

MIKROPLASTIK IN DER UMWELT

EINE STANDORTBESTIMMUNG

Mikroplastik beschreibt eine Vielfalt von Materialien, die gezielt hergestellt oder durch Abrieb und Zerfall gebildet werden. Sie kommen vielerorts in der Umwelt, in Organismen, in Nahrungsmitteln und somit auch in menschlichem Stuhl vor. Da nachgewiesene Materialien und solche, die in Toxizitätstest verwendet wurden, sich stark unterscheiden, ist eine abschliessende Risikobewertung bisher noch nicht möglich.

Alexandra Kroll*; Cornelia Kienle; Anke Schäfer,
Schweizerisches Zentrum für angewandte Ökotoxikologie (Oekotoxzentrum)
Lothar Aicher, Schweizerisches Zentrum für angewandte Humantoxikologie (SCAHT)

RÉSUMÉ

MICROPLASTIQUES DANS L'ENVIRONNEMENT – ÉTAT DES LIEUX

Le Centre suisse d'écotoxicologie appliquée (Centre Ecotox) ainsi que le Centre Suisse de Toxicologie Humaine Appliquée (SCAHT) ont organisé le 26 et 27 janvier 2021 un cours de formation continue ainsi qu'une table ronde publique à propos des microplastiques dans l'environnement. L'objectif de ce cours, auquel ont participé 74 experts de l'industrie, des autorités et des universités, était d'échanger des expériences sur l'état des connaissances relatives aux dangers et risques des microplastiques dans l'environnement. Le terme «microplastique» décrit un large groupe de substances ainsi qu'une fourchette de tailles allant de 1 à 1000 µm. Dans la pratique, les particules dont la taille se situe entre 1 et 5000 µm sont souvent considérées comme des microplastiques. Les microplastiques sont omniprésents dans les compartiments environnementaux et ont été détectés dans les aliments, les selles humaines et les organismes présents dans l'environnement. Il existe un lien direct entre l'utilisation mondiale de matériaux plastiques et la pollution par le plastique. Les microplastiques primaires sont fabriqués de manière ciblée et se retrouvent dans l'environnement principalement à cause d'accidents de transport. Les microplastiques secondaires résultent de l'abrasion et de la dégradation d'objets en plastique, dont les sources principales sont les pneus de véhicules, l'élimination des déchets, le bitume, les aires de sport et de jeux,

WAS IST MIKROPLASTIK?

Das Vorkommen von Mikroplastik in der Umwelt und die damit verbundenen Gefahren und Risiken finden viel Interesse in Öffentlichkeit und Medien. Dies nicht zuletzt, weil Mikroplastik auch in entlegenen Gegenden zu finden ist und vor wenigen Jahren erstmals im Darm von Menschen nachgewiesen wurde. Plastik wird oft als Synonym für Kunststoff verwendet. Darunter versteht man eine Reihe von (teil-)synthetischen Materialien, die auf Makromolekülen basieren. Der Begriff Mikroplastik beschreibt also einerseits eine grosse Gruppe von Materialien und andererseits einen Grössenbereich, nämlich 1–1000 µm. In der Praxis werden jedoch oft Partikel mit einer Grösse von 1–5000 µm als Mikroplastik bezeichnet [1], wobei im Bereich zwischen 1000–5000 µm teilweise von «grossem» Mikroplastik und unterhalb von 1 µm von Nanoplastik gesprochen wird. Mikroplastik kann durch seinen Ursprung, seine chemische Zusammensetzung, seine physikalischen Eigenschaften und seine Form (Fasern, Bruchstücke, Kugeln) und Grösse charakterisiert werden. Es tritt als primäres und sekundäres Mikroplastik auf. Primäres Mikroplastik wird in Form von kunststoffbasierten Granulaten bzw. Pellets industriell hergestellt und in Sandstrahlern, in Reinigungs- und Poliermitteln, als Trägermaterial

* Kontakt: Alexandra.Kroll@oekotoxzentrum.ch

(Bild: ©crevis/123RF.com)

für Dünger und Pflanzenschutzmittel, in Lacken und Farben, in Medizinprodukten und in kosmetischen Mitteln verwendet. Sekundäres Mikroplastik entsteht durch Abrieb bei der Nutzung von kunststoffbasierten Gegenständen sowie chemische und physikalische Alterungs- und Zerfallsprozesse wie z.B. die Versprödung durch UV-Strahlung und mechanische Zerkleinerung. Zusätzlich enthalten Mikroplastikpartikel Substanzen aus dem ursprünglichen Fertigungsprozess, adsorbieren Substanzen in ihrer jeweiligen Umgebung und werden von Mikroorganismen besiedelt.

CHARAKTERISIERUNG UND VORKOMMEN

Mikroplastik ist in allen Umweltkompartimenten nachweisbar, auch in entlegenen und unbesiedelten Regionen. Die Uneinheitlichkeit und die Komplexität der Materialien, die zurzeit weitläufig als Mikroplastik betrachtet werden, bedeuten jedoch eine Herausforderung für die Quantifizierung und Charakterisierung. Zur genauen Charakterisierung sind Daten zur Grösse, Form und chemischen Zusammensetzung nötig.

Bereits die Probenahme von Mikroplastik ist kritisch: Die Auswahl der Probenahmestellen und -techniken, die verwendeten Behälter und Geräte sowie Transport und Lagerung beeinflussen die am Ende nachweisbaren Materialien. In Gewässern z.B. finden sich Mikroplastikpartikel an unterschiedlichen Stellen aufgrund unterschiedlicher Dichte und Form, des Aufwuchses von Mikroorganismen, der Wasserchemie (Salzgehalt, organisches Material) und der Wasserbewegungen (Strömung, Schichtung, Wind, Regen, Verdunstung). Der Einsatz von Filtern bei der Wasserprobenahme beeinflusst den Grössenbereich des gesammelten Materials.

Aus Umweltproben muss das Mikroplastik isoliert werden, damit es identifiziert und quantifiziert werden kann. Diese Methoden sind aufwendig, insbesondere bei Böden oder Sedimenten. Bei der Isolierung von Mikroplastik kann dieses in der Grössenverteilung verändert werden, wenn die Isolation unvollständig/selektiv ist und Chemikalien, die zuvor an oder im Plastik gebunden waren, abgelöst werden. Zusätzlich kann Mikroplastik aus der Umgebung (z.B. Laborgegenstände, Kleidung) die Proben

verunreinigen, weshalb besondere Massnahmen zur Kontrolle erforderlich sind. Die anschliessende Charakterisierung erlaubt in der Regel entweder eine Anzahl-, Grössen- und Massenmessung oder eine chemische Charakterisierung, für die jeweils eine aufwendige Aufreinigung nötig ist. Zur Messung der Anzahl und Grösse von Plastikpartikeln im Millimeter- bis Mikrometerbereich können Mikroskopiemethoden (*Fourier-transform-Infrarotspektroskopie* [FT-IR] oder *Raman-Mikroskopie*) verwendet werden, bei denen einzelne Partikel analysiert werden. Diese Methoden sind zurzeit, auch bei einer Automatisierung, noch zeitaufwendig und teuer. Sie sind jedoch für Partikel

im Mikrometerbereich gut etabliert. Die Grössen- und Anzahlbestimmung im Nanometerbereich befindet sich noch in der Entwicklung. Die Identifikation eines Materials ist vom Vergleich mit Referenzmaterialien und der Eindeutigkeit der gemessenen Spektren abhängig. Die Bestimmung der Masse von Mikroplastik kann bereits weitgehend automatisiert werden. Auch die gesamtheitliche chemische Analyse einer Probe ist gut etabliert, jedoch geht hier durch die erforderliche Zerstörung des Materials die Information über die einzelnen Partikel verloren. Bisher fehlt eine Standardisierung der Methoden, der Quantifizierungsparameter (Anzahl, Oberfläche oder Masse der

