

Executive Summary



Mikrokunststoffe in Komposten und Gärprodukten aus Bioabfallverwertungsanlagen und deren Eintrag in landwirtschaftlich genutzte Böden - Erfassen, Bewerten, Vermeiden (MiKoBo)

Projektlaufzeit: 01.03.2018 – 30.09.2021

Autoren:

Rahma Abdi ², Ansilla Bayha ⁴, Christian Bonten ⁵, Franz Brümmer ², Vivian Budig ², Detlef Clauß ⁶, Ruth Freitag ¹, Jens Forberger ⁴, Gabriela Gromer ⁴, Lea Kneiße ², Ellen Kandeler ³, Martin Kranert ⁶, Christian Laforsch ⁷, Martin Löder ⁷, Sven Marhan ³, Hildemar Mendez-Guillen ⁶, Julia Möller ⁷, Maria Anna Lioba von Moers-Meißner ², Holger Pagel ³, Julia Resch ⁵, Uwe Schnepf ², Lion Schöpfer ³, Thomas Steiner ¹, Thilo Streck ³

¹ Universität Bayreuth, Lehrstuhl für Bioprozesstechnik (BPT), ² Universität Stuttgart, Institut für Biomaterialien und biomolekulare Systeme (IBBS), ³ Universität Hohenheim, Institut für Bodenkunde und Standortslehre (IBS), ⁴ Fraunhofer Institut für Chemische Technologie (ICT), ⁵ Universität Stuttgart, Institut für Kunststofftechnik (IKT), ⁶ Universität Stuttgart, Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft (ISWA), ⁷ Universität Bayreuth, Lehrstuhl für Tierökologie I (TÖK I)



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

Die Arbeiten des Programms Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung werden mit Mitteln des Landes Baden-Württemberg gefördert

Oktober 2022

Executive Summary

1. Einführung

Hinsichtlich der Belastung und Gefährdung terrestrischer Ökosysteme durch Mikrokunststoffe (kurz: MKS, Kunststoffpartikel kleiner 5 mm) bestehen noch erhebliche Wissenslücken. MKS können potenziell in das Nahrungsnetz gelangen und stehen unter dem Verdacht, wichtige Bodenfunktionen zu verändern. Daher sind Untersuchungen zum Vorkommen und Verhalten von MKS in terrestrischen Ökosystemen unerlässlich. Eine mögliche Quelle für MKS in Böden sind Komposte und Gärprodukte aus Bioabfallverwertungsanlagen, die u.a. als Düngemittel und Bodenverbesserer in der Landwirtschaft genutzt werden. Die Kompostierung und Vergärung von häuslichem Bioabfall leisten einen wesentlichen Beitrag zur Kreislaufwirtschaft. Die Rolle von Komposten und Gärprodukten beim Eintrag von MKS in Böden war bisher nicht belastbar untersucht. Auch zur Auswirkung von MKS auf wesentliche Bodenfunktionen existierten bislang kaum Daten. Voraussetzung für die Risikobeurteilung von MKS in Komposten, Gärprodukten und Böden ist eine standardisierte Analytik für MKS in diesen Matrices sowie systematische Untersuchungen zur Veränderung bzw. Fragmentierung von Kunststoffen während des Behandlungsprozesses in Bioabfallverwertungsanlagen.

An dieser Stelle setzte das Vorhaben "Mikrokunststoffe in Komposten und Gärprodukten aus Bioabfallverwertungsanlagen und deren Eintrag in Böden - Erfassen, Bewerten, Vermeiden (MiKoBo)" an. **Ziel des Vorhabens** war die Bestimmung und Quantifizierung von MKS in Komposten und Gärprodukten sowie die Bewertung der potenziellen ökologischen Auswirkungen von MKS auf Bodenlebewesen und -funktionen. Grundlage dafür war die Etablierung von standardisierten Methoden zur Identifikation und Quantifizierung von Kunststoffen in terrestrischen Ökosystemen auf Basis der Partikelgrößen und -verteilung.

Das Projekt war in drei Themenbereiche gegliedert. Im **ersten Themenbereich** wurde die Analytik zur Erfassung der Partikelgröße und -anzahl von MKS unter Berücksichtigung möglichst aller relevanten Kunststoffe auf Grundlage bestehender Ansätze adaptiert und für feste Matrices weiterentwickelt. Gleichzeitig wurden geeignete Prüf- und Referenzmaterialien hergestellt und vollumfänglich charakterisiert, um das Verhalten und Veränderungen von MKS unter definierten Randbedingungen untersuchen zu können. Dabei wurden sowohl konventionelle, biologisch nicht abbaubare als auch biologisch abbaubare Kunststoffe untersucht.

