

MODELLIERUNG VON PLASTIK IN DER UMWELT

QUANTIFIZIERUNG DER FREISETZUNG VON MIKRO- UND MAKROPLASTIK IN DIE SCHWEIZER UMWELT

Plastik gehört nicht in die Umwelt, dennoch wird es überall gefunden. Da der analytische Nachweis bis anhin schwierig ist, wurden in diesem Projekt die Emissionen von sieben verschiedenen Polymeren in die Umwelt der Schweiz mittels Materialflussmodellen berechnet. Die Emissionen von Makroplastik sind viel grösser als von Mikroplastik, zudem gelangt viel mehr Plastik auf Böden als in Gewässer.

Bernd Nowack*; Delphine Kawecki-Wenger

Empa - Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, St. Gallen

RÉSUMÉ

MODÈLE POUR QUANTIFIER LE PLASTIQUE DANS L'ENVIRONNEMENT

La question de la pollution par le plastique a attiré beaucoup d'attention globalement ces dernières années. Afin de fournir une base holistique à la discussion en Suisse, nous avons développé un modèle pour quantifier les quantités de macro- et microplastiques entrant dans l'environnement suisse. Nous avons choisi de distinguer sept différents polymères importants: le LDPE, le HDPE, le PP, le PS, le EPS, le PVC et le PET. Sur la base d'une modélisation de l'ensemble du cycle de vie des polymères de la production jusqu'à leur utilisation puis leur élimination, nous avons pu calculer les flux de masse qui se déversent dans l'environnement chaque année. Chaque année, environ 5100 tonnes des sept polymères sont rejetées dans l'environnement en Suisse, dont 4400 tonnes correspondent à des émissions de macroplastiques dans les sols. Le microplastique émis dans les sols est la deuxième contribution la plus importante avec 600 tonnes. La quantité de plastique qui est émise dans l'eau est beaucoup plus faible: 110 tonnes de macroplastiques et 15 tonnes de microplastique. La fragmentation du macroplastiques en microplastiques et les processus de transport dans l'environnement ne sont pas pris en compte. Les émissions totales pour la Suisse ont été régionalisées à l'aide de données géographiques. Des cartes qui montrent les émissions dans le sol, l'eau et l'air avec une haute résolution ont ainsi été obtenues. Une comparaison des émissions des sept polymères

EINLEITUNG

Plastik ist in den vergangenen 100 Jahren eines der wichtigsten Materialien unserer Zivilisation geworden, das aus unserem täglichen Leben nicht mehr wegzudenken ist. In den letzten Jahren ist jedoch deutlich geworden, dass unser Gebrauch von Plastik weltweit zu grossen Umweltproblemen führen kann. Bestimmend in der öffentlichen Wahrnehmung waren dabei die Bilder von angeschwemmtem Plastikmüll an Stränden und die schwimmenden «Plastikinseln» in der Mitte der Ozeane. Neben dem sichtbaren Müllproblem mit Makroplastik ist noch ein weiterer Aspekt der Plastikverschmutzung bekannt geworden: Mikroplastik – die Plastikteilchen kleiner als 5 mm, die mittlerweile überall auf dem Globus gefunden werden.

Für die Schweiz gibt es ein paar Messungen von Mikroplastik, hauptsächlich in Seen und Flüssen [1], aber auch in Auenböden [2]. Diese Arbeiten zeigen, dass hier Mikroplastik in (fast) allen Umweltproben gefunden werden kann. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass die Methoden zur Probenahme und Analytik von Mikroplastik immer noch in Entwicklung sind. Über die Belastung mit Makroplastik gibt es praktisch keine quantitativen Daten ausserhalb von *Citizen-Science*-Projekten wie dem *Swiss Litter Report* [3]. Um ein ganzheitliches Bild der Plastikbelastung der Schweizer Umwelt zu bekommen, haben

* Kontakt: nowack@empa.ch

wir ein Modell entwickelt, mit dem die Massenflüsse von Makro- und Mikroplastik in die Schweizer Umwelt abgeschätzt werden können. Der vorliegende Artikel fasst die wichtigsten Resultate aus drei wissenschaftlichen Artikeln zusammen [4–6]. Zusätzlich werden die Resultate mit denjenigen einer Studie zur Freisetzung von Mikroplastik aus Pneu verglichen [7].

METHODEN

Die Materialflussanalyse (MFA) ist eine etablierte Methode, um die Flüsse von Stoffen durch die Anthroposphäre verfolgen zu können [8]. In der MFA wird der ganze Lebenszyklus eines Materials betrachtet, von der Produktion des Materials über die Herstellung von Produkten und deren Gebrauch bis zur Entsorgung. Um die Unsicherheit der Modellparameter berücksichtigen zu können, wurde eine probabilistische MFA verwendet [9]. Das

generelle Vorgehen ist in *Figur 1* aufgezeigt. In einem ersten Schritt wurden für sieben verschiedene Polymere die Massenflüsse innerhalb der Anthroposphäre für Europa und die Schweiz quantifiziert [4]. Die betrachteten Polymere waren Polyethylen mit niedriger und hoher Dichte (LDPE und HDPE), Polypropylen (PP), Polystyrol (PS), expandiertes PS (EPS), Polyvinylchlorid (PVC) und Polyethylenterephthalat (PET). In einem zweiten Schritt wurden für jeden Prozess die Flüsse von Makro- und Mikroplastik aller Polymertypen in die Umwelt der Schweiz quantifiziert [5]. Dazu wurden für jeden Abschnitt im Lebenszyklus und jede Produktkategorie die möglichen Emissionsfaktoren abgeschätzt, und zwar jeweils für Makro- und Mikroplastik separat. In einem dritten Schritt wurde die in die Umwelt freigesetzte Menge regional verteilt, um die lokalen Emissionen bestimmen zu können [6]. Dies erfolgte mit Karten basierend auf geografischen Infor-

mationssystemen (GIS), die es erlaubten, die verschiedenen Freisetzungsprozesse abzubilden, z.B. die Bevölkerungsdichte für das Littering, also das achtlose Wegwerfen von Abfall, oder die Neubauten für die Freisetzung während des Baus neuer Gebäude.