WEITERBILDUNGSKURS «MIKROPLASTIK IN DER UMWELT»

Am 26. und 27. Januar 2021 hat das Schweizerische Zentrum für angewandte Ökotoxikologie (Oekotoxzentrum) gemeinsam mit dem Schweizerischen Zentrum für angewandte Humantoxikologie (SCAHT) einen Weiterbildungskurs zum Thema Mikroplastik in der Umwelt veranstaltet und am Abend des 26. Januar zu einer öffentlichen Podiumsdiskussion zum Thema eingeladen. Beide Veranstaltungen fanden online statt.

Ziel des Kurses, an dem 74 Fachleute aus Industrie, Behörden und Universitäten aus fünf Ländern teilnahmen, war der Erfahrungsaustausch über den aktuellen Stand des Wissens über die Gefahren und Risiken von Mikroplastik in der Umwelt. In der Podiumsdiskussion wurden die aktuellen Thesen einem breiten Publikum von über 250 zugeschalteten Teilnehmenden vorgestellt und Fragen des Publikums beantwortet. Im Artikel sind die Erkenntnisse zusammengefasst, die im Kurs und der Podiumsdiskussion präsentiert wurden.

LISTE DER PRÄSENTATIONEN

- Überblick «Mikroplastik in der Umwelt», *Alexandra Kroll*, Oekotoxzentrum
- Was ist Mikroplastik? *Birgit Geueke*, Food Packaging Forum
- Identifikation und Quantifizierung von Mikroplastik, *Ralf Kägi*, Eawag
- Microplastic concentrations in the different environmental compartments, *Florian Breider*, EPFL
- Mikroplastik im Boden und im Sediment, *Christian Laforsch*, Universität Bayreuth
- Experimentelle Herausforderungen, *Markus Holzner*, ETH Zürich
- Effekte von Mikroplastik auf das aquatische Biofilm-Weidegänger-System, *Stephanie Merbt*, Eawag

- Mikroplastik in Bundeswasserstrassen: Exposition und Effekte auf Organismen, *Christian Scherer*, Bundesanstalt für Gewässerkunde
- Effekte auf den Menschen: Einführung, *Lothar Aicher*, SCAHT
- Macht uns das Plastik krank? – Erkenntnisse aus der Grundlagenforschung, *Michael Scharl*, Universitätsspital Zürich
- Small(er) particles, big(ger) problems? *Peter Wick*, Empa
- Elimination von Mikroplastik durch Abwasserreinigungsanlagen, *Edith Durisch-Kaiser*, AWEL
- Mikroplastik in der Siedlungswasserwirtschaft, *Daniel Venghaus*, TU Berlin
- Biologisch abbaubare Polymere als Alternativen? *Michael Zumstein*, Universität Wien
- Risiko- und Unsicherheitswahrnehmung in der Schweiz, *Angela Bearth*, ETH Zürich, und *Ivana Logar*, Eawag
- Mikrokunststoffpartikel in Kosmetika, Wasch- und Reinigungsmitteln, *Klaus Rettinger*, Industrieverband Körperpflege und Waschmittel e.V
- Umweltrisikobewertung von Mikroplastik, *Bernd Nowack*, Empa
- Aspekte der Risikobewertung, *Alfonso Lampen*, Bundesinstitut für Risikobewertung
- Regulierung von Mikroplastik in Produkten: Stand heute und Ausblick, *Josef Tremp*, BAFU
- Regulierung von Mikroplastik in Produkten: Ausblick Schweiz, *Amanda Finger*, BAFU

INFO UND KONTAKT

Bei Rückfragen zu einzelnen Vorträgen wenden Sie sich bitte an *Alexandra Kroll*: alexandra.kroll@oekotoxzentrum.ch

Partikel), der Bezugsgrößen (Oberfläche oder Volumen des Gewässers/Bodens etc.) und der Extrapolationsmethoden, was den Vergleich von Daten erschwert. In nationalen Messprogrammen und öffentlichen Forschungsprojekten erhobene Daten lassen trotzdem die Schlussfolgerung zu, dass Mikroplastik zunehmend in der Umwelt vorkommt. Wie stark die Häufigkeit und Größenverteilung durch die jeweilige Methodik beeinflusst wurde, kann nicht global beantwortet werden. Berechnungen legen z. B. einen derzeitigen jährlichen Eintrag von 1,5 Mio. Tonnen in die Weltmeere nahe, der bei Beibehaltung der derzeitigen Nutzung von Kunststoffen weiter ansteigen wird [2]. In der Schweiz wurde Mikroplastik in Gewässern, Gewässersedimenten und Böden nachgewiesen (Fig. 1).

Die Eintragswege in die Umwelt sind vielfältig. In jedem Abschnitt des Lebenszyklus (Produktion, Transport, Nutzung, Recycling oder Entsorgung) von primä-

rem Mikroplastik und von Plastikartikeln kann es zur Freisetzung von Mikroplastik in Luft, Wasser und Boden kommen. Global gelten als Hauptquellen mit absteigender Häufigkeit: Fahrzeugreifen, Abfallentsorgung, Bitumen von Asphalt, Pelletverluste (z. B. durch Transportunfälle), Sport- und Spielplätze, Baustellen, Schuhsohlen, Kunststoffverpackungen, Fahrbahnmarkierungen und Textilwäsche [4]. Der grösste Eintrag erfolgt also durch sekundäres Mikroplastik, mit Ausnahme der Pelletverluste. Weitere Quellen für primäres Mikroplastik liegen auf Platz 13 (Flockungsmittel für Kläranlagen) und 17 (Kosmetika). Fasern aus der Textilwäsche und kugelförmige Partikel aus Kosmetika beispielsweise werden nicht vollständig in Kläranlagen zurückgehalten. In Ländern, in denen die Ausbringung von Klärschlamm in der Landwirtschaft erlaubt ist, gelangt Mikroplastik in die Böden und von dort durch Auswaschung in die Gewässer. Über Meeres-

strömungen, Luftbewegungen und Niederschlag wird Mikroplastik global verteilt. Grundsätzlich kann es auch in Nahrungsketten gelangen. Mikroplastik wurde in Honig, Fischen, Muscheln und Krebsen, Tafelsalz, Trinkwasser, Mineralwasser und Bier nachgewiesen. Allerdings sind die Mengen, die Zusammensetzung und die Partikelgröße und -form des Mikroplastiks in Lebensmitteln schwierig zu bestimmen. Deshalb sind noch keine definitiven Rückschlüsse auf die durchschnittlichen Gehalte von Mikroplastik in Lebensmitteln möglich. Die Europäischen Lebensmittelsicherheitsbehörde (EFSA) hat in ersten Modellrechnungen die zusätzliche Aufnahme von Schadstoffen abgeschätzt, die wir durch mikroplastikbelastete Lebensmittel aufnehmen können. Die EFSA kommt zu dem Ergebnis, dass durch den Verzehr von Mikroplastik und den darauf anhaftenden Schadstoffen die Gesamtbelastung des Menschen mit Schadstoffen, die wir sonst

