

Bodenmikrobiome und wichtige Ökosystemleistungen – ein Pilotprojekt



Impressum

Projektnehmerin: Umweltbundesamt GmbH

Team für Landnutzung und Biologische Sicherheit

Adresse: 1090 Wien, Spittelauer Lände 5

Projektleiterin: Elisabeth Schwaiger

Tel.: 01/31304/3640

E-Mail: elisabeth.schwaiger@umweltbundesamt.at

Kooperationspartner:innen: Umweltbundesamt: Barbara Birli, Manuela Bürgler, Barbara Färber, Sigbert Huber, Peter Tramberend; AIT: Markus Gorfer, Theresa Ringwald, Dragana Bandian, Angela Sessitsch; Landwirtschaftskammer NÖ: Josef Springer;

Landwirtschaftskammer OÖ: Franz Xaver Hölzl

Finanzierungsstelle: BML

Projektlaufzeit: 1.12.2020 bis 30.6.2023

Fotonachweis: Cover: Umweltbundesamt/Anastasia Zinner

Wien, 2023.

Inhalt

1 Einleitung	6
2 Ziel des Projektes	7
3 Bodenmikrobiom und Trockenstress.....	8
3.1 Allgemein	8
3.1.1 Mikrobielle Gemeinschaften	9
3.2 Auswahl der Versuchsflächen.....	11
3.3 Untersuchungen im Freiland	13
3.4 Untersuchungen im Glashaus.....	13
3.5 Ergebnisse	15
3.5.1 Freilandflächen	15
3.5.2 Glashaus.....	24
3.6 Diskussion und Schlussfolgerungen für die Praxis.....	38
3.6.1 Bodenmikrobiom und Trockenheit.....	38
3.6.2 Bodenmikrobiom und Zwischenfruchtanbau	39
4 Umweltbewertung	42
4.1 Ökosystemleistungen und Landwirtschaft	43
4.2 Ökosystemleistungen und Boden.....	44
4.2.1 Biomasseproduktion	46
4.2.2 Speicherung und Reinigung von Wasser	47
4.2.3 Kohlenstoffbindung	48
4.2.4 Nährstoffkreislauf und Reduktion von Schadstoffbelastung.....	49
4.2.5 Biodiversität	50
4.2.6 Lebensqualität	50
5 Disseminierungsaktivitäten	52
5.1 Aufbereitung eines Schulmoduls für landwirtschaftliche Schulen.....	53
5.1.1 Lehrunterlagen für landwirtschaftliche Schulen	53
5.1.2 Durchführung der Schulworkshops	55
5.1.3 Aktivitäten zur Verbreitung der Lehrmaterialien	59
5.2 Aufbereitung der Thematik für die Öffentlichkeit.....	59
5.3 Informationsveranstaltungen für Fachpublikum.....	62
5.3.1 Boden.Wasser.Schutz.Tagung 2022	62
5.3.2 Weitere Arbeiten zur besseren Bekanntmachung des Projektes und Verbreitung der Projektinhalte	63
5.4 Publikationen	64

6 Zusammenfassung.....	65
7 Anhang.....	69
7.1 Poster – für Lange Nacht der Forschung	69
7.2 Lehrunterlagen	69
Tabellenverzeichnis.....	70
Abbildungsverzeichnis.....	71
Literaturverzeichnis	72
Abkürzungen.....	78

1 Einleitung

Klimawandel und Bodenversiegelung stellen die Landwirtschaft und damit die Versorgung der Bevölkerung mit Nahrungsmitteln vor immer größer werdende Herausforderungen (Haslmayr et al., 2018, IPCC, 2014). Landwirtschaftlich genutzte Flächen dienen jedoch nicht nur der Nahrungsmittelproduktion, sondern erfüllen auch andere wichtige Ökosystemleistungen (ÖSL). Landwirtschaftliche Böden erfüllen eine Reihe lebenswichtiger Funktionen, indem sie die Primärproduktion und Zersetzungsprozesse unterstützen, die Nährstoff-, Kohlenstoff- und Wasserkreisläufe regulieren und mehrere Ökosystemprozesse steuern, wie z. B. Pufferung, Filterung, Speicherung, und Lebensraum für Organismen bereitstellen (Faber et al., 2022). Das Mikrobiom im Boden zeigt komplexe Interaktionen mit Bodenparametern, Pflanzenwachstum und anderen Umweltfaktoren. Bei vielen Nährstoffumsetzungen sind die Funktionen der Mikroorganismen und deren Interaktionen gut erforscht. Beim Verständnis des Beitrags des Bodenmikrobioms zu anderen ÖSL steht die Forschung aber erst ganz am Anfang. So ist der Einfluss von Trockenheit auf Bakterien und Pilze im Boden bekannt, wobei oftmals indirekte Effekte über die Vegetation zu beobachten sind (z. B. de Vries et al., 2018). Am AIT konnte in Vorversuchen gezeigt werden, dass sich eine verminderte mikrobielle Biodiversität im Boden negativ auf das Pflanzenwachstum unter Trockenstress auswirken kann (Ringwald et al., unpublizierte Daten). Bekannt ist weiters, dass sich mit dem Humusgehalt die mikrobielle Biomasse im Boden erhöht (z. B. McGonigle und Turner, 2017) und sich auch die Zusammensetzung der mikrobiellen Gemeinschaften ändert (z. B. Hartmann et al., 2015). Zwischenbegrünungen stellen eine Möglichkeit dar, um Humus im Boden aufzubauen und Bodenerosion zu vermindern. Damit können bestimmte Ökosystemleistungen (ÖSL) des Bodens erhalten bzw. verbessert werden.

In diesem Pilotprojekt wurde einerseits die Auswirkung von Zwischenbegrünungen auf das Bodenmikrobiom im Freiland untersucht. Andererseits sollte die Interaktion von Trockenstress und mikrobieller Diversität im Boden in einem Glashausversuch untersucht werden. Ein besseres Wissen um die Bedeutung des Mikrobioms in der Stresstoleranz kann in der Zukunft bei der Entwicklung nachhaltiger Strategien für eine klimafitte Landwirtschaft helfen.

2 Ziel des Projektes

Ein wichtiges Ziel des Projektes war es, die Zusammenhänge zwischen dem Bodenmikrobiom und ausgewählten ÖSL zu erkennen und darzustellen. Damit soll eine umfassendere Bewertung der zahlreichen Funktionen landwirtschaftlicher Böden möglich gemacht werden. In weiterer Folge trägt eine möglichst umfassende Bewertung von Böden zum gezielten Schutz von Flächen dar, die für bestimmte ÖSL relevant sind.

Zudem war es das Ziel dieser Pilotstudie, die Bedeutung von Bodenmikrobiomen für Landwirt:innen sowie eine breite Öffentlichkeit zu demonstrieren und zielgruppenorientierte Empfehlungen zur Berücksichtigung der Potenziale der Bodenmikrobiome für die ÖSL zu geben. Eine genauere Kenntnis der durch Gründüngung bewirkten Bodenprozesse und Veränderungen im Bodenmikrobiom kann in Zukunft als weiteres Argument zur vermehrten Anwendung der Gründüngung genutzt werden. Landwirt:innen sowie Schüler:innen wurden in die Studie aktiv miteinbezogen ("farmer / citizen science"). Die Ergebnisse der Studie wurden verschiedenen relevanten Stakeholdern vorgestellt.

3 Bodenmikrobiom und Trockenstress

3.1 Allgemein

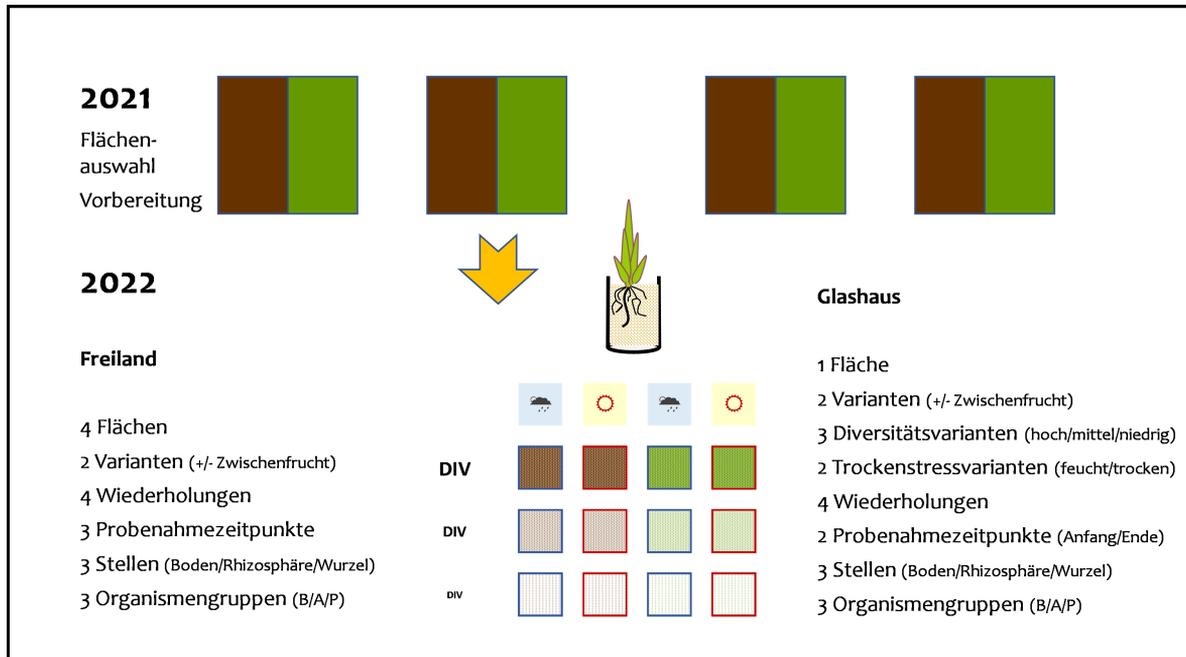
Für das Pilotprojekt Bodenmikrobiome und wichtige Ökosystemleistungen wurde Mais ausgewählt, da es sich dabei um eine flächenmäßig wichtige Kulturpflanze in Ober- und Niederösterreich handelt. Der Maisanbau hatte in den letzten Jahren oftmals unter der starken Trockenheit während der Vegetationsperiode zu leiden. Weiters können mit Mais auch Glashausversuche durchgeführt werden.

Nach der Flächenauswahl im Spätsommer 2021 wurde ein Teil der Flächen unbegrünt belassen, während auf dem anderen Teil eine Zwischenfruchtmischung ausgesät wurde (Details siehe 3.5.1 Freilandflächen). Es wurde angenommen, dass sich der Anbau von Zwischenfrüchten über den Winter positiv auf das Bodenleben auswirkt.

Im Frühling 2022 wurde eine der vier Flächen für einen Glashausversuch ausgewählt. Dazu wurde Boden von den beiden Winterbegrünungsvarianten (mit bzw. ohne Zwischenfrucht) entnommen. Ein Teil des Bodens wurde zur Reduktion der mikrobiellen Diversität mit γ -Strahlen behandelt. Im Glashausversuch wurde wie auch im Freiland Mais angebaut. Ein Teil der Töpfe wurde einem Trockenstress ausgesetzt um den Einfluss der mikrobiellen Diversität auf die Stresstoleranz testen zu können (Details siehe 3.5.2 Glashaus).

Ein Schema der Freiland- und Glashausversuche ist in Abbildung 1 gezeigt.

Abbildung 1: Plan für die Freiland- und Glashausversuche.



Quelle: AIT

Nach der Flächenauswahl im Spätsommer wurden auf vier Flächen in Ober- und Niederösterreich jeweils ein Teil unbepflanzt belassen (braune Hälfte), während der Rest mit Zwischenfrüchten begrünt wurde (grüne Hälfte). Im Jahr 2022 wurden dann zu drei Zeitpunkten Proben aus den Freilandflächen entnommen. Von einer Fläche wurde Boden für einen Glashausversuch entnommen. Zusätzlich zu den Begrünungsvarianten wurde die Diversität durch γ -Bestrahlung reduziert (durch unterschiedliche Schriftgrößen von DIV markiert). Die im Glashaus angebaute Maispflanze wurde zum Teil einem Trockenstress ausgesetzt (Symbole für Regen bzw. Sonne für die beiden Varianten „Kein Stress“ bzw. „Trockenstress“). Für die Mikrobiomuntersuchungen wurden Proben von Boden, Rhizosphäre und Wurzel auf Bakterien (B), Archaeen (A) und Pilze (P) untersucht.

3.1.1 Mikrobielle Gemeinschaften

Die mikrobiellen Gemeinschaften der Bakterien, Archaeen und Pilze wurden über die Hochdurchsatzsequenzierung erfasst. Dafür wurden Proben von Gesamtboden, Rhizosphärenboden und Wurzeln genommen. Der Gesamtboden haftet nicht direkt der Wurzel an, und wird in weiterer Folge einfach Boden genannt. Der Rhizosphärenboden haftet direkt der Wurzel an und wird in weiterer Folge Rhizosphäre genannt. Aus allen drei Materialien wurde die Gesamt-DNA isoliert. Darin sind die DNAs aller in der Probe

enthaltenen Lebewesen – Mikroben, Mikroarthropoden, Pflanzenteile usw. – enthalten. Im folgenden Schritt werden aus der Gesamt-DNA spezifische Marker für die gewünschten Organismengruppen amplifiziert. Für dieses Projekt haben wir folgende Marker verwendet:

- 16S-rRNA-Gene für Bakterien und Archaeen, die 16S-rRNA ist Teil der Ribosomen und somit in allen Lebewesen enthalten. Bei der Amplifikation wird ein kleines Stück, das spezifisch in Bakterien und Archaeen zu finden ist, vermehrt (Frey et al., 2016).
- ITS für Pilze, die IST-Region – internally transcribed spacer – liegt ebenfalls im Bereich der Gene für die rRNA und wird vielfach für die Identifizierung von Pilzen verwendet (Schoch et al., 2012).

Die Amplifikationsprodukte enthalten ein Gemisch der jeweiligen DNA-Abschnitte aller in der Probe enthaltenen Zielorganismen. In einem speziellen Verfahren werden die Amplifikationsprodukte im Hochdurchsatz sequenziert, sodass man für jede Probe tausende DNA-Sequenzabschnitte erhält. Über die Bioinformatik können anschließend aus den Rohdaten Listen mit den in jeder Probe erhaltenen Organismen erstellt werden. Neben der Identifizierung bekommt man auch Informationen über die relativen Häufigkeiten in Prozent der jeweiligen Organismen in der ursprünglichen Probe.

Aus den Daten können Biodiversitätsindizes für die einzelnen Gruppen berechnet werden. Diese sogenannte α -Diversität bildet die Anzahl der in der Probe gefundenen verschiedenen Organismen sowie deren relative Häufigkeiten ab. Proben mit wenigen sehr häufigen Arten sind weniger divers als Proben mit einer Vielzahl unterschiedlicher Arten ohne deutlich ausgeprägte Dominanzen. Es gibt mehrere unterschiedliche Biodiversitätsindizes, die sich in der Methode der Berechnung unterscheiden (Magurran und McGill, 2010). Im Rahmen dieses Pilotprojektes wurde der Shannon-Index verwendet.

Neben der α -Diversität kann aus den Daten auch die β -Diversität berechnet werden (Jost et al., 2010). Die β -Diversität beschreibt, wie ähnlich oder unähnlich zwei Proben sind. Hierfür wird vielfach der Bray-Curtis-Index verwendet. Die übliche Darstellung dafür ist die Hauptkoordinatenanalyse. Jeder Punkt in einem Koordinatensystem steht für die komplexe Gemeinschaft von Organismen in einer Probe. Sind sich zwei Proben in der Zusammensetzung ihrer Organismen sehr ähnlich, liegen die Punkte nahe beieinander. Sind die Proben sehr unterschiedlich, liegen die Punkte weiter voneinander entfernt (vgl. z. B. Abbildung 4).

3.2 Auswahl der Versuchsfelder

Die Landwirtschaftskammer Oberösterreich und die Landwirtschaftskammer Niederösterreich haben den Kontakt mit Landwirt:innen hergestellt und potenzielle Versuchsfelder vorgeschlagen. In Zusammenarbeit mit den Projektpartnern wurden vier Felder für die Freilandversuche ausgewählt. Diese sind typisch für den Maisanbau in Niederösterreich und Oberösterreich und decken ein gewisses Spektrum an klimatischen Verhältnissen und Bodentypen ab. Extremfelder von geringer Relevanz für den Maisanbau wurden nicht in Betracht gezogen, ebenso wurden starke Hangneigungen vermieden. Bevorzugt wurden weiter Flächen mit einem mittleren Humusgehalt von ca. 3 %. Es wurden sowohl leichtere als auch schwerere Böden ausgewählt; extrem sandige und extrem schwere Böden wurden vermieden, ebenso Beregnungsflächen, da diese in beiden Bundesländern nicht Standard sind. Ein Teil der Felder blieb über den Winter als Schwarzbrache erhalten. Regelmäßige mechanische Bearbeitung sollte dafür sorgen, dass die Felder weitgehend frei von Ausfallgetreide und Unkraut bleiben. Der Teil mit Schwarzbrache wurde möglichst klein gehalten. Der Zwischenfruchtanbau ist mittlerweile Standard, die Schwarzbrache erfordert jedoch durch die mechanische Bearbeitung zur Unkrautkontrolle mehr Arbeit als die Zwischenfruchtfelder. Für die Schwarzbrache wurden Feldergrößen von ca. 9 Meter × 30 Meter gewählt, sodass Randeffekte vermieden werden konnten und die Bearbeitung mit Standardmaschinen leicht möglich war. Stellen, die mit den Maschinen mehrmals befahren wurden, wurden für die Beprobung vermieden. Die Auswahl fiel auf die folgenden vier Felder (siehe auch Abbildung 2):

Oberösterreich:

1. Auswahlfläche – Nußbach: wechselfeuchte Ackerfläche auf Pseudogley mit mäßiger Speicherkraft, sauer bis schwach sauer.
2. Auswahlfläche – Bachloh: mäßig trockene Ackerfläche auf Lockersediment-Braunerde mit mäßiger Speicherkraft (in Trockenperioden nicht ausreichend) und schwach sauer bis neutral.

Niederösterreich:

3. Auswahlfläche – Rafing: hochwertiges Ackerland auf stark kalkhaltiger Lockersediment-Braunerde mit mäßiger Wasserversorgung mit viel Abstand zu den Feldrändern.

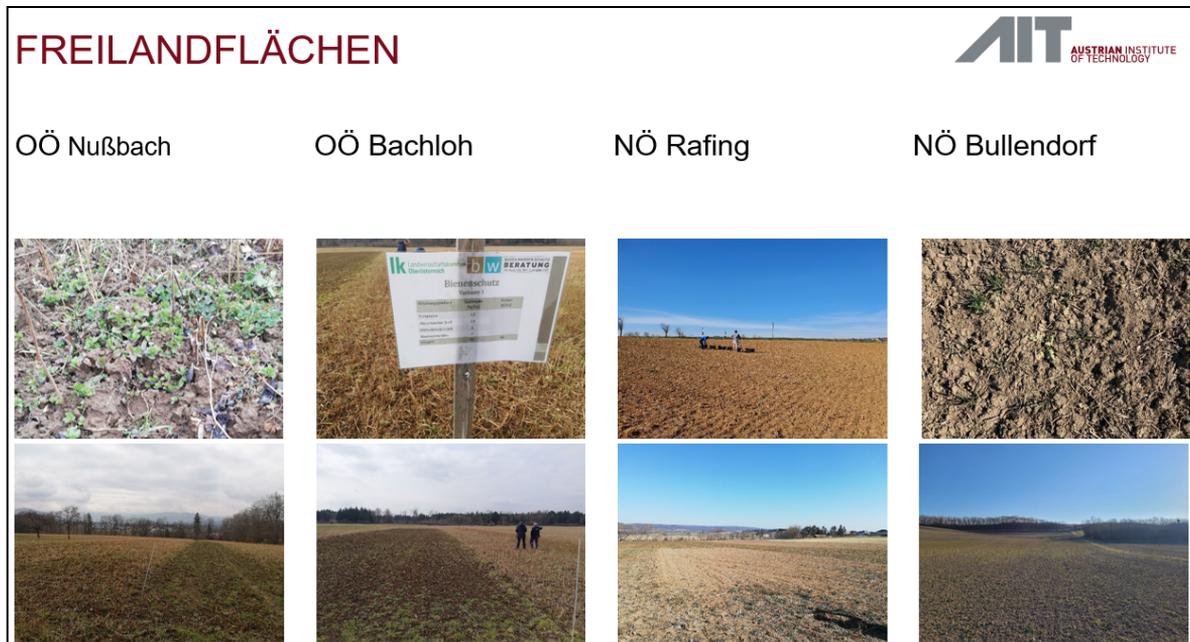
4. Auswahlfläche – Bullendorf: hochwertiges Ackerland auf schwach bis stark kalkhaltigem Kolluvium mit guter Wasserversorgung in entfernter Lage von der A5.

Auf allen Flächen wurde im Spätsommer 2021 nach der Getreideernte (Ende August, Anfang September in NÖ, im August in OÖ) zu einem Teil eine abfrostende Zwischenfruchtmischung (Variante 4) ausgesät (siehe Abbildung 1). Von einer diversen Mischung werden stärkere Effekte auf die Bodenbiodiversität erwartet. Folgende Mischung wurde vorgeschlagen: u. a. Mungo, Phacelia, Buchweizen, Alexandrinerklee, Rettich. Es gab jedoch lokale Abwandlungen dieser Mischung.

Folgende Abkürzungen werden in weiterer Folge für die beiden Zwischenfruchtvarianten verwendet:

- B – Brache ohne Zwischenbegrünung (braune Flächen in),
- G – Flächen mit Zwischenbegrünung (grüne Flächen in).

Abbildung 2: Bilder von den vier Versuchsflächen in Ober- und Niederösterreich.



Quelle + ©: AIT

Die untere Bildreihe zeigt Aufnahmen der beiden Zwischenbegrünungsvarianten bei der Probenahme im März 2022 für alle vier Flächen. Links oben ist eine Nahaufnahme der Fläche mit Zwischenbegrünung in Nußbach im März 2022 gezeigt. In Bachloh wurde die Zwischenfruchtmischung auf einem Schild angegeben.

Auch hier sind im unteren Bild die beiden Begrünungsvarianten zu sehen. Auf der Fläche in Rafing wurde im April 2022 Boden für den Glashausversuch entnommen. In Bullendorf waren nur geringe Unterschiede zwischen den beiden Varianten zu erkennen, es ist wenig Zwischenfruchtmischung aufgegangen, stattdessen wurden auf beiden Varianten Beikräuter und Ausfallsgetreide gefunden.

3.3 Untersuchungen im Freiland

Die vier Freilandflächen in Ober- und Niederösterreich wurden im Laufe der Vegetations-saison 2022 dreimal beprobt:

- März 2022 vor Aussaat der Hauptfrucht Mais:
 - Bodenproben für chemisch-physikalische Untersuchungen
 - Bodenproben für Mikrobiomuntersuchungen
- Juli 2022 zur Maisblüte:
 - Proben von Boden, Rhizosphäre und Wurzel für Mikrobiomuntersuchungen
- September 2022 vor der Ernte:
 - Proben von Boden, Rhizosphäre und Wurzel für Mikrobiomuntersuchungen.

Von jeder Fläche wurden jeweils Proben von den beiden Zwischenbegrünungsvarianten B und G genommen.

Von den vier Flächen wurde schließlich Rafing (NÖ) für den Glashausversuch ausgewählt. Hier waren im März 2022 die Unterschiede zwischen den beiden Zwischenbegrünungsvarianten deutlich erkennbar. Es wurden daher im April 2022 größere Mengen Boden von beiden Zwischenbegrünungsvarianten entnommen (siehe Abbildung 2 oberes Bild für Rafing) und nach Tulln, dem Standort der Bioresources Unit des AIT, transportiert.

3.4 Untersuchungen im Glashaus

In einer gemeinsamen Besprechung aller Projektpartner:innen wurde der experimentelle Plan für die Glashausversuche in Tulln im Jahr 2022 festgelegt. Der Versuch berücksichtigt die Unterschiede im Boden, die sich durch die beiden Zwischenbegrünungsvarianten B und G ergeben.

