



$\mu$ Plastik

**Verständnis der Effekte von Mikroplastik auf  
Rhizosphärenprozesse und -wechselwirkungen in landwirtschaftlichen Böden**

TP C (FZJ)

**Schlussbericht Phase I (Teile I-II)**

**Förderkennzeichen:** 031B0907C

**Zuwendungsempfänger:** Forschungszentrum Jülich GmbH  
52425 Jülich

**Ausführende Stelle:** Forschungszentrum Jülich GmbH  
Institut für Bio- und Geowissenschaften  
Agrosphäre (IBG-3)  
Wilhelm-Johnen-Straße  
52425 Jülich

**Projektleiter:** Prof. Dr. Nicolas Brüggemann  
n.brueggemann@fz-juelich.de  
Telefon: 02461-61-8643

**Laufzeit & Berichtszeitraum:** 01.02.2020-31.01.2024

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

## **I. Kurzdarstellung**

### **I.1 Aufgabenstellung**

Das Vorkommen von Mikroplastik in Agrarökosystemen ist ein zunehmend wichtiges Thema. Diese Materialien sind in landwirtschaftlich genutzten Böden weit verbreitet, was wahrscheinlich auf die vorherrschenden Eintragspfade durch synthetische Düngemittel („slow-release“-Dünger), organische Düngemittel (Kompost, Klärschlamm) und Mulchfolien sowie die effiziente Einarbeitung durch das Pflügen zurückzuführen ist. Zu Beginn des Vorhabens gab es bereits Hinweise auf Auswirkungen von Mikroplastik auf Bodenprozesse (z.B. Bodenaggregation) und Bodenbiota (z.B. Regenwürmer), aber die Auswirkungen auf die Rhizosphäre, einen Hotspot mikrobieller Aktivität im Boden mit größter Bedeutung für das Pflanzenwachstum, waren zu Beginn des Vorhabens noch unbekannt. Das Projekt zielte darauf ab, durch Untersuchungen der Auswirkungen von Mikroplastik auf die Funktionen und Wechselwirkungen der Rhizosphäre mit dem Boden zur Schließung dieser Kenntnislücke beizutragen. Die Experimente waren so konzipiert, dass sie auch direkt zur Erstellung von Managementempfehlungen beitragen konnten. Es wurden drei sehr unterschiedliche Böden (Sandige Braunerde, Parabraunerde aus Löß und Schwarzerde) miteinander verglichen, die für die deutsche Landwirtschaft von besonderer Bedeutung sind, um festzustellen, in welchem Boden die (positiven oder negativen) Auswirkungen auf die hydraulischen Bodeneigenschaften, auf das Wurzelwachstum und die Wurzelarchitektur sowie auf die biogeochemischen Schlüsselprozesse am stärksten sein würden. Dazu wurden Versuche im Labor, in Klimakammern und im Freiland in Inkubationsgefäßen, Rhizotronen und Lysimetern mit Weizen durchgeführt.

### **I.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde**

Zur Bearbeitung des Vorhabens waren alle technischen und personellen Voraussetzungen erfüllt. Für die Laborversuche standen voll ausgestattete chemische und physikalische Labore mit modernster Analytik zur Verfügung. Die Rhizotronversuche wurden in zwei verschiedenen von der Werkstatt des FZJ angefertigten Rhizotronentypen („split-root“-Design sowie Rhizotrone mit ungeteiltem Wurzelraum) in einer Klimakammer des FZJ durchgeführt. Die Freilandversuche fanden in der Freiland-Lysimeter-Versuchsanlage des FZJ mit eigens von der Werkstatt des FZJ dafür angefertigten Lysimetern statt. Die Versuche wurden von der über das TP C finanzierten Doktorandin Katharina Neubert durchgeführt.

### **I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens**

Das Teilprojekt FZJ bearbeitete überwiegend das Arbeitspaket 4 in Zusammenarbeit mit den Kooperationspartnern des Gesamtvorhabens. Daneben trug das TP FZJ auch zum Arbeitspaket 1 bei. Der zeitliche Ablauf der Arbeiten wurde wie in Abb. 1 dargestellt festgelegt. Ebenso wurden folgende Meilensteine unter Federführung des Partners FZJ festgelegt:

- M1 Logistik für Screening-Experiment ist geklärt, Böden und Pflanzenmaterial sind beschafft, und der erste Durchgang ist im Gewächshaus aufgebaut (FUB mit FZJ und HGMU)
- M4a Screeningexperiment mit kleinen Rhizoboxen ist abgeschlossen, Genotypen für das Haupt-Rhizobox-Experiment sind ausgewählt (FZJ)
- M4b Haupt-Rhizobox-Experiment ist abgeschlossen und Effekte auf Pflanzen-N- und Wasseraufnahme sind quantifiziert (FZJ)
- M4c Effekte von Mikroplastik auf C- und N-Umsatz im Boden, sowie auf GHG-Emissionen sind quantifiziert (FZJ)

	Year 1				Year 2				Year 3				Year 4			
	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
WP1		M1														
WP4				M4a								M4b				M4c

**Abb. 1.** Schematische Darstellung des Zeitplans der unter Beteiligung des FZJ durchgeführten Arbeitspakete und der in Phase I zu erreichenden Meilensteine.

#### I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Geyer et al. (2017) schätzten, dass bisher 8.300 Millionen Tonnen (Mt) Kunststoffe produziert wurden, von denen ca. 6.300 Mt zu Kunststoffabfällen wurden, wovon 79 % sich in Deponien oder in der Umwelt angesammelt haben. Wenn Plastik in Größen <5 mm (oder <1 mm) auftritt, wird es als Mikroplastik bezeichnet. Mikroplastik als Schadstoff wird seit über einem Jahrzehnt in den Ozeanen untersucht, aber erst mit einiger Verzögerung wurden die Auswirkungen von Mikroplastik im Boden als wichtig erachtet (Rillig 2012). In der aquatischen Umwelt fügen Mikroplastikpartikel den Systemen eine zusätzliche Oberfläche hinzu, an die sich andere organische Materialien anlagern können. Diese zusätzlichen Partikel können mit Nahrungsmitteln verwechselt und dann aufgenommen werden, wodurch sie sich entlang der Nahrungskette anreichern. Ob ähnliche Prozesse auch in Böden zu beobachten sind, war bisher umstritten (Rillig und Bonkowski 2018), denn in Böden ist die Situation eine ganz andere: der Boden ist eine partikelreiche Umgebung, und das Hinzufügen einer Oberfläche ist verhältnismäßig weniger wichtig. Wahrscheinlich aus diesem Grund war der Boden nicht das unmittelbare Ziel der Mikroplastikforschung (Rillig 2012; Machado et al. 2018). Es gibt jedoch gute Gründe für die Annahme, dass sich Mikroplastik auch in Böden stark auf die Biota und die Struktur des Nahrungsnetzes auswirkt, vor allem in Hotspots wie der Rhizosphäre, wo erhebliche Verschiebungen im Funktionsmuster möglich sind, die sich auf das Pflanzenwachstum und die Stressreaktionen auswirken können.

Ein wichtiger Grund, warum wir bisher so wenig über Mikroplastik im Boden wussten, ist, dass die Nachweismethoden weitaus anspruchsvoller sind, da Mikroplastikpartikel von der Bodenmatrix unterschieden werden müssen. Diese Herausforderung wurde erst kürzlich mit dem Aufkommen von Methoden zur Quantifizierung von Mikroplastik im Boden bewältigt (Fuller und Gautam 2016; Bläsing und Amelung 2018; Hurley et al. 2018; Scheurer und Bigalke 2018; Zhang et al. 2018). Diese Methodenentwicklung ist ein fortlaufender Prozess; aber überall dort, wo Forscher nach Mikroplastik gesucht haben, haben sie auch Mikroplastik gefunden, wie z.B. in abgelegenen Gebieten der Schweiz (Scheurer und Bigalke 2018).

Landwirtschaftliche Böden scheinen Hotspots für Mikroplastik zu sein (Nizzetto et al. 2016), und zwar aus mehreren Gründen: (i) landwirtschaftliche Zusatzstoffe enthalten Mikroplastik, was für Kompost (Weithmann et al. 2018) und auch für Klärschlamm (Zubris und Richards 2005) nachgewiesen wurde; (ii) Kunststoffmulch kann ebenfalls Mikroplastik hinzufügen, wenn dieses Material fragmentiert (Qi et al. 2018); (iii) landwirtschaftliche Ökosysteme sind zusätzlich anderen Quellen ausgesetzt, die terrestrische Ökosysteme beeinflussen, wie etwa atmosphärische Deposition (Dris et al. 2018). Es scheint also unbestreitbar, dass unsere landwirtschaftlichen Böden

Schlussbericht µPlastik Phase I – TP C (FZJ)

Mikroplastik enthalten. Jedoch war vor Beginn des Vorhabens nichts über den Abbau von Mikroplastik im Boden bekannt, und angesichts des im Allgemeinen sehr ineffizienten Abbaus von Kunststoffen im Boden muss davon ausgegangen werden, dass der Mikroplastikgehalt im Boden im Laufe der Zeit zunimmt.

Sobald Mikroplastikpartikel die Bodenoberfläche erreichen, können sie leicht in das Bodenprofil transportiert werden. Ein solcher Transport erfolgt durch z.B. durch Bodentiere (Regenwürmer: Rillig et al. 2017a; Collembolen: Maaß et al. 2017), entlang von Bioporen und wahrscheinlich auch auf andere Weise, die für landwirtschaftliche Systeme spezifisch ist, z.B. durch Pflügen (Rillig et al. 2017b) oder nach der Bildung von Rissen während Dürreperioden. Somit kann Mikroplastik, das auf der Bodenoberfläche deponiert wird, leicht in landwirtschaftlich genutzte Böden gelangen, wo es dann mit Bodenbiota und Wurzeln in Kontakt kommt und diese möglicherweise beeinflussen oder sogar beeinträchtigen kann.

Vor Beginn des Vorhabens gab es allerdings nur wenige Studien zu diesem Thema, aber es wurde beispielsweise gezeigt, dass sich Mikroplastikkügelchen negativ auf die Aktivität von Regenwürmern auswirken und in einem Experiment zu einer erhöhten Sterblichkeitsrate führen (Huerta Lwanga et al. 2016). Zum Teil als Folge der geringeren Abundanz und Aktivität von Regenwürmern sind Veränderungen in der Bodenstruktur zu erwarten, die sich auch auf andere Bodenbiota auswirken werden, da sich die Heterogenität der angebotenen Nischen verändert. Es ist sehr wahrscheinlich, dass kleinere Mikroplastikpartikel von Protisten aufgenommen werden und sich so in der Nahrungskette des Bodens anreichern können (Rillig und Bonkowski 2018). In Anbetracht der Bedeutung von Bodentieren für die Regulierung mikrobieller Netzwerke scheint es wahrscheinlich, dass es indirekte Auswirkungen gibt, die durch den Verlust wichtiger Kontrollfaktoren vermittelt werden, auch wenn Bakterien, Archaeen und Pilze nicht direkt von Mikroplastik betroffen sind.

Pflanzen beherbergen eine große Vielfalt von Mikroorganismen, die die Oberfläche der Wurzeln (Rhizosphäre) oder oberirdische Pflanzengewebe besiedeln. Pflanzen und die mit ihnen verbundenen Mikrobiome bilden komplexe und dynamische Wechselwirkungen. Pflanzen bieten dem Mikrobiom ökologische Nischen und leicht verwertbaren Kohlenstoff, der wiederum die Entwicklung, das Wachstum und die Vitalität der Pflanzen stark beeinflusst. Das Mikrobiom wirkt somit als Modulator für den Phänotyp der Pflanze. Es ist bekannt, dass das pflanzenassoziierte Mikrobiom, insbesondere das Rhizosphären- und Endophytenkompartiment, Krankheiten unterdrückt, die Dürresistenz verbessert, die oberirdische Herbivorie verändert oder sogar die Blütezeit modifiziert. Dies verdeutlicht das Ausmaß, in dem das pflanzliche Mikrobiom die Gesamtvitalität der Pflanze beeinflusst, die über die vom Pflanzengenom bereitgestellten Merkmale hinausgehen kann.

Pflanzen sind in der Lage, ihr Mikrobiom aus der Umwelt zu selektieren. Die Zusammensetzung des pflanzlichen Mikrobioms ist abhängig von der Bodenart, der Pflanzenart und sogar von der Sorte einer bestimmten Pflanzenart. Diese selektiven Auswirkungen der Pflanze auf ihr Mikrobiom, insbesondere in der Rhizosphäre, werden wahrscheinlich durch quantitative und qualitative Unterschiede bei der aktiven Freisetzung von Wurzelexsudaten beeinflusst – niedermolekulare Verbindungen, d.h. Zucker, Aminosäuren, organische Säuren, Phenole, sekundäre Metaboliten und hochmolekulare Verbindungen wie Proteine und Schleimstoffe, die entweder durch die Bereitstellung von Ressourcen oder durch komplexere hemmende und signalgebende Wechselwirkungen wirken. Pflanzen und Mikrobiome bilden somit einen Holobionten oder Metaorganismus. Das Pflanzenmikrobiom bietet einzigartige Eigenschaften/Funktionen wie Nährstoffmobilisierung, Nährstoff- und Wassertransport und erhöhte Toleranz gegenüber

Schlussbericht µPlastik Phase I – TP C (FZJ)

abiotischen und biotischen Stressoren, einschließlich Pflanzenpathogenen. Als zweites Genom der Pflanze hat das Mikrobiom das Potenzial, die Leistung der Pflanze über die genetischen Fähigkeiten der isolierten Wirtspflanze hinaus zu steigern (Berg et al. 2014).

