

Kunststoffe, Mikroplastik und deren Inhaltsstoffe im Boden

Fachbeirat für Bodenfruchtbarkeit und Bodenschutz



Impressum

Medieninhaber und Herausgeber:

Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Regionen und Wasserwirtschaft,
Stubenring 1, 1010 Wien
bml.gv.at

Autorinnen und Autoren: Ines Fritz, Monika Humer, Bettina Liebmann, Wolfgang Friesl-Hanl, Thomas Peham, Hermann Miesbauer, Andreas Baumgarten, Vanessa Scharsching, Helene Walch

Leitung der Arbeitsgruppe und Redaktion: Andreas Baumgarten, AGES

Grafikdesign: Leonie Fink

Fotonachweis BML/Alexander Haiden (S. 1), BML/Andy Wenzel (S. 5), Ines Fritz (S. 17)

Wien, 2023. Stand: 7. November 2024

Copyright und Haftung:

Auszugsweiser Abdruck ist nur mit Quellenangabe gestattet, alle sonstigen Rechte sind ohne schriftliche Zustimmung des Medieninhabers unzulässig.

Es wird darauf verwiesen, dass alle Angaben in dieser Publikation trotz sorgfältiger Bearbeitung ohne Gewähr erfolgen und eine Haftung des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Regionen und Wasserwirtschaft und der Autorin / des Autors ausgeschlossen ist. Rechtausführungen stellen die unverbindliche Meinung der Autorin / des Autors dar und können der Rechtsprechung der unabhängigen Gerichte keinesfalls vorgreifen.

Rückmeldungen: Ihre Überlegungen zu vorliegender Publikation übermitteln Sie bitte an andrea.spanischberger@bml.gv.at

Vorwort



Mag. Norbert Totschnig, MSc

Kunststoffe sind in unserem Alltag allgegenwärtig, gleichzeitig können sie aber aufgrund ihrer Langlebigkeit auch ein Problem darstellen. Kunststoffreste, insbesondere in Form von Nano- und Mikroplastik, lassen sich mittlerweile in praktisch allen Ökosystemen, und daher auch im Boden, nachweisen.

Österreich ist mit seinen hohen Umweltstandards bei Abwasserreinigung und Abfallmanagement, auf Basis von Know-how und effizienten Umwelttechnologien auf einem guten Weg bei der Vermeidung des Eintrags von Plastik in die Umwelt. Es bleibt aber noch einiges zu tun. Im Aktionsplan Mikroplastik wurden daher Maßnahmen erarbeitet, um die Verbreitung von Kunststoffen in der Umwelt weiter zu reduzieren.

In dieser Broschüre ist der aktuelle Wissensstand zu Kunststoffen in Böden zusammengefasst. Zentrale Begriffe werden erläutert, Methoden zur Bestimmung von Art und Grad der Belastung beschrieben und mögliche Auswirkungen auf Bodeneigenschaften, das Bodenleben sowie in weiterer Folge auch auf Pflanzen, Tiere und Menschen angesprochen. Basierend auf dem aktuellen rechtlichen Rahmen werden Vorschläge gemacht, um eine weitere Reduktion der Freisetzung von Plastik in die Umwelt zu erreichen.

Norbert Totschnig
Bundesminister

| | |
|--|-----------|
| Vorwort | 3 |
| 1 Einleitung – warum gibt es Handlungsbedarf?..... | 5 |
| 2 Begriffe | 7 |
| 3 Anreicherung von Kunststoffen im Boden | 10 |
| 4 Kunststoffe im Boden – Probenahme, Bestimmung, Verweildauer und Auswirkungen..... | 13 |
| 4.1 Probenahme | 13 |
| 4.2 Probenaufbereitung und Bestimmungsmethoden..... | 14 |
| 4.3 Abbaubarkeit von Kunststoffen in Böden..... | 16 |
| 4.4 Räumliche Verlagerung im Boden und Erosion | 17 |
| 4.5 Auswirkungen von Kunststoffen im Boden | 18 |
| 4.6 Einfluss von Kunststoffen auf Bodenorganismen und Pflanzen..... | 19 |
| 5 Rechtliche Rahmenbedingungen..... | 20 |
| 5.1 Emissionsseitige Grenzwerte für Kunststoffe und Mikroplastik | 20 |
| 5.2 Immissionsseitige Grenzwerte für Kunststoffe und Mikroplastik in Böden..... | 23 |
| 6 Handlungsempfehlungen..... | 25 |
| 6.1 Rechtliche Rahmenbedingungen..... | 25 |
| 6.2 Quellen und Vermeidungsstrategien..... | 26 |
| 6.2.1 Reduktion des gezielten Einsatzes von Mikroplastik..... | 26 |
| 6.2.2 Reduktion der unbeabsichtigten Mikroplastikfreisetzung | 27 |
| 7 Fazit: | 33 |
| Referenzen: | 35 |
| Tabellenverzeichnis..... | 41 |
| Abbildungsverzeichnis..... | 42 |
| Abkürzungen..... | 43 |

1 Einleitung – warum gibt es Handlungsbedarf?

Kunststoffe sind aus vielen Aspekten des Lebens nicht mehr wegzudenken, sie sind vergleichsweise günstig herzustellen und lassen sich auf einfache Weise verarbeiten.

Kunststoffreste in der Umwelt sind allerdings inzwischen zu einem globalen Problem geworden. Während Berichte über die Verunreinigung aquatischer Systeme mittlerweile starkes öffentliches Interesse auf sich gezogen haben, stehen Erhebungen zum Ausmaß von Kunststoffansammlungen in Böden und deren Folgen erst am Beginn und entziehen sich noch weitgehend der öffentlichen Aufmerksamkeit.

Kunststoffe wurden großteils entwickelt, da sie bei vergleichsweise geringem Gewicht resistent gegenüber Umwelteinflüssen sind. Werden diese Stoffe in die Umwelt freigesetzt, kann es zu problematischen Veränderungen der Bodeneigenschaften sowie Auswirkungen auf das Bodenleben und den damit verbundenen Folgen auf Pflanzen, Tiere und letztlich auch dem Menschen kommen. Dies ergibt sich aus

- der beabsichtigten oder unbeabsichtigten Freisetzung von Kunststoffen in die Umwelt,
- der beabsichtigten Widerstandsfähigkeit von Kunststoffen gegen einen biologischen Abbau und somit gegen eine Eingliederung in den natürlichen Kohlenstoffkreislauf und
- der geringen Dichte von Kunststoffen, die einen Ferntransport durch Windverfrachtung oder Aufschwimmen (etwa in Fließgewässern) ermöglicht.

So verbleiben Kunststoffe für lange Zeiträume in der Umwelt, wo sie zu immer kleineren Teilen zerfallen und sich dadurch noch weiterverbreiten können. Mit geringerer Partikelgröße steigt auch die Wahrscheinlichkeit der Aufnahme in Organismen. Risiken für Umwelt und Mensch können dabei auch aus den in Kunststoffen enthaltenen Zuschlagstoffen (Additive) entstehen. Die Auswirkungen sind noch weitgehend unklar. Einmal in der Umwelt verteilte Kunststoffteilchen können nicht einfach wieder eingesammelt werden, weshalb entsprechende Vorsicht geboten ist.

Im Jahr 2021 lag die globale Produktion von Kunststoffen bei 390 Mio. Tonnen. In Europa (EU27+NO/CH/UK) wurden rund 57 Mio. Tonnen hergestellt. Der Großteil davon wurde in der Verpackungsindustrie eingesetzt (44 %), gefolgt vom Bausektor (18 %) und der Automobilindustrie (8 %). Die am häufigsten verwendeten Kunststoffarten waren Polyethylen (PE; 26,9 %), Polypropylen (PP; 19,3 %), Polyvinylchlorid (PVC; 12,9 %), Polyethylenterephthalat (PET; 6,2 %), Polyurethan (PUR bzw. PU; 5,5 %), und Polystyrol (PS; 5,3 %). Für den Agrarsektor (4 % der Nachfrage) werden vor allem Weich-PE (Polyethylen niedriger Dichte (low density), PE-LD), PP und PVC eingesetzt (Plastics Europe 2022).

Der Anteil von Kunststoffen aus nachwachsenden Rohstoffen an der globalen Produktion liegt derzeit bei ca. 1,5 %, mehr als die Hälfte davon wird für Verpackungen eingesetzt (Plastics Europe 2022).

Die vorliegende Broschüre ist eine erste Zusammenstellung des aktuellen Wissensstands.

Kunststoffe im Boden – welche Fragen ergeben sich?

Das Ziel dieser Broschüre ist es, erste Antworten auf die folgenden wichtigen Fragen zum Kunststoffproblem in unseren Böden bereitzustellen:

1. Wie viele und welche Kunststoffe und deren Additive befinden sich in unseren Böden?
2. Wie viel und welcher Kunststoff kommt aus beabsichtigter und unbeabsichtigter Freisetzung?
3. Gibt es Vermeidungsstrategien für beide Freisetzungswege?
4. Welchen Einfluss haben Kunststoffe auf den Boden?
5. Welche Untersuchungsmethoden stehen zur Verfügung?
6. Gibt es gesetzliche Regelungen zum Eintrag von Kunststoffen in Böden?
7. Stellt die Verwendung alternativer (abbaubarer) Materialien eine Lösungsstrategie dar?

Auch wenn es derzeit noch nicht möglich ist, die oben genannten Fragen vollständig zu beantworten, liefert diese Broschüre einen ersten Überblick auf Basis des aktuellen Wissensstandes jener Institutionen, die sich derzeit mit der Problematik auseinandersetzen. Dazu zählen unter anderem die AGES, das Umweltbundesamt, die Landwirtschaftskammer, der Branchenverband für Obst und Gemüse, die Bundesländer, Universitäten, das ökosoziale Forum, das Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Regionen und Wasserwirtschaft (BML), der Kompost und Biogas Verband und die Industrie.

2 Begriffe

Im täglichen Sprachgebrauch werden dieselben Begriffe (z. B. Bio-Kunststoff) oft in ganz unterschiedlichem Zusammenhang verwendet und bezeichnen dabei unterschiedliche Materialien und/oder Eigenschaften.

Im Sinne der Klarheit und Eindeutigkeit werden, die in dieser Broschüre verwendeten Begriffe, wie folgt definiert:

Kunststoff: Ein Material, das zumeist aus einem oder mehreren Polymeren oder aus einem Polymer und Hilfsstoffen (Additiven) zusammengesetzt ist und bestimmte mechanische, physikalische und chemische Eigenschaften hat. Die Herkunft der Rohstoffe ist in diesem Begriff nicht definiert.

„konventioneller“ Kunststoff, Synonym „Plastik“: Kunststoff, der üblicherweise aus fossilen Rohstoffen (z. B. Erdöl) hergestellt ist und dessen Eigenschaften ihn zumeist besonders widerstandsfähig gegen biotischen) und abiotischen Abbau machen (siehe Abbildung 1).

Biokunststoff: Kunststoff, der entweder aus biogenen Rohstoffen (z. B. Zucker, Maisstärke, Biogas) hergestellt wurde und/oder biologisch abbaubar ist. Bei der Verwendung des Begriffs „Biokunststoff“ ist daher nicht immer klar, ob er sich auf die Zusammensetzung bzw. Herkunft (fossil oder biogen) oder die Eigenschaften (z. B. biologische Abbaubarkeit) bezieht. Einen Überblick über die Ableitungsmöglichkeiten des Begriffs gibt Abbildung 1.

