

Plastik in der Schweizer Umwelt

Wissensstand zu Umweltwirkungen von Kunststoffen (Mikro- und Makroplastik)
Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU), 2020



Auftraggeber

Bundesamt für Umwelt (BAFU)
Abteilung Abfall und Rohstoffe
CH-3003 Bern

Das BAFU ist ein Amt des Eidg.
Departements für Umwelt, Verkehr,
Energie und Kommunikation
(UVEK).

Begleitung BAFU

Amanda Finger

Auftragnehmer

EBP Schweiz AG
Zollikerstrasse 65
8702 Zollikon
Schweiz
Telefon +41 44 395 11 11
info@ebp.ch
www.ebp.ch

**Autorinnen und
Autor**

Isolde Erny
Dr. Isabel O'Connor
Dr. Andy Spörri

Hinweis: Dieser Bericht wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

Druck: 15. April 2020
2020-04-15_Plastik in der Schweizer
Umwelt_DE.docx

Zusammenfassung

Plastik findet sich überall in der Umwelt in der Schweiz: in Böden, Gewässern, deren Sedimenten und der Luft sowie in Lebewesen. Diese Tatsache und ihre möglichen Auswirkungen auf Menschen und Tiere sowie mögliche Massnahmen werden in der Politik und in den Medien intensiv diskutiert. Der Bericht soll als erste Grundlage zu weiteren Diskussionen und Arbeiten zum Thema dienen.

Der vorliegende Bericht befasst sich mit Mikro- und Makroplastik in der Schweizer Umwelt. Er gibt als Metastudie einen systematischen Überblick über den aktuellen Wissensstand auf der Basis bereits erstellter Studien – gleichzeitig wird das vorhandene Wissen in verständlicher Form dargelegt und soweit heute möglich, eingeordnet. Im Sinne der Kürze und der Übersichtlichkeit fokussiert der Bericht auf wichtige Schlüsselstudien und verzichtet auf eine vollständige Übersicht aller vorhandener Studien. Es ist dabei aufgrund des medialen und politischen Interesses am Thema zu erwarten, dass laufend neue wissenschaftliche Grundlagen zum Thema veröffentlicht werden.

Herstellung, Nutzung und Entsorgung von Kunststoffen

Kunststoffe weisen je nach Polymertyp und enthaltenen Additiven sehr unterschiedliche Eigenschaften auf. Kunststoffe sind aufgrund verschiedenster technischer Eigenschaften als Werkstoffe nicht mehr wegzudenken. Entsprechend werden sie in allen Branchen und Lebensbereichen in grossen Mengen eingesetzt. In der Schweiz kommen jährlich rund 1 Million Tonnen Kunststoffe zum Einsatz. Ein Teil davon wird im gleichen Jahr entsorgt, der Rest wird länger verwendet. Insgesamt werden jedes Jahr rund 780'000 t Kunststoffe entsorgt – darunter sowohl kurzlebige als auch solche, die länger im Einsatz waren.

Eintrag von Kunststoffen in die Umwelt

Es gibt zahlreiche **Quellen** für die Emissionen von Kunststoffen in die Umwelt. Wenn die Kunststoffe als kleine Partikel mit maximal 5 mm Durchmesser in die Umwelt gelangen, spricht man von Mikroplastik. Von Makroplastik spricht man, wenn die Kunststoffstücke ≥ 5 mm sind, hierzu gehören aber auch ganze Produkte wie gelitterte PET-Flaschen, Plastiksäcke und dergleichen.

Heute bestehen grosse Unsicherheiten bezüglich der effektiv in die Umwelt eingetragenen Mengen von Makro- oder Mikroplastik. Die heutigen Mengenangaben basieren einerseits auf hochgerechneten Punktmessungen und andererseits auf Modellabschätzungen.

Makroplastik gelangt durch Littering – das achtlose Wegwerfen von Abfall – und sonstige nicht korrekt entsorgte Kunststoffe, wie beispielsweise Falschentsorgung in der Grüngutsammlung, in die Umwelt. Dort zerfällt es über die Zeit zu Mikroplastik.

Beim Mikroplastik dominieren die Emissionen aus der Nutzung von Kunststoffprodukten gegenüber beabsichtigt produziertem Mikroplastik. Die

grösste Quelle ist Reifenabrieb, gefolgt von einer Vielzahl weiterer Quellen aus Haushalten, Siedlungen, Strassen, Landwirtschaft, Bauwesen sowie Industrie und Gewerbe.

Kunststoffe gelangen durch diffuse und punktuelle **Eintragspfade** in die Böden, Oberflächengewässer und die Luft. Wichtige Eintragspfade sind der indirekte Abtransport mit Abwässern, Abschwemmungen und Aufwirbelung in der Luft sowie direkte Einträge in Oberflächengewässer, Böden und die Luft. Durch die Abfall- und Siedlungswasserwirtschaft wird ein Teil der Kunststoff-Emissionen auf dem Weg in die Umwelt zurückgehalten. Diese Rückhalte- und Filtermechanismen sind insbesondere bedeutend für Kunststoffe im Abwasser sowie für gelitterte Abfälle, die durch Reinigungsmassnahmen wieder eingesammelt werden.

Es ist nach wie vor schwierig, die Einträge in die verschiedenen Umweltkompartimente und die Effizienz der Rückhaltmassnahmen zu quantifizieren. Neueste Abschätzungen zeigen aber, dass die Einträge auf und in die Böden viel höher als die Einträge in die Oberflächengewässer sind. Den Böden sollte somit mehr Aufmerksamkeit geschenkt werden.

Verbleib und Verhalten von Kunststoffen in der Umwelt

Kunststoffe und insbesondere Mikroplastik finden sich in der Schweiz in Böden und Oberflächengewässern, in der Luft und in Lebewesen. Die Messung der Konzentration von Mikroplastik in der Umwelt ist jedoch sehr schwierig, insbesondere in Böden und Sedimenten, und es existiert noch keine standardisierte Analytik. Deshalb gibt es hier noch Datenlücken. Im Grundwasser wurde bisher kein Mikroplastik nachgewiesen.

Generell sind in der Wasserphase von Oberflächengewässern Partikel mit geringer Dichte zu finden, während Partikel grösserer Dichte in Fluss- und Seesedimente absinken. Plastikpartikel in Böden sind weitgehend immobil, können aber durch Organismen wie Regenwürmer in tiefere Bodenschichten gelangen.

Plastik wird in der Umwelt nur sehr langsam abgebaut und verbleibt dort entsprechend über lange Zeiträume. Durch Sonnenlicht und mechanische Beanspruchung wie Transport zerkleinern sich die Plastikstücke zwar, aber der vollständige Abbau verläuft sehr langsam – mitunter über mehrere hundert Jahre.

Auswirkungen von Kunststoffen in der Umwelt

Mikro- und Makroplastik kann möglicherweise Auswirkungen auf die Gesundheit von Menschen und Tieren haben, es besteht diesbezüglich jedoch noch grosser Forschungsbedarf. Belegt sind Verletzungen des Verdauungstraktes von Tieren durch Makroplastik sowie das Verheddern von Tieren in Fischernetzen und Plastiksäcken in den Weltmeeren. Die Effekte von Mikroplastik auf Menschen und Tiere unter gängigen Umweltkonzentrationen sind aber noch kaum verstanden, da sie von noch zu untersuchenden Faktoren wie den chemischen und physikalischen Eigenschaften der Kunststoffpartikel abhängen.

Die wenigen bisher durchgeführten Studien für **aquatische Systeme** lassen keine belastbaren Aussagen zum Risiko für Menschen und Tiere zu. Einerseits werden die gemessenen Konzentrationen durch den Fokus auf grössere Partikel meist unterschätzt. Andererseits sind die Auswirkungen der Partikel mit unterschiedlicher Grösse und Beschaffenheit nur wenig erforscht.

Für **Böden** fehlen Daten noch weitgehend, allerdings wurden in Studien negative Effekte bei Bodenorganismen wie Regenwürmern oder Springschwänzen unter Laborbedingungen beobachtet.

In der **Luft** ist Mikroplastik ein kleiner Teil des Feinstaubs (PM₁₀ resp. PM_{2.5}). Die Immissionsgrenzwerte für Feinstaub werden durch die Luftreinhalte-Verordnung geregelt und im Rahmen des Vollzugs gemessen. Bei der Einhaltung der Immissionsgrenzwerte sind Mensch und Umwelt im Allgemeinen vor schädlichen Auswirkungen geschützt.

Fazit

Plastik gehört nicht in die Umwelt, deshalb ist sein Eintrag zu vermeiden bzw. zu minimieren. Da bei unverändert hohem Eintrag und der Tatsache, dass sich Kunststoffe nur über sehr lange Zeiträume abbauen, die Umweltkonzentrationen ansteigen, wird das Risiko für Menschen und Tiere mit der Zeit zunehmen.

Daher ist es einerseits wichtig, die Datenlage dahingehend zu verbessern, dass aussagekräftige Risikoanalysen für die Umweltwirkungen von Kunststoffen möglich werden. Dies betrifft Quellen, Eintragspfade und Transportprozesse von Kunststoffen, aber auch deren Auswirkungen unter Umweltbedingungen in belasteten oder vulnerablen Ökosystemen der Schweiz.

Andererseits ist im Sinne des Vorsorgeprinzips bei mangelnder Datenlage zu prüfen, wie Kunststoffeinträge in die Umwelt reduziert werden können, um negativen Auswirkungen vorzubeugen. Lösungsansätze dafür finden sich je nach Quelle auf der einen Seite bei der Freisetzung während der Herstellung, Nutzung und Entsorgung von Kunststoffen. Auf der anderen Seite könnte die Ausgestaltung heutiger, resp. weiterer möglicher Rückhalte-mechanismen für relevante Eintragspfade in die Umwelt verbessert werden.

Résumé – Le plastique dans l'environnement Suisse

En Suisse, le plastique est présent partout dans l'environnement: dans les sols, les eaux et leurs sédiments, l'air ainsi que dans les organismes vivants. Cette contamination et ses effets possibles sur l'homme et l'animal ainsi que les mesures possibles sont discutés intensivement en politique et dans les médias. Ce rapport doit servir de base pour la poursuite des discussions et des travaux sur le sujet.

Ce rapport traite des micro- et macroplastiques dans l'environnement en Suisse. En tant que méta-étude, il donne un aperçu systématique de l'état actuel des connaissances sur la base d'études déjà réalisées. Dans le même temps, les connaissances existantes sont présentées de manière intelligible et dans la mesure du possible classées. Par souci de concision et de clarté, le rapport se concentre sur les études clés importantes et ne donne pas d'aperçu complet de toutes les études existantes. En raison de l'intérêt médiatique et politique pour le sujet, il faut s'attendre à ce que de nouvelles bases scientifiques sur le sujet soient continuellement publiées.

Production, utilisation et élimination des matières plastiques

Les plastiques ont des propriétés très différentes selon le type de polymère et les additifs qu'ils contiennent. Les matières plastiques sont devenues indispensables en tant que matériaux en raison de leurs propriétés techniques diverses. Elles sont donc utilisées en grande quantité dans toutes les industries et tous les domaines de la vie quotidienne. Environ 1 million de tonnes de matières plastiques sont utilisées chaque année en Suisse. Une partie est éliminée dans la même année, le reste est utilisé plus longtemps. Au total, environ 780'000 t de plastiques sont éliminées chaque année – plastiques ayant une courte durée de vie et ceux utilisés plus longtemps.

Introduction de matières plastiques dans l'environnement

Il existe de nombreuses **sources** d'émissions de plastiques dans l'environnement. Si les plastiques sont libérés dans l'environnement sous forme de petites particules d'un diamètre maximal de 5 mm, on les appelle des microplastiques. On parle de macroplastiques lorsque les particules de plastique ont un diamètre ≥ 5 mm. Ces derniers comprennent également des produits entiers tels que des bouteilles en PET abandonnées, des sacs en plastique, etc.

Aujourd'hui, il existe de grandes incertitudes quant à la quantité de macro- ou microplastiques réellement introduits dans l'environnement. Les données quantitatives actuelles sont basées sur des mesures ponctuelles extrapolées d'une part et sur des estimations modélisées d'autre part.

Les macroplastiques pénètrent dans l'environnement par le biais du littering – des déchets négligemment jetés sur la voie publique – et de l'élimination inappropriée des plastiques, comme par exemple avec les résidus biodégradables. Là, les macroplastiques se désintègrent au fil du temps en microplastiques.

Dans le cas des microplastiques, les émissions provenant de l'utilisation de produits en plastique dominent par rapport aux microplastiques produits de manière intentionnelle. La principale source est l'abrasion des pneus, suivie d'un grand nombre d'autres sources provenant des ménages, des milieux bâtis, des routes, de l'agriculture, de la construction, de l'industrie et de l'artisanat.

Les plastiques parviennent dans le sol, les eaux de surface et l'air par des **voies d'apport** diffuses et ponctuelles. Les voies d'apport importantes sont les entrées indirectes avec les eaux usées, le ruissellement et la suspension de particules dans l'air, ainsi que les entrées directes dans les eaux de surface, les sols et l'air. Grâce à la gestion des déchets et des eaux usées, une partie des émissions de plastiques peut être retenue avant d'atteindre l'environnement. Ces mécanismes de rétention et de filtrage sont particulièrement importants pour les matières plastiques présentes dans les eaux usées et pour les déchets abandonnés collectés lors du nettoyage de l'espace public.

Il est encore difficile de quantifier les apports dans les différents compartiments environnementaux et l'efficacité des mesures de rétention. Des estimations récentes montrent toutefois que les apports sur et dans les sols sont beaucoup plus élevés que les apports dans les eaux de surface. Il convient donc d'accorder une plus grande attention aux sols.

Devenir et comportement des plastiques dans l'environnement

Les matières plastiques et surtout les microplastiques se retrouvent en Suisse dans les sols et les eaux de surface, dans l'air et dans les organismes vivants. Cependant, il est très difficile de mesurer la concentration des microplastiques dans l'environnement, en particulier dans les sols et les sédiments, et il n'existe pas encore d'analyse standardisée. Il y a donc encore des lacunes relatives aux données. Jusqu'à présent, les particules de microplastique n'ont pas été détectées dans les eaux souterraines.

En général, les particules de faible densité se trouvent dans la phase aqueuse des eaux de surface, tandis que les particules de densité plus élevée coulent et se déposent dans les sédiments des rivières et des lacs. Les particules de plastique dans les sols sont en grande partie immobiles, mais peuvent être transportées dans les couches plus profondes du sol par des organismes tels que les vers de terre.

Le plastique ne se décompose que très lentement dans l'environnement et y reste longtemps. La lumière du soleil et les contraintes mécaniques telles que le transport provoquent la fragmentation des morceaux de plastique, mais la dégradation complète est très lente et peut parfois prendre plusieurs centaines d'années.

Effets des plastiques sur l'environnement

Les micro- et macroplastiques peuvent potentiellement avoir un impact sur la santé humaine et animale. Toutefois, il existe encore un grand besoin de recherche dans ce domaine. Des blessures du tube digestif d'animaux causées par des macroplastiques et l'enchevêtrement des animaux dans des filets de pêche et des sacs de plastique dans les océans ont été observés.

Cependant, les effets des microplastiques sur les personnes et les animaux dans des concentrations environnementales telles qu'observées actuellement sont encore mal compris. En effet, ces effets dépendent de facteurs qui restent encore à étudier, comme par exemple les propriétés chimiques et physiques des particules de plastique.