Die oben genannten Effekte verdeutlichen, dass kleine Veränderungen im Phänotyp der Pflanze oder Verschiebungen im pflanzenassoziierten Mikrobiom erhebliche Auswirkungen auf das Pflanzenwachstum und den Ertrag haben können. Viele Einflussfaktoren auf das pflanzenassoziierte Mikrobiom wurden bereits ausführlich beschrieben, darunter die landwirtschaftliche Bewirtschaftung, standortspezifische Bedingungen (Klima und Bodentyp) und Schadstoffe. Allerdings wurden vor Beginn des Vorhabens die Auswirkungen von Mikroplastik auf die Dynamik in der Rhizosphäre und die Wechselwirkungen zwischen Pflanzen und Mikroben nur selten untersucht. Dies war eine der größten Kenntnislücken, da sich die Forschung anfänglich auf die Auswirkungen von Mikroplastik auf bestimmte Bodenbiota, meist Regenwürmer, und nicht auf Pflanzen konzentriert hat (Qi et al. 2018).

### **1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Dieses Vorhaben basierte auf der Zusammenarbeit zwischen drei wissenschaftlichen Partnern mit komplementären Spezialisierungen (Wurzeln/Mykorrhiza, Mikrobiom, Prozesse in der Rhizosphäre). Das Konsortium wurde von Prof. Dr. Matthias Rillig, Freie Universität Berlin (FUB) geleitet. Neben dem FZJ war noch die AG Prof. Dr. Michael Schloter, Helmholtz Zentrum München (HMGU) beteiligt.

## II. Eingehende Darstellung

### II.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

#### II.1.1 Einfluss von Mikroplastik auf die hydraulischen Eigenschaften des Bodens

Die hydraulischen Parameter und physikalischen Eigenschaften des Bodens sind entscheidende Faktoren, die das Wachstum und die Wasser- und Nährstoffaufnahme der Pflanzenwurzeln beeinflussen und somit einen erheblichen Einfluss auf die Funktionalität des Bodens haben. Die Akkumulation von Mikroplastik (MP) führt zu Veränderungen einer Vielzahl von Bodenparametern, einschließlich Veränderungen der Porenstruktur, der Lagerungsdichte, der Aggregatstruktur, -größe und -stabilität sowie der hydraulischen Eigenschaften. Diese Veränderungen haben höchstwahrscheinlich weitreichende Folgen, denn sie beeinträchtigen die strukturelle Integrität des Bodens und beeinflussen den Wasserkreislauf im Boden.

Für die Untersuchungen wurden drei Bodentypen verwendet: Luvisol (L) mit einer lehmigen Schlufftextur, Albic Luvisol (AL) mit einer lehmigen Sandtextur und Chernozem (CH) mit einer schluffig-tonigen Lehmttextur (Tabelle 1).

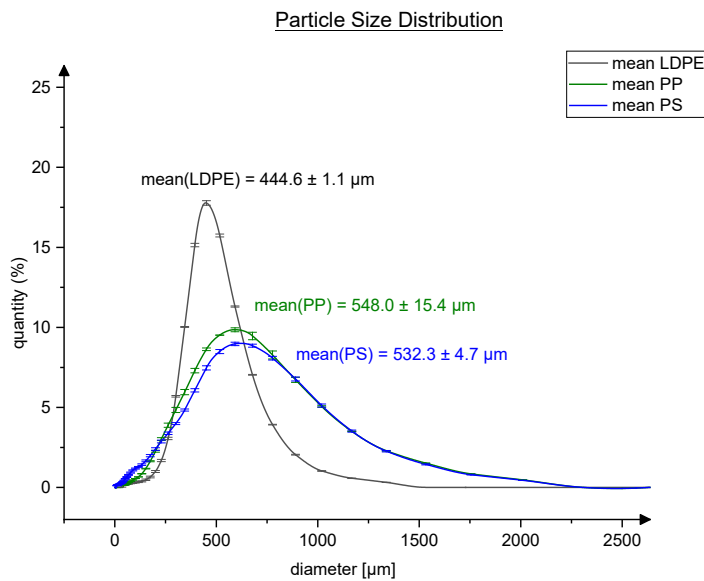
**Tabelle 1.** Charakteristische Bodeneigenschaften der verwendeten Bodentypen.

Bodentyp	Abk.	Textur	pH [CaCl <sub>2</sub> ]	C <sub>org</sub> [%]	N <sub>t</sub> [%]	C:N	ΣS [%]	ΣU [%]	ΣT [%]
Luvisol	L	IU	6,5	0,98	0,10	9,8	8	77	15
Albic Luvisol	AL	IS	5,3	0,75	0,04	22,5	83	14	3
Chernozem	CH	utL	7,5	2,06	0,18	11,3	11	68	21

CaCl<sub>2</sub> = Calciumchlorid, C<sub>org</sub> = organischer Kohlenstoff, N<sub>t</sub> = Gesamtstickstoff, C:N = Kohlenstoff:Stickstoff-Verhältnis, S = Sand, U = Schluff, T = Ton, L = Lehm.

Der Luvisol wurde einem Versuchsfeld auf dem Campus Klein-Altendorf der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Deutschland (50,613614°N, 7,000713°E), entnommen. Der Albic Luvisol wurde von einem Versuchsfeld des Albrecht Daniel Thaer-Instituts für Agrar- und Gartenbauwissenschaften der Humboldt-Universität zu Berlin in Thyrow, Deutschland (52.254674°N, 13.236030°E), entnommen. Der dritte Bodentyp, CH, wurde von der Forschungsstation des UFZ (Helmholtz-Zentrum für Umweltwissenschaften) in Bad Lauchstädt, Deutschland (51.393447°N, 11.875048°E), entnommen. Alle Bodenarten wurden aus 0-20 cm Tiefe entnommen, luftgetrocknet und auf 2 mm gesiebt. Die gravimetrische Wasserhaltekapazität (WHC) wurde für jeden Bodentyp bestimmt und betrug 56%-w für L, 58%-w für AL und 32%-w für CH.

Basierend auf Ergebnissen zur Mikroplastik-Belastung deutscher landwirtschaftlicher Böden aus der Literatur (Machado et al., 2019) wurden die folgenden Arten von MP als signifikant für Untersuchungszwecke angesehen: Polyethylen niedriger Dichte (LDPE), Polypropylen (PP), Polystyrol (PS) und Polyesterfasern (PES). Die PS- und PP-Kunststoffpartikel wurden in einem herkömmlichen Hochleistungs-Küchenmixer (BlendTec classic 575) zerkleinert und mit Analysensieben aus Edelstahl auf eine Partikelgröße von 100 - 1000 µm gesiebt. Alle Partikeltypen (LDPE, PP und PS) wurden mit einem Laserbeugungs-Partikelgrößenanalysator (HORIBA LA-950) durch Dispergieren des jeweiligen Partikeltyps in Ethanol gemessen.



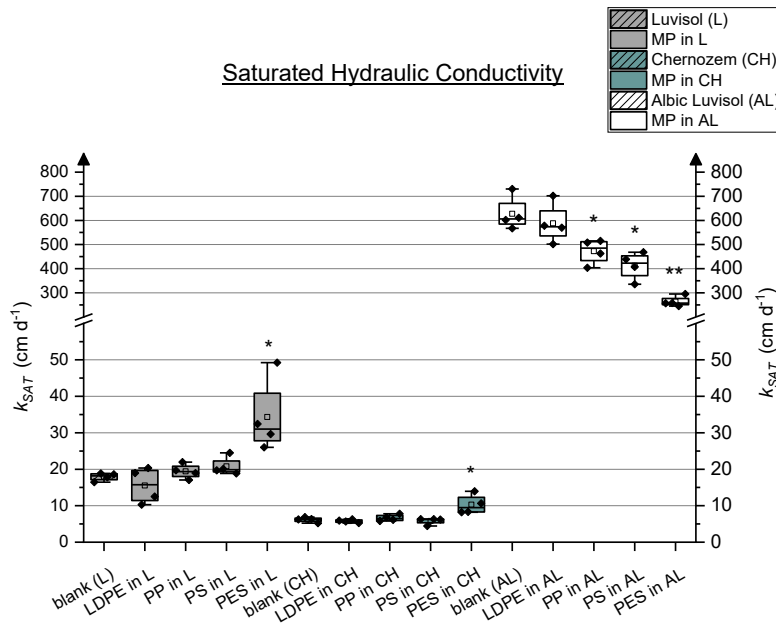
**Abbildung 2.**

*Partikelgrößenverteilung der verwendeten Partikel, LDPE = Polyethylen niedriger Dichte, PP = Polypropylen, PS = Polystyrol, gemessen mit einem Laserbeugungs-Partikelgrößenanalysator (HORIBA LA-950). Die Partikel wurden in Ethanol dispergiert, es wurde kein Ultraschall verwendet,  $n = 3$ .*

Die verwendeten PES-Fasern bestanden aus Polyethylenterephthalat (PET), dessen mittels Raman-Spektroskopie bestätigt wurde. Als Referenzmaterial für PET wurde ein Stück aus einer PET-Plastikflasche herausgeschnitten und dessen Spektrum mit dem Spektrum der Fasern verglichen.

Die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit ( $K_S$ ) wurde für die Bodentypen L, AL und CH mit und ohne die vier im Versuch untersuchten MP-Typen bestimmt. Hierzu wurden Edelstahlzylinder von  $250 \text{ cm}^3$  am unteren Ende mit einem wasserdurchlässigen Tuch verschlossen, auf ein Gestell gestellt und mit Erde mit unterschiedlichen Schüttdichten für jede Bodenart, je nach Feldbedingungen, gefüllt: L =  $1,2 \text{ g trockener Boden cm}^{-3}$ , AL =  $1,6 \text{ g cm}^{-3}$  und CH =  $1,4 \text{ g cm}^{-3}$ . Für die Behandlungen mit MP wurde der Boden vor dem Einfüllen mit dem entsprechenden MP-Pulver oder -Fasern in einer Konzentration von 0,4 %-w vermischt (+Boden). Der leere Boden ohne Zusatz von MP (0Boden) wurde auf die gleiche Weise behandelt. Jede Behandlung (0Boden, +Boden mit LDPE, PP, PS oder PES) wurde in vierfacher Ausführung untersucht. Die gefüllten Zylinder wurden in Kunststoffbehälter gestellt, die dann bis zum oberen Rand der Zylinder mit Wasser gefüllt wurden. Die Zylinder wurden 7 Tage lang im Wasser belassen, um eine vollständige Sättigung des Bodens sicherzustellen. Die  $K_S$  wurde mit dem KSAT (Meter Group AG, München, Deutschland) gemessen. Die Werte werden in cm pro Tag angegeben.

Sowohl im L-Boden als auch im CH-Boden führte nur die Zugabe von PES-Fasern zu einem signifikanten Anstieg von  $K_S$  im Vergleich zum 0Boden (Abb. 3). Folglich durchdrang das Wasser den mit PES-Fasern vermischten L- und CH-Boden fast doppelt so schnell wie den jeweiligen Boden ohne PES-Fasern. Im Gegensatz dazu führte die Zugabe von PES-Fasern im AL-Boden zu einer deutlichen Verringerung der  $K_S$ . Darüber hinaus zeigte die Zugabe von PP und PS eine Verringerung der Wasserinfiltration in die gesättigte Bodenporenmatrix. Der Wasserfluss war im AL-Boden im Vergleich zum L-Boden aufgrund des hohen Sandanteils und der damit verbundenen größeren Porenräume ca. 30-mal schneller.



**Abbildung 3.** Boxplot-Diagramm der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit ( $K_S$ ) in  $\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$  für die drei verschiedenen Böden Luvisol (L), Chernozem (CH) und Albic Luvisol (AL) ohne Zusatz von MP („blank“) sowie mit Zusatz von 0,4%-w der vier Mikroplastikarten LDPE, PP, PS und PES. Sternchen (\*) markieren signifikante Unterschiede in  $K_S$  zwischen MP + Boden und Leerwert ( $p < 0,05$ ). Doppelsterne (\*\*) markieren  $p$ -Werte  $\leq 0,001$ .

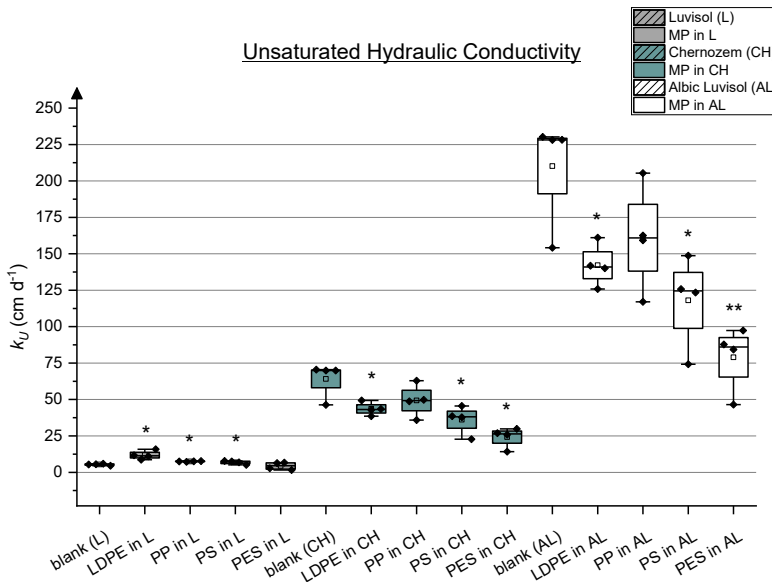
Die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit ( $K_U$ ) wurde mit einem Mini-Disk-Infiltrometer (MDI, Meter Group AG, München, Deutschland) mit einem Scheibenradius von 4,5 cm bestimmt, um die Werte von trockenem +Boden und 0Boden für alle oben beschriebenen Bodentypen zu bestimmen. Der kleine Wassertank des MDI, das Mariotte-Kompartiment, das die Saughöhe steuert, wurde mit Wasser gefüllt und eine Saugspannung von -2 cm eingestellt. Das große Wasserreservoir mit einem maximalen Volumen von 95 mL wurde mit 90 mL blau gefärbtem Leitungswasser (Farbstoff: Brillantblau, FCF, E133) gefüllt. Um eine Messung zu starten, wurde das vorbereitete MDI auf eine mit Erde gefüllte Säule gesetzt, und eine Kamera wurde eingeschaltet, um alle 10 s Fotos vom Wasserreservoir zu machen. Die verwendeten Säulen hatten einen Durchmesser von 10 cm und waren bis zu 8 cm mit trockener Erde mit einer Schüttdichte von 1,2, 1,6 und 1,4  $\text{g cm}^{-3}$  für die Böden L, AL und CH gefüllt. Bei den Behandlungen mit +Boden wurden MP-Partikel oder MP-Fasern in einer Massenkonzentration von 0,4 %-w vor dem Befüllen zugegeben und mit dem Boden vermischt. Jede Behandlung (0Boden, +Boden mit LDPE, PP, PS oder PES) wurde in vierfacher Ausführung untersucht, wobei jede Säule nach einer Trocknungszeit von 7 Tagen bei 60°C dreimal gemessen wurde.