RESULTATE

PLASTIKFLÜSSE IN DER ANTHROSPHÄRE

Das Wissen über die Plastikflüsse von spezifischen Polymeren in der Anthroposphäre bildet die Grundlage, um die Mengen an Plastik, die in die Umwelt gelangen, quantifizieren zu können. Als Beispiel für ein vereinfachtes Materialflussdiagramm sind in *Figur 2* die Flüsse von Polypropylen in der Schweiz gezeigt. Das Gesamtsystem, das die Grundlage für das Diagramm bildet, enthält ein Vielfaches an Kompartimenten und Flüssen: vor allem alle 35 Produktkategorien, die in den *Figuren 2* und *3* in acht Sektoren

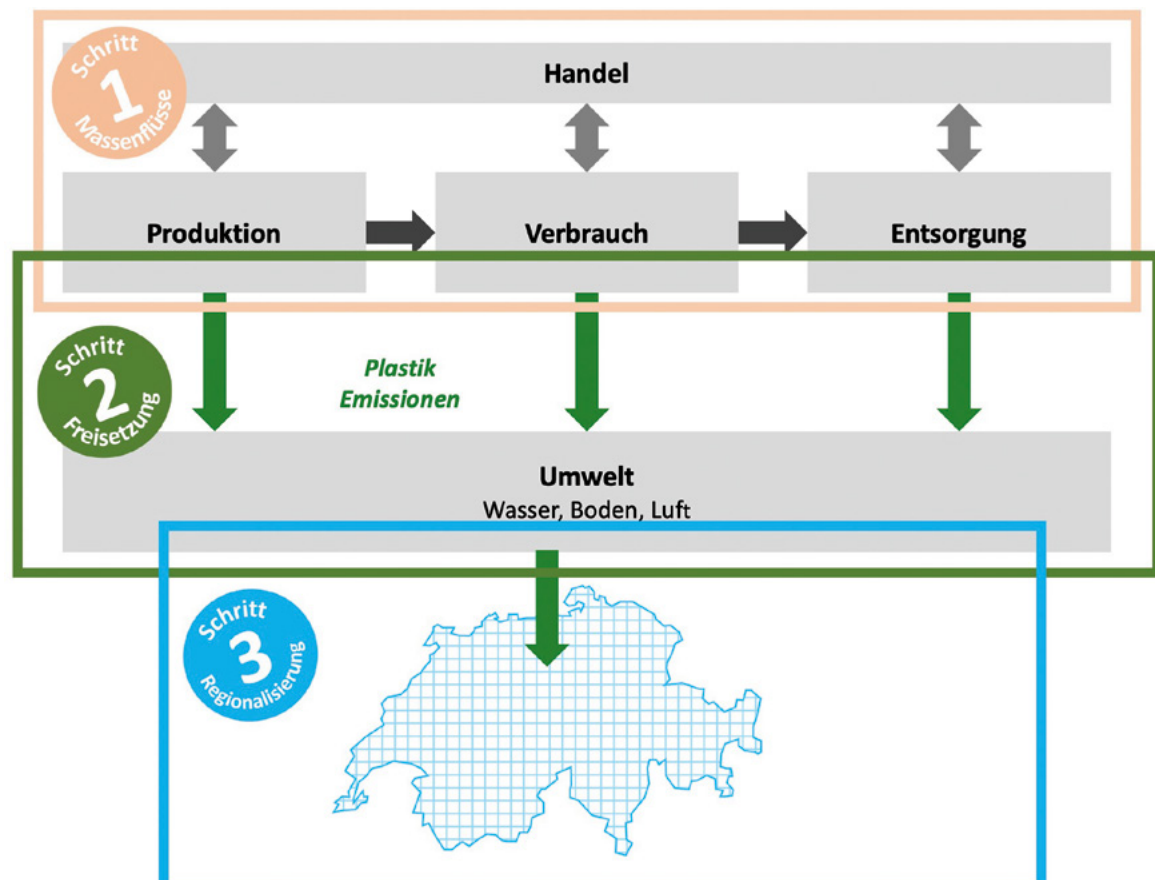


Fig. 1 Schematisches Vorgehen zur Abschätzung der Emissionen von Plastik in die Umwelt: In einem ersten Schritt wurden die Flüsse durch die Anthroposphäre modelliert, anschliessend wurde die Freisetzung in die Umwelt quantifiziert, welche dann in einem dritten Schritt regionalisiert wurde.

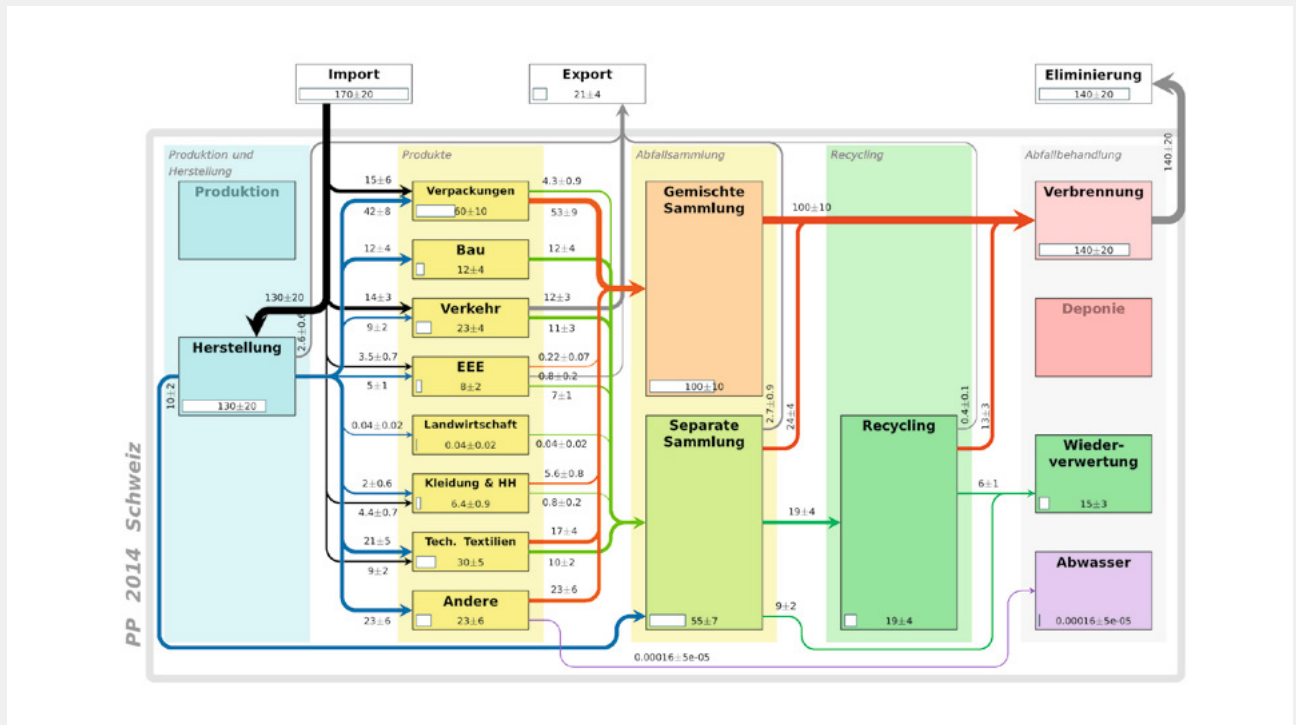


Fig. 2 Vereinfachtes Materialflussdiagramm für Polypropylen in der Schweiz in 1000 Tonnen pro Jahr. EEE: elektrische und elektronische Geräte; HH: Haushaltstextilien.