Les recherches encore limitées concernant les **systèmes aquatiques** ne permettent pas de faire des déclarations fiables sur le risque pour l'homme et les animaux. D'une part, les concentrations mesurées sont généralement sous-estimées car on se concentre sur les particules de plus grande dimension. D'autre part, les effets des particules de dimensions et de composition différentes sont peu étudiés.

Les données sur les **sols** sont encore largement défaut, mais des études ont permis d'observer des effets négatifs chez des organismes du sol tels que les vers de terre ou les collemboles dans des conditions de laboratoire.

Dans l'**air**, les microplastiques constituent une petite partie de la poussière fine (PM₁₀ resp. PM_{2,5}). Les valeurs limites d'immission des particules sont régies par l'Ordonnance sur la protection de l'air et sont mesurées dans le cadre de son exécution. En général, l'homme et l'environnement sont protégés des effets nocifs si les limites d'immission sont respectées.

Conclusion

Les plastiques n'ont pas leur place dans l'environnement. Il faut donc éviter respectivement réduire leur apport. Étant donné la longue vie des plastiques dans l'environnement, leurs concentrations dans l'environnement ne cesseront d'augmenter si les apports restent inchangés, amplifiant par la même occasion les risques pour les personnes et les animaux.

Il est donc important, d'une part, d'intensifier la récolte des données nécessaires à une analyse de risques pertinentes des impacts environnementaux des plastiques. Cela concerne les sources, les voies d'apport et les processus de transport des matières plastiques, mais aussi leurs effets dans les conditions environnementales prévalant dans des écosystèmes pollués ou vulnérables en Suisse.

D'autre part, conformément au principe de précaution et en l'absence de données appropriées, il est nécessaire d'examiner comment réduire les rejets de matières plastiques dans l'environnement afin de prévenir les effets négatifs. En fonction de la source, des solutions peuvent être trouvées aux niveaux de la production, de l'utilisation et de l'élimination des matières plastiques. La conception des mécanismes de rétention actuels est également à améliorer et d'autres mécanismes sont à développer pour les voies d'apport importantes dans l'environnement.

Riassunto – La plastica nell'ambiente svizzero

In Svizzera la plastica si trova ovunque nell'ambiente: nel suolo, nelle acque e nei loro sedimenti, nell'aria e negli organismi viventi. Questa contaminazione e i suoi possibili effetti sull'uomo e sugli animali, così come le possibili misure atte a contrastarli, vengono discussi intensamente sia in ambito politico sia nei media. Questo rapporto ha lo scopo di gettare le basi per ulteriori discussioni e lavori concernenti tale argomento.

Nel presente rapporto viene trattato il tema delle micro e macroplastiche nell'ambiente svizzero. In qualità di meta-studio, esso fornisce una panoramica sistematica dello stato attuale delle conoscenze tratte da studi già compiuti, le quali vengono presentate in maniera comprensibile e classificate per quanto attualmente possibile. Per motivi di brevità e chiarezza, il rapporto si concentra su importanti studi chiave e non fornisce una panoramica completa di tutti gli studi esistenti. Considerando l'interesse dimostrato da parte dei media e della politica per il tema, è presumibile che verranno pubblicati di continuo nuovi fondamenti scientifici sull'argomento.

Produzione, uso e smaltimento delle materie plastiche

Le materie plastiche hanno proprietà molto diverse a seconda del tipo di polimero e degli additivi che contengono. A causa delle loro diverse proprietà tecniche, le materie plastiche sono indispensabili come materiali. Per cui vengono utilizzati in grandi quantità in tutti i settori e gli ambiti della vita. In Svizzera ogni anno si impiegano circa 1 milione di tonnellate di materie plastiche. Una parte di esse viene smaltita nello stesso anno, mentre il resto viene utilizzato per periodi più lunghi. Ogni anno vengono smaltite complessivamente circa 780'000 t di plastica, sia che il suo utilizzo sia stato breve o prolungato.

Immissione di materie plastiche nell'ambiente

Esistono numerose **fonti** di emissione di materie plastiche nell'ambiente. Le materie plastiche che entrano nell'ambiente sotto forma di piccole particelle del diametro di 5 mm al massimo vengono definite microplastiche. Mentre si definiscono macroplastiche le particelle che hanno un diametro ≥ 5 mm, il che include anche prodotti interi come bottiglie di PET disperse nell'ambiente, sacchetti di plastica e simili.

Oggi c'è grande incertezza sulla quantità di macro e microplastiche che viene effettivamente introdotta nell'ambiente. Le cifre odierne si basano, da un lato, su dati puntuali estrapolati e, dall'altro, su stime di modelli.

Le macroplastiche finiscono nell'ambiente attraverso il *littering*, ossia il gettare i rifiuti nell'ambiente in maniera noncurante, e a causa dello smaltimento non adeguato di altre plastiche, ad esempio perché introdotte nella raccolta dei rifiuti vegetali. Una volta giunte nell'ambiente, le plastiche con il tempo si decompongono fino a diventare microplastiche.

Nel caso delle microplastiche, le emissioni derivanti dall'uso di prodotti di plastica sono nettamente superiori a quelle delle microplastiche prodotte intenzionalmente. La fonte principale è l'abrasione degli pneumatici, seguita

da un gran numero di altre fonti, tra cui le economie domestiche, i complessi residenziali, le strade, l'agricoltura, l'edilizia, l'industria e il commercio.

Le plastiche finiscono nel suolo, nelle acque superficiali e nell'aria attraverso **vie d'ingresso** diffuse e situate in punti specifici. Importanti vie d'ingresso sono il trasporto indiretto attraverso le acque reflue, i deflussi superficiali e la sospensione di particelle nell'aria, così come gli apporti diretti nelle acque superficiali, nel suolo e nell'aria. Attraverso la gestione dei rifiuti e delle acque municipali, alcune delle emissioni di plastica vengono trattenute nel loro percorso verso l'ambiente. Questi meccanismi di ritenzione e di filtraggio sono particolarmente importanti per le plastiche nelle acque di scarico e per i rifiuti abbandonati che vengono raccolti durante la pulizia degli spazi pubblici.

È ancora difficile quantificare gli apporti nei vari comparti ambientali e l'efficacia delle misure di ritenzione. Tuttavia, stime recenti mostrano che gli apporti da e verso il suolo sono molto più elevati rispetto agli apporti verso le acque superficiali. Occorre quindi prestare maggiore attenzione al suolo.

Permanenza e comportamento delle materie plastiche nell'ambiente

Le materie plastiche, e in particolare le microplastiche, in Svizzera sono presenti nel suolo e nelle acque superficiali, nell'aria e negli organismi viventi. Tuttavia, è difficile quantificare la concentrazione di microplastiche nell'ambiente, specialmente nel suolo e nei sedimenti, inoltre non esiste ancora un'analisi standardizzata. Pertanto, i dati sono ancora lacunosi. Finora non sono state rilevate microplastiche nelle acque sotterranee.

In generale, le particelle a bassa densità si trovano nella fase acquosa delle acque superficiali, mentre le particelle a maggiore densità affondano nei sedimenti di fiumi e laghi. Le particelle di plastica nel suolo sono in gran parte immobili, ma possono essere trasportate negli strati più profondi da altri organismi, come ad esempio dai lombrichi.

La plastica si degrada molto lentamente nell'ambiente e vi rimane per lunghi periodi di tempo. La luce del sole e le sollecitazioni meccaniche, come il trasporto, provocano la rottura dei pezzi di plastica. Tuttavia, la decomposizione completa è molto lenta e a volte dura diverse centinaia di anni.

Effetti delle materie plastiche nell'ambiente

Le micro e macroplastiche possono potenzialmente avere un impatto sulla salute degli esseri umani e degli animali, tuttavia è necessario condurre ulteriori ricerche in questo campo. Sono state riscontrate lesioni del tratto digestivo negli animali, così come intrappolamenti di animali nelle reti da pesca e nei sacchetti di plastica negli oceani. Tuttavia, gli effetti delle microplastiche sull'uomo e sugli animali alle attuali concentrazioni ambientali sono ancora poco conosciuti, in quanto dipendono da fattori ancora da studiare, come le proprietà chimiche e fisiche delle particelle di plastica.

Le esigue ricerche effettuate finora sui **sistemi acquatici** non consentono di formulare affermazioni affidabili sul rischio per l'uomo e gli animali. Da un lato, le concentrazioni misurate vengono sottovalutate, poiché ci si concen-

tra maggiormente sulle particelle più grandi. Dall'altro lato, gli effetti di particelle di dimensioni e caratteristiche diverse sono stati finora poco studiati e sono in gran parte sconosciuti.

Per quanto riguarda il **suolo**, i dati sono ancora molto carenti, anche se in alcuni studi sono stati osservati effetti negativi su organismi che vivono nel suolo, quali lombrichi o collemboli, in condizioni di laboratorio.

Nell'**aria** le microplastiche costituiscono una piccola parte delle polveri fini (PM_{10} o $PM_{2.5}$). I valori limite di immissione per le polveri fini sono regolati dall'ordinanza contro l'inquinamento atmosferico e vengono misurati nell'ambito della sua attuazione. In generale, l'uomo e l'ambiente sono protetti dagli effetti nocivi se vengono rispettati i limiti di immissione.

Conclusione

Le plastiche non sono parte integrante dell'ambiente, pertanto il loro ingresso deve essere evitato o ridotto al minimo. Poiché le materie plastiche si degradano in periodi di tempo molto lunghi, le concentrazioni ambientali continueranno ad aumentare se l'input rimarrà elevato. Il rischio per l'uomo e gli animali di conseguenza aumenterà nel tempo.

È quindi importante, da un lato, migliorare la situazione dei dati in modo tale da rendere possibile un'analisi significativa dei rischi riguardanti l'impatto ambientale delle materie plastiche. Ciò riguarda le fonti, le vie d'ingresso e i processi di trasporto delle materie plastiche, ma anche i loro effetti sotto le condizioni ambientali che vigono negli ecosistemi inquinati o vulnerabili in Svizzera.

D'altra parte, secondo il principio di precauzione, in caso di mancanza di dati appropriati, è necessario trovare una soluzione per ridurre l'immissione di materie plastiche nell'ambiente per evitare impatti negativi. A seconda della fonte, gli approcci per risolvere questo problema possono riguardare da un lato la riduzione delle emissioni durante la produzione, l'uso e lo smaltimento di materie plastiche, e dall'altro lo sviluppo di attuali e futuri meccanismi di ritenzione più efficaci per le principali vie d'ingresso nell'ambiente.

Summary – Plastics in the Swiss environment

Plastics can be found everywhere in the environment in Switzerland: in the soil, water, sediments, air, as well as in living organisms. Their prevalence and the potential impacts for humans and animals, as well as possible measures to reduce the negative effects are being intensively discussed within politics and in the media. This report intends to serve as a basis for further discussions and work on the topic.

The report deals with micro- and macroplastics in the Swiss environment. As a meta-study, it provides a systematic overview of the current state of knowledge based on studies that have already been carried out. Existing knowledge is presented in a comprehensive form and classified to the extent possible. For the sake of concision and clarity, the report focuses on important key studies and does not provide a complete overview of all existing studies. Due to the interest in the topic on the part of the media and policy-makers, it is expected that new scientific findings on the topic will be published on a regular basis.

Production, use and disposal of plastics

Plastics have very different properties depending on the type of polymer and the additives they contain. Due to their different technical properties, plastics have become indispensable materials. They are used in large quantities across all industries and within all aspects of daily life. In Switzerland, around 1 million tonnes of plastics are used annually. Some of these are disposed of in the same year, the rest are used for a longer period. A total of around 780'000 t of plastics are disposed of each year – including both short-lived plastics and those that have been in use for prolonged periods.

Input of plastics into the environment

There are numerous **sources** of plastic emissions into the environment. Plastics with a maximum diameter of 5 mm are called microplastics. Macroplastics are defined as plastic pieces ≥ 5 mm in diameter and they also include whole products such as crushed PET bottles, plastic bags, or similar.

Considerable uncertainty remains about the quantities of macro- or microplastics that are effectively introduced into the environment. Current quantities are based on extrapolated point measurements and on model estimates.

Macroplastics enter the environment through littering – the careless disposal of waste – and other improperly disposal methods, such as mixing plastic into green waste collection. In the environment, they decompose over time into microplastics.

In the case of microplastics, emissions associated with the use of plastic products are typically the prime source. The largest source is tire abrasion, followed by numerous other sources from households, settlements, roads, agriculture, construction, industry and commerce.

Plastics are released into the soil, surface water and air through diffuse and point sources. Important **input pathways** are the indirect transport via

wastewater, runoff and turbulence in the air, as well as direct inputs into surface water, soil and air. Through waste and municipal water management, some of the emissions of plastics are captured before being released into the environment. These retention and filtering mechanisms are particularly important for plastics in wastewater and for littered waste, which is collected again during public space cleaning.

It is still difficult to quantify the introduction of plastics into the various environmental compartments and the efficiency of the retention measures. However, recent estimates show that inputs to and from soils are much higher than inputs to surface waters. More attention should, therefore, be paid to soils.

Fate and behaviour of plastics in the environment

Plastics, and microplastics in particular, are found in Switzerland in soil and surface waters, in the air and in living organisms. However, measuring the concentration of microplastics in the environment is very difficult, especially in soils and sediments, and there is no standardized approach for analysis yet. Consequently, there are still data gaps. So far, no microplastics have been detected in groundwater.

In general, low-density particles are found in the aqueous phase of surface water, while particles of higher density sink into river and lake sediments. Plastic particles in soils are largely immobile but can penetrate deeper soil layers by means of organisms such as earthworms.

Plastic degrades very slowly in the environment and remains there for extended periods of time. Sunlight and mechanical stress such as transport cause the plastic pieces to break up, but the complete decomposition process is very slow – possibly taking as long as several hundred years.

Effects of plastics in the environment

Micro- and macroplastics can potentially have an impact on the health of humans and animals, but a great need for research in this area still exists. Evidence of macroplastic injuries to the digestive tract of animals, as well as the entanglement of animals in fishing nets and plastic bags in the oceans, is well-evidenced. However, the effects of microplastics on humans and animals under common environmental concentrations are still poorly understood, as they depend on factors still to be investigated such as the chemical and physical properties of the plastic particles.

The few studies carried out to date for **aquatic systems** do not allow reliable statements regarding the risk to humans and animals. On the one hand, the measured concentrations are frequently underestimated due to the focus on larger particles. In addition, the effects of particles of different sizes and characteristics are not well researched and are largely unknown.

For **soils**, data are still largely lacking, although studies have observed negative effects in soil organisms such as earthworms or springtails under laboratory conditions.

In the **air**, microplastics constitute a small part of the particulate matter (PM₁₀ resp. PM_{2.5}). The maximum permitted ambient air pollution levels for particulate matter are regulated by the Ordinance on Air Pollution Control and are measured during enforcement. In general, people and the environment are protected from harmful effects if the permitted ambient air pollution levels limits are observed.

Conclusion

Plastic does not belong in the environment, therefore, its introduction should be avoided or minimized. Since plastics only degrade over very long periods of time, the environmental concentrations will increase if the input remains high. This in turn means, that the risk for humans and animals will increase over time.

It is, therefore, important on the one hand to improve the data basis in order to allow for reliable risk analyses of the environmental impact of plastics. This concerns sources, input pathways and transport processes of plastics, but also their effects under environmental conditions in polluted or vulnerable ecosystems in Switzerland.