Die Zugabe von MP zu L führte zu einer erhöhten  $K_U$ , während sie im Boden AL und CH eine deutliche Verringerung der  $K_U$  bewirkte (Abb. 4). Bemerkenswert ist, dass im Boden L alle Partikeltypen (LDPE, PP und PS) ausgeprägte Veränderungen bewirkten, während in den Böden AL und CH vor allem die Fasern den stärksten Rückgang der  $K_U$ -Werte zeigten, allerdings bewirkten auch die Partikeltypen LDPE und PS eine deutliche Verringerung der  $K_U$  von AL und CH.

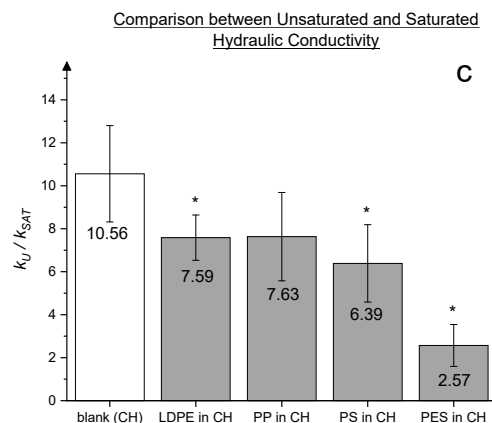
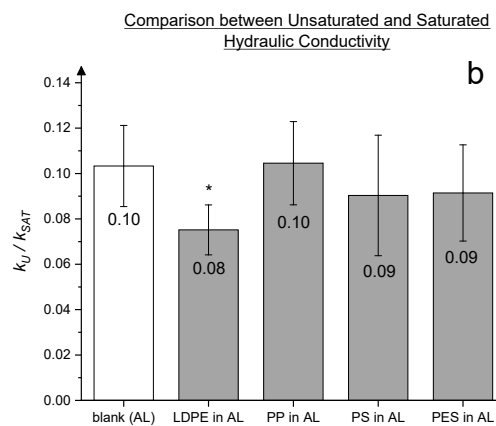
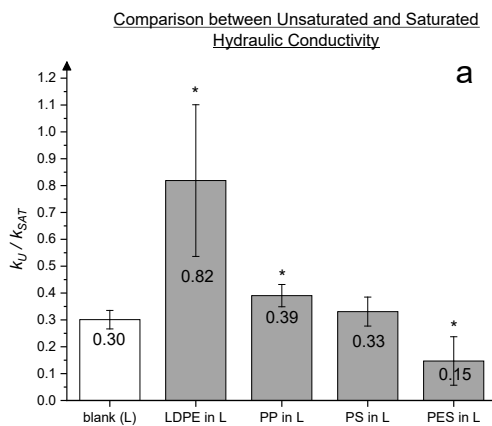
Um zu analysieren, inwieweit die einzelnen MP-Typen in den unterschiedlichen Böden den Wasserfluss in der gesättigten und ungesättigten Bodenmatrix beeinflussen, wurden die beiden Werte für jede Behandlungsvariante ins Verhältnis zueinander gesetzt ( $K_U/K_S$ ). Innerhalb des L-Bodens zeigte sich, dass der Wasserfluss in der gesättigten Bodenmatrix des 0Bodens dreimal schneller war als in der ungesättigten Bodenmatrix. Durch die Zugabe von LDPE in den L-Boden wurde beobachtet, dass sich  $K_U$  und  $K_S$  zunehmend einem Verhältnis von 1:1 annäherten. Dies lässt sich auf einen deutlichen Anstieg von  $K_S$  zurückführen. Bei Anwesenheit von PES-Fasern im L-

Schlussbericht  $\mu$ Plastik Phase I – TP C (FZJ)

Boden wurde ein entgegengesetzter Trend festgestellt, bei dem beide Werte auseinandergingen. In diesem Fall war der Wasserfluss in der gesättigten Zone sechsmal höher als im ungesättigten Boden. Im AL-Boden wurde ein deutlich größerer Unterschied zwischen den beiden Werten festgestellt, wobei der Wasserfluss in der ungesättigten Zone im Durchschnitt etwa ein Zehntel der Geschwindigkeit in der gesättigten Bodenmatrix betrug. Die Zugabe von LDPE-Teilchen in den Boden zeigte jedoch, dass dieses Verhältnis sogar noch deutlich geringer war.



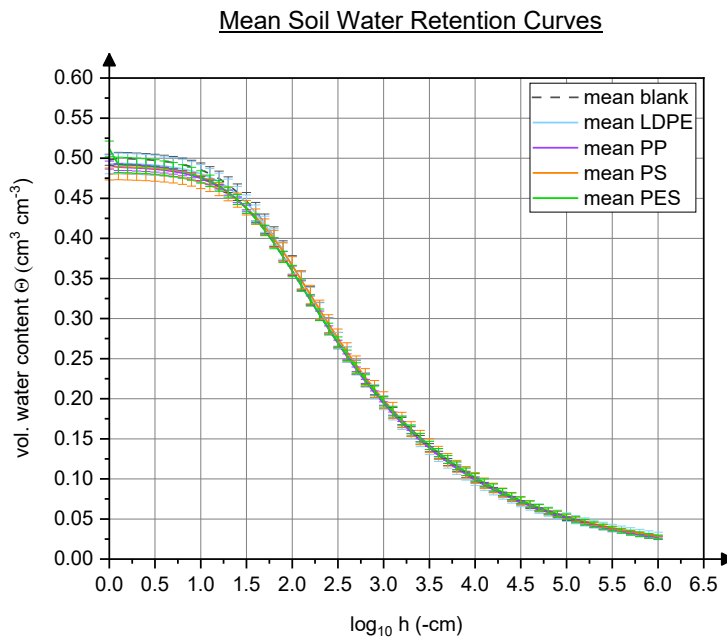
**Abbildung 4.** Boxplot-Diagramm der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit ( $K_U$ ) in  $\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$  für die drei verschiedenen Böden Luvisol (L), Chernozem (CH) und Albic Luvisol (AL) ohne Zusatz von MP („blank“) sowie mit Zusatz von 0,4%-w der vier Mikroplastikarten LDPE, PP, PS und PES. Sternchen (\*) markieren signifikante Unterschiede in  $K_S$  zwischen MP + Boden und „blank“ ( $p < 0,05$ ). Ein Doppelstern (\*\*) markiert einen  $p$ -Wert  $\leq 0,001$ .



**Abbildung 5.** Vergleich zwischen ungesättigter ( $K_U$ ) und gesättigter ( $K_S$ ) hydraulischer Leitfähigkeit, gemessen in (a) Luvisol (L), (b) Albic Luvisol (AL) und (c) Chernozem (CH) Boden. Mikroplastik (MP) wurde dem Boden in einer Menge von 0,4 %-w zugesetzt, LDPE = Polyethylen niedriger Dichte, PP = Polypropylen, PS = Polystyrol, PES = Polyesterfasern aus Polyethylenterephthalat. Ein signifikanter Unterschied zum „blank“ (ohne MP-Zusatz) ist mit einem Sternchen (\*) gekennzeichnet ( $p < 0,05$ ).

Schlussbericht  $\mu$ Plastik Phase I – TP C (FZJ)

Die Wasserretentionskurven des Bodens (SWRC) wurden mithilfe eines Hochkapazitäts-Tensors (HCT) und einer digitalen Laborwaage aufgezeichnet, indem die Masse und die während der Trocknung einer Bodenprobe erzeugte Saugspannung kontinuierlich überwacht wurden. Die für die  $K_{SAT}$ -Messungen vorbereiteten wassergesättigten Proben wurden für diese Art von Experiment verwendet. Die gemessene SWRC wurde mit einem geeigneten Modell parametrisiert. Für höhere Druckstufen (-10.000 hPa bis -40 MPa) wurde das WP4-Gerät (Decagon Devices, USA) eingesetzt.



**Abbildung 6.**

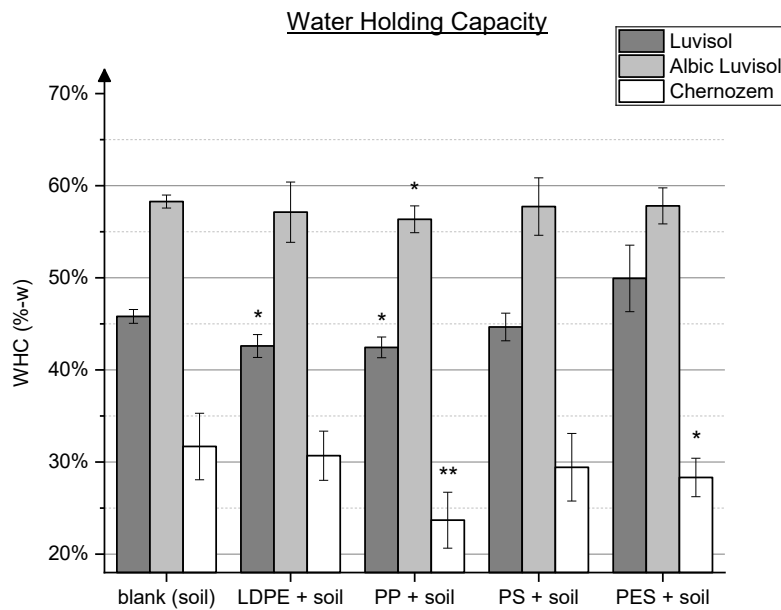
Wasserretentionskurven (SWRC) für Luvisol-Boden mit lehmiger Schlufftextur ohne (blank) und mit Zusatz von 0,4 %-w Mikroplastik (MP). Die gestrichelte Linie zeigt die Werte für den 0Boden („blank“), während die farbigen, durchgezogenen Kurven das Wasserrückhaltevermögen des mit verschiedenen MP-Typen gemischten Bodens zeigen: LDPE = Polyethylen niedriger Dichte (hellblau), PP = Polypropylen (violett), PS = Polystyrol (orange), PES = Polyesterfasern, die aus Polyethylenterephthalat bestehen (grün).

Abb. 6 zeigt den resultierenden volumetrischen Wassergehalt in jeder Behandlung als Funktion der Saugspannung. Der volumetrische Wassergehalt wurde nur am permanenten Welkepunkt (pF 4,5) durch den Einfluss der PES-Fasern im Boden signifikant vergrößert. Der Wassergehalt bei Feldkapazität (pF 1,8) wurde durch die Zugabe von MP in den Boden nicht signifikant verändert, ebenso wie der pflanzenverfügbare Wassergehalt im Boden, der der Differenz zwischen den volumetrischen Wassergehalten bei Feldkapazität und am permanenten Welkepunkt entspricht.

Die Wasserhaltekapazität (WHC) wurde für jeden Bodentyp mit und ohne Zusatz von MP bestimmt. Hierzu wurde der jeweilige Boden schrittweise vollständig mit deionisiertem Wasser gesättigt und in einem verschlossenen Behälter 7 Tage lang stehen gelassen. Danach wurde die WHC gravimetrisch bestimmt, indem eine entsprechende Menge Boden vor und nach dem Trocknen bei 105 °C für 24 h gewogen wurde.

Bei allen untersuchten Bodentypen, L, AL und CH, bewirkten die PP-Partikel eine signifikante Verringerung der WHC im Vergleich zum 0Boden. Im L-Boden bewirkten LDPE-Partikel ebenfalls eine signifikante Verringerung der WHC, während dies im CH-Boden durch die Zugabe von PES-Fasern hervorgerufen wurde (Abb. 7).