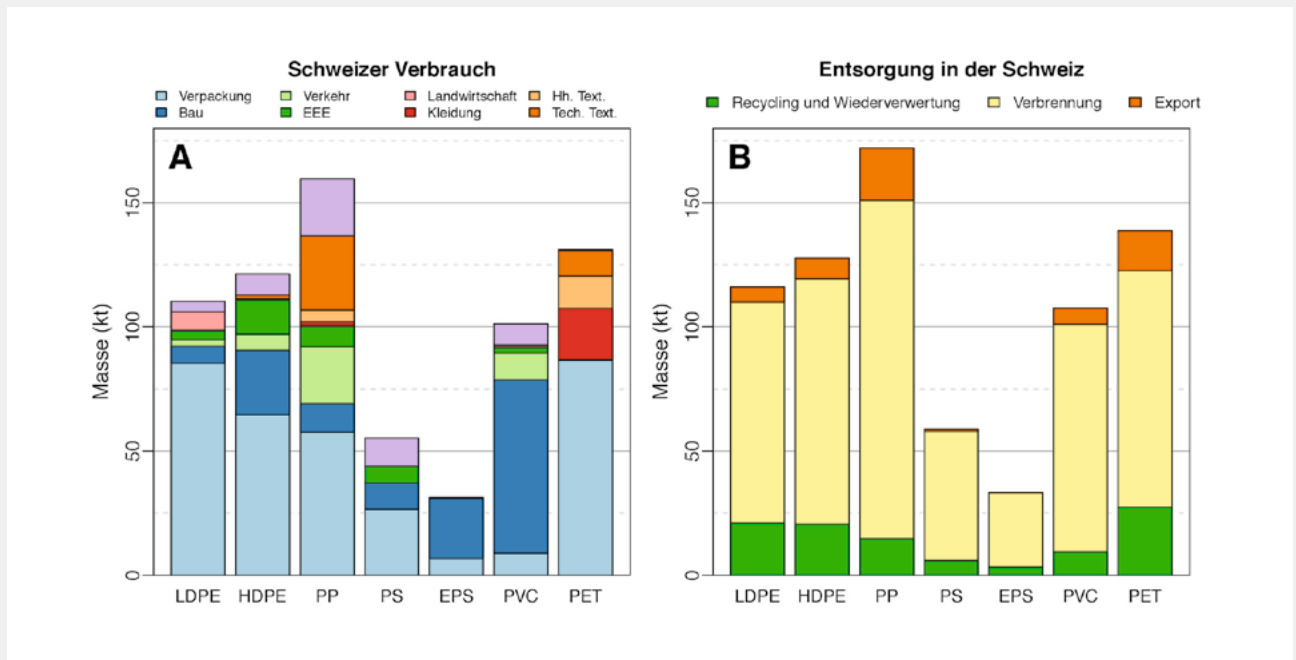


Fig. 3 Verbrauch und Entsorgung der sieben untersuchten Polymere in der Schweiz in 1000 Tonnen pro Jahr: A) Verteilung des Verbrauches auf verschiedene Sektoren. B) Entsorgung der Polymere. EEE: elektrische und elektronische Geräte; HH: Haushaltstextilien.

zusammengefasst sind. Die Abfallsammlung und das Recycling wurden mit 16 verschiedenen Prozessen beschrieben. Das Beispiel von PP zeigt, dass von den 170kT, die pro Jahr in die Schweiz importiert werden (Produktion findet keine statt), am Schluss 20kT exportiert und 140kT verbrannt werden. Der Rest wird der Wiederverwertung zugeführt. *Figur 3* zeigt in einer vereinfachten Weise die

Verteilung der sieben Polymere auf die Produktsektoren. Anhand der Grafik ist gut zu erkennen, warum eine polymer-spezifische Betrachtung wichtig ist: Je nach Polymer sind andere Produktkategorien vorherrschend. EPS und PVC finden zum Beispiel hauptsächlich in der Bauwirtschaft Verwendung, während LDPE als Verpackungsmaterial genutzt wird. PET ist das einzige Material, das in

signifikanter Menge für Bekleidung verwendet wird. *Figur 3* zeigt auch, welcher Anteil der sieben Polymere verbrannt oder wiederverwertet wird. Die rezyklierte Menge macht für alle Polymere nur einen kleinen Teil aus. Auch für PET ist dies der Fall, was überraschend sein mag, da die Schweiz doch als Weltmeister im PET-Recycling gilt – allerdings bezieht sich dies nur auf PET-Getränkeflaschen.

