



## Die Rolle der Landwirtschaft bei der (Mikro-)Plastik-Belastung in Böden und Oberflächengewässern

Elke Brandes ([elke.brandes@thuenen.de](mailto:elke.brandes@thuenen.de))

### Abstract

Die Verschmutzung der Weltmeere mit Mikroplastik (MP, Plastikpartikel von 100nm bis 5 mm Größe) hat in den vergangenen Jahren in Wissenschaft und Gesellschaft an Bedeutung gewonnen. In weitaus kleinerem Umfang wurde bislang zur Belastung der terrestrischen Ökosysteme mit Kunststoffpartikeln und deren ökologischen und agronomischen Auswirkungen geforscht. Trotz einer dünnen Datenlage ist in jüngster Zeit die Landwirtschaft im Zusammenhang mit der Plastikbelastung von Böden in den Fokus gerückt. Landwirtschaftliche Böden spielen eine Schlüsselrolle, da Mikroplastik, das aus unterschiedlichen Quellen eingetragen wird, einerseits die Bodeneigenschaften beeinträchtigen und andererseits durch Oberflächenabfluss und Erosion in nahegelegene Gewässer verfrachtet werden kann. Dieser Artikel fasst den Kenntnisstand zusammen und diskutiert offene Forschungsfragen bezüglich der Rolle der Landwirtschaft bei der Mikroplastikbelastung in Böden und Gewässern.

### 1. Einleitung

Umweltverschmutzung durch Plastik wurde lange Zeit vor allem in marinen Ökosystemen untersucht. Seit kurzem ist auch die terrestrische Umwelt in den öffentlichen und wissenschaftlichen Fokus gerückt. Viele interdisziplinäre Arbeitsgruppen forschen aktuell an Analysemethoden zur Identifizierung und Quantifizierung von Mikroplastik in Umweltmedien, an den Auswirkungen auf Bodenstruktur und Biota, sowie an räumlich-zeitlichen Modellen für ein besseres Systemverständnis der Eintragsquellen, -pfade und Transportprozesse (z.B. in der BMBF Forschungsmaßnahme „Plastik in der Umwelt“ <https://bmbf-plastik.de/>).

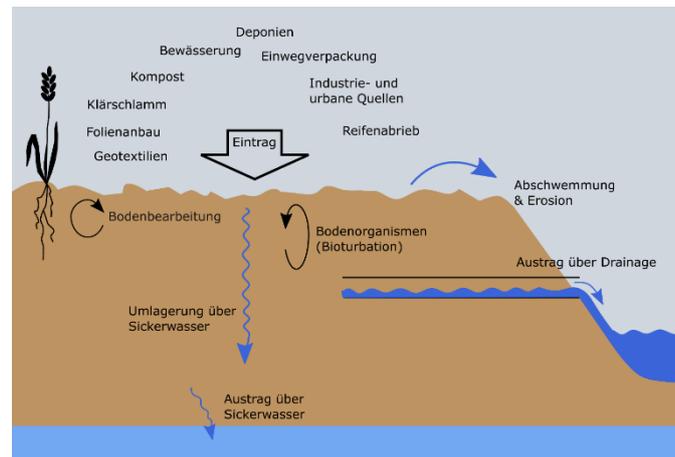
Die Landwirtschaft wird einerseits häufig in der öffentlichen Wahrnehmung als eine wesentliche Verursacherin der (Mikro-)Plastikbelastung von Böden angesehen. Dies liegt unter anderem an dem auffälligen Unterfolienanbau oder der Nutzung von Silagefolie. Andererseits nehmen Landwirte den kommunen kompostierten Bioabfall und Klärschlamm als Dienstleistung im Sinne der Kreislaufwirtschaft ab, um ihn zur Bodenverbesserung zu nutzen. Da diese Substrate häufig stark mit Mikroplastik belastet sind (Weithmann et al. 2018; Crossman et al. 2020), nimmt der Landwirtschaftssektor damit ebenso die Rolle des Leittragenden der „Nebenwirkungen“ einer ressourcenschonenden Abfallwirtschaft ein.

Mikroplastik (MP) liegt ubiquitär in der Umwelt vor und wurde auch in Böden ohne Klärschlamm, Kompost und Folienanbau nachgewiesen (Piehl et al. 2018). Es ist jedoch bislang weitgehend unbekannt, welche Mengen MP aus welchen anthropogenen Quellen in die Böden eingetragen werden. Somit ist auch die Bedeutung der mit der Landwirt-

schaft assoziierten MP-Quellen derzeit nicht sicher quantifizierbar.