Abbildung 1: Ableitungsmöglichkeiten für den Begriff „Biokunststoff“

| | biologisch abbaubar | persistent |
|--------------------------------|--|-------------------------------|
| biogener Rohstoff (biobasiert) | biobasierter, biologisch abbaubarer (bio-)Kunststoff | biobasierter (bio-)Kunststoff |
| Rohstoff Erdöl (fossil) | biologisch abbaubarer (bio-)Kunststoff | Plastik |

abbaubar: Eigenschaft eines Materials, während eines nicht näher definierten Zeitraumes, seine chemische Zusammensetzung und damit auch seine mechanischen und physikalischen Eigenschaften zu ändern.

biologisch abbaubar, Synonym „Bioassimilation“: Eigenschaft eines Materials, das aufgrund biologischer Prozesse, die durch lebende Organismen hervorgerufen werden, abgebaut wird. Im Unterschied zu konventionellen Kunststoffen sind bei biologisch abbaubaren Kunststoffen die Polymere meist anders aufgebaut und es werden oft auch andere Zusatzstoffe beigefügt. Ein biologischer Abbau findet nur dann statt, wenn der abbauende Organismus das abgebaute Material als Substrat zur Erzeugung von Energie („Nahrung“) und zum Aufbau neuer Biomasse (Zellen) nutzen kann.

kompostierbar: Eigenschaft eines Materials, innerhalb einer begrenzten Zeitspanne (üblicherweise 6 Monate) unter Kompostierungsbedingungen (optimale Temperatur, optimale Feuchtigkeit) vollständig biologisch abbaubar zu sein. Produkte, die nach der Norm EN 13432 zertifiziert sind, erfüllen diese Anforderung.

umweltabbaubar: Eigenschaft eines Materials, innerhalb einer begrenzten Zeit (üblicherweise 12 Monate) unter Umweltbedingungen (wie sie z. B. im Meer, im Boden, etc. herrschen) vollständig biologisch abbaubar zu sein.

abiotisch abbaubar: Eigenschaft eines Materials, vollständig abbaubar zu sein, ohne dass dazu die Mitwirkung lebender Organismen notwendig ist (z. B. durch Sonneneinwirkung etc.).

Fragmentierbare Kunststoffe (Synonym oxo-abbaubar (oxo-degradable), Foto-abbaubar (foto-degradable): Zerfall eines Materials in (beliebig) kleine Fragmente, ohne explizite Zeitangabe und ohne Definition der erreichten Teilchengröße. Wichtig: Der Zerfall erfolgt ohne Stoffumwandlung, ist also **kein Abbau**, obwohl der Begriff dies suggeriert.

Mikroplastik: Obwohl zum jetzigen Zeitpunkt noch keine international einheitliche Definition existiert, werden unter Mikroplastik meist Kunststoffteilchen (inklusive Fasern) unter **5 mm** Größe verstanden.

Neben der Größenunterscheidung kann eine weitere Einteilung in primäres und sekundäres Mikroplastik erfolgen. Während **primäres Mikroplastik** in dieser Größe produziert und direkt eingesetzt wird, entsteht **sekundäres Mikroplastik** aus der Fragmentierung von größeren Kunststoffteilen.

Nanoplastik: Definitionen von Mikroplastik enthalten meist keine untere Größengrenze. Wird von Nanoplastik gesprochen, handelt es sich, je nach Literatur, um Partikel **unter 1000 nm (0,001 mm) bzw. 100 nm (0,0001 mm)** Größe.

Meso- und Makroplastik: Neben Mikroplastik kann man zwischen Mesoplastik und Makroplastik unterscheiden. Auch hierbei gibt es keine einheitlichen Definitionen, oftmals werden darunter jedoch die Bereiche von **5 mm bis 2,5 cm** Größe (Mesoplastik) bzw. über 2,5 cm Größe (Makroplastik) verstanden.

Littering: Wegwerfen oder Liegenlassen von Abfall im öffentlichen Raum und der Natur, ohne dabei die vorgesehenen Entsorgungswege zu berücksichtigen.

Weitere wichtige Begriffe sind in der ÖNORM Regel ONR 2915351 „Kunststoffe – Leitfaden für Begriffe im Bereich abbaubarer und bioabbaubarer Polymere und Kunststoffteile“ aufgelistet.

3 Anreicherung von Kunststoffen im Boden

Die Menge an Kunststoffen im Boden kann derzeit nur grob geschätzt werden. Kunststoffpartikel können über verschiedene Wege in den Boden gelangen. Gründe dafür sind das Wegwerfen oder Liegenlassen von Kunststoffen (Littering) inklusive deren Verfrachtung und Deposition durch Wind und Wasser, die Verwendung von verunreinigten Sekundärrohstoffdüngern (Klärschlamm, Gärresten oder Kompost), die Verwendung von Kunststoffen in der Umwelt, der Reifenabrieb von nahegelegenen Straßen oder Abplatzungen von Farben/Lacken/Anstrichen. Im Vergleich zu sekundärem Mikroplastik ist der Beitrag von primärem Mikroplastik, wie es z. B. in Kosmetika oder Reinigungsprodukten eingesetzt wird, als eher gering einzustufen. Bei einer hohen Belastung des Bodens mit Makroplastik ist davon auszugehen, dass auch höhere Mengen an Mikroplastikpartikeln vorliegen, denen durch ihre geringere Größe und der größeren Oberfläche ein höheres Risikopotential, z. B. bezüglich der Freisetzung von Additiven und Aufnahme durch Organismen, zugeschrieben wird (Sexlinger et al., 2019).

Harmonisierte quantitative und qualitative Mess- und Analysenmethoden sind die Voraussetzung für genaue Stoffstromanalysen und Modellrechnungen. Viele verschiedene Methoden sind aktuell noch in Entwicklung, weshalb quantitative Aussagen über die Eintragungsmengen von Kunststoffen in den Boden über spezifische Eintragungspfade derzeit nur bedingt verfügbar und vergleichbar sind. (Busse und Rechberg, 2019; ISO/NP 24187; Liebmann, 2015; Sexlinger et al, 2019). Die möglichen Eintragungspfade lassen sich folgendermaßen einteilen:

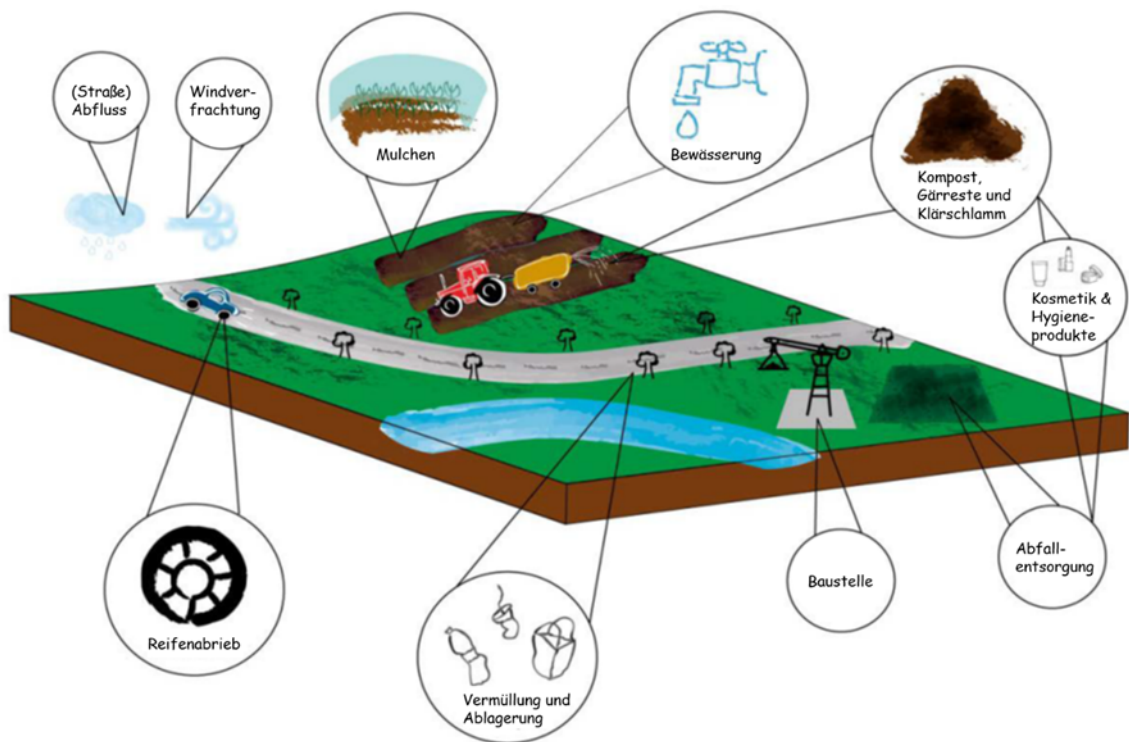
- 1. Freisetzung aus nicht zielgerichteter Anwendung:** Dies umfasst alle Varianten des Litterings (z. B. Verpackungsmaterial, Zigarettenfilter), aber auch die Verbreitung von Kunststoffen durch Reifenabrieb, Abrieb von kunststoffhaltigem Asphalt, Abplatzungen von Farben/Lacken/Anstrichen, Abfall bei der Bearbeitung von Baustoffen aus Kunststoffen im Freien oder die punktuelle Kontamination durch unberechtigte Ablagerung größerer Mengen Abfall (EU COM28, 2018; McArthur et al, 2016). Auch die Anwendung von verunreinigten Sekundärrohstoffdüngern (z. B. Klärschlamm, Kompost oder Biogasgülle), die trotz Behandlungsverfahren noch Reste von Kunststoffen beinhalten, können zu Kunststoffeinlagerungen / einer Kontamination im Boden führen. Diese Reste stammen überwiegend aus mit

Kunststoffen verunreinigtem Bioabfall (z. B. durch unsachgemäße Mülltrennung) oder aus dem Abwasser (z. B. Hygieneartikel, Zusätze von Kunststoffen in Kosmetikprodukten, Farben, Faserabrieb von Textilien im Waschwasser).

2. **(unbeabsichtigte) Freisetzung aus zielgerichteter Verwendung von Kunststoffen:**
Dies umfasst Anwendungen in Industrie und Gewerbe, der Land- und Forstwirtschaft oder der Bauwirtschaft wie z. B. Styropor als Isoliermaterial, gehäckseltes Kunststoffvlies oder Kunststofffasern sowie Gummigranulat auf Reit- und Sportplätzen, Einsatz von Geotextilien, Pflanzenschutzhüllen und Kunststoffvliese/-netze/-bindematerial, Mulch Folien oder umhüllte Langzeitdünger und diverse Hilfsprodukte der Forstwirtschaft wie beispielsweise Wuchshüllen oder Verbiss Schutz.

Die oben genannten Aufstellungen der beiden Freisetzungswege sind als Beispiele ohne Anspruch auf Vollständigkeit zu verstehen. Abbildung 2 gibt einen Überblick über beabsichtigte und nicht beabsichtigte Eintragungspfade von Kunststoffen in den Boden.