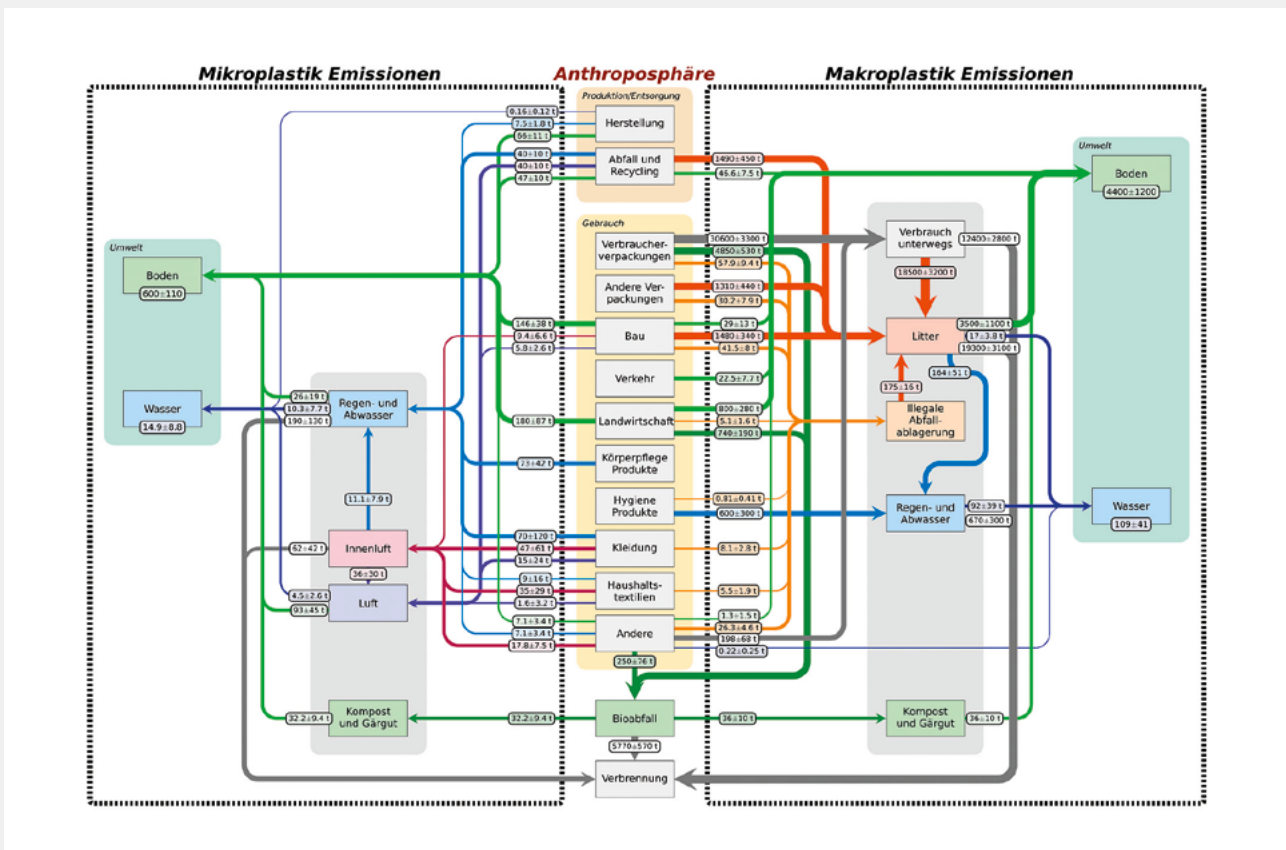


Fig. 4 Massenflüsse von Mikro- und Makroplastik in die Schweizer Umwelt in Tonnen pro Jahr.

Makroplastik (Tonnen pro Jahr)				Mikroplastik (Tonnen pro Jahr)			
Boden: 4400 ± 1200		Wasser: 109 ± 41		Boden: 600 ± 110		Wasser: 15 ± 9	
Flaschen	1090 ± 740	Flaschen	33 ± 26	Röhren (Bau)	137 ± 38	Entsorgung und Recycling	3,2 ± 1,1
Entsorgung und Recycling	760 ± 320	Säcke (Konsumenten)	18,3 ± 9,5	Landwirtschaftliche Folien	114 ± 77	Bekleidung	3,1 ± 5,7
Säcke (Konsumenten)	600 ± 270	Andere Verpackungen	16,7 ± 7,4	Entsorgung	89 ± 17	Kosmetikprodukte	2,6 ± 2,8
Andere Verpackungen	560 ± 210	Folien (Konsumenten)	13,2 ± 5,6	Produktion/Herstellung	69 ± 11	Textilbeschichtungen	2 ± 1,6
Folien (Konsumenten)	440 ± 160	Folien (Nicht-Konsumenten)	4,5 ± 4	Agrotexilien	65 ± 39	Produktion/Herstellung	1,2 ± 0,4
Agrotexilien	350 ± 200	Röhren (Bau)	4,1 ± 2,5	Bekleidung	28 ± 36	Technische Textilien	1 ± 1,7

Tab. 1 Mengen an Plastik und Mikroplastik in Tonnen, die pro Jahr in die Schweizer Umwelt gelangen. Gezeigt sind jeweils die Gesamteinträge in die Umweltkompartimente und die sechs wichtigsten Quellen.

Wie *Figur 3a* zeigt, findet PET vielerorts Anwendungen, was im Endeffekt dazu führt, dass nicht viel mehr PET recycelt wird als andere Polymere.

FREISETZUNG VON PLASTIK IN DIE UMWELT

Figur 4 zeigt eine vereinfachte Darstellung der Emissionen für alle Polymere kombiniert. Auf der rechten Seite sind die Makroplastikflüsse zu sehen, auf der linken Seite diejenigen für Mikroplastik. Es gibt sowohl für Makro- wie für Mikroplastik direkte Flüsse in die Umwelt, wobei diese für Makroplastik klein sind im Vergleich mit denjenigen, die zuerst in

ein technisches System wie das Abwasser gelangen. In diesen technischen Systemen wird der grösste Teil der anfänglich freigesetzten Plastikmenge entfernt und der Abfallverbrennung zugeführt. Dies gilt vor allem für das «Littering»-Kompartiment, das sowohl das Wegwerfen der Verpackungen als auch das Reinigen durch die Gemeinden umfasst. Nur derjenige Anteil an Plastik, der durch regelmässiges Reinigen nicht wieder eingesammelt wird, verlässt das Littering-Kompartiment und gelangt letztendlich in die Umwelt. Auch für Mikroplastik ist die Abwasserreinigungsanlage ein wich-

tiges technisches Kompartiment, das den grössten Teil der Mikroplastikmenge im Abwasser entfernt. Obwohl aus Textilien und anderen Anwendungen rund 220 Tonnen Mikroplastik freigesetzt werden, gelangen davon nur 15 Tonnen in die Gewässer, der Rest wird in der Kläranlage entfernt und mit dem Klärschlamm verbrannt.

In *Tabelle 1* sind die Mengen an Mikro- und Makroplastik aufgelistet, die auf den Boden und ins Wasser gelangen. Total gelangen rund 5100 Tonnen Plastik in die Umwelt, wobei Makroplastik auf Böden mit 4400 Tonnen den grössten Anteil

ausmacht. Mikroplastik auf Böden ist mit 600 Tonnen am zweitwichtigsten. Die Menge an Plastik, die ins Wasser gelangt, ist sehr viel kleiner: 110 Tonnen Makroplastik und 15 Tonnen Mikroplastik. Das sind rund 0,7% der gesamten Menge der sieben Kunststoffe, die in der Schweiz jährlich verbraucht werden (insgesamt rund 710 000 Tonnen). *Tabelle 1* zeigt für jeden Eintragspfad die sechs wichtigsten Prozesse, die jeweils für rund 90% der Freisetzung verantwortlich sind. Dabei zeigt sich, dass für Makroplastik vor allem das Littering eine grosse Rolle spielt. Die wichtigsten Quellen von Mikroplastik im Boden sind die Landwirtschaft (z.B. durch den Zerfall von Folien und Rohrleitungen) und die Bauwirtschaft (z.B. bei der Installation und dem Rückbau von Isolationen an Häusern). In geringerem Masse trägt auch die Abfallentsorgung zur Mikroplastikbelastung bei, nämlich durch das Zerkleinern von Kunststoffabfällen für das Recycling. Auch das Waschen von Kunstfasertextilien ist für die Freisetzung ins Wasser ein wichtiger Prozess. Bis jetzt wurden jeweils alle Polymere zusammen präsentiert. Bezogen auf die einzelnen Polymere gibt es sieben Hotspots für die Freisetzung (*Tab. 2*):