Die beiden Varianten werden im Folgenden mit B für Brache ohne Zwischenbegrünung und G für die Varianten mit Zwischenbegrünung abgekürzt. Durch die unterschiedliche

Begrünung werden Unterschiede in den mikrobiellen Gemeinschaften im Boden erwartet. Zusätzlich wurde die mikrobielle Diversität in einem Teil der Böden durch Bestrahlung mit γ -Strahlen stark reduziert, bevor der Versuch im Glashaus angesetzt wurde. Davon wurden drei Diversitätsstufen hergestellt:

- I0 – normal, keine Behandlung mit γ -Strahlen,
- I1 – mix, die unbehandelten (I0) und die bestrahlten (I2) Böden wurden zu gleichen Teilen gemischt,
- I2 – steril, Behandlung der Böden mit γ -Strahlen.

Alle Arbeiten im Glashaus wurden unter nicht-sterilen Bedingungen durchgeführt. Das bedeutet, dass während des Ansetzens des Versuchs sowie im weiteren Versuchsverlauf Mikroorganismen in die Böden eingebracht wurden – auch in die γ -bestrahlten der Variante steril I2. Die Mikroorganismen stammen von Töpfen, Geräten, Handschuhen, Saatgut, Gießwasser sowie aus der Luft. Dieses Mikrobiom unterscheidet sich jedoch von dem ursprünglich im Boden vorhandenen Mikrobiom.

Die verschiedenen Bodenvarianten wurden im Glashaus mit Mais (Sorte Die Sonja – DKC 4717) bepflanzt und unterschiedlichem Trockenstress ausgesetzt. Folgende Abkürzungen wurden für die beiden Trockenstressvarianten verwendet:

- KS – Kein Stress,
- TS – Trockenstress.

Die Töpfe wurden 2–3 Mal pro Woche gegossen. Die TS-Varianten wurden von T28 (28 Tage nach der Aussaat) bis T40 sowie von T44 bis T50 nicht gegossen. Die Aufteilung der Trockenstressbehandlung in zwei Perioden erlaubte das Aufbringen und Eingießen von Dünger. Alle Töpfe wurden zu den Zeitpunkten T16, T23, T40 und T50 mit Wuxal super gedüngt (vgl. dazu Abbildung 10).

Alle Kombinationen wurden in vierfachen Wiederholungen angesetzt.

Folgende Untersuchungen wurden durchgeführt:

- Bodenuntersuchungen bei der AGES (pH-Wert in CaCl₂, SOC – organischer Kohlenstoff, Labiler C, TN – Gesamtstickstoff, Phosphor in CAL, Kalium in CAL, pflanzenverfügbares Magnesium, Eisen in EDTA, Mangan in EDTA, Kupfer in EDTA, Zink in EDTA). Diese Parameter wurden zu den Zeitpunkten zu Versuchsbeginn (T0), 14 Tage nach der Aussaat (T14) und zu Versuchsende 77 Tage nach der Aussaat (T77) erhoben.
- Pflanzenparameter:
 - Ober- und unterirdische Biomasse nach 14 (T14) und 77 (T77) Tagen,
 - Chlorophyllgehalt (Chlorophyll Content Index) ca. zweimal pro Woche ab dem 37. Tag nach der Aussaat.
- Mikrobiome über die Hochdurchsatzsequenzierung von phylogenetischen Markern für Bakterien und Archaeen (16S) sowie für Pilze (ITS) zu folgenden Zeitpunkten:
 - T02 zwei Tage nach Versuchsbeginn, Bodenproben aller Kombinationen aus den Zwischenbegrünungsvarianten B und G sowie den drei Bestrahlungsvarianten I0, I1 und I2,
 - T07 Bodenproben wie für T02,
 - T14 Proben von Boden, Rhizosphäre und Wurzel der Kombinationen aus Zwischenbegrünungs- und Bestrahlungsvarianten; vor Trockenstress,
 - T77 Proben von Boden, Rhizosphäre und Wurzel aller Kombinationen von Zwischenbegrünung, Bestrahlung und Trockenstress.

3.5 Ergebnisse

3.5.1 Freilandflächen

3.5.1.1 Chemische Bodenuntersuchungen

Im März 2022 wurden von den beiden Zwischenbegrünungsvarianten B und G der vier Freilandflächen Proben für chemische Bodenuntersuchungen bei der AGES genommen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Alle Böden weisen einen mittleren Humusgehalt auf und die Gehaltsklassen für Phosphor, Kalium und Magnesium liegen zum überwiegenden Teil in den Kategorien C und D, nur der Standort Rafing liegt bei Phosphor in der Gehaltsklasse B gemäß der Richtlinie für die sachgerechte Düngung im Ackerbau und Grünland (BML, 2022).

Zwischen den Begrünungsvarianten B und G konnten für die meisten Parameter Unterschiede festgestellt werden, es gibt jedoch keinen Parameter, der über alle vier Standorte hinweg gleich auf die Zwischenbegrünung reagiert, d. h. in der Variante G immer höher bzw. immer niedriger liegt als in der Variante B. Die Humusgehalte blieben in Folge der Zwischenbegrünung unverändert oder sind leicht angestiegen. Da es an jedem Standort jeweils nur eine Fläche für jede Zwischenbegrünungsvariante gab, kann nicht eindeutig gesagt werden, ob es sich bei den Änderungen tatsächlich um Effekte aus der Zwischenbegrünung handelt.

Tabelle 1: Ergebnisse der Bodenuntersuchung für die beiden Zwischenbegrünungsvarianten der oberösterreichischen Standorte im März 2022.

		ONB	ONG	OBB	OBG
Bundesland		OÖ	OÖ	OÖ	OÖ
Standort		Nußbach	Nußbach	Bachloh	Bachloh
Zwischenbegrünung		B	G	B	G
pH (CaCl₂)		6,7	6,7	7,3	7,3
P (CAL)	mg/kg	61	56	137	150
K (CAL)	mg/kg	187	219	222	209
Mg – verfügbar	mg/kg	147	150	155	132
Humusgehalt	%	2,9	2,9	3,9	4,1
Gesamtstickstoff	%	0,184	0,191	0,255	0,265
C/N-Verhältnis		9,13	8,85	8,94	9,06
Fe (EDTA)	mg/kg	651	679	560	490
Mn (EDTA)	mg/kg	564	642	815	760
Cu (EDTA)	mg/kg	11,5	9,4	8,8	9,4
Zn (EDTA)	mg/kg	12,6	12,7	10,9	12,1
Ca – austauschbar	cmolc/kg	14,28	14,48	23,9	24,17
Mg – austauschbar	cmolc/kg	1,78	1,86	2,29	1,92
K – austauschbar	cmolc/kg	0,67	0,79	0,8	0,76
Na – austauschbar	cmolc/kg	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04

		ONB	ONG	OBB	OBG
Al – austauschbar	cmolc/kg	<0,06	<0,06	<0,06	<0,06
Fe – austauschbar	cmolc/kg	<0,00	<0,00	<0,00	<0,00
Mn – austauschbar	cmolc/kg	0,03	0,03	<0,01	<0,01
H-Wert	cmolc/kg	0,002	0,002	0,002	0,002
Austauschkapazität	cmolc/kg	16,79	17,19	27	26,78

Quelle: AIT

Tabelle 2: Ergebnisse der Bodenuntersuchung für die beiden Zwischenbegrünungsvarianten der niederösterreichischen Standorte im März 2022.

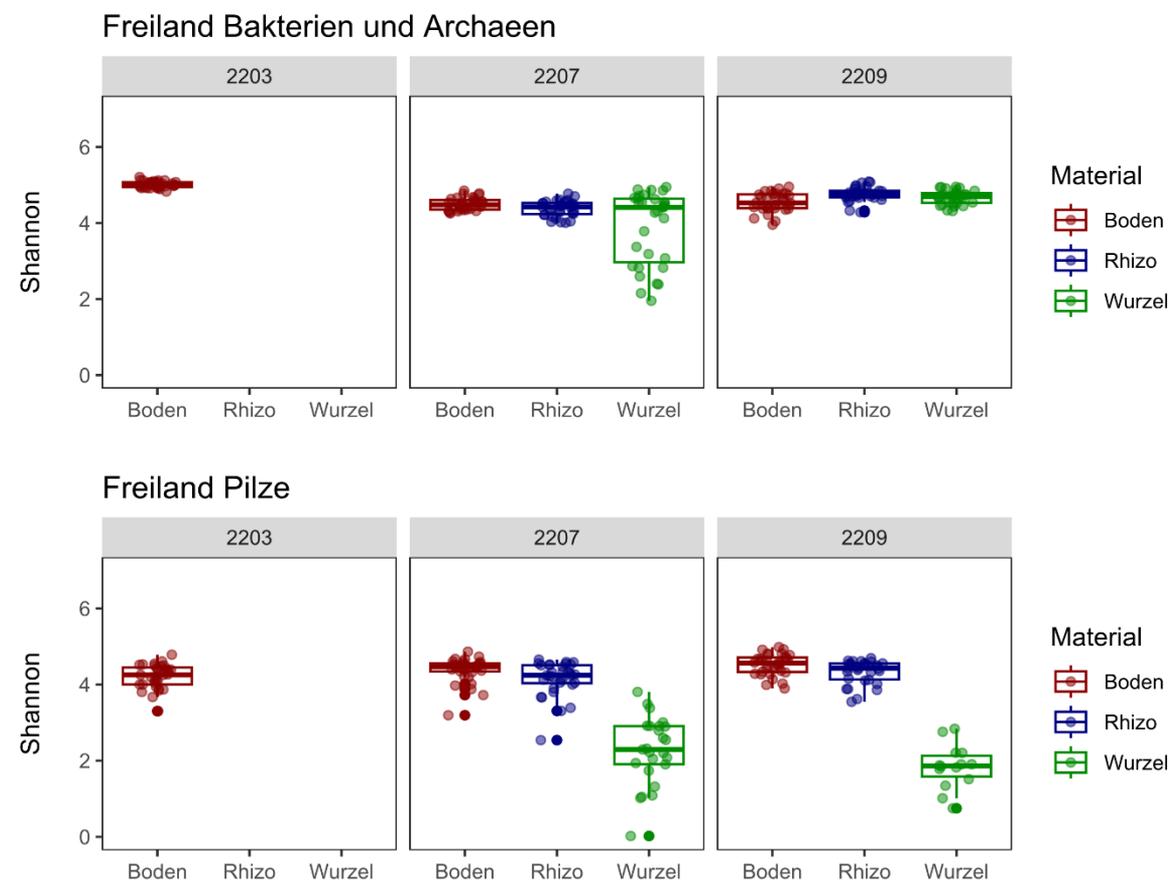
		NRB	NRG	NBB	NBG
Bundesland		NÖ	NÖ	NÖ	NÖ
Standort		Rafing	Rafing	Bullendorf	Bullendorf
Zwischenbegrünung		B	G	B	G
pH (CaCl₂)		7,6	7,6	7,6	7,6
P (CAL)	mg/kg	45	42	64	84
K (CAL)	mg/kg	118	97	324	376
Mg – verfügbar	mg/kg	114	106	186	174
Humusgehalt	%	2,4	2,5	2,9	2,9
Gesamtstickstoff	%	0,149	0,144	0,176	0,186
C/N-Verhältnis		9,19	10,07	9,49	9,19
Fe (EDTA)	mg/kg	88	36	91	83
Mn (EDTA)	mg/kg	316	76	207	214
Cu (EDTA)	mg/kg	6,8	8,6	4,8	4
Zn (EDTA)	mg/kg	2,2	2,8	1,5	1,9
Ca – austauschbar	cmolc/kg	21,82	21,21	23,41	22,94
Mg – austauschbar	cmolc/kg	1,63	1,47	2,72	2,57
K – austauschbar	cmolc/kg	0,45	0,39	1,04	1,17

		NRB	NRG	NBB	NBG
Na – austauschbar	cmolc/kg	<0,04	<0,04	0,06	0,08
Al – austauschbar	cmolc/kg	<0,06	<0,06	<0,06	<0,06
Fe – austauschbar	cmolc/kg	<0,00	<0,00	<0,00	<0,00
Mn – austauschbar	cmolc/kg	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
H-Wert	cmolc/kg	0,002	0,002	0,002	0,002
Austauschkapazität	cmolc/kg	23,92	23,09	27,22	26,76

Quelle: AIT

3.5.1.2 Mikrobielle Diversität

Abbildung 3: Biodiversität für Bakterien und Archaeen sowie Pilze im Freiland.



Quelle: AIT

Anmerkung: Der Shannon-Index, ein Maß für die Biodiversität, ist für die Gemeinschaften der Bakterien und Archaeen (obere Hälfte) und Pilze (untere Hälfte) zu den drei Probenahmezeitpunkten im März, Juli und September 2022 für Boden (rot), Rhizosphäre (blau) und Wurzel (grün) gezeigt. Daten aus den beiden Begrünungsvarianten sind für die Abbildung zusammengefasst worden.

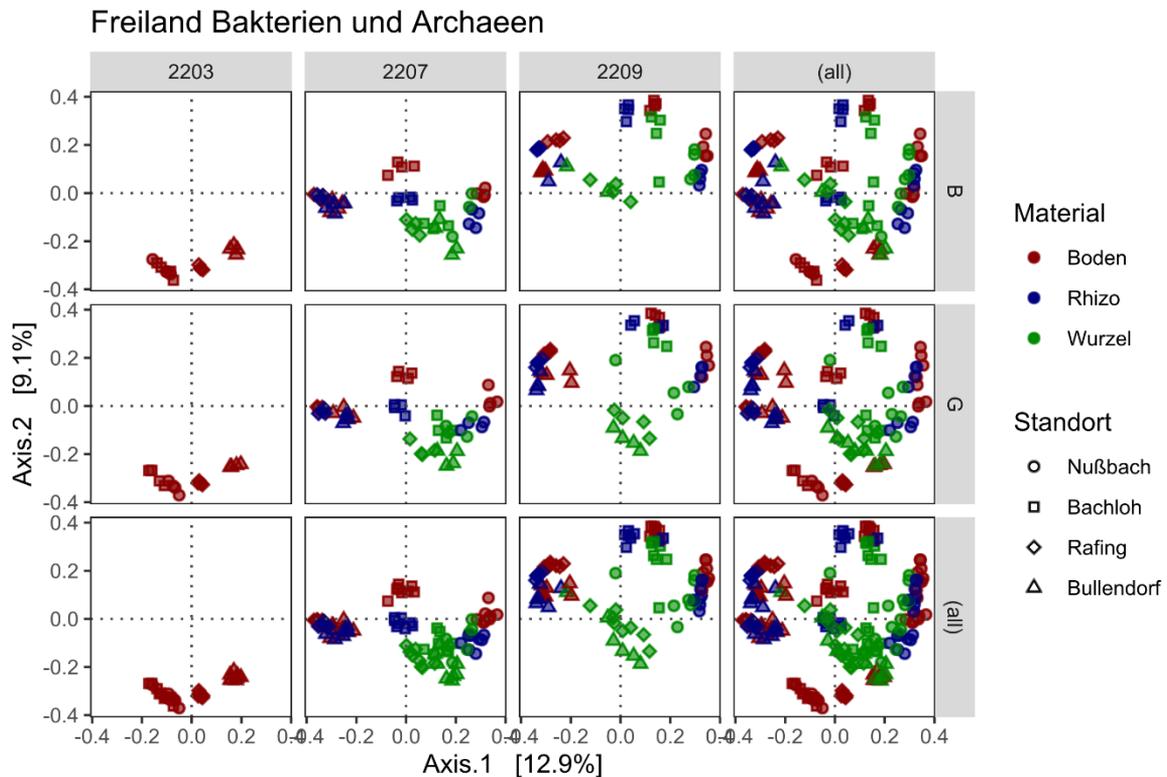
Bei den Freilandproben blieb die Biodiversität der Bakterien und Archaeen über alle Standorte, Begrünungsvarianten, Materialien (Boden, Rhizosphäre, Wurzel) und Jahreszeiten relativ stabil (Abbildung 3 oben). Die Biodiversität der Pilze blieb in den Boden- und Rhizosphärenproben ebenfalls relativ stabil über alle Standorte, Begrünungsvarianten und Jahreszeiten (Abbildung 3 unten). Die Wurzelproben haben jedoch eine deutlich niedrigere Biodiversität als die Boden- und Rhizosphärenproben.

3.5.1.3 Bakterien und Archaeen

Bei den Gemeinschaften der Bakterien und Archaeen auf den Freilandflächen lassen sich deutliche Effekte des Probenahmezeitpunkts (saisonale Effekte), des Standorts sowie des Probenmaterials (Boden, Rhizosphäre oder Wurzel) erkennen. In der Hauptkoordinatenanalyse¹ (siehe Abbildung 4) ist vor allem für die Boden- und Rhizosphärenproben (rote bzw. blaue Symbole) eine Gruppierung nach Standort zu sehen sowie die Veränderung der Gemeinschaften im Laufe der Saison. Für die Wurzelproben (grüne Symbole) sind die Effekte von Saison und Standort viel weniger deutlich ausgeprägt. Für die beiden Zwischenbegrünungsvarianten B und G konnten keine Unterschiede in den Gemeinschaften der Bakterien und Archaeen festgestellt werden.

¹ Zur Erklärung siehe Abschnitt Mikrobielle Gemeinschaften auf Seite 8.

Abbildung 4: Hauptkoordinatenanalyse der Bakterien und Archaeen der vier Freilandflächen.



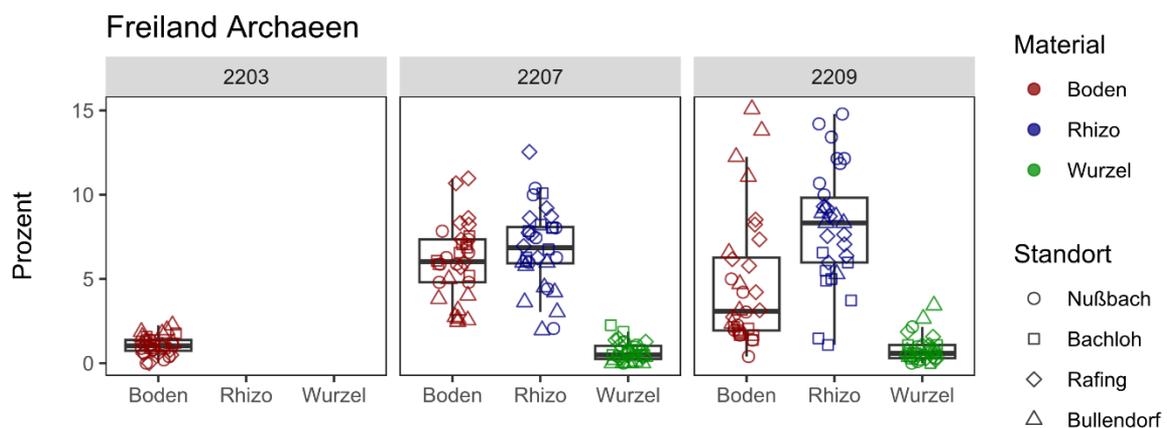
Quelle: AIT

Anmerkung: Von links nach rechts sind die drei Probenahmezeitpunkte im März, Juli und September 2022 sowie eine Übereinanderlagerung der drei Zeitpunkte gezeigt. In der ersten Reihe sind die Daten aus den Flächen ohne Zwischenbegrünung (B), in der zweiten Reihe die Flächen mit Zwischenbegrünung (G) gezeigt. Die unterste Reihe ist eine Übereinanderlagerung der Daten von den B- und G-Flächen. Proben von Boden sind in rot, von der Rhizosphäre in blau und von der Wurzel in grün dargestellt. Für die verschiedenen Standorte wurden unterschiedliche Symbole verwendet.

Beispielgebend für die zahlreichen Verschiebungen in den Gemeinschaften der Bakterien und Archaeen seien hier die relativen Häufigkeiten der Archaeen angeführt. Im Frühling 2022 sind nur sehr geringe relative Anteile der Archaeen – meist unter 2,5 % – zu finden. Zum Sommer hin steigen die relativen Anteile im Boden sehr deutlich, in einzelnen Proben auf fast 15 %. In der Rhizosphäre sind tendenziell mehr Archaeen zu finden als im umgebenden Boden, während die Wurzeln nur sehr geringe Mengen an Archaeen aufweisen. Zu Details siehe Abbildung 5. Der überwiegende Teil der Archaeen, die im Rahmen dieser Studie gefunden wurden, gehört zur Ordnung Nitrososphaerales. Diese Archaeen sind zur Ammonia-Oxidation befähigt, dem ersten Schritt in der Nitrifizierung, der Umwandlung

von Ammonium in Nitrat (Leininger et al., 2006). In vielen Böden dominieren die Ammonia-oxidierenden Archaeen (AOA) gegenüber den Ammonia-oxidierenden Bakterien (AOB). AOA sind speziell an niedrige Ammonium-Konzentrationen angepasst (Clark et al., 2021). Die hier beobachtete Anreicherung von Archaeen, insbesondere von AOA in der Rhizosphäre, wurde bereits in früheren Studien gefunden (Jung et al., 2020).

Abbildung 5: Relative Häufigkeiten in Prozent der Archaea zu den verschiedenen Probenahmezeitpunkten.



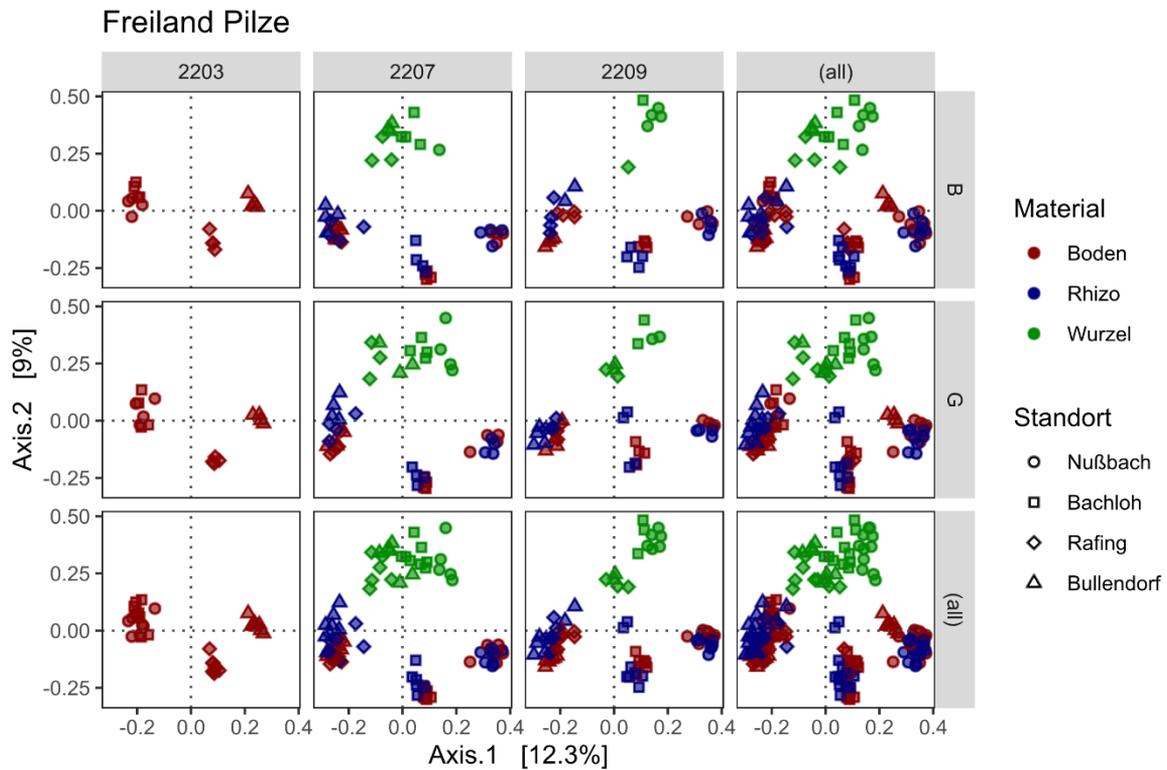
Quelle: AIT

Anmerkung: Probenahmematerial und Standort sind wie in der vorangegangenen Abbildung gekennzeichnet. Im Boden steigt die relative Häufigkeit vom Frühling zum Sommer. In der Rhizosphäre sind tendenziell mehr Archaea zu finden als im Boden, während in der Wurzel der Anteil sehr niedrig ist.

