9		36.7	17.5
10		33.9	39.8
11	23.5		
12	26.7		
2018			
1	30.3		
2	15.2		
3	25.9		
4		73.9	73.7
5		56.5	30
6		46.5	34.5
7		28.9	5.1
8		58.6	40.4
9		45.0	23.1
10		36.7	42.4
11		0	18.4
12	45.2		
2019			
1	15		
2	7.8		
3		28.5	28.5
4		37	18
5		55	24.8
6		65.9	38.4
7		46.9	32.9
8		28.5	20.3
9		51.7	32.2
10		27.3	17.9
11		11.3	27.7
12	32.9		

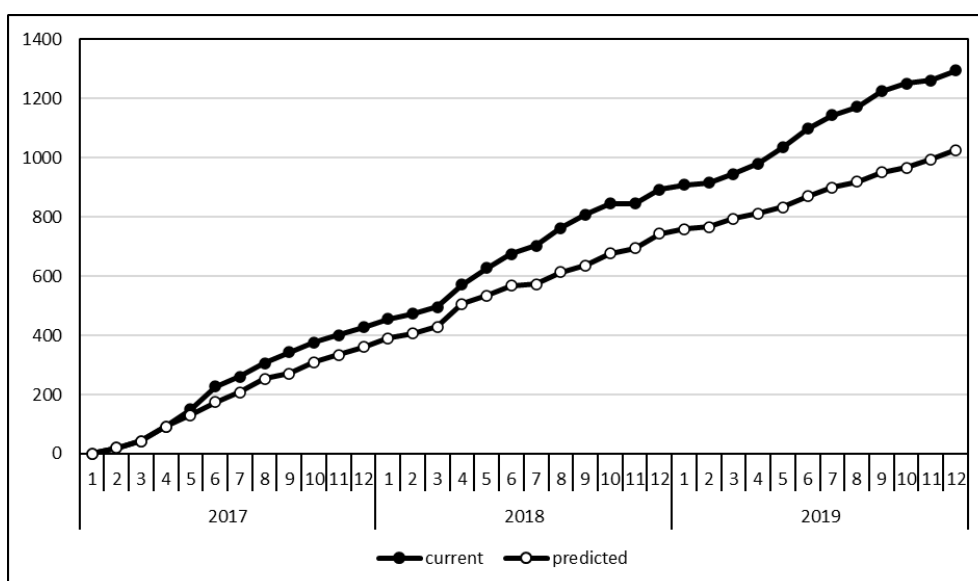


Abbildung 6. Kumulativer mittlerer Niederschlag während der Studie (mm)

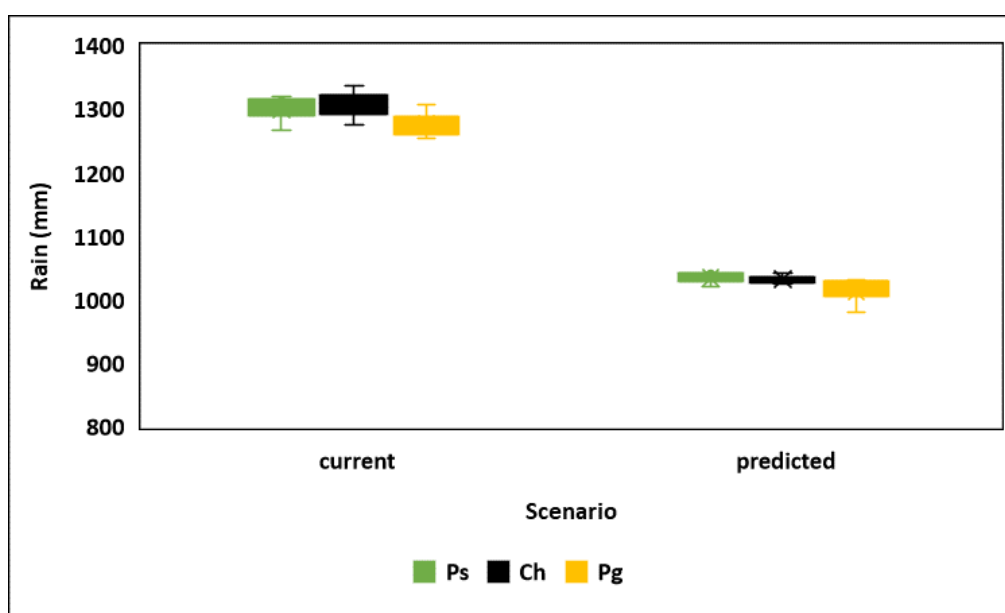


Abbildung 7. Gesamter Niederschlag und Standardabweichung 2017 - 2019 für beide Varianten und drei Bodentypen