Der **zweite Themenbereich** umfasste Untersuchungen zu der Entstehung und dem Verhalten von MKS in Bioabfallverwertungsanlagen sowie die Untersuchung und Bewertung der MKS-Bestandteile in den Produkten üblicher Bioabfallbehandlungsanlagen (Komposte,

Gärprodukte). Das Fragmentierungsverhalten (Entstehung von MKS) ausgewählter Kunststoffe wurde unter definierten Laborbedingungen und durch Experimente in Technikumsanlagen untersucht.

Im **dritten Themenbereich** wurden das Abbauverhalten von MKS im Boden sowie Auswirkungen von MKS auf Bodenorganismen und -funktionen in Feld- und Laborversuchen untersucht.

An dieser Stelle soll nochmals betont werden, dass der Abbau von Biokunststoffen nicht Gegenstand der Studie war, sondern die Fragmentierung von Kunststoffen in den biologischen Prozessen der Kreislaufwirtschaft. Die gemäß DIN EN 13432 und DIN EN 14995 zertifizierten biologisch abbaubaren Kunststoffe sind darauf hin entwickelt, bei der Kompostierung abgebaut und fragmentiert zu werden; nach der Novelle der BioAbfV (2022) ist eine Zusatzzertifizierung erforderlich, die eine vollständige Desintegration der bioabbaubaren Kunststoffe bei der Kompostierung in Partikel kleiner 2 mm innerhalb einer Rottezeit von 6 Wochen nachweist.

2. Ergebnisse

Themenbereich 1: Methodenentwicklung, Probenverarbeitung, Analytik, Prüf- und Referenzmaterialien

Methodenentwicklung der Probenaufbereitung und Analytik

Bis vor kurzem waren Böden kaum Gegenstand von MKS-Untersuchungen in der Wissenschaft, und es gab keine zuverlässige Methode kleinere MKS (kleiner 1 mm) aus der komplexen Bodenmatrix zu isolieren und zu analysieren. In Themenbereich 1 wurde eine neue Methode etabliert und validiert, mit der eine Trockenmasse von bis zu 250 g Bodenprobe auf MKS untersucht werden kann. Mit dieser Methode - einer Sequenz aus Dichtentrennung zur Abtrennung der schweren mineralischen Fraktion und enzymatisch-oxidativem Verdau zur Reduzierung der organischen Reste in der leichten Fraktion - ist es möglich, sowohl konventionelle als auch biologisch abbaubare MKS in der Größenordnung von 10 µm bis 500 µm (mittels µ-FTIR Spektroskopie) und 500 µm bis 5 mm (mittels ATR-FTIR Spektroskopie) in der komplexen Umweltmatrix Boden nachzuweisen. Dabei werden ökologisch relevante Parameter wie Kunststoffart, Größe und Form der MKS erfasst, die später zu einer fundierten Risikobewertung herangezogen werden können. Für Komposte, die zu einem großen Teil aus stabilisierten organischen Komponenten bestehen, ist die oben genannte Methode nicht anwendbar. Dies liegt daran, dass die Organik im Kompost zum einen eine ähnliche Dichte wie viele Kunststoffe aufweist und somit nicht durch eine Dichtentrennung abgetrennt werden kann, und zum anderen kaum mehr durch Enzyme (Hemmung der Enzyme

durch Huminstoffe) abbaubar ist, da in der Kompostierung das leicht abbaubare organische Material bereits durch mikrobielle Enzyme abgebaut wird und somit eine relativ stabile organische Rest-Matrix übrigbleibt. Daher konnten im Rahmen dieser Studie in Komposten aus Bioabfallbehandlungsanlagen nur MKS größer 1 mm (Analyse MKS kleiner 1mm ist Schwerpunkt des BWPLUS-Projektes „BabbA“) untersucht werden, die dazu unter dem Mikroskop aussortiert und mittels ATR-FTIR Spektroskopie gemessen wurden.

Herstellung der Prüf- und Referenzmaterialien

Um in der Lage zu sein, das Verhalten und die Auswirkungen bestimmter MKS-Sorten in der Umwelt, in Kompostier- und Fermentationsversuchen, sowie in Ökotoxizitätsstudien grundlegend zu erfassen, wurden für dieses Projekt gezielt Kunststoffe mit genau bekannter Zusammensetzung hergestellt und in den Technikums- sowie Laborversuchen verwendet. Eingesetzt wurde Polyethylen (PE) in den Varianten Polyethylen mit niedriger Dichte (LDPE) und Polyethylen mit hoher Dichte (HDPE) und die biologisch abbaubaren Kunststoffe Polylactid (PLA), Polybutylenadipat-Terephthalat (PBAT) sowie zwei Gemische aus PLA und PBAT mit unterschiedlichen Mischungsverhältnissen (PLA/PBAT und PBAT/PLA).