On the other hand, in accordance with the precautionary principle, in the absence of sufficient data, it is necessary to determine how plastic released into the environment can be reduced in order to prevent negative impacts. Depending on the source, approaches to solving this problem can be found by tackling releases during production, use and disposal of plastics. In addition, the design of retention mechanisms for relevant input paths into the environment could be improved.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	16
1.1	Ausgangslage	16
1.2	Zielsetzung und Untersuchungsrahmen	16
1.3	Begriffe und Definitionen	17
1.4	Übersicht über das Thema Kunststoffeinträge in die Umwelt	20
1.5	Übersicht der Datenlage	22
2.	Herstellung, Nutzung und Entsorgung von Kunststoffen (Drivers)	23
2.1	Herstellung	23
2.2	Nutzung	24
2.3	Entsorgung und Recycling	27
2.4	Fazit	29
3.	Eintrag von Kunststoffen in die Umwelt (Pressures)	31
3.1	Freisetzung von Kunststoffen und Eintrag in die Umwelt	31
3.2	Quellen	32
3.3	Eintragspfade	34
3.4	Quantifizierung der Einträge in die Umweltkompartimente	38
3.5	Fazit	40
4.	Verbleib und Verhalten von Kunststoffen in der Umwelt (State)	41
4.1	Plastik in Oberflächengewässern, Böden und der Luft	41
4.2	Transport	43
4.3	Abbau	44
4.4	Senken von Plastik	45
4.5	Fazit	46
5.	Auswirkungen von Kunststoffen in der Umwelt (Impacts)	47
5.1	Die Beurteilung von Effekten und Risiken	47
5.2	Auswirkungen auf den Menschen	48
5.3	Auswirkungen auf Organismen (Tiere)	50
5.4	Fazit	52
6.	Abkürzungsverzeichnis des Berichts	55
7.	Literaturverzeichnis	57

1. Einleitung

1.1 Ausgangslage

Die Umweltwirkungen von Kunststoffen sind seit mehreren Jahren ein intensiv diskutiertes Thema in der Politik, in den Medien und in der Öffentlichkeit. Entsprechend wurden in der Schweiz diverse parlamentarische Vorstösse eingereicht und die EU hat bereits eine Kunststoffstrategie mit teilweise sehr konkreten Massnahmen veröffentlicht.

Kunststoffe gelangen aus einer Vielzahl von Quellen und über verschiedene Eintragspfade in die Umwelt. Kunststoffe unterschiedlicher Grösse und Zusammensetzung finden sich überall in der Umwelt. Die Auswirkungen dieser Kunststoffpartikel auf die Ökosysteme und Organismen sind erst begrenzt untersucht. Auch sind die Transportprozesse innerhalb und zwischen Umweltkompartimenten und mögliche Senken (Anreicherungsorte), sowie der Abbau unter Umweltbedingungen noch nicht ausreichend bekannt.

Entsprechend schwierig ist es, sich eine Übersicht der Kunststoffbelastung in der Schweiz zu verschaffen und eine Einschätzung möglicher gefährdeter Lebensräume und Ökosysteme sowie Risiken auf den Menschen zu treffen.

1.2 Zielsetzung und Untersuchungsrahmen

Eine aktuelle Zusammenstellung im Sinne einer Metastudie zu den heute verfügbaren Wissensgrundlagen und -lücken zu Umweltwirkungen von Kunststoffen in der Schweiz soll das BAFU bei seinen Aufgaben unterstützen. Dies wird mithilfe des vorliegenden Berichts umgesetzt, welcher eine Übersicht über die Thematik gibt.

Im Zentrum stehen Mikro- und Makroplastikeinträge in die Umwelt und damit verbundene Umweltwirkungen in der Schweiz^a. Nicht Gegenstand des Berichts bzw. nur am Rande tangiert sind anderweitige Umweltauswirkungen (z.B. Ressourcen- und Energieverbräuche, Treibhausgasemissionen) durch die Ressourcenextraktion, die Herstellung von Kunststoffprodukten und die Entsorgung von Kunststoffabfällen. Ebenso werden keine Hinweise bezüglich bestehender Regulierungen und allfälligem Anpassungsbedarf gemacht.

Die Inhalte basieren auf bestehender Literatur. Der Fokus liegt auf der Schweiz. Wo nötig, werden internationale Studien herbeigezogen und kritisch begutachtet, inwiefern die Ergebnisse auf die Schweiz übertragbar sind. Dabei wurde darauf geachtet, alle wichtigen Studien einzubauen, um den Wissensstand gemäss Herbst 2019 sinnvoll zusammenzufassen. Aus Ressourcen- und Lesbarkeitsgründen wurde auf eine umfassende und abschliessende Beschreibung aller publizierten Studien verzichtet. Der Bericht wurde bewusst in einer allgemein verständlichen Sprache gehalten, um eine möglichst breite Leserschaft erreichen zu können. Rückmeldungen seitens Auftraggeber wurden dabei mit Sorgfalt berücksichtigt.

^a Flüssigpolymere sind somit nicht Gegenstand dieses Berichts.

1.3 Begriffe und Definitionen

Im untenstehenden Kasten wird eine Übersicht über die in diesem Bericht verwendeten Begrifflichkeiten und Definitionen gegeben.

Eine zentrale Rolle spielt die Definition von Mikroplastik in Bezug auf seine Entstehung. Da es sich um ein relativ neues Thema handelt, werden die Begriffe in der Literatur nicht immer einheitlich verwendet. Betreffend Partikelgrösse von Mikroplastik wird in diesem Bericht die kürzlich publizierte Definition gemäss der «European Chemicals Agency» (ECHA) verwendet, welche eine explizite Untergrenze für die Partikelgrösse vorschlägt¹. Für die Unterteilung der Mikroplastikpartikel in der Umwelt in Bezug auf ihre Entstehung wird auf die Definition der «Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection» (GESAMP)² und «Science Advice for Policy by European Academies» (SAPEA)³ zurückgegriffen, welche zwischen sogenannt primärem und sekundärem Mikroplastik unterscheidet.

Begrifflichkeiten und Definitionen

Kunststoff und Plastik

Kunststoff / Plastik	Ein Werkstoff, der sich aus Polymeren zusammensetzt. Meist werden die Rohstoffe aus Erdölprodukten gewonnen ⁴ . Gummi und Kunst kautschuk in Autoreifen sind auch Kunststoffe. Biobasierte Kunststoffe werden aus erneuerbaren Ressourcen produziert (vgl. unten). Der Begriff Plastik wird hier als Synonym zu Kunststoff verwendet.
----------------------	--

Bausteine von Kunststoffen

Monomer	Niedermolekulares, reaktionsfähiges Molekül, das sich zu Polymeren zusammenschliessen kann ⁴ .
Oligomer	Zusammenschluss weniger Monomere ⁴ .
Polymer	Zusammenschluss vieler Monomere ⁴ .
Additive	Zusatzstoffe, um die Eigenschaften des Kunststoffes zu beeinflussen (z.B. Farbstoffe, Weichmacher und Flammschutzmittel) ⁴ .

Kunststofftypen

Unterteilung in drei Gruppen aufgrund thermischer und mechanischer Eigenschaften:

Thermoplast	Kunststoffe wie z.B. Polyethylenterephthalat (PET) oder Polyethylen (PE). Sie bestehen aus unvernetzten Polymeren mit kristallinen und amorphen Regionen. Diese Regionen bestimmen u.a. die Abbaubarkeit des Kunststoffes oder wie stark Umweltschadstoffe am Kunststoff adsorbieren ^{5,6} . Thermoplaste können in einem bestimmten Temperaturbereich beliebig oft verformt werden ^{4,7} .
Duroplast	Kunststoffe wie z.B. Bremsbeläge oder Kabelbahnen. Sie bestehen aus engmaschig vernetzten Polymeren ⁴ . Sie sind starr und können

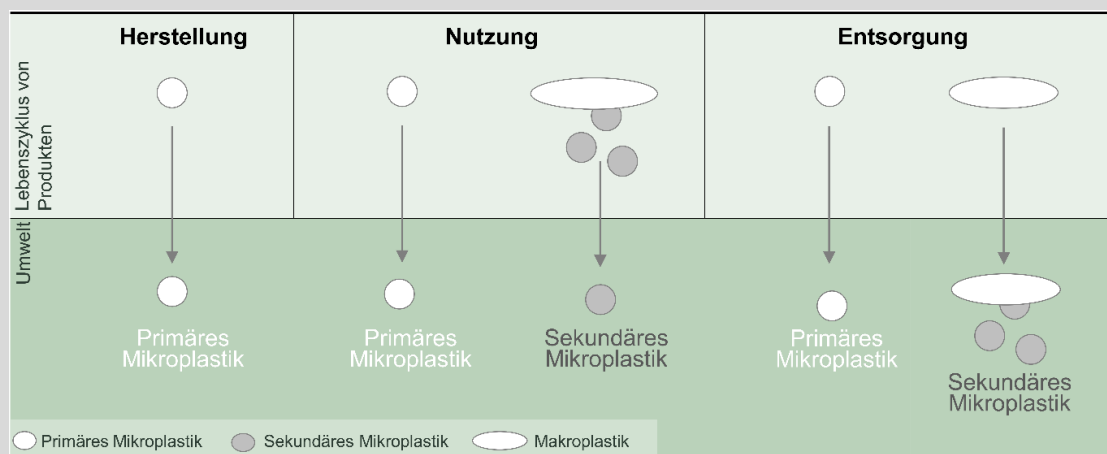
	nicht aufgeschmolzen werden, sondern zerfallen bei der Überschreitung ihrer Zersetzungstemperatur (Pyrolyse) ^{4,7} . Mechanische Einwirkungen resultieren in Rissen oder Sprüngen im Material.
Elastomer	Kunststoffe wie z.B. Autoreifen oder Elastikbänder. Sie bestehen aus weitmaschig vernetzten Polymeren. Elastomere dehnen sich und fallen in die ursprüngliche Form zurück, sobald die mechanische Beanspruchung nachlässt. ⁴

Mikroplastik

Von der ECHA wie folgt definiert: Polymere, welche Additive oder andere Substanzen enthalten können und entweder 1 nm bis 5 mm grosse Partikel oder maximal 15 mm lange Fasern sind¹. Es handelt sich um einen neuen Begriff und dieser wird in der Literatur nicht einheitlich gehandhabt. Oft wird Mikroplastik als Plastikpartikel kleiner als 5 mm definiert, ohne eine Mindestgrösse festzulegen^{5,8}.

In der Umwelt gefundenes Mikroplastik wird in Bezug auf die Entstehung wie folgt klassifiziert¹⁻³:

Primäres Mikroplastik	Primäres Mikroplastik wird eigens produziert. Die Freisetzung in die Umwelt ist entweder gewollt (z.B. Düngemittelträgerpartikel), bewusst in Kauf genommen (z.B. Reibkörper in Kosmetikartikeln) oder erfolgt ungewollt (z.B. Verluste während des Transports). Die Freisetzung in die Umwelt kann demnach sowohl in der Phase der Herstellung als auch während der Nutzung und Entsorgung erfolgen.
Sekundäres Mikroplastik	Sekundäres Mikroplastik entsteht durch die Verwitterung und Fragmentierung von Makro- zu Mikroplastik während der Nutzungs- und Entsorgungsphase. Makroplastik zerkleinert sich zu Mikroplastik beispielsweise beim Abrieb von Autoreifen, beim Waschen von synthetischen Textilien (v.a. Fleece-Textilien), bei der Verwitterung und Fragmentierung von untergepflügten Landwirtschaftsfolien oder gelitterten Plastik-Artikeln. Die Freisetzung ist nicht gewollt.



Die Unterteilung in diese zwei Mikroplastiktypen ist wichtig im Hinblick auf die Verantwortung und den Handlungsspielraum unterschiedlicher Akteure in Bezug auf die Reduktion des Eintrags in die Umwelt: Im Allgemeinen haben Hersteller einen grossen Einfluss auf primäre und die Verbraucher auf sekundäre Mikroplastikemissionen^b.

Makroplastik

Makroplastik	In diesem Bericht werden Plastikstücke, welche grösser als 5 mm sind, als Makroplastik bezeichnet. Makroplastik umfasst somit Plastikstücke ≥ 5 mm, aber auch ganze Produkte wie gelitterte PET-Flaschen, Plastiksäcke und dergleichen. Der Begriff dient als Abgrenzung zu Mikroplastik und wird in der Literatur nicht immer einheitlich verwendet.
--------------	--

Biobasierter Kunststoff, bioabbaubarer Kunststoff und oxo-abbaubarer Kunststoff

Biobasierter Kunststoff	Biobasierte Kunststoffe haben dieselben Eigenschaften wie erdölbasierte Kunststoffe, werden jedoch gemäss Definition der europäischen Norm EN 16575 ⁹ aus Biomasse hergestellt (z.B. natürliches Kautschuk als Inhaltsstoff von Pneus). Das Ausgangsmaterial sagt jedoch nichts darüber aus, wie gut abbaubar der Kunststoff ist ¹⁰ .
Bioabbaubarer Kunststoff	Bioabbaubarer Kunststoff oder biologisch abbaubare Kunststoffe sind Materialien, die durch natürlich auftretende Mikroorganismen vollständig abgebaut und in Wasser, Kohlenstoffdioxid und Biomasse umgewandelt werden. Gemäss Definition spielt es dabei keine Rolle, ob erneuerbare oder nicht erneuerbare, also fossile Ressourcen, zur Herstellung verwendet werden. ¹¹
Oxo-abbaubarer Kunststoff	Oxo-abbaubare Kunststoffe enthalten Additive, welche die Fragmentierung in der Umwelt unter gewissen Bedingungen beschleunigen (Licht bzw. Wärme sind notwendig). Es gibt keine Hinweise, dass das entstandene Mikroplastik in der Umwelt innerhalb eines vertretbaren Zeitraums abgebaut wird. ^{10,12}

Sachgemässe und unsachgemässe Entsorgung und Littering^c

Sachgemässe Entsorgung	Entsorgung beinhaltet Verfahren und Tätigkeiten, die der Beseitigung oder Verwertung von Abfällen dienen. Sie ist sachgemäss, wenn sie den gesetzlichen Vorgaben entsprechend erfolgt und somit nicht zu negativen Auswirkungen für Gesundheit und Umwelt führt.
Unsachgemässe Entsorgung	Unsachgemässe Entsorgung beinhaltet die nicht den gesetzlichen Vorgaben entsprechende, absichtliche oder unabsichtliche, Entsorgung von Abfällen, wie z.B.: — Entsorgung von Plastiksäcken mit der Grüngutsammlung (Falschentsorgung); — Verbrennung von Plastikabfällen im Cheminée, wobei giftige Gase und Rückstände (Dioxine) entstehen können;

^b Eine gebrauchts- und herkunftsbezogene Charakterisierung von Mikroplastik mit Abbildungen findet sich im Bericht «Évaluation de la pollution par les plastiques dans les eaux de surface en Suisse»⁵¹.

^c Die hier verwendeten Definitionen basieren auf Angaben des BAFU.