Schlussbericht µPlastik Phase I – TP C (FZJ)

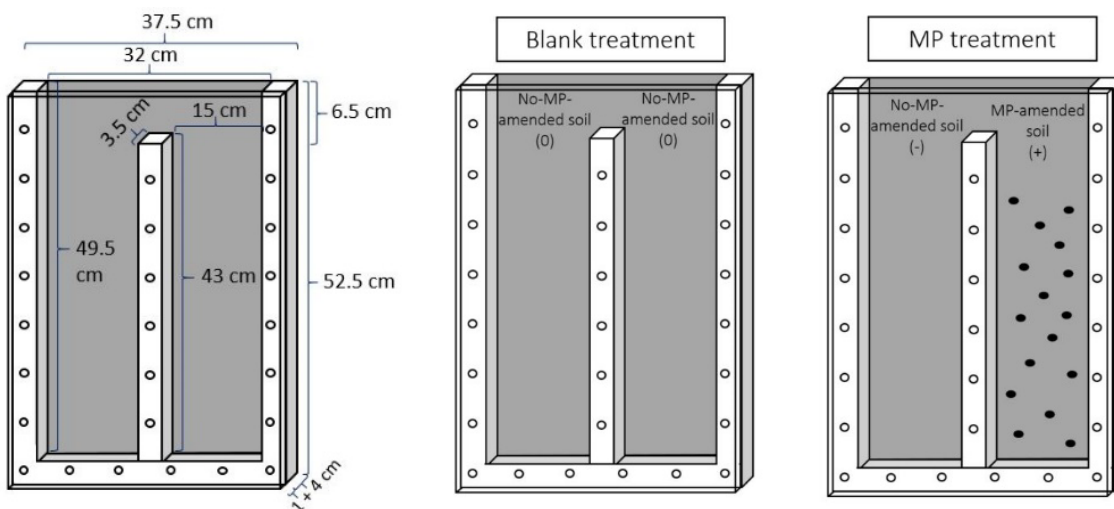


**Abbildung 7.** Wasserhaltevermögen (WHC, in %-w) von Luvisol (dunkelgraue Balken), Albic Luvisol (hellgraue Balken) und Chernozem (weiße Balken) ohne („blank“) und mit Zusatz von verschiedenen Mikroplastikarten: LDPE = Polyethylen niedriger Dichte, PP = Polypropylen, PS = Polystyrol, PES = Polyesterfasern aus Polyethylenterephthalat. Sternchen (\*) markieren signifikante Unterschiede zwischen MP + Boden und „blank“ ( $p < 0,05$ ). Ein Doppelstern (\*\*) markiert einen  $p$ -Wert  $\leq 0,001$ .

II.1.2 Einfluss von Mikroplastik auf Wurzelwachstum, pH-Wert, Wasser- und Nährstoffaufnahme

Split-Root-Rhizotron-(SRR)-Experiment

Um den Effekt von Mikroplastik auf den Wurzelphänotyp und die Wurzelperformance hinsichtlich der Nährstoffaufnahme genauer zu bestimmen, ließen wir Winterweizen in vertikal geteilten Split-Rhizotrone (SRR) wachsen (Abb. 8). Wir stellten die Hypothese auf, dass Wurzeln Präferenzen zeigen, wenn sie zwischen mikroplastikfreiem (-) und mikroplastikbelastetem Boden (+) wählen müssen, und zwar, dass Mikroplastik das Wurzelwachstum negativ beeinflusst, indem es die Wasser- und Nährstoffaufnahme stört. Im Gegensatz dazu stellten wir die Hypothese auf, dass Wurzeln in mit Mikroplastikfasern angereichertem Boden eine größere Wurzellänge aufweisen, da die Fasern die Bodendichte verringern, was sich positiv auf das Wurzelwachstum auswirken würde.



**Abbildung 8.** Schematische Darstellung eines SRR mit seinen Abmessungen (links), ohne (Mitte) und mit

*Mikroplastik (MP) (rechts).*

Wir führten einen 28-tägigen Versuch mit vertikal zweigeteilten SRR (siehe Abb. 1) mit Winterweizen (Sorte *Nordkap*) durch, der auf Boden aus Klein Altendorf (Parabraunerde auf Löss, Versuchsstation der Universität Bonn) wuchs, um mögliche Wurzelpräferenzen bezüglich mikroplastikverunreinigtem oder -freiem Boden zu untersuchen. Zu diesem Zweck wurde das linke Wurzelwachstums-kompartiment mit Erde ohne Mikroplastik, bezeichnet als (-), Trockendichte ca.  $1,2 \text{ g cm}^{-3}$ ) und die rechte Seite mit mikroplastikangereicherter Erde, bezeichnet als (+) (Mikroplastik im Boden: 0,4 % w/v), gefüllt. Die obersten 6,5 cm, die nicht geteilt wurden, wurden vollständig mit mikroplastikfreiem Boden gefüllt (Abb. 9). Das verwendete Mikroplastik war: Polyethylen (LDPE-Pulver  $<300 \mu\text{m}$ ), Polypropylen (PP,  $100\text{-}1000 \mu\text{m}$ ), Polystyrol (PS,  $100\text{-}1000 \mu\text{m}$ ) und Polyesterfasern (PES). Jede der vier Mikroplastikarten sowie eine Kontrolle ohne Mikroplastik (bezeichnet als (0)) wurden in vierfacher Ausfertigung untersucht.



**Abbildung 9.** Linkes Bild: Erste Bewässerung des SRR. Die linke Seite des SRR ist mit Kontrollboden gefüllt, die rechte Seite mit (+) LDPE-Boden. Bild Mitte: Wurzelsystem nach 28 Tagen Wachstumsphase. Rechtes Bild: Beispiel einer Bodenprobe von einer Seite des SRR. Der Rhizosphärenboden wurde so nah wie möglich an den sichtbaren Primärwurzeln entnommen.

Nach 28 Tagen Wachstumszeit wurde jede Seite der SRR separat beprobt, in drei Bodentiefen aufgeteilt: 0-15 cm, 15-30 cm und 30-45 cm, und bei  $-20^\circ\text{C}$  gelagert. Die enthaltenen Wurzeln wurden mit deionisiertem Wasser über ein 2-mm-Sieb gewaschen und in 50%-v EtOH gelagert, bis die Wurzeln mit WinRhizo gescannt und gemessen wurden. Neben der Gesamtwurzellänge bestimmten wir auch den gravimetrischen Wassergehalt, den Gehalt an Bodennährstoffen ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ , P und K) und die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit ( $K_s$ ).

Die sichtbaren Wurzelstrukturen auf jeder Seite der SRR wurden in regelmäßigen Abständen manuell nachgezeichnet. In Abb. 10 sind die Verläufe der Primärwurzeln (gelb) und der Seitenwurzeln erster Ordnung (grün) für jedes Replikat jeder Behandlung und für beide Seiten der SRR dargestellt.

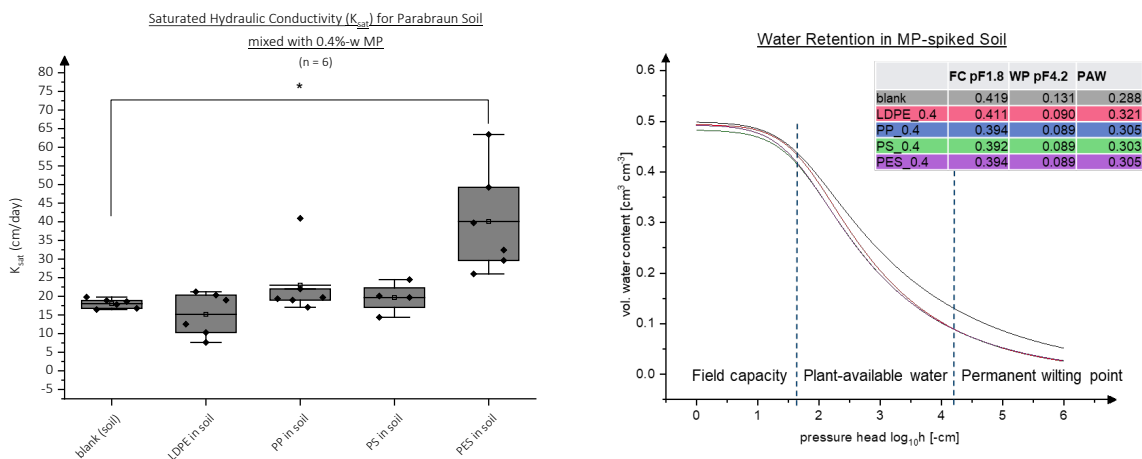
Schlussbericht  $\mu$ Plastik Phase I – TP C (FZJ)



**Abbildung 10.**  
Wurzelverläufe  
aller SRRs,  
ausgewertet mit  
der Software  
SmartRoot anhand  
von manuellen  
Wurzelskizzen  
(Primärwurzeln in  
gelb und  
Seitenwurzeln 1.  
Ordnung in grün).

Schlussbericht  $\mu$ Plastik Phase I – TP C (FZJ)

Pflanzen, die in (+)LDPE-Böden wuchsen, zeigten nicht nur deutlich reduzierte Primär- und Seitenwurzeln, sondern auch eine allgemein verringerte Aufnahme von  $\text{NH}_4^+$  und K. Das Wurzelsystem war auch in (+)PP-Böden deutlich weniger ausgeprägt.  $K_s$  war in (+)PES-Böden signifikant höher (Abb. 11, links), was eine Erklärung für das gut ausgeprägte Wurzelsystem in (+)PES-Böden sein könnte, da das Wasser leichter in den Boden eindringen konnte. Der Wassergehalt auf der (+)PES-Seite unterschied sich stark vom Kontrollwert (0), während die (-)PES-Seite ebenfalls einen deutlich reduzierten Wassergehalt aufwies, allerdings nicht im gleichen Ausmaß. Auch der Wassergehalt der (+)PP-Behandlung war signifikant niedriger als der Kontrollwert. Die Wasserhaltekapazität des Bodens wurde durch die Zugabe von 0,4%-w Mikroplastik zum Boden signifikant verändert (Abb. 11, rechts), insbesondere bei negativeren Wasserpotenzialwerten (d.h. höherer Saugspannung). Gäbe es keine anderen Wasserverluste, wie Drainage und Verdunstung, würde dies zu einer größeren Menge an pflanzenverfügbarem Wasser im mit Mikroplastik versetzten Boden führen. Gleichzeitig kann diese Verringerung der Wasserspeicherkapazität des Bodens jedoch auch zu einer schnelleren Drainage und höheren Verdunstungsraten führen, wodurch diese Prozesse mit der Wasseraufnahme der Wurzeln um das verfügbare Wasser konkurrieren.



**Abbildung 11.** Links: Boxplot-Diagramm der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit ( $K_s$ ) in  $\text{cm Tag}^{-1}$  für vier verschiedene Mikroplastik-Typen, die mit dem Boden mit einem Massenanteil von 0,4 % gemischt wurden, und für reinen Boden (Kontrolle) (\* = signifikanter Unterschied von  $K_s$  für PES-Böden im Vergleich zum MP-freien Boden,  $p < 0,01$ ). Rechts: Wasserretentionskurven für den im SRR-Experiment verwendeten Boden ohne und vermischt mit einer der vier Mikroplastikarten LDPE, PP, PS und PES.

Die PP-Behandlung hatte einen signifikant niedrigeren pH-Wert in der Rhizosphäre als im wurzelfreien Boden ( $p = 0,02$ ), und auch zwischen der (+)PP- und (-)PP-Seite ( $p = 0,04$ ). Über alle Wiederholungen dieser Behandlung hinweg waren die pH-Werte der Rhizosphäre in den (-)MP-Varianten im Durchschnitt saurer als die der Rhizosphäre der (+)MP-Varianten. Pflanzen, die in (+)PES-Böden wuchsen, zeigten eine verringerte Aufnahme von  $\text{NO}_3^-$  und K, aber die verringerte K-Aufnahme wurde durch eine überdurchschnittliche Aufnahme von K auf der (-)PES-Seite kompensiert. Darüber hinaus war die K-Aufnahme auch in (+)PP-Böden deutlich reduziert.

### Experiment in ungeteilten Rhizotronen (RHZ)

Mit dem Versuch in ungeteilten Rhizotronen (RHZ) mit ähnlichen Dimensionen wie im SRR-Experiment sollten die Ergebnisse des vorangegangenen SRR-Experiments zu Unterschieden im Wurzelwachstum und in der Nährstoffaufnahme der Wurzeln in mit MP versetztem Boden (+Boden) überprüft werden. Dabei sollte die Hypothese überprüft werden, dass das Wurzelwachstum im +Boden mit MP-Partikeln reduziert ist, da MP-Partikel im Boden die Wasser- und Nährstoffaufnahme der Wurzeln beeinträchtigen. Im Gegensatz dazu nahmen wir an, dass Wurzeln in mit MP-Fasern vermishtem Boden ein verstärktes Wurzelwachstum aufweisen, da die Fasern die Bodenstruktur in positiver Weise für die Wurzeln verändern.

In diesem Versuch wurden RHZs (inneres Volumen:  $45\text{ cm} \cdot 30\text{ cm} \cdot 3,5\text{ cm} = 5040\text{ cm}^3$ ) mit durchsichtigen Plexiglasrückwänden verwendet, in denen Winterweizen (Sorte: Nordkap) in Parabraunerde (Standort: Klein Altendorf, Textur: sandiger Lehm, s. Abschnitt II.1.1) angezogen, die mit je einem der gleichen vier MP-Typen aus dem SRR-Experiment (LDPE, PP, PS, PES) vermisht war. Für die MP-Behandlungen wurde der Boden zuvor mit 0,4 %-w MP vermisht. Der Boden wurde auf die Feldlagerungsdichte von  $1,2\text{ g cm}^{-3}$  verdichtet. Jede der vier MP-Behandlungen (bezeichnet als +Boden) sowie eine Blindbehandlung ohne MP-Zusatz (bezeichnet als 0Boden) wurden in fünf Wiederholungen untersucht, was insgesamt 25 RHZ ergab.

Winterweizensamen (*Triticum aestivum*, Sorte Nordkap) wurden im Dunkeln bei  $10^\circ\text{C}$  auf einem feuchten Papiertuch 24 h lang vorgekeimt. Ein vorgekeimter Samen pro RHZ wurde 2 cm tief genau in der Mitte in den Boden gesteckt, nachdem die mit Erde gefüllten RHZs bewässert und eine Woche lang in der Klimakammer unter kontrollierten Bedingungen bebrütet worden waren. Während der Wachstumsperiode von 28 Tagen waren alle RHZs abgedeckt und um  $45^\circ$  geneigt, damit die Wurzeln dicht an der transparenten Rückwand entlang wachsen konnten. Die Pflanzen wurden in einer Klimakammer mit kontrollierten Umweltbedingungen gezogen. Diese Bedingungen waren auf eine Temperatur von  $22^\circ\text{C}$  während der 16-stündigen Lichtperiode und  $10^\circ\text{C}$  während der 8-stündigen Dunkelperiode eingestellt. Die Luftfeuchtigkeit wurde auf 60 % eingestellt.