Die Zusammensetzungen wurden gewählt, um damit verschiedene Produktparten repräsentieren zu können. Kommerzielle auf dem Markt befindliche Produkte wurden aufgrund der nicht bekannten und wechselnden chemischen Zusammensetzung nicht verwendet. Das PLA/PBAT-Blend (mit weit höherem PLA-Anteil) stellt eine Zusammensetzung dar, die im Bereich der Hartkunststoffprodukte wie kompostierbare Joghurtbecher, Shampooflaschen oder Einweggeschirr eingesetzt wird. Das PBAT/PLA-Blend (mit weit höherem PBAT-Anteil) wurde hingegen gewählt, um einen Werkstoff für Verpackungsfolien zu repräsentieren.

Die Kunststoffe wurden hinsichtlich ihrer Stoffeigenschaften charakterisiert und zu MKS mit unterschiedlichen Korngrößenbereichen zerkleinert; die kleinsten Partikel hatten 10 µm. Die Partikelvermessung, die für die Bewertung von Ökotoxizitätstests unabdingbare Informationen liefert, wurde mittels statischer Bildanalyse durchgeführt.

Themenbereich 2: Kompostierungs- und Vergärungsprozesse

Es wurden Komposte und Gärprodukte aus 14 Bioabfallbehandlungsanlagen in Baden-Württemberg beprobt und auf MKS untersucht. Im Hinblick auf die Konzentration von Kunststoffen größer 1 mm überschritt keiner der im Projekt untersuchten Qualitätskomposte

(Biogut- und Grüngutkomposte) die rechtlichen oder die in den Qualitätskriterien der Bundesgütegemeinschaft Kompost definierten Obergrenzen für Kunststoffverunreinigungen. Biogutkomposte aus reinen Kompostierungsanlagen waren im Durchschnitt etwas stärker mit Kunststofffragmenten größer 1 mm belastet als solche aus Grüngutanlagen (15 Partikel pro kg Trockenmasse in Biogutkomposten im Vergleich zu etwas mehr als 10 Partikel pro kg in Grüngutkomposten) – typischerweise wird eine Düngemenge von 7 bis 10 t Trockenmasse Kompost pro Hektar und Jahr ausgebracht, dies entsprechen 0,7 bis 1 kg pro m². Das in den Anlagen angelieferte Biogut war deutlich stärker mit Kunststoffen (vor allem Beutel) belastet als das angelieferte Grüngut. Erkauft wird die dennoch hohe Qualität der Biogutkomposte mit aufwändigen Aufbereitungsschritten (z.B. Siebung, Windsichtung), bei denen zwangsläufig wertvolle biogene Materialien mit den Fremdstoffen aussortiert werden und dadurch dem Wertstoffkreislauf verloren gehen.

Biogutkomposte aus kombinierten Bioabfallverwertungsanlagen (Vergärung mit nachfolgender Kompostierung) waren stärker mit Kunststoffen größer 1 mm belastet (bis zu 100 Partikel pro kg Trockenmasse im Fertigkompost) als Biogutkomposte aus reinen Kompostieranlagen (15 Partikel pro kg Trockenmasse). Bei kombinierten Anlagen wird eine höhere Organikausnutzung erzielt, jedoch resultieren daraus höhere MKS-Konzentrationen. Nach den vorliegenden Ergebnissen tragen vor allem zwei Faktoren zu einer höheren Konzentration der entsprechenden Komposte mit Kunststofffragmenten größer 1 mm bei:

1. Verwendung von Schreddern:

Dadurch wird zwar die Vergärung intensiviert (schnellerer Abbau der organischen Substanz), gleichzeitig können aber MKS entstehen. (Im Projekt wurde eine kombinierte Anlage untersucht, die keinen Schredder einsetzte (Garagenfermenter); hier war der Kompost deutlich weniger belastet.)

2. Abpressen des flüssigen Gärrestes:

Der feste Gärrest wirkt dabei wie ein Filterkuchen und hält die Kunststofffragmente größer 1 mm zurück, die dann mit dem festen Gärrest in die Kompostierung gelangen.