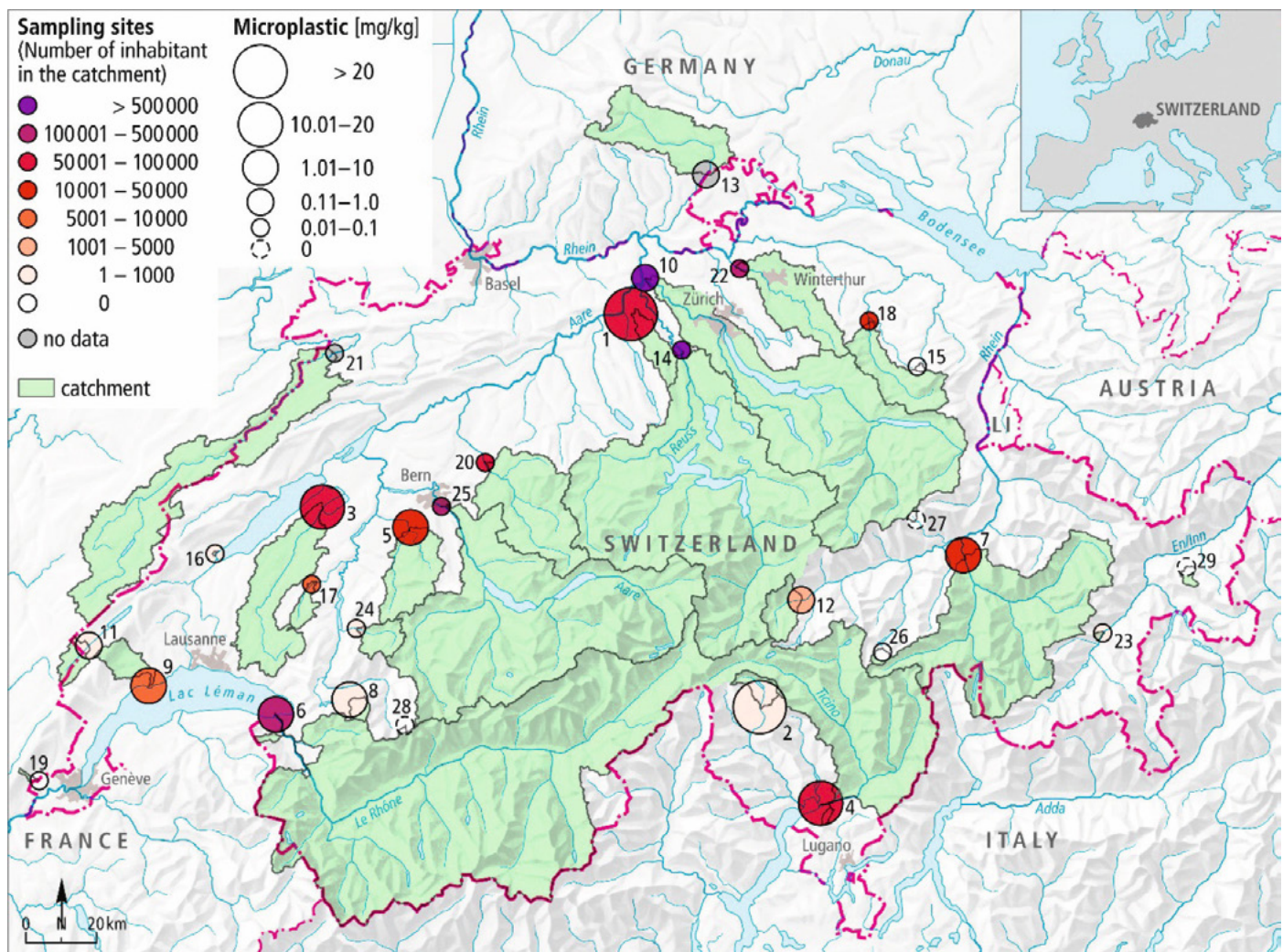


Fig. 1 Konzentration von Mikroplastik in Schweizer Flusssedimenten und Böden. Die Konzentrationen erreichten bis zu 55,5 mg/kg oder 593 Partikel/kg an 26 von 29 Probenahmestellen [3].

mit der Nahrung aufnehmen, wahrscheinlich um weniger als 0,01% erhöht wird. Vorbehaltlich der diskutierten Herausforderungen bei Probenahme, Probenaufbereitung und Charakterisierung werden in der Umwelt häufig künstliche Gummiarten (wie Nitrilgummi) und Polymere, die in Bekleidung, Verpackungen und Isolationsmaterial verwendet werden (wie Polyester, Polyvinylchlorid, Polypropylen, Polyethylen, Polyethylenterephthalat), gefunden. Die Zusammensetzung variiert stark zwischen den untersuchten Standorten und auch die lokale Verteilung ist heterogen. Daten zu Lebensmitteln sind noch rar und liegen hauptsächlich zu in Flaschen abgefülltem Trinkwasser vor, in denen man z. B. Polypropylenpartikel identifiziert hat.

ÖKOTOXIKOLOGISCHE EFFEKTE VON MIKROPLASTIK

Die Aufnahme von Mikroplastik in Organismen wurde bisher an primärem Mikroplastik untersucht und erfolgt vor allem über die Nahrung. Die Interaktion von Organismen mit Mikroplastik hängt neben verschiedenen abiotischen Faktoren, wie Grösse und Konzentration der Partikel, Vorhandensein zusätzlicher Partikel, Form, Polymertyp und «Geschmack», auch von biotischen Faktoren (Ernährungstyp, Spezies, Entwicklung) ab. Beispielsweise können filtrierende Gewässerorganismen (z. B. Zooplankton, Muscheln) oder Fischlarven Mikroplastikpartikel aufgrund ihrer geringen Grösse zusammen mit Phytoplankton und anderen Futterpartikeln aufnehmen. In Laborstudien hat sich gezeigt, dass aktiv schwimmende Ruderfusskrebse mehr Partikeln begegnen als eher passive Individuen [5].