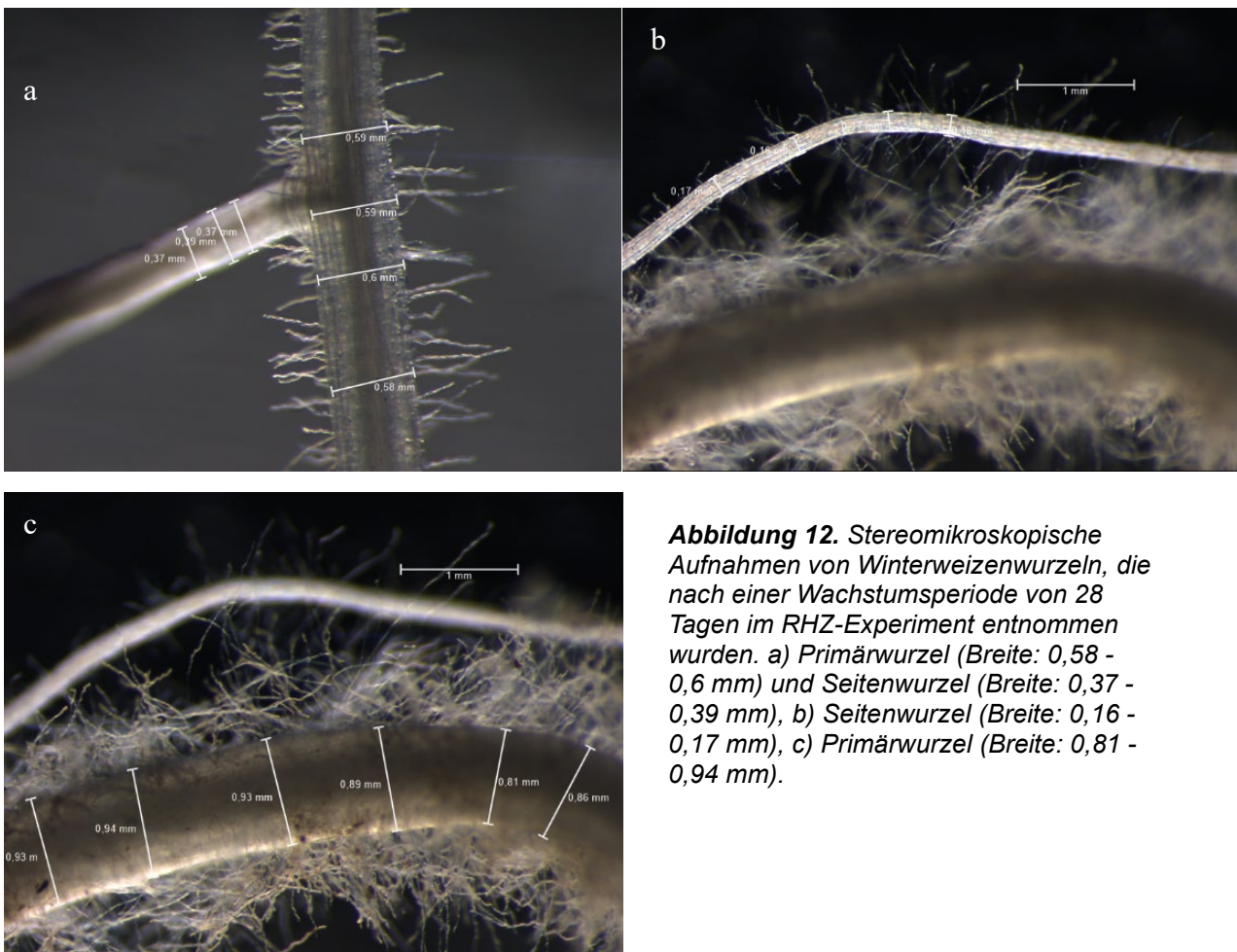
Damit die Pflanzen unter gut bewässerten Bedingungen wachsen konnten, wurde der Wassergehalt des Bodens bei 45%-w der Wasserhaltekapazität (WHC) des Bodentyps gehalten, was einem gravimetrischen Gesamtwassergehalt des Bodens von 25,2%-w entsprach. Die Pflanzen wurden an zwei Tagen pro Woche mit Wasser von oben bewässert, und der Wasserverlust im Boden wurde gravimetrisch bestimmt. Das Gewicht der wachsenden Wurzeln und Triebe wurde dabei vernachlässigt.

Unmittelbar bevor die Wurzeln geerntet wurden, wurden Bodenproben genommen. Dabei wurde zwischen dem Boden in der Nähe der Wurzeln (Rhizosphären-Boden) und dem Boden ohne Wurzeln (wurzelfreier Boden) unterschieden. Die Proben wurden mit Edelstahlzylindern (L: 100 mm, B: 10 mm) entnommen, um sicherzustellen, dass die gesamte Tiefe des RHZ durchdrungen wird. Der Wassergehalt jeder Probe wurde gravimetrisch durch Wiegen einer ausreichenden Menge einer frisch entnommenen Bodenprobe (10-15 g) vor und nach einer 5-tägigen Trocknung bei  $105^\circ\text{C}$  bestimmt. Die pH-Werte wurden mit einem pH-Meter in den  $\text{CaCl}_2$ -Extrakten gemessen. Vor den Messungen wurde eine Zweipunktkalibrierung des pH-Meters durchgeführt.

Schlussbericht  $\mu$ Plastik Phase I – TP C (FZJ)

Für die Bodenextraktion wurden ca. 5 g der gefrorenen Bodenprobe in 50-mL-Zentrifugenröhrchen eingewogen. Für jede Probe wurden zwei Extraktionen durchgeführt: Calciumchlorid ( $\text{CaCl}_2$ , 0,01 M) für die Analyse des mineralischen Nitratgehalts ( $N_{\text{min}}$ ) und Calciumacetat-Calciumlactat (CAL) für die Analyse von Kalium (K) und Phosphat (P). Für jede Extraktionsmethode wurden die mit Erde gefüllten Zentrifugenröhrchen mit 40 mL des jeweiligen Extraktionsmediums gemischt und 1 Stunde lang horizontal geschüttelt. Nach 15-minütigem Zentrifugieren wurden 20 mL des Überstands mit einer Spritze entnommen. Die ersten 5 mL wurden durch einen 0,45- $\mu\text{m}$ -Filter verworfen, und die restlichen 15 mL wurden durch den Filter in PTFE-Fläschchen zur weiteren Analyse gegossen. Die Proben wurden bis zur Analyse bei  $-20^\circ\text{C}$  gelagert. Die resultierende Konzentration des Bodens im Extraktionsmedium betrug  $0,1 \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1}$ .

Für die Wurzelprobenahme wurden die RHZ in drei Bodentiefen unterteilt: 0-15 cm, 15-30 cm und 30-45 cm, mit einem Volumen von jeweils ca.  $1680 \text{ cm}^3$ , die aus dem RHZ entnommen und in Plastikbeuteln bei  $-20^\circ\text{C}$  gelagert wurden. Die enthaltenen Wurzeln wurden mit deionisiertem Wasser über ein 2-mm-Sieb ausgewaschen und in 50%-v EtOH gelagert, bis die Wurzeln mit der Software WinRhizo gescannt und vermessen wurden. Dazu wurden die gesammelten Wurzeln einzeln auf den Scanner gelegt, wobei darauf geachtet wurde, dass sich die Wurzeln nicht zu sehr überlappten. Die Scans wurden mit einer Auflösung von 600 dpi durchgeführt. Eine Batch-Analyse aller Proben wurde mit den folgenden Parametern durchgeführt: 1. Erkennung von Wurzeln und Hintergrund: 220; 2. Grobe Ränder: Fläche kleiner als  $0,0025 \text{ cm}^2$ ; Grobe Kanten und Rauschunterdrückung: niedrig.

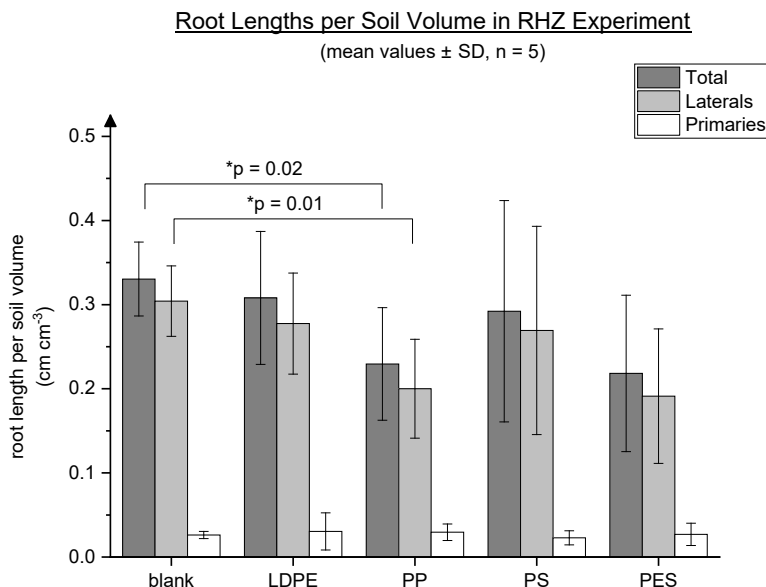


**Abbildung 12.** Stereomikroskopische Aufnahmen von Winterweizenwurzeln, die nach einer Wachstumsperiode von 28 Tagen im RHZ-Experiment entnommen wurden. a) Primärwurzel (Breite: 0,58 - 0,6 mm) und Seitenwurzel (Breite: 0,37 - 0,39 mm), b) Seitenwurzel (Breite: 0,16 - 0,17 mm), c) Primärwurzel (Breite: 0,81 - 0,94 mm).

Schlussbericht  $\mu$ Plastik Phase I – TP C (FZJ)

Anhand von Stereomikroskopiebildern der entnommenen Wurzeln wurde ein Durchmesserbereich für Seitenwurzeln von 0-0,4 mm und für Primärwurzeln von 0,4-1 mm gefunden (Abb. 12). Die Häufigkeit von Durchmesserklassen über 1 mm war vernachlässigbar.

Wurzeln in mit PP versetztem Boden wiesen ein signifikant ( $p = 0,02$ ) geringeres Wurzelwachstum auf als der 0Boden („blank“), was hauptsächlich auf die geringere Länge der Seitenwurzeln zurückzuführen war ( $p = 0,01$ , Abb. 13).



**Abbildung 13.** Mittlere Wurzellängen ( $\pm$  SD,  $n = 5$ ) pro Bodenvolumen ( $\text{cm} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) in den verschiedenen Behandlungsvarianten im RHZ-Versuch. Unterscheidung zwischen Seitenwurzeln („Laterals“; Breite: 0-0,4 mm) und Primärwurzeln („Primaries“; Breite: 0,4-1 mm), die zusammen die Gesamtwurzellänge („Total“) ausmachen.

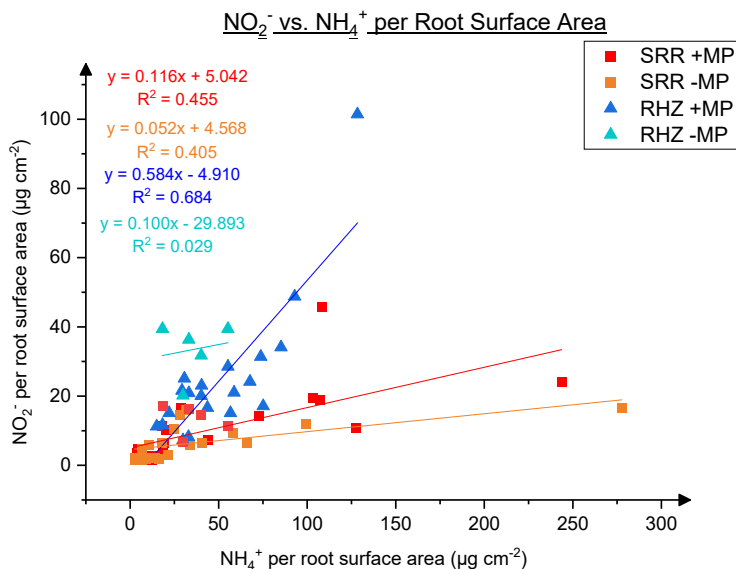
Die folgenden Bodennährstoffe wurden analysiert, um zu untersuchen, ob sich der Gehalt in den +MP-Boden-Behandlungen signifikant von der 0Boden-Behandlung unterscheidet: Nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ), Nitrit ( $\text{NO}_2^-$ ), Ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ), Phosphor (P) und Kalium (K). Um die Beziehungen zwischen den Nährstoffen im Boden und den darin enthaltenen Wurzeln besser zu verstehen und eventuelle Rückschlüsse auf die Aufnahme dieser Nährstoffe durch die Wurzeln ziehen zu können, wurde der jeweilige Nährstoffgehalt im Boden auf die Wurzeloberfläche (RSA) in dem jeweiligen Bodenkompartment berechnet. Mit dieser Methode konnten die Ergebnisse und signifikanten Unterschiede im Nährstoffgehalt bezogen auf die zugehörige RSA zwischen +MP-Behandlung und 0Boden mit denen des SRR-Versuchs verglichen werden.