Tabelle 10. Regen (P) und Sickerwasser (SW) pro Lysimeter, Szenario und Jahr

Treatment	Lys	2017		2018		2019	
		P (mm)	SW (mm)	P (mm)	SW (mm)	P (mm)	SW (mm)
Ch current	CT06	426.8	7.47	454.2	0.86	393.8	0.76
Ch current	CT12	426.8	7.47	471.8	0.86	409.5	0.76
Ch current	CT18	426.8	7.47	490.2	0.86	419.6	0.75
Ch predicted	DT03	360.5	7.48	392.2	0.86	289.4	0.76
Ch predicted	DT09	360.5	7.48	382.2	0.86	283.2	0.77
Ch predicted	DT15	360.5	7.48	383.7	0.86	285.0	0.77
Pg current	CF02	426.8	17.4	472.7	1.09	408.5	0.06
Pg current	CF08	426.8	17.4	449.7	1.08	392.0	0.05
Pg current	CF14	426.8	17.4	441.4	1.08	385.1	0.06
Pg predicted	DF05	360.5	18.2	385.2	1.16	284.9	0.04
Pg predicted	DF11	360.5	18.2	355.7	1.17	265.1	0.06
Pg predicted	DF17	360.5	18.2	383.7	1.16	285.0	0.04
Ps current	CS04	426.8	6.03	452.6	5.19	387.3	5.45
Ps current	CS10	426.8	6.03	477.2	5.19	408.1	5.32
Ps current	CS16	426.8	6.03	481.8	5.20	412.1	5.52
Ps predicted	DS01	360.5	6.03	391.9	5.19	290.0	5.45
Ps predicted	DS07	360.5	6.03	390.1	5.19	289.2	5.36
Ps predicted	DS13	360.5	6.03	378.9	5.19	281.1	5.49

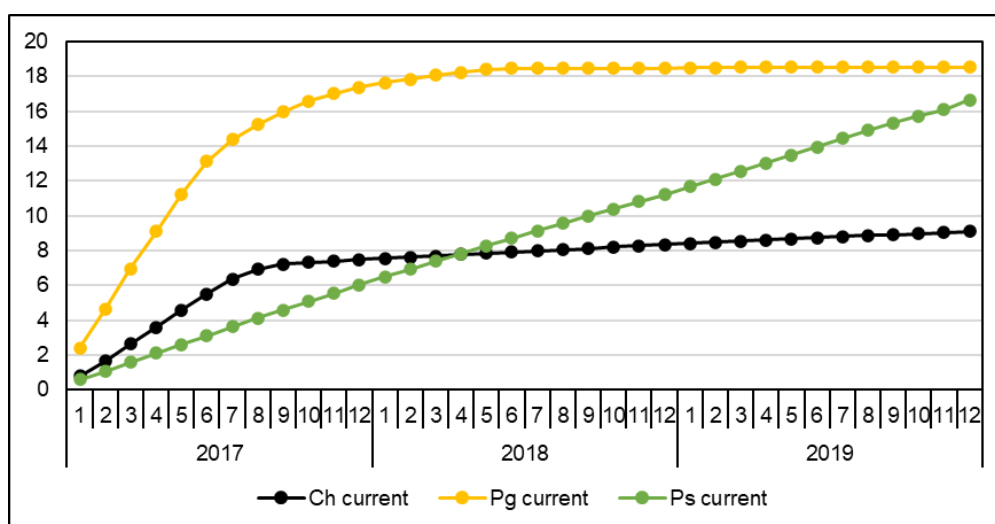


Abbildung 8. Current Szenario – Berechnete Sickerwassermengen, monatlich kumulierte Werte (mm)

