

# Nachweis, Verbleib und Wirkung von Mikro- und Nanoplastik in Böden



**Martin Hoppe, Kristof Dorau, Karsten Schlich, Axel Lamparter, Georg Scheeder, Jan Köser**

20.06.2024

# Meso-, Mikro- und Nanoplastik in Böden

## Inhalt

- ▶ Motivation
- ▶ Definitionen
- ▶ Nachweis, Verbleib und Wirkung von Mikro- und Nanoplastik in Böden
- ▶ Probenahme, -aufbereitung und Analytik von Meso- und Mikroplastik in Böden

Image	Particle type
	Foil
	Film
	Fibre
	Fibre bundle
	Fragment

Mesoplastik von einem Ackerstandort nach mehrfacher Applikation von Kompost

# Meso-, Mikro- und Nanoplastik in Böden

## Inhalt

- ▶ Motivation
- ▶ Definitionen
- ▶ **Nachweis, Verbleib und Wirkung von Mikro- und Nanoplastik in Böden**
- ▶ Probenahme, -aufbereitung und Analytik von Meso- und Mikroplastik in Böden

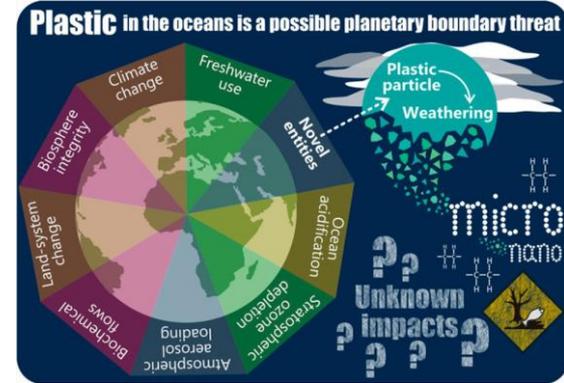
Image	Particle type
	Foil
	Film
	Fibre
	Fibre bundle
	Fragment

Mesoplastik von einem Ackerstandort nach mehrfacher Applikation von Kompost

# Plastik in der Umwelt

## Motivation

- ▶ Plastik lässt sich weltweit in der Umwelt nachweisen (Mitrano et al., 2021)
- ▶ Produktion steigt (PPEWG, 2023)  
=> Freisetzung in die Umwelt
- ▶ Wissenslücken zu Wirkung und Verbleib von Plastik in Böden (Maity et al., 2022)



(Jahnke et al., 2017)

## Are Agricultural Soils Dumps for Microplastics of Urban Origin?

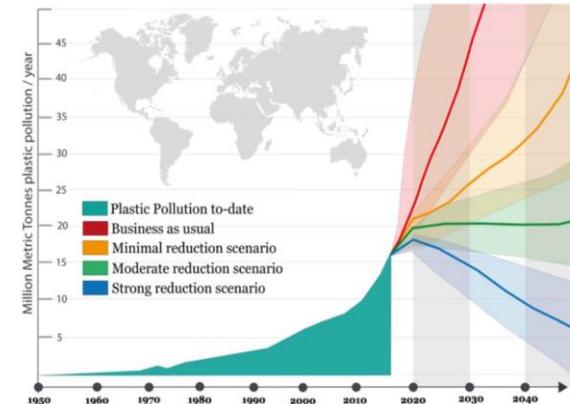
Luca Nizzetto,<sup>\*,†,‡</sup> Martyn Futter,<sup>§</sup> and Sindre Langaas<sup>†</sup>

<sup>†</sup>Norwegian Institute for Water Research, NO-0349, Oslo, Norway

<sup>‡</sup>Research Centre for Toxic Compounds in the Environment, Masaryk University, 62500, Brno, Czech Republic

<sup>§</sup>Department of Aquatic Sciences and Assessment, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, Sweden

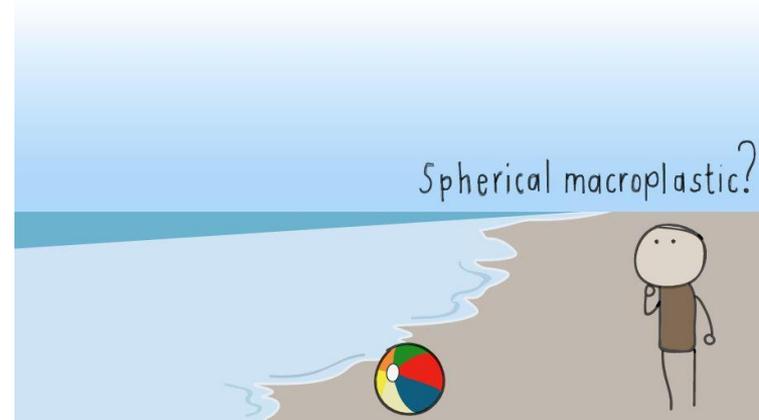
Plastic Pollution Emissions Working Group (2023)



# Meso-, Mikro- und Nanoplastik in Böden

## Definitionen (CEN/TC 444/WG 6)

- ▶ Primäres und sekundäres Mikroplastik
- ▶ Makroplastik (>25 mm)
- ▶ Mesoplastik (25 - 5 mm)
- ▶ Großes Mikroplastik (5 - 1 mm)
- ▶ Kleines Mikroplastik (1000 - 1  $\mu\text{m}$ )
- ▶ Nanoplastik (<1  $\mu\text{m}$ )

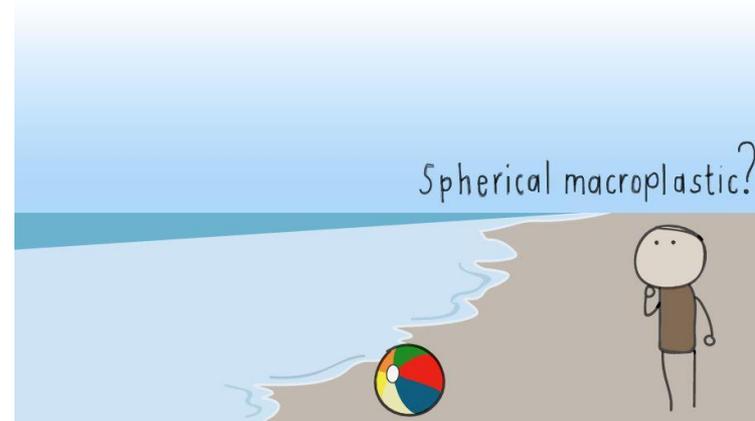


(Hartmann et al., 2019)

# Meso-, Mikro- und Nanoplastik in Böden

## Definitionen (CEN/TC 444/WG 6)

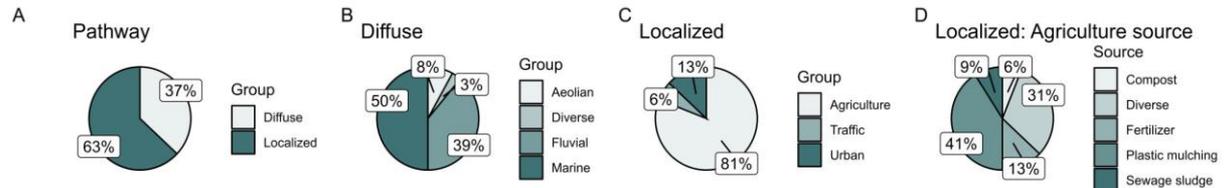
- ▶ Primäres und sekundäres Mikroplastik
- ▶ Makroplastik (>25 mm)
- ▶ Mesoplastik (25 - 5 mm)
- ▶ Großes Mikroplastik (5 - 1 mm)
- ▶ Kleines Mikroplastik (1000 - 1 µm)
- ▶ Nanoplastik (<1 µm)



(Hartmann et al., 2019)

## Quellen und Eintragspfade

- ▶ Klärschlammverwertung, Kompostverwertung
- ▶ Mulchfolien
- ▶ Reifenabrieb



(Dorau et al., 2023)