Abbildung 2: Beabsichtigte und unbeabsichtigte Eintragungspfade von Kunststoffen in den Boden (nach Meixner et al., 2020)



Die in den Boden gelangenden Kunststoffe können grundsätzlich einem jeden Kunststofftyp angehören. Die weltweit am häufigsten und in großen Mengen produzierten Kunststoffe sind Polyethylen (PE), Polypropylen (PP), Polyvinylchlorid (PVC), Polyethylenterephthalat (PET), Polyurethan (PU), Polystyrol (PS) und Polyamid (PA). Aufgrund der vielfältigen Anwendungsgebiete dieser Massenkunststoffe lässt sich – nach Identifikation des Kunststofftyps – der genaue Ursprung selten eindeutig rückverfolgen. So wird beispielsweise PP in Folien und Verpackungen ebenso verwendet wie in Isolierschäumen, in Textilfasern oder Gehäusewerkstoffen und Karosserieteilen.

Handelt es sich um einen persistenten Kunststoff, spielen bei der Betrachtung des Gefahrenpotentials die Zusatzstoffe im Kunststoff (z. B. Flammschutzmittel, Weichmacher, Stabilisatoren) eine wichtigere Rolle, da für einige dieser Stoffe krebserregende, nervenschädigende oder hormonelle Wirkungen nachgewiesen wurden (Hahladakis et al., 2018). Durch die längere Verweildauer können sich diese herauslösen und in Wasser und Boden gelangen, wo es zu einer unkontrollierten Verfrachtung kommt.

Darüber hinaus können auch flüssige oder wasserlösliche synthetische Polymere, die nicht unter den Begriff „Mikroplastik“ fallen, freigesetzt werden (z. B. Verpackungsfolie von Geschirrspültabs, Flockungsmittel). Diese Polymere sind aber nicht Gegenstand dieser Broschüre.

4 Kunststoffe im Boden – Probenahme, Bestimmung, Verweildauer und Auswirkungen

Bislang sind in Österreich keine flächendeckenden Untersuchungen von Kunststoffen in Böden durchgeführt worden. Das Land Vorarlberg hat mehrere landwirtschaftlich genutzte Böden auf Kunststoffe untersucht und als erstes österreichisches Bundesland in der Bodenqualitätsverordnung einen Grenz- und Vorsorgewert für Kunststoffe über 1 mm Größe im Boden festgelegt (Sexlinger et al. 2018). Aktuell wird, im Rahmen des vom Umweltbundesamt geleiteten Bund-Bundesländer Kooperationsprojekts „Harmonisierte Methoden für Plastik und Mikroplastik in Böden – PLASBo“, gefördert über die Forschungsplattform DaFNE des BML, eine erste Datengrundlage zur Belastung von Böden an über 100 Standorten in Österreich erhoben. Aus der internationalen Literatur liegen vereinzelte Datensätze zu Kunststoffen in Böden (z. B. Acker, Garten, Stadtgebiet) vor.

4.1 Probenahme

Für die Ermittlung von Stoffströmen von Kunststoffen in der Umwelt und die Vergleichbarkeit von Mikroplastikdaten sind standardisierte Probenahmemethoden sowie die Anwendung quantitativer Untersuchungsmethoden erforderlich.

Bevor eine Probe im Labor untersucht werden kann, muss sie in der Umwelt entnommen werden. Die Art und Weise der Probengewinnung entscheidet also darüber, welche Aussagen von den Laborergebnissen abgeleitet werden können. Eine Bodenprobe muss, den Untersuchungsparametern entsprechend, repräsentativ für eine definierte Fläche sein. Darüber hinaus soll sie den Anspruch auf Wiederholbarkeit erfüllen. Bedingt durch die unterschiedlichen Eintragspfade von Kunststoffen auf oder in Böden, ist sowohl die zweidimensionale Verteilung über die Fläche als auch die Verteilung in die Tiefe sehr variabel. Außerdem sind Kunststoffe in ihrer Ausprägung (insbesondere Größe und Form) sehr heterogen, sodass sich eine repräsentative Probenahme als sehr komplex gestalten kann.

Die repräsentative Entnahme von Bodenproben orientiert sich an den allgemeinen Probenahmnormen (ÖNORM L 1054, L 1055; L 1056, L 1057, L 1058, L 1059, S 2126 und S 2127), da es für die Bodenprobenahme zur Untersuchung speziell auf Kunststoffe derzeit keine normierten Vorgaben gibt.

Die bislang existierenden standardisierten Probenahmeverfahren für Böden sind nur bedingt für Kunststoffuntersuchungen geeignet (Sexlinger et al., 2019). In der Vorarlberger Bodenqualitätsverordnung sind geeignete Verfahren genannt, derzeit werden weitere Verfahren in einem Forschungsprojekt des BML („PlasBo“) und einem EU-Projekt (MINAGRIS) geprüft.

4.2 Probenaufbereitung und Bestimmungsmethoden

Bei der Aufbereitung der Bodenprobe für die Analytik muss gewährleistet sein, dass es zu keiner Veränderung, Zerstörung oder Verlusten der zu untersuchenden Kunststoffe kommt. Zugleich bedarf es Vorkehrungen im Labor, die eine zusätzliche Verunreinigung der Probe mit Kunststoffen (z. B. durch Abrieb des Laborequipments, synthetische Bekleidungsfasern der Laborangestellten, Staub) während der Aufbereitung und Analyse verhindern bzw. minimieren. Eine große Herausforderung stellt auch die Extraktion von Kunststoffen aus Bodenproben dar. Dabei müssen Bodenbestandteile (z. B. Mineralien, Pflanzenteile) chemisch oder physikalisch entfernt werden, ohne dass es zu Verlusten von Kunststoffen kommt.

Die quantitative und qualitative Bestimmung von Mikroplastik erfolgt aktuell über:

- mikroskopische Analytik (Auflicht- und Durchlichtmikroskopie),
- thermoanalytische Methoden, die einen Gesamtgehalt in mg Kunststoff pro kg Boden ermitteln und eine Identifizierung des Kunststoffs ermöglichen (vorzugsweise Pyrolyse-GC-MS (Gas-Chromatographie-Massenspektrometrie) sowie TED-GC-MS (Thermo-Extraktion-Desorption Gas-Chromatographie-Massenspektrometrie) und
- spektroskopische Verfahren, die die Partikelanzahl einzelner Kunststoffe in Stück pro kg Boden und/oder die Partikelgröße sowie die Art des Kunststoffs detektieren (Raman-Spektroskopie und FT-IR (Fourier Transformation Infrarot) Spektroskopie; BMBF, 2018).

Die rein bildgebenden Verfahren wie Licht- und Elektronenmikroskopie haben ebenso wie reine Partikelzählverfahren über Licht- und Laserstreuung den Nachteil, dass sie keine Information über die chemische Zusammensetzung des untersuchten Materials liefern.

Für Partikel über 1 mm Größe ist in den meisten Fällen eine Unterscheidung zwischen Kunststoffen und anderen Materialien (z. B. mineralische Stoffe, Glas, Metall) im Auflichtmikroskop möglich. Für kleinere Partikel ist dies nur eingeschränkt der Fall. Für eine erste überblicksmäßige Analyse sind diese kostengünstigen Verfahren gut geeignet. Allerdings ist für diese Verfahren ein sehr erfahrenes Mikroskopie-Fachpersonal erforderlich. Zur Verbesserung der Aussage sind Kombinationen mit mikroanalytischen spektroskopischen Methoden (Raman-Spektroskopie oder FT-IR Spektroskopie) vorteilhaft.

Für die Überprüfung der bereits bestehenden Grenzwerte zu Kunststoffen über 2 mm Größe in Kompost und Düngemitteln (beides gilt für ganz Österreich; Kompost- bzw. Düngemittelverordnung) sowie in Böden über 1 mm Größe (gilt derzeit in Vorarlberg) wird eine technisch einfache, sowie kostengünstige Untersuchungsmethode angewendet: Hierbei werden Partikel aufgrund des visuellen Erscheinungsbildes (Form, Farbe, Struktur) als Kunststoffe aus der Probe identifiziert, aussortiert und gewogen bzw. deren Flächenausdehnung (zweidimensional) ermittelt. Der Sortieraufwand steigt mit abnehmender Teilchengröße, zugleich wird die (subjektiv geprägte) Einordnung als Kunststoff schwieriger.

Detailliertere Ergebnisse erzielt man mit spektroskopischen Methoden wie Infrarot- bzw. Ramanspektroskopie. Da organische Moleküle charakteristische Wellenlängen des Infrarotlichtes absorbieren, lässt sich mit beiden Methoden der Kunststofftyp bestimmen. In Kombination mit der Lichtmikroskopie lässt sich eine Auflösung von 10 µm und mehr erreichen. Die tatsächlich erreichte Partikeluntergrenze wird jedoch meist von der Probenaufbereitung bestimmt, da diese zur Extraktion von Kunststoffen aus dem Boden auch Trennschritte über Filtration oder Dichtentrennung erfordert.

Unabhängig von der Partikelgröße, lässt sich die Kunststoffmasse über thermoanalytische Methoden wie Pyrolyse-GC-MS sowie TED-GC-MS bestimmen. Beiden Methoden gemein ist, dass nicht ein Kunststoff-Partikel an sich erfasst wird, sondern das Partikel wird durch eine thermische Belastung in molekulare Bruchstücke zerlegt, die wiederum charakteristisch für einen Kunststofftyp sind. Diese verdampfbaren Bruchstücke werden mit Hilfe von Gaschromatographie getrennt und mittels Massenspektroskopie charakterisiert. Somit ist es möglich, bei gleichzeitiger Anwendung einer Kalibrierung die Menge eines Kunststoffes im Boden zu bestimmen. Diese Methode ist allerdings sehr aufwändig, da der thermische

Zerfall des Kunststoffes von der Matrix beeinflusst werden kann. Außerdem muss für eine Kalibrierung eine ähnliche Probe mit bekannter Kunststoffmenge hergestellt werden.

4.3 Abbaubarkeit von Kunststoffen in Böden

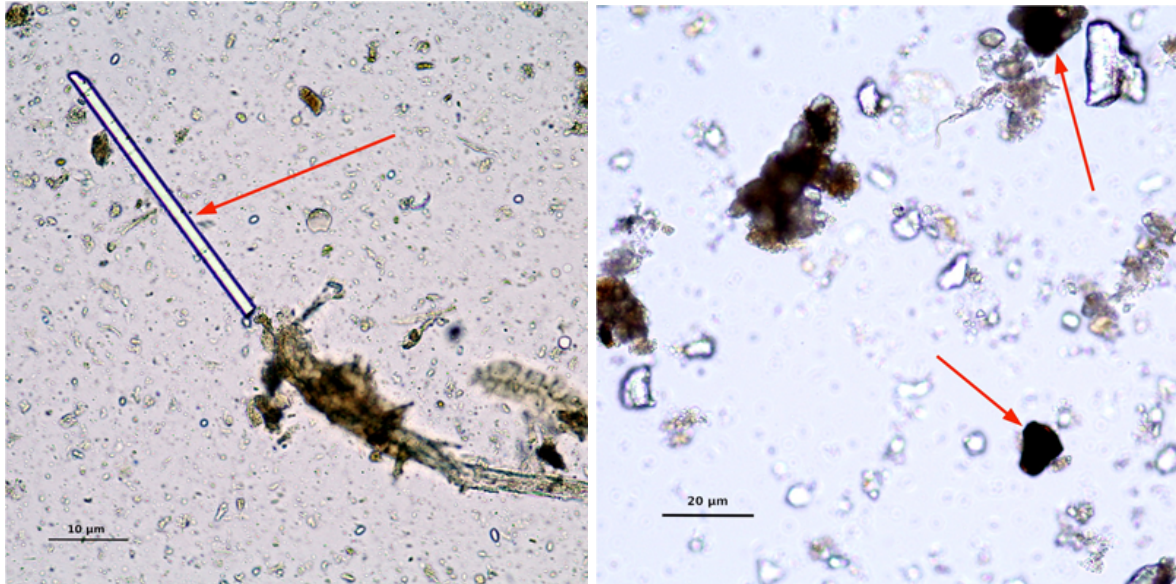
Natürliche Materialien sind solche, die durch biochemische Prozesse in Organismen synthetisiert wurden. Sie sind biologisch abbaubar, alle ihre Bestandteile und Elemente verbleiben im biologischen Stoffkreislauf. Kunststoffe hingegen wurden so entwickelt, dass sie eben genau dieser Reintegration in den biologischen Kreislauf möglichst lange widerstehen.