Freisetzung	Polymere
Littering von Verpackungsmaterial	PET, HDPE, PP, LDPE, PS und PVC
Entsorgung und Recycling	PVC, HDPE, EPS, PP und PS
Landwirtschaft	LDPE und PP
Bauwirtschaft	PVC, HDPE, EPS und PS
Entsorgung über das Abwasser	HDPE, PET und PP
Kompost/Gärgut	PP, HDPE, LDPE, PET und PS
Textilien	PET und PP

Tab. 2 Hotspots für die Freisetzung einzelner Polymere

Figur 5 zeigt die Verteilung der Polymeremissionen in verschiedenen Umweltkompartimente für Mikroplastik, *Figur 6* diejenige für Makroplastik. Vor allem für Mikroplastik zeigen sich grosse Unterschiede in den erwarteten Polymerverteilungen in verschiedenen Umweltkompartimenten. PET im Wasser stammt zu einem guten Teil aus Kunstfaserkleidung, während LDPE im Boden aus Folien für die Landwirtschaft stammt. Für Makroplastik ist bei Oberflächenwasser, Strassenrandböden und natürlichen Böden vor allem die Littering-Signatur der Verpackungskunststoffe LDPE, HDPE, PP und

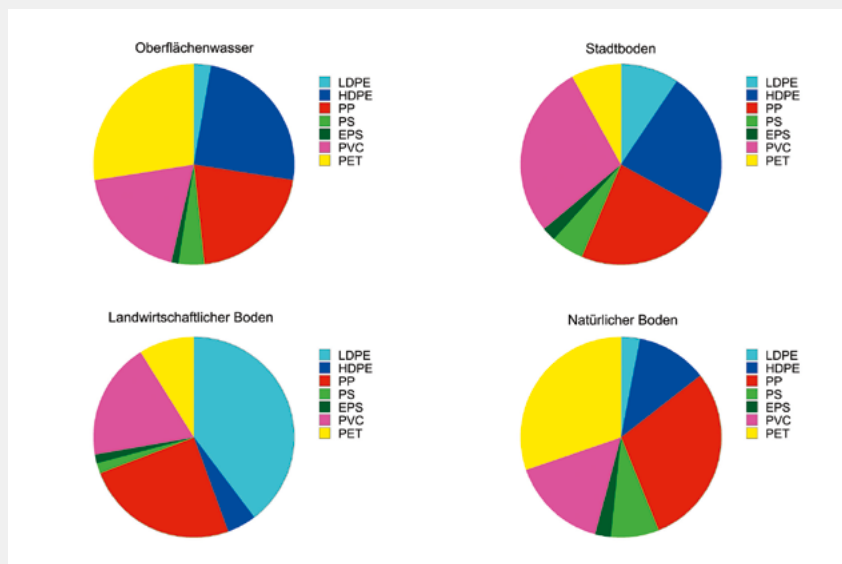


Fig. 5 Prozentuale Verteilung der Polymeremissionen für Mikroplastik in Wasser, Stadtböden, landwirtschaftlichen und natürlichen Böden.

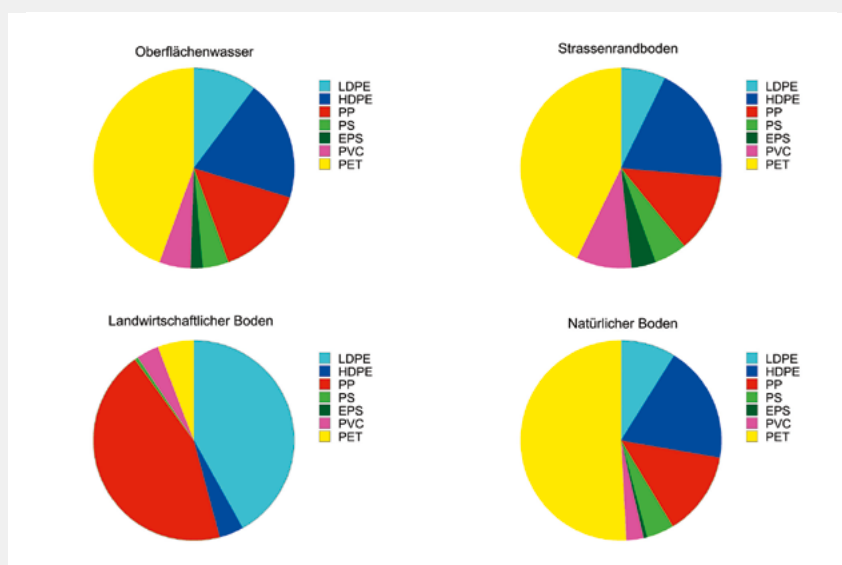


Fig. 6 Prozentuale Verteilung der Polymeremissionen für Makroplastik in Wasser, Strassenrandböden, natürlichen und landwirtschaftlichen Böden.

	Freisetzung in g/Person/Jahr
Total	630 ± 150
Makroplastik, Boden	540 ± 140
Makroplastik, Wasser	13 ± 5
Mikroplastik, Boden	73 ± 14
Mikroplastik, Wasser	1,8 ± 1,1
LDPE	94 ± 34
HDPE	98 ± 50
PP	126 ± 43
PS	24 ± 13
EPS	16 ± 12
PVC	65 ± 36
PET	200 ± 120

Tab. 3 Mengen an Plastik und Mikroplastik in Gramm pro Kopf und Jahr, welche in die Schweizer Umwelt gelangen

PET zu sehen. Im landwirtschaftlichen Boden bestimmt die Verwendung von LDPE und PP in Folien zu einem grossen Teil die Freisetzung.

In *Tabelle 3* sind die Emissionen in Gramm pro Kopf und Jahr gegeben. Im Schnitt ist jeder Einwohner der Schweiz für 630 g Plastikemissionen pro Jahr verantwortlich. Der Mikroplastikanteil, der pro Jahr ins Wasser gelangt, ist dabei mit 1,8 g/Kopf vergleichsweise gering.