Effekte auf Organismen können durch verwendete Additive, an Mikroplastikpartikel gebundene Schadstoffe, das Vorhandensein der Partikel in aquatischen Biofilmen (Aufwuchs aus Algen, Bakterien und Pilzen) und auch Grösse, Form, Polymertyp und weitere Partikeleigenschaften beeinflusst werden. Als Hinweis für Gewässer können auch Daten zu Schwebstoffen (suspendierte Sedimentpartikel sowie Detritus) dienen: Für diese wurde abgeleitet, dass die Stärke negativer Effekte von der Konzentration, der Dauer der Belastung, der chemischen Zusammensetzung und der Partikelgrößenverteilung abhängt [6]. Arten, die

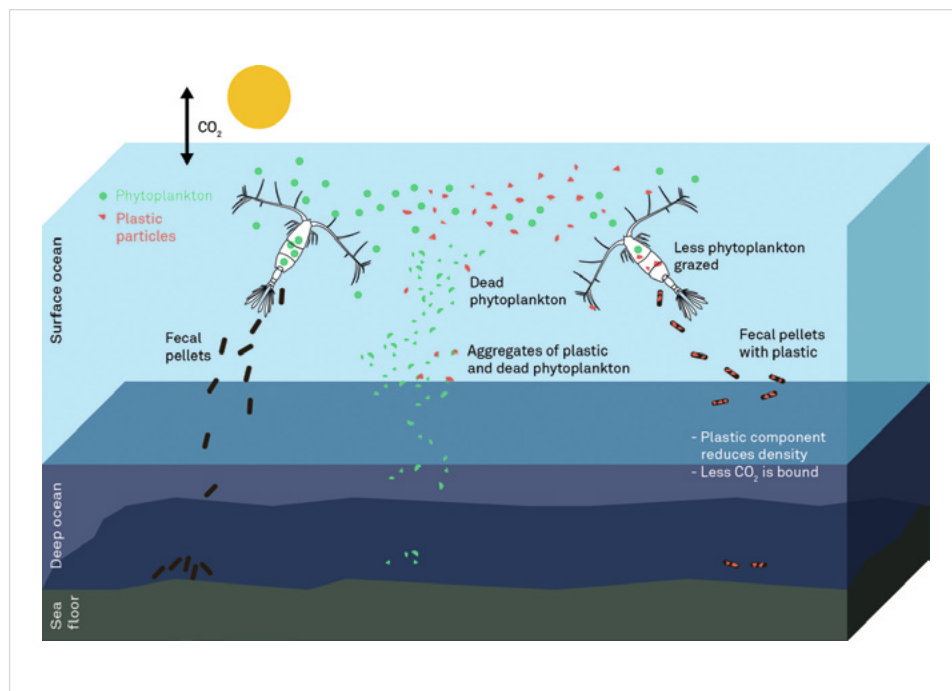


Fig. 2 Modell zum Einfluss von Mikroplastik in einer aquatischen Nahrungskette auf die CO₂-Bindung.

(©M. Holzner).

grundsätzlich empfindlich auf Umweltbelastung reagieren, reagieren stärker auf Belastung durch Schwebstoffe als tolerante Arten [7].

Im Organismus gelangt das Mikroplastik zunächst in den Verdauungstrakt. Folgen hiervon können eine Mangelernährung, Verstopfungen, Funktionsstörungen und, je nach Partikelform und -grösse, auch Verletzungen und Entzündungen sein. Zudem können an die Mikroplastikpartikel gebundene Stoffe im Verdauungstrakt abgelöst werden, oder andere Stoffe an die Partikel gebunden werden. Werden Mikroplastikpartikel von Zooplankton zusammen mit Phytoplankton oder anstatt diesem aufgenommen, sinkt die Dichte der Ausscheidungen, sodass weniger Biomasse sedimentiert, also weniger organisch gebundenes CO₂ entfernt wird. Sinken Fäkalien oder Agglomerate von Mikroplastik und totem Phytoplankton zu Boden, können sie auch von Sedimentorganismen aufgenommen werden (Fig. 2). Nachweislich nehmen Schnecken primäres und gealtertes Mikroplastik beim Abweiden zusammen mit aquatischen Biofilmen auf [8]. Bei den Schnecken selbst konnten keine direkten Auswirkungen des Mikroplastiks beobachtet werden, allerdings war der Schlüpfertag von Embryonen von gegenüber Mikroplastik ausgesetzten Schnecken deutlich geringer als in den unbelasteten Kontrollen. Wurden die Mikroplastikpartikel mit dem Biozid

Triclosan beladen, das u. a. in Anti-Fouling-Anstrichen von Schiffen, aber auch in Kosmetika eingesetzt wird, zeigten die Schnecken deutlich stärkere Effekte als durch Belastung mit Triclosan über das Wasser.

Ein wichtiger Aspekt für die Extrapolation von Laborstudien auf mögliche Effekte im Freiland ist die Ähnlichkeit der verwendeten Materialien. Im Labor werden häufig Modell-Mikroplastikpartikel verwendet, die i. d. R. erst kürzlich produziert wurden. Teilweise werden diese direkt im Biotest eingesetzt, teilweise werden sie auch einem Alterungsprozess ausgesetzt. Diese Partikel sind jedoch häufig rund, wohingegen Mikroplastikpartikel in der Umwelt z. B. aus kleinen Kügelchen, eckigen Partikeln, Folien oder auch Fasern zusammengesetzt sind, die je nach Umgebung altern und Stoffe adsorbieren können. Die gleichmässige Verteilung der Partikel im Versuchsansatz muss gewährleistet sein, was in wässrigen Medien schwierig ist und auch die Reproduzierbarkeit der Versuche beeinflussen kann. Bei Tests mit Biofilmen oder Sedimenten ist die gleichmässige Verteilung besser gewährleistet. Um den Vergleich von Ergebnissen zu verbessern, wäre eine Standardisierung der Methoden sinnvoll. Auch die Verwendung von natürlich vorkommenden Partikeln und Standardpartikeln zur Kontrolle könnte wichtige Erkenntnisse liefern.

Konzentrationen von primärem Mikroplastik, die in Laborversuchen Effekte auf Organismen hervorgerufen haben, liegen häufig mehrere Grössenordnungen über Konzentrationen von Mikroplastik in der Umwelt, wobei die Quantifizierung in der Umwelt, wie oben diskutiert, grösseren Unsicherheiten unterliegt und die Materialien sich unterscheiden.

EFFEKTE AUF DEN MENSCHEN

Da Mikroplastik überall in der Umwelt und so auch in Lebensmitteln auftritt, gibt es Sorgen über mögliche Effekte auf den Menschen. Unser Körper verfügt über verschiedene Barrieren, die die Aufnahme von Mikroplastik verhindern oder verringern. Die intakte Darmwand bildet eine physikalische Barriere, die nur von kleinen Partikeln überwunden werden kann. Die Darmwand ist zusätzlich mit einer Schleimschicht überzogen, die enzymhaltige Sekrete produziert und einen Schutz darstellt. Die Haut, die Hornhaut der Augen und die Schleimhäute der Atemwege stellen ebenfalls physikalische und chemische Barrieren für Mikroplastik dar. Mikroorganismen oder Chemikalien können potenziell zusammen mit Mikroplastik aufgenommen werden.

Beim Verzehr von Nahrungsmitteln, die mit kantigen Plastikpartikeln belastet sind, kann die Darmschleimhaut durch Reibung geschädigt werden und ihre Barrierefunktion lokal verlieren, sodass die Partikel aus dem Darm leichter in die Blutbahn übergehen und sich im Körper verteilen können.