Littering	— Entsorgung von Plastikabfällen via Toilette in die Kanalisation (Falschentsorgung); — Deponierung von Abfallsäcken im Wald oder an Strassen (illegale Deponierung). In diesem Bericht werden unsachgemäss entsorgte Kunststoffe als «sonstige nicht korrekt entsorgte Kunststoffe» zusammengefasst (als Abgrenzung zu Littering). Littering bezeichnet das achtlose Wegwerfen oder Liegenlassen kleiner Mengen Siedlungsabfall, ohne die dafür vorgesehenen Entsorgungsstellen zu benutzen¹³.
Feinstaub	
Feinstaub	Feinstaub in der Luft ist ein komplexes Gemisch. Als PM₁₀ resp. PM_{2.5} werden Partikel bezeichnet, deren Durchmesser weniger als 10 µm resp. 2.5 µm beträgt. Die Partikel gelangen einerseits direkt durch Verbrennungsprozesse (z.B. Dieselmotoren, Holzheizungen) und durch mechanischen Abrieb (z.B. von Reifen, Bremsen, Strassenbelag) und Aufwirbelung in die Umwelt. Andererseits bildet sich ein Teil der Partikel erst in der Luft aus gasförmigen Vorläuferschadstoffen (z.B. Schwefeldioxid, Stickoxide, Ammoniak, flüchtige organische Verbindungen).¹⁴

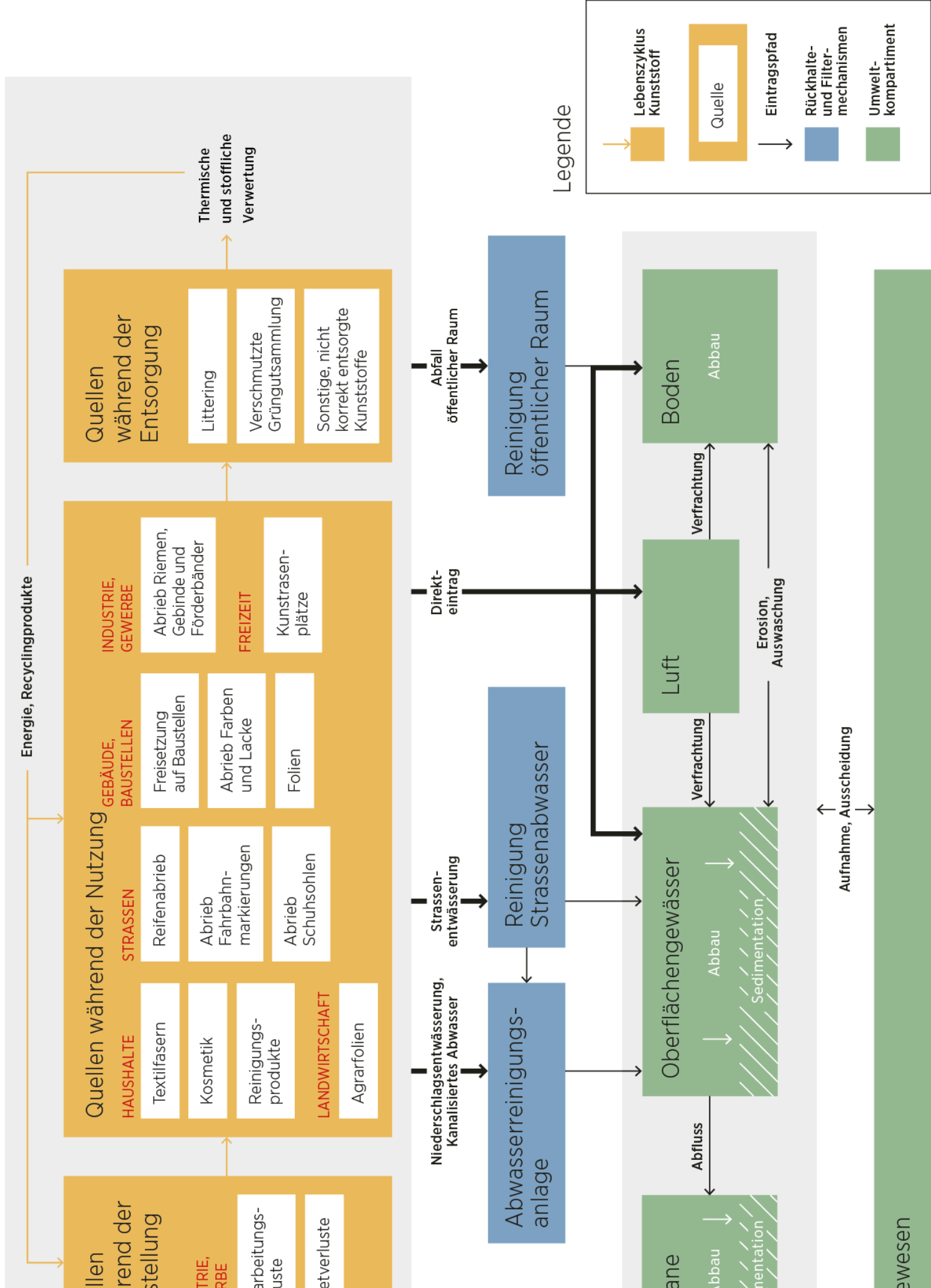
1.4 Übersicht über das Thema Kunststoffeinträge in die Umwelt

Die nachfolgende Infografik gibt eine Übersicht über die wichtigsten Quellen und Prozesse, die mit dem Eintrag von Mikro- und Makroplastik in die Umwelt zusammenhängen. Es gibt Quellen von Plastikeinträgen in die Umwelt in allen Lebensphasen von Kunststoffen (vgl. Kapitel 2): während der Herstellung, während der Nutzung und bei der Entsorgung. Sie gelangen durch verschiedene Eintragspfade in die Umwelt: z.B. durch Abschwemmung oder durch Direkteinträge wie Liegenlassen im Wald (vgl. Kapitel 3). Die Kunststoffe gelangen so in die Oberflächengewässer, Böden und Luft, wo sie kaum abgebaut werden (vgl. Kapitel 4). Tiere und Menschen können den Kunststoff aus der Umwelt aufnehmen, die Effekte sind zurzeit aber noch schwierig einzuschätzen (vgl. Kapitel 5).

Dieser Bericht gibt eine Übersicht über das Thema mittels der DPSIR-Struktur:

- **Drivers / driving forces:** Aktivitäten, Treiber;
- **Pressures:** Druck auf die Umwelt;
- **State:** Umweltqualität;
- **Impacts:** Auswirkungen auf die Umwelt;
- **Responses:** Korrekturmassnahmen.

Der Schritt *Responses* wird im Bericht nicht weiter ausgeführt.



Diese Übersicht zeigt in orange den Lebenszyklus von Kunststoffen; in blau Rückhalte- und Filtermechanismen der Entsorgung zuführen und in

1.5 Übersicht der Datenlage

Die Datenlage ist in Bezug auf Kunststoffeinträge in die Umwelt wenig einheitlich; viele Studien geben nur einen Einblick in sehr spezifische Themengebiete. Die zugrundeliegenden Untersuchungen waren meist lokal beschränkt oder fanden unter Laborbedingungen statt. Die Datenlage für die Berichtskapitel wird wie folgt eingeschätzt:

- Herstellung, Nutzung und Entsorgung von Kunststoffen: Es liegen teilweise gute Daten seitens Branchenverbänden vor.
- Eintrag von Kunststoffen in die Umwelt: Verschiedene Studien quantifizieren die Quellen anhand von Modellabschätzungen, Extrapolationen und Einzelpunktbetrachtungen und nennen Eintragspfade. Die Berechnungen sind aufgrund der schlechten Datenlage mit hohen Unsicherheiten behaftet, dennoch zeigt sich ein qualitativ einheitliches Bild. Eine genaue Quantifizierung der Mengeneinträge in die verschiedenen Umweltkompartimente ist jedoch schwierig und steht heute erst ansatzweise zur Verfügung.
- Verbleib und Verhalten von Kunststoffen in der Umwelt: Auch hier nennen verschiedene Studien quantitative Zahlen zu Konzentrationen, Transport- und Abbauprozessen, die jedoch mit hohen Unsicherheiten behaftet sind. So gibt es z.B. einige Wasser- und Sediment-Proben aus Schweizer Seen, aber nicht genügend, um Aussagen zur Sedimentationsrate je nach Fliessgeschwindigkeit zu machen. Aufgrund unterschiedlicher Methodik und Einheiten sind die Werte oft schwer vergleich- und interpretierbar. Zur Bestimmung von Plastikmengen in Böden existiert heute keine einheitliche Methodik. Erschwerend kommt hinzu, dass sehr kleine Partikel mit heutigen Methoden gerade in Böden und Sedimenten, aber auch oft in Oberflächengewässern nicht erfasst werden. Das betrifft z.B. die kleinen, aber mengenmässig sehr bedeutenden Reifenabriebpartikel. In Bezug auf Abbauprozesse sind genaue Aussagen zudem schwierig, weil sich die meisten Kunststoffe unter Umweltbedingungen nur sehr langsam abbauen und daher zeitliche Extrapolationen nötig sind.
- Auswirkungen von Kunststoffen in der Umwelt: Die Effekte von Mikroplastik auf Menschen und Tiere unter gängigen Konzentrationen in der Umwelt sind bis auf einige Ausnahmen noch kaum verstanden. Sie werden aber zunehmend Gegenstand intensiver Forschung.

2. Herstellung, Nutzung und Entsorgung von Kunststoffen (Drivers)

Kunststoffe weisen je nach Polymertyp und enthaltenen Additiven sehr unterschiedliche Eigenschaften auf. Entsprechend werden sie in grossen Mengen und sehr unterschiedlichen Anwendungen eingesetzt.

In der Schweiz werden jährlich rund 1 Mio. t Kunststoffe verbraucht. Ein Teil davon wird im gleichen Jahr entsorgt, der Rest wird länger verwendet. Insgesamt werden jedes Jahr rund 780'000 t entsorgt.¹⁵

2.1 Herstellung

Weltweit wird eine enorme und stetig steigende Menge an Kunststoffen unterschiedlicher Zusammensetzung hergestellt. Die meisten Kunststoffe basieren auf Erdöl, in jüngerer Zeit allerdings auch auf Biomasse. Kunststoffe sind grundsätzlich Polymere und enthalten sogenannte Additive.

Die globale Kunststoffproduktion ist in den letzten Jahren stetig gestiegen. 2017 betrug sie ca. 350 Millionen Tonnen⁷. Davon wurden ca. 64 Millionen Tonnen in der EU (EU 28 + Norwegen und Schweiz) produziert⁷. In der Schweiz werden nur sehr kleine Mengen Kunststoff produziert, allerdings werden beträchtliche Mengen verarbeitet. Die Schweiz hat im Jahr 2018 rund 775'000 t Kunststoff und 42'000 t Kautschuk verarbeitet¹⁶.

Kunststoffe werden durch Polymerisation von Monomeren hergestellt. Der ursprüngliche Ausgangsstoff ist typischerweise Erdöl⁴. Die Art und Eigenschaften eines Kunststoffes hängen von der Wahl des Monomers (z.B. Ethylen oder Styrol), der Herstellungsweise, sowie von den eingesetzten Additiven ab. Aufgrund des mechanisch-thermischen Verhaltens werden Kunststoffe grob in drei Gruppen aufgeteilt: Thermoplaste, Duroplaste und Elastomere (vgl. Kapitel 1.3). Biobasierte Kunststoffe werden anstatt aus Erdöl aus Biomasse hergestellt¹⁷. Typische Ausgangsmaterialien dafür sind z.B. Stärke oder Palmblattfasern. In der Schweiz sind jährlich rund 3'000 t biobasierte Kunststoffe auf dem Markt¹⁷.

Durch die Beigabe von Additiven können die Eigenschaften des Kunststoffes gezielt gesteuert werden^{18,19}: z.B. machen Weichmacher wie Phthalate das Material weicher und flexibler, während Farbstoffe dem Kunststoff die gewünschte Farbe geben. Tabelle 1 gibt eine grobe Übersicht über die Funktion von Additiven.

Tabelle 1: Übersicht über typische Additive mit Beispielen und Erläuterungen^{18,19}.

Kategorie	Beispieladditiv(e)	Erläuterungen
Funktionale Additive		
Weichmacher	Phthalate	80% der Menge an Weichmachern wird in PVC verwendet, 20% in Zelluloseplastik.
Flammschutzmittel	Decabromdiphenylethan	
Stabilisatoren	Bisphenol A (BPA)	Diverse Untergruppen: Antioxidanten, UV-Stabilisatoren, Wärmestabilisatoren, usw.
Biozide	Triclosan	Hauptsächlich eingesetzt bei weichem PVC und geschäumten Polyurethanen.
Diverse weitere		
Farbstoffe	Eisenoxide	
Füllstoffe	Kalk, Ton, Russ	Streckmittel, um die Produktion zu verbilligen (z.B. Russ in Autoreifen ²⁰).
Verstärkung	Glasfasern, Carbonfasern	
Vulkanisierungshilfe	Schwefel	Schwefel verbindet bei der Reifenherstellung während der sogenannten Vulkanisierung die Gummi-Moleküle.
Verarbeitungshilfe	Metallseifen (Zink-, oder Calciumseifen), aliphatische Säuren	Während der Reifenherstellung verbessern die Verarbeitungshilfen die Formbarkeit des Materials.

2.2 Nutzung

Kunststoffe haben sehr vielfältige Eigenschaften und sind damit sehr breit einsetzbar. Sie finden sich in jeder Branche und jedem Bereich des menschlichen Lebens.

Tabelle 2 zeigt exemplarische Anwendungsgebiete für die mengenmässig relevantesten Polymere. Auf eine abschliessende Übersicht wird aufgrund der grossen Vielfalt an Polymeren und Anwendungen an dieser Stelle verzichtet. Darüber hinaus werden zunehmend mehr Produkte aus Verbundstoffen hergestellt, d.h. sie bestehen aus zwei oder mehr mechanisch nicht trennbaren Kunststoffarten.

Tabelle 2: Beispiele von typischen Polymertypen und deren Verwendungen^{4,7,21}.

Plastikgruppe	Polymer	Produktebeispiel(e)
Thermoplast	Low-density Polyethylen (LDPE)	Frischhaltefolien, Plastiksäcke, Landwirtschaftsfolien
	High-density Polyethylen (HDPE)	Milchflaschen, Shampooflaschen, HDPE-Trinkwasserrohre
	Polypropylen (PP)	Verpackungen, Rohre, Autoteile
	Polystyrol (PS)	Brillenrahmen, Plastikgeschirr
	Expandiertes Polystyrol «Styropor» (EPS)	Verpackungen, Gebäudeisolation
	Polyvinylchlorid (PVC)	Fensterrahmen, Bodenplatten, Kabelisolation
	Polyethylenterephthalat (PET)	Trinkflaschen, Textilien
Duroplast	Polyurethane (PUR) ^a	Gebäudeisolation, Gehäuseteile im Maschinenbau
Elastomer	Gummi	Autoreifen, Elastikbänder
	Polyurethane (PUR) ^a	Matratzen, Schuhsohlen, Autositze

^a Aus kurzkettigen Ausgangsstoffen werden harte Schaumstoffe (Duroplast) hergestellt, aus langkettigen Ausgangsstoffen elastische Schäume (Elastomer).