Der Rhizosphärenboden der PP-Variante im RHZ-Experiment zeigten signifikant erhöhte Mittelwerte des  $\text{NO}_2^-$  ( $p = 0,008$ ) und K-Gehalts ( $p = 0,003$ ) bezogen auf RSA im Vergleich zum 0Boden. Der  $\text{NH}_4^+$ -Gehalt pro RSA war im Durchschnitt ebenfalls erhöht und lag nur knapp außerhalb des Signifikanzniveaus ( $p = 0,059$ ). Im SRR-Versuch zeigte die PP-Behandlung nur beim mittleren K-Gehalt pro RSA einen erhöhten Wert mit einer geringen Signifikanz von  $p = 0,077$ . Darüber hinaus zeigte im SRR-Versuch die PS-Behandlung einen signifikant erhöhten mittleren  $\text{NO}_2^-$ -Gehalt ( $p = 0,023$ ), die LDPE-Behandlung einen signifikant erhöhten mittleren  $\text{NH}_4^+$ -Gehalt ( $p = 0,036$ ) und die PES-Behandlung einen signifikant erhöhten K-Gehalt ( $p = 0,013$ ) in Abhängigkeit vom RSA. Bei letzterem war eine marginale Signifikanz des mittleren erhöhten K-Gehalts bei der PES-Behandlung auch innerhalb des RHZ-Versuchs messbar ( $p = 0,070$ ).

Um die Gründe dafür zu ermitteln, warum  $\text{NO}_2^-$  in zwei verschiedenen Behandlungen in beiden Rhizotronversuchen entweder weniger effizient von den Pflanzen aufgenommen oder verstärkt mikrobiell gebildet wurde, was sich in deutlich erhöhten  $\text{NO}_2^-$ -Gehalten pro RSA zeigte, wurde der

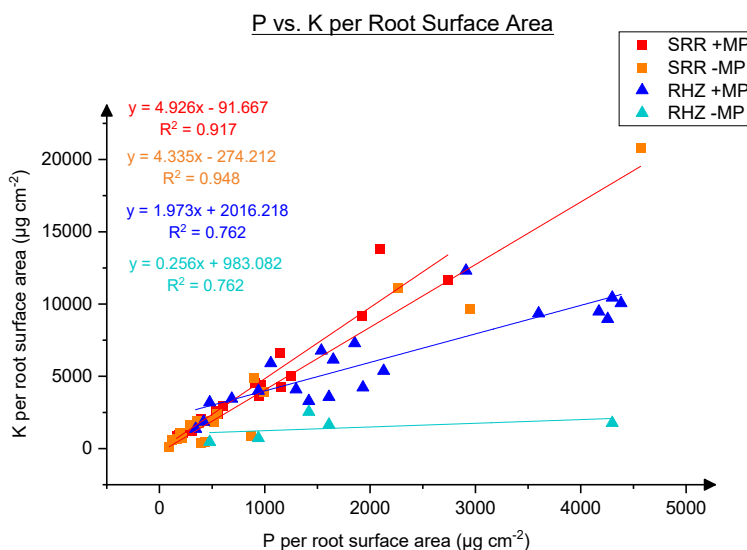
Schlussbericht  $\mu$ Plastik Phase I – TP C (FZJ)

$\text{NO}_2^-$ -Gehalten pro RSA gegen den  $\text{NH}_4^+$ -Gehalt pro RSA aufgetragen. Durch diese Korrelationsanalyse sollten Hinweise gefunden werden, ob der erhöhte  $\text{NO}_2^-$ -Gehalt aus der verstärkten Oxidation von  $\text{NH}_4^+$  resultiert oder auf eine erhöhte Aktivität von nitratreduzierenden Mikroorganismen im Boden zurückzuführen war. Im Ergebnis zeigte die Regressionslinie für den RHZ-Versuch die beste Korrelation von Nitrit mit Ammonium mit einem  $R^2$ -Wert von 0,8, während die Regressionslinien der +MP- und -MP-Böden aus dem SRR-Versuch eine schwächere Korrelation mit  $R^2$ -Werten von 0,03 bis 0,45 zeigten (Abb. 14).



**Abbildung 14.** Nitrit- ( $\text{NO}_2^-$ ) und Ammoniumgehalt ( $\text{NH}_4^+$ ) pro Wurzelfläche im Split-Root-Rhizotron-Experiment (SRR) und im Experiment mit ungeteilten Rhizotronen (RHZ).

Bei Auftragung der P- gegen die K-Menge pro RSA aus beiden Versuchen zeigten die einzelnen Regressionslinien eine sehr gute Korrelation zwischen den beiden im Boden gefundenen Nährstoffen mit  $R^2$ -Werten zwischen 0,76 für den RHZ-Versuch und  $>0,9$  für den SRR-Versuch (Abb. 15). Generell deuteten die hohen Korrelationen auf eine gleichzeitige Wurzelaufnahme von P und K hin. Interessanterweise einen signifikanten Unterschied in der Steigung zwischen der +MP- und -MP-Variante im RHZ-Versuch, nicht aber im SRR-Versuch.



**Abbildung 15.** Gehalte von Phosphor (P) und Kalium (K) pro Wurzelfläche im Split-Root-Rhizotron-Experiment (SRR) und im Experiment mit ungeteilten Rhizotronen (RHZ).

Schlussbericht µPlastik Phase I – TP C (FZJ)

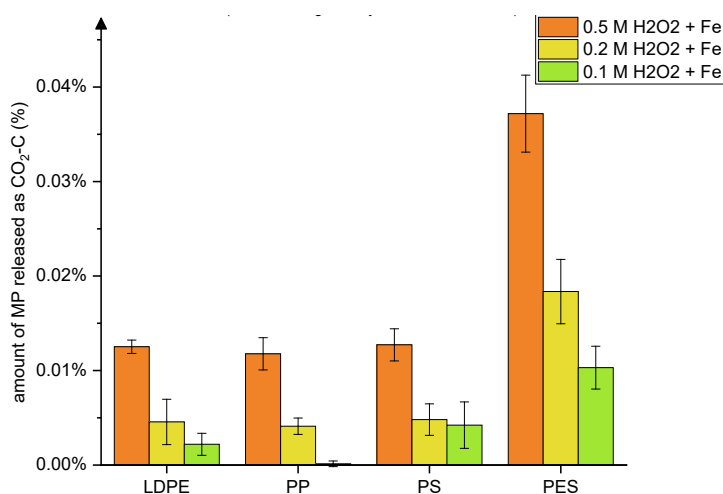
Die Signifikanzanalyse zeigte, dass im RHZ-Experiment die  $\text{NH}_4^+$ -Menge pro RSA in den +MP-Behandlungen signifikant zwischen dem wurzelfreien und dem Rhizosphären-Boden variierte ( $p = 0,019$ ). Insbesondere die +PS-Behandlung zeigte einen durchschnittlich 70 % niedrigeren  $\text{NH}_4^+$ -Gehalt pro RSA im wurzelfreien im Vergleich zum Rhizosphären-Noden. Bei den +PP- und +LDPE-Böden war der Unterschied im  $\text{NH}_4^+$ -Gehalt zwischen Rhizosphären-Boden und wurzelfreiem Boden vergleichbar, mit 33-37 % weniger  $\text{NH}_4^+$  im wurzelfreien Boden. Im Gegensatz dazu war bei der PES-Behandlung kein signifikanter Unterschied in der  $\text{NH}_4^+$ -Menge pro RSA zwischen Rhizosphären- und wurzelfreiem Boden festzustellen. Es konnte jedoch nicht abschließend ermittelt werden, worauf die Unterschiede bei den N-Spezies zwischen den Behandlungen zurückzuführen waren. Folgende Möglichkeiten für die Umwandlung und Reduktion von stickstoffhaltigen Nährstoffen im Boden könne hierfür jedoch in Betracht gezogen werden: 1. Neubildung durch Mineralisierung, 2. Umwandlung in andere Produkte, 3. Aufnahme durch Mikroorganismen, 4. Aufnahme durch Pflanzen, 5. Verlust in gasförmiger Form. Der Austrag über Sickerwasser kann für unsere Versuche ausgeschlossen werden, da es zu keiner Sickerwasserbildung kam.

Im Schlussbericht des Teilprojekts B (HMGU) finden sich in Abschnitt II.1.3 Ergebnisse der Mikrobiomanalyse der Proben aus den SRR- und RHZ-Experimenten. Wie dort ersichtlich, konnten keine signifikanten Unterschiede in der Alpha- und Betadiversität zwischen Rhizosphären- und wurzelfreiem Boden gefunden werden. Unterschiede zwischen den MP-Varianten waren gering, bis auf die LDPE-Variante im SRR-Versuch.

### II.1.3 Abbau von Mikroplastik durch die Fenton-Reaktion

Bestimmte holzersetzende Pilzarten wie *Pleurotus ostreatus* nutzen die Fenton-Reaktion, um Lignozellulose durch Depolymerisation abzubauen. Die Fenton-Reaktion, bei der aus  $\text{H}_2\text{O}_2$  in Anwesenheit von  $\text{Fe}^{2+}$  OH-Radikale entstehen, ist eine unspezifische, starke Oxidationsreaktion, die möglicherweise auch zum Abbau von Mikroplastik beitragen könnte.

Um zu testen, ob die Fenton-Chemie in der Lage ist, Mikroplastik abzubauen, führten wir Experimente mit den vier Arten von Mikroplastik durch, die auch im SRR- und RHZ-Experiment verwendet wurden (s. Abschnitt II.1.2), wobei wir das Fenton-Reagenz in verschiedenen Konzentrationen verwendeten (0,1, 0,2, 0,5 M  $\text{H}_2\text{O}_2$  und  $\text{Fe}^{2+}$  in einem Verhältnis von 1:100 mit  $\text{H}_2\text{O}_2$ ). Wir führten die Reaktionen in gasdichten 22-ml-Gaschromatographie-Fläschchen 20 Stunden lang durch und maßen dann das während der Reaktionszeit gebildete  $\text{CO}_2$ .



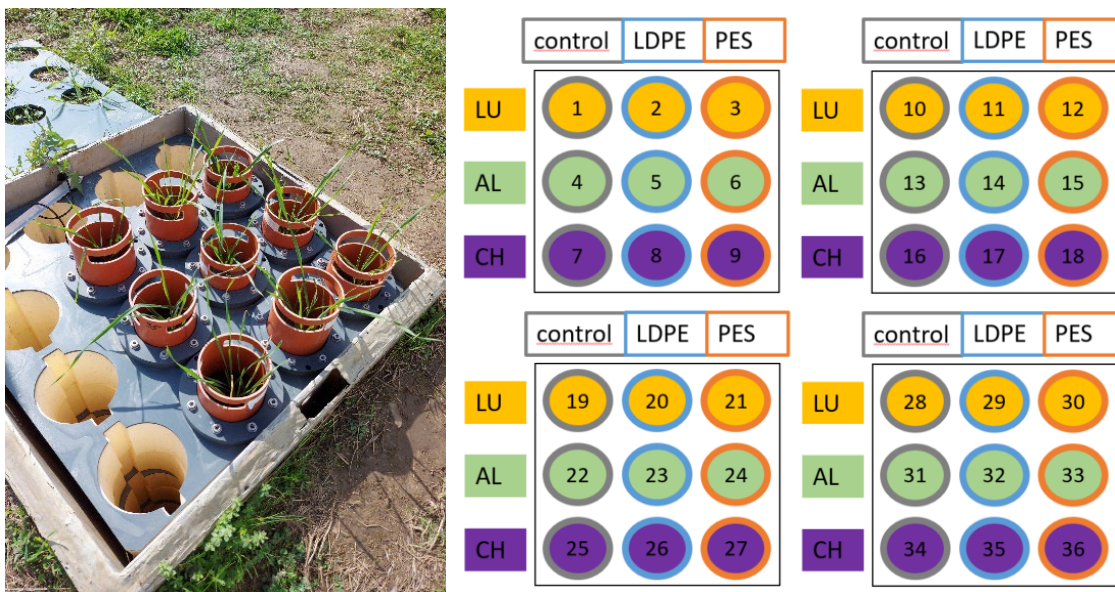
**Abbildung 16.** Anteil des in  $\text{CO}_2$  umgewandelten Mikroplastiks (in % des ursprünglichen Mikroplastik-C) während einer 20-stündigen Reaktionszeit mit Fenton-Reagenz aus 0,1, 0,2 und 0,5 M  $\text{H}_2\text{O}_2$  und einem  $\text{Fe}^{2+}:\text{H}_2\text{O}_2$ -Molverhältnis von 1:100.

Schlussbericht  $\mu$ Plastik Phase I – TP C (FZJ)

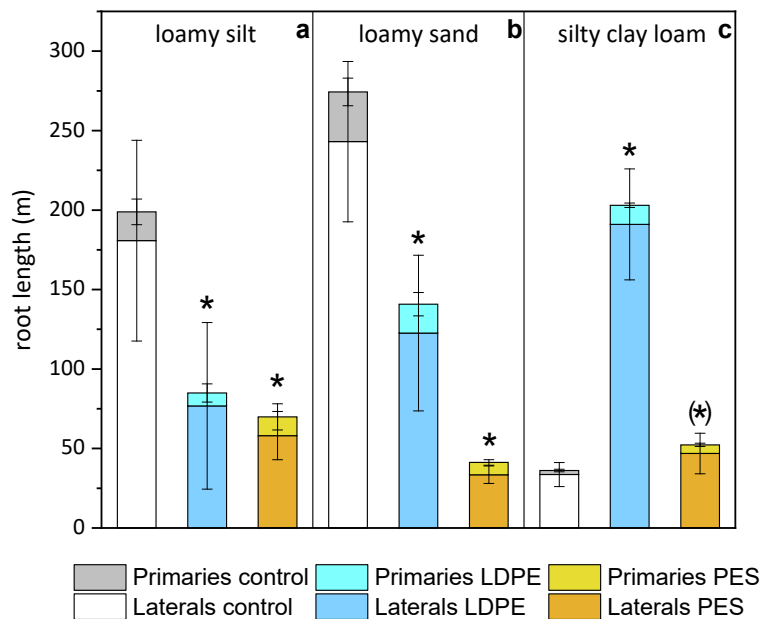
PES war die Art von Mikroplastik, die am wenigsten stabil gegenüber dem Abbau mit Fenton-Reagenz war (Abb. 5). Fast 0,04 % der ursprünglichen Menge an Mikroplastik wurde innerhalb von 20 Stunden mit 0,5 M Fenton-Reagenz in  $\text{CO}_2$  umgewandelt. Die anderen drei Arten von Mikroplastik erwiesen sich als stabiler als PES. Darüber hinaus gab es eine klare Konzentrationsabhängigkeit mit proportional niedrigeren  $\text{CO}_2$ -Bildungsraten bei niedrigeren Fenton-Reagenz-Konzentrationen, was auf eine Kinetik erster bzw. pseudoerster Ordnung für die Abbaureaktion(en) hindeutet.