Neben den Meeren werden vor allem die Böden als Orte der MP-Anreicherung gesehen; über die Bedeutung, den Verbleib und die tatsächlichen Umweltwirkungen liegen jedoch bisher kaum Erkenntnisse vor. Erste Studien legen nahe, dass ein erheblicher Austrag von Mikroplastik aus landwirtschaftlichem Boden in Abhängigkeit von Wetterbedingungen und hydraulischen Bodeneigenschaften möglich ist (Crossman et al. 2020). Da insbesondere landwirtschaftliche Böden von Erosion betroffen sind, ist dieser Transportweg für Mikroplastik in Oberflächengewässer von großem Interesse in der Agrarforschung.

In den letzten Jahren hat die öffentliche Diskussion bezüglich Mikroplastik deutlich zugenommen und den Handlungsdruck auf die Politik erhöht. Effiziente Minderungsmaßnahmen können jedoch zum jetzigen Zeitpunkt aufgrund der geringen Wissensgrundlage noch nicht abgeleitet werden. Die ersten Ergebnisse und Indizien sollten daher mit mehr Zahlen und Fakten hinterlegt werden, um die landwirtschaftlichen Eintragspfade gegenüber anderen Eintragspfaden (z.B. Littering, Reifenabrieb, urbane Quellen) einordnen und geeignete Handlungsoptionen entwickeln zu können.



**Abb 1:** Schema der möglichen Einträge und Umlagerungsprozesse von Mikroplastik in landwirtschaftlichen Böden und der potentiellen Austragswege in Grundwasser und Oberflächengewässer.

### 2. Offene Forschungsfragen:

Um in Zukunft besser einordnen zu können, welche Rolle landwirtschaftliche Aktivitäten bei der Mikroplastikbelastung der Böden spielt, müssen etliche Forschungsfragen bearbeitet werden, die hier in drei thematische Kategorien eingeteilt sind: Eintrag, Gehalte im Boden und Austrag.

1. **Eintrag:**  
Welche Quellen tragen wo und wie viel Mikroplastik in landwirtschaftliche Böden ein?
2. **Gehalte im Boden:**  
Zu welchen Mikroplastik-Konzentrationen haben diese Einträge wo und in welcher Art (Plastiktyp, Größe und Form) in landwirtschaftlichen Böden geführt?
3. **Austrag:**  
Welche Einflussgrößen bestimmen in welchem Maße die regionale Erosion?

Wie sind die Austragspfade mit dem Austragsgeschehen von Mikroplastik gekoppelt?

Wie verhält sich Mikroplastik bei Erosionsprozessen? Findet eine An- oder Abreicherung von Mikroplastik im erodierten Boden statt? Welche Rolle spielen Bodentyp und –art, Abbauprozesse und Zwischentransporte?

Im folgenden Abschnitt wird auf diese drei Bereiche näher eingegangen unter Berücksichtigung des aktuellen Forschungsstandes, des weiteren Forschungsbedarfs sowie der damit verbundenen Herausforderungen.

### 3. Eintrag von Mikroplastik in die Böden

Mögliche Eintragsquellen, die insbesondere für landwirtschaftliche Böden relevant sein können, sind in Abbildung 1 aufgeführt. Mit einer Stoffstromanalyse für die Schweiz zeigten Kawecki und Nowack (2019), dass auf nationaler Ebene der überwiegende Teil des Plastiks als Makroplastik in Böden eingetragen wird. Was die Eintragsquellen anbelangt kamen die Autoren zu dem Ergebnis, dass sogenanntes Littering (unsachgemäß in die Umwelt entsorgter Abfall) den Hauptanteil einnimmt, aber auch die Sektoren Bauwesen, Landwirtschaft und Konsum wichtige Einträge verursachen. Dass sich in der Analyse deutliche Unterschiede zwischen den sieben untersuchten Plastiktypen ergaben, unterstützt die Empfehlung vieler anderer Wissenschaftler\*innen, Mikroplastikpartikel unterschiedlicher Charakteristiken differenziert zu betrachten. Modellierungsstudien, die anhand von Produktions- und Verarbeitungsdaten die Plastikemissionen in die Umwelt auf Sektor-Ebene abschätzen, liefern wichtige Anhaltspunkte zu den relevanten Quellen und Größenordnungen (Kawecki und Nowack 2019; Bertling et al. 2018). Unter Einbeziehung von regionalen Datensätzen lassen sich in räumlich differenzierten Modellen darüber hinaus Aussagen treffen, wo besonders hohe MP-Belastungen zu erwarten sind. Durch Bodenanalysen auf MP von Flächen mit bekannter Nutzungshistorie (z.B. Komposteinsatz, Folieneinsatz, Kontrollflächen) sowie direkter Analyse potentieller Quellen, wie Kompost, können die landwirtschaftlichen Eintragsmengen von Mikroplastik punktuell quantifiziert werden, und somit der Plausibilisierung und Einordnung von flächendeckenden, räumlich differenzierten Modellergebnissen dienen. Auch ließe sich damit die nichtlandwirtschaftliche „Hintergrundbelastung“, zum Beispiel durch diffusen Lufteintrag, abschätzen. Feldbeprobungen können außerdem dazu dienen, wichtige Parameter für Modelle, wie