# Nachweis, Verbleib und Wirkung von Mikro- und Nanoplastik in Böden



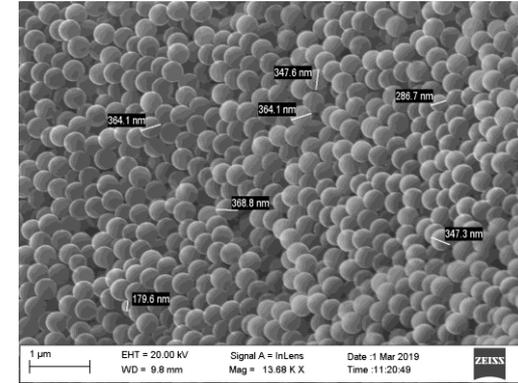
**Martin Hoppe, Kristof Dorau, Karsten Schlich, Axel Lamparter, Georg Scheeder, Jan Köser**

20.06.2024

# Motivation

## Stand des Wissens zu Mikro- und Nanoplastik in Böden

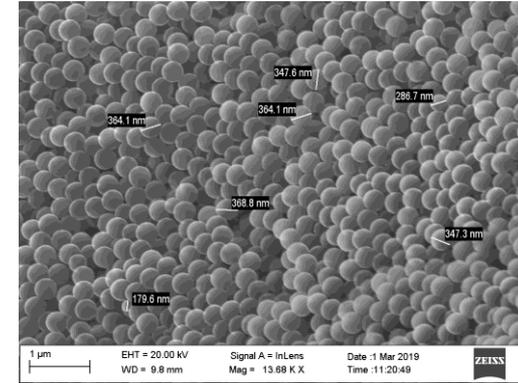
- ▶ Böden gelten als Senke für Mikroplastik (MP, 5 mm – 1 µm) und Nanoplastik (NP, < 1 µm) =>  
Quantifizierung in der Umwelt schwierig (Schwaferts et al., 2019) =>  
Wirkung in Böden unklar (Maity et al., 2022) =>  
Aufnahme in Pflanzen möglich (Wang et al., 2022) =>  
Wirkung auf Pflanzenwachstum unklar (Zhang et al., 2022)



# Motivation

## Stand des Wissens zu Mikro- und Nanoplastik in Böden

- ▶ Böden gelten als Senke für Mikroplastik (MP, 5 mm – 1 µm) und Nanoplastik (NP, < 1 µm) =>  
Quantifizierung in der Umwelt schwierig (Schwaferts et al., 2019) =>  
Wirkung in Böden unklar (Maity et al., 2022) =>  
Aufnahme in Pflanzen möglich (Wang et al., 2022) =>  
Wirkung auf Pflanzenwachstum unklar (Zhang et al., 2022)
- => Quantifizierbare Modellpartikel sind erforderlich, um bestehende Wissenslücken zu schließen!**



# Material und Methoden

## Synthese (1)

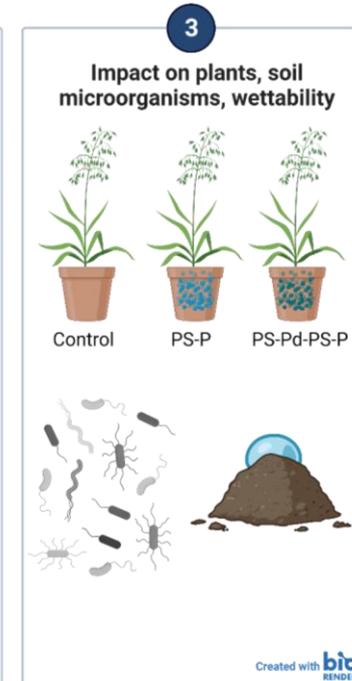
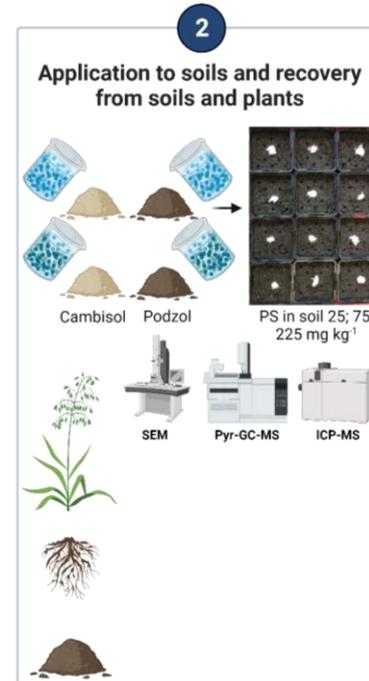
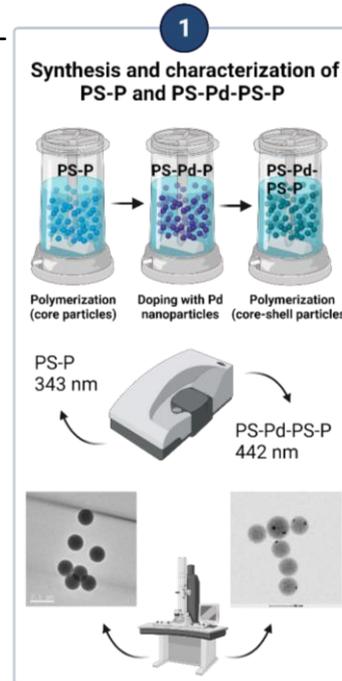
- ▶ Tensid-freie Synthese von Polystyrol (PS)-Partikeln mit und ohne Doping aus Pd-Nanopartikeln

## Applikation zu Ackerböden (2)

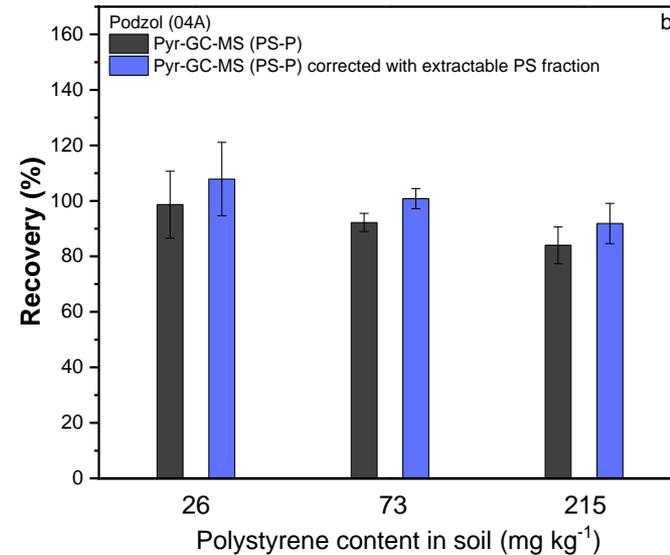
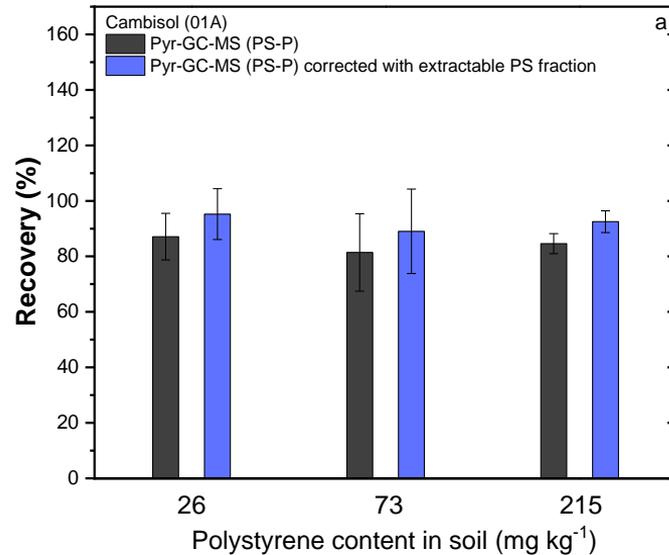
- ▶ Zugabe zu Cambisol ( $C_{\text{org}} = 1\%$ , Refesol 01A) und Podzol ( $C_{\text{org}} = 2,5\%$ , Refesol 04A)