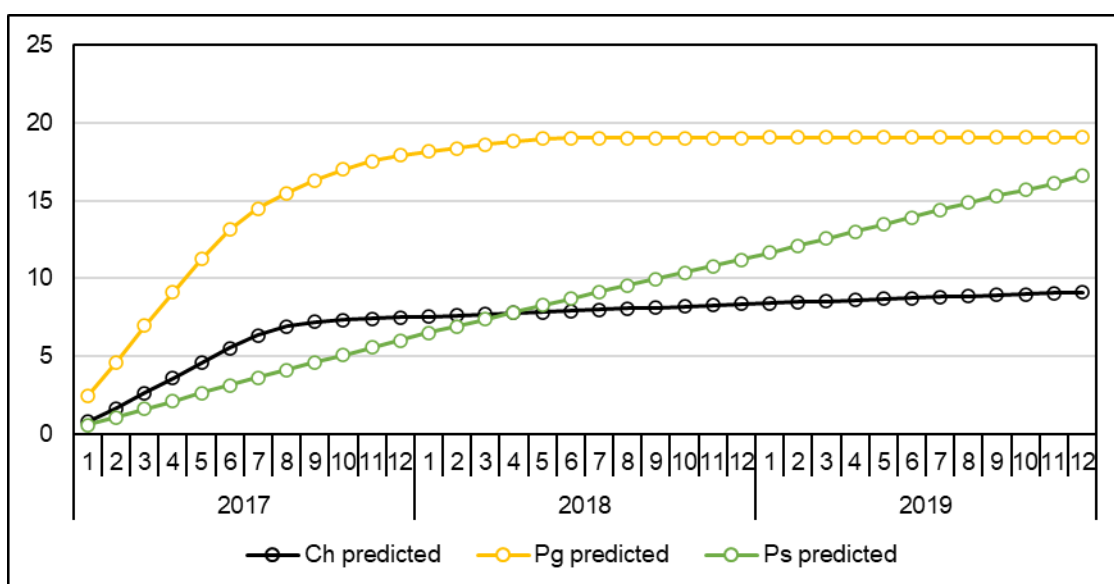


Abbildung 9: Predicted Szenario – Berechnete Sickerwassermengen, monatlich kumulierte Werte (mm)

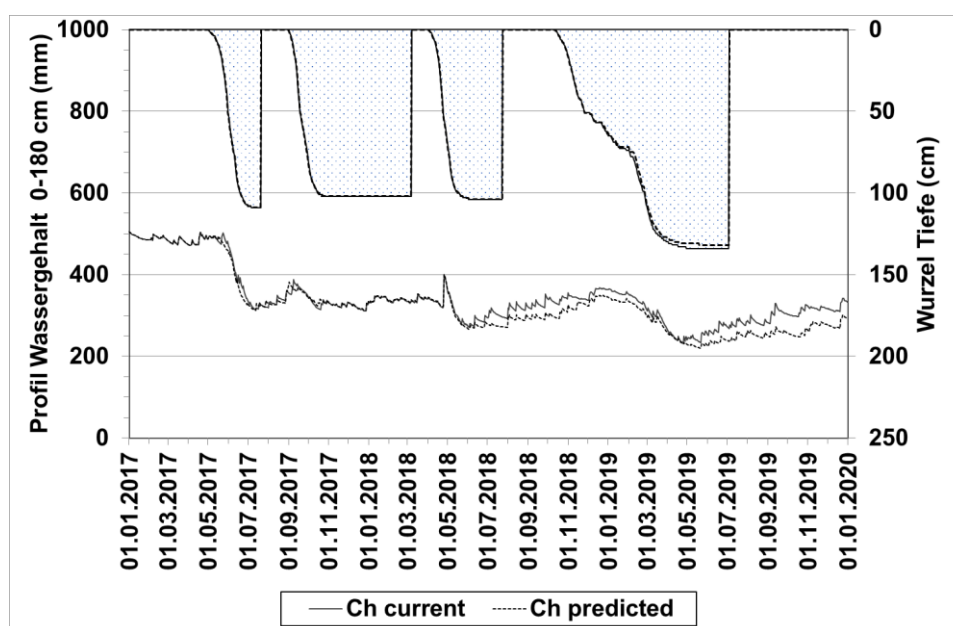


Abbildung 10: Profilwassergehalt und Wurzeltiefe berechnet. Tageswerte für Bodentyp Ch