Rückstände **biologisch abbaubarer Werkstoffe (BAW)** wurden vor allem in Komposten aus kombinierten Anlagen gefunden (2 - 29 Partikel pro kg Trockenmasse; vor allem PBAT). Die Spanne des Anteils biologisch abbaubarer Werkstoffe an der Gesamtbelastung mit Fremdstoffpartikeln größer 1 mm lag zwischen 2 und 36 %. Da diese Anlagen deutlich kürzer kompostieren als reine Kompostieranlagen (5 bis 6 Wochen, statt bis zu 3 Monate), ist zu vermuten, dass die Dauer der Kompostierung in den kombinierten Anlagen nicht ausreicht, um die gefundenen BAW vollständig biologisch abzubauen. Das Abbauverhalten von BAW und dessen Umweltrelevanz war nicht Gegenstand des vorliegenden Projektes. Diese

Fragestellung wird in einem weiteren Forschungsprojekt „*Biologisch abbaubare Beutel in der Bioabfallverwertung: Potential zur Verdrängung konventioneller Plastikbeutel, Abbau in der Anlage, Umweltrelevanz (BabbA)*“ untersucht.

Die **flüssigen Gärprodukte** aus kombinierten Bioabfallverwertungsanlagen waren nicht mit Plastikpartikeln größer 1 mm belastet. Im Bereich kleiner 1 mm enthalten flüssige Gärprodukte zwischen 19.200 bis zu 21.760 Kunststofffragmente pro Liter, etwa zu gleichen Teilen konventionelle Kunststoffe wie PE und PP und BAW wie PLA und PBAT. Die flüssigen Gärprodukte aus landwirtschaftlichen Biogasanlagen waren hingegen nur geringer belastet (max. 1.600 Partikel kleiner 1 mm pro Liter). Kunststoffpartikel größer 1 mm wurden in keinem der untersuchten flüssigen Gärprodukte gefunden. Des Weiteren führt wahrscheinlich die mechanische Separation selbst (Presse) schon zu erhöhter Bildung von MKS-Partikeln.

Um das **Verhalten ausgewählter Kunststoffe (LDPE, PLA, PLA/PBAT-Blend, PBAT/PLA-Blend)** in Bioabfallbehandlungsprozessen unter definierten Bedingungen detailliert zu untersuchen, wurden aerobe (Kompostierung) und anaerobe (Vergärung) Laborversuche durchgeführt. Dabei wurden fremdstofffreie Bioabfälle (synthetische Abfallmischungen und Speisereste) mit einer definierten Menge an Referenzkunststoffen (abhängig vom Reaktorvolumen Kompostierung: Folien mit der Abmessung 16 x 3 cm, Vergärung: 3 x 1,5 cm) versehen und unter kontrollierten, praxisnahen Bedingungen mit unterschiedlichen Aufenthaltszeiten aerob bzw. anaerob behandelt.

Bei der Kompostierung mit synthetischen Bioabfällen wurden statische und semidynamische Verfahren mit unterschiedlichen Belüftungskonzepten untersucht. Beim Anaerobprozess wurden statische und dynamische Verfahren im mesophilen (37°C) und thermophilen (55°C) Temperaturbereich und zwei verschiedene Substrate (synthetischer Bioabfall, Speisereste) betrachtet. Die Probenahme erfolgte vom Ausgangsmaterial sowie nach 3, 6 und 12 Wochen Versuchsdauer.

Die Versuchsergebnisse in den Laboruntersuchungen zeigen, dass besonders bei den bioabbaubaren Kunststoffen eine Fragmentierung durch den biologischen Prozess, verbunden mit der Bewegung der Substrate in den Reaktoren, stattgefunden hat.

Bei der Kompostierung wurden durch den Rotteprozess besonders die bioabbaubaren Kunststoffe in ihrer Korngröße stark reduziert. Auch haben sich bei den bioabbaubaren Kunststoffen deren Eigenschaften (Farbe, Flächigkeit) stark verändert. Besonders PBAT/PLA war nach 12 Wochen Rottezeit nur noch in geringem Umfang optisch erkennbar. Die Anzahl der Partikel größer 5 mm (Ausgangszustand der Folien) hatte sich während des Prozesses

deutlich verringert, während die Anzahl der Kunststofffragmente (angegeben in Partikel/L Frischmasse) in den Korngrößenklassen kleiner 5 mm deutlich zunahm:

- 500 µm bis 5 mm: von Woche 3 auf Woche 12 von ca. 50 Partikeln (überwiegend PLA) auf über 700 Partikel (vor allem PLA/PBAT und PLA)
- 10 bis 500 µm: von ca. 15 Partikeln (vor allem LDPE und PBAT/PLA) auf ca. 200 Partikel (vor allem PLA/PBAT und PLA, in geringerem Umfang auch PBAT/PLA und LDPE).

Besonders bioabbaubare Kunststoffe sind bei der Kompostierung fragmentiert und waren bereits nach 3 Wochen in Korngrößen kleiner 5 mm als MKS zu finden. Nach 12 Wochen waren in den Fraktionen kleiner 5 mm vor allem PLA und PLA/PBAT noch auffindbar. In den Fraktionen kleiner 500 µm wurden – wenn auch zahlenmäßig in geringem Umfang (ca. 20 Partikel) – LDPE-Partikel gefunden, die wahrscheinlich durch Abrasion im Prozess entstanden sind.