## Versuche mit Ackerböden (3)

- ▶ Haferwachstum (DIN EN ISO 22030, *Avena sativa*), Aktivität von Bodenmikroorganismen, Benetzbarkeit

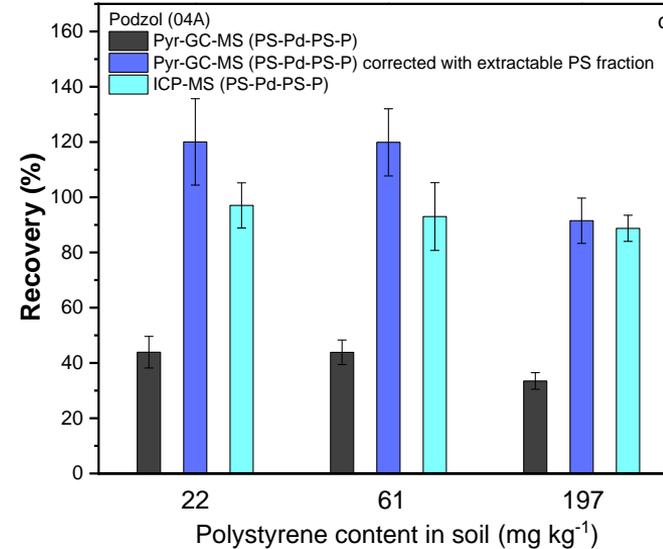
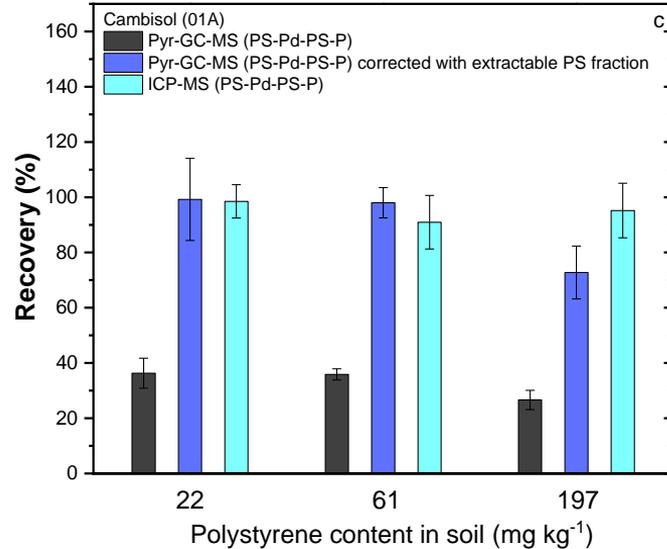


## Quantifizierung von PS in Böden



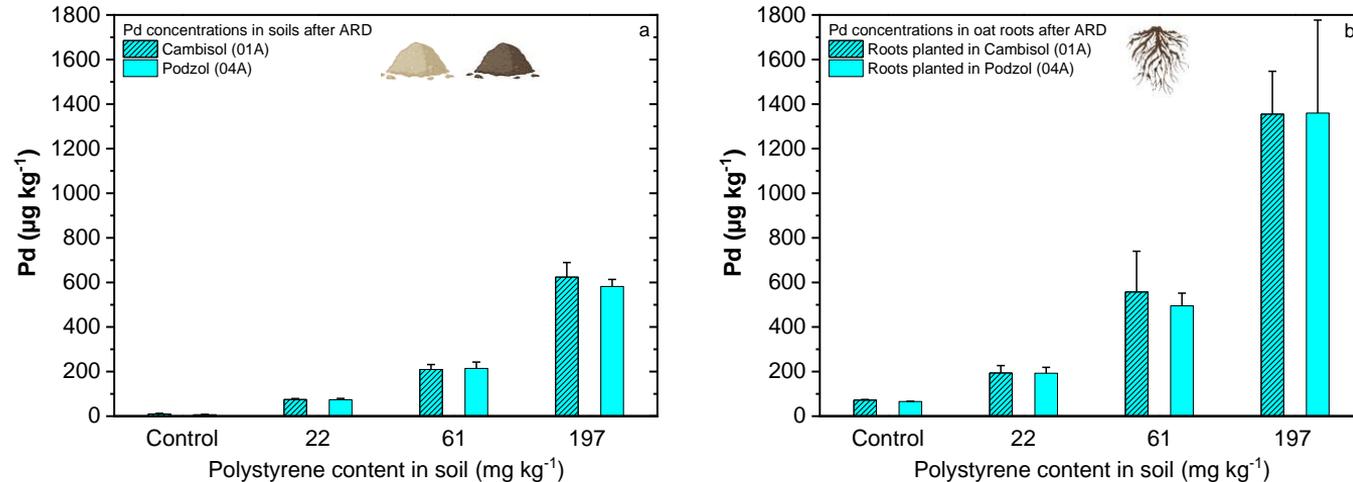
- ▶ Hohe Wiederfindungsraten für alle PS-Gehalte in beiden Böden (89% - 108%)

## Quantifizierung von PS und Pd in Böden



- ▶ Hohe Wiederfindungen für alle PS-Gehalte in beiden Böden nach Korrektur (cross-linking?)
- ▶ Gute Vergleichbarkeit der Wiederfindungsraten von ICP-MS (Pd) und Pyr-GC-MS (PS)

## Quantifizierung von Pd in Böden und Pflanzenwurzeln



- ▶ Anreicherung von PS-Pd-PS-P auf Wurzeloberfläche im Vergleich zu Böden (Faktor 2,2 – 2,7)
- ▶ Keine Unterschiede in Wurzel-Anreicherung von PS-Pd-PS-P zwischen Cambisol und Podzol
- ▶ Keine Verlagerung in den Spross nachweisbar ( $\text{Pd} < \text{LOQ}_{\text{Methode}} = 73 \mu\text{g kg}^{-1}$ )

# Ergebnisse und Diskussion

## Überblick über die Versuche mit den gespikten Böden

Created with 

	Plants					
	Fertile pods		Shoot length		Fresh wt. shoots	
	After 2 months		After 2 months		After 2 months	
						
PS-P 215 mg kg <sup>-1</sup>	—	0	0	0	0	0
PS-Pd-PS-P 197 mg kg <sup>-1</sup>	0	0	—	0	0	0
PS-P 73 mg kg <sup>-1</sup>	0	0	0	0	0	—
PS-Pd-PS-P 61 mg kg <sup>-1</sup>	0	0	0	0	0	0
PS-P 26 mg kg <sup>-1</sup>	0	0	0	0	0	0
PS-Pd-PS-P 22 mg kg <sup>-1</sup>	0	0	0	0	0	—



Cambisol



Podzol



Significant increase compared to the control,  $p < 0.05$



Significant decrease compared to the control,  $p < 0.05$

0 No effect

► Effekte auf Wachstum von Hafer vernachlässigbar

# Ergebnisse und Diskussion

## Überblick über die Versuche mit den gespikten Böden

Created with bio RENDER

	Plants						Bacteria					
	Fertile pods		Shoot length		Fresh wt. shoots		AOB		Basal respiration		SIR	
	After 2 months		After 2 months		After 2 months		1 months	6 months	1 months	6 months	1 months	6 months



PS-P 215 mg kg <sup>-1</sup>	—	0	0	0	0	0	0	—	—	0	0	0
PS-Pd-PS-P 197 mg kg <sup>-1</sup>	0	0	—	0	0	0	0	0	—	0	0	0
PS-P 73 mg kg <sup>-1</sup>	0	0	0	0	0	—	0	—	—	0	0	0
PS-Pd-PS-P 61 mg kg <sup>-1</sup>	0	0	0	0	0	0	0	—	—	0	0	0
PS-P 26 mg kg <sup>-1</sup>	0	0	0	0	0	0	0	0	—	0	0	0
PS-Pd-PS-P 22 mg kg <sup>-1</sup>	0	0	0	0	0	—	0	—	0	0	0	0