Österreichische Forscher haben 2018 erstmals Kunststoffpartikel im menschlichen Stuhl nachgewiesen [9]. Die Proben enthielten im Mittel 20 Partikel pro zehn Gramm Stuhl in einer Grösse von 50 bis 500 µm. Am häufigsten fanden sich PP (Polypropylen) und PET (Polyethylenterephthalat) in den Proben. Die Europäische Lebensmittelsicherheitsbehörde geht davon aus, dass für Partikel, die grösser sind als 150 µm, keine Aufnahme über die Darmbarriere möglich ist. Partikel, die kleiner sind als 1,5 µm können theoretisch die Darmwand passieren, ins Blut übergehen und in andere Organe gelangen [10]. Dass die Partikel dann ins Gehirn gelangen, gilt laut Aussagen von Experten als unwahrscheinlich, weil sie die Blut-Hirn-Schranke überwinden müssten.

Die Forschung des Deutschen Instituts für Risikobewertung (BfR) an isolierten menschlichen Darmzellkulturen zeigt, dass Partikel mit einer Grösse von bis zu 4 µm in die Darmzellen aufgenommen werden, dort aber stecken bleiben. Die Tatsache, dass die Partikel *in vitro* in die Darmzellen auf der darmzugewandten Seite aufgenommen werden, bedeutet also nicht zwingend, dass die Partikel auch im Körper Darmzellen passieren und ins Blut abgegeben werden. Weil Darmzellen relativ kurzlebig sind und im Körper nach etwa 72 Stunden vom körpereigenen Immunsystem abgebaut und ausgeschieden werden, werden auch die Plastikpartikel im Darm mit ausgeschieden.

Eine Simulation des menschlichen Verdauungsprozesses mit sphärischen Polystyrol- und Polyethylenmikroplastikpartikeln der Grösse 3 bzw. 50 µm, künstlichem Speichel, Magensaft und Darmsaft ergab, dass die Mikropartikel nicht abgebaut wurden. Dies ist vermutlich auf andere Polymere übertragbar, bedeutet aber nicht, dass keine gesundheitsschädlichen Stoffe aus dem Plastik herausgelöst werden können.

Genau wie beim Menschen konnten auch in kontrollierten Tierstudien mit primären sphärischen Polystyrolmikroplastikpartikeln verschiedener Grösse und Konzentration die höchsten Mengen im Magen-Darm-Trakt nachgewiesen werden. Wurden Mäuse 28 Tage lang mit einem Futter gefüttert, das mit primärem Mikroplastik (Polystyrol, PS) angereichert war, konnten anschliessend nur wenige Einzelpartikel im Darmgewebe nachgewiesen werden [11]. Anders als beim Menschen hat man im Tierversuch teilweise auch Mikroplastik in Blut, Lymphe und der Leber nachgewiesen.

Wie relevant diese Ergebnisse für die menschliche Risikobeurteilung sind, ist unklar, da sehr hohe Konzentrationen getestet wurden und zudem, wie in ökotoxikologischen Tests, in Tierversuchen bisher primäre Mikroplastikpartikel definierter chemischer Zusammensetzung eingesetzt wurden. Wie relevant diese Versuche für die Risikobewertung anderer Arten von Mikroplastikpartikeln ist, lässt sich nicht abschliessend sagen (*s. unten*). Zudem stellt sich die Frage, ob auch bei den wesentlich niedrigeren umweltrelevanten Konzentrationen noch Plastikpartikel vom Darm ins Blut übergehen und sich dann im Körper verteilen.

MASSNAHMEN ZUR VERMEIDUNG UND ZUR ENTFERNUNG

ABWASSERREINIGUNGSANLAGEN

Die Reduktion von Mikroplastikeinträgen durch die Aufrüstung von Abwasserreinigungsanlagen (ARA), die Veränderung von Verkehrsführungen und der Einsatz von biologisch abbaubaren Polymeren wurden diskutiert. Studien des Zürcher Amts für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL) haben gezeigt, dass ARA, je nach Ausbau, einen grossen Teil des Mikroplastiks zurückhalten können, die Elimination aber nicht vollständig ist [12]. Das AWEL hat Oberflächengewässer sowie Grund- und Trinkwasser nach unterschiedlichen Aufreinigungsschritten in der Kläranlage beprobt. Nach Durchlaufen der biologischen Reinigung, Nachklärung und Filtration wurden Fasern zu 76%, Kugeln zu 87% und anders geformte Partikel zu 96% zurückgehalten. Extrapoliert auf die 64 Kläranlagen des Kantons Zürich, bedeutet das noch einen täglichen Eintrag von 31 Mia. Partikeln oder 610 g pro Tag. Eine Aufrüstung aller Kläranlagen mit einer Filtrationsstufe würde eine Reduktion von 23% auf 24 Mia. Partikel oder 450 g pro Tag erwirken. Im Einzugsgebiet des Greifensees war Mikroplastik an allen Probenahmestellen nachweisbar. Für den Greifensee selbst wird ein jährlicher Eintrag von 110 kg erwartet, wovon etwa 10 kg Mikroplastik im Seesediment eingelagert werden. Bei Trockenwetter stammen >80% des eingetragenen Mikroplastiks aus den Zuflüssen mit Abwasser, bei Regenwetter dominieren unbehandelte Mischwasserentlastungen und Strassenabwasser.

Wie in einem Positionspapier des AWEL zusammengefasst, sind bisher 64 der Züricher ARA mit einer Filtrationsstufe ausgestattet, sodass 81% aller Abwässer filtriert werden [13]. Eine weitere Reduktion kann durch die Aufrüstung aller verbleibenden ARA mit einer Filtrationsstufe oder aller ARA mit einer Membranfiltration und Rückhaltungsmassnahmen bei Mischwasserentlastungen in der Siedlungsentwässerung erreicht werden. Letzteres wird als unverhältnismässig und Massnahmen an der Quelle als zielführender eingestuft. Hierzu zählen separates Vorwaschen von problematischen Textilien, Recycling-Prozesse ohne Verluste von Makro- und Mikroplastik und der grundsätzliche Ausschluss von Mikroplastik von Reinigungsmitteln und

Kosmetika. Bei Kosmetika unterscheidet man zwischen *Rinse-off*-Produkten, die abgespült werden und so ins Abwasser gelangen, und *Leave-on*-Produkten, die hauptsächlich über das Abschminken als fester Abfall entsorgt werden. Durch eine Eigeninitiative der europäischen Kosmetikindustrie konnten bereits 97% des Mikroplastiks aus *Rinse-off*-Produkten entfernt werden. Bei *Leave-on*-Produkten, die einen kleineren Anteil ausmachen, ist nach Angaben des Industrieverbands Körperpflege und Waschmittel e.V. ein Ersatz schwieriger.

STRASSENVERKEHR

Fahrzeugreifen gelten global als Hauptemissionsquelle von Mikroplastik. In Berlin (Deutschland) wurden umfassende Untersuchungen zur Entstehung von Mikroplastik im Strassenverkehr durchgeführt. Baustellen, Abrieb (vor allem von Reifen), «Littering» und Verkehrsunfälle wurden als Hauptquellen identifiziert. Zugleich wurden verschiedene Systeme zur Rückhaltung von Mikroplastikpartikeln aus dem Strassenabwasser evaluiert. Unter Laborbedingungen konnten Wirkungsgrade von 24 bis 58% (Nassschlammfang) und 67% (kommerzielle Filter-/Abscheidesysteme) erzielt werden. An einer Referenzstrasse konnte ein Rückhalt von über 70% festgestellt werden.