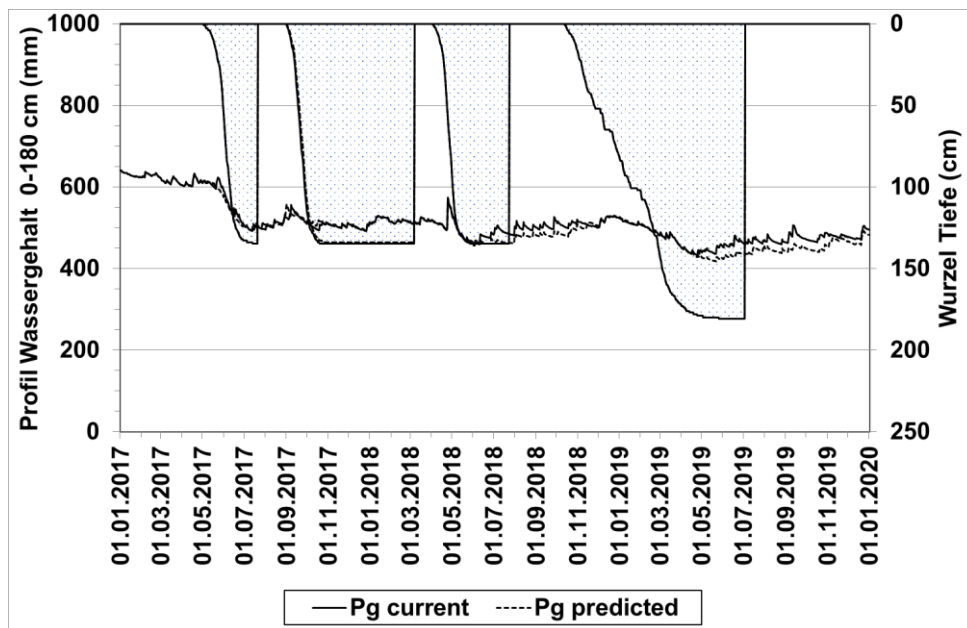


Abbildung 11: Profilwassergehalt und Wurzeltiefe berechnet. Tageswerte für Bodentyp Pg

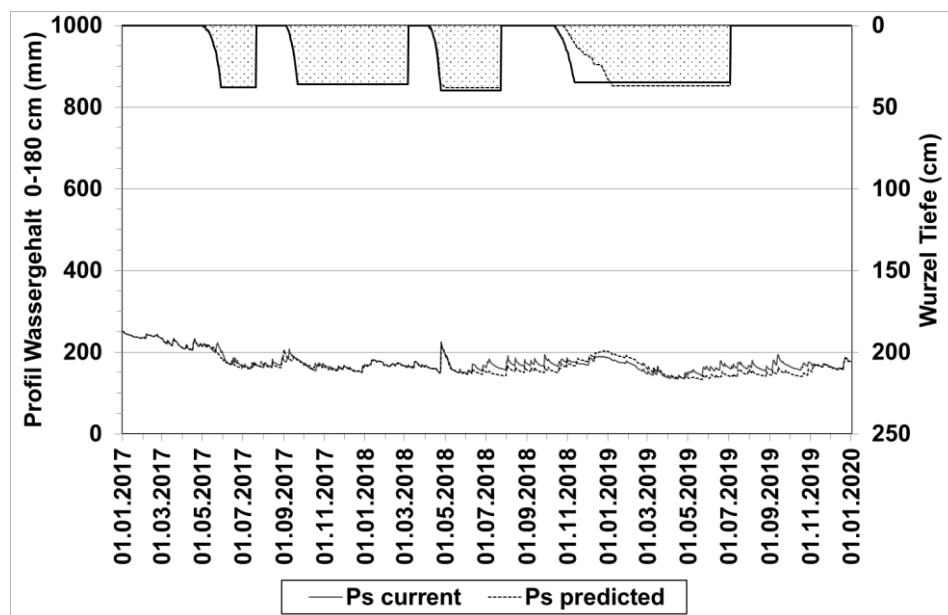


Abbildung 12: Profilwassergehalt und Wurzeltiefe berechnet. Tageswerte für Bodentyp Ps