GEOGRAFISCHE VERTEILUNG DER EMISSIONEN

Die im vorherigen Kapitel präsentierten Resultate beziehen sich jeweils auf die Schweiz als Ganzes. Es ist jedoch klar, dass viele Freisetzungsprozesse lokal sehr unterschiedlich sind. Die Mengen an Plastik, die von den unterschiedlichen Produktkategorien in die Umwelt gelangen, wurden daher mit geografischen Daten auf die Fläche der Schweiz verteilt. So wurde zum Beispiel die Bevölkerungsdichte verwendet, um das Littering innerhalb der Gemeinden zu beschreiben, die Verkehrsdichte für das Littering aus dem Auto und die Karte der Neubauten für die Freisetzung aus dem Baugewerbe. Die Karten für die verschiedenen Prozesse werden anschliessend addiert, um dann die Verteilung der Gesamtfreisetzung zu erhalten. In *Figur 7* sind Beispiele von Karten der Emissionen auf den Boden gezeigt, und zwar für LDPE und EPS, je für Makro- und Mikroplastik. Die Auflösung des Modells beträgt 100×100 m, in den Karten werden Resultate für 10×10 km gezeigt. Die verschiedenen Karten zeigen unterschiedliche Eigenschaften. Für LDPE-Makroplastik ergibt sich die Verteilung der Freisetzung aus dem kombinierten Einfluss der Landwirtschaft und des Litterings. Für EPS-Makroplastik sind das Strassennetzwerk und die Städte deutlich zu sehen, was auf die Freisetzung beim Bau und Transport zurückzuführen ist. Für LDPE-Mikroplastik ist vor allem die Landwirtschaft verantwortlich, was zu hohen Emissionen ausserhalb der Städte führt. EPS-Mikroplastik zeigt im Vergleich zu den anderen Karten tiefere Emissionen, hauptsächlich in den bewohnten Gebieten.

Analog zu den Emissionen auf den Boden wurde auch die Freisetzung in die Gewässer modelliert, wobei hier andere Proxy-Karten zur Anwendung kamen, z. B. der Standort aller Abwasserreinigungsanlagen. *Figur 8* zeigt die resultierenden

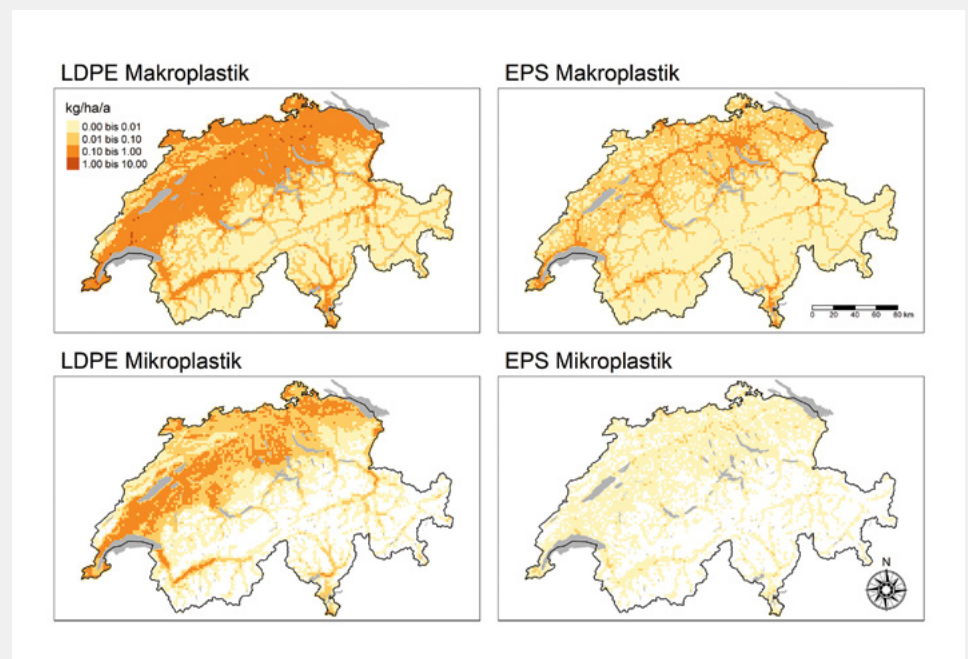


Fig. 7 Geografische Verteilung der jährlichen Plastikemissionen auf Böden mit einer Auflösung von 10×10 km. Gezeigt sind LDPE-Makroplastik (oben links) und -Mikroplastik (unten links), EPS-Makroplastik (oben rechts) und -Mikroplastik (unten rechts).

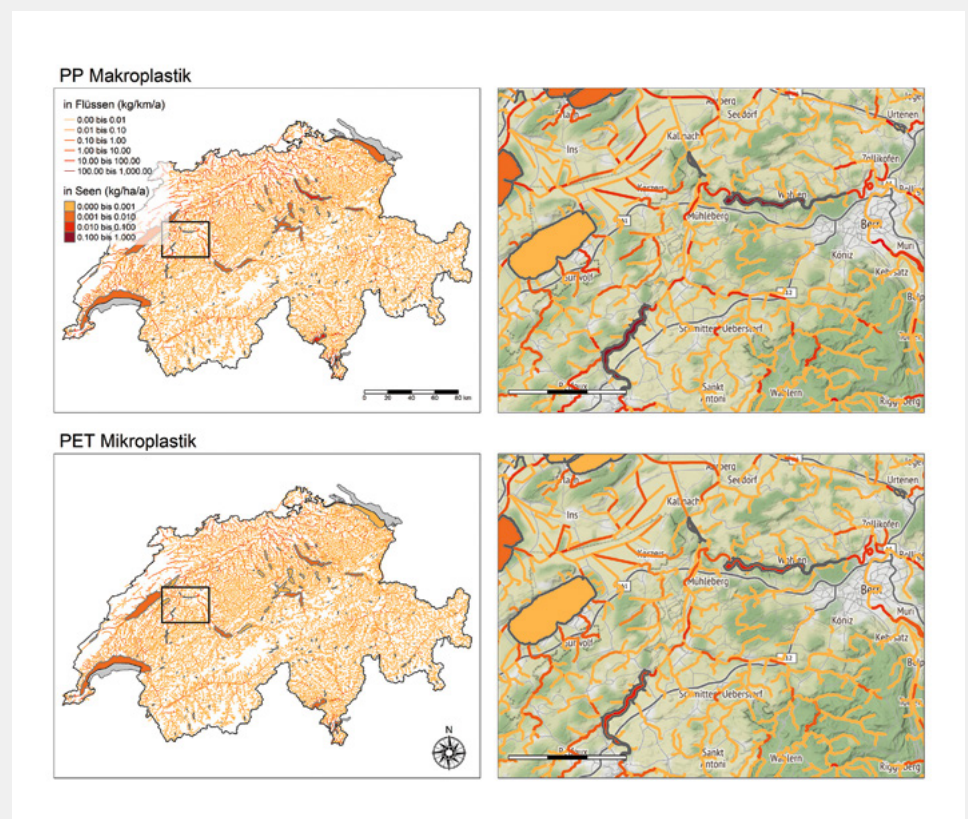


Fig. 8 Geografische Verteilung der jährlichen Plastikemissionen von PP-Makroplastik (oben) und PET-Mikroplastik (unten) in Seen und Flüssen der Schweiz (links) und ein Kartenausschnitt (rechts).

Karten für PP-Makroplastik und PET-Mikroplastik. Ein vergrösserter Kartenausschnitt erlaubt es, den Detaillierungsgrad der Karten besser zu sehen, da in diesen Karten nicht mehr Rasterzellen, sondern Flussabschnitte modelliert wurden.