#### II.1.4 Freiland-Lysimeterexperiment zum Effekt von Mikroplastik auf das Wurzelwachstum von Weizen

Die Forschung zu den Auswirkungen von Mikroplastik (MP) auf die Pflanzenleistung fokussierte in der Vergangenheit in erster Linie auf die Art oder Konzentration von MP und vernachlässigte den Einfluss der Bodentextur. In diesem Experiment untersuchten wir die Auswirkungen von zwei MP-Typen (Polyethylenpartikel niedriger Dichte, LDPE, und Polyesterfasern, PES), die in einer Konzentration von 0,4 %-w in die drei verschiedenen Böden mit unterschiedlicher Textur, die wir auch schon in den vorherigen Experimenten verwendet hatten, eingebracht worden waren, auf das Wachstum von Spross und Wurzeln in einem einen 42-tägigen Freiland-Lysimeterversuch mit Winterweizen (Abb. 17). Dabei analysierten wir die Effekte der MP-Arten auf den Wassergehalt des Bodens, den Nährstoffgehalt der Pflanzen und des Bodens sowie das Wachstum und die Morphologie von Wurzeln und Spross.



**Abbildung 17.** Links: Pflanzröhren (Durchmesser: 10 cm, Länge: 80 cm) mit Winterweizen im Freiland-Lysimeterexperiment. Die Röhren hingen in einer Konstruktion aus Styrodur in einem leeren Lysimeterraum in der Freiland-Lysimeteranlage des FZJ. Rechts: Vollständiges Layout der experimentellen Varianten und Anordnung in allen vier Lysimeterräumen; die Kontrollen des jeweiligen Bodentyps ohne Mikroplastik (MP) sind grau umrandet, LDPE ist Polyethylen niedriger Dichte (blau umrandet), PES repräsentiert Polyesterfasern (orange umrandet); LU ist schluffig-lehmiger Luvisol (gelb gefüllt), AL ist lehmig-sandiger Albic Luvisol (grün gefüllt), CH ist schluffig-toniger lehmiger Chernozem (violett gefüllt).



**Abbildung 18.** Mittlere Wurzellängen ( $\pm$  SD,  $n = 4$ ) von Winterweizen nach 42 Tagen Wachstum in a) lehmig-schluffigen Luvisol, b) lehmig-sandigen Albic Luvisol und c) schluffig-tonig-lehmigen Chernozem, sowohl ohne als auch mit Zugabe von 0,4 Gew.-% Mikroplastikpartikeln aus Polyethylen niedriger Dichte (LDPE) und Polyesterfasern (PES). Laterals = Seitenwurzeln mit einer Breite von 0-0,4 mm, Primaries = Hauptwurzeln mit einer Breite von 0,4-1 mm. Sternchen zeigen einen signifikanten Unterschied zur Kontrolle ( $p < 0,05$ ), während Sternchen in Klammern eine noch schwache Signifikanz zur Kontrolle anzeigen ( $p < 0,1$ ).

Im schluffigen Lehm (Luvisol) führten LDPE-Teilchen zu einer Verringerung der Wurzellänge ( $p = 0,04$ ) und der Biomasse ( $p = 0,03$ ) (Abb. 18), was wahrscheinlich auf eine veränderte Bodentextur zurückzuführen war, die zu mehr Makroporen führt und möglicherweise den Zugang zu Wasser und Nährstoffen verringert. PES-Fasern zeigten ähnliche Auswirkungen, was auf Veränderungen der Bodentextur und der Porosität hinweist, die die Verfügbarkeit von Wasser und Nährstoffen für die Wurzeln verringern.

Im sandigen Lehm (Albic Luvisol) verringerten sowohl PES-Fasern als auch LDPE-Partikel die Wurzellänge und Biomasse, was wahrscheinlich auf eine veränderte Bodenstruktur und Wasserrückhaltefähigkeit zurückzuführen war (Abb. 18). Insbesondere verringerten PES-Fasern die Wurzellänge um  $85\% \pm 2\%$  ( $p = 0,003$ ) und den Stickstoffgehalt in Wurzeln ( $p = 0,003$ ) und Blättern ( $p = 0,04$ ). Erhöhte Nitritwerte im Boden deuteten auf ein Ungleichgewicht bei den Nitrifikationsprozessen hin, was die Stickstoffverfügbarkeit für die Pflanzen beeinträchtigt haben könnte. Reduzierte Wurzel-Spross-Verhältnisse deuteten auf geringere Investitionen in das Wurzelwachstum hin, möglicherweise aufgrund von Sauerstoffmangel in der Wurzelzone, der auf von den PES-Fasern verursachte Staunässe zurückzuführen gewesen sein könnte.

Im Gegensatz dazu führte das Vorhandensein von LDPE-Teilchen im schluffig-tonigen Lehmboden (Chernozem) zu einer signifikanten Zunahme der Wurzellänge, die 4,6-mal höher war als bei der MP-freien Kontrolle ( $p = 0,002$ ) (Abb. 18), was wahrscheinlich auf die Schaffung neuer Wege im Boden für die Wasserinfiltration, aber auch für den Wasserverlust durch Verdunstung oder Versickerung zurückzuführen sein könnte, welche eine tiefere Durchwurzelung fördern könnten. Darüber hinaus war in Gegenwart von LDPE-Partikeln der Kaliumgehalt in den Wurzeln erhöht ( $p = 0,02$ ), was möglicherweise auf eine vergrößerte Wurzeloberfläche und die Freisetzung von Exsudaten zurückzuführen war, die die Nährstoffaufnahme fördert. PES-Fasern führten zu geringfügigen positiven Veränderungen des Wurzelwachstums, verringerten jedoch den Nährstoffgehalt in den Wurzeln signifikant, möglicherweise aufgrund von Störungen der Wasser- und Nährstoffaufnahme im Boden.

Schlussbericht µPlastik Phase I – TP C (FZJ)

Insgesamt zeigte das Experiment einen signifikanten Einfluss der Bodenart auf die Auswirkungen von MP auf die Bodenstruktur und das Pflanzenwachstum. LDPE-Partikel neigten dazu, die Makroporosität in fein strukturierten Böden zu erhöhen, was möglicherweise das Wurzelwachstum fördert, aber die Nährstoffaufnahme in grob strukturierten lehmigen Sandböden negativ beeinflusst. PES-Fasern beeinflussten auch die Bodenstruktur und wirkten sich auf die Wasserrückhaltung und die Nährstoffverfügbarkeit aus, wobei die Auswirkungen je nach Bodentyp unterschiedlich ausfielen. Die Ergebnisse des Experiments verdeutlichen die Komplexität der Wechselwirkungen zwischen MP in unterschiedlichen Böden und Pflanzen und unterstreicht die Notwendigkeit weiterer Forschung, um die Auswirkungen verschiedener Bodentexturen und MP-Typen noch besser zu verstehen.

### II.1.5 Versuch zum Abbau von $^{13}\text{C}$ -markiertem Mikroplastik durch holzzersetzende Pilze

Das folgende Experiment zielte darauf ab, die Depolymerisation von  $^{13}\text{C}$ -markierten Polypropylenpartikeln ( $^{13}\text{C}$ -PP) zu  $^{13}\text{CO}_2$  in Verbindung mit einem Weißfäule-Pilz (*Pleurotus ostreatus*) und einem Braunfäule-Pilz (*Gloeophyllum trabeum*) im Boden zu untersuchen. Zu diesem Zweck wurden Inkubationen einer bekannten Menge von  $^{13}\text{C}$ -PP zusammen mit einem der beiden Pilzstämme mit anschließenden Headspace-Gasmessungen mittels Isotopenverhältnis-Massenspektrometrie (IRMS) durchgeführt.

Das Ziel der Inkubation der saprophytischen Pilze mit  $^{13}\text{C}$ -PP auf Agar war (a) festzustellen, ob die beiden in diesem Versuch verwendeten holzzersetzenden Pilzarten in der Lage sind, synthetische Polymerstrukturen wie PP biologisch abzubauen, und (b) zu quantifizieren, ob diese saprophytischen Pilze, wenn sie sich in unmittelbarer Nähe von PP befinden, wesentlich zum PP-Abbau beitragen. Unsere Hypothese war, dass Braun- und Weißfäulepilze (Basidiomyceten), die die Fenton-Reaktion nutzen, um polymere Strukturen in Holz abzubauen, das Potenzial haben, den Kettenabbau von synthetischen MP-Polymeren zu bewirken.

Der Inkubationsversuch wurde in für die IRMS-Analyse geeignete 12-mL-Glasfläschchen durchgeführt, die mit 2 ml Malzextrakt-Pepton-Agar gefüllt und mit Schraubkappen mit Septum versehen waren. Alle Behandlungen mit und ohne Zusatz von  $^{13}\text{C}$ -PP und den beiden Pilzstämmen *P. ostreatus* und *G. trabeum* wurden in vierfacher Ausfertigung durchgeführt. Das  $^{13}\text{C}$ -PP wurde in Pulverform mit einer Isotopenreinheit von 99 Atom%  $^{13}\text{C}$  eingesetzt.

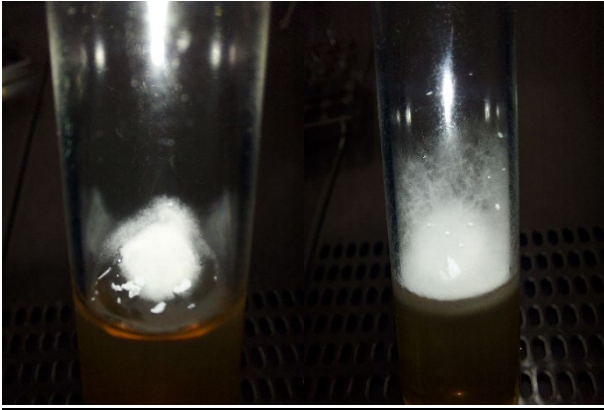
Die Stämme von *P. ostreatus* (DSM 1020, Stammbezeichnung: VII) und *G. trabeum* (DSM 1398, Stammbezeichnung: A 419) wurden von der Deutschen Sammlung von Mikroorganismen und Zellkulturen (DSMZ, Deutsche Sammlung von Mikroorganismen und Zellkulturen GmbH, Braunschweig, Deutschland) bereitgestellt. Beide Pilzkulturen wurden als aktive Kulturen in Agar-Schräggeläsern geliefert. Beide Kulturen wurden separat auf Malzextrakt-Pepton-Agarplatten in einer sauberen Arbeitsumgebung beimpft (Abb. 19).



**Abbildung 19.** Pilzkolonien auf geschlossenen Malz-Pepton-Agarplatten. Links: *Pleurotus ostreatus*, rechts: *Gloeophyllum trabeum*.

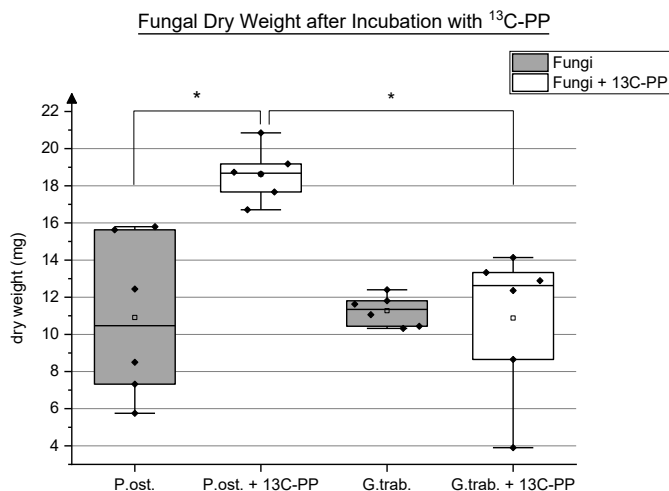
Schlussbericht µPlastik Phase I – TP C (FZJ)

Die Pilzstämme wurden als aktiv wachsende Kulturen auf 0,5 x 0,5 cm große Agar-Quadrate, die vom äußeren Rand des Myzels abgeschnitten wurden, in mit Agar gefüllte Fläschchen übertragen. Nach der Übertragung des Myzels und nach Zugabe von jeweils ca. 500 µg <sup>13</sup>C-PP wuchsen die Pilze jeweils sechs Tage lang in den Fläschchen (Abb. 20).



**Abbildung 20.** Myzelien nach sechs Tagen Wachstum auf Agar bei Raumtemperatur. Links: *Gloeophyllum trabeum*, rechts: *Pleurotus ostreatus*, mit Partikeln von <sup>13</sup>C-markiertem Polypropylen (<sup>13</sup>C-PP).

Auch nach fünf Monaten Inkubation konnte kein nennenswerter Abbau von <sup>13</sup>C-PP in Form von <sup>13</sup>CO<sub>2</sub> festgestellt werden. Interessanterweise zeigte jedoch das Myzel von *P. ostreatus* am Ende der fünfmonatigen Inkubationszeit ein signifikant höheres Trockengewicht in der <sup>13</sup>C-Variante als die Kontrolle ohne <sup>13</sup>C-PP (Abb. 21).



**Abbildung 21.** Boxplots der Pilz-Trockenbiomasse von *Pleurotus ostreatus* („P.ost.“) und *Gloeophyllum trabeum* („G.trab.“) in grau und des jeweiligen Pilzstammes mit Zusatz von <sup>13</sup>C-markiertem Polypropylen (<sup>13</sup>C-PP) in weiß (n = 6) nach der 5-monatigen Inkubation mit <sup>13</sup>C-PP.