Gemäss einer nach wie vor gültigen Schätzung aus dem Jahr 2010 werden in der Schweiz jährlich rund 1'000'000 t Kunststoffe verbraucht. Davon werden 570'000 t länger als ein Jahr verwendet («Zwischenlager»), z.B. Fensterrahmen, Fahrzeugbestandteile oder Spielsachen. Die restlichen 430'000 t werden z.B. als kurzlebige Produkte und Verpackungen innerhalb des gleichen Jahres entsorgt. Vom Zwischenlager gelangen zudem jährlich 320'000 t in die Entsorgung, wenn z.B. Fensterrahmen das Ende ihrer Lebensdauer erreicht haben. Weiter fallen jährlich 30'000 t Produktionsabfälle an. Dies ergibt in der Schweiz Kunststoffabfälle im Umfang von 780'000 t pro Jahr.¹⁵

Abbildung 2 verschafft einen Überblick über die Nutzung bzw. den Verbrauch von Kunststoffen in der Schweiz im Jahr 2010, einmal aufgeteilt nach Branchen und einmal nach Polymertypen. Die mengenmässig klar grössten Verbraucher von Kunststoffen sind mit beinahe zwei Dritteln die Verpackungs- und Baubranche. Kunststoffe werden auch in diversen anderen Branchen eingesetzt, allerdings zu bedeutend tieferen Anteilen. Ein vergleichbares Bild zeigt sich beim Einsatz der Polymere. Über die Hälfte des Gesamtverbrauchs in der Schweiz entfallen auf die drei Polymere Polyethylen (PE), Polypropylen (PP) und Polyvinylchlorid (PVC).¹⁵

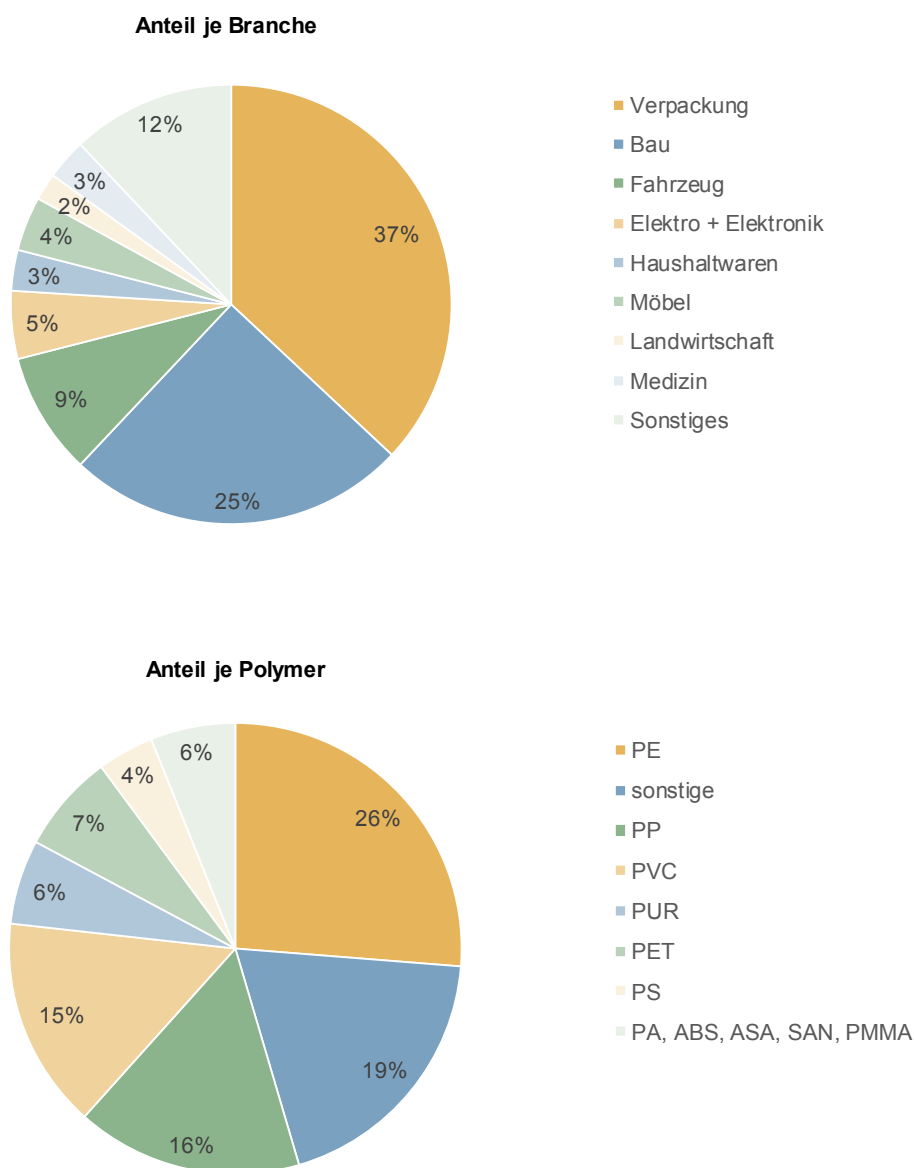


Abbildung 2 Verbrauch von Kunststoffen in der Schweiz: Anteile (Gewichtsprozent) unterschiedlicher Branchen am Verbrauch (oben); Anteile unterschiedlicher Polymertypen am Verbrauch (unten)¹⁵.

Abbildung 3 stellt die am häufigsten verwendeten Polymertypen in Bezug auf die eingesetzten Kunststoffmengen den wichtigsten vier Branchen Verpackung, Bau, Fahrzeugindustrie und Elektro / Elektronik gegenüber. Die Polymere PE, PP und PET dominieren die Verpackungsbranche, während PVC hauptsächlich in der Baubranche eingesetzt wird. Die restlichen Polymere werden in diversen Branchen eingesetzt. Auffällig ist die grosse Menge an «sonstigen Polymeren», die in «sonstigen Branchen» eingesetzt werden. Dies bestätigt die grosse Vielfältigkeit des Kunststoffeinsatzes.¹⁵

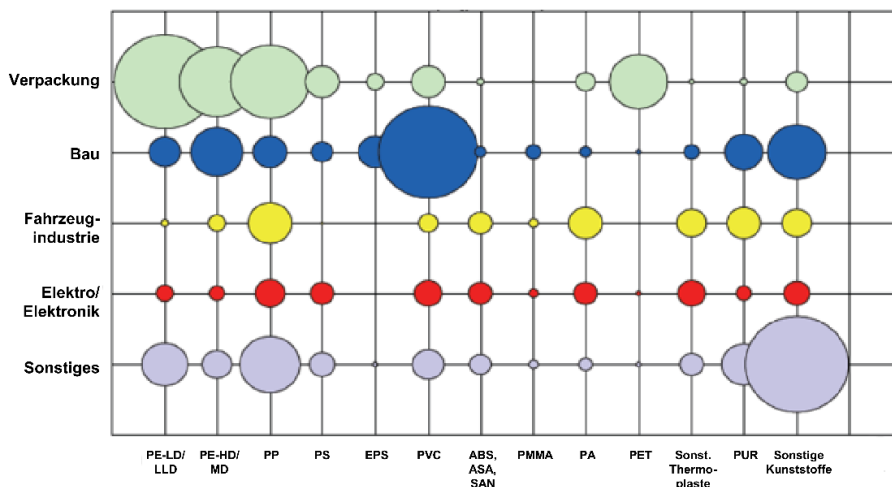


Abbildung 3 Verwendung der unterschiedlichen Polymertypen in den wichtigsten Branchen in der Schweiz (grössere Kreise bedeuten grössere Kunststoffmengen)¹⁵.

2.3 Entsorgung und Recycling

Nach der Nutzungsphase fallen Kunststoffe als Abfälle an (i.d.R. als Makroplastik) und werden in der Schweiz je nach Kunststofftyp recycelt oder verbrannt^d. Ein kleiner Teil gelangt via Littering und sonstige nicht korrekt entsorgte Kunststoffe in die Umwelt.

Insgesamt fallen in der Schweiz 780'000 t Kunststoffabfälle pro Jahr an¹⁵ (vgl. Abbildung 4). 430'000 t davon sind Kunststoffe, welche innerhalb des ersten Jahres ihrer Nutzung entsorgt werden (v.a. Verpackungen). Daneben fallen jährlich 320'000 t Kunststoffabfälle aus dem Zwischenlager und 30'000 t Produktionsabfälle an. Die Grösse des Lagers, resp. der Anteil an Kunststoffen, die ins Lager hinein oder wieder heraus gelangen, unterliegt über die Jahre Schwankungen.

Kunststoffabfälle werden in der Schweiz wie folgt behandelt¹⁵ (vgl. Abbildung 4):

- Sammlung im Kehrrecht und thermische Verwertung in Kehrrechtverbrennungsanlagen (KVAs) (ca. 635'000 t);
- Separatsammlung und Recycling (ca. 80'000 t);
- Thermische Verwertung des nicht rezyklierbaren Anteils aus Separatsammlungen in Zementwerken (ca. 50'000 t) und KVAs (ca. 15'000 t).

Mittels Separatsammlungen werden spezifische Kunststofffraktionen gesammelt und dem Recycling zugeführt. 2018 wurden von PET-Recycling Schweiz 38'000 t PET-Getränkeflaschen verwertet, was einer stofflichen Verwertungsquote von 82% entspricht²². Seit einiger Zeit werden vom Detailhandel zusätzlich PE-Kunststoffflaschen (wie z.B. Shampooflaschen) im Hinblick auf eine stoffliche Verwertung separat gesammelt. Kunststoffe aus

^d Bemerkung: Mikroplastik, welches z.B. durch Abnutzung oder Verwitterung entsteht (z.B. Reifenabrieb oder Mikrofasern beim Waschen synthetischer Textilien) fällt nicht unter Abfälle.

Industrie und Gewerbe werden z.T. ebenfalls dem Recycling zugeführt. Daneben bestehen verschiedene meist private Sammelsysteme für gemischte Kunststoffabfälle aus Haushalten.

Der stofflich nicht verwertbare Anteil der separat gesammelten Kunststoffabfälle aus Industrie und Haushalten wird in Zementwerken oder KVA thermisch verwertet. Bei sortenreinen Fraktionen ist dieser Anteil typischerweise kleiner als bei gemischten Sammlungen.

Durch die sachgemässe Entsorgung der Kunststoffabfälle wird gewährleistet, dass sie nicht in die Umwelt gelangen. Im Gegensatz dazu verursacht die unsachgemässe Entsorgung einen Eintrag von Plastik in die Umwelt.

Gewisse Kunststoffe, insbesondere für die Sammlung verwendete Plastiksäcke, gelangen mit der Grüngutsammlung oder dem Bioabfall in Kompostier- oder Vergärungsanlagen. Diese Kunststoffe werden teilweise durch Sortierung aus dem Kompost oder Gärgut aussortiert. Je nach Sortiereffizienz verbleibt unterschiedlich viel davon im Kompost oder in den Gärrückständen und gelangt mit diesen zurück in die Umwelt²³. Dies betrifft auch Fragmente von nicht zersetzten, sogenannt bioabbaubaren Kunststoffen, da diese oft nur unter idealen, in der Realität selten erreichten Bedingungen vollständig abbaubar sind¹⁷.

Zudem gelangt eine relevante Menge an Kunststoffen via Littering und sonstige nicht korrekt entsorgte Kunststoffe in die Umwelt. Da diese Menge nicht direkt gemessen werden kann, existieren diesbezüglich nur grobe Abschätzungen, die auf theoretischen Modellierungen basieren. Gemäss einer neuen Studie gelangen durch Littering rund 1.2% der für den Unterwegskonsum geeignete Kunststoffprodukte (z.B. Verpackungen, Einwegbesteck) trotz Reinigungsmaßnahmen in die Umwelt⁸.

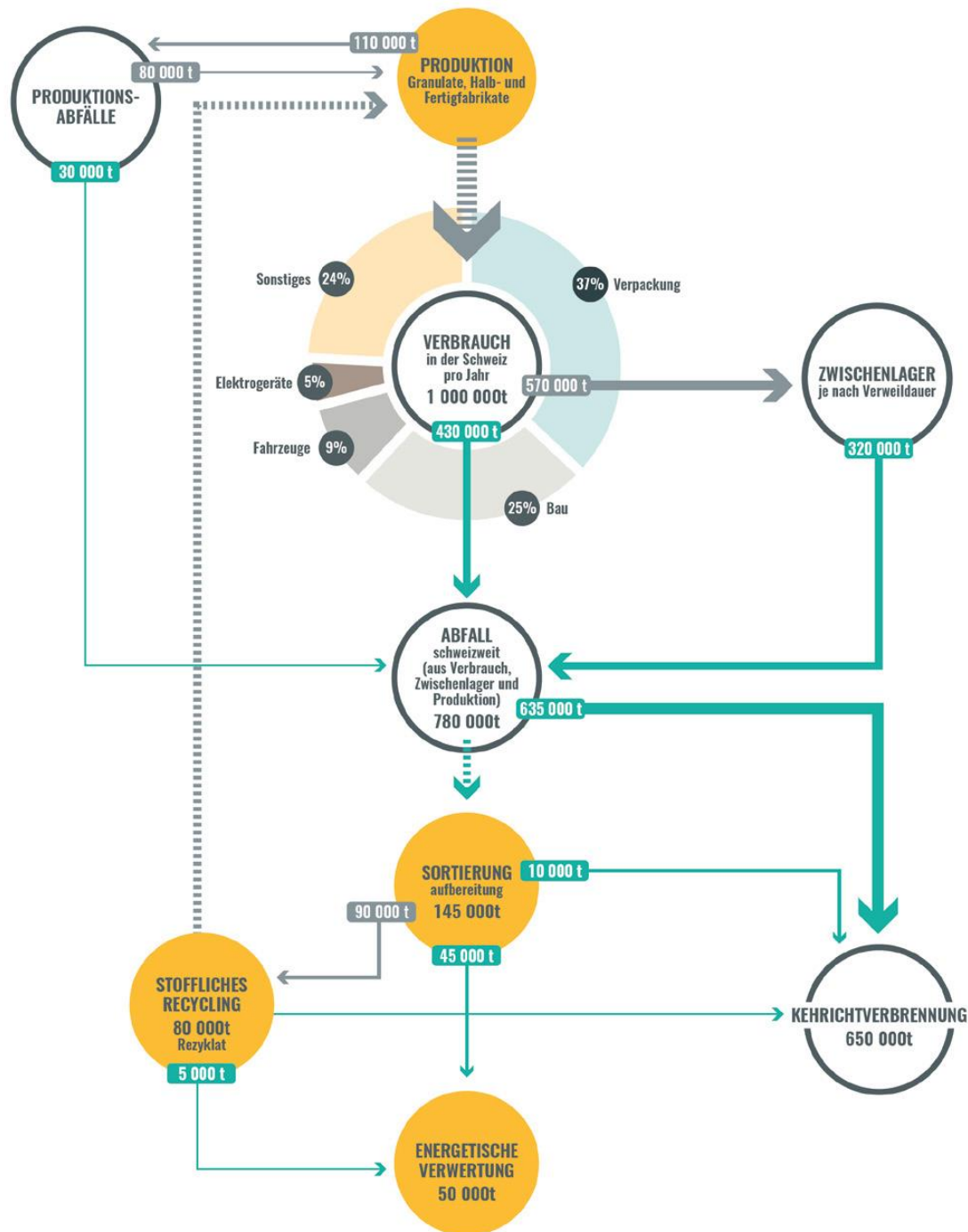


Abbildung 4 Kunststoffströme in der Schweiz im Jahr 2010^{15,24}.

2.4 Fazit

Zusammenfassend lässt sich über den Lebenszyklus von Kunststoffen von der Herstellung über die Nutzung bis zur Entsorgung sagen, dass Kunststoffe für eine ausserordentliche Vielzahl von Anwendungen und in einer

grossen Vielfalt von Zusammensetzungen im Einsatz sind. Allerdings dominieren einige Anwendungszwecke und Kunststofftypen: über zwei Drittel aller Kunststoffe entfallen auf Verpackungen, Bauten und Fahrzeuge und über die Hälfte aller heute eingesetzten Kunststoffe sind PE, PP und PVC. Die Kenntnis der wichtigsten Anwendungszwecke und Kunststofftypen hilft beim Verständnis der Kunststoffeinträge in die Umwelt, um die es im Folgenden geht.