zum Beispiel den im Feld verbleibenden Anteil von Mulchfolie, zu erheben.

### 4. Gehalte im Boden

Durch seine Langlebigkeit reichert sich MP in der Umwelt an. Diese Eigenschaft legt nahe, dass sowohl die Einträge aus der Vergangenheit als auch die zukünftig Belastungswege bei der Untersuchung und Analyse von Umweltkompartimenten auf MP-Belastung berücksichtigt werden sollten. Bislang veröffentlichte Daten zu Mikroplastikgehalten in Böden zeigen eine hohe Spannweite, was durch Unterschiede in der Aufbereitung und Analysemethodik, der berücksichtigten Partikelgrößen, des Probevolumens, aber sicherlich auch mit einer sehr heterogenen Belastungslandschaft zusammen hängt (Scheurer und Bigalke 2018; Corradini et al. 2019; Zhang und Liu 2018; Crossman et al. 2020). Von der Etablierung eines standardisierten Analyseverfahrens für ein flächenhaftes Monitoring von Mikroplastikgehalten in Böden ist die Forschung noch weit entfernt. Gleichzeitig drängt die Öffentlichkeit auf Regulation zur Verminderung der Plastikeinträge, was die Dringlichkeit der weiteren Forschung verdeutlicht. Die Analysemethoden sollten daher gezielt auf die jeweilige Forschungsfrage ausgerichtet sein, um einen höchstmöglichen Erkenntnisgewinn zu erzielen. Wenn zum Beispiel mit einem ersten Screening von vielen Bodenproben aus Gebieten mit unterschiedlichen potentiellen Belastungsquellen die Bedeutung der verschiedenen Quellen zunächst eingeschätzt werden soll, wäre ein hoher Proben-durchsatz das Mittel der Wahl, bei der sich die Ergebnisse auf die Masse ausgewählter, häufig vorkommender Polymere beschränkt (Steinmetz et al. 2020). Aus den Ergebnissen analytischer Screeningansätze können Indikatoren für Belastungshotspots abgeleitet werden. Diese Ergebnisse zu Mikroplastikgehalten können in bestehende Modellstrukturen eingebaut und hoch skaliert werden, um auf nationaler Ebene regional differenzierte, aus sämtlichen Eintragsquellen stammende Belastungspotentiale im Boden abzuschätzen. Ist das Ziel jedoch, MP-Verbleib und Verfrachtung im Boden besser zu verstehen (siehe Abschnitt 5), sind Information über Größe, Form und Anzahl von MP Partikeln auf belasteten Böden wichtig. Hierfür sollte eine aufwendigere, spektroskopische Methode gewählt werden (Hurley et al. 2018).

Einige ökotoxikologische Studien deuten auf schädigende Wirkungen von Plastikpartikeln auf Bodenlebewesen hin (z.B. Kim und An 2019; Awet et al. 2018). Da diese Studien jedoch häufig in Laborversuchen unter Beigabe von hohen Mikroplastik-Gehalten durchgeführt wurden (Büks et al. 2020; Bänsch-Baltruschat et al. 2020), sind Rückschlüsse aus diesen Ergebnissen auf mögliche Schädwirkungen in der Umwelt nur begrenzt möglich. Als Basis für eine Risikobewertung werden neben toxikologischen Ergebnissen auch Daten benötigt, die Aufschluss darüber geben, welchen Mengen von Mikroplastikpartikeln ein Organismus in der Umwelt aktuell und in Zukunft ausgesetzt ist. Dabei ist es wichtig zwischen MP-Charakteristiken wie zum Beispiel der Größe und Form zu differenzieren, da diese festlegen, von welchen Organismengruppen ein

Partikel aufgenommen wird. Es ist daher notwendig, das heterogene Gemisch aus Mikroplastikpartikel in funktionelle Gruppen einzuteilen, und für diese eine Risikobewertung für unterschiedliche Organismengruppen durchzuführen. Während dies in der Vergangenheit für Plastik in marinen Ökosystemen vorgeschlagen wurde, wo insbesondere die Größe und die Belastung mit toxischen Chemikalien eine Rolle spielt (Koelmans et al. 2017), ist vermutlich zusätzlich die Form der Mikroplastikpartikel ein wichtiger Faktor für die Wirkungen in Böden (Rillig et al. 2019).