3.5.1.4 Pilze

Die Gemeinschaften der Pilze zeigen ähnliche Tendenzen wie die Gemeinschaften der Bakterien und Archaeen. Die verschiedenen Standorte sowie die verschiedenen Probenahmezeitpunkte unterscheiden sich deutlich voneinander. Die Unterschiede zwischen Boden und Rhizosphäre sind nur sehr schwach ausgeprägt, während die Wurzeln auch hier ihre eigenen Pilzgemeinschaften beherbergen. Der Standorteffekt ist bei den Wurzeln weniger deutlich ausgeprägt. Die Zwischenbegrünung hat wenig Einfluss auf die Pilzgemeinschaften an den vier Standorten.

Abbildung 6: Hauptkoordinatenanalyse der Pilze der vier Freilandflächen.

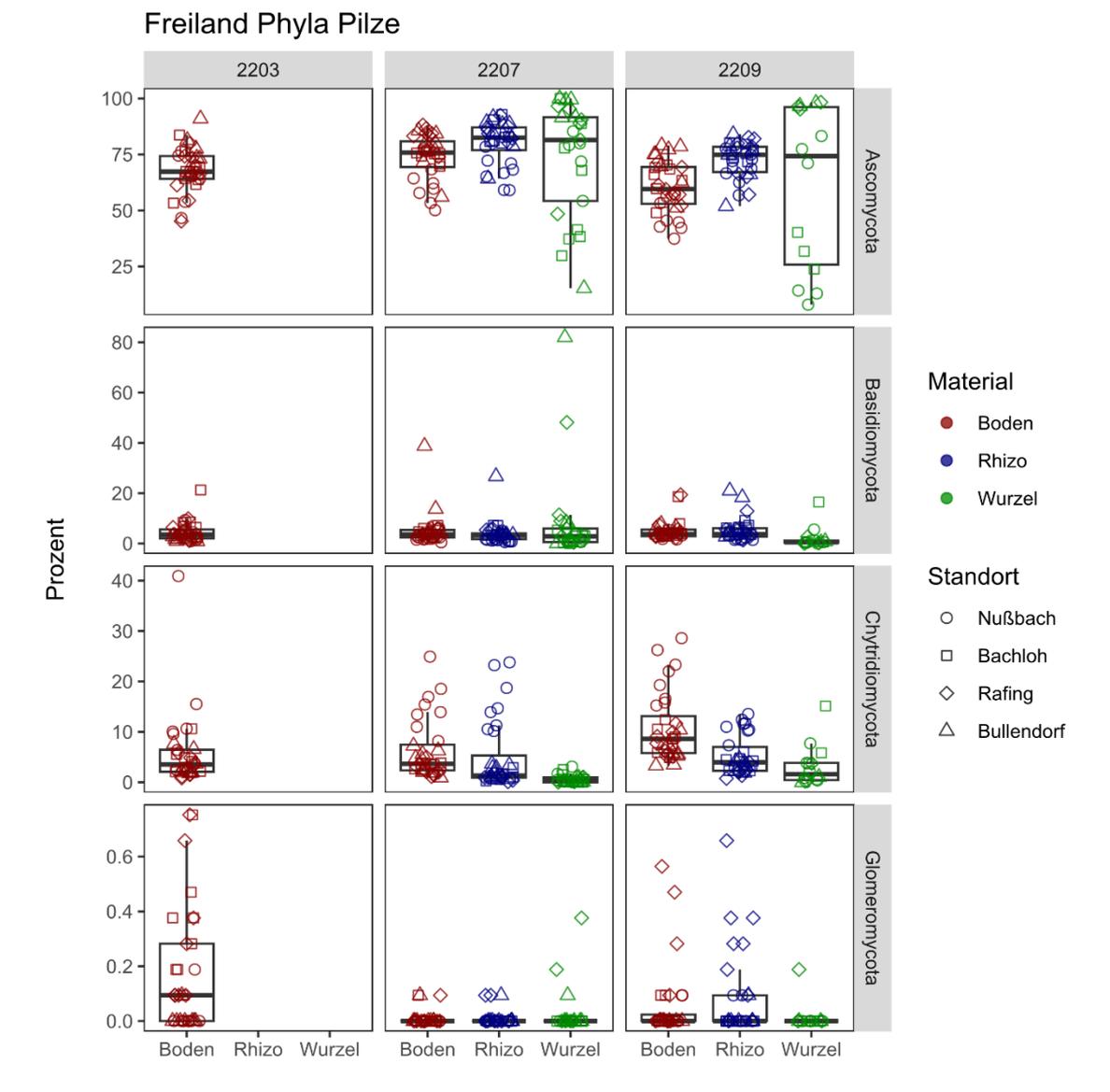


Quelle: AIT

Anmerkung: Zu Details siehe Abbildung 4. Ähnlich wie bei den Bakterien und Archaeen sind auch bei den Pilzen starke Einflüsse von Standort, Probenahmezeitpunkt sowie Probenmaterial zu beobachten.

In Abbildung 7 sind die relativen Häufigkeiten der wichtigsten Pilz-Phyla dargestellt. So gut wie alle Proben der vier Freilandflächen werden von **Ascomycota** dominiert. Zu diesem Phylum der Pilze gehören so bekannte Vertreter wie *Aspergillus*, *Cladosporium* oder *Fusarium*. Die starke Dominanz der Ascomycota in landwirtschaftlichen Böden wurde bereits vor langer Zeit mithilfe klassischer Methoden beobachtet (Domsch und Gams, 1970) und konnte wiederholt mit molekularen Methoden bestätigt werden (Klaubauf et al., 2010, Hartmann et al., 2015). Die Dominanz nimmt in der Rhizosphäre weiter zu. Basidiomycota, zu denen u. a. viele Pilze mit deutlich erkennbaren Fruchtkörpern, wie z. B. Tintlinge, Ackerlinge oder Schnecklinge, aber auch Schaderreger wie *Rhizoctonia*, gehören, sind in landwirtschaftlichen Flächen üblicherweise sehr viel seltener zu finden und waren im gegebenen Fall vor allem im Frühling vergleichsweise häufig.

Abbildung 7: Relative Häufigkeiten in Prozent für die wichtigsten Pilz-Phyla zu den verschiedenen Probenahmezeitpunkten.



Quelle: AIT

Anmerkung: Probenahmematerial und Standort sind wie in den vorangegangenen Abbildungen gekennzeichnet.

Die **Chytridiomycota** sind eine Gruppe von sehr ursprünglichen Pilzen, die normalerweise an ein Leben im Wasser angepasst sind. Fortpflanzungszellen sind mit einer Geißel ausgestattet, die eine schwimmende Fortbewegung ermöglicht. Gerade in feuchten Böden sind Chytridiomycota oft recht häufig zu finden (Freeman et al., 2009). Damit übereinstimmend wurden in dieser Studie Chytridiomycota vor allem in den Böden in Nußbach (Traunviertel

OÖ) mit relativen Häufigkeiten zwischen 10 % und 20 % nachgewiesen. In Nußbach waren die Böden deutlich feuchter als an den anderen Standorten, insbesondere den Standorten im Weinviertel. Chytridiomycota nahmen in ihrer relativen Häufigkeit vom Boden zur Rhizosphäre zur Wurzel ab.

Glomeromycota können mit den Wurzeln vieler Pflanzen – darunter bedeutende Kulturpflanzen wie Mais, Weizen, Erdäpfel und Paradeiser – eine Symbiose eingehen, die sogenannte Arbuskuläre Mykorrhiza. Der Pilz unterstützt dabei die Pflanze bei der Nährstoffaufnahme aus dem Boden, vor allem von Phosphat. Im Gegenzug dafür wird der Pilz von der Pflanze mit Zuckern aus der Photosynthese versorgt. Generell war in allen Proben der relative Anteil der Glomeromycota sehr niedrig, wie es typisch für die meisten Böden inklusive Ackerland ist. Am ehesten wurden Glomeromycota am Standort Rafing gefunden. Dieser Boden weist die niedrigsten Phosphatgehalte der vier Freilandflächen auf (vgl. Tabelle 1 und Tabelle 2).

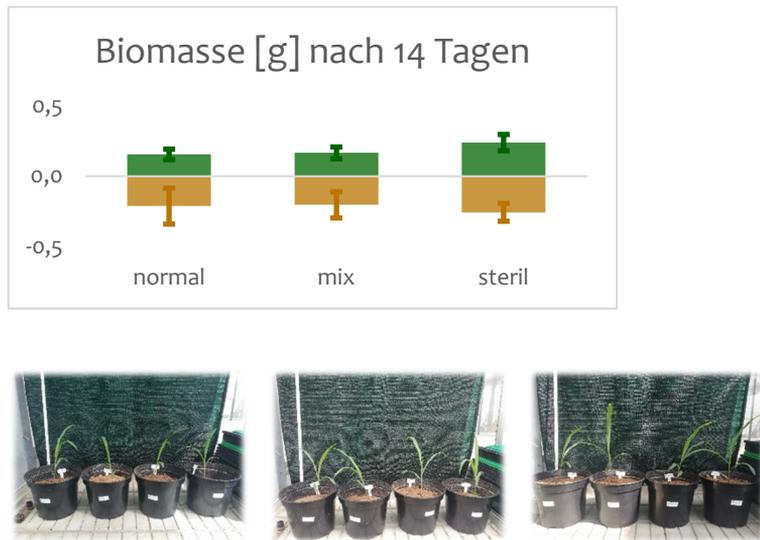
3.5.2 Glashaus

Im Glashausversuch wurden die Zwischenbegrünungsvarianten (B und G), die Bestrahlungsvarianten (I0, I1 und I2) sowie die Trockenstressvarianten (KS und TS) in allen Kombinationen miteinander verglichen. Es wurden Pflanzen-, Boden- und Mikrobiomdaten erfasst. Der Glashausversuch begann im Juni 2022. Gegen Ende der Trockenstressperiode 1 sind die Temperaturen im Glashaus aufgrund hoher Außentemperaturen tagsüber stark angestiegen. Alle Pflanzen waren somit zumindest vorübergehend einem Hitzestress ausgesetzt.

3.5.2.1 Pflanzendaten Glashaus

Von den Maispflanzen wurden nach 14 bzw. nach 77 Tagen die ober- und die unterirdische Biomasse bestimmt (siehe dazu Abbildung 8). Nach 14 Tagen war eine statistisch signifikante Steigerung der oberirdischen Biomasse um ca. 50 % auf den sterilisierten Böden (I2) im Vergleich zu den beiden anderen Varianten (normal – I0 und mix – I1) zu beobachten. Dies ist vermutlich auf zusätzlich freiwerdende Nährstoffe aus der durch die Bestrahlung abgetöteten mikrobiellen Biomasse zurückzuführen. Für die Wurzelbiomasse war eine ähnliche Tendenz zu beobachten. Aufgrund der hohen Standardabweichungen waren die Unterschiede jedoch statistisch nicht signifikant. Zwischen den beiden Begrünungsvarianten B und G konnten keinerlei Unterschiede festgestellt werden.

Abbildung 8: Ober- und unterirdische Biomasse der Maispflanzen nach 14 Tagen.

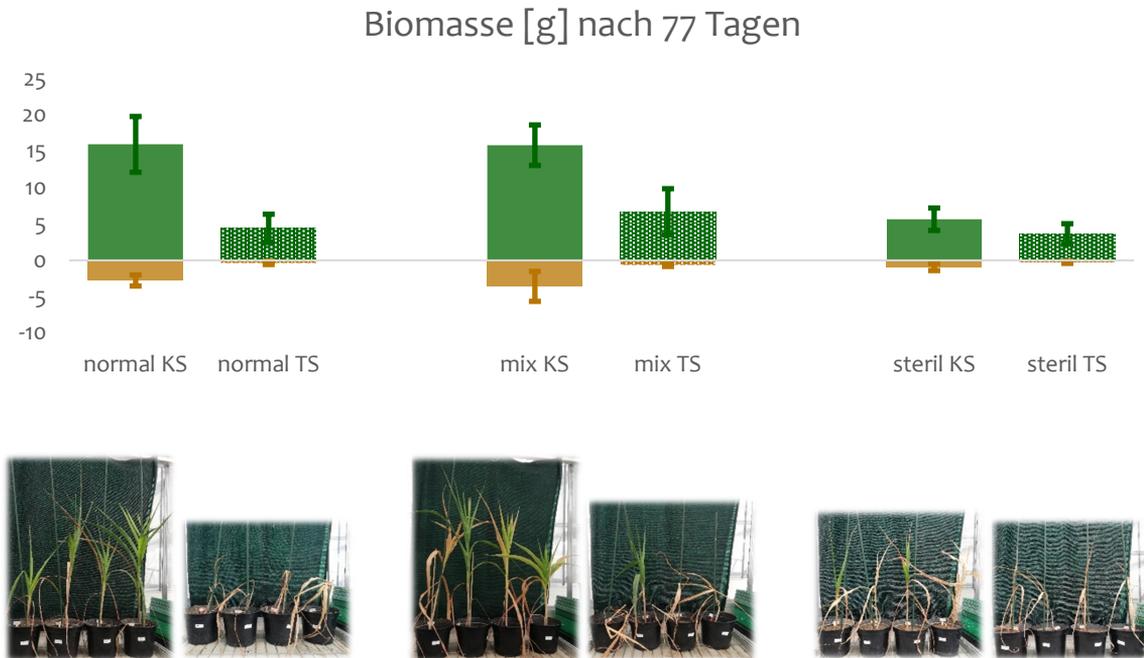


Quelle und ©: AIT

Anmerkung: Im oberen Teil der Grafik sind die ober- und unterirdischen Biomassen der Maispflanzen auf den drei Biodiversitätsvarianten normal – I0 –, mix – I1– und steril – I2 – nach 14 Tagen gezeigt. Die oberirdische Sprossbiomasse ist in grün dargestellt, die unterirdische Wurzelbiomasse in braun. In der sterilen Variante wurde eine um ca. 50 % höhere Biomasse gebildet. Im unteren Teil sind alle Töpfe für diesen Teil des Versuches in der gleichen Anordnung wie in der Grafik darüber gezeigt. Zu diesem Zeitpunkt wurden die Pflanzen noch keinem Trockenstress ausgesetzt. Die Balken stellen Mittelwerte aus 16 Töpfen mit der dazugehörigen Standardabweichung dar. Es gab keinerlei signifikante Unterschiede zwischen den beiden Begrünungsvarianten B und G. Für die Berechnung der Mittelwerte und Standardabweichungen wurden diese beiden Varianten daher zusammengefasst.

Zu Versuchsende waren bei den Bestrahlungsvarianten I0 und I1 deutliche Unterschiede in der ober- und unterirdischen Biomasse zwischen den Pflanzen ohne (KS) und mit Trockenstress (TS) zu erkennen (siehe Abbildung 9). Die Reduktion der Sprossbiomasse durch den Trockenstress betrug ca. 50–60 %. Stresssymptome waren deutlich zu erkennen. Bei der Variante I2 zeigten selbst die Pflanzen ohne Trockenstress (KS) sehr starke Stresssymptome und hatten eine ähnlich niedrige Biomasse wie die TS-Varianten auf den beiden anderen Böden. Die zusätzliche Reduktion durch den Trockenstress war nur schwach ausgeprägt. Auch zu Versuchsende konnten keinerlei Unterschiede zwischen den Begrünungsvarianten B und G festgestellt werden.

Abbildung 9: Ober- und unterirdische Biomasse der Maispflanzen nach 77 Tagen.



Quelle und ©: AIT

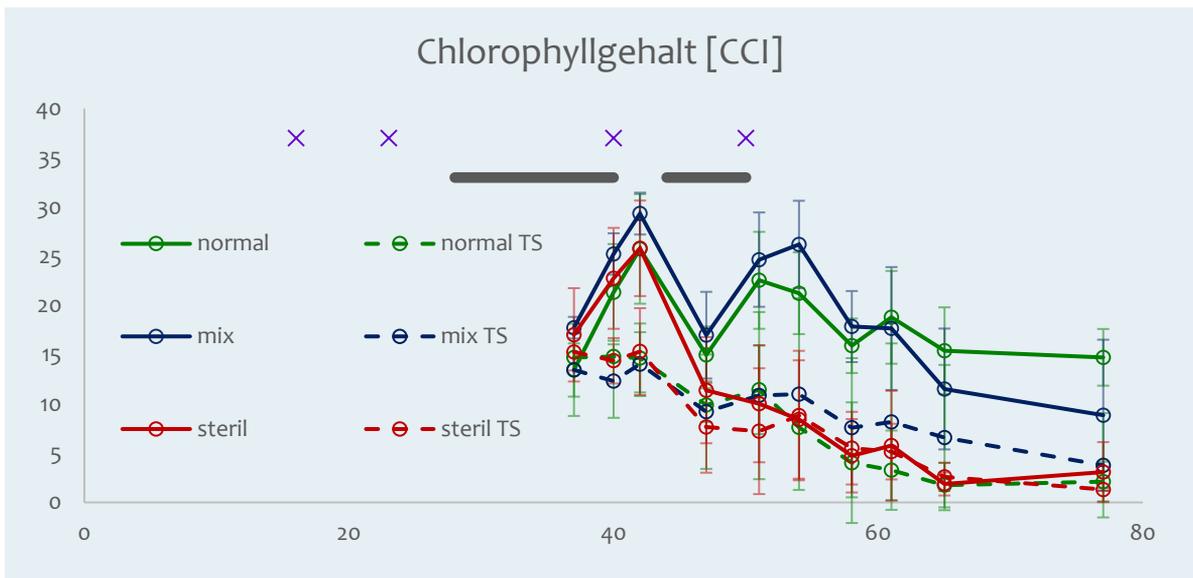
Anmerkung: Im oberen Teil der Grafik sind die ober- und unterirdischen Biomassen der Maispflanzen auf den drei Biodiversitätsvarianten normal – I0 –, mix – I1 – und steril – I2 – nach 77 Tagen für die beiden Trockenstressvarianten KS – kein Stress und TS – Trockenstress gezeigt. Im unteren Teil sind repräsentative Fotos von Pflanzen der verschiedenen Bedingungen gezeigt. Details siehe Abbildung 8. Auf den Böden normal – I0 – und mix – I2 – entwickeln sich die KS-Varianten gut, während die TS-Varianten kaum Biomasse bildeten und verwelkten. Auf den sterilen Böden I2 zeigen selbst die KS-Varianten, die keinerlei Trockenstress ausgesetzt waren deutliche Stresssymptome und geringe Biomasseentwicklung. Es gab keinerlei signifikante Unterschiede zwischen den beiden Begrünungsvarianten B und G. Für die Berechnung der Mittelwerte und Standardabweichungen wurden diese beiden Varianten daher zusammengefasst.

Von allen Maispflanzen im Glashausversuch wurden ab T37 regelmäßig die Chlorophyllgehalte mit einem Handmessgerät erfasst. Die Daten sind in Abbildung 10 zusammengefasst. Alle Pflanzen, die einem Trockenstress ausgesetzt wurden (TS), zeigen ab der ersten Trockenstressperiode einen kontinuierlich abnehmenden Chlorophyllgehalt unabhängig von der Bestrahlungsvariante. Ab der zweiten Trockenstressperiode weicht die KS-Variante auf dem sterilisierten Boden von den anderen KS-Varianten ab. Die Maispflanzen auf den γ -bestrahlten Böden (steril – I2) zeigen auch ohne TS starke Stresssymptome. Maispflanzen auf den Bestrahlungsvarianten normal – I0 – und mix – I2 – zeigen ohne Trockenstress (KS) höhere Chlorophyllgehalte als mit Trockenstress (TS). Die Chlorophyll-daten stimmen gut mit den Biomassedaten zu Versuchsende (vgl. Abbildung 9) überein.

Die beiden Begrünungsvarianten B und G zeigen keinerlei Unterschiede im Chlorophyllgehalt.

Diese Ergebnisse liefern somit starke Hinweise, dass ein intaktes Bodenmikrobiom für eine gedeihliche Pflanzenentwicklung wichtig ist.

Abbildung 10: Chlorophyllgehalte der Maispflanzen im Glashausversuch.



Quelle: AIT

Anmerkung: Die Chlorophyllgehalte (Chlorophyll Content Index – CCI) wurden mit einem Handmessgerät erfasst. Auf der x-Achse sind die Tage nach der Aussaat eingezeichnet. Die Trockenstressperioden sind durch graue Balken im oberen Teil der Grafik gekennzeichnet, die Zeitpunkte der Düngung mit Wuxal Super durch violette x-Zeichen. Die verschiedenen Bestrahlungsvarianten (normal – I0 –, mix – I1 – und steril – I2 –) sind in den Farben grün, blau und rot gekennzeichnet. Behandlungen ohne Trockenstress (KS) wurden mit durchgehenden Linien markiert, solche mit Trockenstress (TS) mit strichlierten. Ab der ersten Trockenperiode sinken die Chlorophyllgehalte in den TS-Pflanzen. In der zweiten Trockenstressphase sinkt auch der Chlorophyllgehalt in den nicht gestressten Pflanzen, die in sterilisiertem Boden angepflanzt wurden. Es gab keinerlei signifikante Unterschiede zwischen den beiden Begrünungsvarianten B und G. Für die Berechnung der Mittelwerte und Standardabweichungen wurden diese beiden Varianten daher zusammengefasst.

3.5.2.2 Bodendaten Glashaus

Die Böden aus dem Glashausversuch wurden zu den Zeitpunkten T0, T14 und T77 auf die wichtigsten chemischen Parameter untersucht, um die Auswirkungen der verschiedenen Behandlungsvarianten (Zwischenbegrünung, Bestrahlung, Trockenstress) auf Pflanze und Mikrobiom besser verstehen zu können. In den folgenden Grafiken sind die Daten zu unterschiedlichen Gruppen zusammengefasst, um die Effekte der jeweiligen Varianten besser erkennen zu können.

In Abbildung 11 wurden die beiden Zwischenbegrünungsvarianten B und G separat für die beiden Zeitpunkte T0 und T14 dargestellt. Die Ergebnisse sind in der untenstehenden Liste zusammengefasst. Statistische Aussagen aus diesen Messungen sind nur bedingt aussagekräftig, da es sich um sogenannte Pseudoreplikate handelt. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass es sich bei den beobachteten Unterschieden um generelle Unterschiede auf dem Feld handelt oder um spezifische Effekte der Zwischenbegrünung. Dafür müssten die Begrünungsvarianten auf dem Feld mehrfach repliziert werden. Weiters gibt es zum Zeitpunkt T0 jeweils nur drei Replikate pro Zwischenbegrünungsvariante für die Bodenuntersuchungen. Zum Zeitpunkt T14 gibt es jeweils sechs Replikate.