Cambisol



Podzol



Significant increase compared to the control, p<0.05



Significant decrease compared to the control, p<0.05

0 No effect

- ▶ Effekte auf Wachstum von Hafer vernachlässigbar
- ▶ Effekte auf Mikroorganismen zeigen keine monotonen Dosis-Wirkungs-Beziehungen

# Ergebnisse und Diskussion

## Überblick über die Versuche mit den gespikten Böden

Created with **bio** RENDER

	Plants						Bacteria						SWR	
	Fertile pods		Shoot length		Fresh wt. shoots		AOB		Basal respiration		SIR		Contact angle	
	After 2 months		After 2 months		After 2 months		1 months 6 months		1 months 6 months		1 months 6 months		After application	
PS-P 215 mg kg <sup>-1</sup>	−	0	0	0	0	0	−	−	0	0	0	+	0	
PS-Pd-PS-P 197 mg kg <sup>-1</sup>	0	0	−	0	0	0	0	−	0	0	0	0	0	
PS-P 73 mg kg <sup>-1</sup>	0	0	0	0	0	−	0	−	−	0	0	0	0	
PS-Pd-PS-P 61 mg kg <sup>-1</sup>	0	0	0	0	0	0	−	−	0	0	0	0	−	
PS-P 26 mg kg <sup>-1</sup>	0	0	0	0	0	0	0	−	0	0	0	0	0	
PS-Pd-PS-P 22 mg kg <sup>-1</sup>	0	0	0	0	0	−	0	−	0	0	0	0	−	



Cambisol



Podzol



Significant increase compared to the control, p<0.05



Significant decrease compared to the control, p<0.05

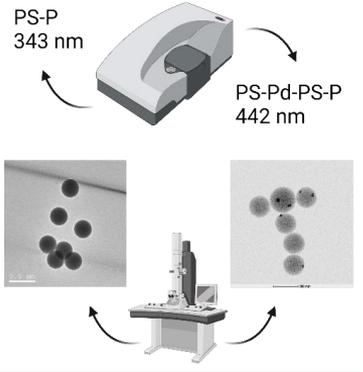
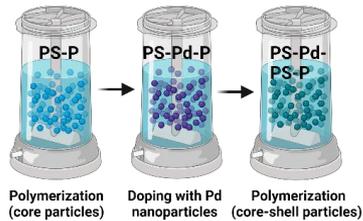
0 No effect

- ▶ Effekte auf Wachstum von Hafer vernachlässigbar
- ▶ Effekte auf Mikroorganismen zeigen keine monotonen Dosis-Wirkungs-Beziehungen
- ▶ Geringer Effekt auf Benetzungshemmung

# Take home messages

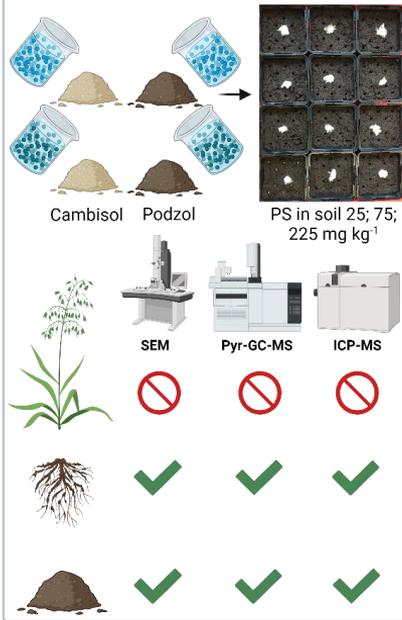
1

## Synthesis and characterization of PS-P and PS-Pd-PS-P



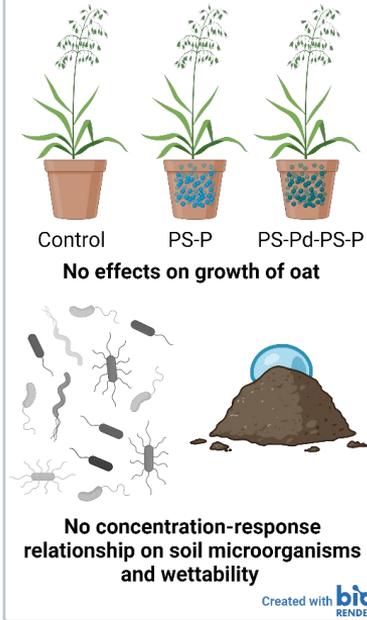
2

## Application to soils and recovery from soils and plants



3

## Impact on plants, soil microorganisms, wettability



- ▶ Pd gedopte Modellpartikel gut geeignet, um Verbleib und Wirkung von NP zu testen (Methodenentwicklung)
- ▶ Effekte auf das Wachstum von Hafer vernachlässigbar
- ▶ Geringfügige Effekte auf Mikroorganismen und Benetzungshemmung

# Probenahme, -aufbereitung und Analytik von Meso- und Mikroplastik in Böden



Kristof Dorau, Daniel Rückamp, Jan Köser, Christian Weber, Georg Scheeder, Ronja Reßing, Stephan Peth, Phillip Otto, Korinna Altmann, Elke Fries, Martin Hoppe



SOil Sampling for  
Microplastic Analysis



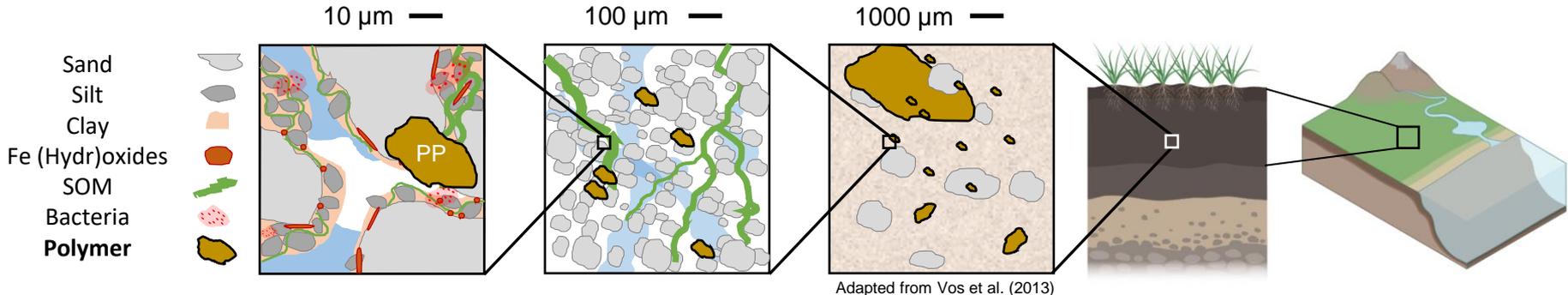
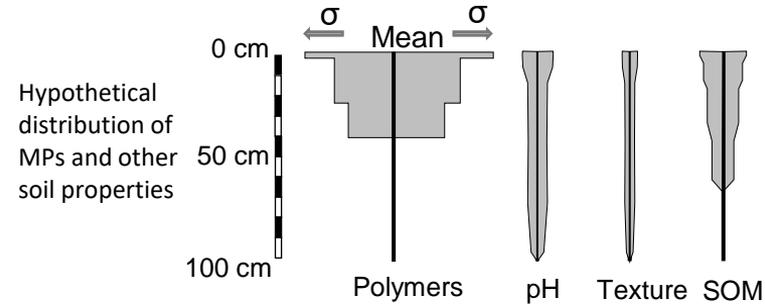
20.06.2024