Bei den mesophil-statischen Vergärungsversuchen fand aufgrund des anaeroben Prozesses, der vergleichsweise geringen Temperaturen und des ruhenden Zustandes des Materials (keine Abrasion) in nur sehr geringem Umfang bei PLA eine Fragmentierung in die Fraktionen kleiner 500 µm statt, die drei anderen zugesetzten Kunststoffe wurden in diesen Fraktionen nicht gefunden. Im Gegensatz hierzu wurden bei den thermophil-dynamischen Vergärungsversuchen aufgrund der vergleichsweise höheren Temperaturen sowie der ständigen Bewegung des Materials und der damit verbundenen Abrasion insgesamt mehrere tausend Partikel in den Fraktionen kleiner 500 µm festgestellt. Dies waren vor allem PBAT/PLA und LDPE, in geringem Umfang auch PLA.

Die Partikelzahlen in den Fraktionen kleiner 500 µm lagen nach 12 Wochen Versuchszeit bei den dynamischen Anaerobversuchen im thermophilen Bereich insgesamt signifikant höher als bei den Kompostierungsversuchen. Es ist davon auszugehen, dass durch die dynamische Betriebsweise die damit einhergehenden auftretenden Scherkräfte stark zu der Fragmentierung beigetragen haben.

Auf allen in den Laboranlagen untersuchten Kunststoffsorten konnten Biofilme nachgewiesen werden. Kunststoffe könnten somit als Vektoren für Biofilme dienen, wenn sie in die Umwelt gelangen. Welche Auswirkungen dies hat, sollte in Folgeprojekten untersucht werden.

Während der Prozessführung wurde bei den Kunststofffolien Mikrorisse auf der Oberfläche und eine erhöhte Brüchigkeit festgestellt. Beides könnte die Bildung von MKS in Bioabfallverwertungsanlagen begünstigen. Ob diese Fragmente anschließend von

Organismen vollständig mineralisiert werden können, ist noch nicht geklärt. Dies sollte in weiteren Studien untersucht werden.

Themenbereich 3: Auswirkungen auf Bodenorganismen und -funktionen

Im Themenbereich 3 wurden ein **Feldversuch** zum Verhalten von MKS im Boden einer konventionell bewirtschafteten Ackerfläche, Laborversuche zur Abbaubarkeit und zu den Auswirkungen von MKS auf wichtige Bodenfunktionen sowie Laborversuche zu Wechselwirkungen von MKS mit Nematoden, Springschwänzen und Regenwürmern durchgeführt.

Die MKS-Hintergrundbelastung des landwirtschaftlich genutzten Bodens des Feldversuchs wurde anhand der MKS-Belastung der Kontrollplots des Feldversuchs ($n = 4$) beurteilt. Dazu wurde pro Plot eine Fläche von 143 cm^2 mittels 15 Einstichen, die zu einer Probe vereint wurden, beprobt. Der Boden enthielt 296 ± 110 (Mittelwert $\pm$ Standardfehler) Partikel kleiner $0,5 \text{ mm}$ pro kg , wobei PP, PS und PE die häufigsten MKS waren. Insgesamt wurden in den Bodenproben der Kontrollplots nur 4 Partikel (2 PET, je 1 PE und PS) größer $0,5 \text{ mm}$ gefunden. Um die Sensitivität der MKS-Analysen für Partikel kleiner $0,5 \text{ mm}$ zu verbessern, wurde deshalb eine Beprobung durchgeführt, bei der alle Plots des Feldversuchs ($n = 36$) beprobt wurden und die Beprobungsfläche pro Plot auf 900 cm^2 erhöht wurde. Dabei wurden auffallend viele Lackpartikel (27 von insgesamt 57 MKS-Partikeln) gefunden. Diese Befunde zeigen, dass auch in Ackerböden ohne landwirtschaftliche Praktiken wie organischer Düngung, Klärschlammzugabe und der Verwendung von Kunststoffmulchfolien, verschiedene MKS vorkommen können. Dies deutet darauf hin, dass ein erheblicher diffuser MKS-Eintrag durch atmosphärische Deposition und unsachgemäße Entsorgung von Kunststoffabfall („Littering“), aber auch durch den Abrieb von Beschichtungen landwirtschaftlicher Maschinen erfolgt. Für andere landwirtschaftlich genutzte Böden in Baden-Württemberg mit ähnlicher Nutzungsgeschichte wie die des Feldversuchsbodens ist eine Hintergrundbelastung in ähnlicher Größenordnung zu erwarten. Insbesondere MKS-Partikel kleiner $0,2 \text{ mm}$ kamen im Boden des Feldversuchs häufig vor. MKS kleiner $0,01 \text{ mm}$ und Nanopartikel haben möglicherweise direkte Auswirkungen auf Bodenorganismen, können allerdings derzeit noch nicht zuverlässig quantifiziert werden. Dafür ist die Weiterentwicklung der bestehenden MKS-Analytik unabdingbar.