- pH-Wert: Der pH-Wert ist von 7,5 zum Zeitpunkt T0 auf 7,6 zum Zeitpunkt T14 gestiegen, während es keine Unterschiede zwischen den Begrünungsvarianten gab.
- SOC – Soil Organic Carbon, Organischer Kohlenstoff: Es ist eine Tendenz zu höheren SOC-Gehalten in der Variante G verglichen mit Variante B zu beobachten. Die Zunahmen um jeweils ca. 0,1 Prozentpunkte sind jedoch statistisch nicht signifikant.
- Labiler Kohlenstoff: Zu Beginn des Versuchs sind in G höhere Gehalte an labilem Kohlenstoff zu finden als in B, die Unterschiede sind jedoch nicht signifikant. Eine Erhöhung des labilen Kohlenstoffs durch Zwischenbegrünung erscheint plausibel, da Wurzelexsudate und abgestorbenes Pflanzenmaterial als erstes im labilen Kohlenstoff-Pool zu finden sind.
- TN – Gesamtstickstoff: Die Unterschiede zwischen B und G sind zum Zeitpunkt T14 schwach signifikant – auch nach Korrektur für multiple Tests. Die Unterschiede zum Zeitpunkt T0 sind nicht signifikant.
- C/N-Verhältnis: Es konnte keine Änderung des C/N-Verhältnisses durch die Begrünungsvarianten beobachtet werden.
- Phosphor – pflanzenverfügbar: Der Gehalt an pflanzenverfügbarem Phosphat liegt zu beiden Zeitpunkten in der Begrünungsvariante G signifikant höher als in B, die Zunahme beträgt 22 % bzw. 12 %. Eine Steigerung des pflanzenverfügbaren Phosphatgehaltes nach dem Absterben der Zwischenfrucht ist im Einklang mit Ergebnissen aus

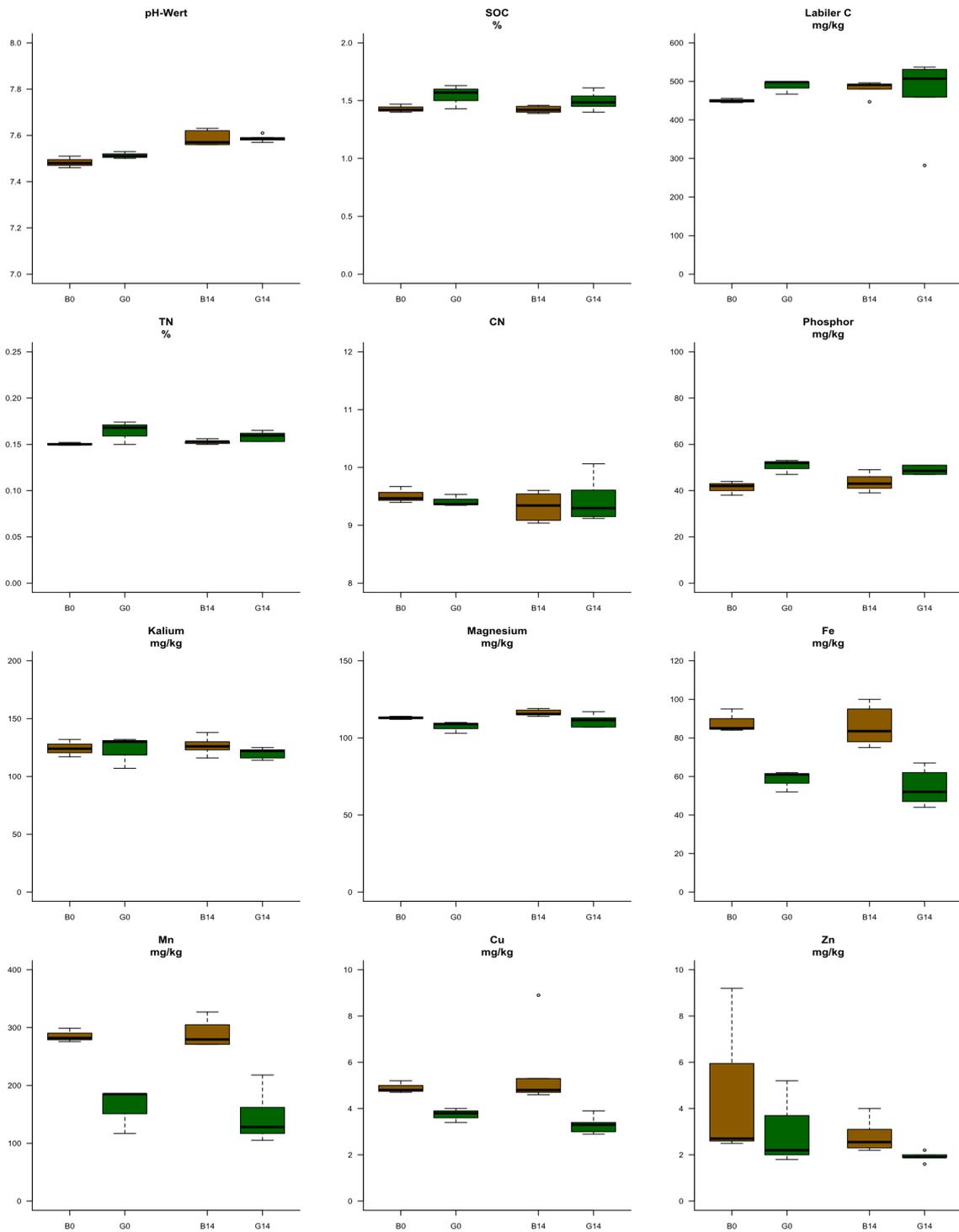
einer Metastudie, in der auch ähnliche Größenordnungen für die Zunahme beschrieben werden (Daryanto et al., 2018).

- K – pflanzenverfügbares Kalium: Es konnten keine statistisch signifikanten Unterschiede beobachtet werden.
- Mg – pflanzenverfügbares Magnesium: Zu beiden Probenahmezeitpunkten liegen die Gehalte an pflanzenverfügbarem Mg in den G-Böden niedriger als in den B-Böden, die Unterschiede sind schwach signifikant.
- Fe, Mn, Cu, Zn – nachlieferbare Spurenelemente: Alle gemessenen Spurenelemente liegen in den G-Böden um ca. 35 % niedriger als in den B-Böden. Für Fe und Mn bleiben diese Unterschiede bis zum Versuchsende (T77) erhalten und werden nicht durch Effekte vom Trockenstress maskiert.

In Abbildung 12 werden die Daten für die drei Bestrahlungsvarianten I0 (normal), I1 (mix) und I2 (steril) gezeigt. Es konnten keinerlei statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den drei Bestrahlungsvarianten festgestellt werden. Es kann somit davon ausgegangen werden, dass Unterschiede zwischen den Bestrahlungsvarianten beim Pflanzenwachstum bzw. beim Mikrobiom nicht auf Veränderungen in der Bodenchemie zurückzuführen sind. In Abbildung 11 und Abbildung 12 werden die gleichen Daten gezeigt, sind jedoch nach anderen Varianten zusammengefasst.

In Abbildung 13 sind die Daten der Trockenstressvarianten KS und TS zu Versuchsende (T77) dargestellt. In den TS-Varianten sind signifikant höhere Gehalte an Gesamtstickstoff sowie an pflanzenverfügbarem Kalium zu finden. Diese Elemente wurden mit dem Dünger zugeführt, können jedoch von den Pflanzen mit Trockenstress aufgrund der geringen Biomasseentwicklung nicht aufgenommen werden und verbleiben somit im Boden. Für Phosphor wurde eine ähnliche Tendenz beobachtet, die Unterschiede sind jedoch auf Grund der hohen Schwankungen statistisch nicht signifikant. Die höheren Stickstoffgehalte bei annähernd gleichbleibenden SOC-Gehalten bedingen statistisch signifikant niedrigere C/N-Verhältnisse in den TS-Varianten. Trotz Anwendung des Düngers (Wuxal Super) gemäß den Empfehlungen des Herstellers wurden sehr hohe Gehalte an Stickstoff, Phosphor und Kalium und sehr niedrige C/N-Verhältnisse zu Versuchsende beobachtet.

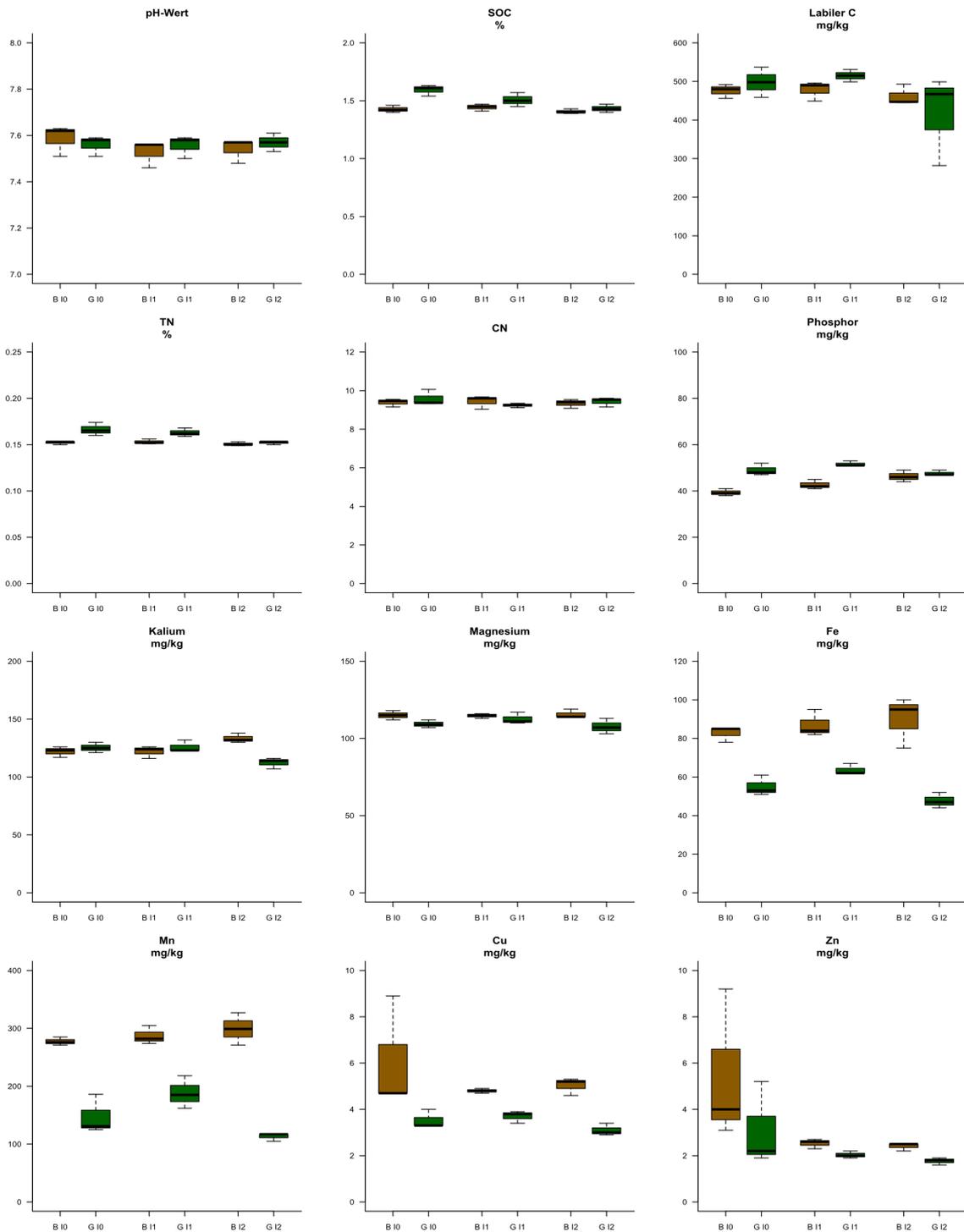
Abbildung 11: Bodendaten Begrünungsvarianten B und G zu Versuchsbeginn (T0 und T14).



Quelle: AIT

Anmerkung: Ergebnisse aus den Bodenuntersuchungen zu den Zeitpunkten T0 und T14 für die beiden Begrünungsvarianten B (braun) und G (grün). Die drei Bestrahlungsvarianten wurden zusammengefasst. Für T0 standen jeweils drei Datenpunkte (n=3) zur Verfügung, für T14 jeweils sechs (n=6). Details siehe Text.

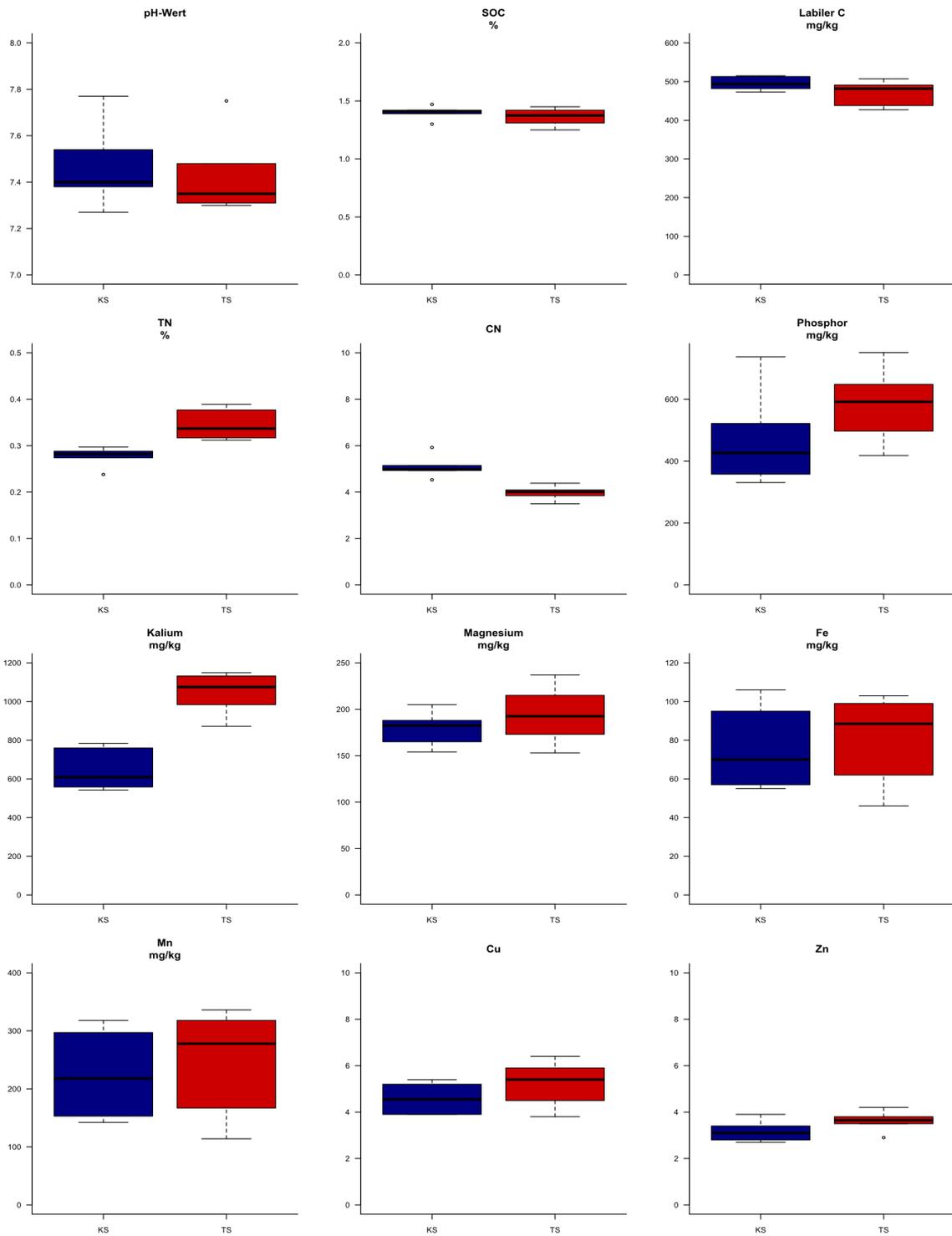
Abbildung 12: Bodendaten Bestrahlungsvarianten I0 (normal), I1 (mix) und I2 (steril).



Quelle: AIT

Anmerkung: Ergebnisse aus den Bodenuntersuchungen für die Bestrahlungsvarianten aufgeteilt nach Zwischenbegrünungsvarianten (n=3). Die Zeitpunkte T0 und T14 wurden zusammengefasst. Details siehe Text.

Abbildung 13: Bodendaten Trockenstressvarianten KS und TS zu Versuchsende (T77).



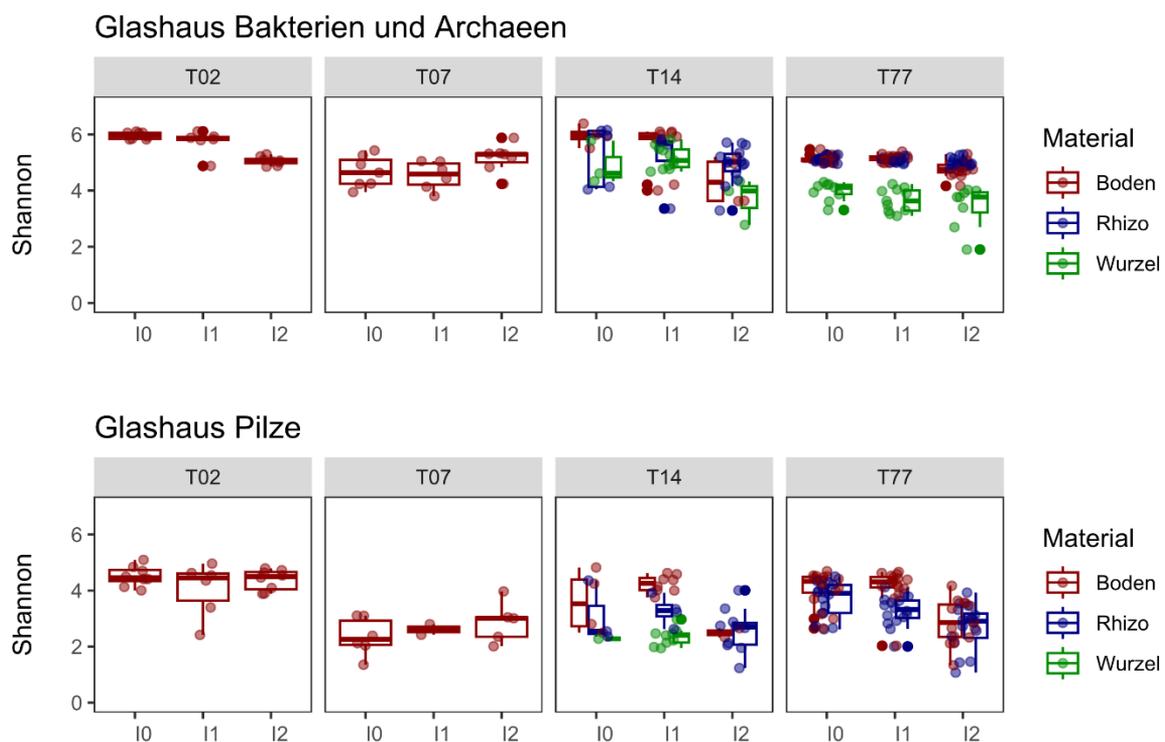
Quelle: AIT

Anmerkung: Die Daten für die Zwischenbegrünungsvarianten B und G sowie die drei Bestrahlungsvarianten I0, I1 und I2 wurden zusammengefasst (n=6). Details siehe Text.

3.5.2.3 Mikrobiomdaten Glashaus

Der Shannon-Index ist einer von mehreren Indikatoren für die α -Diversität, die auch für Mikrobiomdaten herangezogen werden können. Ein hoher Shannon-Index zeigt an, dass die jeweilige Gemeinschaft aus vielen verschiedenen Arten zusammengesetzt ist und die einzelnen Arten relativ gleichmäßig verteilt sind ohne stark ausgeprägte Dominanzen. Die Daten aus dem Glashausversuch sind in Abbildung 14 zusammengefasst.

Abbildung 14: Biodiversität für Bakterien und Archaeen sowie Pilze im Glashausversuch.



Quelle: AIT

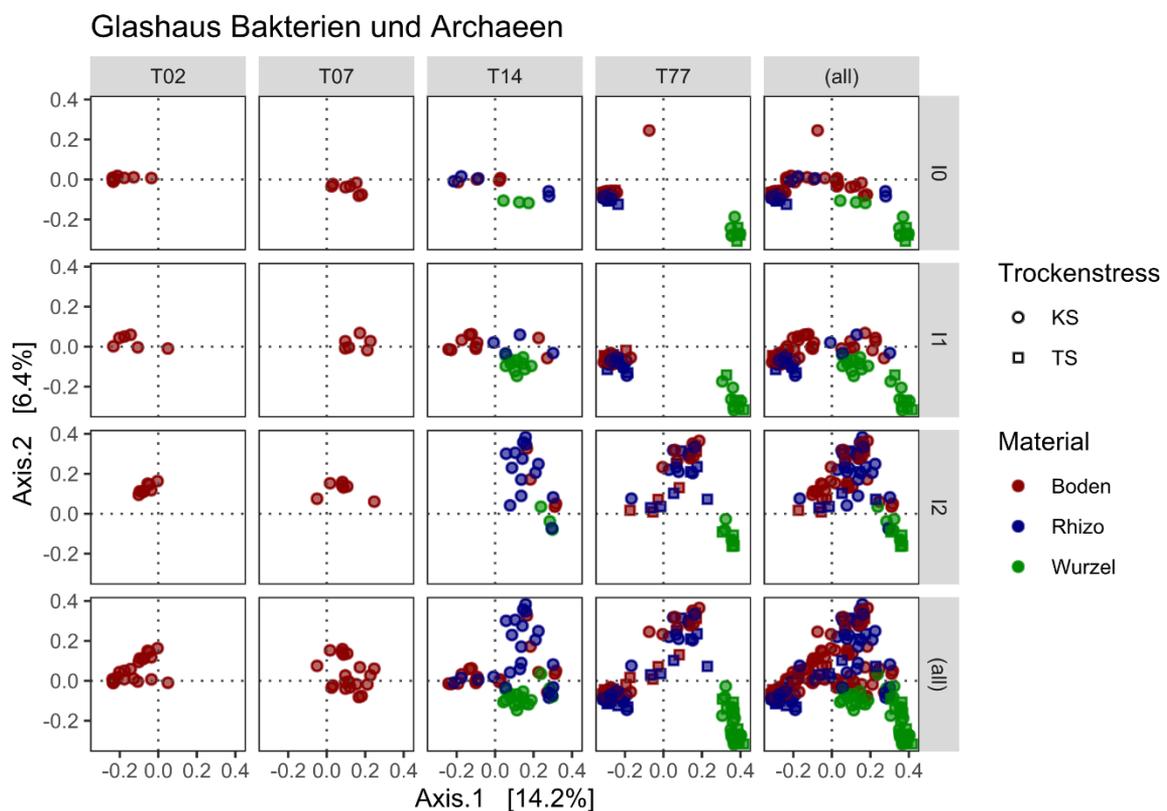
Anmerkung: Der Shannon-Index, ein Maß für die Biodiversität, ist für die Gemeinschaften der Bakterien und Archaeen (obere Hälfte) und Pilze (untere Hälfte) in den Bestrahlungsvarianten I0, I1 und I2 zu den vier Probenahmezeitpunkten T02, T07, T14 und T77 für Boden (rot), Rhizosphäre (blau) und Wurzel (grün) gezeigt. Daten aus den beiden Trockenstressvarianten sind für die Abbildung zusammengefasst worden.

Für die Gemeinschaften der Bakterien und Archaeen (16S-Daten, obere Hälfte der Abbildung 14) konnte durch die Bestrahlung eines Teils der Böden vor Versuchsbeginn der gewünschte Effekt für den ersten Probenahmezeitpunkt T02 erzielt werden, nämlich eine deutliche Reduktion der α -Diversität. Durch das Einbringen neuer Mikroorganismen aus

der Umgebung etablierten sich nach einer gewissen Zeit ähnlich diverse Gemeinschaften zu den späteren Probenahmezeitpunkten. Zu Versuchsende (T77) waren die Gemeinschaften der Bakterien und Archaeen in den Wurzeln deutlich weniger divers als in der Rhizosphäre oder im Boden. Der Trockenstress bewirkte keine deutliche Reduktion der α -Diversität von Bakterien und Archaeen.

Die bestrahlungsbedingte Reduktion der α -Diversität konnte bei den Pilzen nicht beobachtet werden (ITS-Daten, untere Hälfte der Abbildung 14). Aufgrund der vielen Ausfälle bei den Pilzdaten für die Wurzelproben können keine validen Aussagen über verminderte Biodiversität in den Wurzeln verglichen mit Rhizosphäre oder Boden gemacht werden.

Abbildung 15: Hauptkoordinatenanalyse der Bakterien und Archaeen im Glashausversuch.