# Motivation

## Stand des Wissens zur Probenahme und Analytik von Meso- und Mikroplastik in Böden

- ▶ Probennahmefehler im Vergleich zu Bodeneigenschaften unbekannt (Partikel in einer partikulären Matrix)
- ▶ Keine Informationen zur räumlichen Variabilität auf Feld- und Einzugsgebiets-Ebene (Up-Scaling)

=> **Informationen dringend erforderlich, um sinnvolle Probenahmestrategien abzuleiten!**



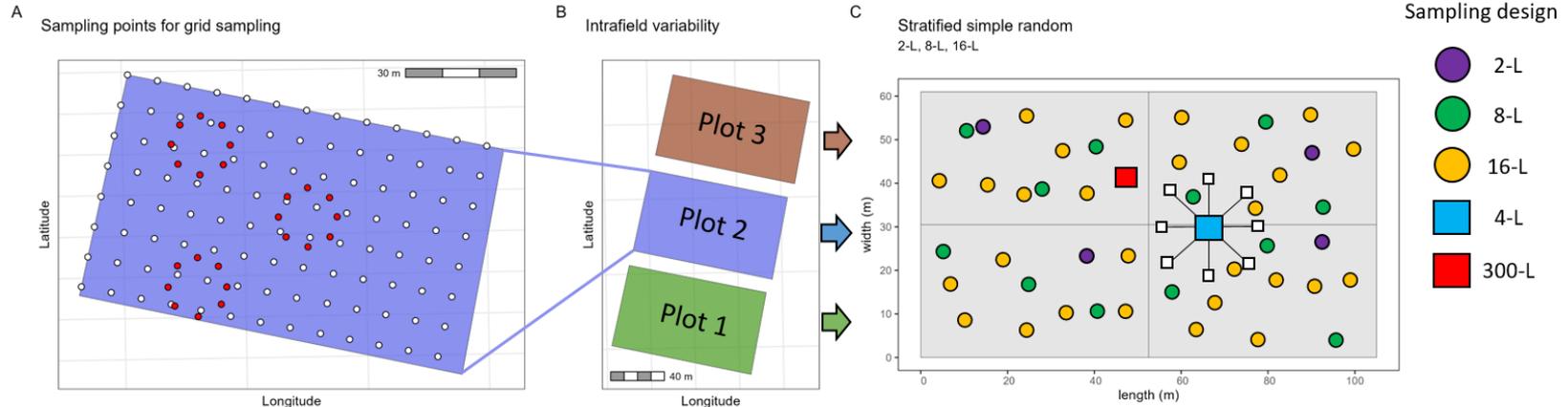
Adapted from Vos et al. (2013)

## Probenahmestandort

- ▶ Ackerstandort in Schleswig-Holstein (Podzolic Cambisol, 3 ha, 12 J. Komposteintrag, Summe 20 = kg m<sup>-2</sup>)

## Probenahmedesign

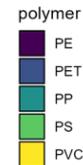
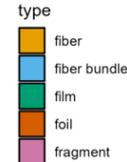
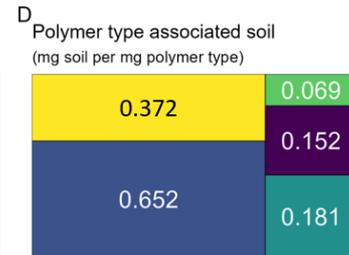
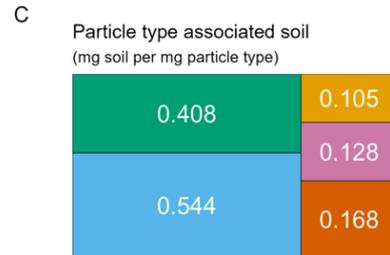
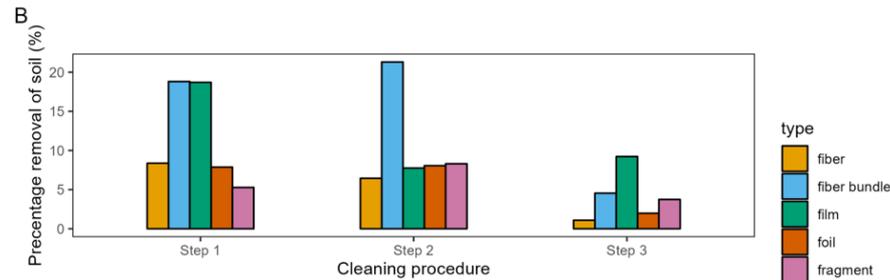
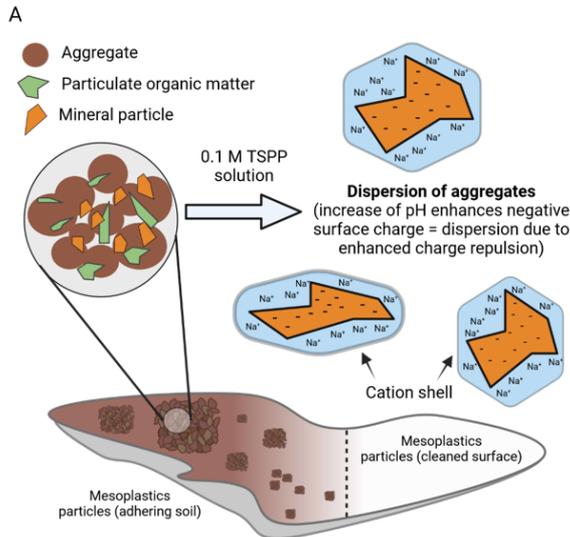
- ▶ Ap-Horizont (0 - 30 cm, split tube sampler, 844 Einzelproben, 480 kg)
- ▶ Unterschiedliche Probenahmestrategien (Raster, Plots, Satelliten, Volumen)



# Ergebnisse und Diskussion

## Mesoplastik

- ▶ Aufreinigung vor gravimetrischer Bestimmung der Partikelmasse zwingend erforderlich
- ▶ Partikelzahl = 0,5 (0 - 3,2) P kg<sup>-1</sup>, 1,89 (0,11 - 221) mg, Daten nicht normalverteilt
- ▶ Polymertyp: PE > PP > PET > PS > PVC, Partikeltyp: Folien > Fasern > Faser-Bündel > Fragmente