## 5. Austrag

Unter den diffusen Plastikeinträgen in die Flüsse und Meere wird die Abschwemmung sowie die Erosion von landwirtschaftlichen Flächen als wichtigster landseitiger Eintragspfad vermutet. Beide Prozesse spielen eine zentrale Rolle im Boden- und Gewässerschutz, da sie mit der Bodensubstanz etliche weitere, viel diskutierte (Schad-)Stoffe (z.B. Phosphat, Pflanzenschutzmittel, Arzneimittel, Schwermetalle, langlebige organische Stoffe) in Gewässer eintragen. Für eine realistische Abschätzung der MP-Einträge in Gewässer fehlen Kenntnisse über das Verhalten der Partikel bei Abschwemmungs- und Erosionsereignissen. Erste Hinweise deuten an, dass der Austrag von MP nicht linear mit dem Bodenaustrag verläuft, sondern u.a. durch Bodenart und Intensität des Niederschlagsereignisses beeinflusst wird. Auch stellen die Größe und Dichte der MP-Partikel relativ zu den Bodenpartikeln, sowie die Form wichtige Faktoren für das Erosionsverhalten von Mikroplastik dar. Grundsätzlich geht man davon aus, das leichtere Partikel, die zum Beispiel aus Folienresten stammen können (Light Density Polyethylen, LDPE mit einer Dichte von  $0,9 \text{ g cm}^{-3}$ ) präferenziell ausgetragen werden, aber auch der Einschluss in Bodenaggregate hat einen wichtigen Einfluss (Brandes et al. 2020). Außerdem wird der Verbleib von MP im Boden durch Faktoren, die auf die vertikale Umverteilung im Boden einwirken, beeinflusst. Mikroplastikpartikel wurden zum Beispiel in Auenböden in bis zu 1 m Tiefe gefunden (Weber und Opp 2020), in Ackerböden findet dagegen eine homogene Durchmischung im Pflughorizont (obere 30 cm) statt, wobei Mikroplastikpartikel bei der Aufnahme und Ausscheidung durch Regenwürmer entlang der Gänge auch in tiefere Bereiche gelangen könnten (Rillig et al. 2017; Huerta Lwanga et al. 2017). Das in tiefere Bodenschichten verfrachtete Mikroplastik ist somit weniger anfällig für einen Austrag über Abschwemmung oder Erosion in naheliegende Gewässer. Bei drainierten Ackerböden ist ein Austrag über das Drainagewasser nicht auszuschließen.

Um die Transportprozesse von MP bei Erosionsereignissen zu untersuchen, sind auf kleinskaliger Ebene Feldversuche und Beprobungen notwendig. Auf erosionsgefährdeten Versuchsfeldern kann zum einen das Erosionsgeschehen quantifiziert werden. Neben einer ereignisgesteuerten Beprobung (z.B. nach Starkregenereignissen) von erosionsgefährdeten Versuchsfeldern kann durch Modellversuche mit Regensimulation auch unabhängig von Umweltereignissen das Erosions-

geschehen untersucht werden. Das Verhalten von Mikroplastik bei Erosionsprozessen sollte sowohl durch die Zugabe von Referenzmaterial als auch durch die Analyse der im Boden vorhandenen Partikel untersucht werden.

## 6. Handlungsoptionen und Ausblick

Zum aktuellen Zeitpunkt liegen noch keine ausreichend fundierten Kenntnisse über die Eintragsquellen, MP Gehalte im Boden und Austragspfade in aquatische Ökosysteme vor, um eine Risikobewertung von Mikroplastik in Böden durchzuführen. Die vorangehenden Abschnitte haben die Notwendigkeit für weitergehende Forschung aufgezeigt. Aus der dadurch gewonnenen Sachgrundlage können in Zukunft mögliche Minderungsmaßnahmen abgeleitet bzw. auf ihre Effizienz und Randbedingungen hin geprüft werden. Dabei muss die Frage gestellt werden, welche Maßnahmen an welcher Stelle im Lebenskreislauf für welchen Plastiktyp den höchsten Nutzen bringen, unter Berücksichtigung der Kosten. Beispielsweise wäre zu untersuchen, welche Auswirkungen eine Reduzierung der landwirtschaftlichen Kompostverwertung im Vergleich zu verbesserten Reinigungsverfahren in Kompostanlagen auf den Plastikeintrag in landwirtschaftliche Böden einerseits hat, und welche Nebeneffekte damit einhergehen.