Die Ursache hierfür konnte nicht zweifelsfrei ermittelt werden, könnte aber möglicherweise auf die Freisetzung von nicht <sup>13</sup>C-markierten Substanzen (z.B. Weichmacher) aus dem <sup>13</sup>C-PP zurückzuführen sein.

## **II.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises**

Ein Großteil der verausgabten Mittel wurde für Personal eingesetzt. Dies war erforderlich, um die anspruchsvollen Arbeiten im Projekt mithilfe einer Doktorandin durchführen zu können. Die Arbeiten umfassten neben routinemäßiger Probenahmen, Planung und Durchführung von Experimenten, Extraktion von Bodenproben, Waschen und Scannen von Wurzeln Analyse von Nährstoff- und Chlorophyllgehalten, Bestimmung von Abbaukinetiken, statistische Auswertungen, Präsentation von Projektergebnissen auf Konferenzen und Tagungen sowie Publikation der Resultate in Journalartikeln. Des Weiteren fielen Kosten für Materialbeschaffung für die Experimente und Kosten für Konferenz- und Statusseminarreisen an. Zum Zeitpunkt der Berichterstellung waren federführend oder mit Beteiligung aus dem Teilprojekt FZJ zwei Publikationen im Rahmen von  $\mu$ Plastik eingereicht. Ferner sind weitere Publikationen in Vorbereitung (siehe unten).

## **II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

Die durchgeführten Arbeiten waren der anspruchsvollen Aufgabenstellung des Projektes angemessen und in ihrem Umfang zur Erreichung der Projektziele allesamt notwendig.

## **II.4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans**

Die in diesem Projekt erzielten Ergebnisse werden sowohl in wissenschaftlich begutachteten Fachzeitschriften veröffentlicht als auch über Datenbanken öffentlich verfügbar gemacht. Darüber hinaus werden die Ergebnisse der landwirtschaftlichen Praxis über praxisnahe Veröffentlichungen zugänglich gemacht. Sie leisten einen dauerhaften Beitrag, die Mikroplastikkontamination in Böden und im speziellen in der Rhizosphäre zu verstehen und Managementfaktoren zu identifizieren, mit deren Hilfe solche Systeme optimiert werden können. Des Weiteren wurden die Ergebnisse im Rahmen der jährlichen BonaRes- und Rhizo4Bio-Statusseminare bzw. -Konferenzen sowie auf weiteren nationalen und internationalen Tagungen präsentiert und damit einer breiten wissenschaftlichen Öffentlichkeit zugänglich gemacht.

## **II.5 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen**

Während der Durchführung des Vorhabens sind Publikationen von dritter Seite erschienen, die ebenfalls die Bedeutung des Einflusses der Bodentextur auf die Effekte von Mikroplastik auf die bodenphysikalischen Eigenschaften hervorgehoben haben und damit die Relevanz unseres Forschungsansatzes unterstrichen haben.

## II.6 Erfolge oder geplante Veröffentlichungen

### *Bisher durch oder unter Beteiligung von Partner FZJ eingereichte Artikel:*

Chen H, Ingraffia R, Schloter M, Brüggemann N, Rillig M. Effects of multiple microplastic types on growth of winter wheat and soil properties vary in different agricultural soils. *Plants, People, Planet*, ms ID PPP-MS-2024-00919

Neubert KJ, Weihermüller L, Vereecken H, Brüggemann N. Soil texture governs the influence of different microplastics on soil hydraulic properties. *Vadose Zone Journal*, ms ID VZJ-2024-06-0044-OA

### *In Vorbereitung:*

Neubert KJ, Brüggemann N. Soil texture modifies the impact of microplastics on winter wheat growth.

Neubert KJ, Brüggemann N. Microplastic particles and fibers affect the root growth of winter wheat differently in different soils – results from a rhizotron experiment.

Neubert KJ, Brüggemann N. Degradation of microplastics by means of the Fenton reaction.

### *Konferenzbeiträge:*

Neubert K, Brüggemann N. Highly hydrophobic microplastics affect winter wheat root growth and plant-available soil nutrient content. *Bonares-Konferenz, Berlin, 16.05.2023 (Vortrag)*.

Neubert K, Weihermüller L, Vereecken H, Brüggemann N. Microplastics in soil affect soil water retention and hydraulic conductivity. *Tagung der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, Halle, 04.09.2023 (Vortrag)*.

Neubert K, Weihermüller L, Vereecken H, Brüggemann N. Microplastics in soil affect soil water retention and hydraulic conductivity. *Fall Meeting der American Geophysical Union, San Francisco, 12.12.2023 (Poster)*.

## II.7 Verwendete Literatur

- Baraniya D, Nannipieri P, Kublik S, Vestergaard G, Schloter M, Schöler A. 2018. The impact of the diurnal cycle on the microbial transcriptome in the rhizosphere of barley. *Microb. Ecol.* 75: 830–833.
- Berg G, Grube M, Schloter M, Smalla K. 2014. Unraveling the plant microbiome: looking back and future perspectives. *Frontiers in Microbiology* 5: 148.
- Bläsing M, Amelung W. 2018. Plastics in soil: Analytical methods and possible sources. *Science of The Total Environment* 612: 422-435.
- Dris R, Gasperi J, Tassin B. 2018. Sources and Fate of Microplastics in Urban Areas: A Focus on Paris Megacity. In: Wagner M., Lambert S. (eds) *Freshwater Microplastics. The Handbook of Environmental Chemistry*, vol 58. Springer, Cham
- Fuller S, Gautam A. 2016. A procedure for measuring microplastics using pressurized fluid extraction. *Environmental Science & Technology* 50: 5774–5780.
- Geyer R, Jambeck JR, Lavender Law K. 2017. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances* 3: e1700782.
- Huerta Lwanga E, Gertsen H, Gooren H, Peters P, Salanki T, van der Ploeg M, Besseling E, Koelmans AA, Geissen V. 2016. Microplastics in the terrestrial ecosystem: Implications for *Lumbricus terrestris* (Oligochaeta, Lumbricidae). *Environmental Science & Technology* 50: 2685-2691.
- Hurley RR, Lusher AL, Olsen M, Nizzetto L. 2018. Validation of a method for extracting microplastics from complex, organic-rich, environmental matrices. *Environmental Science & Technology* 52: 7409–7417.
- Maaß S, Daphi D, Lehmann A, Rillig MC. 2017. Transport of microplastics by two collembolan species. *Environmental Pollution* 225: 456-459.
- Machado AAS, Kloas W, Zarfl C, Hempel S, Rillig MC. 2018. Microplastics as an emerging threat to terrestrial ecosystems. *Global Change Biology* 24: 1405-1416.
- Nizzetto L, Langaas S, Futter M. 2016. Do microplastics spill on to farm soils? *Nature* 537: 488-488.
- Qi Y, Yang X, Meji Pelaez A, Huerta Lwanga E, Beriot N, Gertsen H, Garbeva P, Geissen V. 2018. Macro- and micro- plastics in soil-plant system: Effects of plastic mulch residues on wheat (*Triticum aestivum*) growth. *Science of The Total Environment* 645: 1048-1056.
- Rillig MC. 2012. Microplastic in terrestrial ecosystems and the soil? *Environmental Science & Technology* 46: 6453-6454.
- Rillig MC, Bonkowski M. 2018. Microplastic and soil protists: a call for research. *Environmental Pollution* 241: 1128-1131.
- Rillig MC, Ziersch L, Hempel S. 2017a. Microplastic transport in soil by earthworms. *Scientific Reports* 7: 1362; doi: 10.1038/s41598-017-01594-7
- Rillig MC, Ingrassia R, Machado AAS. 2017b. Microplastic incorporation into soil in agroecosystems. *Frontiers in Plant Science* 8: 1805. doi: 10.3389/fpls.2017.01805
- Scheurer M, Bigalke M. 2018. Microplastics in Swiss floodplain soils. *Environmental Science & Technology* 52: 3591–3598.
- Schöler A, Jacquiod S, Vestergaard G, Schulz S, Schloter M. 2017. Analysis of soil microbial communities based on amplicon sequencing of marker genes. *Biol. Fert. Soils* 53: 485-489.
- Weithmann R, Möller JN, Löder MGJ, Pieh S, Laforsch C, Freitag R. 2018. Organic fertilizer as a vehicle for the entry of microplastic into the environment. *Science Advances* 4: eaap8060.
- Zhang S, Yang X, Gertsen H, Peters P, Salanki T, Geissen V. 2018. A simple method for the extraction and identification of light density microplastics from soil. *Science of the Total Environment* 616–617: 1056-1065.
- Zubris KAV, Richards BK. 2005. Synthetic fibers as an indicator of land application of sludge. *Environmental Pollution* 138: 201-211.

## Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) <b>Schlussbericht</b>
3. Titel  <b>µPlastik – Verständnis der Effekte von Mikroplastik auf Rhizosphärenprozesse und -wechselwirkungen in landwirtschaftlichen Böden</b>	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] <b>Brüggemann, Nicolas, Prof. Dr.</b>	5. Abschlussdatum des Vorhabens <b>31.01.2024</b>
	6. Veröffentlichungsdatum <b>31.07.2021</b>
	7. Form der Publikation <b>Schlussbericht</b>
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) <b>Forschungszentrum Jülich GmbH Institut für Bio- und Geowissenschaften – Agrosphäre (IBG-3) Wilhelm-Johnen-Straße 52425 Jülich</b>	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen <b>031B0907C</b>
	11. Seitenzahl <b>26</b>
12. Fördernde Institution (Name, Adresse)  <b>Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) Kapelle-Ufer 1 11055 Berlin</b>	13. Literaturangaben <b>21</b>
	14. Tabellen <b>1</b>
	15. Abbildungen <b>21</b>
16. Zusätzliche Angaben <b>Keine.</b>	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) <b>Projekträger Jülich, Bioökonomie (BIO), Bioressource (BIO 6); Forschungszentrum Jülich GmbH, 31.07.2024</b>	
18. Kurzfassung  Das Ziel des Verbundvorhabens µPlastik, Teilprojekt C (FZJ), in Phase I war es, die Effekte verschiedener Mikroplastikarten in verschiedenen Böden, die sich insbesondere in ihrer Textur unterschieden, auf die bodenphysikalischen Eigenschaften, das Wurzelwachstum von Winterweizen sowie die biogeochemischen Prozesse in der Rhizosphäre zu untersuchen. Daneben wurden auch Versuche zum Abbau von Mikroplastik im Boden durch natürliche und chemische Prozesse untersucht. Hierzu wurden schwerpunktmäßig Untersuchungen im Labor, in Rhizotronexperimenten in Klimakammern sowie in Lysimeterexperimenten im Freiland durchgeführt. Zentrale Ergebnisse waren, dass es sehr stark von der Textur des Bodens und von der Konsistenz der Mikroplastikpartikel abhängt, wie deren Wirkung auf die Bodeneigenschaften, die biogeochemischen Prozesse und das Wurzelwachstum ausfällt. Es wurden positive, negative und ausbleibende Effekte beobachtet, ohne dass klare Muster erkennbar wurden. Die Versuche zu möglichen Abbaumechanismen ergaben, dass ein natürlicher Abbau von Mikroplastikpartikeln im Boden extrem langsam verläuft und daher sehr wahrscheinlich nicht in signifikantem Umfang zur Verringerung der Mikroplastikbelastung des Bodens beitragen kann.	
19. Schlagwörter Mikroplastik, Rhizosphärenprozesse, Pflanze-Boden-Mikroorganismen-Interaktionen	
20. Verlag	21. Preis

## Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. Type of document (e.g. report, publication) <b>Final report</b>
3. Title <b>µPlastic – Understanding and mitigating microplastic effects on rhizosphere processes and interactions in agricultural soils</b>	
4. Author(s) (family name, first name(s)) <b>Brüggemann, Nicolas, Prof. Dr.</b>	5. end of project <b>31.01.2024</b>
	6. publication date <b>31.07.2024</b>
	7. form of publication <b>Final report</b>
8. Performing organization(s) (name, address) <b>Forschungszentrum Jülich GmbH Institut für Bio- und Geowissenschaften – Agrosphäre (IBG-3) Wilhelm-Johnen-Straße 52425 Jülich Germany</b>	9. originator's report no.
	10. reference no. <b>031B0907C</b>
	11. no. of pages <b>26</b>
12. Sponsoring agency (name, address) <b>Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) Kapelle-Ufer 1 11055 Berlin</b>	13. no. of references <b>21</b>
	14. no. of tables <b>1</b>
	15. no. of figures <b>21</b>
16. Supplementary notes <b>None.</b>	
17. Presented at (title, place, date) <b>Projekträger Jülich, Bioökonomie (BIO), Bioressource (BIO 6); Forschungszentrum Jülich GmbH, 31/7/2024</b>	
18. Abstract <p>The aim of the joint project µPlastic, subproject C (FZJ), in phase I was to investigate the effects of different types of microplastics in different soils, which differed in particular in their texture, on the physical properties of the soil, the root growth of winter wheat and the biogeochemical processes in the rhizosphere. In addition, experiments on the degradation of microplastics in the soil through natural and chemical processes were also investigated. To this end, investigations were focused on experiments in the laboratory, with rhizotrons in climate chambers and with lysimeter in the field. The main results were that it depends very much on the texture of the soil and the consistency of the microplastic particles as to how their effect on soil properties, biogeochemical processes and root growth. Positive, negative and absent effects were observed without any recognizable clear patterns. The experiments on possible degradation mechanisms revealed that the natural degradation of microplastic particles in the soil is extremely slow and is therefore very unlikely to significantly contribute to the reduction of microplastic pollution in the soil.</p>	
19. Keywords Microplastics, rhizosphere processes, plant-soil-microorganism interactions	
20. Publisher	21. Price