Durch Kraftfahrzeuge erzeugte Abriebpartikel lassen sich in drei Typen einteilen: Laufflächenpartikel, Reifenabriebpartikel und Fahrbahnpartikel. Letztere enthalten auch Abgase und andere Hintergrundbelastungen, während Reifenabriebpartikel nur aus Reifen- und Strassenmaterial bestehen. An einer der Hauptverkehrsstrassen Berlins wurden mittels Gesamtpartikelanalytik etwa 70% aller Fahrbahnpartikel am Strassenrand detektiert, die verbleibende Menge war etwa gleichmässig über die Fahrbahnen verteilt. Der Grossteil der Partikel lag im Grössenbereich 0,1–0,5 mm. 2–5% dieser Partikel sind luftgänglich und gehören zur sogenannten «PM10»-Fraktion (*particulate matter*, bis 10 µm) des Feinstaubs. Basierend auf Untersuchungen in den 1980er-Jahren, geht man von einer Abbaurate von 0,15% der Fahrbahnpartikel pro Tag in Strassenrandstreifen aus, wobei der Grossteil der Partikel innerhalb von 30 cm vom Strassenrand zu finden sind. Für Berlin konnten innerstädtische «Hotspots» auch abhängig von der Ver-

kehrsführung, der Verkehrsgeschwindigkeit und dem Bremsverhalten identifiziert werden. Als Massnahmen zur Verringerung des Eintrags von Fahrbahnpartikeln wurden optimierte Strassenreinigung, Reduktion an «Hotspots» durch Verkehrsregelung, Materialinnovation und intelligente Vernetzung der Abwasserreinigung identifiziert.

BIOLOGISCH ABBAUBARE POLYMERE

Die Verwendung von biologisch abbaubaren Polymeren zur Reduktion der Mikroplastikbelastung wurde ebenfalls diskutiert. Allerdings gibt es keine harmonisierte Definition des Begriffes der biologischen Abbaubarkeit. Grundsätzlich muss man zwischen Polymeren unterscheiden, die nur im Rahmen standardisierter industrieller Verfahren bei spezifischer Temperatur und unter Einsatz spezieller Mikroorganismen mineralisiert werden können, und solchen, die auch unter den Bedingungen der Kompostierung zu Hause in anorganische Verbindungen wie CO₂, H₂O oder Nitrat zerlegt werden können. Keiner der beiden Typen biologisch abbaubarer Polymere findet heute grosse Anwendung.

Das Polymer Polybutylenadipat-terephthalat (PBAT) wird als vielversprechende Alternative zum Einsatz von Polyethylen in der Landwirtschaft gehandelt.

Unter Laborbedingungen konnte gezeigt werden, dass alle Bausteine des PBAT von den Mikroorganismen aus Bodenproben aufgenommen und umgesetzt werden können (Fig. 3). Allerdings wurde der Versuch nicht bis zur vollständigen Mineralisierung durchgeführt. Feldversuche werden zurzeit durch die ETHZ organisiert. Auch wenn man den biologischen Abbau einiger Mikroplastikpartikel in einzelnen Studien belegen kann, ist es wichtig, dass der Abbau in einem umweltrelevanten System und einem nützlichen Zeitrahmen möglich ist. Studienergebnisse sind zudem nicht zwangsläufig von einem auf ein anderes System extrapolierbar, da die vorhandenen Mikroorganismen und Enzyme, pH-Wert, Temperatur und Licht ebenfalls entscheidend für die Mineralisierung sind. UV-Licht kann zur Vernetzung von Molekülen führen und dadurch die Abbaubarkeit verändern. Auch der jeweilige Bodentyp beeinflusst die biologische Abbaubarkeit, was bei möglicher zukünftiger Regulation berücksichtigt werden sollte.

Nach einem kürzlich erschienenen Bericht und wissenschaftlichen Publikationen sollte der Einsatz von biologisch abbaubaren Polymeren auf deren Nützlichkeit für die Anwendung und die Ziele abgestimmt werden [15, 16]. Es sollte eine Fall-zu-Fall-Evaluierung unter Be-

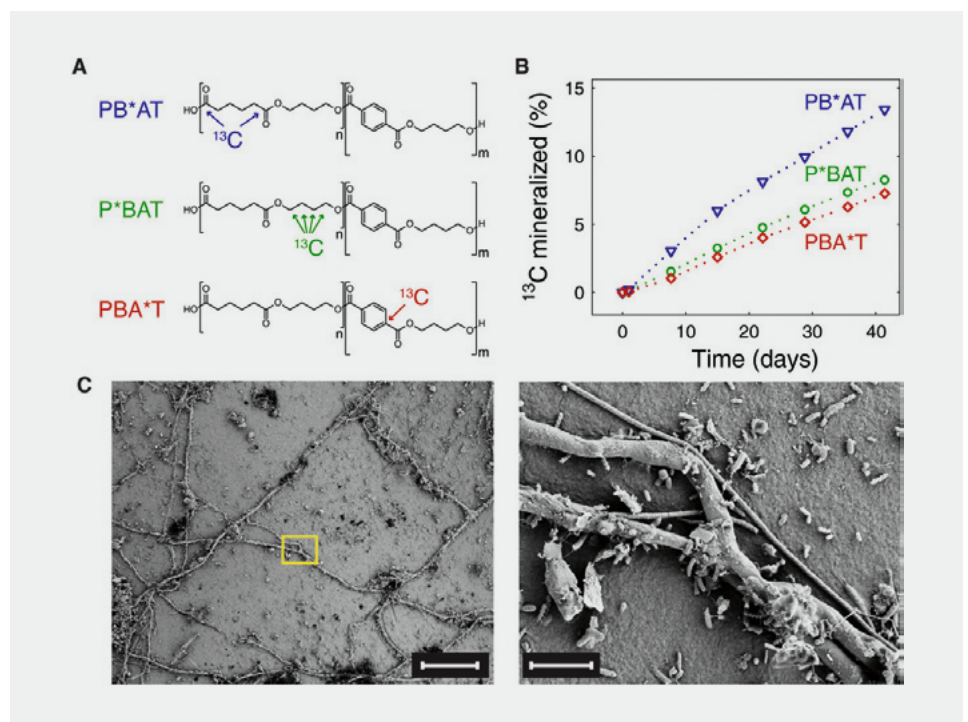


Fig. 3 Mineralisation und Oberflächenkonolonisation von drei PBAT-Typen während 6-wöchiger Inkubation mit Erde. a) Molekulare Strukturen; b) Bildung von ¹³CO₂; c) Repräsentative elektronenmikroskopische Aufnahmen (linker Massstab: 50 µm, rechter Massstab: 5 µm) [14].

rücksichtigung des gesamten Lebenszyklus des Plastikartikels vorgenommen werden. Anwendungen mit zusätzlichem Nutzen, wie Kompostbeutel, oder mit möglichem Verbleib des Materials in der Umwelt (Fischereinetze, Mulchfolien) werden als sinnvoll betrachtet. Ein generelles Design für Abbaubarkeit in natürlichen Systemen scheint jedoch nicht nützlich, da dies das unachtsame Wegwerfen («Littering») fördern könnte. Insgesamt sollten biologisch abbaubare Polymere als Ergänzung zu den Prinzipien «reduce, reuse, recycle» (3R; reduzieren, wiederverwenden, recyceln) betrachtet werden.