DISKUSSION UND SCHLUSSFOLGERUNGEN

Zahlen zu den Emissionen von Makro- und Mikroplastik sind bereits mehrfach publiziert worden, doch können die Re-

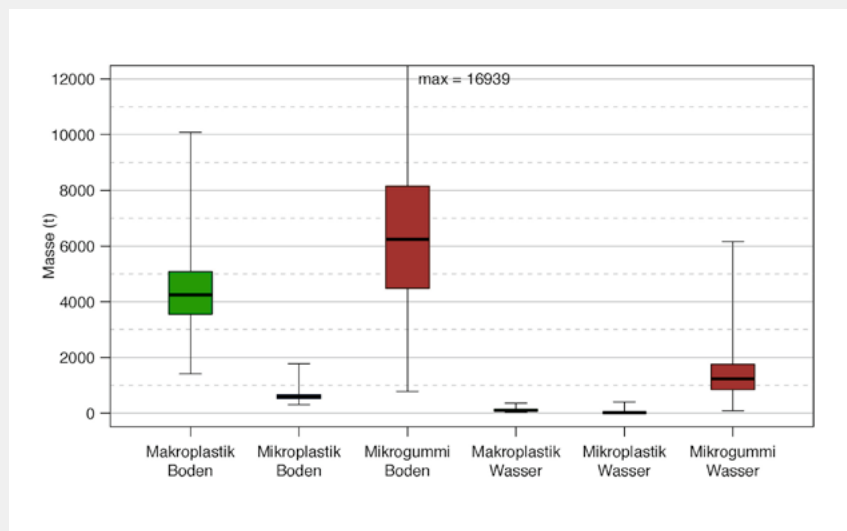


Fig. 9 Vergleich der Freisetzung der sieben in dieser Arbeit berücksichtigten Polymere mit den Emissionen von Gummi aus Reifen in Form von Mikrogummi. Die Gummidaten stammen aus Sieber et al. [7].

sultate verschiedener Studien schlecht miteinander verglichen werden, da die Ansätze zu unterschiedlich sind. Bisherige Studien zu Plastikemissionen in die Umwelt haben mit einfachen Methoden berechnet, dass es zu Umweltemissionen im Bereich von einigen Prozenten kommt. Solche groben Zahlen sind gute erste Abschätzungen, müssen jetzt aber durch genauere und spezifischere Zahlen ersetzt werden. Die Resultate zeigen klar, dass ein einziger generischer Emissionsfaktor für alle Plastikartikel nicht sinnvoll ist, da der Lebenszyklus einzelner Anwendungen sehr unterschiedlich ist. Darüber hinaus sind grosse Unterschiede zwischen den Weltregionen zu erwarten, die jeweils von den dortigen Abfallentsorgungssystemen abhängen. Aus diesem Grund können globale Emissionsfaktoren nicht repräsentativ für einzelne Länder sein. Dies ist besonders wichtig für die Schweiz, die ein gut funktionierendes Abfallmanagement hat.

Unsere Studie beschränkt sich auf die Quantifizierung der Emissionen und kann deshalb keine Aussagen zu den tatsächlichen Umweltkonzentrationen machen. Hierfür müsste auch der Trans-

port zwischen den Kompartimenten und der Zerfall von Makro- zu Mikroplastik untersucht werden. Dies wird in einem Folgeprojekt modelliert werden. Gleichwohl zeigt ein Vergleich der gemessenen Umweltkonzentrationen von Mikroplastik in Flüssen und Seen mit ökotoxikologischen Studien, dass gemäss dem derzeitigen Wissensstand kein Risiko für Umweltorganismen besteht [10]. Auch zeigen unsere Resultate, wie wichtig es ist, vom Begriff «Plastik» wegzukommen und sich auf die verschiedenen Polymere zu konzentrieren. Einige der früheren Abschätzungen zählen nämlich den Mikrogummi zum Mikroplastik hinzu, z. B. die Studie des Fraunhofer Institutes aus Deutschland [11]. In einem anderen Projekt haben wir den Eintrag von Mikrogummi in die Schweizer Umwelt berechnet [7] und können daher einen direkten Vergleich zwischen Mikroplastik und Mikrogummi für die Schweiz machen. *Figur 9* vergleicht die Mengen von Makro- und Mikroplastik (die Summe der sieben in dieser Arbeit berücksichtigten Polymere) mit denjenigen von Mikrogummi. Die Mikrogummi-Emission ist dabei grösser als die gesamten Makroplastikemissionen zusammen. Wenn nur Mikroplastik direkt mit Mikrogummi verglichen wird, dann ist das Verhältnis 7% Mikroplastik zu 93% Mikrogummi. Wenn daher beide Stoffe zusammen als «Mikroplastik» bezeichnet werden, ist der Anteil der sieben betrachteten Polymere sehr klein. Basierend auf der erfolgten Analyse können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- 1) Die Mikroplastikflüsse auf den Boden sollten vermehrt Beachtung finden. Bis anhin gibt es mehr Daten zu Mikroplastik in Wasser als im Boden, vor allem auch, weil die Messungen im Wasser viel einfacher sind. Es braucht jetzt mehr Messungen im Boden und ein besseres Verständnis der Prozesse, wie Mikroplastik in den Boden gelangt.
- 2) Ein Grossteil der Emissionen von Makroplastik auf Böden und ins Wasser wird durch Einwegartikel verursacht. Eine Richtlinie wie diejenige der EU [12] könnte die Situation verbessern, da darin zum Beispiel Take-away-Verpackungen und Hygieneprodukte thematisiert werden.
- 3) Eine Reduktion des Litterings oder eine verbesserte Reinigung hätten den grössten Einfluss auf die Gesamtumweltbelastung. In diese Richtung finden bereits viele Aktionen statt, zum Beispiel über die Schulen, Kampagnen oder Putzaktionen. Auch wenn die Wirksamkeit dieser Aktionen debattiert wird, gibt es Anzeichen, dass sich die Situation in der Schweiz in den letzten Jahren etwas gebessert hat [13].
- 4) Eine Optimierung der Abfallsammlung und -behandlung in der Bau- und Landwirtschaft könnte einen grossen Einfluss auf die Emissionen haben. Es muss jedoch erwähnt werden, dass die Emissionsflüsse aus diesen Sektoren mit grossen Unsicherheiten behaftet sind, da die verwendeten Zahlen nicht Schweiz-spezifisch sind oder auf lokalen Daten beruhen. Auf diesem Gebiet braucht es eine bessere Datengrundlage, um die Abschätzungen zuverlässiger machen zu können.
- 5) Die möglichen Einträge über Recyclingprozesse (Schreddern usw.) wurden als eine potenziell sehr wichtige Quelle für Mikroplastikeinträge in Gewässer identifiziert. Die zu Grunde liegenden Daten sind jedoch sehr unsicher, weshalb es hier detaillierte weitere Untersuchungen braucht.
- 6) Es gibt eine Vielzahl von weiteren möglichen Massnahmen, mit denen kleinere Verbesserungen erzielt werden können. Ein Beispiel wäre die Reduktion des Auftretens von Regenwasserüberläufen bei Abwasserreinigungsanlagen. Massnahmen zur Verringerung der Freisetzung von Faserbruchstücken aus Textilien könnten eine der grössten Quellen von Mikroplastik in Gewässern reduzieren. Der Ersatz von