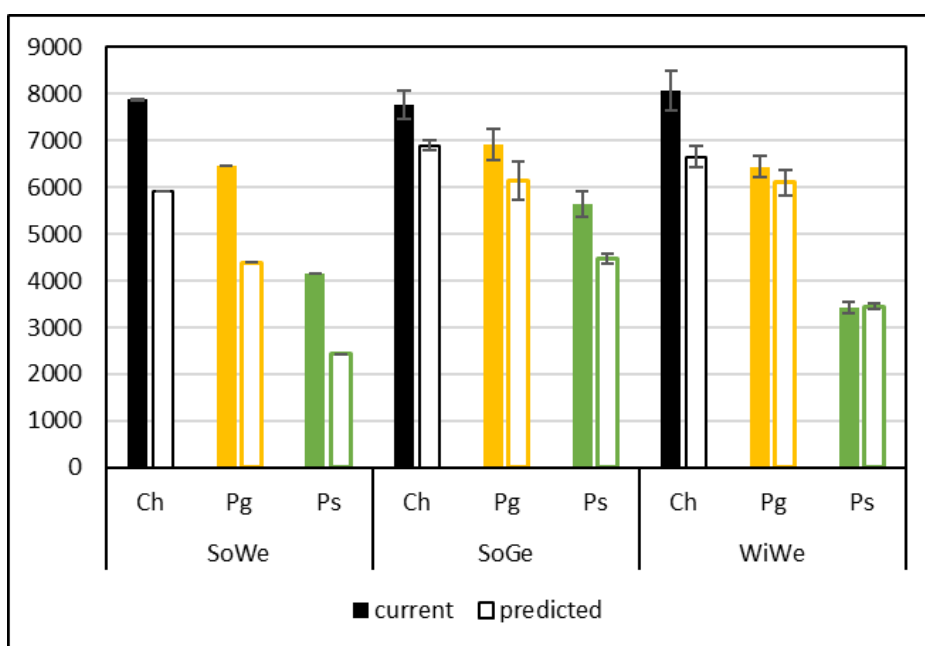


Abbildung 13: Berechnete Erträge und deren Standardabweichung 2017 – 2019 für beide Varianten und drei Bodentypen (TM in kg/ha).

Tabelle 11: Potentielle Nitratauswaschung

Jahr	Sickerwasser (mm/a)		NO ₃ -N Fracht (kg/ha*a)		NO ₃ Konzentration(mg/l)	
	Pg current	Pg predicted	Pg current	Pg predicted	Pg current	Pg predicted
2017	17.4	18.2	0.0	0.0	0.0	0.0
2018	1.1	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0
2019	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Total	18.6	19.4	0.0	0.0	0.0	0.0
Jahr	Ps current		Ps predicted"		Ps current	
	Ps current	Ps predicted"	Ps current	Ps predicted"	Ps current	Ps predicted"
2017	6.0	6.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2018	5.2	5.2	0.0	0.0	0.0	0.0
2019	5.4	5.4	0.0	0.0	0.0	0.0
Total	16.3	16.3	0.0	0.0	0.0	0.0
Jahr	Ch current		Ch predicted		Ch current	
	Ch current	Ch predicted	Ch current	Ch predicted	Ch current	Ch predicted
2017	7.5	7.5	0.0	0.0	0.0	0.0
2018	0.9	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0
2019	0.8	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0
Total	9.2	9.2	0.0	0.0	0.0	0.0

Tabelle 12: Durchschnittliche N-Bilanz (kg N / ha; Abfuhr minus Zufuhr minus Austrag) in Bezug auf Bodentyp und -variante: Positive Vorzeichen zeigen eine Mobilisierung von N-Reserven aus dem Boden an, negative Vorzeichen zeigen einen N-Überschuss an.

	2017	2018	2019
	Sommer Weizen	Sommer Gerste	Winter Weizen
„current“			
Pg	64.1	-9.2	-60.1
Ps	45.7	-10.4	-68.0
Ch	87.7	0.4	-38.0
„predicted“			
Pg	46.9	-12.9	-60.7
Ps	33.2	-13.5	-52.7
Ch	79.5	-3.6	-52.3

Tabelle 13. Anzahl der Beikrautarten pro Bodentyp und Niederschlagsszenario für jedes Jahr (2017-2019).