RISIKOBEWERTUNG VON MIKROPLASTIK

Mit Mikroplastik ist nicht zwangsläufig ein Umwelt- oder Gesundheitsrisiko verbunden. Dieses setzt sich immer aus zwei Komponenten zusammen: Giftigkeit (= das Gefährdungspotenzial) und Aufnahme- oder Expositionsmenge. Grundsätzlich beschreibt die Giftigkeit die Möglichkeit einer Gefährdung, während das Risiko deren Wahrscheinlichkeit beschreibt. Die Giftigkeit ist eine stoffspezifische Eigenschaft. Die Aufnahme- oder Expositionsmenge für eine Chemikalie kann je nach Situation variieren. Wenn eine Substanz sehr gefährlich ist, die Substanz aber nicht aufgenommen wird oder kein sonstiger Kontakt entsteht, besteht auch kein Umwelt- oder Gesundheitsrisiko. Umgekehrt kann eine weniger giftige Substanz, die andauernd und in grossen Mengen vorhanden ist und aufgenommen wird, ein Umwelt- oder Gesundheitsrisiko darstellen.

Das Risiko von Mikroplastikpartikeln muss also abgeschätzt werden, indem die von den unterschiedlichen Organismen aufgenommene Menge mit der sicheren Menge verglichen wird, die im jeweiligen Organismus keine negativen Auswirkungen auf die Gesundheit oder die Umwelt hat. Bei der Bestimmung von Grenzwerten auf Basis dieser Effektschwelle werden in der Regel Sicherheitsfaktoren für Unsicherheiten in der Abschätzung verwendet. Bisher wurden keine gesetzlich verbindlichen Grenzwerte für Mikroplastik festgelegt. In der Literatur zu Umweltauswirkungen von Mikroplastik wurden bisher Effektschwellen auf Basis von Tests mit primärem Mikroplastik vorgeschlagen. Die Bestimmung von Umweltkonzentrationen unterliegt, wie oben beschrie-

ben, jedoch noch Einschränkungen. Die Abschätzung durch Modelle befindet sich ebenfalls noch in der Entwicklung.

Die Toxizität der Partikel auf Organismen erstreckt sich, je nach betrachtetem Organismus, über mehrere Grössenordnungen. Daher haben Forschende den Bereich der Umweltkonzentrationen, der aufgrund von Modellrechnungen zu erwartenden ist, mit den Konzentrationsbereichen verglichen, die nachweislich eine ökotoxikologische Wirkung hatten: Der Vergleich zeigte, dass sich die Konzentrationsbereiche nur wenig überlappen. Die Expositions- und Toxizitätsdaten beruhen allerdings auf sehr unterschiedlichen Plastikpartikeln in Bezug auf Grösse, Form, Polymer, Alterung und Reinheit.

Das Risiko für den Menschen durch die Aufnahme von Mikroplastik aus Lebensmitteln sieht das BfR als derzeit unwahrscheinlich an: In Tierstudien konnte zwar Mikroplastik im Magen-Darm-Trakt, in Blut, Lymphe und der Leber nachgewiesen werden, allerdings nur bei hohen, nicht umweltrelevanten Mikroplastikkonzentrationen. Auch im menschlichen Darm wurden Mikroplastikpartikel nachgewiesen. Diese Partikel sind aber grösstenteils nicht systemisch verfügbar, d. h., sie gelangen nicht über die Darmwand ins Blut und werden nicht mit dem Blutstrom im Körper verteilt, sondern werden schnell wieder ausgeschieden.

Es bleibt unklar, wie relevant die Testergebnisse an einzelnen Partikeln unter bestimmten Versuchsbedingungen für die Risikobewertung anderer Partikel oder der gleichen Partikel unter anderen Versuchsbedingungen sind. Eine abschliessende Risikobewertung für Umweltorganismen und den Menschen ist aufgrund der vielen offenen Fragen aktuell noch nicht möglich.

RISIKOKOMMUNIKATION UND -WAHRNEHMUNG

Bei der Kommunikation von unbekannten Risiken, wie dies bei Mikroplastik der Fall ist, ergeben sich aus der wissenschaftlichen Unsicherheit, der Komplexität des Themas und der selektiven Berichterstattung durch die Medien zahlreiche Herausforderungen. Es ist davon auszugehen, dass grosse Teile der Bevölkerung nicht zwischen Plastikmüll und Mikroplastik unterscheiden, das Prinzip der Dosis-Wirkungs-Beziehung nicht

kennen und die Bereitschaft, sich intensiv mit wissenschaftlich komplexen Themen auseinanderzusetzen, nicht in allen Bevölkerungsgruppen gleichermassen vorhanden ist. Hinzu kommt, dass das öffentliche Vertrauen in die Wissenschaft geschwächt wird, wenn von Expertenseite darauf hingewiesen wird, dass noch zahlreiche Unsicherheiten bei der Risikobewertung bestehen. Die Art der Berichterstattung zum Thema trägt auch dazu bei, dass die öffentliche Wahrnehmung des Risikos sich von der der Wissenschaft unterscheidet. Nach einer aktuellen Umfrage der Eawag in der deutschsprachigen Schweiz sieht eine Mehrheit der schweizerischen Bevölkerung die Risiken durch Mikroplastikpartikel als ebenso gross oder grösser an als die Risiken durch die Klimaerwärmung, durch Pestizide und Dünger, durch Wasserkraftwerke und durch Makroplastik [17].

POLITISCHE MASSNAHMEN

Die EU hat auf die Besorgnis der Bevölkerung über das Vorkommen von Mikroplastik reagiert und mit ihrer Kunststoffstrategie (2018) und dem Neuen Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft (2020) bereits Massnahmen zur Verringerung von Mikroplastik an der Quelle initiiert. So wird die EU voraussichtlich 2021 oder 2022 im Rahmen der REACH-Verordnung eine Beschränkungsregelung für absichtlich verwendetes Mikroplastik erlassen – und zwar in Anwendungen mit relevanten Umwelteinträgen. Die Beschränkungen sollen schrittweise über einen Zeitraum von sechs Jahren in Kraft treten. Sie betreffen zum Beispiel Einstreumaterial für Kunstrasenplätze, landwirtschaftliche Produkte wie Dünger mit kontrollierter Freisetzung oder Antiklumpmittel, verschiedene Kosmetikzusätze, verkapselte Duftstoffe in Wasch- und Reinigungsmitteln, plastikhaltige Farben und Lacke, Medizinprodukte und Arzneimittel. Für Anwendungen in geschlossenen Systemen und an Industriestandorten sowie in Arzneimitteln sind Ausnahmeregelungen vorgesehen. Es wird erwartet, dass die Beschränkung für Mikroplastik die Einträge in die Umwelt in 20 Jahren um rund 500 000 Tonnen oder 90% reduzieren wird. Die Gesamtkosten für die Umsetzung der Beschränkungsregelung werden auf 11 bis 19 Mia. Euro geschätzt. Die Europäische Chemikalienagentur (ECHA) hat im Januar 2019 einen Vorschlag für