In ihrem aktuellen Statusbericht zeigte die Europäische Umweltagentur auf, dass 12,7% der Europäischen Landfläche von mittlerer bis starker Erosion (Bodenverlust von  $>5\text{t/ha}$ ) betroffen sind, jedoch keine verbindlichen Richtlinien existieren um der Bodendegradierung entgegen zu wirken (European Environmental Agency 2019, nach Modellierungen von Panagos et al. 2015). In ihrer kürzlich veröffentlichten Roadmap für eine Neue Bodenstrategie sind sowohl Bodenerosion als auch Mikroplastikbelastung unter den Boden-spezifischen Umweltproblemen erwähnt, die gelöst werden müssen (European Commission 2020). Von besonderem Interesse für die landwirtschaftliche Praxis ist das Reduktionspotential von erosionsmindernden Maßnahmen (z.B. Mulchsaat, Erosionsschutzstreifen und Fahrgassenbegrünung, Gewässerrandstreifen) in Bezug auf Mikroplastikausträge, da diese Maßnahmen synergistische Wirkungen auf den Boden- und Gewässerschutz haben könnten. Das interdisziplinäre Zusammenspiel von Feldforschung, Analytik und Modellierung kann dazu beitragen, ein Systemverständnis aufzubauen, Belastungshotspots abzugrenzen und Wirkungszusammenhänge zu identifizieren, die als Ansatzpunkte politischen Handelns dienen.

## Literaturverzeichnis

- Awet, T. T.; Kohl, Y.; Meier, F.; Straskraba, S.; Grün, A-L; Ruf, T. et al. (2018): Effects of polystyrene nanoparticles on the microbiota and functional diversity of enzymes in soil. In: *Environmental Sciences Europe* 30 (1), S. 11. DOI: 10.1186/s12302-018-0140-6.
- Bänsch-Baltruschat, Beate; Kocher, Birgit; Stock, Friederike; Reifferscheid, Georg (2020): Tyre and road wear particles (TRWP) - A review of generation, properties, emissions,