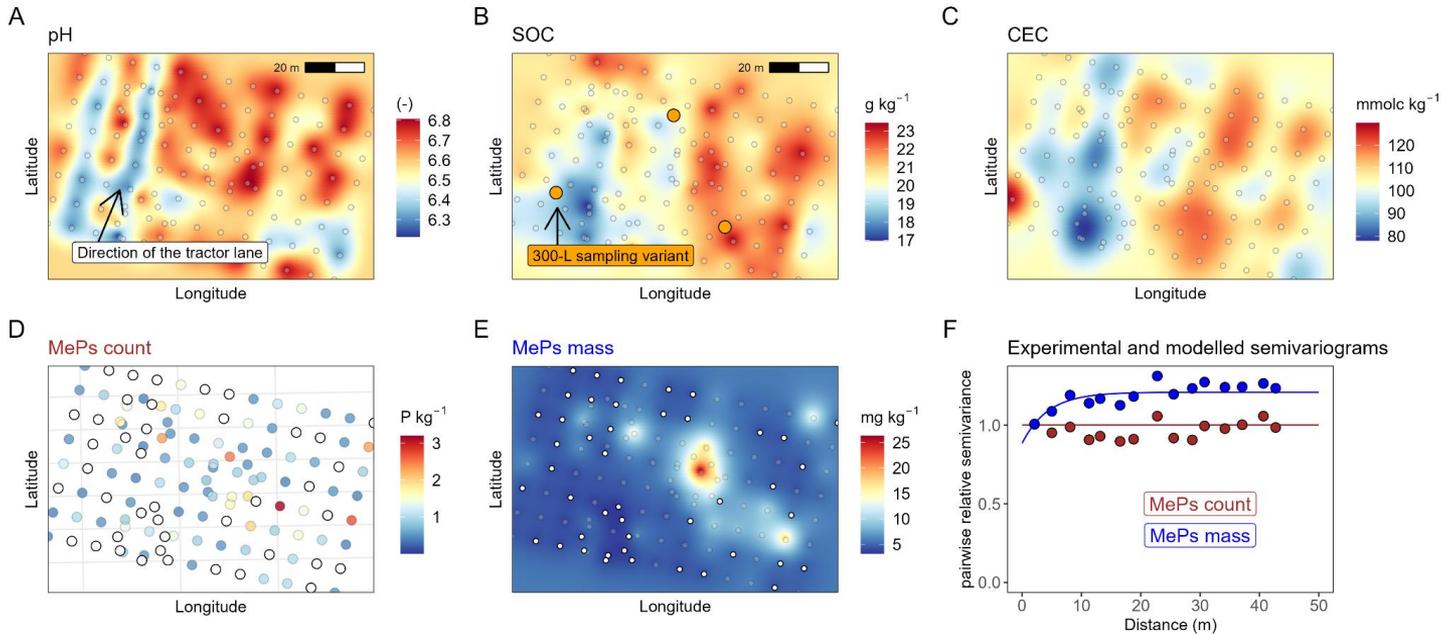


# Ergebnisse und Diskussion

## Mesoplastik

- ▶ Keine räumlichen Zusammenhänge für Mesoplastik-Funde (Partikelzahl, Partikelmasse)

=> Simple random sampling möglich



# Take home messages

## Ergebnisse für Mesoplastik

- ▶ Reinigung der Mesoplastik-Funde erforderlich (Massebestimmung, Spektroskopie)
- ▶ Es dominieren PE, PP und PET, hauptsächlich Folien und Fasern
- ▶ Simple random sampling möglich (Zufallsstichproben)
- ▶ Gesamtvolumen von 2 L ausreichend, Anzahl der Einzelstichproben zeigt wenig Einfluss auf Güte der Mischproben (Daten nicht gezeigt)
- ▶ Probeanzahl für Mesoplastik deutlich höher als für Bodenparameter (Daten nicht gezeigt)



Microplastics and Nanoplastics

About [Articles](#) [Submission Guidelines](#)

[Submit manuscript](#) 

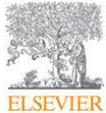
Review | [Open Access](#) | [Published: 13 July 2023](#)

## Status quo of operation procedures for soil sampling to analyze microplastics

[Kristof Dorau](#) , [Martin Hoppe](#), [Daniel Rückamp](#), [Jan Köser](#), [Georg Scheeder](#), [Katrin Scholz](#) & [Elke Fries](#)

[Microplastics and Nanoplastics](#) **3**, Article number: 15 (2023) | [Cite this article](#)

774 Accesses | **3** Altmetric | [Metrics](#)



Colloids and Surfaces A: Physicochemical and  
Engineering Aspects

Volume 676, Part B, 5 November 2023, 132255



## Soil organic matter facilitates the transport of microplastic by reducing surface hydrophobicity

[Federico M. Ivanic](#) <sup>a, b</sup>  , [Georg Guggenberger](#) <sup>b</sup>, [Susanne K. Woche](#) <sup>b</sup>, [Jörg Bachmann](#) <sup>b</sup>,  
[Martin Hoppe](#) <sup>c</sup>, [Jannis F. Carstens](#) <sup>b</sup>

## Geplante Publikationen

- ▶ Mesoplastik (< 5 mm, under review)
- ▶ Mikroplastik (5 mm – 1 mm)
- ▶ Mikroplastik (< 1 mm)



NanoImpact

Volume 32, October 2023, 100484



## Palladium-doped and undoped polystyrene nanoplastics in a chronic toxicity test for higher plants: Impact on soil, plants and ammonium oxidizing bacteria

[Martin Hoppe](#) <sup>a</sup>  , [Jan Köser](#) <sup>a</sup>, [Georg Scheeder](#) <sup>a</sup>, [Axel Lamparter](#) <sup>a</sup>, [Kristof Dorau](#) <sup>a</sup>,  
[Lena Grüger](#) <sup>a</sup>, [Georg Dierkes](#) <sup>c</sup>, [Karsten Schlich](#) <sup>b</sup>

# Fachgespräch – Probenahme von Plastik in Böden



Das Fachgespräch richtet sich an alle, die sich für die Probenahme und Analyse von Mikroplastik in Böden interessieren. Am ersten Tag ist eine allgemeine Einführung zum Thema Mikroplastik in der Umwelt vorgesehen. Hierbei liegt der Schwerpunkt auf dem Kompartiment Boden. Zunächst wird der Stand der Forschung in einem Vortagsblock dargestellt und diskutiert. Anschließend ist ein Posterspotlight und eine Postersession mit Beiträgen der Teilnehmenden geplant. Am zweiten Tag werden die Ergebnisse aus zwei Forschungsvorhaben zur Probenahme vorgestellt und diskutiert (Plastik und Mikroplastik im Boden, **PLASBo**, UBA Österreich; Soil Sampling for Microplastic Analysis, **SOSMA**, Refoplanvorhaben des UBA Deutschland). Es besteht ebenfalls die Möglichkeit, die Probenvorbereitung und bildgebende Analytik für Meso- und Mikroplastik in den Laboren der BGR anzusehen.

## 09. – 10.10.2024, BGR in Hannover

Großer Sitzungssaal, kostenlose Teilnahme

- 1. Tag (13:00 – 17:30 Uhr)
- 2. Tag (09:00 – 13:00 Uhr)

## Anmeldung

Bitte melden Sie sich bis zum **31.08.2024** an. Teilen Sie uns bitte mit, ob Sie an der **Abendveranstaltung** (Brauhaus Ernst August, Selbstzahler) teilnehmen möchten und ob Sie ein eigenes **Poster** vorstellen möchten. Anmeldungen bitte unter der folgenden Adresse: Verena.Schulze@bgr.de



## Kontakt

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)  
Stilleweg 2  
30655 Hannover

## Ansprechpersonen:

Kristof.Dorau@bgr.de  
Martin.Hoppe@bgr.de  
Verena.Schulze@bgr.de

Stand: 06/2024



Im Auftrag des:



Die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) ist eine wissenschaftlich-technische Oberbehörde im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK).