die Beschränkungsregelung vorgelegt; die Entscheidung der EU dazu steht derzeit noch aus. Sobald die Regelung in Kraft tritt, wird die Schweiz sie prüfen und eine entsprechende Beschränkungsregelung im Rahmen einer Revision der Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung vorbereiten. So soll das gleiche Schutzniveau wie in der EU erreicht und Handelshemmnisse vermieden werden. In der EU gilt ausserdem seit dem 4. Juli 2021 ein Verbot für das Inverkehrbringen von oxo-abbaubaren Kunststoffen. In diesen Kunststoffen führen metall-organische und andere Zusätze zur schnelleren Bildung von Plastikfragmenten und so auch zu einem verstärkten Umwelteintrag von Mikroplastik. Oxo-abbaubare Kunststoffe werden vor allem in Einkaufstaschen, Lebensmittelverpackungen und landwirtschaftlichen Mulchfolien eingesetzt. Die Schweiz hat einen Regelungsentwurf für ein Verbot des Inverkehrbringens von oxo-abbaubaren Kunststoffen in die Vernehmlassung geschickt. Die Regelung soll im Herbst 2021 vom Bundesrat verabschiedet werden.

In der Schweiz ist das Bundesamt für Umwelt (BAFU) in zahlreiche Aktivitäten im Zusammenhang mit Mikroplastik in der Umwelt involviert. So hat es sich zum Beispiel das Ziel gesetzt, der Öffentlichkeit sachliche und verständliche Informationen zu Mikroplastik zur Verfügung zu stellen. Darüber hinaus finanziert und begleitet das BAFU Forschungsprojekte zu Kunststoffen in der Umwelt, arbeitet in internationalen Gremien mit und prüft die Umsetzung von parlamentarischen Vorstössen zu diesem Thema sowie die EU-Beschränkungen für Mikroplastik (REACH-Verordnung) im Hinblick auf die Umsetzung im Schweizer Chemikalienrecht. Im Herbst 2021 soll der Bericht «Kunststoffe in der Umwelt» publiziert werden, der auf den zukünftigen Umgang der Schweiz mit Kunststoffen eingeht und Massnahmen zur Reduktion der Umweltbelastung durch Kunststoffe vorschlägt.

SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK

Mikroplastik ist ubiquitär in Umweltkompartimenten verteilt, wurde in Nahrungsmitteln, menschlichem Stuhl und Umweltorganismen nachgewiesen. Es besteht ein direkter Zusammenhang

der Umweltkonzentrationen mit der weltweiten Kunststoffverwendung und -verschmutzung. Probenahme- und Probenvorbereitungstechniken, ebenso wie Möglichkeiten zur Charakterisierung, bestimmen die Kenntnis über das Vorkommen von Mikroplastik. Die Materialien, die in der Umwelt detektiert wurden, und die, die bisher in (öko-)toxikologischen Tests eingesetzt wurden, unterscheiden sich in verschiedenen chemischen und Materialeigenschaften. Die Identifikation relevanter durch Mikroplastik hervorrufer Effekte und von Referenzmaterialien für (öko-)toxikologische Tests ist notwendig. Trotz der starken medialen Präsenz potenzieller Risiken durch Mikroplastik ist eine Risikobewertung nach aktuellen Standards nicht möglich oder mit sehr grossen Unsicherheiten verbunden. Im Laufe des Kurses wurde aufgrund dessen wiederholt auf die Berücksichtigung des Vorsorgeprinzips bei der Bewertung von Mikroplastik in der Umwelt hingewiesen.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Frias, J.P.G.L.; Nash, R. (2019): *Microplastics: Finding a consensus on the definition*. *Mar Pollut Bull.* p. (138) 147–145
- [2] Lebreton, L.; Egger, M.; Slat, B. (2019): *A global mass budget for positively buoyant macroplastic debris in the ocean*. *Scientific Reports*: p. 12922 (9)
- [3] Scheurer, M.; Bigalke, M. (2018): *Microplastics in Swiss Floodplain Soils*. *Environmental Science & Technology*. 52(6): p. 3591–3598
- [4] Bertling, J.; Bertling, R.; Hamann, L. (2018): *Kunststoffe in der Umwelt: Mikro- und Makroplastik*. *Fraunhofer Umsicht*
- [5] Michalec, F.-G. et al. (2020): *Efficient mate finding in planktonic copepods swimming in turbulence*. *eLife*: p. 9:e62014
- [6] Bilotta, G.S.; Brazier, R.E. (2008): *Understanding the influence of suspended solids on water quality and aquatic biota*. *Water Research*: p. 2849–2861
- [7] Chapman, J.M. et al. (2014): *Clear as mud: a meta-analysis on the effects of sedimentation on freshwater fish and the effectiveness of sediment-control measures*. *Water Res.*: p. 56:190–202
- [8] Merbt, S. (2021): *The effects of micropalastic ingestion on the aquatic snail, Physa acuta*. *In preparation*
- [9] Schwabl, P. et al. (2019): *Detection of Various Microplastics in Human Stool: A Prospective Case Series*. *Ann Int Med.* p. 171(7):453–457
- [10] panel EC (2016): *Presence of microplastics and nanoplastics in food, with particular focus on seafood*. *EFSA Journal*: p. 14(6):4501
- [11] Stock, V. et al. (2019): *Uptake and effects of orally ingested polystyrene microplastic particles in vitro and in vivo*. *Arch. Toxicol.*: p. 93(7):1817–1833
- [12] Cabernard, L. et al. (2016): *Mikroplastik in Abwasser und Gewässern*. *Aqua & Gas*: p. 87–85 (7–8)
- [13] AWEL (2019): *Mikroplastik in Abwasser und Gewässern, Stand und Beurteilung*. *Baudirektion, Kanton Zürich*
- [14] Zumstein, M.T. et al. (2018): *Biodegradation of synthetic polymers in soils: Tracking carbon into CO₂ and microbial biomass*. *Sci Adv*, 4(7): p. eaas9024
- [15] SAPEA (2020): *Biodegradability of Plastics in the Open Environment*
- [16] Albertson, A.-C.; Hakkarainen, M. (2017): *Designed to degrade*. 358(6365): p. 872–873
- [17] Logar, I. (2021): *Public risk perception, preferences and willingness to pay for reducing micro- and nanoplastic pollution in freshwater in Switzerland*. *In preparation*

> SUITE DU RÉSUMÉ

les chantiers, les semelles de chaussées, les emballages plastiques, les marquages routiers et le lavage des tissus. Le prélèvement et la préparation d'échantillons ainsi que les possibilités de caractérisation déterminent les connaissances sur la présence de microplastiques. Les substances détectées dans l'environnement et celles utilisées jusqu'à présent dans les analyses (éco)toxikologiques diffèrent par leurs propriétés chimiques et de matériaux. C'est pourquoi, malgré la forte présence des risques potentiels des microplastiques dans les médias, une évaluation définitive des risques n'est pas possible selon les normes actuelles, ou est associée à de très grandes incertitudes. Par conséquent, l'attention des participants au cours a de nombreuses fois été attirée sur le respect du principe de précaution lors de l'évaluation des microplastiques dans l'environnement.