3. Eintrag von Kunststoffen in die Umwelt (Pressures)

Es bestehen grosse Unsicherheiten bezüglich der effektiv eingetragenen Mengen an Makro- und Mikroplastik in die Umwelt. Die heutigen Angaben über Mengen basieren einerseits auf hochgerechneten Punktmessungen und andererseits auf Modellabschätzungen.

Makroplastik gelangt insbesondere durch Littering (das achtlose Wegwerfen von Abfall) und sonstige nicht korrekt entsorgte Kunststoffe (z.B. Falschentsorgung in der Grüngutsammlung) in die Umwelt. Dort zersetzt es sich über die Zeit zu Mikroplastik.

Beim Mikroplastik dominieren Emissionen aus der Nutzung von Kunststoffprodukten gegenüber beabsichtigt produziertem Mikroplastik. Die grösste Quelle ist Reifenabrieb, gefolgt von einer Vielzahl weiterer Quellen aus Strassen, Gebäuden und Baustellen, Sport- und Spielplätzen, Haushalten, Abfallentsorgung, Industrie und Gewerbe, sowie Landwirtschaft.

3.1 Freisetzung von Kunststoffen und Eintrag in die Umwelt

Während des Lebenszyklus von Kunststoffen gibt es zahlreiche Quellen für deren Freisetzung und Eintrag in die Umwelt: Kunststoffe können während der Herstellung, Nutzung oder Entsorgung freigesetzt werden (**Emissionen**). Die effektiv eingetragenen Mengen in die Umwelt (**Eintrag**) können den freigesetzten Mengen entsprechen oder aufgrund von Rückhalte- und Filtermechanismen kleiner ausfallen.

Ein Teil des freigesetzten Kunststoffes gelangt direkt in die Umwelt, also in die Böden, Oberflächengewässer oder Luft (z.B. Reifenabrieb in die Strassenböschung). Ein weiterer Teil wird durch Rückhalte- und Filtermechanismen zurückgehalten, z.B. der Faserabrieb synthetischer Textilien beim Waschen, der in der Abwasserreinigungsanlage (ARA) gefiltert wird oder gelitterte Gegenstände, die durch die Reinigung des öffentlichen Raumes zurückgehalten werden. Allerdings gelangt ein Rest trotz dieser Rückhalte- und Filtermechanismen in die Umwelt. Denn die ARAs können Mikroplastik nicht vollständig zurückhalten, wie auch nicht alle gelitterten Gegenstände bei der Reinigung des öffentlichen Raums zurückgehalten werden können. Insgesamt ist die Menge des tatsächlich in die Umwelt eingetragenen Kunststoffes (Eintrag) kleiner als die Menge an freigesetztem Kunststoff (Emission) (Abbildung 5).

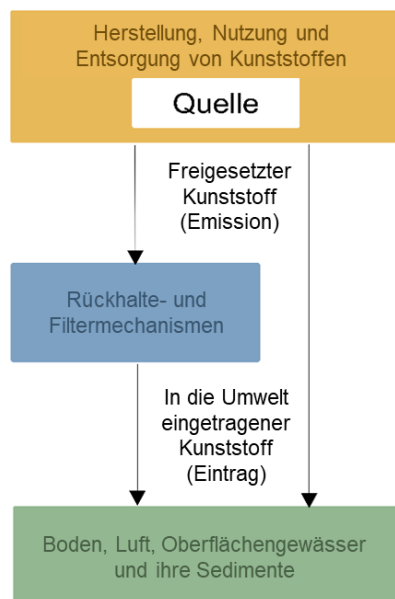


Abbildung 5 Kunststoffe können während der Herstellung, Nutzung und Entsorgung von Kunststoffprodukten freigesetzt werden (Emission). Nicht alles gelangt in die Umwelt, da ein Teil durch Rückhalte- und Filtermechanismen zurückgehalten wird. Die in die Umwelt eingetragene Menge ist somit kleiner als die Menge an freigesetztem Kunststoff.

3.2 Quellen

Es gibt zahlreiche Quellen für die Emissionen von Mikro- und Makroplastik in die Umwelt. Sie entstehen in allen Phasen der Kunststoffwertschöpfungskette:

- Quellen während der Herstellung
- Quellen durch die Nutzung
- Quellen während der Entsorgung

Mehrere Studien haben die Emissionen von Mikro- und Makroplastik quantifiziert^{1,5,8,23,25–28}. Nachfolgend werden die wichtigsten Quellen beschrieben. Falls nicht anders erwähnt, wurden die in Bertling et al.⁵ für Deutschland berechneten spezifischen Mengen (in g/(Kopf*a)) auf die Schweiz übertragen und auf 8.5 Millionen Einwohner in t/a hochgerechnet. Die Hochrechnungen selbst sind mit hohen Unsicherheiten behaftet. Die effektiv in die Umwelt eingetragenen Mengen dürften aber tiefer als die angegebenen, freigesetzten Mengen sein, da Filter- und Rückhaltemechanismen die Mengen in noch zu untersuchendem Ausmass reduzieren. Das qualitative bzw. semiquantitative Bild ist jedoch konsistent zwischen den einzelnen Studien.

- **Reifenabrieb:** Diverse Modellierungen deuten darauf hin, dass Reifenabrieb mit Abstand die mengenmässig grösste Quelle von Mikroplastik ist^{5,25,26}. Die Hochrechnung für die Schweiz basierend auf Bertling et al. ergibt jährlich rund 10'400 t Reifenabrieb⁵. Dies passt mit den Ergebnissen einer Schweizer Studie zusammen, welche den jährlich freigesetzten

Reifenabrieb auf rund 10'700 t schätzt. Der Anteil, welcher davon tatsächlich in die Umwelt eingetragen wird, wird auf 74% geschätzt. Der Rest wird durch die Strassen- oder Abwasserbehandlung entfernt.²⁸ Der Anteil von Reifenabrieb am lungengängigen Feinstaub PM₁₀ und PM_{2.5} liegt im einstelligen Prozentbereich^{29,30}.

- **Littering und sonstige nicht korrekt entsorgte Kunststoffe:** Durch Littering gelangt Makroplastik z.B. in Form von PET-Flaschen und Verpackungen in die Umwelt, wo es langsam zu sekundärem Mikroplastik zerfällt. Gemäss einer neuen Studie gelangen durch Littering rund 1.2% der für den Unterwegskonsum geeignete Kunststoffprodukte (z.B. Verpackungen, Einwegbesteck) trotz Reinigungsmassnahmen in die Umwelt. Die Studie schätzt, dass so jährlich etwa 2'700 t Plastik in Böden und Oberflächengewässern landen.^{e,8}
- **Strassen:** Neben dem Reifenabrieb gibt es diverse weitere Mikroplastikquellen auf den Strassen. Überträgt man die Zahlen von Deutschland auf die Schweiz, entstehen jährlich rund 930 t Schuhsohlenabrieb, 770 t Fahrbahnmarkierungsabrieb, sowie 330 t Abrieb von Besen und Kehrmaschinen.
- **Gebäude und Baustellen:** Rund 1'000 t Mikroplastik pro Jahr entstehen während des Baus und des Abbruchs von Gebäuden⁵. Neben Mikroplastik gelangt auch Makroplastik in die Umwelt, z.B. durch Fragmentierung und Verwehung von Styropor-Isolationen⁸. Zusätzlich entstehen durch die Verwitterung von Gebäudefassaden rund 320 t Mikroplastik pro Jahr⁵.
- **Sport- und Spielplätze:** Durch Verwitterung und Abnutzung gelangen Partikel von Sport- und Spielplätzen (z.B. Kunstrasenplätze) via Entwässerung und Aufwirbelung in die Umwelt. Alle Sportplätze zusammen setzen jährlich geschätzt 1'120 t Mikroplastik frei.
- **Haushalte:** In Haushalten entsteht Mikroplastik primär während des Waschens von synthetischen Kleidern (rund 650 t Mikroplastikfasern pro Jahr). Auch Kosmetikartikel oder Reinigungsmittel enthalten Mikroplastik, das nach der Verwendung ins Abwasser gelangt (rund 160 t/a durch Kosmetik, 40 t/a durch Wasch- und Reinigungsmittel).
- **Abfallentsorgung:** Eine wichtige Quelle bei der Abfallentsorgung ist Plastik, welches über Falschentsorgung in die separate Grüngutsammlung gerät und in der Folge mittels Kompost und Gärgut in die Umwelt gelangt. Es wurde anhand von Produktproben berechnet, dass in der Landwirtschaft durch verunreinigte Gärgut- und Kompostprodukte jährlich rund 50 t Plastik auf die Landwirtschaftsböden ausgebracht werden (Eintrag). Rund zwei Drittel davon stammen von festem Gärgut und etwa ein Drittel von Kompost²³. Des Weiteren entsteht Mikroplastik während dem Schreddern von Fahrzeugen auf offenen Schrottplätzen^{5,8}.

^e Der in Abbildung 2 der zitierten Studie zusammengefasste Wert von total 3'469 t (Böden und Oberflächengewässer) beinhaltet neben Littering auch weitere Abfälle (z.B. aus illegaler Deponierung oder Bautransporten). Gemäss Auskunft der Studienautoren gelangen durch Littering 2'700 t von unterwegs konsumierten Kunststoffprodukten trotz Reinigungsmassnahmen in die Umwelt.

- **Industrie und Gewerbe:** Während des Herstellungsprozesses können Produktions- und Pelletverluste entstehen. Diese treten vor allem in unmittelbarer Nähe des Produktionsortes auf, sowie flussabwärts von Gebieten mit entsprechender Industrie^{31,32}. Für die Schweiz gibt es keine Daten und Schätzungen aus dem Ausland sind für die Schweiz wenig aussagekräftig, da es hierzulande keine primären Plastikproduzenten gibt. Jedoch kann es Emissionen bei der Verarbeitung von Plastik und beim Transport geben. Des Weiteren gibt es Abrieb von Kunststoffpartikeln bei Förderbändern und beim Verschleisschutz von Maschinen (260 t/a), Riemen (140 t/a) und Zahnrädern (20 t/a), sowie bei der Reinigung von Gebinden (200 t/a)⁵.
- **Landwirtschaft:** In der Landwirtschaft werden oft Folien eingesetzt, z.B. Gewächshausfolien oder Mulchfolien. PE-Mulchfolien tragen geschätzt jährlich 0.3 bis 3 t/a zum Plastikeintrag in die Böden bei²⁷.

Es gibt neben den genannten, mengenmässig wichtigsten Quellen zahlreiche weitere wie Abrieb aus Rohrleitungen oder Mikroplastik-Zusätze in Medikamenten, welche hier nicht weiter beschrieben werden.

Wenn man obige Auflistung zusammenfasst, zeigt sich, dass der grösste Teil der Mikroplastikemissionen während der Nutzungsphase der Produkte durch Abrieb (z.B. Reifen) entsteht, während die Emissionen von intendiert produziertem Mikroplastik (z.B. Reibkörper in Kosmetik) deutlich geringer ausfallen^{1,5}. Das Verhältnis von nicht intendiertem, zu intendiert produziertem Mikroplastik wird in Deutschland z.B. auf 89% vs. 11% geschätzt⁵. Für die Schweiz kann ein ähnliches Verhältnis angenommen werden. Die Emissionen von Makroplastik werden durch Littering dominiert.

Ein direkter Vergleich, ob mehr Mikro- oder Makroplastik in die Umwelt gelangt, ist wenig aussagekräftig. Wenn man Reifenabrieb mitbetrachtet, sind in der Schweiz und Europa die Emissionen von Mikroplastik insgesamt vermutlich höher als von Makroplastik⁵. Der Vergleich hängt unter anderem davon ab, welche Kunststoffe betrachtet werden. Insgesamt gilt es zu beachten, dass die Quantifizierung der Quellen auf Modellabschätzungen und Hochrechnungen beruht, welche mit grossen Unsicherheiten behaftet sind.

3.3 Eintragspfade

Freigesetztes Mikro- und Makroplastik gelangt je nach Quelle und Zeitpunkt der Freisetzung auf unterschiedlichen Eintragspfaden in die Böden, Oberflächengewässer und Luft. Plastik kann durch Lebewesen aufgenommen werden. Es ist wichtig zu beachten, dass ein grosser Teil der freigesetzten Kunststoffe durch Reinigung von öffentlichen Räumen und Reinigung von Abwässern gesammelt und entsorgt wird und somit nicht in die Umwelt gelangt.

Eine Übersicht der Eintragspfade findet sich in Tabelle 3. Man unterscheidet zwischen punktuellen Kunststoff-Einträgen wie z.B. via Abwasser aus der ARA und diffusen Einträgen wie z.B. Littering oder Abschwemmung von Strassen⁵. Welche Distanzen die Partikel während der Abschwemmung oder

Luftverfrachtung zurücklegen, hängt u.a. von der Partikeldichte und -grösse ab und wird in Kapitel 4.2 näher beschrieben.

Tabelle 3: Punktuelle und diffuse Eintragspfade.

Art des Eintrags	Eintragspfad
Punktuelle Einträge	Niederschlagsentwässerungen inner- und ausserorts via — Strassenentwässerung (mit / ohne Behandlung) — Abwasserreinigungsanlagen (ARAs) — Direkteinleitung
	Kanalisiertes Abwasser aus Haushalten, Industrie und Gewerbe via — ARAs — Direkteinleitung (selten, u.a. bei Starkniederschlagsereignissen)
Diffuse Einträge	Verfrachtung (Verwehung, Ferntransport, trockene und nasse Deposition)
	Abschwemmungen
	Diffuse Direkteinträge (z.B. durch Littering, verunreinigter Kompost)

Die Einträge von Mikro- und Makroplastik in Böden, Oberflächengewässer und die Luft werden durch bereits implementierte Massnahmen in der Abfallwirtschaft und der Siedlungswasserwirtschaft reduziert (**Rückhalte- und Filtermechanismen**). So wird ein Teil der Kunststoffpartikel wie z.B. gelitterte Kunststoffabfälle oder Reifenabrieb durch die Reinigung der Strassen und des öffentlichen Raumes einer umweltgerechten Abfallentsorgung zugeführt. Der Eintrag von Kunststoffen in die Umwelt durch Littering und entsprechende Rückhaltemechanismen werden in Kapitel 3.2 beschrieben.

Das Konzept der Schweizer **Strassenentwässerung** sieht vor, dass Niederschlagswasser in erster Priorität über die Strassenschulter in der Böschung versickert wird. Ist dies nicht möglich, soll Strassenabwasser in ein Oberflächengewässer geleitet werden. Dabei soll das Strassenabwasser von vielbefahrenen Strassen in Strassenabwasserbehandlungsanlagen (SABAs) behandelt und das Niederschlagswasser von wenig befahrenen Strassen direkt in die Oberflächengewässer eingeleitet werden. Bei Extremniederschlägen (drei- bis fünfmal pro Jahr) kann überschüssiges Strassenabwasser unbehandelt in die Oberflächengewässer gelangen^{33,34}. Die dritte Priorität der Strassenentwässerung sieht einen Anschluss an die Mischwasserkanalisation vor.^f

In **Siedlungen** wird Niederschlagswasser meist – wegen mangelnden Versickerungsmöglichkeiten – entweder in ARAs gereinigt (Mischsysteme) oder direkt in die Oberflächengewässer eingeleitet (Trennsysteme). Jedoch gilt auch hier, dass das Abwasser ab einer gewissen Belastung behandelt werden muss. Auch im Mischsystem (bei ARAs oder im Kanalisationsnetz) wird bei Extremniederschlägen überschüssiges Niederschlagswasser unbehandelt in die Oberflächengewässer geleitet^{34, f}.