- human health risk, eco-toxicity, and fate in the environment. In: *The Science of the Total Environment*, S. 137823. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137823.
- Bertling, Jürgen; Hamann, Leandra; Bertling, Ralf (2018): Kunststoffe in der Umwelt. Mikro- und Makroplastik. Ursachen, Mengen, Umweltschicksale, Wirkungen, Lösungsansätze, Empfehlungen. Fraunhofer UMSICHT. Oberhausen.
- Brandes, Elke; Braun, Melanie; Rillig, Matthias C.; Leifheit, Eva F.; Steinmetz, Zacharias; Fiener, Peter; Thomas, Daniela (2020): (Mikro-)Plastik im Boden. In: *Bodenschutz* (3). DOI: 10.37307/j.1868-7741.2020.03.10.
- Büks, Frederick; van Schaik, Nicolette Loes; Kaupenjohann, Martin (2020): What do we know about how the terrestrial multicellular soil fauna reacts to microplastic? In: *SOIL* (6), S. 245–267. DOI: 10.5194/soil-6-245-2020.
- Corradini, Fabio; Bartholomeus, Harm; Huerta Lwanga, Esperanza; Gertsen, Hennie; Geissen, Violette (2019): Predicting soil microplastic concentration using vis-NIR spectroscopy. In: *The Science of the Total Environment* 650 (Pt 1), S. 922–932. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.09.101.
- Crossman, Jill; Hurley, Rachel R.; Futter, Martyn; Nizzetto, Luca (2020): Transfer and transport of microplastics from biosolids to agricultural soils and the wider environment. In: *Science of the Total Environment* 724, S. 138334. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138334.
- European Commission (2020): Roadmap - New Soil Strategy. Healthy soil for a healthy life. European Commission.
- European Environmental Agency (2019): The European Environment State and Outlook 2020.
- Huerta Lwanga, Esperanza; Gertsen, Hennie; Gooren, Harm; Peters, Piet; Salánki, Tamás; van der Ploeg, Martine et al. (2017): Incorporation of microplastics from litter into burrows of *Lumbricus terrestris*. In: *Environmental Pollution* 220, S. 523–531. DOI: 10.1016/j.envpol.2016.09.096.
- Hurley, Rachel R.; Lusher, Amy L.; Olsen, Marianne; Nizzetto, Luca (2018): Validation of a method for extracting microplastics from complex, organic-rich, environmental matrices. In: *Environmental Science & Technology* 52 (13), S. 7409–7417. DOI: 10.1021/acs.est.8b01517.
- Kawecki, Delphine; Nowack, Bernd (2019): Polymer-specific modeling of the environmental emissions of seven commodity plastics as macro- and microplastics. In: *Environmental Science & Technology* 53 (16), S. 9664–9676. DOI: 10.1021/acs.est.9b02900.
- Kim, Shin Woong; An, Youn-Joo (2019): Soil microplastics inhibit the movement of springtail species. In: *Environment International* 126, S. 699–706. DOI: 10.1016/j.envint.2019.02.067.
- Koelmans, Albert A.; Besseling, Ellen; Foekema, Edwin; Kooi, Merel; Mintenig, Svenja; Ossendorp, Bernadette C. et al. (2017): Risks of plastic debris: unravelling fact, opinion, perception, and belief. In: *Environmental Science & Technology* 51 (20), S. 11513–11519. DOI: 10.1021/acs.est.7b02219.
- Panagos, Panos; Borrelli, Pasquale; Poesen, Jean; Ballabio, Cristiano; Lugato, Emanuele; Meusburger, Katrin et al. (2015): The new assessment of soil loss by water erosion in Europe. In: *Environmental Science & Policy* 54, S. 438–447. DOI: 10.1016/j.envsci.2015.08.012.
- Piehl, Sarah; Leibner, Anna; Löder, Martin G. J.; Dris, Rachid; Bogner, Christina; Laforsch, Christian (2018): Identification and quantification of macro- and microplastics on an agricultural farmland. In: *Scientific Reports* 8 (1), S. 17950. DOI: 10.1038/s41598-018-36172-y.
- Rillig, Matthias C.; Lehmann, Anika; Ryo, Masahiro; Bergmann, Joana (2019): Shaping up: toward considering the shape and form of pollutants. In: *Environmental Science & Technology* 53 (14), S. 7925–7926. DOI: 10.1021/acs.est.9b03520.
- Rillig, Matthias C.; Ziersch, Lisa; Hempel, Stefan (2017): Microplastic transport in soil by earthworms. In: *Scientific Reports* 7 (1), S. 1362. DOI: 10.1038/s41598-017-01594-7.
- Scheurer, Michael; Bigalke, Moritz (2018): Microplastics in Swiss floodplain soils. In: *Environmental Science & Technology* 52 (6), S. 3591–3598. DOI: 10.1021/acs.est.7b06003.
- Steinmetz, Zacharias; Kintzi, Aaron; Muñoz, Katherine; Schaumann, Gabriele E. (2020): A simple method for the selective quantification of polyethylene, polypropylene, and polystyrene plastic debris in soil by pyrolysis-gas chromatography/mass spectrometry. In: *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, S. 104803. DOI: 10.1016/j.jaap.2020.104803.
- Weber, Collin Joel; Opp, Christian (2020): Spatial patterns of mesoplastics and coarse microplastics in floodplain soils as resulting from land use and fluvial processes. In: *Environmental Pollution* (Barking, Essex : 1987) 267, S. 115390. DOI: 10.1016/j.envpol.2020.115390.
- Weithmann, Nicolas; Möller, Julia N.; Löder, Martin G. J.; Piehl, Sarah; Laforsch, Christian; Freitag, Ruth (2018): Organic fertilizer as a vehicle for the entry of microplastic into the environment. In: *Science Advances* 4 (4), eaap8060. DOI: 10.1126/sciadv.aap8060.
- Zhang, G. S.; Liu, Y. F. (2018): The distribution of microplastics in soil aggregate fractions in south-western China. In: *The Science of the Total Environment* 642, S. 12–20. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.06.004.

## Korrespondenzadresse

Dr. Elke Brandes  
Thünen-Institut für Ländliche Räume  
Bundesallee 64  
38116 Braunschweig  
Tel. +49 (0)531 / 596 - 5255  
Fax. +49 (0)531 / 596 - 5599  
[elke.brandes@thuenen.de](mailto:elke.brandes@thuenen.de)