Unsere Untersuchungen zeigen, dass sowohl nicht vorbehandelte konventionelle MKS (LDPE) als auch nicht vorbehandelte biologisch abbaubare MKS (PLA/PBAT) unter Feldbedingungen im Boden verbleiben. Im Feldversuch wurden 20 kg MKS (LDPE, PLA/PBAT) pro Hektar zugegeben. Auf Basis von Partikelanalysen des Zugabematerials entspricht dies einer Zugabe

von 1,4 Mrd. LDPE- und 0,2 Mrd. PLA/PBAT-Partikeln kleiner 0,5 mm bzw. 39 Mio. LDPE- und 32 Mio. PLA/PBAT-Partikeln größer 0,5 mm pro Hektar. Im Vergleich zum Hintergrundwert erhöhte diese MKS-Zugabe zwar deutlich die Partikelkonzentration im Boden, aber es konnten keine Auswirkungen auf die untersuchten Bodenfunktionen festgestellt werden. Bedingt durch die kontinuierliche Ausbringung von organischen Düngemitteln und eine damit verbundene Anreicherung von MKS in landwirtschaftlichen Böden besteht dennoch langfristig das Potenzial, Bodenfunktionen und -organismen zu gefährden.

In einem **Laborexperiment** zur Abbaubarkeit von MKS (PLA/PBAT, LDPE) wurden ausschließlich PLA/PBAT-Partikel in eher trockenem Boden innerhalb von 230 Tagen mineralisiert (11 bis 15 % des zugegebenen Kohlenstoffs). Für LDPE-Partikel und kleinere PLA/PBAT-Partikel wurde im feuchten Boden keine Mineralisierung festgestellt. MKS veränderten den Kohlenstoffumsatz und die Zusammensetzung der wichtigsten mikrobiellen Gruppen im Boden nicht. Allerdings deuten morphologische Veränderungen und erhöhte Aktivitäten des Enzyms Lipase auf der Oberfläche von aus dem Boden extrahierten PLA/PBAT-Partikeln auf den beginnenden Abbau dieser Partikel durch Depolymerisierung hin. Künftige Studien sollten sich mit der polymerspezifischen Plastisphäre in unterschiedlicher räumlicher Auflösung in verschiedenen Böden befassen, um mehr Informationen über die Auswirkungen dieses neuen anthropogenen Mikrohabitats in Böden auf mikrobiell gesteuerte Bodenprozesse zu erhalten.

In einem weiteren Laborexperiment zur Abbaubarkeit von fermentierten MKS (LDPE, PBAT/PLA) im Boden erwiesen sich PBAT/PLA-Partikel (0,5 bis 2 mm) mit Fermentatbelag als besonders gut abbaubar (26 % Mineralisierung des PLA/PBAT-Kohlenstoffs nach 202 Tagen). Aber auch fermentierte PBAT/PLA-Partikel ohne Fermentatbelag (abgewaschen) wurden deutlich besser abgebaut als unbehandelte (12 gegenüber 6 %). Dies zeigt, dass die biologische Vorbehandlung von MKS deren Abbaubarkeit im Boden maßgeblich verbessern kann. Für LDPE-Partikel wurde keine Mineralisierung im Boden festgestellt.

In **ökotoxikologische Untersuchungen** mit dem Nematoden *Caenorhabditis elegans* wurde nachgewiesen, dass diese Bodentiere bei Exposition gegenüber PLA/PBAT-Partikeln (mittlerer Durchmesser $\pm$ Standardabweichung: $40 \pm 31 \mu\text{m}$) in Futtersuspensionen (100 mg PLA/PBAT pro Liter) PLA/PBAT-Partikel in einer Größe von 1,3 bis $5,1 \mu\text{m}$ in den Verdauungstrakt aufnahmen. Bei Exposition gegenüber MKS (LDPE [$57 \pm 40 \mu\text{m}$] und PLA/PBAT) in Futtersuspensionen (1, 10 und 100 mg pro Liter) war die Reproduktion der Nematoden bis zu 22,9 % im Vergleich zur Kontrolle reduziert. Diese Reduktion war kunststoffunabhängig und bei höheren Konzentrationen tendenziell stärker.