VERDANKUNG

Diese Studie wurde vom Bundesamt für Umwelt (BAFU) finanziert. Die Autoren danken dem BAFU für die fruchtbare Zusammenarbeit und *Anke Hofacker, Amanda Finger* und *Andreas Buser* für wertvolle Kommentare zum Artikel.

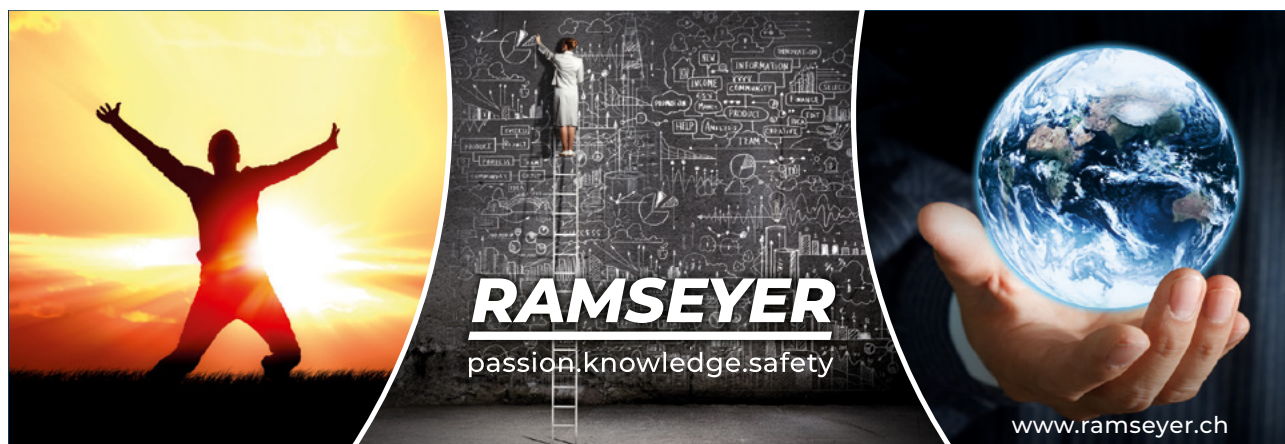
Mikroplastik in Kosmetikprodukten würde einen gewissen kleinen Einfluss auf die Mikroplastikmenge in Gewässern haben. Für diese spezifische Produktkategorie hat die Diskussion in der Öffentlichkeit und in der Politik bereits dazu geführt, dass die Firmen die Menge an Mikroplastik in diesen Produkten reduziert haben.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Faure, F. et al. (2015): Plastic pollution in Swiss surface waters: nature and concentrations, interaction with pollutants. *Environmental Chemistry*, 12, (5), 582-591
- [2] Scheurer, M.; Bigalke, M. (2018): Microplastics in Swiss Floodplain Soils. *Environmental Science & Technology*, 52, (6), 3591-3598
- [3] Blarer, P.; Kull, G. (2018): Swiss Litter Report. Stop Plastic Pollution Switzerland, WWF Schweiz, Hammerdirt. www.stoppp.org/swiss-litter-report
- [4] Kawecki, D.; Scheeder, P. R. W.; Nowack, B. (2018): Probabilistic Material Flow Analysis of Seven Commodity Plastics in Europe. *Environmental Science & Technology*, 52, (17), 9874-9888
- [5] Kawecki, D.; Nowack, B. (2019): Polymer-Specific Modeling of the Environmental Emissions of Seven Commodity Plastics As Macro- and Microplastics. *Environmental Science & Technology*, 53, 9664-9676
- [6] Kawecki, D.; Nowack, B. (2020): A proxy-based approach to predict spatially resolved emissions of macro- and microplastic to the environment. *Environ. Sci. Technol.*, submitted
- [7] Sieber, R.; Kawecki, D.; Nowack, B. (2020): Dynamic Probabilistic Material Flow Analysis of Rubber Release from Tires into the Environment. *Environmental Pollution*, 113573
- [8] Brunner, P. H.; Rechberger, H. (2004): *Practical Handbook of Material Flow Analysis*. CRC Press, Boca Raton
- [9] Gottschalk, F.; Scholz, R. W.; Nowack, B. (2010): Probabilistic material flow modeling for assessing the environmental exposure to compounds: Methodology and an application to engineered nano-TiO₂ particles. *Environ. Modeling Software*, 25, 320-332
- [10] Adam, V.; Yang, T.; Nowack, B. (2019): Towards an ecotoxicological risk assessment of microplastics: comparison of available hazard and exposure data in freshwaters. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 38, 436-447
- [11] Bertling, J.; Bertling, R.; Hamann, L. (2018): *Kunststoffe in der Umwelt: Mikro- und Makroplastik. Ursachen, Mengen, Umweltschicksale, Wirkungen, Lösungsansätze, Empfehlungen. Kurzfassung der Konsortialstudie.*; Oberhausen; <https://www.umsicht.fraunhofer.de/content/dam/umsicht/de/dokumente/publikationen/2018/kunststoffe-id-umwelt-konsortialstudie-mikroplastik.pdf>
- [12] Europäisches Parlament (2019): Amtsblatt der Europäischen Union. RICHTLINIE (EU) 2019/904 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 5. Juni 2019 über die Verringerung der Auswirkungen bestimmter Kunststoffprodukte auf die Umwelt. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019L0904&from=EN>
- [13] IGSU (2017): Recul Du Littering Dans Toutes Les Régions Du Pays; 2017; https://www.igsu.ch/files/fr_2017-12-05_mm_littering-index.pdf

> SUITE DU RÉSUMÉ

avec celles du micro-caoutchouc causées par l'usure des pneus montre que seulement 7% des microparticules de polymères rejetées dans l'environnement se composent de plastique, alors que 93% proviennent de l'usure des pneus. Les données sur les émissions peuvent servir de support aux prises de décision, mais peuvent également être utilisées pour modéliser les concentrations dans l'environnement ou pour évaluer les risques environnementaux.



RAMSEYER
passion.knowledge.safety

www.ramseyer.ch