Bildnachweise: © BGR



## Plastik im Boden - Probenahme, Probenauf- bereitung und Analytik

### Fachgespräch zur Probenahme von Mikroplastik in Böden

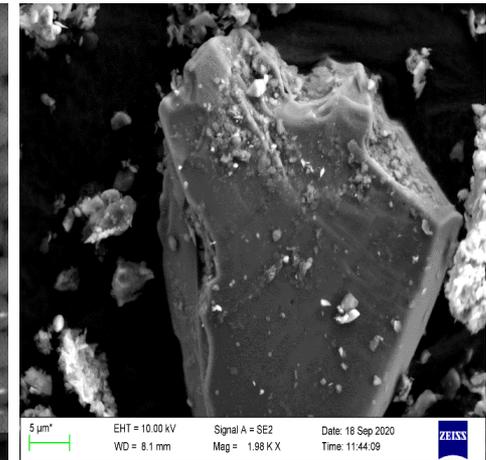
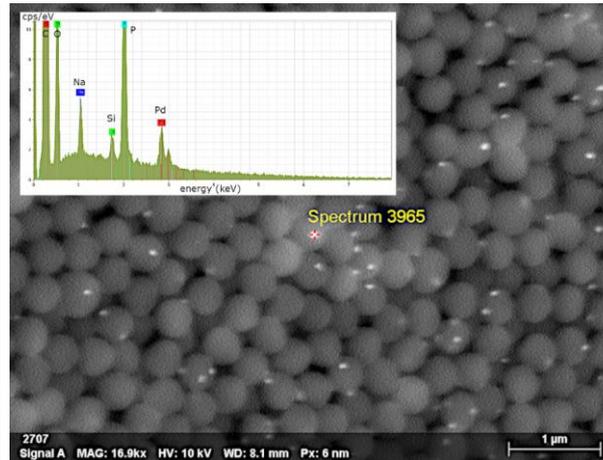
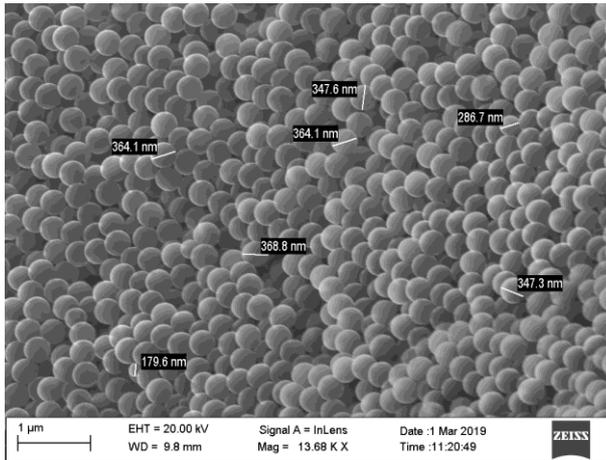
(SOSMA, Förderkennzeichen: FKZ: 372174 2020, Umweltbundesamt)

Bundesanstalt für  
Geowissenschaften  
und Rohstoffe

[www.bgr.bund.de](http://www.bgr.bund.de)

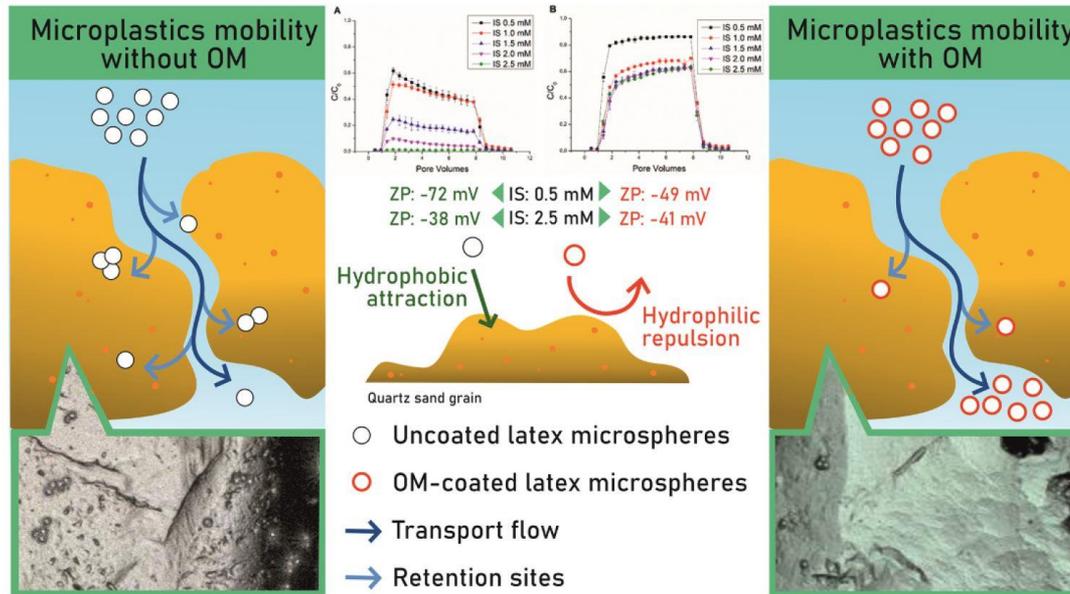
Herzlichen Dank an alle beteiligten Kolleg\*innen!

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!



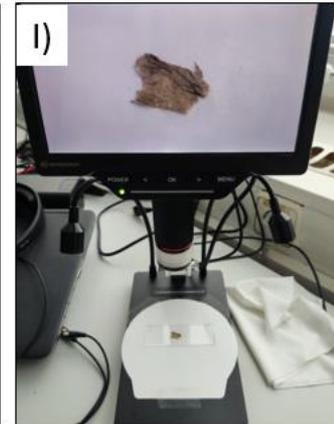
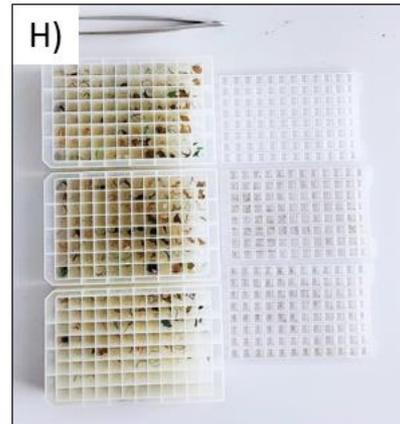
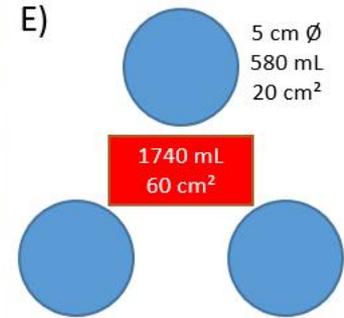
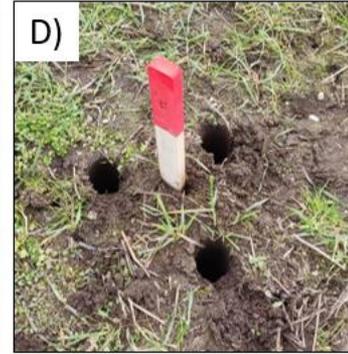
## Transport von Mikroplastik in Sandsäulen

- ▶ Adsorption von gelöster organischer Substanz erhöht die Mobilität von Modellpartikeln in Sandsäulen



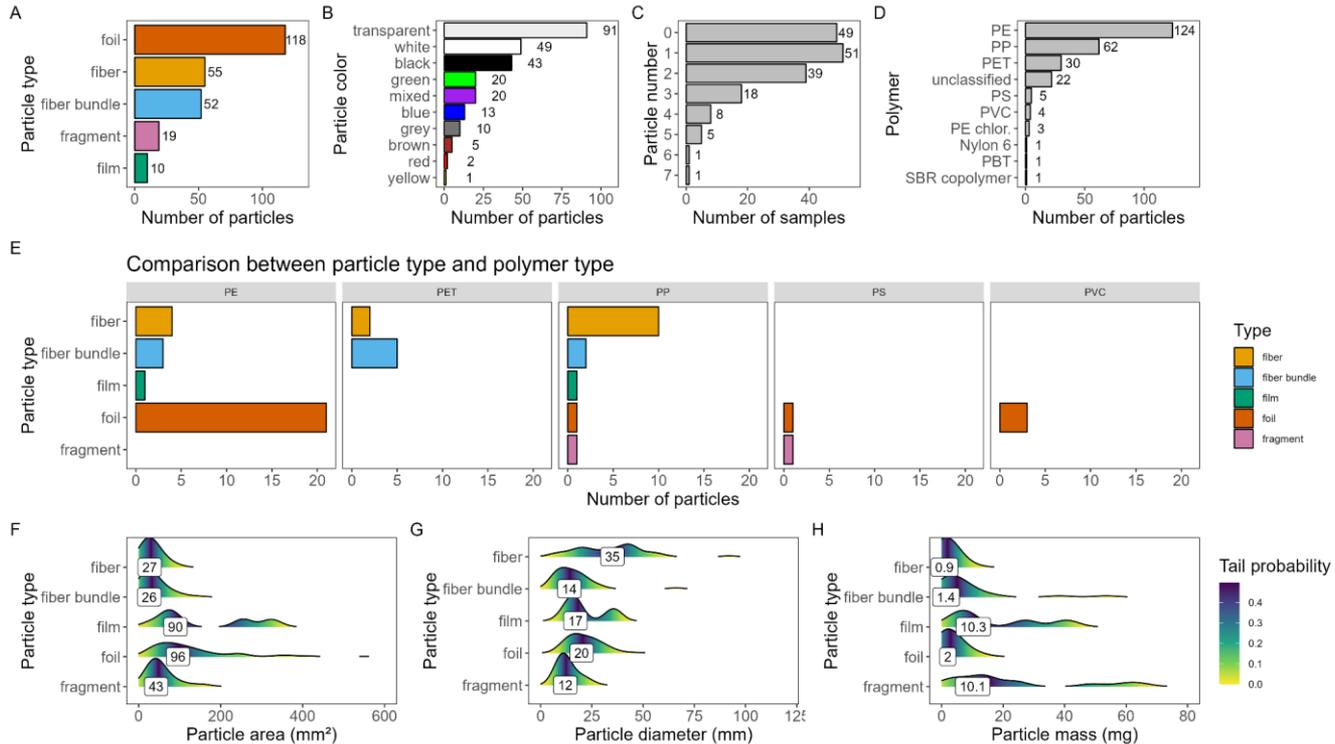
Säulenversuche zur Wechselwirkung von Mikroplastik mit Sand (Ivanic et al., 2023)