In einem Reproduktionstest mit der Springschwanzart *Folsomia candida* reduzierten PBAT/PLA-Partikel (mittlerer Durchmesser $\pm$ Standardabweichung: $76 \pm 40 \mu\text{m}$) die Nachkommenzahl nur bei der höchsten untersuchten Konzentration beträchtlich (34 % Reduktion bei einer Konzentration von 1,5 Gew.-% PBAT/PLA im Boden). Im Vergleich dazu verringerte LDPE (mittlerer Durchmesser $\pm$ Standardabweichung: $84 \pm 33 \mu\text{m}$) die Nachkommenzahl bereits bei einer deutlich geringeren Konzentration (43 % Reduktion bei einer Konzentration von 0,12 Gew.-% LDPE im Boden). In einer weiteren Untersuchung zeigte sich ein konzentrationsabhängiges Vermeidungsverhalten von Springschwänzen gegenüber mit LDPE-Partikeln (mittlerer Durchmesser $\pm$ Standardabweichung: $84 \pm 33 \mu\text{m}$) verunreinigten Böden. Die Springschwänze mieden Böden stärker mit steigender LDPE-Konzentration. Mit Nilrot gefärbte PBAT/PLA-Partikel konnten im Verdauungstrakt von *F. candida* nachgewiesen werden – ein Nachweis dafür, dass MKS-Partikel aufgenommen werden. Für die Abschätzung der Umweltauswirkungen sind weitere Untersuchungen notwendig.

Untersuchungen zu den Interaktionen der Regenwurmart *Lumbricus terrestris* mit Kunststofffragmenten legen dar, dass Regenwürmer fermentierte Kunststofffragmente in gleichem Maße wie ihre natürliche Nahrung in bis zu 30 cm Tiefe in den Boden einzogen. Insofern ist zu erwarten, dass vor allem biologisch vorbehandelte Kunststoffe, die als Bestandteil von organischen Düngemitteln in den Boden gelangen, von Regenwürmern in den Boden eingezogen werden. Daraus ergeben sich mögliche Umweltrisiken mit bisher ungeklärten Auswirkungen auf biogeochemische Prozesse insbesondere in größeren Bodentiefen.

3. Schlussfolgerungen für die Kreislaufwirtschaft

Die Ergebnisse zeigen, dass die Freisetzung von Kunststoffen durch die in Bioabfallverwertungsanlagen erzeugten Produkte (Komposte, Gärprodukte) so weit wie möglich vermieden werden sollte, um mögliche negative Auswirkungen auf terrestrische Ökosysteme auszuschließen. Zur Vorsorge vor möglichen negativen Auswirkungen auf die Umwelt sollte darauf hingewirkt werden, den Eintrag von im biologischen Prozess nicht vollständig abbaubaren Kunststoffen in die Bioabfallverwertung zu minimieren.

Hierzu ist es erforderlich, die Bioabfallsammlung unter dem Aspekt einer hohen Sortenreinheit durchzuführen. Dabei können sowohl eine entsprechende Öffentlichkeitsarbeit und Gestaltung der Abfallsatzung als auch Kontroll- und Sanktionsmechanismen zur Qualitätssicherung der erfassten Bioabfälle seitens der öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträger zwingend erforderlich. Es muss oberste Priorität haben, Kunststoffeinträge bereits bei der Sammlung zu vermeiden.

Auf Ebene der Anlagenbetreiber ist dafür zu sorgen, dass eingetragene Kunststoffe vor deren Ausschleusung möglichst nicht zerkleinert werden (z.B. selektive Zerkleinerung) bzw. abhängig vom Behandlungsverfahren (Vergärung und/oder Kompostierung) frühzeitig im Prozessverlauf ausgeschleust werden. Darüber hinaus sollten generell Siebüberläufe, die als Strukturmaterial wiedereingesetzt werden, von Kunststoffen befreit werden. Neben Windsichtern können hierzu auch verstärkt Nahinfrarot-Detektionssysteme mit gezielter Ausschleusung durch Ausblasen eingesetzt werden. Auch hier ist eine Qualitätssicherung der Prozesse und erzeugten Produkte unerlässlich.

Da in kombinierten Anlagen häufig Pressen für die Separation von flüssigen und festen Gärresten verwendet werden und es in diesen Anlagen vermehrt zur Partikelbildung kommt, muss in weiteren Untersuchungen überprüft werden, ob tatsächlich das Abpressen oder ein anderer Faktor zur Entstehung von MKS bei kombinierten Anlagen führt. Es ist ersichtlich, dass die eingesetzte Anlagentechnik (Presstechnik, Vergärungstechnik, Aufbereitungstechnik, nachgeschaltete Kompostierungstechnik etc.) einen großen Einfluss auf die Entstehung von MKS hat und dies einer erweiterten Betrachtung und Untersuchung bedarf.