Die in den Medien wiederholt publizierte biologischen Abbauezeiten (bzw. Verweilzeiten) von PE, PET oder PS in der Umwelt gelten für Abbaueversuche im Labor und wurden meist unter Idealbedingungen ermittelt. Dabei wird von einer gemischten Population aus Mikroorganismen, wie sie beispielsweise im Boden, in Sedimenten oder im Klärschlamm vorkommt, ausgegangen, der keine andere Kohlenstoff- bzw. Energiequelle zur Verfügung steht. Die so festgestellten Abbauezeiten liegen zwischen 250 und 500 Jahren.

Für den tatsächlichen biologischen Abbau in der Umwelt gelten die publizierten Zahlenwerte nicht, denn Boden, Sediment und Klärschlamm enthalten auch andere, leichter verwertbare Kohlenstoff- und Energiequellen. Entsprechend der Grundregel der Diauxie nutzen (Mikro-) Organismen immer zuerst das am leichtesten abbaubare Substrat, bevor zu widerstandsfähigeren Substanzen übergegangen wird. In einem gewissen Ausmaß können von Mikroorganismen ausgeschiedene Exoenzyme auch zu einem Kunststoffabbau führen. Für die genannten Umwelthabitate gilt jedoch, dass die persistenten Kunststoffe in erster Linie erst dann abgebaut werden, wenn keine anderen organischen Substrate, also beispielsweise Pflanzenreste oder Humus im Boden, zu finden sind. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass in den Boden gelangte Kunststoffe viel länger unverändert dort verbleiben, als unter Laborbedingungen. Zusätzlich zum biogenen Abbau kann es durch chemisch-physikalische Einflüsse in geringem Umfang zur Fragmentierung, aber auch zu Materialveränderungen bis hin zum (abiotischen) Abbau kommen.

Mit jeder physikalischen oder chemischen Beanspruchung können Makro- und Meso-Plastik in kleinere Teilchen zerfallen. So finden sich wiederholt Faserreste und Bruchstücke von etwa 1 bis 5 µm Größe in großer Zahl in mineralischen Aggregaten und eingebettet in Tonmineral-Humus-Komplexe. Abbildung 3 zeigt zwei mikroskopische Aufnahmen von Bodenpartikeln mit Kunststoffverunreinigungen.

Abbildung 3: Kunststoffverunreinigungen im Mikroskop (Hellfeld): links: Humusneubildung an Pflanzenteilen neben einer Kunststofffaser; rechts: schwarze Kunststoffteilchen in Tonmineral-Humus-Komplexen. Fotos: Ines Fritz, 2019 li & 2018 re, unveröffentlicht.



4.4 Räumliche Verlagerung im Boden und Erosion

Boden kann aufgrund seiner Filterwirkung als Senke für (Mikro)Plastik gesehen werden. In speziellen Fällen kann es zu Verlagerungen im Bodenprofil kommen. Dies kann durch Bodenbearbeitung (z. B. Pflügen, Tiefpflügen) ausgelöst werden, aber auch in Fließwegen wie Poren (Kanäle von Wurzeln, Regenwurmröhren etc.) stattfinden. Horizontale Verlagerung / Erosion kann aufgrund von Starkregenereignissen oder Wind auftreten und zu Ansammlungen in angrenzenden Ökosystemen führen (Braun und Amelung, 2018).

Ob Kunststoffpartikel in den Untergrund und möglicherweise ins Grundwasser verlagert werden, hängt zusätzlich von den Eigenschaften wie Größe, Hydrophobizität, Oberflächenladung, Dichte und Form ab. Auch der Flurabstand des Grundwassers und die Eigenschaften des Bodens oder des Sediments, die sich auf deren potenzielles Filtervermögen auswirken, spielen eine wesentliche Rolle. Dazu zählen die Korngrößenverteilung, der vorhandene Porenraum (Makroporen), die Sättigung mit Wasser und die Fließgeschwindigkeit des Sickerwassers (Rillig et al., 2017a, 2017b). Ein Eintrag von (Mikro)Plastik-Teilchen, aber auch von deren Inhaltsstoffen (z. B. Phthalate, Nonylphenol, Bisphenol A) ins Grundwasser ist in den meisten Fällen zwar unwahrscheinlich, kann jedoch bei hochstehendem Grundwasser oder sandigen Böden nicht ausgeschlossen werden.

4.5 Auswirkungen von Kunststoffen im Boden

Die Auswirkungen von Kunststoffen im Boden sind bislang noch unzureichend erforscht. Man kann zwischen chemischen (z. B. Freisetzung von Zusatzstoffen, Wirkung als Überträger), physikalischen (z. B. Veränderung der Bodenstruktur) und biologischen (z. B. Aufnahme in die Nahrungskette) Effekten unterscheiden. Viele der bisher beschriebenen Effekte beziehen sich auf ihre kurzfristige Wirkung. Langfristige Effekte wurden bislang kaum untersucht. Einige Untersuchungen gehen allerdings nur von theoretischen Überlegungen aus.

Mikroplastik verbessert die chemischen Bodeneigenschaften im Regelfall nicht. Die in der Herstellung von Kunststoffprodukten üblichen Zusatzstoffe machen bis zu 40 Gewichtsprozent aus und werden aufgrund der effektiv größeren Oberfläche aus Mikroplastik leichter freigesetzt als aus größeren Teilen.

Im Boden können bereits vorhandene hydrophobe Schadstoffe (z. B. persistente organische (Schad)Stoffe, kurz POPs) zunächst zwar an Kunststoffoberflächen adsorbiert und damit unwirksam gemacht werden, jedoch werden sie über einen längeren Zeitraum wieder freigesetzt, sodass die potentiell schädliche Wirkung wiedergegeben ist.

Abhängig von der Art, Form und Größe des vorliegenden Mikroplastiks (z. B. Fasern, Kügelchen, Blättchen) und der Konzentration bzw. der vorliegenden Menge kann eine Beeinträchtigung der Aggregatstabilität, des Wasserhaltevermögens bzw. der Lagerungsdichte des Bodens festgestellt werden (Zhang et al., 2019; de Souza Machado et al., 2018a).

Zur besseren Risikoeinschätzung ist es erforderlich, den Einfluss von Mikroplastik auf die Funktionalität und die mechanische Integrität des Bodens weiter zu untersuchen. Im Sinne des Vorsorgeprinzips sind Maßnahmen zu treffen, um den weiteren Eintrag persistenter Kunststoffe in den Boden so gering wie möglich zu halten.

Über internationale Vernetzung mit Fachverbänden, Forschungsinitiativen, Behörden und Normungsinstituten können gemeinsame Erkenntnisse rund um Eintrag, Verbleib und Auswirkungen von Mikroplastik im Boden gewonnen und so Synergien genutzt werden.

4.6 Einfluss von Kunststoffen auf Bodenorganismen und Pflanzen

Negative Auswirkungen bestehen jedenfalls für die Bodentiere, die zum einen in ihrer Fortbewegung in Bodenporen durch Mikroplastik behindert werden und zum anderen Kunststoffteilchen als Nahrung aufnehmen (Kim und An, 2019). Dies kann auch zu Verhaltensänderungen, z. B. bei Fadenwürmern, führen (Lei et al., 2018). Bei Regenwürmern geht man zwar derzeit davon aus, dass sie das Mikroplastik wieder ausscheiden und die toxischen Effekte unter praktischen Umweltbedingungen vernachlässigbar sind (Wang et al., 2019). Nichtsdestoweniger kann ihr Verdauungssystem, so wie das anderer Bodenorganismen, belastet oder geschädigt werden, entweder durch die Partikel selbst oder freigesetzte Additive. Es ist daher nicht ausgeschlossen, dass es zu einer Verringerung der generellen „Fitness“ kommt. Hinweise auf einen beschleunigten biologischen Abbau von Mikroplastik in der Regenwurm-Darmpassage fördern eine weitere Verbreitung von Mikroplastik in der Nahrungskette (Huerta Lwanga et al., 2016). Die meisten Studien liegen derzeit zu aquatischen Organismen vor (siehe z. B. Review von Botterell et al., 2018), wobei sich in 45 % der Studien zu aquatischen Organismen negative Effekte zeigten. Ein Großteil der Ergebnisse bezieht sich auf Laborexperimente, die aufzeigen, welche Faktoren für die Aufnahme entscheidend, aber auch, wie komplex die Zusammenhänge sind.

Einige Studien weisen darauf hin, dass Mikroplastik im Boden einen negativen Einfluss auf das Pflanzenwachstum haben kann. Der Effekt wurde jedoch nur in einem sehr hohen Konzentrationsbereich nachgewiesen (van Weert et al., 2019). Ein Faktor ist aber auch die mögliche Aufnahme von freigesetzten bedenklichen Kunststoff-Additiven in die Pflanze und somit in die Nahrungskette (Castan et al., 2023).

5 Rechtliche Rahmenbedingungen

Unerwünschte Gehalte von Kunststoffen bzw. Mikroplastik werden, wie für andere Störstoffe auch, über Grenzwerte geregelt. Es kann grundsätzlich zwischen emissionsseitigen (z. B. Düngemittel) und immissionsseitigen (Boden) Grenzwerten unterschieden werden.

5.1 Emissionsseitige Grenzwerte für Kunststoffe und Mikroplastik

Um den Eintrag von Kunststoffen in Böden über die Aufbringung von Materialien zu reduzieren, gibt es in Österreich seit dem Jahr 2001 in der Kompostverordnung (Kompostverordnung BGBl. II Nr. 292/2001) sowie seit 2019 in der Düngemittelverordnung (Düngemittelverordnung BGBl. II Nr. 100/2004) festgelegte Grenzwerte für Fremdstoffe über 2 mm bzw. 20 mm Größe. Diese Grenzwerte gelten für alle in Österreich in Verkehr gebrachten Komposte und Düngemittel. Das österreichische Abfallwirtschaftsgesetz (AWG) sieht einen maximalen Anteil von bodenfremden organischen Bestandteilen, insbesondere Kunststoff, von einem Volums Prozent in Bodenaushubmaterialien vor. In Vorarlberg gelten seit 2019 Grenzwerte (Vlbg. Bodenqualitätsverordnung LGBl. Nr.77/2018) für die Summe der Fremdstoffe aus Kunststoff, Gummi sowie Verbundstoffen für alle Materialien, die auf Vorarlberger Böden ausgebracht werden (Bei den Grenzwerten handelt es sich hauptsächlich um massenbasierte Größen. Die Vorarlberger Bodenqualitätsverordnung betrachtet zusätzlich auch die optische Wirkung, also eine flächenwirksame Größe des Kunststoffes. Darüber hinaus dürfen weder Kunststoffe über 2,5 cm Größe in Materialien (z. B. Düngemittel, Bodenhilfsstoffe) enthalten sein, noch dürfen Kunststoffe, insbesondere fragmentierbare Kunststoffe, absichtlich in bestimmten Materialien beigemischt werden. In den oben aufgelisteten Rechtsmaterien werden ausschließlich Kunststoffe über 2 mm Größe betrachtet. Kleinere Partikel werden bei den Analysemethoden und geltenden Grenzwerten nicht berücksichtigt. Somit gibt es in Österreich für die Fraktion von Mikroplastik unter 2 mm Größe in ausgebrachtem Material (emissionsseitig) aktuell keine gesetzliche Regelung.