Quelle: AIT

Anmerkung: Von links nach rechts sind die vier Probenahmezeitpunkte T02, T07, T14 und T77 sowie die Überlagerung der vier Zeitpunkte gezeigt. Von oben nach unten sind die drei Bestrahlungsvarianten

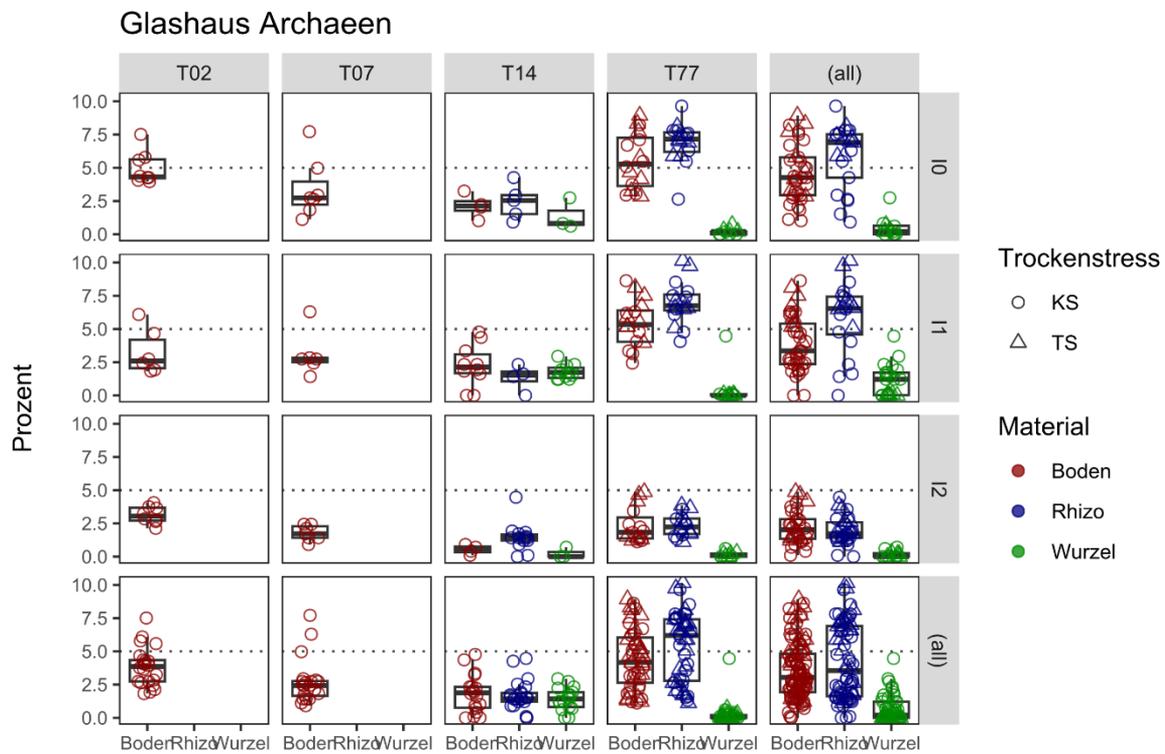
I0, I1 und I2 sowie die Übereinanderlagerung der drei Bestrahlungsvarianten gezeigt. Die beiden Trockenstressvarianten KS und TS sind durch unterschiedliche Symbole dargestellt. Proben vom Boden sind in rot, von der Rhizosphäre in blau und von der Wurzel in grün dargestellt.

Bei den Bakterien und Archaeen konnte durch die Bestrahlung nicht nur eine Verminderung der Biodiversität, sondern auch eine Veränderung in der Zusammensetzung der Gemeinschaft festgestellt werden. Die Ergebnisse sind in Abbildung 15 zusammengefasst. Bei den Boden- und Rhizosphärenproben unterscheidet sich die Bestrahlungsvariante I2 von den beiden anderen Varianten I0 und I1 über den gesamten experimentellen Verlauf. Bei den Wurzelproben konnten die Unterschiede durch die Bestrahlung nicht beobachtet werden. Die Gemeinschaften der Bakterien und Archaeen in den Wurzeln unterschieden sich deutlich von den Gemeinschaften in den Boden- und Rhizosphärenproben. Die beiden letzteren waren einander sehr ähnlich. Der Trockenstress hatte interessanterweise nur einen geringen Einfluss auf die Gemeinschaften der Bakterien und Archaeen.

Die Änderungen der mikrobiellen Gemeinschaften durch verschiedene Umwelteinflüsse werden durch Zu- und Abnahmen der relativen Häufigkeiten einzelner Gruppen bewirkt. Als Beispiel seien hier wieder die relativen Häufigkeiten der Archaeen in den unterschiedlichen Proben angeführt (siehe Abbildung 15). Sowohl der Rhizosphären- als auch der Wurzeffekt vom Freiland (vgl. Abbildung 5) konnten auch im Glashaus beobachtet werden, d. h. in der Rhizosphäre waren mehr, in der Wurzel deutlich weniger Archaeen zu finden als im Boden. In der Bestrahlungsvariante I2 war der relative Anteil der Archaea niedriger als in den beiden anderen Varianten I0 und I1.

Wie schon bei den Freilandversuchen handelt es sich bei den Archaeen im Glashausversuch zum überwiegenden Teil um Vertreter der Ordnung Nitrososphaerales, also um sogenannte Ammonia-oxidierende Archaeen (AOA).

Abbildung 16: Relative Häufigkeiten in Prozent für die Archaea im Glashausversuch.

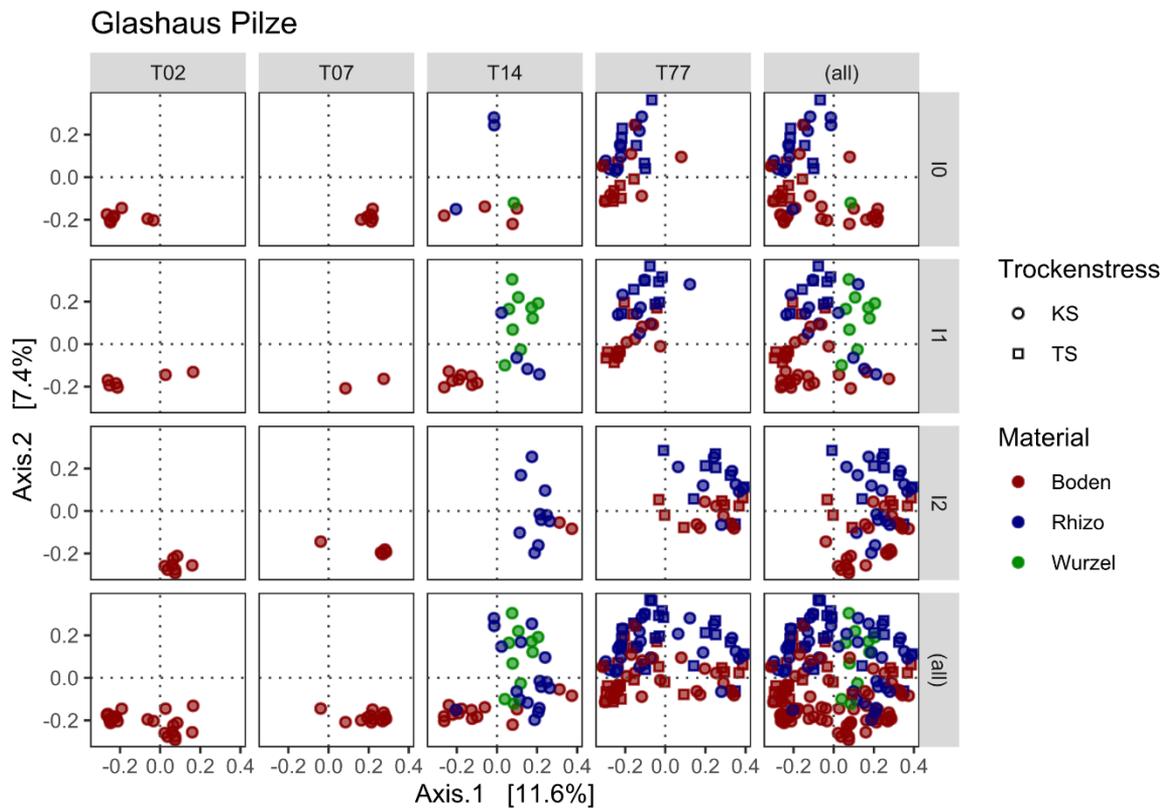


Quelle: AIT

Anmerkung: Anordnung, Schema, Farben und Symbole der Boxplots entsprechen der Abbildung 15.

Bei den Gemeinschaften der Pilze konnten zu Versuchsbeginn keine deutlichen Unterschiede in den drei Bestrahlungsvarianten festgestellt werden (siehe Abbildung 17). Erst zu Versuchsende (T77) wurden in der Variante I2 deutlich andere Pilzgemeinschaften gefunden als in den beiden anderen Varianten I0 und I1. Überdies ist ein stark ausgeprägter Rhizosphäreneffekt zu beobachten, d. h. im Boden und in der Rhizosphäre sind unterschiedliche Pilzgemeinschaften zu finden. Die wurzelbesiedelnden Pilze sind den Rhizosphärenpilzen ähnlich, allerdings ist es aufgrund der vielen Ausfälle bei den Wurzelproben schwierig, statistisch signifikante Aussagen zu machen. Wie auch bei den Bakterien hatte der Trockenstress nur einen geringen Einfluss auf die Gemeinschaften der Pilze.

Abbildung 17: Hauptkoordinatenanalyse der Pilze im Glashausversuch.

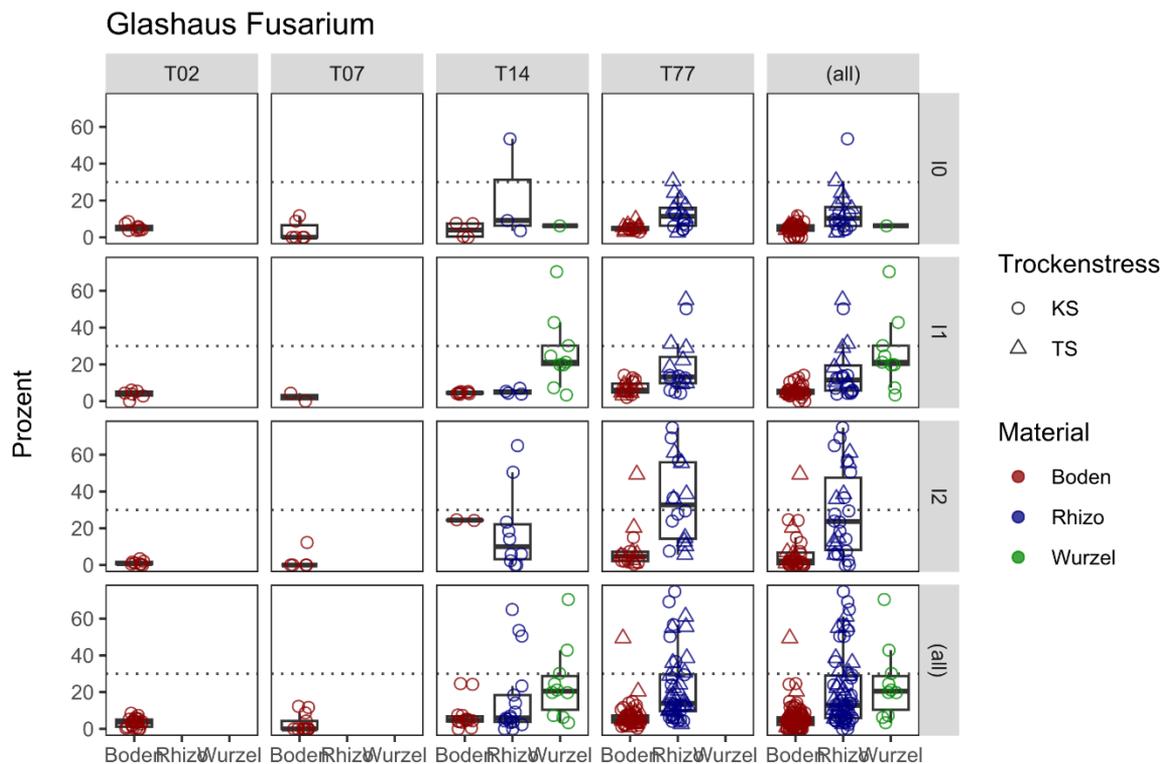


Quelle: AIT

Anmerkung: Anordnung, Schema, Farben und Symbole der Grafiken entsprechen der Abbildung 15.

Als Beispiel für eine Pilzgruppe, die auf geänderte Bedingungen im Glashausversuch mit Änderungen in den relativen Häufigkeiten reagierte, sei hier *Fusarium* angeführt (Abbildung 18). Zu Versuchsbeginn waren im Boden nur sehr geringe Mengen an *Fusarium* zu finden. Zu Versuchsende (T77) stieg die Menge an *Fusarium* vor allem in der Rhizosphäre an, wobei in der Bestrahlungsvariante I2 dieser Anstieg besonders deutlich ausfiel.

Abbildung 18: Relative Häufigkeiten in Prozent für *Fusarium* im Glashausversuch.



Quelle: AIT

Anmerkung: Anordnung, Schema, Farben und Symbole der Boxplots entsprechen der Abbildung 15.

3.6 Diskussion und Schlussfolgerungen für die Praxis

3.6.1 Bodenmikrobiom und Trockenheit

Zahlreiche Studien konnten deutliche Einflüsse von Trockenstress auf die mikrobiellen Gemeinschaften im Boden (z. B. de Vries et al., 2018) sowie in der Wurzel (z. B. Compant et al., 2010) zeigen, wobei die Effekte stark variieren können. Im Glashausversuch, der im Rahmen dieses Projektes durchgeführt wurde, konnten sehr starke Effekte des Trockenstresses auf die Pflanzenentwicklung sowie damit verbunden bei wichtigen Nährelementen im Boden beobachtet werden, während keinerlei deutliche Effekte auf die Gemeinschaften der Bakterien, Archaeen und Pilze zu sehen waren. Es gilt jedoch hervorzuheben, dass alle Töpfe vorübergehendem Hitzestress durch hohe Temperaturen im

Glashaus ausgesetzt waren. Es erscheint daher plausibel, dass Hitzestresseffekte sowie starke Effekte durch die Bestrahlungsvarianten die Einflüsse des Trockenstresses maskiert haben.

Durch die Bestrahlungsvarianten im Pilotversuch konnte jedoch deutlich gezeigt werden, dass das Mikrobiom im Boden für eine gedeihliche Pflanzenentwicklung auch unter guter Wasserversorgung wichtig ist. Bei einer starken Störung des Mikrobioms können sich die Pflanzen nicht normal entwickeln und zeigen extreme Stresssymptome. Zum Teil lässt sich das vermutlich durch die Zunahme von Schaderregern wie *Fusarium* spp erklären.

3.6.2 Bodenmikrobiom und Zwischenfruchtanbau

Die einjährigen Ergebnisse des Pilotprojektes zeigen keinen eindeutigen Trend betreffend Zwischenfruchtanbau und Bodenmikrobiom, was sehr wahrscheinlich auf die kurze Versuchsdauer zurückzuführen ist.

Zahlreiche nationale und internationale Forschungsprojekte konnten jedoch in den letzten Jahrzehnten positive Effekte der Zwischenbegrünung zeigen. Zuvorderst steht der Erosionsschutz des Bodens durch die durchgehende Pflanzendecke, höhere Aggregatstabilität und höhere Humusgehalte (Daryanto et al., 2018). Damit gehen auch geringere Wasserverluste durch verminderten Abfluss von Oberflächenwasser einher.

Zwischenfrüchte haben unterschiedliche Auswirkungen auf die Ernteertragsarchitektur. Die Steigerung der Ernteerträge (beispielsweise der Silomaisernte) erfordert Kombinationen mit unterschiedlichen Pflanzen oder Pflanzenmischungen. Gleichzeitig erzeugte jede Zwischenfruchtvariante individuelle mikrobielle Fingerabdrücke. Rhizodepositionen und Zersetzungsprodukte von Zwischenfruchtstreu beeinflussen die Zusammensetzung der mikrobiellen Gemeinschaft in der Rhizosphäre der Folgefrucht. Zwischenfrüchte oder Untersaaten können vielfältigen Nutzen für das Anbausystem haben. Mit Leguminosen als Zwischenfrüchten wird Luftstickstoff gebunden, Nährstoffe werden in der Pflanzenmasse gespeichert und für nachfolgende Kulturen bereitgestellt, Beikräuter werden unterdrückt und die Bodenstruktur wird verbessert. Der gezielte Einsatz von Begrünungen kann auch Lösungsansätze für die Herausforderungen der reduzierten Bodenbearbeitung bieten (BML, 2022).

Eine Metastudie zu europäischen Feldversuchen konnte überdies zeigen, dass in der Mehrzahl der Fälle eine Zwischenbegrünung eine Ertragssteigerung bei der Hauptkultur

zur Folge hatte. Besonders deutlich waren die positiven Effekte bei Gerste und Mais sowie bei Langzeitversuchen (Zavattaro et al., 2015).

Mikrobielle Biomasse gilt wiederum als ein sehr wichtiger Baustein im stabilen Humus (Cotrufo et al., 2012; Angst et al., 2021), wobei abgestorbene Pilzbiomasse eine größere Rolle spielen dürfte als bakterielle Biomasse (Wang et al., 2021). Die Steigerung des Humusgehaltes durch Zwischenbegrünung ist durch einmalige Maßnahmen kaum messbar, sondern erfordert eine langfristige Umstellung. Eine lineare Zunahme des Humusgehaltes ist selbst 50 Jahre nach der Umstellung weiterhin zu beobachten (Poeplau und Don, 2015).

Wenn die Zwischenfrüchte am Feld verbleiben, wird über das zusätzliche Pflanzenmaterial der organische Kohlenstoffgehalt (SOC) im Boden erhöht. Folglich kann in Marktfruchtbetrieben durch den Anbau von Zwischenfrüchten eine positive Humusbilanz erzielt werden. Zwischenfrüchte bzw. Gründüngung sollten insbesondere vor Hackfrüchten angebaut werden, da diese stark humuszehrend wirken. Winterharte Zwischenfrüchte sind von Vorteil, da diese länger am Feld stehen und tiefere Wurzeln ausbilden. Der Ackerboden ist damit länger bedeckt (weniger Erosion) und besser durchwurzelt (BML, 2022).

Mit der Zwischenbegrünung steigt jedoch nicht alleine die mikrobielle Biomasse, sondern auch die mikrobielle Aktivität, z. B. der Abbau von abgestorbenem Pflanzenmaterial. Das Ausmaß der Förderung von mikrobieller Biomasse und Aktivität durch Zwischenbegrünung hängt stark von Umweltfaktoren wie Klima, Bodentyp und Bodenbearbeitung ab. Die mikrobielle Biodiversität kann ebenfalls durch Zwischenbegrünung gefördert werden, doch sind hier die positiven Effekte meist nur sehr schwach ausgeprägt (Kim et al., 2020).

Weiters wird durch die Wurzelbiomasse der Nitratgehalt im Boden verringert, was naturgemäß Auswaschungen minimiert (Heuermann et al., 2019, Daryanto et al., 2018). Durch Zwischenbegrünungen wird zusätzliches CO₂ aus der Atmosphäre assimiliert, das schlussendlich den Mikroben im Boden zur Verfügung steht. Dadurch steigt die mikrobielle Biomasse, insbesondere die Biomasse der Pilze, wobei die Effekte bei diversen Zwischenfruchtmischungen deutlicher ausgeprägt sind (Gentsch et al., 2020, Kim et al., 2020).

Das Projekt CATCHY² hat das Ziel, mit vielfältigen Zwischenfruchtmischungen innovative Anbausysteme zu entwickeln, um die Bodenfruchtbarkeit zu erhalten und zu verbessern. Erste Projektergebnisse zeigen, dass biogeochemische Bodenkreisläufe in Anbausystemen durch Zwischenfruchtmischungen optimiert werden können. Der Vorteil vielfältiger Zwischenfrüchte ergibt sich aus unterschiedlichen Triebhöhen, einem größeren Wurzelvolumen und einer gleichmäßigeren Wurzelverteilung in unterschiedlichen Bodentiefen, aber auch aus vielfältigen Wechselwirkungen eines vielfältigeren Bodenmikrobioms. Es kam zu der Schlussfolgerung, dass diversifizierte Zwischenfruchtmischungen die Effizienz des Kohlenstoffkreislaufs in Anbausystemen verbessern und ein vielversprechendes Instrument für eine nachhaltige Bodenbewirtschaftung darstellen Gentsch et al. (2020). Sie stellten fest, dass die Netto-CO₂-Aufnahme aus der Atmosphäre bei vielfältigen Zwischenfruchtmischungen um ein Vielfaches höher ist als bei wenigen Mischungspartnern. Der höhere rhizosphärische C-Eintrag stimulierte das Wachstum und die Aktivität des Bodenmikrobioms. Die gesamte mikrobielle Biomasse stieg im Vergleich zur Brache um ein Vielfaches an; insbesondere die Pilz- und Aktinobakteriengemeinschaften profitierten am stärksten von dem höheren unterirdischen C-Eintrag.

Untersuchungen an einem Langzeitversuch der Landwirtschaftlichen Fachschule Hollabrunn konnten zeigen, dass langfristige Umstellungen in der Bodenbearbeitung zu einer Änderung der Gemeinschaften der Pilze und Bakterien im Boden führen (Gorfer et al., 2023).

Die Zwischenbegrünung ist ein sehr gutes Beispiel, wie anhaltende Änderungen in der landwirtschaftlichen Praxis das Bodenleben beeinflussen können. Durch komplexe Interaktionen zwischen Pflanze, Boden und Mikrobiom können sich dadurch positive Effekte auf eine Vielzahl von ÖSL, wie Ertragssicherheit, Erosionsschutz, Wasserspeicherung und Kohlenstoffspeicherung, erzielen lassen.

² bonares.de/catchy

4 Umweltbewertung

In der Fachliteratur gibt es eine Reihe von Definitionen für Ökosystemleistungen, deren Unterschiede zumeist darin liegen, dass der Begriff der ÖSL unterschiedlich weit gefasst wird. Boyd und Banzhaf (2007) beziehen sich in ihrer Definition darauf, dass ÖSL Leistungen der Natur sind, die einen direkten Nutzen für Menschen darstellen und somit einen Wohlfahrtsbezug haben. Die Basis dieser Leistungen sind intakte Ökosysteme, deren Erhaltung und Erneuerung komplexen ökologischen Prozessen unterliegt. Das Konzept der Ökosystemleistungen zeigt sehr deutlich den Zusammenhang zwischen der Funktionsfähigkeit der Ökosysteme und dem menschlichen Wohlergehen (z. B. Fischer et al., 2009) und soll die vielfältigen Leistungen der Natur verständlicher und erfassbarer machen. Durch das Millenium Ecosystem Assessment (MEA, 2005), welches von den Vereinten Nationen durchgeführt wurde, erlangte das ÖSL-Konzept eine große Bedeutung. Demnach lassen sich ÖSL in vier Kategorien einteilen (MEA, 2005):

- Versorgende Funktion: Nahrung, Trinkwasser, Holz
- Regulierungsfunktion: Hochwasserschutz, Grundwasserschutz, CO₂-Speicherfähigkeit, Erosionsschutz
- Kulturelle Funktion: Erholungsleistung (Landschaftsvielfalt...)
- Basisfunktion: Photosynthese, Stoffkreisläufe, Bodenbildung...

Durch das Millenium Ecosystem Assessment gelang es, vielfach unbeachtete Umweltleistungen und deren Bedeutung für das menschliche Wohlbefinden stärker in das Bewusstsein der Gesellschaft zu rücken und somit zur nachhaltigeren Nutzung dieser Umweltleistungen beizutragen.

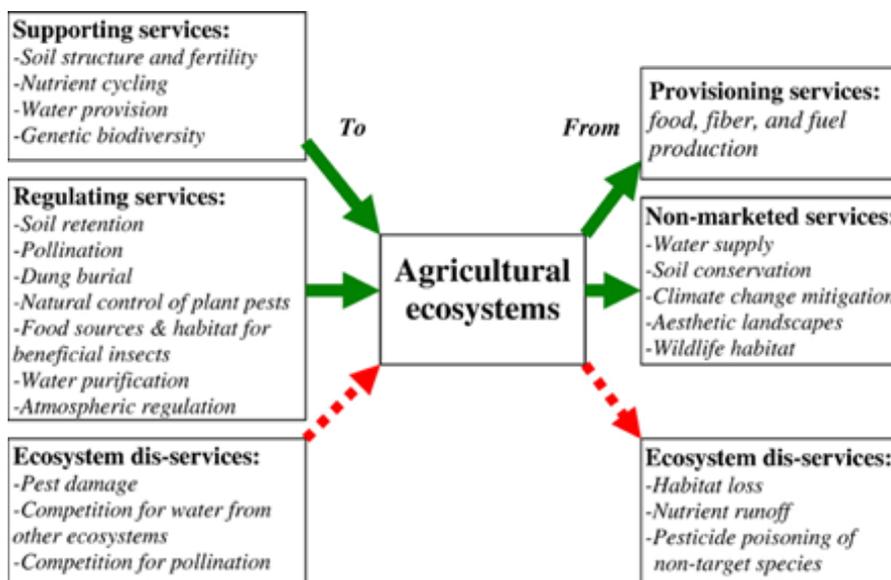
Die Klassifikation von ÖSL wurde in den vergangenen Jahren erweitert und verfeinert; es entstand eine internationale Klassifikation unter der Bezeichnung „Common International Classification of Ecosystem Services – CICES“, die mittlerweile in der Version 5.1 verfügbar

ist³. Ebenso gibt es Bestrebungen, ÖSL in die Berichtssysteme zu den nationalen umwelt-ökonomischen Gesamtrechnungen (System of Environmental-Economic Accounting – SEEA) einzubeziehen und so das volkswirtschaftliche Rechnungswesen zu erweitern.