^fBasierend auf Angaben des BAFU.

Die Abwässer aus **Haushalten, Gewerbe und Industrie** werden in ARAs behandelt. In Zürcher ARAs werden über 90% des Mikroplastiks im Abwasser entfernt (8 µm – 5 mm)³⁵. In einer deutschen Studie wurde ebenfalls eine Minderung der Partikelfracht um 97% festgestellt³⁶. Da auch eine finnische Studie³⁷ auf vergleichbare Werte kam, kann man davon ausgehen, dass die Zürcher Werte für die ganze Schweiz gelten. Laborexperimente zeigten, dass auch Nanopartikel (< 100 nm) zu 98% zurückgehalten werden³⁸. Modellierungen in Boucher et al. weisen darauf hin, dass der Ausfluss der ARAs insgesamt nur in geringem Masse zu den Einträgen in die Oberflächengewässer beiträgt²⁵. Die zurückgehaltenen Kunststoffe aus der Abwasserreinigung gelangen in den Klärschlamm, der somit eine wichtige Senke für Kunststoffe darstellt^{36,39,40}. Das Ausbringen von Klärschlamm auf Böden ist in der Schweiz seit dem Jahr 2006 verboten⁴¹. Der Klärschlamm wird thermisch verwertet und bildet somit im Gegensatz zum Ausland keinen Eintragspfad mehr für Kunststoffe in die Umwelt.

Da das Abfallmanagement und die Abwasserreinigung in der Schweiz auf einem hohen Stand der Technik stehen, ist davon auszugehen, dass die Kunststoffeinträge über diese Kanäle in die Umwelt in der Schweiz geringer sind als im weltweiten Durchschnitt. In Boucher et al. wurde geschätzt, dass ca. 0.03% des jährlichen Schweizer Kunststoffverbrauchs in Oberflächengewässer, Böden und Luft gelangen, während dies weltweit auf 2.9% geschätzt wird²⁵.

Plastik, welches durch die Reinigungsmassnahmen nicht zurückgehalten wird, kann durch verschiedene Eintragspfade in die Oberflächengewässer, Böden und die Luft gelangen. Eine qualitative Übersicht der möglichen Eintragspfade je nach Quelle wird in Tabelle 4 gegeben.

Tabelle 4: Eintragungspfade von Kunststoffen in die verschiedenen Umweltkompartimente je Quelle. Qualitative Einschätzung der Autorinnen und Autoren (kein Anspruch auf Vollständigkeit). Hinweis: Gewässer steht für Oberflächengewässer.

Quelle	Eintragungspfad	Kompartiment
LITTERING, SONSTIGE NICHT KORREKT ENTSORGTE KUNSTSTOFFE	Direkteintrag	Böden, Gewässer
Littering	Verfrachtung	Böden, Gewässer, Luft
Falschentsorgung		
Illegale Deponierung		
STRASSEN	Direkteintrag	Luft, Böden
Reifenabrieb	Verfrachtung	Böden, Gewässer, Luft
Schuhsohlenabrieb		
Abrieb Fahrbahnmarkierungen	Abschwemmung	Böden, Gewässer
Abrieb Besen & Kehrmaschinen	Niederschlagsentwässerung – ARA	Gewässer
	Niederschlagsentwässerung – Reinigung von Strassenabwasser	Gewässer
	Niederschlagsentwässerung – Direkteinleitung	Gewässer
HAUSHALTE	Direkteintrag	Luft
Abrieb Verpackungen	Verfrachtung	Böden, Gewässer, Luft
Faserabrieb synthetische Textilien		
Kosmetik & Reinigungsmittel	Kanalisiertes Abwasser – ARA	Gewässer
ABFALLENTSORGUNG	Direkteintrag	Böden, Luft
Kompost	Verfrachtung	Böden, Gewässer, Luft
Recycling Schutt, Metall & Plastik	Niederschlagsentwässerung	Gewässer
	Kanalisiertes Abwasser – ARA	Gewässer
GEWERBE	Direkteintrag	Böden, Gewässer, Luft
Verarbeitungs- & Pelletverluste	Verfrachtung	Böden, Gewässer, Luft
Abrieb Maschinen, Riemen, Zahnräder		
Reinigung Gebinde	Kanalisiertes Abwasser – ARA	Gewässer
SPORT-, SPIELPLÄTZE	Verfrachtung	Böden, Gewässer, Luft
Abrieb Sport- & Spielplätze (z.B. Kunstrasenplätze)	Kanalisiertes Abwasser – ARA	Gewässer
	Niederschlagsentwässerung – Direkteinleitung	Gewässer
GEBÄUDE / BAUSTELLEN	Verfrachtung	Böden, Gewässer, Luft
Freisetzung Baustellen		
Farben- & Lackabrieb (primär Fassaden)	Abschwemmung	Böden, Gewässer
	Niederschlagsentwässerung	Gewässer
	Kanalisiertes Abwasser – ARA	Gewässer
ABWASSERREINIGUNG	Niederschlagsentwässerung – ARA	Gewässer
Abrieb Leitungen		
Kläranlagenablauf	Niederschlagsentwässerung – SABA	Gewässer
LANDWIRTSCHAFT	Direkteintrag	Böden
Landwirtschaftlich genutzte Kunststoffe (z.B. Folien)		

3.4 Quantifizierung der Einträge in die Umweltkompartimente

Plastik aus den verschiedenen Quellen kann durch diverse Eintragspfade in die Oberflächengewässer, Böden und die Luft gelangen (vgl. Tabelle 4). Die Quantifizierung der Einträge je Umweltkompartiment ist jedoch sehr schwierig und steht heute erst ansatzweise zur Verfügung.

In der Öffentlichkeit wird vor allem der Eintrag von Plastik in die Gewässer diskutiert. Aktuelle Studien deuten allerdings darauf hin, dass Einträge in die Böden mengenmässig relevanter sind^{8,26,42}.

Nachfolgend werden exemplarisch die Ergebnisse aus der Studie von ICF und Eunomia gezeigt, welche für die EU den Eintrag von selektierten Quellen von sekundärem Mikroplastik in verschiedene Umweltkompartimente modellierte (Abbildung 6). Obwohl die Abschätzung noch mit grossen Unsicherheiten verbunden ist, deutet die Berechnung darauf hin, dass ein relevanter Anteil im Boden landet. Unter «waste management» fallen die emittierten Plastikpartikel, welche über das Abfallsystem korrekt entsorgt werden (z.B. Strassenreinigung). Das Plastik im Landwirtschaftsboden beinhaltet sowohl das Ausbringen von Klärschlamm (nicht relevant für die Schweiz), als auch sonstige Einträge.²⁶

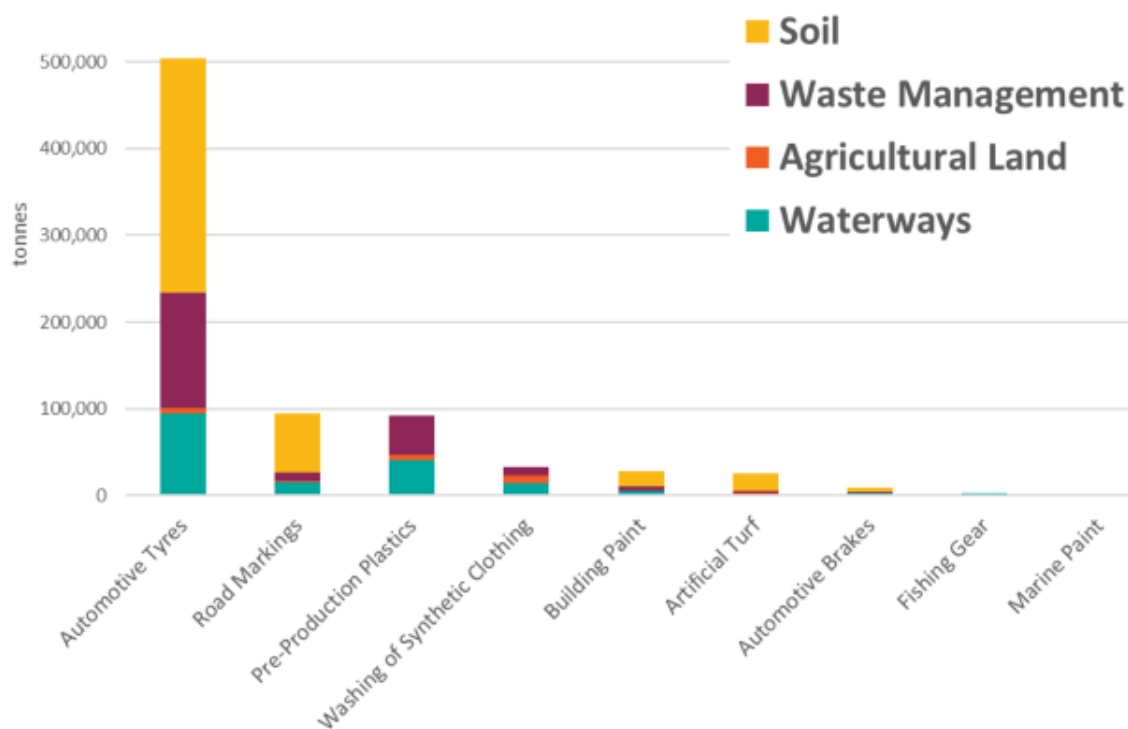


Abbildung 6 Modellierter Eintrag von Mikroplastik in die verschiedenen Umweltkompartimente, basierend auf einer Studie für die EU²⁶.

Eine Studie der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa) für die Schweiz zeigt ebenfalls, dass ein grosser Teil der Kunststoffe in die Böden gelangt. Die Autoren modellierten die Umwelteinträge der sieben am häufigsten verwendeten Polymere, wobei der Reifenabrieb in dieser

Studie jedoch nicht berücksichtigt wird. Insgesamt werden jedes Jahr rund 5'120 t Plastik in die Umwelt eingetragen. Rund 4'400 t gelangen als Makroplastik in die Böden, weitere 110 t in die Gewässer. Zusätzlich gelangen jedes Jahr rund 600 t Mikroplastik in die Böden und 15 t in die Gewässer. Diese Studie nennt Littering als die wichtigste Eintragsquelle vor allem in die Böden, in zweiter Linie auch in die Oberflächengewässer. Weitere wichtige Quellen für die Einträge in die Böden sind Mikro- und Makroplastik von Baustellen und aus der Landwirtschaft, sowie aus Herstellungs- und Entsorgungsprozessen. Neben Littering gelten für Oberflächengewässer Kunststoffe aus Entsorgungsprozessen, Textilfasern und Kosmetika als weitere Quellen.⁸

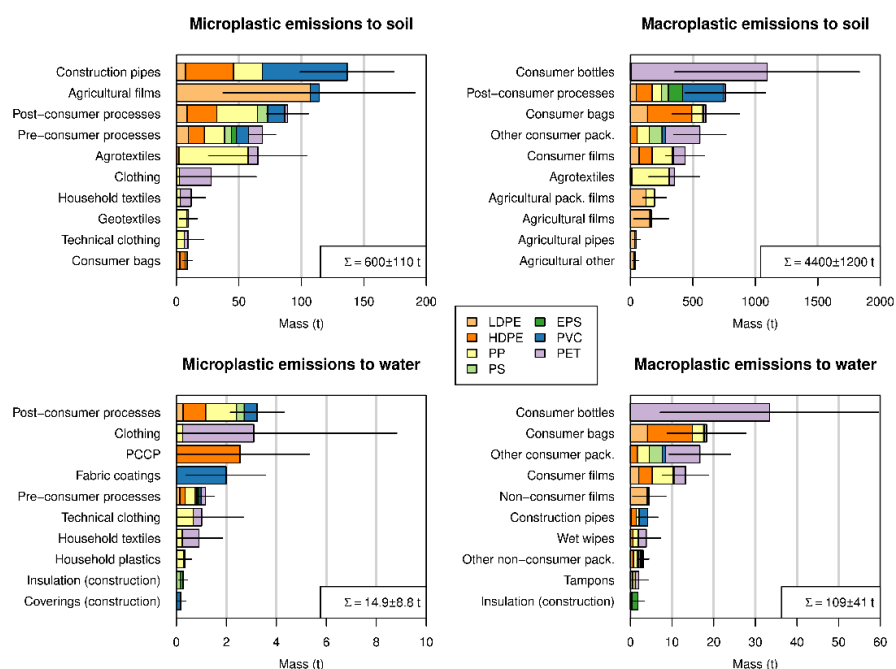


Abbildung 7 Modellierung des Eintrags von Mikro- und Makroplastik in die Schweizer Böden und Oberflächengewässer⁸. Der Eintrag von Reifenabrieb wurde in dieser Studie nicht modelliert und ist darum nicht abgebildet.

In einer Studie der Agroscope wurden die Einträge von Plastik auf landwirtschaftliche Nutzflächen in der Schweiz untersucht. Jährlich werden rund 16'000 t Plastik ausgebracht, davon verbleiben rund 160 t pro Jahr in den Böden. Die Haupteintragsquellen sind Littering (80 t/a) und verunreinigte Gärgut- und Kompostdünger (50 t/a).²⁷ Der Eintrag der untersuchten landwirtschaftlich genutzten Folien wurde insgesamt geringer auf rund 1.7 – 17 t pro Jahr⁹ eingeschätzt und beruht auf aktuelleren und detaillierteren Zahlen als in der oben erwähnten EMPA-Studie^{8,27,h}.

⁹ Die Studie listet die Einträge pro Quelle auf. Hier wurden die Einträge für alle untersuchten Folien aufsummiert.

^h Persönliche Mitteilung der Studienautorin.

3.5 Fazit

In der Schweiz entstehen bedeutende Kunststoffeinträge in die Umwelt: einerseits durch die unbeabsichtigte Freisetzung von Mikroplastik durch Abrieb usw. während der Nutzungsphase, andererseits durch Einträge von Makroplastik durch Littering und sonstige nicht korrekt entsorgte Kunststoffe (z.B. Falschentsorgung im Kompost). Weit weniger wichtig ist die Freisetzung von Mikroplastik durch Produkte, denen beabsichtigt Mikroplastik zugefügt wurde (z.B. Kosmetik).

Die Schweizer Siedlungsabfall- und Abwasserwirtschaft eliminiert Kunststoffabfälle und -verunreinigungen effizient. Trotz des hohen Reinigungsaufwandes im öffentlichen Raum stellen gelitterte Kunststoffabfälle einen wichtigen Anteil am Kunststoffeintrag in die Umwelt dar.

Während Kunststoffeinträge in Gewässer bereits hohe Aufmerksamkeit erhielten, wurden Einträge in die Böden bisher eher vernachlässigt. Insgesamt deuten Modellierungen darauf hin, dass die Einträge in Böden viel höher sind als in Oberflächengewässer. Die Einträge in Böden und deren Auswirkungen sollten daher künftig genauer betrachtet werden.

4. Verbleib und Verhalten von Kunststoffen in der Umwelt (State)

Kunststoffe und insb. Mikroplastik werden auf allen Kontinenten und in allen Umweltkompartimenten gefunden, auch in der Schweiz.