Auch in den Nachbarländern Deutschland und Schweiz wurden für Düngemittel und Komposte Grenzwerte für Fremdstoffe inklusive der Kunststoffe, festgelegt. Die Schweiz verschärfte beispielsweise im Jahr 2016 die Kunststoffgrenzwerte in der Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung (ChemRRV 2005). Seither werden Hartplastik, Kunststofffolien und

Alufolie zusammen bewertet und die Messuntergrenze von vormals 2 mm wurde gestrichen. Somit fällt nun auch Mikroplastik unter diese Regelung. In der deutschen Düngemittelverordnung (DüMV, Deutschland 1991) wird zusätzlich der Eintrag von synthetischen Polymeren auf Böden durch eine Frachtenregelung begrenzt.

Frankreich hat 2018 ein Einsatzverbot von fragmentier baren Kunststoffen in der Landwirtschaft erlassen, welches insbesondere oxo- und foto-abbaubare Kunststoffe (Zerfall durch Lichteinwirkung) im Gebrauchsbereich von Mulch- und Abdeckfolien sowie Langzeitdüngerperlen umfasst. Seit 2021 ist die Verwendung von oxo-abbaubaren Kunststoffen gemäß der RICHTLINIE (EU) 2019/904 verboten, dies ist in Österreich durch das Abfallwirtschaftsgesetz umgesetzt. In dieser Richtlinie wurden auch häufige als „Litter“ endende Kunststoff-Einweganwendungen verboten (Wattestäbchen, Kunststoffbesteck und -teller, Strohhalme, Luftballonstäbe, sowie Becher und Essens-/Getränkebehälter aus expandiertem PS).

Die EU – Düngemittelverordnung 2019/1009 sieht in Artikel 42 Abs. 4 eine eindeutige Regelung zur biologischen Abbaubarkeit von Polymeren, die über Düngemittel in den Boden gelangen, vor. Darüber hinaus sind auch maximale Gehalte an Kunststoffen im Kompost und in Gärrückständen geregelt, sofern sie als Düngemittel eingesetzt werden.

Tabelle 1: Emissionsseitige Grenzwerte für Kunststoffe in österreichischen, deutschen und schweizerischen Rechtsnormen

| Rechtsnorm | Land | Gültig seit | Geltungsbereich | Art des Kunststoffes | Partikelgröße | Grenzwert |
|-------------------------|------------|-------------|--|----------------------|---------------|------------------------------|
| Bundeskompst-Verordnung | Österreich | 2001 | in Verkehr gebrachter Kompost Landwirtschaft | Kunststoffe | > 2 mm | 0,2 bzw. 0,02 Gew.-% TM |
| | | | in Verkehr gebrachter Kompost Landschaftsbau | | > 20 mm | 0,4 bzw. 0,04 Gew.-% TM |
| Düngemittelverordnung | Österreich | 2019 | in Verkehr gebrachte Düngemittel | Kunststoffe | > 2 mm | 0,1 Gew.-% |
| | | 2010 | in Verkehr gebrachte Biogasgülle | | | schwer abbaubare Kunststoffe |

| Rechtsnorm | Land | Gültig seit | Geltungsbereich | Art des Kunststoffes | Partikelgröße | Grenzwert |
|--|-------------------|-------------|--|---|-----------------------|----------------------------------|
| Abfallwirtschaftsgesetz bzw. Bundesabfallwirtschaftsplan | Österreich | 2002 | Bodenaushubmaterial | organische, bodenfremde Bestandteile (inkl. Kunststoffe) | | 1 Vol.-% |
| Vlbg. Bodenqualitätsverordnung | Vorarlberg | 2019 | alle Materialien, die auf Böden aufgebracht werden | Kunststoff (inkl. biologisch abbaubare), Gummi, Verbundstoffe | > 2 mm | 0,1 Gew.-% |
| | | | | | > 25 mm | Null |
| Düngemittelverordnung | Deutschland | 2015 | in Verkehr gebrachte Düngemittel | Kunststofffolien | > 2 mm | 0,1 Gew.-% |
| | | | | Fremdstoffe inkl. Hartplastik | | 0,4 Gew.-% |
| Bioabfallverordnung | Deutschland | 1998 | unbehandelte und behandelte Bioabfälle und Gemische, die auf Böden aufgebracht oder abgegeben werden | Fremdstoffgehalt inkl. Kunststoff | > 2 mm | 0,5 Gew.-% |
| Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung | Schweiz | 2016 | Kompost und Gärgut | Kunststoffe und Alufolie | keine Messuntergrenze | 0,1 Gew.-% |
| EU Düngemittelverordnung | Europäische Union | 2019 | Kompost, Gärückstände | Kunststoff | >2mm | 3 g/kg TM (ab 2026: 2,5 g/kg TM) |

5.2 Immissionsseitige Grenzwerte für Kunststoffe und Mikroplastik in Böden

Unter Immissionsgrenzwerten werden maximale Gehalte an Schadstoffen in einem Umweltmedium, wie z. B. dem Boden, verstanden, die nicht überschritten werden dürfen. Immissionsgrenzwerte sind besonders in Böden relevante Größen, da diese als Senken fungieren. So kann es trotz Einhaltung von Emissionsgrenzwerten bei regelmäßiger und langjähriger Ausbringung von belasteten Materialien zu Schadstoffanreicherungen kommen. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn es sich bei den betrachteten Schadstoffen um schwer oder nicht abbaubare Stoffe handelt. Die meisten Kunststoffe fallen in diese Stoffgruppe.

Immissionsgrenzwerte für Kunststoffe ab einer Größe von 1 mm sind in der Vorarlberger Bodenqualitätsverordnung festgelegt. Es wird dabei zwischen an der Bodenoberfläche aufliegendem Kunststoff, dem sogenannten „optischen Verunreinigungsgrad“ und jenem Kunststoff, der bereits in den Boden gelangt ist, unterschieden. Der optische Verunreinigungsgrad definiert jene maximal zulässige Flächensumme an Kunststoff, die auf einem Quadratmeter Boden oberflächlich aufliegen darf. Der massenbasierte Grenzwert hingegen begrenzt den maximal zulässigen Gehalt an Kunststoffen in den obersten 10 cm des Bodens. Für beide Bewertungsmethoden wird zusätzlich zwischen einem Vorsorge- und einem Grenzwert unterschieden.

Für die Fraktion von immissionsseitigem Mikroplastik unter 1 mm Größe gibt es in Österreich aktuell keine gesetzliche Regelung.

Tabelle 2: Grenzwerte und Vorsorgewerte für Kunststoffe der Vorarlberger Bodenqualitätsverordnung

| Bodengrenzwerte | |
|---|------------------------------------|
| Summe der Fremdstoffe aus Kunststoff und Gummi sowie Verbundstoffen mit Anteilen davon (> 1 mm) | 200 mg/kg TM |
| Flächensumme der Fremdstoffe aus Kunststoff und Gummi sowie Verbundstoffen mit Anteilen davon | 10 cm ² /m ² |
| Bodenvorsorgewerte | |
| Summe der Fremdstoffe aus Kunststoff und Gummi sowie Verbundstoffen mit Anteilen davon (> 1 mm) | 100 mg/kg TM |
| Flächensumme der Fremdstoffe aus Kunststoff und Gummi sowie Verbundstoffen mit Anteilen davon | 5 cm ² /m ² |

6 Handlungsempfehlungen

Im Folgenden werden einige Möglichkeiten aufgezeigt, um den Eintrag von Kunststoffen in Böden zu verringern bzw. gänzlich zu vermeiden. Aufgrund des erst relativ jungen Bewusstseins über die Thematik, stehen die entsprechenden Lösungen in vielen Bereichen noch am Beginn ihrer Entwicklung. Deshalb und auch aufgrund der Komplexität der gewachsenen Problematik, können im Rahmen dieser Broschüre nur Empfehlungen abgegeben und Entwicklungen angeregt werden.

6.1 Rechtliche Rahmenbedingungen

Aktuell gibt es international nur einige wenige behördliche Vorgaben, die darauf abzielen, die Ansammlung von Kunststoffen in der Umwelt zu verringern. Eine der bedeutendsten ist das Strategiepapier COM (2018) 28 vom 16. Jänner 2018, das der „Einwegkunststoffrichtlinie“ (EU Richtlinie 2019/904 – Single-Use Plastics Directive) vom 5. Juni 2019 als Vorlage diente. Darin wird das Inverkehrbringen der zehn auf europäischen Stränden meistgefundenen Einweg-Kunststoffprodukte explizit verboten. In Österreich ist das Verbot des Inverkehrbringens von Einweg-Kunststofftragetaschen seit 1. Jänner 2020 in Kraft (in Form einer Novelle/Ergänzung des AWG BGBl 102/2002) und kann somit als nationale Direktive zur Vermeidung eines Teils des Eintrags von Kunststofffolien in die Umwelt betrachtet werden.

Um eine Verbreitung von Mikroplastik aus Reifenabrieb (siehe auch 6.2) zu beschränken, wurde im Bundes-Abfallwirtschaftsplan 2023 (Kapitel 4.8. „Aushubmaterialien“) eine landwirtschaftliche Verwertung von Bankettschälgut nur von Straßen mit einem (sehr geringen) Verkehrsaufkommen von weniger als 500 Fahrzeugen pro Tage (DTV) zugelassen.

Neben den verbindlichen Maßnahmen gibt es viele regionale oder lokale Initiativen, vor allem auf Druck der Verwerterinnen und Verwerter biogener Abfälle, im Bestreben ein Inputmaterial zu erhalten, das möglichst frei von Kunststoffen ist, um damit die Kunststoffreste im Kompost (der auf die Felder ausgebracht wird) gering zu halten. Solcher Art Maßnahmen sind freiwillig, setzen auf das Umweltbewusstsein der Bevölkerung und unterscheiden sich nach Abfallbezirken und Bundesländern.

6.2 Quellen und Vermeidungsstrategien

Um Mikroplastikeinträge in den Boden zu reduzieren oder zu verhindern, ist die Entwicklung von technisch und kommerziell umsetzbaren Instrumenten unumgänglich, die zu einer „Systemumstellung“ beitragen. Es sind jene Maßnahmen zu bevorzugen, die die günstigste Energiebilanz aufweisen. Der Kompost und Biogas Verband Österreich startete im Herbst 2021 die Initiative „Bündnis mikroplastikfrei“, einen sektorenübergreifenden Zusammenschluss von Partnern aus der Wissenschaft und Forschung, Industrie, Interessensverbänden sowie der kommunalen Verwaltung. Ziel der Organisation ist es, gemeinsam umsetzbare Lösungsstrategien zu erarbeiten, um weitere Plastikeinträge in unserer Umwelt zu reduzieren.