	12.07.2017						16.07.2018						02.07.2019					
Weed species	C			D			C			D			C			D		
	F	S	T	F	S	T	F	S	T	F	S	T	F	S	T	F	S	T
<i>Consolida regalis</i> S.F. Gray, Syn.: <i>Delphinium consolida</i> L.			X			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
<i>Chenopodium album</i>	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
<i>Fallopia convolvulus</i> (<i>Polygonum convolvulus</i>)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
<i>Reseda lutea</i>		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
<i>Pennisetum</i> sp.	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			
<i>Tragopogon pratensis</i>			X	X	X	X												
<i>Hieracium lachenalii</i>	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X						
<i>Veronica</i> sp.	X		X	X	X	X												
<i>Polygonum aviculare</i>	X		X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
<i>Medicago lupulina</i>				X	X	X							X					
<i>Zea mays</i>					X	X												
<i>Amaranthus retroflexus</i>	X									X	X					X	X	
<i>Papaver rhoeas</i>							X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
<i>Convolvulus arvensis</i>							X		X	X		X	X	X	X	X	X	X
<i>Cirsium arvense</i>									X				X					
<i>Mercurialis annua</i>							X	X		X	X	X	X	X				
<i>Viola arvensis</i>													X	X				
<i>Gallinsoga parviflora</i>										X		X						
<i>Galeopsis segetum</i>									X									
<i>Echinochloa crus-galli</i>									X									
Gras													X		X	X	X	
<i>Silene</i> sp.														X		X		X
<i>Sandhus</i> sp.													X		X	X		X
Wolfsmilch kleinblütig													X					
Miere													X	X			X	
<i>Tripleurospermum perforatum</i>													X					X
Sum	7	4	9	4	6	11	9	7	11	10	8	11	13	14	11	9	10	11

Tabelle 14. 3Way-Anova von N-Aufnahme der Nutzpflanzen 2017, 2018 and 2019

Parameter	Unit	Transf.	Soil		Precipitation		Time	
			F	P	F	P	F	P
Plant N uptake	g m ⁻²	log	2.80	0.0723	2.97	0.0923	22.37	0.0000

Tabelle 15. Two-way ANOVA der Zersetzung, gemessen in 2019.

Parameter	Soil			Precipitation	
	Pg	Ps	Ch	C	D
S	a	b	ab	a	b
k	↔	↔	↔	↔	↔

Tabelle 16. Bodenanalysen der Lysimeter (04.07.2019). Kleinbuchstaben weisen auf einen signifikanten Unterschied zwischen Bodentypen hin. Großbuchstaben zeigen einen signifikanten Unterschied zwischen Niederschlagsszenarien pro Bodenart an. Fett: Signifikanter Unterschied zwischen Niederschlagsszenarien

		Pg	Ps	Ch
pH	Scenario			
	cur	8.0A	8.0	8.0A
	pred	7.9B	7.9	7.9B
N nachlieferbar mg/kg/7d	Cur	60.0	36.1	59.1
	pred	55.8	38.9	59.4
Calciumcarbonat %	Cur	28.8	13.8	20.9
	pred	29.2	14.0	20.9
Phosphor mg/kg	Cur	64.0a	132.3b	78.7c
	pred	61.0a	136.3b	83.3c
Kalium mg/kg	cur	83.7	49.7	72.0
	pred	80.7 a	64.3 b	75.0 a
TOC	Cur	2.34a	1.12b	2.91a
	Pred	2.30	1.14	2.91
Humusgehalt %	cur	4.0a	1.9b	5.0c
	pred	3.9a	2.0b	5.0c
N gesamt	Cur	0.21a	0.10b	0.23c
	Pred	0.22a	0.10b	0.23c
Calcium cmolc/kg	cur	19.4a	10.8b	22.5c
	pred	20.3a	10.8b	22.9c
Magnesium cmolc/kg	cur	5.3a	2.5b	5.5c
	pred	5.0a	2.5b	5.2c
Natrium cmolc/kg	cur	0.7 a	0.4 b	0.7 aA
	pred	0.6 a	0.3 b	0.5 aB
CEC cmolc/kg	cur	25.6a	13.8b	28.9c
	pred	26.2a	13.8b	28.9c
C:N Verhältnis	cur	11.3a	11.3a	12.9b
	pred	10.7a	11.0a	12.9b
Aggregatstabilität	Cur	18.6	21.5	25.5 A
	Pred	23.9	25.0	35.9 B

Tabelle 17. Generalized mixed effects analysis der Collembolen-Abundanz.

```
Random effects:
Conditional model:
Groups      Name      Variance Std.Dev.
season_year (Intercept) 0.1278  0.3575
Residual      0.1986  0.4456
Number of obs: 72, groups: season_year, 6

Dispersion estimate for gaussian family (sigma^2): 0.199

Conditional model:
              Estimate Std. Error z value Pr(>|z|)
(Intercept)    1.9144    0.1798  10.647  <2e-16 ***
irrigationpredicted -0.1083    0.1485  -0.729   0.4661
soilPs         -0.2916    0.1485  -1.963   0.0496 *
irrigationpredicted:soilPs -0.1573    0.2101  -0.749   0.4539
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

Tabelle 18. Generalized mixed effects analysis der Hornmilben-Abundanz.