4.1 Ökosystemleistungen und Landwirtschaft

Die landwirtschaftliche Nutzung verändert und gestaltet Ökosysteme und hat somit einen starken Einfluss auf die von der Gesellschaft gewünschten ÖSL. Jedoch ist das Verhältnis zwischen ÖSL und Landwirtschaft komplex und die Abgrenzung erbrachter Leistungen unscharf, da die natürlichen Prozesse in der Landwirtschaft eine große Rolle spielen und die Leistungen der Landwirtschaft (aus dem Wirkungsbereich des Menschen) direkt an die Leistungen der Natur anschließen.

Abbildung 19: Landwirtschaft zwischen Nutzung und Bereitstellung von Ökosystemleistungen.



Quelle: Zhang et al., 2007

Anmerkung: Abbildung 19 zeigt, dass die Landwirtschaft sowohl Bereitstellerin als auch Nutzerin von ÖSL ist. Sie profitiert von Leistungen der Ökosysteme, wie fruchtbarer Boden, Bestäubung und Wasserverfügbarkeit,

³ <https://cices.eu/>; 01.06.2023

und ist bestrebt, diese Leistungen zu erhalten und zu erhöhen. Untersuchungen zeigen den Zusammenhang von ÖSL mit landwirtschaftlicher Nutzung, wie beispielsweise Nahrungsmittelbereitstellung, Trinkwasserqualität, Bodenfunktion und Klimaschutz (z. B. Umweltbundesamt, 2011). Darüber hinaus unterstützt sie die Erbringung bestimmter ÖSL, von denen viele als Koppelprodukt der nachhaltigen, extensiven landwirtschaftlichen Produktion anfallen (z. B. Agrobiodiversität, Kulturlandschaft). Die Landwirtschaft kann aber auch durch eine negative Beeinträchtigung von Ökosystemen deren Fortbestand gefährden.

4.2 Ökosystemleistungen und Boden

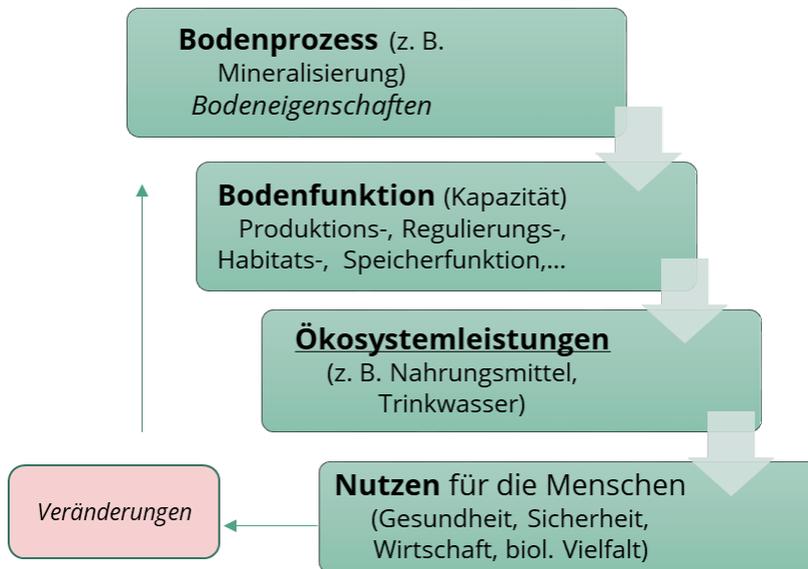
Der Boden ist ein wichtiger Bestandteil des Konzepts der Ökosystemleistungen, da er viele wichtige Funktionen für Ökosysteme und Menschen erfüllt. Durch die Einbeziehung des Bodens in das System der Ökosystemleistungen werden seine Funktionen und damit die zugrundeliegenden Bodeneigenschaften und Prozesse als Beitrag zum menschlichen Wohlbefinden sichtbar. Außerdem besteht die Möglichkeit, die vielfältigen Bodenfunktionen und deren Bedeutung für den Menschen aus einer ganzheitlichen Perspektive zu betrachten.

Der Boden ist eine komplexe und lebendige Umwelt, die eine Vielzahl von Eigenschaften, Prozessen und Funktionen aufweist, welche miteinander verbunden sind und sich gegenseitig beeinflussen.

Viele ÖSL hängen naturgemäß von der Gesundheit des Bodens und der biologischen Vielfalt des Bodenlebens ab.

Die Leistungen des Bodens hängen also von den Bodeneigenschaften und Prozessen ab. Um diese ÖSL zur Verfügung zu stellen, müssen die Bodenfunktionen (= Kapazität/Potenzial des Bodens ausreichend Ökosystemleistungen hervorzubringen) intakt sein. Eine konservierende Bodenbewirtschaftung liefert wichtige ÖSL für den Menschen. Ein reichhaltiges und vielfältiges Bodenleben beeinflusst alle Ökosystemleistungen des Bodens positiv.

Abbildung 20: Ökosystemleistungen des Bodens zwischen Prozessen, Funktionen und Nutzen.



Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Haines-Young und Potschin, 2009, in Umweltbundesamt 2011

Anmerkung: Eine Unterscheidung zwischen Bodeneigenschaften, Prozessen und Funktionen hilft eine Kaskade von Schritten zu definieren, die den Beitrag des Bodens zu ÖSL verdeutlichen (Grêt-Regamey, 2016). Bodenprozesse (z. B. Mineralisierung organischer Substanz), definiert als Wechselwirkungen zwischen biotischen und abiotischen Elementen eines Ökosystems, und Bodeneigenschaften (z. B. pH-Wert und organische Substanz) bedingen die Bodenfunktionen (Wallace, 2007). Funktionen stellen die Kapazität des Bodens dar, ÖSL zu erbringen (Dominati et al., 2010). Die Nutzung durch den Menschen kann wiederum zu Veränderungen der Bodenprozesse und -funktionen führen.

Auch zum Schutz des Bodens wird verstärkt auf den Ökosystemleistungsansatz hingewiesen. Mit diesem Ansatz sollen die Leistungen des Bodens deutlicher sichtbar gemacht und Bodenbelange besser in der Öffentlichkeit kommuniziert werden. Die Kommission Bodenschutz des Umweltbundesamtes in Deutschland greift diese Diskussionen auf, ordnet sie in das deutsche Regelungssystem ein und leitet erste Empfehlungen zum Umgang mit dem Ökosystemleistungsansatz ab (KBU, 2019). Aufgrund seiner übergreifenden Perspektive legt das ÖSL-Konzept in besonderer Weise eine strategische Zusammenarbeit des Bodenschutzes mit dem Gewässer-, Klima- und Naturschutz dar. Auf diese Weise kann ein multifunktionaler Flächenschutz realisiert werden (KBU, 2019).

In einer Studie zur aktuellen Mission der Europäischen Kommission zu gesunden Böden (A Soil Deal for Europe) wird die zentrale Bedeutung der Bodenfunktionen für den

Menschen hervorgehoben (Veerman et al., 2020). Zu den wichtigsten Bodenfunktionen bzw. Bodenökosystemleistungen gehören:

- **Biomasseproduktion:** Der Boden stellt den Nährboden für Pflanzen dar und trägt somit zur Nahrungsmittel-, Futtermittel-, Faser- und -Biomasseproduktion bei.
- **Speicherung und Reinigung von Wasser:** Der Boden kann Wasser speichern und filtern, wodurch er einen wichtigen Beitrag zur Wasserqualität leistet.
- **Kohlenstoffbindung:** Der Boden spielt eine wichtige Rolle bei der Bindung von Kohlenstoff und hilft somit den Klimawandel zu bekämpfen.
- **Nährstoffkreislauf und Reduktion von Verschmutzung:** Der Boden unterstützt den Nährstoffkreislauf und kann auch Schadstoffe abbauen, was zur Reduktion von Umweltverschmutzung beiträgt.
- **Biodiversität:** Der Boden bietet eine wichtige Lebensgrundlage für Bodenlebewesen und trägt somit zur Erhaltung der Biodiversität bei.
- **Lebensqualität:** Der Boden beeinflusst die Lebensqualität der Menschen durch die Bereitstellung von Nahrungsmitteln, die Unterstützung der Erholung und Freizeitaktivitäten sowie durch die Regulierung des Klimas.

Im Folgenden werden die Bodenökosystemleistungen genauer beschrieben.

4.2.1 Biomasseproduktion

Das Bodenmikrobiom, das aus einer vielfältigen Gruppe von Mikroorganismen besteht, spielt eine wichtige Rolle für die Bodenfruchtbarkeit und damit für das Wachstum und die Gesundheit der Pflanzen. Es trägt zur Nährstofffixierung, Mineralisierung, Löslichkeit und Mobilisierung bei und verbessert so die Verfügbarkeit essenzieller Nährstoffe für Pflanzen (Gardi und Jeffery, 2009, Geitner et al., 2019).

Die Bereitstellung von Nahrungsmitteln, Futtermitteln, Fasern, Heilpflanzen und Biomasse für die Energieproduktion beruht auf der vielfältigen und komplexen Interaktion zwischen physikalischen, chemischen und biologischen Bodeneigenschaften und -prozessen, welche u. a. die Fruchtbarkeit des Bodens bestimmen. Die für die Land- und Forstwirtschaft so wichtige Bodenfruchtbarkeit wird von vielen Bodeneigenschaften beeinflusst, wie z. B. Bodentiefe, Nährstoffgehalt, Menge und Qualität der organischen Substanz, Wasserrückhalt, Säuregehalt (pH-Wert), Bodentextur und -struktur, mineralische Zusammensetzung, Gesteinsgehalt, Zusammensetzung des Bodenlebens.

Die in der Landwirtschaft zum Einsatz kommenden Bewirtschaftungspraktiken beeinflussen wiederum maßgeblich die Bodeneigenschaften und somit die vom Boden erbrachten Ökosystemleistungen. Im Ackerbau können sich unter anderem organische Düngung mit Wirtschaftsdünger und Kompost, Einarbeitung von Ernteresten, Optimierung der Fruchtfolge und Sortenwahl, Zwischenfruchtanbau, Untersaaten und Gründüngung sowie reduzierte Bodenbearbeitung und Direktsaat positiv auf Bodeneigenschaften wie Struktur und Nährstoffversorgung auswirken (BML, 2022). Häufige Bodenbearbeitung kann beispielsweise zur Destabilisierung der Bodenaggregate und zu erhöhter Erosion führen und steigert die Mineralisierung der organischen Substanz im Boden (Chenu et al., 2019). Die Ermittlung einer optimalen Grünlandbewirtschaftung, die sowohl eine rentable Tierproduktion als auch die Bereitstellung von Ökosystemleistungen kombiniert, ist immer noch eine große Herausforderung. Bewirtschaftungsmaßnahmen, Wiedereinsaat, Entwässerungsbedingungen, Pflanzenarten oder auch Landnutzungsänderungen nehmen Einfluss auf die Beschaffenheit von Grünlandböden. Bodeneigenschaften im Grünland, wie beispielsweise der Humusgehalt, können durch verbessertes Weidemanagement, anorganische und organische Düngung von Weiden und Wiesen, Bewässerung sowie Aussaat von Leguminosen und verbesserten Grasarten positiv beeinflusst werden (Conant et al., 2017, Khalil et al., 2020).

4.2.2 Speicherung und Reinigung von Wasser

Die Funktion des Bodens, Wasser zurückzuhalten und zu reinigen, ist für das Wachstum und das Überleben der Pflanzen unerlässlich. Die Wasserrückhaltefähigkeit des Bodens sorgt für eine kontinuierliche Wasserversorgung der Pflanzen zwischen den Regenperioden, sodass sie wachsen und gedeihen können. Die Wasserspeicherkapazität ist die Fähigkeit des Bodens, Wasser aus Regenfällen zu speichern und für Pflanzen verfügbar zu machen. Durch diese Leistung können Böden die Auswirkungen extremer Klimaereignisse (z. B. Dürre) abmildern und Überschwemmungen begrenzen.

Die Bodenbeschaffenheit und die organische Substanz sind die wichtigsten Komponenten, die die Wasserspeicherkapazität des Bodens bestimmen. Humusgehalt und Wasserspeicherfähigkeit sind eng miteinander verbunden. Maßnahmen, die den Humusaufbau fördern, wirken sich positiv auf den Wasserhaushalt der Böden und die Infiltrationsleistung aus (BML, 2022). Böden mit kleineren Partikeln, wie Schluff und Ton, haben eine größere Oberfläche als Böden mit größeren Sandpartikeln, wodurch sie mehr Wasser speichern können. Das Mikrobiom spielt eine wichtige Rolle bei der Wasserspeicherkapazität und der Reinigung des Bodens. Bodenmikroben verbessern die Bodenstruktur

und die Porosität des Bodens und erhöhen damit die Wasserinfiltration und -speicherung. Darüber hinaus spielt die Zersetzung organischer Stoffe und der Abbau von Schadstoffen durch das Mikrobiom eine wesentliche Rolle beim Nährstoffkreislauf und der Reinigung des Bodenwassers (Dominati et al., 2010, Geitner et al., 2019).

4.2.3 Kohlenstoffbindung

Der Boden spielt eine entscheidende Rolle im globalen Kohlenstoffkreislauf und hat das Potenzial, den Klimawandel erheblich zu beeinflussen. Er fungiert als Kohlenstoffseneke und speichert Kohlenstoff in Form von stabiler organischer Substanz. Diese Fähigkeit wird durch die Menge an organischer Substanz im Boden und die Prozesse, die an ihrer Bildung und Zersetzung beteiligt sind, bestimmt. Darüber hinaus spielen Bodenbedingungen wie Feuchtigkeit und Temperatur eine wichtige Rolle bei der Regulierung der Aktivität von Bodenmikroorganismen, die wiederum die Produktion von Treibhausgasen beeinflussen (Dominati et al., 2010). Mikroorganismen interagieren mit organischem Material und fördern den Abbau und die Umwandlung von organischem Kohlenstoff in stabilere Formen. Durch den Zersetzungsprozess bauen sie komplexe organische Verbindungen ab und setzen Kohlendioxid (CO₂) in die Atmosphäre frei. Sie tragen aber auch zur Kohlenstoffspeicherung bei, indem sie durch die Synthese von mikrobieller Biomasse und extrazellulären Substanzen stabile organische Verbindungen schaffen.

Das Gleichgewicht zwischen Kohlenstoffspeicherung und -freisetzung im Boden wird durch die Art der Bodennutzung beeinflusst. Unterschiedliche Landnutzungen wie Land- und Forstwirtschaft sowie Urbanisierung können sich unterschiedlich auf die Kohlenstoffdynamik im Boden auswirken. Beispielsweise können Entwaldung und intensive landwirtschaftliche Praktiken zu Kohlenstoffverlusten im Boden führen, da die Vegetation entfernt oder der Boden gestört wird. Andererseits können Aufforstung, Wiederaufforstung und die Anwendung nachhaltiger landwirtschaftlicher Praktiken die Kohlenstoffbindung im Boden verbessern. Neben der Landnutzung hat die Art der Bewirtschaftung einen großen Einfluss auf das Bodenmikrobiom. Praktiken wie die Zugabe organischer Düngemittel, Fruchtfolge und reduzierte Bodenbearbeitung können das Wachstum und die Aktivität nützlicher Bodenmikroorganismen fördern, was zu einer erhöhten Kohlenstoffbindung führt (Geitner et al., 2019).

Eine erhöhte Kohlenstoffspeicherung in Ackerböden wird primär über die Förderung des Humusaufbaus in der obersten Bodenschicht erreicht. Maßnahmen zum vermehrten Humusaufbau beinhalten organische Düngung mit Wirtschaftsdünger (Stallmist, Gülle)

und Kompost, Einarbeiten von Ernteresten, optimierte Fruchtfolge mit einem hohen Anteil an Kulturen mit großer Wurzelmasse (insbesondere Leguminosen), Aufbau von Agroforstsystemen, Einbringung von Biokohle und reduzierte Bodenbearbeitung (Wiesmeier et al., 2020). Speziell das Erhöhen des organischen Inputs (Ernterückstände, Begrünungen, Feldfutter) sowie die Reduktion der Bodenbearbeitung tragen zu einer deutlich verbesserten Humusversorgung im Boden bei. Die reduzierte bzw. angepasste Bodenbearbeitung ist eine Möglichkeit, sowohl die Nährstofffreisetzung als auch die Kohlenstoffhaltung bzw. -speicherung zu gewährleisten und ermöglicht gleichzeitig einen energiesparenden und ressourcenschonenden Anbau.

Weitere wichtige Maßnahmen zur Kohlenstoffspeicherung im Boden sind der Erhalt bzw. die Wiederherstellung von Dauergrünland, Mooren und Feuchtgebieten (BML, 2022).

4.2.4 Nährstoffkreislauf und Reduktion von Schadstoffbelastung

Der Boden spielt eine entscheidende Rolle bei der Regulierung des Nährstoffkreislaufs und der Rückhaltung von Schadstoffen, wobei seine Leistungsfähigkeit auf verschiedenen Prozessen und Komponenten beruht. Ein wichtiger Aspekt ist die Speicherung, der Austausch und der Kreislauf von Makro- und Mikronährstoffen mit den Pflanzen. So sind z. B. die Stickstofffixierung, die Phosphorversorgung und die Zersetzung und Mineralisierung organischer Stoffe für Pflanzen lebenswichtige Prozesse, die durch den Boden ermöglicht werden. Die im Boden vorhandenen Nährstoffe werden zwischen den Bodenpartikeln und den Pflanzenwurzeln durch Prozesse wie Ionenaustausch, Adsorption und Desorption ausgetauscht. Dieser Austauschmechanismus stellt sicher, dass die Pflanzen kontinuierlich mit den für ihren Stoffwechsel notwendigen Nährstoffen versorgt werden (Geitner et al., 2019).

Darüber hinaus ist der Boden ein wichtiger Puffer, der dazu beiträgt, dass gelöste Stoffe und Schadstoffe nicht in Gewässer wie Grundwasser, Seen und Flüsse gelangen. Der Boden hat die Fähigkeit, diese Stoffe zu absorbieren, zurückzuhalten und teilweise abzubauen, wodurch ihre potenziellen Auswirkungen auf die Umwelt verringert werden. Die Bodenbeschaffenheit mit ihrer unterschiedlichen Durchlässigkeit und Drainagekapazität trägt zur Rückhaltung von Schadstoffen bei, indem sie deren Bewegung durch das Bodenprofil einschränkt (Geitner et al., 2019).

Neben den physikalischen Eigenschaften des Bodens spielt auch das Bodenmikrobiom eine wichtige Rolle beim Schadstoffabbau. Bodenmikroorganismen, darunter Bakterien,

Pilze und Archaeen, haben die Fähigkeit, verschiedene Schadstoffe durch biochemische Prozesse abzubauen und umzuwandeln. Sie können organische Verbindungen metabolisieren, Schadstoffe in weniger schädliche Formen umwandeln oder in ihre eigene Biomasse einbauen und so deren Konzentration in der Bodenumwelt wirksam reduzieren (Jónsson und Davíðsdóttir, 2016).

4.2.5 Biodiversität

Der Boden ist ein Hotspot der biologischen Vielfalt und beherbergt eine außergewöhnlich hohe Artenvielfalt. Er dient als Lebensraum für Millionen von Organismen, von Mikroorganismen bis hin zu größeren wirbellosen Tieren und ermöglicht ihnen, zu gedeihen und sich zu entwickeln. Diese biologische Vielfalt des Bodens spielt eine entscheidende Rolle bei der Gestaltung seiner funktionellen Eigenschaften und bei der Unterstützung einer Vielzahl von ÖSL.

Insbesondere das Bodenmikrobiom ist für die Erhaltung der Gesundheit und Funktionalität des Bodenökosystems von großer Bedeutung. Bodenmikroorganismen wie Bakterien, Pilze, Archaeen und andere mikrobielle Gemeinschaften tragen wesentlich zu verschiedenen ÖSL bei.

Eine der wichtigsten Aufgaben des Bodenmikrobioms ist die Pedogenese, der Prozess der Bodenbildung. Mikroorganismen sind aktiv am Abbau von organischem Material, der Zersetzung von Pflanzenresten und der Umwandlung von Mineralien beteiligt, die für die Entwicklung und Fruchtbarkeit des Bodens von entscheidender Bedeutung sind. Ihre Aktivitäten tragen zur Bildung und Stabilisierung der Bodenstruktur bei und verbessern die Fähigkeit des Bodens, Wasser zu speichern, Gase auszutauschen und das Pflanzenwachstum zu fördern (Geitner et al., 2019).

4.2.6 Lebensqualität

Böden dienen als Rohstofflagerstätte, als Siedlungsraum, als Basis für land- und forstwirtschaftliche Nutzung sowie als Standort für andere wirtschaftliche und öffentliche Nutzungen, z. B. im Bereich von Verkehr, Ver- und Entsorgung.

Boden dient als Grundlage für Erholungsaktivitäten und Tourismus und ermöglicht so viele unterschiedliche Outdoor-Aktivitäten. Damit können auch kulturelle, spirituelle und ästhe-

tische Erfahrungen verbunden sein. Für manche Aktivitäten ist spezielle Bodenbearbeitung erforderlich, welche die physikalischen und chemischen Eigenschaften des Bodens ändern (Geitner et al., 2019).

Mutterboden, Ton und Torf sind Beispiele für Bodenrohstoffe. Böden werden auch direkt verbraucht und haben in einigen Regionen der Welt eine wichtige Rolle als Quelle für Mineralien und Medizin. Darüber hinaus bewahren Böden unser geologisches, ökologisches und archäologisches Archiv (Jónsson und Davíðsdóttir, 2016). Böden mit speziellen natürlich oder kulturell bedingten Eigenschaften bieten großes Potenzial für Wissenschaft und Lehre. Moorböden eignen sich beispielsweise sehr gut als Archive, da sie Überreste unter Sauerstoffausschluss konservieren können, die zur Rekonstruktion der natürlichen und kulturellen Geschichte beitragen (Geitner et al., 2019).

5 Disseminierungsaktivitäten

Wissensvermittlung unterstützt das Verständnis für Ökosystemleistungen des Bodens und fördert damit die Akzeptanz für Maßnahmen zum Schutz des Bodens in der Gesellschaft. Ein wichtiges Ziel der Arbeiten war es daher, das Bewusstsein und Wissen hinsichtlich der Bedeutung von Bodenmikrobiomen für Landwirtschaft und Umwelt zu schärfen und zu vertiefen.

Neben der Forschung zum Einfluss der Bodenmikrobiome auf Zwischenbegrünung und Trockenstress und der Darstellung der ÖSL wurden in einem dritten Arbeitspaket der Pilotstudie verschiedene Kanäle genutzt, um unterschiedliche Multiplikatoren anzusprechen. Ziel war es, Wissen über Bodenmikrobiome aufzubauen und zu verbreiten. Folgende drei Zielgruppen wurden besonders angesprochen:

- Zielgruppe Landwirtschaft / Boden (Praktiker:innen und Praktiker:innen in Ausbildung),
- Zielgruppe allgemeine Öffentlichkeit, z. B. Familien,
- Zielgruppe Fachpublikum.

Die erste angesprochene Zielgruppe waren Jugendliche, die sich in Ausbildung zu einem landwirtschaftsnahen Beruf befinden. Im Rahmen des Projektes wurden Lehrunterlagen für landwirtschaftliche Fachschulen und Höhere Bundeslehranstalten für Land- und Forstwirtschaft erstellt, die nach Projektende allen interessierten Lehrenden und Lernenden zur Verfügung stehen. Ergänzt wurden diese Aktivitäten durch die Abhaltung von zwei Schulworkshops mit insgesamt drei Klassen zum Testen der Schulunterlagen in Wien und in der Steiermark.