Am 11. Mai 2022 beschloss die Bundesregierung den Österreichischen Aktionsplan Mikroplastik. Dieser soll die Freisetzung von Mikroplastik in die Umwelt, durch 25 Maßnahmen innerhalb fünf definierter Aktionsfelder, reduzieren: (1) Stärkung der Datenlage, Forschung und Innovation; (2) effektive Umsetzung und Weiterentwicklung der Regulierung; (3) Bewusstseinsbildung im Bereich Öffentlichkeit und Schulen; (3) freiwillige Maßnahmen; (5) Maßnahmen auf globaler Ebene.

6.2.1 Reduktion des gezielten Einsatzes von Mikroplastik

Primäres Mikroplastik wird für die Anwendung (z. B. in Zahnpasta, Duschgels, Kosmetikprodukten, Reinigungsprodukten) gezielt hergestellt (AGES 2019). Der absichtliche Einsatz von Mikroplastikpartikeln in Produkten sollte deutlich eingeschränkt werden, da so die über den Haushaltsmüll und über das Abwasser freigesetzte Menge reduziert wird. Auf europäischer Ebene gilt gemäß der REACH-VO ein Verbot von Mikroplastik, welches Produkten absichtlich hinzugefügt wird. Hierbei handelt es sich um Produkte aus unterschiedlichsten Bereichen. Unter den zuvor genannten Produkten sind z. B. auch Düngemittel und Pflanzenschutzmittel betroffen. Mikrokunststoffe werden auch als weiches Füllmaterial in Kunstrasenplätzen verwendet. Eine Untersuchung kommt zu dem Ergebnis, dass Kunstrasenplätze aufgrund ihrer Verbreitung eine signifikante Mikroplastikquelle sind (Fraunhofer UMSICHT 2021). In der Systemanalyse wird der Materialverlust pro Platz und Jahr auf bis zu 3 Tonnen beziffert. Die Kommission veröffentlichte am 30. August 2022 einen Entwurf zur vorgeschlagenen Beschränkung. Das Verbot ist 2023 zu erwarten.

Die genauen Rahmenbedingungen des Verbots stehen derzeit noch in Verhandlung, wobei die Europäische Kommission am 30. August 2022 einen überarbeiteten Entwurf vorgelegt

hat. Dieser basiert auf einem Bericht der European Chemicals Agency (ECHA), welcher eine weitreichende Beschränkung von Mikroplastik in Produkten vorschlägt, mit der die Freisetzung von 500 000 Tonnen Mikroplastik über einen Zeitraum von 20 Jahren vermieden werden soll.

6.2.2 Reduktion der unbeabsichtigten Mikroplastikfreisetzung

Sekundäres Mikroplastik entsteht aus Gebrauchsgegenständen aus Kunststoff durch Abnutzung, Verwitterungs-, Alterungs- oder Zerfallsprozesse. Die Europäische Kommission (GD Umwelt) hat eine Studie zur Kosten-Nutzen-Analyse von politischen Maßnahmen zur Reduktion von unbeabsichtigten Mikroplastikfreisetzungen beauftragt. Diese soll unter Einbezug der Stakeholder eine mögliche Rechtsprechung unterstützen. Ein Vorschlag ist 2023 zu erwarten.

Für die wichtigsten Eintragspfade können u.a. folgende mögliche Vermeidungsstrategien angeführt werden:

Abrieb von Reifen, Abrieb von Fahrbahndecken:

Laut Schätzungen macht der Anteil von Reifenabrieb alleine 30,7 % der Gesamtmenge der Mikroplastikemission aus und stellt somit die größte Emissionsquelle für Mikroplastik dar (Fraunhofer UMSICHT 2018). Pro Jahr werden allein in Österreich mehr als 20.000 Tonnen in Wasser, Boden und Luft emittiert (Prenner et al., 2021). Aus Reifenabrieb stammende Zusatzstoffe können in der Wurzelzone essbarer Pflanzen freigesetzt werden, diese wiederum können leicht von den Pflanzen, wie z. B. Kopfsalat aufgenommen werden (Castan et al, 2023).

Die Abriebeigenschaften von Reifen sind sehr unterschiedlich (zwischen 60 und 120 g/1.000 km)¹, durch entsprechende Reifenkonstruktion bzw. Optimierung der Gummimischung hin zu abriebresistenteren Reifen wäre eine deutliche Reduktion möglich. Entsprechende Anreize oder produktrechtliche Vorgaben existieren jedoch (noch) nicht. Weiters kann die Optimierung von Fahrverhalten, Reifendruck und Axenausrichtung sowie eine Verbesserung und Sanierung von Straßenoberflächen sinnvoll sein.

¹ <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/ausstattung-technik-zubehoer/reifen/reifenkauf/reifenabrieb-mikroplastik/>

Auf EU Ebene werden im Rahmen von Euro sieben Reifenabriebs-Grenzwerte diskutiert, wofür jedoch zuerst eine Abriebs-Testmethode sowie eine Kennzeichnungspflicht für Reifen in Bezug auf eine Normung von Abrieb hinsichtlich gefahrener Kilometer festgelegt werden müssten.

Während in städtischem Gebiet der Reifenabrieb hauptsächlich über die Niederschlagswässer in die Kanalisation abgeführt wird, findet in ländlicheren Gegenden eine markante Akkumulation in straßennahen Böden statt. Die Mikroplastikanteile reichern sich dabei vor allem in den oberen 20 cm im unmittelbaren Bankettbereich in einem Abstand von ca. 1 m beiderseits der Straße an.

Insbesondere diese mit Reifenabrieb „beladenen“ Bankettbereiche fallen im Zuge von Baumaßnahmen, aber auch durch das periodisch notwendige „Abschälen“ von nicht befestigten Banketten, die sich durch den Eintrag von Staub, den Aufwuchs von organischem Material sowie Streugut (z. B. Splitt) erhöhen und damit den Abfluss des Oberflächenwassers von der Straße behindern, regelmäßig als Abfall (Bankettschälgut) an. Dieses Bankettschälgut (ca. 300.000 Tonnen² pro Jahr in Österreich) wird oftmals für landwirtschaftliche und nicht landwirtschaftliche Rekultivierungen verwendet, nur ein Teil davon wird deponiert. Durch diese Verwertungsmaßnahmen wird der Reifenabrieb weiter in der Biosphäre verteilt. Auch im Zuge von Baumaßnahmen kann dieses Bankettmaterial – meist vermischt mit geringer belasteten, tiefen Schichten, die mit ausgehoben werden – in Verwertungen abseits der jeweiligen Straßen gelangen und damit zur weiteren Verteilung beitragen.

Mögliche spezifische Gegenmaßnahmen sind:

- Reduktion des Abriebs von Reifen durch entsprechend optimierte Gummimischungen; Einführung gesetzlicher Obergrenzen
- Einschränkung der Verwertung von belastetem Bankettschälgut
- separate Entnahme und entsprechende Entsorgung des straßennahen Oberbodens bei Um- und Rückbauvorhaben von Straßen
- Sensibilisierung von Gemeinden, Straßen Erhaltern und Landwirten bezüglich der Problematik von Reifenabrieb im straßennahen Boden bzw. deren Verbreitung/Verteilung über Verwertungsmaßnahmen dieser Oberböden

² Vgl. Berechnungen des Schlussberichts „Wirtschaftliche Verwertung von Materialien des Straßendienstes“ der österr. Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr (FSV), Februar 2014

Abplatzungen von Farben/Lacken/Anstrichen:

Laut Erhebungen innerhalb der von der Europäischen Kommission beauftragten Studie zur unbeabsichtigten Mikroplastikfreisetzung tragen Farben/Lacke/Anstriche ähnlich große Mengen bei wie Reifenabrieb. Mögliche Maßnahmen umfassen Produktdeklarationen zu Lebensdauer und Kunststoffgehalten von Anstrichen sowie die Förderung von umweltfreundlichen Alternativen (z. B. Mineralfarben).

Baustellen – Emissionsminderung beim Einsatz von Kunststoffen und der Abfallentsorgung (Transport, Behandlung, Deponierung):

In Bereichen, bei denen Kunststoffe im Freien oder mit der Gefahr eines Verlustes ins Freie eingesetzt werden (z. B. Dämmung von Außenwänden, Abdeckfolien), sind entsprechende Emissionsvorkehrungen zu treffen. Für Geotextilien könnten Normen zur Abnutzung und Haltbarkeit sowie in bestimmten Fällen biologische Abbaubarkeit Sinn machen. Natürliche Alternativen im Bereich der Baumaterialien sollten, wenn möglich bevorzugt werden. Wenn die Entstehung von Mikroplastik nicht völlig vermieden werden kann, ist die Ausbreitung am Ort des Entstehens möglichst zu verhindern. Dies kann z. B. durch dezentrale Technik vor Ort mit Einsatz von Filtern erreicht werden. So wird die Rückgewinnungsrate von Mikroplastik deutlich erhöht und dadurch das Risiko von Verfrachtungen und einer Verbreitung durch Niederschlagsereignisse vermindert. Zusätzlich werden auch laufend neue Maßnahmen zur Reduktion von unbeabsichtigten Kunststoff-Emissionen entwickelt und umgesetzt.

Verpackungen: Reduktion, Umstieg auf Mehrweglösungen und abbaubare Materialalternativen

Derzeit übliche Verpackungspraktiken benötigen einen hohen Ressourceneinsatz und verursachen darüber hinaus große Mengen an Kunststoffabfall. Prioritär sollten Strategien für eine Optimierung der Verpackung (Weglassen oder Reduktion) und den Einsatz nachhaltiger Materialien entwickelt werden. In diesem Zusammenhang wären auch die „Ressourcenbilanz“ von Verpackungsmaterialien zu berücksichtigen und eventuelle Vorteile herkömmlicher Kunststoffverpackungen im Vergleich zu alternativen Materialien (z. B. bezüglich der Haltbarkeit tierischer Produkte) zu prüfen.

Im Bereich der Lebensmittel Obst, Gemüse und Backwaren sollte auf Verpackungsvermeidung und – soweit zum Schutz der Lebensmittel sinnvoll – ein Umstieg auf zertifiziert abbaubare Verpackungen erfolgen, um der Verunreinigung des Bioabfallstroms durch persistente Kunststoffe entgegenzuwirken. Insbesondere im Take-Away Bereich sollten verstärkt Mehrwegbehältnisse zum Einsatz kommen.

Littering

Ein nicht zu unterschätzender Eintragsweg, insbesondere von Meso- und Makrokunststoffen, stellt das ungeordnete Wegwerfen oder Liegenlassen von kleinen Einzelmengen an Abfall, sogenanntes „Littering“, dar. Ein explizites österreichweites Littering-Verbot gibt es nicht, allerdings ist illegales Ablagern von Abfall gemäß AWG generell nicht zulässig. Durch das Forstgesetz (bundesweit) sowie Regelungen einzelner Bundesländer (Bodenschutzgesetze der Länder, Vorarlberger Naturschutzgesetz, Tiroler Feldschutzgesetz) sind ebenfalls entsprechende Regelungen vorgegeben.