```
Random effects:
Conditional model:
Groups      Name      Variance Std.Dev.
season_year (Intercept) 0.2439  0.4938
Residual      0.0755  0.2748
Number of obs: 72, groups: season_year, 6

Dispersion estimate for gaussian family (sigma^2): 0.0755

Conditional model:
              Estimate Std. Error z value Pr(>|z|)
(Intercept)    1.25973    0.21175   5.949 2.70e-09 ***
irrigationpredicted -0.49738    0.09159  -5.431 5.62e-08 ***
soilCh          0.39814    0.09159   4.347 1.38e-05 ***
irrigationpredicted:soilCh 0.21823    0.12953   1.685 0.092 .
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

Tabelle 19. Die Oribatiden-Arten, die an sechs Beprobungsterminen (2017-2019) während des Projekts Climagrocycle gesammelt wurden.

<i>Epilohmannia cylindriaca</i> (Berlese, 1904)
<i>Fosseremus laciniatus</i> (Berlese, 1904)
<i>Graptoppia</i> cf. <i>paraanalisis</i> Subias & Rodriguez, 1985
<i>Microppia minus</i> (Paoli, 1908)
<i>Nothrus anauniensis</i> Canestrini & Fanzago, 1876
<i>Protoribates capucinus</i> Berlese, 1908
<i>Rhysotritia ardua</i> (C.L. Koch, 1841)
<i>Scheloribates fimbriatus</i> Thor, 1920
<i>Tectocephus velatus sarekensis</i> (Trägårdh, 1910)

Tabelle 20. Adonis-Permutationstest zur Ähnlichkeit von Oribatidenmilben-Assemblagen (Paket vegan 2.5-6 in R 3.6.2, 999 Permutationen von Hellinger-transformierten Daten, Bray-Curtis-Ähnlichkeit).

	Df	SumsOfSqs	MeanSqs	F.Model	R2	Pr(>F)
soil	1	0.067408	0.067408	5.1133	0.31010	0.009 **
irrigation	1	0.029536	0.029536	2.2404	0.13587	0.112
soil:irrigation	1	0.014969	0.014969	1.1355	0.06886	0.388
Residuals	8	0.105464	0.013183		0.48517	
Total	11	0.217377			1.00000	

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1						

Tabelle 21: Häufigkeit und Art der Bodenprobenahmen.

Date	Period	Time	Soil	Unlabelled	Labelled plots	Events
24/10/2017	2017	t00	P _s , Ch	✓		1x fertilisation
09/04/2018	0h / 6h	t01	P _s , Ch	✓	✓	
11/04/2018	2d	t02	P _s , Ch		✓	
13/04/2018	4d	t03	P _s , Ch		✓	25/04/2018
18/04/2018	9d	t04	P _s , Ch		✓	heavy rainfall
30/04/2018	21d	t07	P _s , Ch		✓	08/05/2018
11/05/2018	32d	t08	P _s , Ch		✓	fertilization
20/06/2018	72d	t09	P _s , Ch		✓	harvest
19/03/2019	0.9y	t10	P _s , Ch	✓	✓	
14/05/2019	1.1y	t11	P _s , Ch		✓	3x fertilisation
03/07/2019	1.2y	t12	P _s , Ch	✓	✓	harvest

Diese Projektbeschreibung wurde von der Fördernehmerin/dem Fördernehmer erstellt. Für die Richtigkeit, Vollständigkeit und Aktualität der Inhalte sowie die barrierefreie Gestaltung der Projektbeschreibung, übernimmt der Klima- und Energiefonds keine Haftung.

Die Fördernehmerin/der Fördernehmer erklärt mit Übermittlung der Projektbeschreibung ausdrücklich über die Rechte am bereitgestellten Bildmaterial frei zu verfügen und dem Klima- und Energiefonds das unentgeltliche, nicht exklusive, zeitlich und örtlich unbeschränkte sowie unwiderrufliche Recht einräumen zu können, das Bildmaterial auf jede bekannte und zukünftig bekanntwerdende Verwendungsart zu nutzen. Für den Fall einer Inanspruchnahme des Klima- und Energiefonds durch Dritte, die die Rechteinhaberschaft am Bildmaterial behaupten, verpflichtet sich die Fördernehmerin/der Fördernehmer den Klima- und Energiefonds vollumfänglich schad- und klaglos zu halten.