Die zweite Zielgruppe umfasste die allgemeine Öffentlichkeit mit einem Fokus auf Familien, die bei der „Langen Nacht der Forschung“ für das Thema Boden und Bodenmikrobiome begeistert werden konnten. Diese Veranstaltung, die jährlich durchgeführt wird, richtet sich an naturwissenschaftlich interessierte Personen, besonders Familien, die gerne fachlich ansprechende Versuche machen und spielerisch Neues erfahren wollen.

Die dritte Zielgruppe umfasste vorwiegend Personen aus dem Landwirtschafts- und/oder Umweltbereich sowie naturwissenschaftlich interessierte Personen. Diese Gruppe beinhaltete vielfach auch jene Personen, die über die Landwirtschaftskammern erreicht wurden. Einerseits waren Landwirt:innen bereits durch die gemeinsame Flächenauswahl für den Versuch (AP1) mit dem Thema des Forschungsprojektes konfrontiert, andererseits konnte über Informationsveranstaltungen und Vorträge eine noch größere Personenanzahl erreicht werden. Über Fachartikel und Publikationen werden zudem die interessierte Öffentlichkeit und auch die Forschung angesprochen.

5.1 Aufbereitung eines Schulmoduls für landwirtschaftliche Schulen

Um Schüler:innen zu erreichen, die sich bereits während der Ausbildung und damit voraussichtlich auch im späteren Berufsleben mit Boden und dessen Bearbeitung beschäftigen, wurden Lehrmaterialien erstellt. Als Zielgruppe wurde hierfür Jugendliche in land- und forstwirtschaftlichen Fachschulen sowie in der Höheren Bundeslehr- und Forschungsanstalt für Land- und Forstwirtschaft ausgewählt. Ziel war es, in der Zielgruppe Bewusstsein für das Bodenmikrobiom und die ÖSL zu schaffen. Dazu stehen die im Projekt erarbeiteten Lehrmaterialien auch über die Projektlaufzeit allen Schulen kostenfrei zur Verfügung.

Um dies zu erreichen, wurde ein Schulmodul geplant, das an den Lehrplan angepasst ist. Das Schulmodul setzt sich aus den beiden Teilen „Aufbereitung einer Lehrunterlage zu Bodenmikrobiomen für den Einsatz im Unterricht“ (siehe 7.2) und „Durchführung von Schulworkshops“ zusammen.

5.1.1 Lehrunterlagen für landwirtschaftliche Schulen

In einem Heft wurden Lehrmaterialien zusammengestellt, die aus einem Theorieteil und einem Praxisteil bestehen (Birli et al., 2018a). Am Ende des Heftes findet sich ein Glossar, um die Fachbegriffe, die im Text erwähnt werden, zu erklären.

Die Lehrunterlage kann für den Unterricht sowohl in landwirtschaftlichen Fachschulen als auch in allgemeinbildenden Schulen – Zielgruppe ist hierbei die zweite Sekundarstufe – eingesetzt werden. Durch die mehrteilige Struktur kann sie dabei sowohl der lehrenden Person als Grundlage dienen als auch als Handout für die Schüler:innen verwendet werden.

Struktur und Aufbau der Lehrmaterialien

Teil 1: Grundlagen

Teil 2: Aufgabenstellungen für landwirtschaftliche Schulen

- Aufgabenstellung 1 – Filmsammlung
- Aufgabenstellung 2 – Präsentation erarbeiten

Teil 3: Aufgabenstellungen für andere Schulen

- Aufgabenstellung 3 – Interviews führen
- Aufgabenstellung 4 – Film kritisch diskutieren

Teil 4: Glossar zum Bodenmikrobiom

Der theoretische Überbau über Bodenmikrobiome bildet die Einführung in die Thematik. Diese beinhaltet zudem eine Übersicht, welchen Einfluss die landwirtschaftliche Praxis auf die Gesundheit des Bodenmikrobioms nehmen kann.

Der zweite und dritte Teil bestehen jeweils aus konkreten Aufgaben, die auch eine umfangreiche Videoliste beinhalten. In den praktischen Übungen nehmen die Schüler:innen die Rolle von Landwirt:innen ein und überlegen, wie das in Handout und Filmen vermittelte Wissen direkt in ihrem (fiktiven oder tatsächlichen familiären) Betrieb anzuwenden wäre. Die maßgeblichen Schritte dabei sollen in einer Präsentation aufbereitet und gegenseitig berichtet werden (Birli et al., 2018b).

Darüber hinaus können die Jugendlichen selbst in die Rolle landwirtschaftlicher Berater:innen schlüpfen und andere Personen zur Thematik Bodenmikrobiome beraten. Dazu müssen sie sich zunächst das erforderliche Wissen aneignen, um es in weiterer Folge entsprechend weitergeben zu können.

Diese Gespräche ermöglichen auch eine kritische Herangehensweise an die Thematik, etwa indem eine Person eine skeptische Rolle einnimmt und eine weitere Person sich für eine Änderung der landwirtschaftlichen Praxis zur Förderung des Mikrobioms ausspricht.

5.1.2 Durchführung der Schulworkshops

Diese Lehrunterlagen wurden an zwei Schulen direkt im Klassenzimmer genutzt. Für die Durchführung der Schulworkshops wurde eine HBLFA und ein LFS ausgewählt, da die Lehrunterlagen auch für diese Schultypen aufbereitet wurden.

Der erste Schulworkshop fand am 20.03.2023 in der 3. Klasse (11. Schulstufe) der HBLFA Schönbrunn statt. An dem Workshop nahmen 20 Schüler:innen teil. Der zweite Workshop fand in der LFS Kirchberg am Walde, Steiermark, statt. Daran nahm die gesamte 10. Schulstufe (zwei Klassen), die ca. 65 Schüler:innen umfasst, teil.

5.1.2.1 Beschreibung der Durchführung

An beiden Schulen wurden jeweils drei Schulstunden für die Durchführung des Schulworkshops verwendet. Der Ablauf setzte sich aus einzelnen Elementen der Lehrunterlagen zusammen, wobei die Lehrunterlagen als Handouts an alle Schüler:innen verteilt wurden.

In der Einleitung stellten die Moderator:innen die Pilotstudie Bodenmikrobiome kurz vor. Danach folgte eine kurze Einführung in das Thema Bodenmikrobiome, wobei besprochen wurde, was Bodenmikrobiome sind, welche Lebewesen wo im Boden vorkommen und welche Wirksamkeit sie haben (als Dünger, als „Medizin“, zur Verbesserung der Bodenstruktur, aber auch als Schädling).

Darauf folgte der Kurzfilm „Mykorrhiza: Mit Pilzen den Boden verbessern“⁴, um die praktische Anwendung im Feld zu zeigen.

Den größten Teil nahm jedoch die selbständige Aufbereitung durch die Schüler:innen in Anspruch. Die Klasse wurde hierfür in Kleingruppen (zwei bis vier Personen) aufgeteilt, um eine der drei folgenden Optionen zu bearbeiten:

⁴ [youtube.com/watch?v=xyRkP00_XTM](https://www.youtube.com/watch?v=xyRkP00_XTM)

Kleingruppenarbeit Option 1

- Wie könnten Sie das im Film/Text vermittelte Wissen am besten im eigenen Betrieb umsetzen?
- Legen Sie Größe und Ausrichtung des Betriebes fest (konventionell/nach Bio-Richtlinien). Gerne kann der familiäre Betrieb herangezogen werden.
- Welche Vorteile, welche Nachteile ergeben sich?
- Diskutieren Sie in der Kleingruppe und erstellen Sie im Anschluss eine Powerpoint-Präsentation mit dem Titel „Nutzung des Bodenmikrobioms für den eigenen Betrieb“.

Die Kleingruppe hatte ausreichend Zeit, um die Inhalte ihrer Powerpoint-Präsentation in einem eigenen Klassenraum zu erarbeiten.

Kleingruppenarbeit Option 2

In dieser Aufgabe nimmt eine Person die Rolle des:der landwirtschaftlichen Berater:in ein und eine andere Person die Rolle eines:einer Landwirt:in, der:die bei der Beratungsstelle anruft, um das aktuelle Wissen rund um Bodenmikrobiome abzufragen.

- Was würden Sie dieser Person raten, wovon würden sie abraten?
- Bereiten Sie die Inhalte vor und stellen sie das Gespräch im Klassenzimmer nach.

Hier haben sich zwei bis drei Personen abgesprochen und die Inhalte des Gespräches zwischen Landwirt:in und Berater:in erarbeitet und eingeübt.

Kleingruppenarbeit Option 3

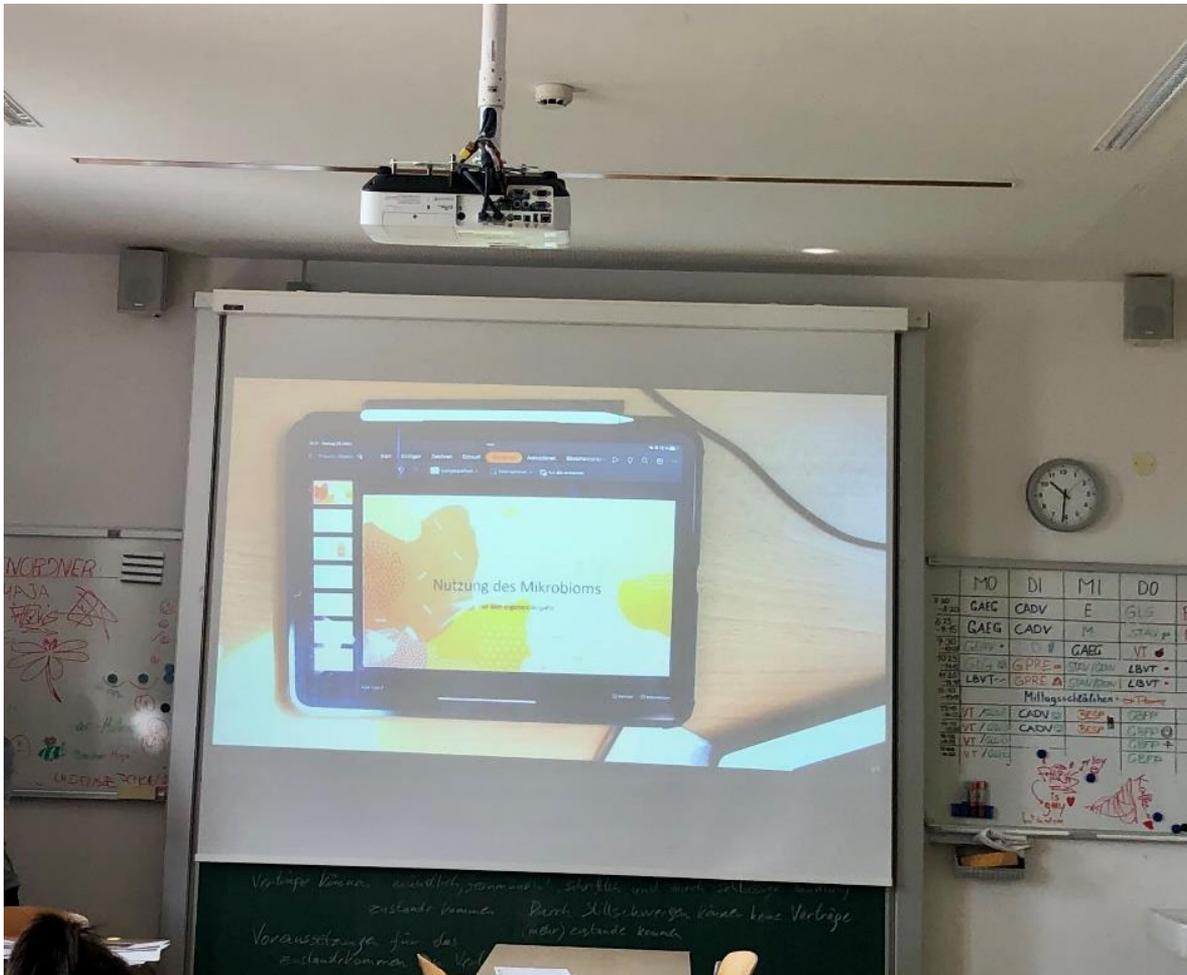
Stellen Sie sich vor, Sie wären ein:e Expert:in für Bodenmikrobiome und ein:e Schüler:in ruft sie an, weil er:sie ein Bodenmikrobiomprojekt macht.

- Was würden Sie dem:der Schüler:in raten?
- Was ist das Wichtigste, das er:sie über Bodenmikrobiome wissen muss?
- Wo kann er:sie sich weiter informieren?
- Bereiten Sie ein Gespräch (in Interviewform) zwischen Schüler:in und Expert:in vor und stellen Sie dieses in der nächsten Einheit im Klassenzimmer nach.
- Nennen Sie mindestens drei Quellen, die Sie zur Vorbereitung des Gesprächs verwendet haben (Internetrecherche, Filme, Zeitschriften etc.).

Diese Gespräche wurden von zwei Personen inhaltlich erarbeitet und geübt, um dann vor der Klasse vorgetragen zu werden.

In drei größeren Gruppen wurde besprochen, wie Bodenmikrobiome in der Landwirtschaft gefördert werden können. Danach wurde in Kleingruppen weitergearbeitet. Die Auseinandersetzung mit praktischen Methoden stellte in Folge die Grundlage für die Ausarbeitung der Aufgabe in der Kleingruppe dar. Den Jugendlichen wurde etwa eine Stunde Zeit gegeben, um die Grundlagen zu erarbeiten. Im Anschluss erfolgten die Präsentationen.

Abbildung 21: Präsentation an der HBLFA Schönbrunn der ausgearbeiteten Powerpoint-Präsentation über einen Beamer.



© Umweltbundesamt / Barbara Färber

5.1.2.2 Resümee aus der Durchführung der Schulworkshops

Die Durchführung von Schulworkshops ermöglichte das Schärfen und Vertiefen der Kenntnisse der Jugendlichen über Bodenmikrobiome und die Vorstellung der Lehrmaterialien. Zudem konnte über die Rückmeldung der Schüler:innen auf die bereits bestehende Auseinandersetzung mit dem Thema Bodenmikrobiome geschlossen werden. Darüber hinaus wurde evaluiert, ob die Lehrunterlagen zum Thema Bodenmikrobiome verständlich sind.

Die Rückmeldungen der Lehrenden waren durchwegs positiv. Durch die unterschiedlichen Aufgabenstellungen konnten die Schüler:innen sich frei für eine Option entscheiden und daher mit Freude an die Aufgabe herangehen. Die Präsentationen und nachgestellten

Gespräche waren vielfältig und von guter Qualität. Es gibt Interesse an einer erneuten Zusammenarbeit.

5.1.3 Aktivitäten zur Verbreitung der Lehrmaterialien

Grundsätzlich stehen die im Projekt erarbeiteten Lehrmaterialien allen Schulen kostenfrei zur Verfügung. Daher ist es wichtig, die Materialien unter Lehrenden bekannt zu machen.

Für die weitere Verbreitung stehen nach Projektabschluss folgende Plattformen zur Verfügung:

- Veröffentlichung auf der Website des BML im Bereich „Boden“,
- Veröffentlichung auf der Umweltbundesamt-Website⁵,
- Veröffentlichung auf den Multiplikatorenseiten agrarschulen.at und schule.at,
- Bekanntmachung über die Landwirtschaftskammern sowie die Hochschule für Agrar- und Umweltpädagogik.

Hierzu wurden schon erste Vorgespräche geführt. Das Ziel ist, für viele weitere interessierte Jugendliche Projekttag zu Bodenmikrobiom zu ermöglichen.

5.2 Aufbereitung der Thematik für die Öffentlichkeit

Es wurde ein Poster für die Lange Nacht der Forschung am 20.05.2022 erstellt. Die Aufbereitung der Thematik Bodenmikrobiome für die Öffentlichkeit, wobei besonders Kinder und Jugendliche miteinbezogen werden sollen, erfolgte beim Stand „Was spielt sich unter unseren Füßen ab?“.

Die Lange Nacht der Forschung ist grundsätzlich so organisiert, dass interessierte Personen – vorrangig sind es Familien – von Stand zu Stand gehen und dort kleine naturwissenschaftliche Aufgaben und Spiele erleben können. Der wissenschaftliche Hintergrund wird vom Fachpersonal am Stand erklärt. Es können Fragen gestellt werden und die Verweildauer am Stand ist nicht vorgegeben.

⁵ umweltbundesamt.at/seminare-schulungen/boden-und-bildung/boden-lehrmaterial

Abbildung 22: Bodenmikrobiome-Stand bei der Langen Nacht der Forschung 2022.



© Umweltbundesamt / Barbara Birli

Der Bodenmikrobiome-Stand bestand aus einer Spielstation (Spiel „NährWert“), einer Black Box zur Bodenbildung und aus der Posterwand. Ziel war es, durch das niederschwellige Angebot der Box Personen an den Stand zu holen und dort ins Gespräch zu kommen. In der Box sind die Bestandteile der Bodenbildung, also etwa organisches, anorganisches Material, Luft und Wasser. Diese Materialien mussten durch Greifen erraten werden, ohne sie zu sehen. Das ist einerseits unterhaltsam, andererseits lehrreich.

Während sich die Jüngeren beim Spielen Grundwissen zu Boden, Ernährung und Bodenbildung angeeignet haben, konnten Ältere direkt Wissen über das Projekt und die Bedeutung der Bodenmikrobiome erwerben.

Die beiden Poster (siehe Kapitel 7) behandelten die theoretische Einführung in Bodenmikrobiome. Die Pilotstudie Bodenmikrobiome wurde detailliert auf einem eigenen Poster vorgestellt, wobei insbesondere auf die Bedeutung des mikrobiellen Bodenlebens für den Wasserhaushalt eingegangen wurde (siehe Kapitel 3.6).

Abbildung 23: Vorstellung des Posters auf der Lange Nacht der Forschung 2022.



© Umweltbundesamt / Barbara Birli

Die Lange Nacht der Forschung hatte ein gutes Medienecho, auch das Umweltbundesamt hat die Aktivitäten beworben⁶.

⁶ biologischevielfalt.at/service/chmnews/2022/lange-nacht

Abbildung 24: Twitternachricht zur Langen Nacht der Forschung.



Quelle: Umweltbundesamt / Barbara Birli

5.3 Informationsveranstaltungen für Fachpublikum

Über Informationsveranstaltungen wurde die Pilotstudie Bodenmikrobiome und die Bedeutung der Bodenmikrobiome einem Fachpublikum zugänglich gemacht.

5.3.1 Boden.Wasser.Schutz.Tagung 2022

Die Boden.Wasser.Schutz.Tagung fand am 1.12.2022 in der Höheren landwirtschaftlichen Bundeslehranstalt in St. Florian, Oberösterreich statt. Veranstalter war das Amt der Oberösterreichischen Landesregierung, Direktion Umwelt und Wasserwirtschaft. Die Zielgruppe der Veranstaltung waren Vertreter:innen von Landwirtschaft, Wasserwirtschaft,

Umwelt, NGOs, Gemeinden und Behörden, Planer:innen, Mitglieder der Arbeitskreise Boden.Wasser.Schutz, Pädagog:innen und interessierte Personen.

Während die Veranstaltung selbst den Fokus Klimawandel und Bodenversiegelung hatte, konnte das Projekt „Bodenmikrobiome“ zeigen, wie komplex die Mikroorganismen im Boden mit Bodenparametern, Pflanzenwachstum und anderen Umweltfaktoren interagieren. So kann ein funktionierendes Bodenleben die Betriebsmitteleffizienz steigern und damit die Nährstoffausträge in Grund- und Oberflächengewässer minimieren. Die Bakterien und Pilze im Boden können aber auch negative Umweltauswirkungen ausgleichen.

In den beiden ersten Vorträgen wurden einerseits die Ökosystemleistungen des Bodens vorgestellt (siehe Kapitel 4) und andererseits auf die bodenbürtigen Pilze und Bakterien in der Landwirtschaft eingegangen (siehe Kapitel 3).

5.3.2 Weitere Arbeiten zur besseren Bekanntmachung des Projektes und Verbreitung der Projekthalte

Verschiedene weitere Vorträge und Diskussionen, die im Folgenden kurz vorgestellt werden, konnten die Bekanntheit der Pilotstudie erhöhen und ein breites Fachpublikum erreichen.

Das Projekt wurde am 4. Mai 2021 und am 11. November 2021 beim Treffen des Bodensforum Österreichs präsentiert. Dabei waren etwa 120 Personen aus der österreichischen Bodencommunity, Repräsentant:innen des BMLRT, des BMK sowie der Bundesländer und Universitäten und von BFW und AGES anwesend.

Auch die Konferenz in Blaubeuren (Opportunities for applied mycological biodiversity research at the AIT, DGfM, Deutsche Gesellschaft für Mykologie – Konferenz Blaubeuren, Deutschland, 4. Oktober 2021) bot eine Möglichkeit zur Präsentation und Diskussion mit einem Fachpublikum.

Bei der Konferenz der Österreichischen Mykologischen Gesellschaft hielt Markus Gorfer am 22. Juli 2021 einen weiteren Vortrag über Pilze in landwirtschaftlich genutzten Flächen.

6 Zusammenfassung

Die Erhaltung und Verbesserung der Bodenfunktionen und der Bodengesundheit liegt im ureigensten Interesse der Gesellschaft. In einer Studie für die Europäische Kommission zu gesunden Böden (A Soil Deal for Europe) wird Bodengesundheit definiert als „... *continued capacity of a certain type of soil to contribute in providing ecosystem services for all forms of life, in accordance with the goals of the SDGs and the Green Deal*“ (Veerman, 2020). Der Boden sollte entsprechend nicht nur aus ökonomischen Gesichtspunkten betrachtet werden, sondern auch aus sich heraus einen Wert darstellen. Neben der Produktion von Biomasse sollten auch andere Ökosystemleistungen in den Fokus treten.

Das Bodenmikrobiom ist das Rückgrat für die Bereitstellung bzw. den Erhalt der Bodenfunktionen und kann als Haupttreiber für viele ÖSL angesehen werden, da die zugrundeliegenden Prozesse hauptsächlich durch Bakterien, Pilze, Archaeen, Protisten oder Algen katalysiert werden.

In den letzten Jahren widmete sich die Forschung verstärkt der Frage, wie Bodenmikroorganismen Pflanzen bei der Vermeidung von Stress unterstützen können. Für die vorliegende Pilotstudie wurden vier repräsentative Maisflächen in Ober- und Niederösterreich beprobt, um die Effekte der Zwischenbegrünung sowie stark reduzierter mikrobieller Diversität auf die Resilienz von Mais gegenüber Trockenstress zu untersuchen. Es wurden Bodenuntersuchungen der Freilandlandflächen zur Bodenchemie und zum Bodenmikrobiom durchgeführt. Im Glashaus wurden Maispflanzen aller Varianten in Töpfen angebaut und Trockenstress ausgesetzt. Ein Teil des Bodens wurde zudem einer Gammabestrahlung ausgesetzt, um die bodenbürtige Biodiversität noch weiter zu reduzieren.

Die chemischen Bodenuntersuchungen zeigten keinen eindeutigen Unterschied zwischen begrüneten und unbegrüneten Freilandflächen, der Gehalt an labilem Kohlenstoff ist jedoch durch die Zwischenbegrünung angestiegen. Eine Erhöhung des labilen Kohlenstoffs durch Zwischenbegrünung erscheint plausibel, da Wurzelexsudate und abgestorbenes Pflanzenmaterial als erstes im labilen Kohlenstoff-Pool zu finden sind. Effekte landwirtschaftlicher Maßnahmen machen sich oftmals erst im labilen Kohlenstoff bemerkbar, bevor Veränderungen im Humusgehalt zu beobachten sind (Tatzber et al., 2015). Die Humusgehalte blieben in Folge der Zwischenbegrünung unverändert oder sind tendenziell leicht angestiegen.