# Anhang - Workflow für Probenahme und -vorbereitung



# Anhang - Mesoplastik

## Fußabdruck der Mesoplastik-Funde



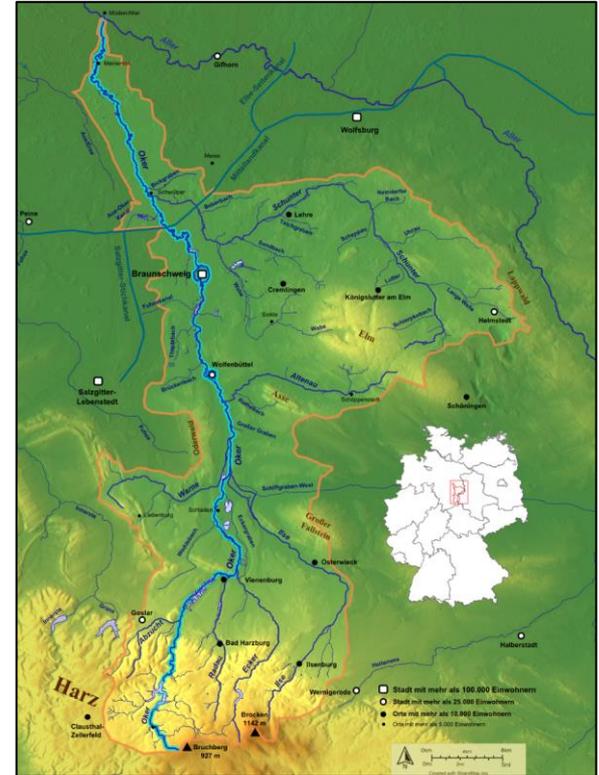
# Anhang - Wie geht es weiter?

## Probenahme, -aufbereitung und Analytik von Meso- und Mikroplastik in Böden (SOSMA)

- ▶ Auswertung der vorhandenen Daten (Mikroplastik) und Ableitung von Probenahmestrategien
- ▶ Ableitung von Probenahmestrategien für andere Eintragspfade (u. a. Einzugsgebiet der Oker)

## Nachweis, Verbleib und Wirkung von Mikro- und Nanoplastik

- ▶ Weitere Versuche mit größeren Probekollektiven (Benetzungshemmung, Mikroorganismen)
- ▶ Herstellung von Modellpartikeln mit unterschiedlichen Eigenschaften (Polymer, Oberflächenladung, Form) für weiterführende Versuche



Wikimedia.org

DIN EN ISO 22030:2011-09, Bodenbeschaffenheit\_ - Biologische Verfahren\_ - Chronische Toxizität in höheren Pflanzen (ISO\_22030:2005); Deutsche Fassung EN\_ISO\_22030:2011. Beuth Verlag GmbH. <https://doi.org/10.31030/1804931>

**Dorau, K., Hoppe, M., Rückamp, D., Köser, J., Scheeder, G., Scholz, K., & Fries, E. (2023). Status quo of operation procedures for soil sampling to analyze microplastics. *Microplastics and Nanoplastics*, 3(1), Article 1. <https://doi.org/10.1186/s43591-023-00063-5>**

Hartmann, N. B., Hüffer, T., Thompson, R. C., Hassellöv, M., Verschoor, A., Daugaard, A. E., Rist, S., Karlsson, T., Brennholt, N., Cole, M., Herrling, M. P., Hess, M. C., Ivleva, N. P., Lusher, A. L., & Wagner, M. (2019). Are We Speaking the Same Language? Recommendations for a Definition and Categorization Framework for Plastic Debris. *Environmental Science & Technology*, 53(3), Article 3. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b05297>

**Hoppe, M., Köser, J., Scheeder, G., Lamparter, A., Dorau, K., Grüger, L., Dierkes, G., & Schlich, K. (2023). Palladium-doped and undoped polystyrene nanoplastics in a chronic toxicity test for higher plants: Impact on soil, plants and ammonium oxidizing bacteria. *NanoImpact*, 32, 100484. <https://doi.org/10.1016/j.impact.2023.100484>**

**Ivanic, F. M., Guggenberger, G., Woche, S. K., Bachmann, J., Hoppe, M., & Carstens, J. F. (2023). Soil organic matter facilitates the transport of microplastic by reducing surface hydrophobicity. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 676, 132255. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2023.132255>**

Jahnke, A., Arp, H. P. H., Escher, B. I., Gewert, B., Gorokhova, E., Kühnel, D., Ogonowski, M., Potthoff, A., Rummel, C., Schmitt-Jansen, M., Toorman, E., & MacLeod, M. (2017). Reducing Uncertainty and Confronting Ignorance about the Possible Impacts of Weathering Plastic in the Marine Environment. *Environmental Science & Technology Letters*, 4(3), Article 3. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.7b00008>

Maity, S., Guchhait, R., Sarkar, M. B., & Pramanick, K. (2022). Occurrence and distribution of micro/nanoplastics in soils and their phytotoxic effects: A review. *Plant, Cell & Environment*, 45(4), 1011–1028. <https://doi.org/10.1111/pce.14248>

Mitrano, D. M., Wick, P., & Nowack, B. (2021). Placing nanoplastics in the context of global plastic pollution. *Nature Nanotechnology*, 16(5), 491–500. <https://doi.org/10.1038/s41565-021-00888-2>

Nizzetto, L., Futter, M., & Langaas, S. (2016). Are Agricultural Soils Dumps for Microplastics of Urban Origin? *Environmental Science & Technology*, 50(20), 10777–10779. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b04140>

Schwaferts, C., Niessner, R., Elsner, M., & Ivleva, N. P. (2019). Methods for the analysis of submicrometer- and nanoplastic particles in the environment. *Trends in Analytical Chemistry*, 112, 52–65. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2018.12.014>

Vos, M., Wolf, A. B., Jennings, S. J., & Kowalchuk, G. A. (2013). Micro-scale determinants of bacterial diversity in soil. *FEMS Microbiology Reviews*, 37(6), Article 6. <https://doi.org/10.1111/1574-6976.12023>

Wang, F., Wang, Q., Adams, C. A., Sun, Y., & Zhang, S. (2022). Effects of microplastics on soil properties: Current knowledge and future perspectives. *Journal of Hazardous Materials*, 424, 127531. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127531>

Zhang, Z., Cui, Q., Chen, L., Zhu, X., Zhao, S., Duan, C., Zhang, X., Song, D., & Fang, L. (2022). A critical review of microplastics in the soil-plant system: Distribution, uptake, phytotoxicity and prevention. *Journal of Hazardous Materials*, 424, 127750. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127750>