Zur Vermeidung bzw. Verringerung des Litterings können folgende Maßnahmen vorgeschlagen werden:

- Stärkung der Bewusstseinsbildung bereits ab dem Kindergartenalter,
- die Fortsetzung von Informationskampagnen und die Steigerung der Mehrweg-Quote bei Getränkeverpackungen aus Kunststoff (Pfand auf Plastikflaschen) und Metallen (z. B. Aluminium), sowohl im Lebensmitteleinzelhandel, bei Veranstaltungen als auch bei Take-Away,
- Pfand für Kunststoffflaschen,
- flächendeckendes Aufstellen von speziellen Papierkorb/Ascher-Kombinationen für die Entsorgung von Zigarettenstummeln und
- Verstärkung der Zusammenarbeit von Gemeinden, Straßenverwaltung und Betreibern von Fast-Food-Restaurants, Tankstellen und Einkaufszentren im Hinblick auf Anti-Littering-Maßnahmen.

Land- und Forstwirtschaft, Landschaftsbau

Durch den Einsatz von Kunststoffprodukten in der Land- und Forstwirtschaft sowie im Landschaftsbau (z. B. Sport- und Freizeitanlagen wie Tennis- und Reitplätze, aber auch Fußballkunstrasen) kann es zu einer unmittelbaren Freisetzung von Kunststoffen in die Umwelt kommen. Die Wahrscheinlichkeit dieser Freisetzung oder der Verwitterung der Materialien ist in diesem Anwendungsbereich als hoch einzuschätzen. Davon betroffen sind z. B. Mulchfolien, Rankhilfen, Pflanztöpfe sowie Verbiss-, Schäl- und Fegeschutzeinrichtungen. Hier sollten Anreizsysteme für die Entwicklung und den Einsatz von natürlichen oder zertifiziert abbaubaren Materialien geschaffen werden.

Innovationen, Öffentlichkeitsarbeit und Bewusstseinsbildung

Innovative Ansätze sind vielerorts in der Materialentwicklung notwendig. Beispielhaft ist das (noch) eingeschränkte Produktangebot bei biologisch abbaubaren Mulch Folien, das derzeit allerdings nur teilweise die Anforderungen an Lebensdauer und Hygiene, aber auch an die Abbaubarkeit unter Umweltbedingungen erfüllt. Werkstoff- und Produktinnovationen sollten den Eigenschaften der aktuellen Produkte aus konventionellen Kunststoffen möglichst nahekommen und darüber hinaus die Langlebigkeit bestimmter Produkte verbessern und so die emittierten Mengen reduzieren.

Bemühungen zur Bewusstseinsbildung (z. B. durch Öffentlichkeitsarbeit von Ländern, Gemeinden, Abfallverbänden, Gewerbe, Industrie und über Medien) zu folgenden Themen müssten sowohl national als auch regional verstärkt werden:

- sachgerechte Anwendung von Kunststoffprodukten,
- korrekte Trennung und Entsorgung von (Kunststoff-)Abfällen,
- Verhinderung des achtlosen Wegwerfens von Abfall (Littering).

So dienen die jährlich durchgeführten Flurreinigungsaktionen in den Bundesländern bereits diesem Zweck. Im Jahr 2019 haben über 2.700 solcher Aktionen stattgefunden, mit über 170.000 Teilnehmerinnen und Teilnehmern und einer gesammelten Abfallmenge von ca. 1.000 Tonnen (ARGE Abfallverbände, 2019).

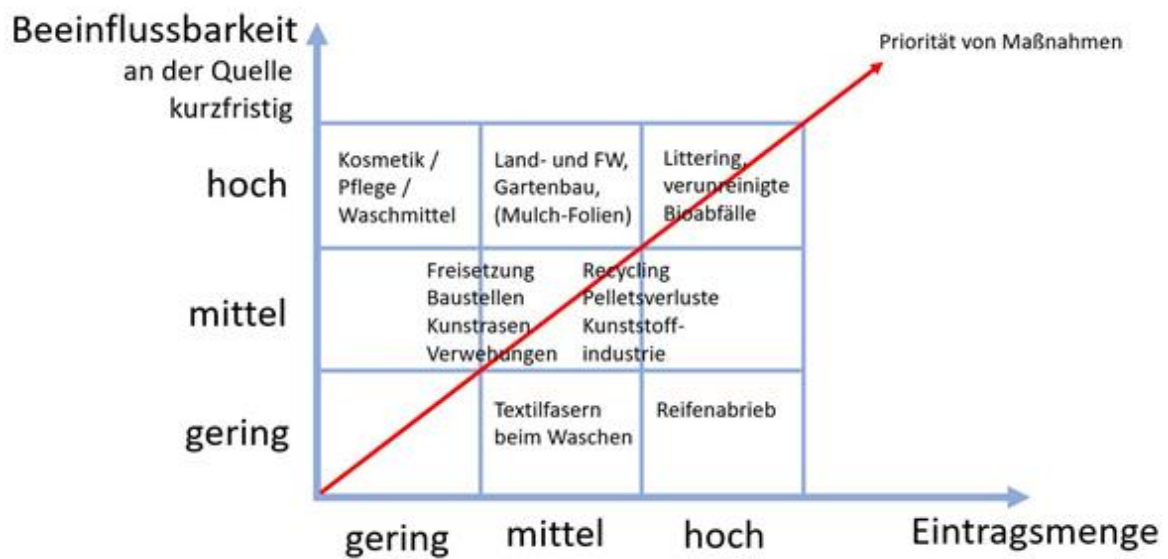
Um bei Verursachenden eine Verhaltensänderung zu fördern, wären darüber hinaus z. B. auch entsprechende behördliche Maßnahmen denkbar, die entweder auf Bundes- oder Landesebene umgesetzt werden könnten. Ein Beispiel dafür wären die „Waste Watcher“ in Wien. Zusätzlich sollten Anreizsysteme zur saubereren Abfallentsorgung und -trennung, sowie für die Langlebigkeit und Reparierbarkeit von Produkten geschaffen werden.

Priorisierung von Maßnahmen

Die Umsetzung notwendiger Maßnahmen kann anhand der Kriterien „kurzfristige Beeinflussbarkeit an der Quelle“ und „Eintragsmenge“ bewertet und nach Priorität gereiht werden (siehe Abbildung 4).

Abbildung 4: Priorisierung von Maßnahmen zur Reduktion von Mikroplastikeinträgen.

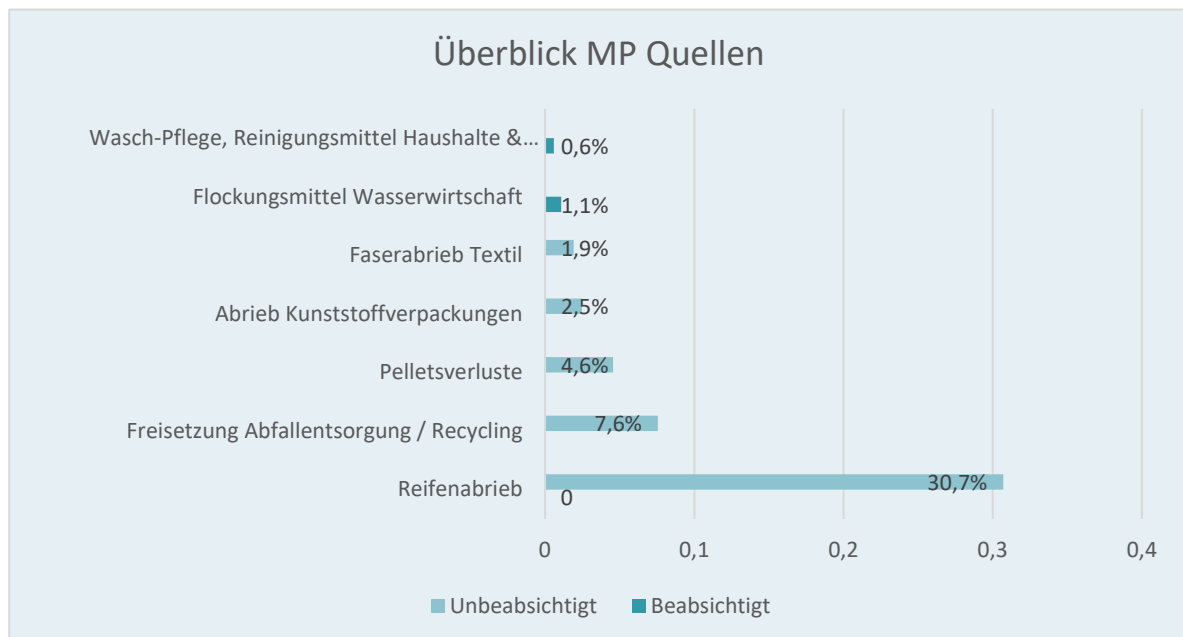
© Bündnis mikroplastikfrei



7 Fazit:

Das Ausmaß der Auswirkungen von Kunststoffeinträgen in die Böden lässt sich bisher nur ansatzweise abschätzen. Im Sinne des Vorsorgeprinzips sollte insgesamt eine drastische Reduktion von Kunststoffemissionen in die Umwelt angestrebt werden. Der größte Teil der Mikroplastikfreisetzung entsteht unbeabsichtigt, durch Abrieb, Verwitterungs- und Zerkleinerungsprozesse.

Abbildung 5: Beabsichtigte und unbeabsichtigte Freisetzung von Mikroplastik (nach FRAUNHOFER UMSICHT 2018)



Die Lösungen sollten sich daher auf die Reduktion an den Eintragsquellen konzentrieren, da Mikroplastikpartikel, die sich bereits in der Umwelt befinden, nicht effizient rückholbar sind. Umgesetzt werden könnte dieser Ansatz durch Innovationen bei Reifenbauarten und Textildesign, eine Verringerung der Kunststoffproduktion, regulatorische und unternehmerische Maßnahmen zur Verhinderung von Pelletsverlusten bei der Herstellung von Kunststoffprodukten, Reduktion und Substitution von Lebensmitteleinwegverpackungen sowie ein Verbot von Mikroplastik-Inhaltsstoffen in Körperpflegeprodukten. Dieses bewusst eingesetzte primäre Mikroplastik macht einen vergleichsweise geringen Anteil der gesamten

Emissionen aus (siehe Abbildung 5), jedoch ist es hier einfach, durch Vermeidung bzw. Materialsubstitution an der Quelle anzusetzen und diese Emissionen gänzlich zu eliminieren (vgl. Abbildung 4)

Referenzen:

Austrian Standards 2007: ONR 2915351: Leitfaden für Begriffe im Bereich abbaubarer und bioabbaubarer Polymere und Kunststoffteile (CEN/TR 15351). Wien.

Austrian Standards 2004: ÖNORM L 1054: Probenahme von Böden – Allgemeines, Terminologie. Wien.

Austrian Standards 2004: ÖNORM L 1055: Probenahme von ackerbaulich genutzten Böden. Wien.

Austrian Standards 2004: ÖNORM L 1056: Probenahme von Dauergrünland (inklusive Parkanlagen, sowie Zier- und Sportrasen). Wien.

Austrian Standards 2004: ÖNORM L 1057: Probenahme von wein- und obstbaulich genutzten Böden und Böden von Baumschulen. Wien.

Austrian Standards 2004: ÖNORM L 1058: Probenahme von Böden in geschütztem Anbau, Substraten und Nährlösungen. Wien.