Der Vergleich mit den Begrünungsvarianten zeigte kaum eindeutige Unterschiede im Bodenmikrobiom. Der Grund dafür liegt im relativ kurzen Untersuchungszeitraum. Die Zwischenbegrünung hatte also in der vorliegenden Studie wenig Einfluss auf die Gemeinschaft der Pilze, Bakterien und Archaeen an den vier Standorten. In vielen, auch über längere Zeiträume durchgeführten Untersuchungen konnte jedoch gezeigt werden, dass der Pflanzenbewuchs von großer Bedeutung für das Bodenmikrobiom ist (siehe Kapitel 3.6). Insbesondere Zwischenbegrünungen mit vielen Mischungspartnern haben einen positiven Einfluss auf das Bodenmikrobiom. Das hat auch für die landwirtschaftliche Praxis eine wichtige Bedeutung.

Im Glashausversuch wurden in der oberirdischen und unterirdischen Biomasse der Maispflanzen keinerlei Unterschiede zwischen den beiden Begrünungsvarianten festgestellt. Hingegen haben erwartungsgemäß die Trockenstressperioden zu einem kümmerlichen Wachstum und einer deutlichen Reduktion der Biomasse geführt. Auf den gamma-bestrahlten Böden zeigten sich am Ende des Versuches auch starke Biomasseverluste. Das bedeutet, dass ein Boden mit stark eingeschränkter mikrobieller Biodiversität bei Pflanzen (Mais) einen ähnlichen Stress bewirkt wie Wassermangel (selbst bei ausreichender Bewässerung), da offensichtlich wichtige Gruppen von Mikroorganismen fehlen, die für die Pflanzenentwicklung bedeutend sind. Trockenstress führt auch zu einer Abnahme des Chlorophyllgehalts; bei den sterilisierten Böden wurde eine stärkere Reduktion beobachtet.

Es wurde festgestellt, dass die verschiedensten Umwelteinflüsse, Bodenbeschaffenheit, Zwischenbegrünung und Trockenstress das Bodenmikrobiom verändern.

Für die Gemeinschaften der Bakterien und Archaeen konnte durch die Bestrahlung eines Teils der Böden eine deutliche Reduktion der α -Diversität (Anzahl der in der Probe gefundenen verschiedenen Organismen sowie deren relative Häufigkeiten) beobachtet werden. Der Trockenstress bewirkte keine deutliche Reduktion der α -Diversität von Bakterien und Archaeen. Die bestrahlungsbedingte Reduktion der α -Diversität konnte bei den Pilzen nicht beobachtet werden. Bei den Bakterien und Archaeen konnte durch die Bestrahlung nicht nur eine Verminderung der Biodiversität, sondern auch eine Veränderung in der Zusammensetzung der Gemeinschaft festgestellt werden. Der Trockenstress hat interessanterweise nur einen geringen Einfluss auf die Gemeinschaft der Pilze, Bakterien und Archaeen.

Der Klimawandel und die Bewirtschaftung der Böden können zu einer negativen Veränderung in der Struktur und Funktion des Bodenmikrobioms führen, was oft mit einem allgemeinen Verlust der Bodenbiodiversität einhergeht und folglich zu einem Verlust der Multifunktionalität des Bodens und zu verminderter Bodenqualität führt.

Deshalb müssen Bewirtschaftungsstrategien für Böden entwickelt werden, welche die Artenvielfalt fördern und ihr Funktionspotenzial nutzen. Um dieses Ziel zu erreichen, ist ein tiefgreifendes Verständnis der Faktoren erforderlich, welche die Struktur, Funktion und Aktivität des Bodenmikrobioms beeinflussen. Entsprechend wichtig ist es, durch Bewusstseinsbildung auf die Bedeutung des Bodens hinzuweisen.

Zusätzlich zum Forschungsschwerpunkt bildete auch die Wissensvermittlung zum Thema Bodenmikrobiome eine wichtige Komponente dieser Pilotstudie. Ziel war es, über unterschiedliche Kanäle und Formate Wissen über Bodenmikrobiome aufzubauen und zu verbreiten. Dafür wurde besonders auf drei Zielgruppen fokussiert:

- Personen, die beruflich und privat mit dem Thema Landwirtschaft und Boden verbunden sind, wie Praktiker:innen und in Ausbildung befindliche Personen, die einen landwirtschaftlichen Schwerpunkt haben,
- Personen der allgemeinen Öffentlichkeit, besonders interessierte Familien,
- Fachpublikum.

Die unterschiedlichen Kanäle, um diese Zielgruppen zu erreichen, bestanden in der Ausarbeitung von Lehrunterlagen, der Durchführung von Schulworkshops und in Folge dem kostenlosen Zugriff auf die Lehrunterlagen für Lehrer:innen. Zudem konnte über einen Stand in der „Langen Nacht der Forschung“ die Öffentlichkeit, besonders Familien, erreicht werden. Landwirt:innen und Fachpublikum konnten sich einerseits über die Einbindung in die Durchführung des Pilotprojektes selbst sowie andererseits über Fachvorträge und Publikationen mit der Thematik Bodenmikrobiome auseinandersetzen.

Speziell in den Schulworkshops fand bei den zukünftigen Bewirtschafter:innen eine intensive Auseinandersetzung zum Thema Bodenmikrobiome statt. Dieses Wissen kann in weiterer Folge in die landwirtschaftliche Praxis der Betriebe eingehen. Gleichzeitig konnte über Rückmeldungen in den Schulen evaluiert werden, ob das Thema verständlich und praxisrelevant aufbereitet wurde. Die Schulworkshops und die Vorträge vor Fachpublikum zeigten ein großes Interesse von Praktiker:innen am Thema Bodenmikrobiome und Ökosystemleistungen des Bodens.

Über die Publikationen und Vorträge auf nationalen und internationalen Veranstaltungen wurden die Forschungsergebnisse einem breiteren Publikum bekannt gemacht. In den Diskussionen zeigte sich, dass noch weitere Forschungen notwendig sind, um den Einfluss von Bodenmikrobiomen auf die ÖSL unter verschiedenen Standortbedingungen (v. a. Bodentyp, Klima, Bewirtschaftung) verifizieren zu können bzw. die konkreten Beiträge bestimmter Gruppen an Mikroorganismen zu identifizieren. Dazu wären weitere Versuchsanordnungen mit Bodenmaterial von anderen Standorten bzw. Behandlungsvarianten hinsichtlich klimatischer Bedingungen und des Bodenmikrobioms zu wählen. Diese Forschungen ermöglichen Aussagen, ob die erzielten Erkenntnisse aus diesem Projekt auf andere Regionen in Österreich übertragbar sind bzw. welche bestimmten Gruppen an Mikroorganismen besonders zu erhalten bzw. durch Bewirtschaftungsmaßnahmen zu fördern sind.

7 Anhang

7.1 Poster – für Lange Nacht der Forschung

Dieses Extra-Dokument wird als pdf-File zum Download bereitgestellt.

7.2 Lehrunterlagen

Dieses Extra-Dokument wird als pdf-File zum Download bereitgestellt.

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ergebnisse der Bodenuntersuchung für die beiden Zwischenbegrünungsvarianten der oberösterreichischen Standorte im März 2022.	16
Tabelle 2: Ergebnisse der Bodenuntersuchung für die beiden Zwischenbegrünungsvarianten der niederösterreichischen Standorte im März 2022.	17

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Plan für die Freiland- und Glashausversuche.	9
Abbildung 2: Bilder von den vier Versuchsflächen in Ober- und Niederösterreich.....	12
Abbildung 3: Biodiversität für Bakterien und Archaeen sowie Pilze im Freiland.	18
Abbildung 4: Hauptkoordinatenanalyse der Bakterien und Archaeen der vier Freilandflächen.....	20
Abbildung 5: Relative Häufigkeiten in Prozent der Archaea zu den verschiedenen Probenahmezeitpunkten.....	21
Abbildung 6: Hauptkoordinatenanalyse der Pilze der vier Freilandflächen.	22
Abbildung 7: Relative Häufigkeiten in Prozent für die wichtigsten Pilz-Phyla zu den verschiedenen Probenahmezeitpunkten.	23
Abbildung 8: Ober- und unterirdische Biomasse der Maispflanzen nach 14 Tagen.....	25
Abbildung 9: Ober- und unterirdische Biomasse der Maispflanzen nach 77 Tagen.....	26
Abbildung 10: Chlorophyllgehalte der Maispflanzen im Glashausversuch.....	27
Abbildung 11: Bodendaten Begrünungsvarianten B und G zu Versuchsbeginn (T0 und T14).....	30
Abbildung 12: Bodendaten Bestrahlungsvarianten I0 (normal), I1 (mix) und I2 (steril).	31
Abbildung 13: Bodendaten Trockenstressvarianten KS und TS zu Versuchsende (T77).	32
Abbildung 14: Biodiversität für Bakterien und Archaeen sowie Pilze im Glashausversuch.	33
Abbildung 15: Hauptkoordinatenanalyse der Bakterien und Archaeen im Glashausversuch.....	34
Abbildung 16: Relative Häufigkeiten in Prozent für die Archaea im Glashausversuch.	36
Abbildung 17: Hauptkoordinatenanalyse der Pilze im Glashausversuch.	37
Abbildung 18: Relative Häufigkeiten in Prozent für <i>Fusarium</i> im Glashausversuch.....	38
Abbildung 19: Landwirtschaft zwischen Nutzung und Bereitstellung von Ökosystemleistungen.	43
Abbildung 20: Ökosystemleistungen des Bodens zwischen Prozessen, Funktionen und Nutzen.	45
Abbildung 21: Präsentation an der HBLFA Schönbrunn der ausgearbeiteten Powerpoint-Präsentation über einen Beamer.	58
Abbildung 22: Bodenmikrobiome-Stand bei der Langen Nacht der Forschung 2022.	60
Abbildung 23: Vorstellung des Posters auf der Langen Nacht der Forschung 2022.....	61
Abbildung 24: Twitternachricht zur Langen Nacht der Forschung.	62

Literaturverzeichnis

Angst, G., Mueller, K. E., Nierop, K. G., & Simpson, M. J.: Plant- or microbial-derived? A review on the molecular composition of stabilized soil organic matter, 2021. *Soil Biology and Biochemistry*, 156, 108189. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108189>

Birli, B., Schwarz, S. Foldal, C., Hromatka, A., Berthold, H., Englisch, M.: Projekt Boden und Klimawandel – selbst erforscht! (2018a) 2. Symposium Wahrnehmung und Bewertung von Böden in der Gesellschaft, Leipzig.

Birli, B., Schwarz, S. Foldal, C., Hromatka, A., Berthold, H., Schaufler, J., Herzberger E., Englisch, M. SchülerInnen Denken Ganzheitlich – zu Boden und Klimawandel (2018b) Jahrestagung der Österreichischen bodenkundlichen Gesellschaft.

BML – Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Regionen und Wasserwirtschaft: Humus in Diskussion: Daten, Fakten und Maßnahmen. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Regionen und Wasserwirtschaft (Hg) 2022, 137 S., Wien.

BMLRT – Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus: Richtlinie für die sachgerechte Düngung im Ackerbau und Grünland – Anleitung zur Interpretation von Bodenuntersuchungsergebnissen in der Landwirtschaft. Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus (Hg) 2022, 185 S., Wien.

Boyd, J. & S. Banzhaf: What are ecosystem services? The need for standardized environmental accounting units. *Ecological Economics*, 2007. 63(2): p. 616-626.

Chenu, C., Angers, D.A., Barré, P., Derrien, D., Arrouays, D. & Balesdent, J. (2019): Increasing organic stocks in agricultural soils: Knowledge gaps and potential innovations. *Soil and Tillage Research*, 188, 41-52.

Clark, I. M., Hughes, D. J., Fu, Q., Abadie, M., & Hirsch, P. R.: Metagenomic approaches reveal differences in genetic diversity and relative abundance of nitrifying bacteria and archaea in contrasting soils, 2021. *Scientific Reports*, 11(1), 1-9. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-95100-9>

Compant, S., van der Heijden, M.G., & Sessitsch, A.: Climate change effects on beneficial plant-microorganism interactions, 2010. *FEMS Microbiology Ecology*, 73(2), 197-214.

Conant, R. T., Cerri, C. E., Osborne, B. B., & Paustian, K.: Grassland management impacts on soil carbon stocks: a new synthesis, 2017. *Ecological Applications*, 27(2), 662-668.

Cotrufo, M. F., Wallenstein, M. D., Boot, C. M., Denef, K., & Paul, E.: The Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: do labile plant inputs form stable soil organic matter?, 2012. *Global change biology*, 19(4), 988-995. <https://doi.org/10.1111/gcb.12113>

Daryanto, S., Fu, B., Wang, L., Jacinthe, P. A., & Zhao, W.: Quantitative synthesis on the ecosystem services of cover crops, 2018. *Earth-Science Reviews*, 185, 357-373. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.06.013>

de Vries, F. T., Griffiths, R. I., Bailey, M., Craig, H., Girlanda, M., Gweon, H. S., Hallin, S., Kaisermann, A., Keith, A. M., Kretschmar, M., Lemanceau, P., Lumini, E., Mason, K. E., Oliver, A., Ostle, N., Prosser, J. I., Thion, C., Thomson, B., & Bardgett, R. D.: Soil bacterial networks are less stable under drought than fungal networks. *Nature Communications*, 2018. 9(1): p. 3033.

Domsch, K., & Gams, W.: *Pilze aus Agrarböden*, 1970. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart.

Dominati, E., Patterson, M., & Mackay, A.: A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils. *Ecological economics*, 2010. 69(9), p. 1858-1868.

Fischer, B., Turner, R.K. & Morling, P.: Defining and classifying ecosystem services for decision making. 2009. *Ecological Economics* 68, p. 643-653.

Faber, J. H., Cousin, I., Meurer, K. H. E., Hendriks, C. M. J., Bispo, A., Viketoft, M., ten Damme, L., Montagne, D., Hanegraaf, M. C., Gillikin, A., Kuikman, P., Obiang-Ndong, G., Bengtsson, J., & Taylor, A.: Stocktaking for Agricultural Soil Quality and Ecosystem Services Indicators and their Reference Values. EJP SOIL Internal Project SIREN Deliverable 2022, 2. Report, 153 pp.

Freeman, K. R., Martin, A. P., Karki, D., Lynch, R. C., Mitter, M. S., Meyer, A. F., Longcore, J. E., Simmons, D. R., & Schmidt, S. K.: Evidence that chytrids dominate fungal communities in high-elevation soils, 2009. Proceedings of the National Academy of Sciences, 106(43), 18315-18320. <https://doi.org/10.1073/pnas.0907303106>

Frey, B., Rime, T., Phillips, M., Stierli, B., Hajdas, I., Widmer, F., & Hartmann, M.: Microbial diversity in European alpine permafrost and active layers, 2016. FEMS microbiology ecology, 92(3), fiw018. <https://doi.org/10.1093/femsec/fiw018>

Gardi, C. & Jeffery, S. : Soil Biodiversity, 2009: JRC – European Commission – Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.

Geitner, C., Freppaz, M., Lesjak, J., Schaber, E., Stanchi, S., d'Amico, M., & Vrscaj, B.: Soil Ecosystem Services in the Alps – An introduction for decision-makers, 2019. pp. 1-78. Agricultural Institute of Slovenia.

Gentsch, N., Boy, J., Batalla, J. D. K., .: Catch crop diversity increases rhizosphere carbon input and soil microbial biomass, 2020. Biology and Fertility of Soils 56, 943–957. <https://doi.org/10.1007/s00374-020-01475-8>

Gorfer, M., Ringwald, T., Bandian, D., Bodner, G., Huber, S., Freudhofmaier, M. & Sessitsch, A.: 2023. Einflüsse von landwirtschaftlichen Maßnahmen auf das Bodenleben, 2023. Der Pflanzenarzt 5: 27-29.

Grêt-Regamey, A., Drobnik, T., Greiner, L., Keller, A., & Papritz, A.: Factsheet Soil and Ecosystem Services. 2016.

Hartmann, M., Frey, B., Mayer, J., Mäder, P., & Widmer, F.: Distinct soil microbial diversity under long-term organic and conventional farming. ISME J, 2015. 9(5), p. 1177-94. <https://doi.org/10.1038/ismej.2014.210>

Haslmayr, H.-P., Baumgarten, A., Schwarz, M., Huber, S., Prokop, G., Sedy, K., Krammer, C., Murer, E., Pock, H., Rodlauer, C., Schaumberger, A., Nadeem, I., & Formayer, H.: BEAT – Bodenbedarf für die Ernährungssicherung in Österreich. Endbericht zum Forschungsprojekt Nr. 100975. 2018, Bundesministerium Nachhaltigkeit und Tourismus (BMNT), Vienna.

Heuermann, D., Gentsch, N., Boy, J., Schweneker, D., Feuerstein, U., Groß, J., Bauer, B., Guggenberger, G., & von Wirén, N.: Interspecific competition among catch crops modifies vertical root biomass distribution and nitrate scavenging in soils, 2019. *Scientific Reports*, 9(1), 1-11. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-48060-0>

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014, Geneva.

Jónsson, J. Ö. G., & Davíðsdóttir, B.: Classification and valuation of soil ecosystem services. *Agricultural Systems*, 2016, 145, 24-38.

Jost, L., Chao, A., & Chazdon, R. L.: Compositional similarity and beta diversity. In: AE Magurran, BJ McGill (eds) *Biological Diversity: Frontiers in Measurement and Assessment*, 2010. Oxford University Press, Oxford.

Jung, J., Kim, J. S., Taffner, J., Berg, G., & Ryu, C. M.: Archaea, tiny helpers of land plants, 2020. *Computational and Structural Biotechnology Journal*, 18, 2494-2500. <https://doi.org/10.1016/j.csbj.2020.09.005>

KBU – Kommission Bodenschutz beim Umweltbundesamt: Das Konzept der Ökosystemleistungen – ein Gewinn für den Bodenschutz. 2019.

Khalil, M. I., Fornara, D. A., & Osborne, B.: Simulation and validation of long-term changes in soil organic carbon under permanent grassland using the DNDC model, 2020. *Geoderma*, 361, 114014.

Kim, N., Zabaloy, M. C., Guan, K., & Villamil, M. B.: Do cover crops benefit soil microbiome? A meta-analysis of current research, 2020. *Soil Biology and Biochemistry*, 142, 107701. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.107701>

Klaubauf, S., Inselsbacher, E., Zechmeister-Boltenstern, S., Wanek, W., Gottsberger, R., Strauss, J., & Gorfer, M.: Molecular diversity of fungal communities in agricultural soils from Lower Austria, 2010. *Fungal diversity*, 44, 65-75. <https://doi.org/10.1007/s13225-010-0053-1>

Leininger, S., Urich, T., Schloter, M., Schwark, L., Qi, J., Nicol, G. W., Prosser, J. I., Schuster, S. C., & Schleper, C.: Archaea predominate among ammonia-oxidizing prokaryotes in soils, 2006. *Nature*, 442(7104), 806-809.
<https://doi.org/10.1038/nature04983>

Magurran, A. E., & McGill, B. J.: Biological diversity: frontiers in measurement and assessment, 2010. Oxford University Press, Oxford.

McGonigle, T.P. & Turner, W. G.: Grasslands and Croplands Have Different Microbial Biomass Carbon Levels per Unit of Soil Organic Carbon. *Agriculture*, 2017. 7(7), p. 57.

MEA – Millennium Ecosystem Assessment: Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis. 2005, Island Press, Washington D.C.

Poeplau, C., & Don, A.: Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops – A meta-analysis, 2015. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 200, 33-41.
<https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.10.024>

Schoch, C. L., Seifert, K. A., Huhndorf, S., Robert, V., Spouge, J. L., Levesque, C. A., Wen Chen, and Fungal Barcoding Consortium: Nuclear ribosomal internal transcribed spacer (ITS) region as a universal DNA barcode marker for Fungi, 2012. *Proceedings of the national academy of Sciences*, 109(16), 6241-6246.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1117018109>

Tatzber M., Schlatter, N., Baumgarten, A., Dersch, G., Korner, R., Lethinen, T., Unger, G., Mifek, E. and Spiegel, H.: KMnO₄ determination of active carbon for laboratory routines: three long-term field experiments in Austria, 2015. *Soil Research* 53, 190-204.

Umweltbundesamt: Ökosystemleistungen und Landwirtschaft: Erstellung eines Inventars für Österreich, 2011. Umweltbundesamt, Vienna.

Veerman, C., Correia, T. P., Bastioli, C., Biro, B., Bouma, J., Cienciala, E., Emmett, B., Frison, E. A., Grand, A., Filchev, L. H., Kriaučiūnienė, Z., Pogrzeba, M., Soussana, J.-F., Vela, C., & Wittkowski, R.: Caring for soil is caring for life: ensure 75 % of soils are healthy by 2030 for healthy food, people, nature and climate: interim report of the mission board for soil health and food: study. 2020, Publications Office of the European Union, Luxembourg.

Wallace, K. J.: Classification of ecosystem services: problems and solutions. *Biological Conservation*, 2007, 139(3), p. 235-246.

Wang, B., An, S., Liang, C., Liu, Y., & Kuzyakov, Y.: Microbial necromass as the source of soil organic carbon in global ecosystems, 2021. *Soil Biology and Biochemistry*, 162, 108422. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108422>

Wiesmeier, M., Mayer, S., Paul, C., Helming, K., Don, A., Franko, U., Steffens, M. & Kögel-Knabner, I.: CO₂-Zertifikate für die Festlegung atmosphärischen Kohlenstoffs in Böden: Methoden, Maßnahmen und Grenzen, 2020. *BonaRes Series*, 1, 1-24.

Zavattaro, L., Costamagna, C., Grignani, C., Bechini, L., Spiegel, A., Lehtinen, T., ... & ten Berge, H. F.: Long-term effects of best management practices on crop yield and nitrogen surplus, 2015. *Italian Journal of Agronomy*, 10(1), 47-50.

Zhang, W., Ricketts, T. H., Kremenc, C., Carney, K., & Swinton S.M.: Ecosystem services and disservices to agriculture. *Ecological Economics*, 2007, 64, p. 253–260.

Abkürzungen

AGES	Österreichische Ernährungsagentur
AIT	Austrian Institute of Technology
AOA	Ammonia-oxidierende Archaeen – können wie die AOB Ammonium in Nitrit umwandeln.
AOB	Ammonia-oxidierende Bakterien – wandeln im ersten Schritt der Nitrifizierung Ammonium in Nitrit um, das in weiterer Folge von den Nitritoxidierern in Nitrat umgewandelt werden kann
B	Brache – Variante ohne Zwischenbegrünung im Freiland- und im Glashausversuch
BFW	Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft
BMK	Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie
BML	Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Regionen und Wasserwirtschaft
BMLRT	Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus
C	Kohlenstoff
CaCl ₂	Calciumchlorid
CAL	Calcium-Acetat-Lactat-Auszug
CCI	Chlorophyll Content Index – Index für den Chlorophyllgehalt im Blatt, wird mit einem Handmessgerät erfasst
C/N	C/N-Verhältnis; Stickstoff/Kohlenstoffverhältnis
CO ₂	Kohlendioxid
Cu	Kupfer
DNA	Desoxyribonukleinsäure – Träger der Erbinformation
EDTA	Ethylendinitrilotetraessigsäure Dinatriumsalz-Dihydrat-Auszug
Fe	Eisen
G	Variante mit Zwischenbegrünung im Freiland- und im Glashausversuch
HBLFA	Höheren Bundeslehranstalten der Land- und Forstwirtschaft
I0	Bestrahlungsvariante im Glashausversuch, unbehandelte Kontrolle
I1	Bestrahlungsvariante im Glashausversuch, Mischung der unbehandelten Kontrolle I0 und der mit γ -Strahlen behandelten Variante I2

I2	Bestrahlungsvariante im Glashausversuch, mit γ -Strahlen sterilisierter Boden
ITS	Internal Transcribed Spacer – Region im Gencluster für die ribosomalen RNAs, wird bei Pilzen als phylogenetischer Marker bei der Hochdurchsatzsequenzierung verwendet
KS	Kein Stress – Variante ohne Trockenstress im Glashausversuch
LFS	Landwirtschaftliche Fachschule
Mn	Mangan
ÖSL	Ökosystemleistungen
rRNA	Ribosomale RNA, essenzieller Bestandteil der Ribosomen, und somit in jeder Zelle vorhanden
SOC	Soil Organic Carbon – organischer Kohlenstoff im Boden
TN	Total Nitrogen – Gesamtstickstoff im Boden
TS	Variante mit Trockenstress im Glashausversuch
z. B.	Zum Beispiel
Zn	Zink

Umweltbundesamt GmbH

Spittelauer Lände 5, 1090 Wien

www.umweltbundesamt.at