Um den Gesamteintrag von Kunststoffen in die Umwelt zu minimieren, sollten die zulässigen Kunststoffgrenzwerte im Abfall- und Düngerecht künftig nicht mehr auf Partikel größer 1 mm beschränkt sein, sondern auch kleinere Kunststoffpartikel berücksichtigt werden. Hierzu sollten die zur Verfügung stehenden Analyseverfahren weiterentwickelt, validiert und standardisiert werden.

Trotz höherer MKS-Gehalte in Gärresten von kombinierten Vergärungs- und Kompostierungsanlagen als in Komposten, die ohne vorgeschaltete Vergärung hergestellt wurden, sind die Vorteile kombinierter Anlagen mit Vergärung und Kompostierung im Hinblick auf den Klimaschutz hervorzuheben, weil sie zusätzlich noch Biogas zur Substitution fossiler Energieträger wie Erdgas produzieren.

Im Hinblick auf die bei der Bioabfallbehandlung eingesetzten Verfahren wird auf Grundlage der Ergebnisse empfohlen, für bei der Bioabfallsammlung zugelassene Beutel eine Zertifizierung zu entwickeln, die neben den aeroben auch die anaeroben Verfahren sowie die in der Praxis vermehrt realisierten Verfahrenskombinationen aus anaerober mit nachgeschalteter aerober Stufe bei den dort üblichen Aufenthaltszeiten abdeckt.

Weitere Untersuchungen zur MKS-Hintergrundbelastung landwirtschaftlicher Böden in Baden-Württemberg sollten durchgeführt werden, um räumliche Verteilungsmuster der MKS-Belastung zu identifizieren. Diese sollten auch Böden mit anderer landwirtschaftlicher Nutzungsgeschichte (z.B. Verwendung von Mulchfolien, Düngung mit organischen Düngemitteln, etc.) berücksichtigen.

Insgesamt zeigen die Projektergebnisse, dass MKS potenziell wichtige Akteure des Bodennahrungsnetzes auf verschiedenen Ebenen beeinträchtigen können. Hier spielt die Konzentration eine entscheidende Rolle für die MKS-Toxizität gegenüber Bodenlebewesen, während die Kunststoffart nachrangig scheint (mit Ausnahme der Springschwänze). Weiterführende künftige Studien zu MKS-Interaktionen mit Bodenlebewesen sollten die Erkenntnissen zu umweltrelevanten Konzentrationen von MKS und deren Größenverteilung in Komposten, Gärprodukten und Böden berücksichtigen und explizit auch die Effekte von Fragmenten aus kommerziell erhältlichen kompostierten Biomüllsammelbeuteln oder anderweitig gealterten MKS in umweltrelevanten Konzentrationen untersuchen. Dadurch ließe sich das Gefahrenpotential von MKS für Bodenlebewesen unter realistischeren Szenarien besser abschätzen.

Der durchgeführte Feldversuch zeigt, dass die zugesetzten Mikrokunststoffe, die einer Akkumulation nach 7 bis 20 Jahren Kompostanreicherung entsprechen, sich weder auf die Aktivitäten am C-Umsatz beteiligter Enzyme noch auf den mikrobiellen Kohlenstoff auswirkten. Auch die Ernteerträge wurden hierdurch nicht beeinflusst. Für eine Veränderung der Bodenfunktion, wie in anderen Studien gezeigt, konnten in der hier durchgeführten Studie keine Hinweise gefunden werden, obgleich Langzeiteffekte nicht ausgeschlossen werden können. Hervorzuheben ist, dass der Einsatz von Komposten und Gärprodukten zum Klima- und Ressourcenschutz beiträgt. Diese leisten durch ihre Düngewirkung, Humusversorgung

und Wasserhaltekapazität einen wichtigen Beitrag zur Fertilität der Böden und zum Bodenschutz. Der Kunststoffeintrag durch Komposte und Gärprodukte in landwirtschaftliche Böden ist nur ein Eintragspfad von vielen – so müssen für eine letztendliche Bewertung auch andere Eintragspfade wie z. B. atmosphärische Deposition, Littering, landwirtschaftliche Mulchfolien, Hüllpolymere von Düngemitteln oder Abrieb von Beschichtungen landwirtschaftlicher Maschinen berücksichtigt werden. Unbestritten ist es aus Vorsorgegründen die Akkumulation von Kunststoffen in Böden so gering wie möglich zu halten.

In diesem Zusammenhang kann im Bereich der Produkte von Bioabfallbehandlungsanlagen mit gezielten Maßnahmen der Eintrag von im biologischen Prozess nicht vollständig abbaubaren Kunststoffen minimiert werden.