Austrian Standards 2004: ÖNORM L 1059: Probenahme von Waldböden. Wien.

Bertling, J., Bertling, R., Hamann, L., (2018): Kunststoffe in der Umwelt: Mikro- und Makroplastik. Fraunhofer UMSICHT. Deutschland

Bertling, J., Bertling, R., Dresen, B., Aryan, V., Weber, T., (2021): Kunstrasenplätze – Systemanalyse unter Berücksichtigung von Mikroplastik- und Treibhausgasemissionen, Recycling, Standorten und Standards, Kosten sowie Spielermeinungen. Fraunhofer UMSICHT. Deutschland

Bioabfallverordnung Deutschland 1998: Verordnung über die Verwertung von Bioabfällen auf landwirtschaftlich, forstwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Böden (Bioabfallverordnung – BioAbfV); geltende Fassung.

BMBF (2018): Diskussionspapier – Mikroplastik-Analytik. Bundesministerium für Bildung und Forschung, Deutschland. <https://bmbf-plastik.de/sites/default/files/2018-10/Diskussionspapier%20Mikroplastik-Analytik.pdf>

Bodenqualitätsverordnung 2019: Verordnung der Landesregierung zur Durchführung des Gesetzes zum Schutz der Bodenqualität (Bodenqualitätsverordnung); LGBl. Nr. 77/2018.

Botterell, Z. L., Beaumont, N., Dorrington, T., Steinke, M., Thompson, R. C., Lindeque, P. K. (2018): Bioavailability and effects of micro plastics on marine zooplankton: A review. *Environmental Pollution*, 245, 98-110.

Braun, M., & Amelung, W. (2018): Synthetische Kunststoffe (Plastik). In W. Wilcke, B.-M. Wilke, & N. Litz (Hrsg.), *Bodengefährdende Stoffe: Bewertung—Stoffdaten—Ökotoxikologie—Sanierung* (S. 1–44).
<https://doi.org/10.1002/9783527678501.bgs2018001>

Bundesabfallwirtschaftsgesetz 2002: Bundesgesetz über eine nachhaltige Abfallwirtschaft (AWG 2002).

Bundesabfallwirtschaftsplan 2017: Teil 1. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. Wien.

Busse L., Rechenberg B. 2019: Kunststoffe in der Umwelt. Umweltbundesamt Deutschland. Dessau-Roßlau.

Castan S., Sherman A., Peng R., Zumstein M., Wanek W., Hüffer T., Hofmann T., 2023: Uptake, Metabolism, and Accumulation of Tire Wear Particle-Derived Compounds in Lettuce. *Environ. Sci. Technol.* 2023, 57, 1, 168–178

Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung 2005: Verordnung vom 18. Mai 2005 zur Reduktion von Risiken beim Umgang mit bestimmten besonders gefährlichen Stoffen, Zubereitungen und Gegenständen (Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung, ChemRRV).

De Souza Machado, A. A.; Lau, C. W.; Till, J.; Kloas, W.; Lehmann, A.; Becker, R. und Rillig, M. C. (2018a): Impacts of Microplastic on the Soil Biophysical Environment. *Environmental Science and Technology*. 2018, 52, 9656 – 9665.

De Souza Machado AA, Kloas W, Zarfl C, Hempel S, Rillig M C (2018b): Microplastics as an emerging threat to terrestrial ecosystems. *Glob Change Biol* 24: 1405–1416.

Düngemittelverordnung 2004: Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, mit der Bestimmungen zur Durchführung des Düngemittelgesetzes 1994 erlassen werden; StF: BGBl. II Nr. 100/2004 (geltende Fassung BGBl. II Nr. 71/2019).

Düngemittelverordnung (DüMV, Deutschland) 1991: Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln; geltende Fassung.

ECHA – Europäische Chemikalienagentur (2019): Annex XV Restriction Report – Proposal for a restriction: Intentionally added micro plastics. Helsinki, Finland.
<https://www.echa.europa.eu/web/guest/registry-of-restriction-intentions/-/dislist/details/0b0236e18244cd73>

European Bioplastics (2019): Bioplastics market development update 2019. European Bioplastics. Berlin.

European Commission 2018: A European Strategy for Plastics in a Circular Economy (EU COM28). Brussels.

Hahladakis, J. N., Velis, C. A., Weber, R., Iacovidou, E., & Purnell, P. (2018): An overview of chemical additives present in plastics: Migration, release, fate and environmental impact during their use, disposal and recycling. *Journal of Hazardous Materials*, 344, 179–199. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.10.014>

Huerta Lwanga, E., Gertsen, H., Gooren, H., Peters P., Salánki, T., van der Ploeg, M., Besseling, E., Koelmans, A.A. & Geissen, V. (2016): Microplastics in the terrestrial ecosystem: implications for *Lumbricus terrestris* (Oligochaeta, Lumbricidae). *Environ Sci Technol*, 50, 2685–2691.

Humer M. (2017): Wie kommt PLASTIK in den BODEN? Amt d. Vorarlberger LReg., Bregenz.

ISO/NP 24187. Principles for the development of standards for investigation procedures of plastics in environmental media and materials. Genf.

Kehres B. (2019): Kunststoffe in Kompost und Gärprodukten. Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V., Köln.

Kern M., Siepenkothen H.-J., Turk T. (2018): Erfassung und Qualität von haushaltsstämmigen Bioabfällen. Müll und Abfall 10, 526.

Kim, S. W., & An, Y. (2019): Soil micro plastics inhibit the movement of springtail species. Environment International, 126, 699–706. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.02.067>

Kompostverordnung. 2001: Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über Qualitätsanforderungen an Komposte aus Abfällen (Kompostverordnung); StF: BGBl. II Nr. 292/2001.

Landesabfallwirtschaftsgesetz 2006: Gesetz über die Vermeidung und Erfassung von Abfällen; LGBl.Nr. 1/2006; (geltende Fassung LGBl.Nr. 3/2019).

Lei, L., Wu, S., Lu, S., Liu, M., Song, Y., Fu, Z., ... He, D. (2018): Micro plastic particles cause intestinal damage and other adverse effects in zebrafish *Danio rerio* and nematode *Caenorhabditis elegans*. Science of the Total Environment, 619–620, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.103>

Liebmann B. (2015): Mikroplastik in der Umwelt; Vorkommen, Nachweis und Handlungsbedarf. Umweltbundesamt Österreich. Wien.

MacArthur E., Waughray D., Stuchtey M.R. (2016): The new plastics economy – Rethinking the future of plastics. Ellen MacArthur Foundation.

Meixner K., M Kubiczek, I. Fritz (2020): Microplastic in soil–current status in Europe with special focus on method tests with Austrian samples. AIMS Environmental Science, 7 (2), 2020: 174–191

Natur- und Landschaftsschutzgesetz 1997: Vorarlberger Gesetz über Naturschutz und Landschaftsentwicklung; LGBl.Nr. 22/1997; (geltende Fassung LGBl.Nr. 78/2017).

NDR.de 2019: Plastik in Komposterde nachgewiesen. Internetreferenz, erreichbar 14. Juni 2019: <https://www.ndr.de/ratgeber/verbraucher/Plastik-in-Komposterde-nachgewiesen,kompost206.html>

Plastics Europe (2022): Plastics – the Facts 2022. An analysis of European plastics production, demand and waste data. Plastics Europe. Brüssel.

Prenner, S., A. Allesch,, M. Staudner, M. Rexeis, M. Schwingshackl, M. Huber-Humer, F. Part (2021): Environmental Pollution 290 (2021): A Static modelling of the material flows of micro- and nanoplastic particles caused by the use of vehicle tyres. Environmental Pollution 290 (2021) 118102 (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Rillig, M.C., Ziersch, L. & Hempel, S. (2017a): Microplastic transport in soil by earthworms. Sci Rep, 7, 1362.
https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5431019/pdf/41598_2017_Article_1594.pdf

Rillig, M.C., Ingraffia, R. & de Souza Machado, A.A. (2017b): Microplastic incorporation into Soil in Agroecosystems. Front Plant Sci, 18 October 2017.
<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2017.01805/full>

Sexlinger K., Humer M., Scheffknecht C. 2019: Kunststoffe im Boden – Untersuchung zu Kunststoffverunreinigungen in landwirtschaftlichen Böden Vorarlbergs. Bericht UI-04/2019 des Umweltinstituts, Bregenz.

SUP Richtlinie: Richtlinie zur Reduktion der Auswirkungen bestimmter Kunststoffprodukte auf die Umwelt (2019/904/EC)

Van Weert, S., Redondo-Hasselerharm, P. E., Diepens, N. J., & Koelmans, A. A. (2019): Effects of nanoplastics and microplastics on the growth of sediment-rooted macrophytes. Science of the Total Environment, 654, 1040–1047.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.183>

VERORDNUNG (EU) 2019/1009 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES

vom 5. Juni 2019 mit Vorschriften für die Bereitstellung von EU-Düngeprodukten auf dem Markt und zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 1069/2009 und (EG) Nr. 1107/2009 sowie zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 2003/2003

Wang, J., Coffin, S., Sun, C., Schlenk, D. & Gan, J. (2019): Negligible effects of microplastics on animal fitness and HOC bioaccumulation in earthworm *Eisenia fetida* in soil. *Environmental Pollution*, 249, 776-784.

Zhang, G.S., Zhang, F.X., Li, X. T., (2019): Effects of polyester microfibers on soil physical properties: Perception from a field and a pot experiment. *Science of the Total Environment* 670, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.149>

Zinkant K. 2016: Mikroplastik zieht Schadstoffe an. *Süddeutsche Zeitung*, erreichbar am 2.4.2019 unter: <https://www.eu-umweltbuero.at/inhalt/mikroplastik-zieht-schadstoffe-an?ref>

Tabellenverzeichnis

| | |
|--|----|
| Tabelle 1: Emissionsseitige Grenzwerte für Kunststoffe in österreichischen, deutschen und schweizerischen Rechtsnormen | 21 |
| Tabelle 2: Grenzwerte und Vorsorgewerte für Kunststoffe der Vorarlberger Bodenqualitätsverordnung | 24 |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Abbildung 1: Ableitungsmöglichkeiten für den Begriff „Biokunststoff“ | 8 |
| Abbildung 2: Beabsichtigte und unbeabsichtigte Eintragspfade von Kunststoffen in den Boden (nach Meixner et al., 2020) | 11 |
| Abbildung 3: Kunststoffverunreinigungen im Mikroskop (Hellfeld): links: Humusneubildung an Pflanzenteilen neben einer Kunststofffaser; rechts: schwarze Kunststoffteilchen in Tonmineral-Humus-Komplexen. Fotos: Ines Fritz, 2019 li & 2018 re, unveröffentlicht..... | 17 |
| Abbildung 4: Priorisierung von Maßnahmen zur Reduktion von Mikroplastikeinträgen. © bündnis mikroplastikfrei | 32 |
| Abbildung 5: Beabsichtigte und unbeabsichtigte Freisetzung von Mikroplastik (nach FRAUNHOFER UMSICHT 2018 | 33 |

Abkürzungen

| | |
|-------|-------------------|
| Abk. | Abkürzung |
| BGBI. | Bundesgesetzblatt |
| Art. | Artikel |
| usw. | und so weiter |

Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Regionen und Wasserwirtschaft

Stubenring 1, 1010 Wien

bml.gv.at