Die Partikelgrösse und -dichte von Kunststoffen beeinflussen das Transportverhalten in der Umwelt. Kleine und leichte Partikel werden mit der Luft über weite Strecken transportiert, während schwerere Partikel schneller mittels Deposition aus der Luft in die Böden und Oberflächengewässer gelangen. Analog verbleiben Partikel mit geringer Dichte als Schwebstoffe im Seewasser, werden mit Flüssen abtransportiert oder an die Ufer angeschwemmt. Partikel mit grösserer Dichte oder zusammenhaftende Partikel sinken in die Fluss- und Seesedimente ab. Plastik in Böden ist weitgehend immobil. Während die Grundsätze des Transportes verstanden sind, ist dessen Quantifizierung heute noch schwierig.

Plastik wird in der Umwelt nur sehr langsam abgebaut; es kann dort bis zu mehreren hundert Jahren verbleiben.

4.1 Plastik in Oberflächengewässern, Böden und der Luft

Kunststoffe und insb. Mikroplastik werden auf allen Kontinenten und in allen Umweltkompartimenten gefunden: in Ozeanen, Flüssen, Seen, Sedimenten, Böden sowie in der Luft^{43–45}. Es wird im Allgemeinen davon ausgegangen, dass die Anzahl Partikel in der Umwelt mit abnehmender Grösse der Partikel zunimmt³⁵. Interessant sind dabei nicht nur die Partikelkonzentrationen, sondern auch darin enthaltene oder adsorbierte Schadstoffe.

Auch in der Schweiz wurde Mikro- und Makroplastik **in der Umwelt nachgewiesen**. Messungen detektierten insb. Mikroplastik in der Luft, in Seen, Flüssen, Sedimenten und Böden und selbst an abgelegenen Orten^{46–51}. Bisher wurde noch kein Mikroplastik im Schweizer Grundwasser nachgewiesen (untersuchter Grössenbereich 8 µm – 5 mm)³⁵.

Die **Methoden** zur Identifizierung und Quantifizierung von Mikroplastik in Gewässern oder Böden sind noch in der Entwicklung^{40,48,50,52,53}. Kritische Punkte für die Vergleichbarkeit von Daten sind die verwendeten Methoden und die betrachteten Partikelgrössen. So messen z.B. viele Studien nur Partikel mit einem Durchmesser über 300 µm, während Reifenabriebpartikel typischerweise deutlich kleiner sind^{25,54}. Besonders herausfordernd ist die Konzentrationsmessung von Mikroplastikpartikeln, da es schwierig ist, sie zuverlässig von anderen Bodenpartikeln bzw. in Oberflächengewässern von anderen Schwebstoffen abzutrennen. Zudem fehlen standardisierte Methoden zur Identifizierung und Quantifizierung von Mikroplastik in der Umwelt. Der aktuelle Stand von Probenahme, Probenaufbereitung und Analytik in Wasser, Boden, Klärschlamm und Kompost wird im Diskussionspapier des deutschen Bundesministeriums für Bildung und Forschung im Rahmen des

Förderschwerpunktes «Plastik in der Umwelt» wiedergegeben. Dabei ist insbesondere der Unterschied zwischen thermoanalytischen und spektroskopischen Verfahren wichtig. Mit thermoanalytischen Verfahren können Polymere identifiziert und deren Massenanteil in der Probe gemessen werden. Angaben zur Grössenverteilung und Form der Partikel sind jedoch nicht möglich. Spektroskopische Verfahren liefern detaillierte Informationen zu Grösse, Form, Anzahl und chemischer Zusammensetzung (Polymeridentifikation) der Mikroplastikpartikel. Die Grösse, Form und Oberflächeneigenschaften der Partikel können für ökotoxikologische Fragestellungen relevant sein, weshalb diese Informationen nicht vernachlässigt werden sollten.⁵⁵

Aufgrund der unterschiedlichen Analysemethoden sind die in der Schweiz gemessenen **Konzentrationen** aus verschiedenen Studien heute noch schwierig zu vergleichen. Im untersuchten Partikelgrössenbereich wurden hauptsächlich PE, PP, PS und PVC gefunden^{25,46,56,57}. Diese gehören zu den am häufigsten verwendeten Polymeren (vgl. Abbildung 2). In einer Studie wurden Schweizer Flüsse und Seen auf Mikroplastik hin untersucht, der untersuchte Grössenbereich lag bei 0.3 – 5 mm. An der Oberfläche der **Flüsse** wurden im Mittel Mikroplastikkonzentrationen von 0.36 Partikel/m³ gemessen, an der Oberfläche der **Seen** 0.27 Partikel/m³.^{46,i} Eine weitere Studie untersuchte das Wasser des Zürichsees in verschiedenen Tiefen (Abbildung 8). Selbst in 30 m Tiefe wurde Mikroplastik entdeckt, und es wurde gezeigt, dass die Konzentration mit abnehmender Partikelgrösse zunimmt: Die über die Tiefe gemittelte Konzentration von Partikeln im Grössenbereich > 100 µm lag bei 132 Partikel/m³, während im Grössenbereich 5 – 10 µm die mittlere Konzentration bei 1.5 Mio. Partikel/m³ lag.⁵⁰ Die grösseren Partikel (> 100 µm) wurden erst unterhalb einer Wassertiefe von 20 m gefunden, so dass die Ergebnisse mit jener der vorher genannten Studie gut übereinstimmen.

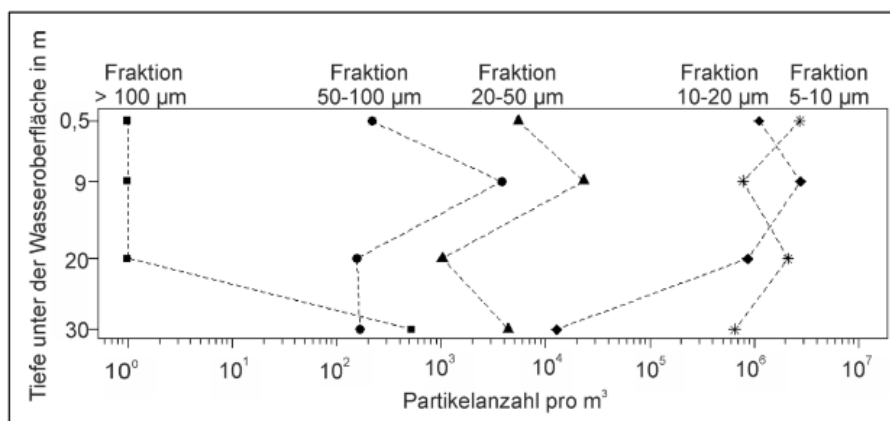


Abbildung 8 Tiefenprofil der Mikroplastikkonzentrationen im Zürichsee für verschiedene Grössenfraktionen.⁵⁰

ⁱ In der Studie wurden für Seen die Partikel in der Einheit Partikel/km² rapportiert. Der Median wurde umgerechnet unter der Annahme, dass mit dem 18x60 cm grossen Manta-Netz eine Wassertiefe von 18 cm beprobt wurde.

Es gibt nur wenige Daten zu Konzentrationen von Mikroplastik in **Böden**. In einer neuen Studie wurde aus der Analyse von Plastikstoffströmen eine Konzentration von Plastik in landwirtschaftlichen Oberböden (0 – 25 cm) von rund 200 mg/kg abgeleitet²⁷. Eine weitere Studie mass in Schweizer Schwemmebenen in Naturschutzgebieten durchschnittlich 5 mg/kg (Durchmesser 0.125 mm – 5 mm)⁴⁸.

Der Feinstaub in der Luft besteht zu einem kleinen Teil aus Mikroplastik. Der Anteil von Reifenabrieb am lungengängigen Feinstaub PM₁₀ und PM_{2.5} liegt im einstelligen Prozentbereich²⁹.

Neben Daten zur Anzahl Partikel haben verschiedene Studien auch gezeigt, dass Plastikpartikel in der Schweizer Umwelt organische und anorganische **Schadstoffe** enthalten können^{46,47,56}. Dies sind Additive (vgl. Kapitel 2.1.), welche in der Produktion bewusst zugefügt wurden, aber auch Umweltschadstoffe, welche an die Plastikpartikel adsorbieren (z.B. Schwermetalle).

4.2 Transport

Plastikpartikel können von einem Umweltkompartiment ins nächste transportiert werden oder innerhalb eines Kompartiments weite Distanzen zurücklegen. Sie können allerdings auch für sehr lange Zeiträume an einer Stelle verbleiben. Die Transportprozesse werden stark durch die Partikelgrösse und -dichte bestimmt. Diese beiden Grössen hängen einerseits vom Kunststoff selbst ab, andererseits können Partikel durch Anlagerungen von Mikroorganismen oder Kohäsion grösser und / oder schwerer werden^{5,25}.

Für den Transport in der **Luft** (Verfrachtung) ist vor allem die Form, Grösse und Dichte eines Partikels wichtig: je leichter und kleiner die Partikel, desto weiter werden sie transportiert. Die Verweilzeit in der Luft reicht von einigen Minuten bis zu mehreren Wochen^{54,58}. Mittels nasser oder trockener Deposition gelangen Partikel aus der Luft in die Oberflächengewässer oder Böden.

Im **Wasser** werden insbesondere jene Partikel transportiert, welche eine ähnliche oder geringere Dichte als Wasser haben (z.B. Polyethylen-Verpackungen oder geschäumte Kunststoffe). Sie verbleiben im Seewasser, werden ans Ufer geschwemmt oder mit Flüssen abtransportiert. Größere Partikel mit grösserer Dichte wie Elastomere (z.B. Reifenabrieb), Duroplaste und technische Thermoplaste mit Dichten über 1 g/cm³ tendieren zur Sedimentation und werden somit weniger weit transportiert. Feine Partikel verbleiben im Wasser und sedimentieren erst nach einer Verklumpung (Koagulation) mit anderen Partikeln.⁵ Verwitterung und ein Überzug von Mikroorganismen, sogenannte Biofilme, können das Transportverhalten beeinflussen: Partikel mit geringerer Dichte können aufgrund eines Biofilms zu sinken beginnen, während Partikel mit grosser Dichte durch den Biofilm Auftrieb erhalten und wieder aufsteigen können⁵⁹. Es kann davon ausgegangen werden, dass ein Grossteil des Kunststoffes in Sedimenten von Seen und Flüssen abgelagert wird, während ein kleinerer Teil im Wasser verbleibt, an Ufern angeschwemmt oder mit Flüssen abtransportiert wird^{25,31}.

Im Gegensatz zur grossen Mobilität von Plastikpartikeln in der Luft und im Wasser ist deren Mobilität in **Böden** gering. Austräge sind möglich durch Auswaschung oder Erosion. Innerhalb der Böden können Plastikpartikel durch bevorzugte, sogenannt präferenzielle Fliesswege verlagert⁶⁰ oder durch Bioturbation^{61,62}, das heisst durch Bodenlebewesen wie Regenwürmer und Springschwänze, transportiert werden. Das Transportverhalten von Kunststoffpartikeln in Böden ist Gegenstand von laufenden Forschungsprojekten.

4.3 Abbau

Plastik wird in der Umwelt nur sehr langsam abgebaut und gilt darum als persistent¹. Der Abbau von Plastik beinhaltet im Normalfall die Fragmentierung der Plastikpartikel zu kleinen Teilen, welche anschliessend chemisch und biologisch mineralisiert werden. Insbesondere der biologische Abbau ist bei heute gängigen Kunststofftypen unter Umweltbedingungen, aber auch während der Kompostierung und Vergärung sehr langsam.⁵

Die **Fragmentierung** geschieht aus einem komplexen Zusammenspiel von biotischen und abiotischen Faktoren: Biologischer Abbau an der Oberfläche durch Mikroorganismen, Versprödung durch UV-Strahlung, Zerkleinerung durch Wellengang, Verbisse durch Tiere und viele weitere Faktoren^{1,5,10}.

Beim **biologischen Abbau** werden kleine Partikel ganz abgebaut oder grössere Partikel an der Oberfläche zersetzt. Biologischer Abbau bedeutet, dass die Bestandteile des Plastiks durch Mikroorganismen mineralisiert werden.

Der **Abbauweg** und die Abbaurate sind abhängig von abiotischen und biotischen Faktoren, sowie von der Zusammensetzung des Plastiks selbst^{1,5}. Gewisse Polymere wie Polyester, Polyamide, Polycarbonate und Polyurethane können durch Hydrolyse gespalten werden. Andere Polymere wie Polyethylen oder Polypropylen benötigen zuerst einen zusätzlichen, sehr langsam ablaufenden Abbauschritt (die Hydroxylierung), bevor sie ebenfalls durch die Hydrolyse gespalten werden können. Aber auch wenn das Polymer für die Hydrolyse zugänglich ist, kann der Abbau sehr langsam sein, falls das Polymer abbauhemmende Additive enthält, eine hohe Kristallinität in der Struktur aufweist oder wenn niedrige Temperaturen herrschen.⁵

Abbauzeiten von Kunststoffen in der Umwelt sind schwierig abzuschätzen. Zeiträume von einigen Jahrzehnten bis Jahrhunderten werden häufig genannt, aber können nicht klar belegt werden⁵. Am Genfersee wurden Plastikpartikel gefunden, die aufgrund der Inhaltstoffe über 60 Jahre alt sein müssen⁴⁷. Die Abbauraten verschiedener Polymere unterscheiden sich stark. Eine Zusammenstellung von Literaturdaten in Bertling et al. zeigt Unterschiede bis zu einem Faktor 1'000 zwischen schwer und leicht abbaubaren Polymeren. Aber auch hier sind methodische Unsicherheiten relevant. So wird z.B. oft nur der Gewichtsverlust statt der tatsächlichen Mineralisierung gemessen und die Abbaudauer wird aufgrund von Versuchen über wenige Tage hochgerechnet. Bei solchen Versuchsbedingungen ist es unklar, ob das Polymer sich im Untersuchungszeitraum tatsächlich zersetzt oder ob der Gewichtsverlust nur darauf beruht, dass Additive ausgewaschen wurden.⁵

Bioabbaubare Kunststoffe sollten in der Umwelt, unter Kompostierungsbedingungen oder in der Vergärung bedeutend schneller abgebaut werden. In einer Studie des Schweizer Kompetenzzentrum für Bioenergie-Forschung (SCCER BIOSWEET) wurde die Eignung von biologisch abbaubaren Werkstoffen zur Verwertung in Schweizer Biogas- und Kompostieranlagen untersucht. Biologisch abbaubare Materialien werden hauptsächlich für Einwegartikel (z.B. Teller), Kompostierungssäcke und in der Landwirtschaft eingesetzt. Es eignen sich jedoch nicht alle Materialien für alle Kompostierungs- und Vergärungsanlagen, was die Entsorgung in der Praxis erschwert. Ausserdem werden in der freien Natur die mittels Laborversuche errechneten Bedingungen, die für einen kurzfristigen, vollständigen Abbau notwendig wären, oft nicht erreicht. Darum verläuft der Abbau in Böden und Gewässern oft langsamer oder wird verunmöglicht.¹⁷ Der Abbau trägt meist nicht zur Humusbildung bei und die energetisch nutzbaren Inhaltsstoffe (z.B. Stärke) gehen bei der Mineralisierung verloren. Deshalb sind die Verbrennung und Vergärung meist sinnvoller als die Kompostierung, da sie zumindest eine energetische Nutzung der Ressourcen erlauben⁶³.

Oxo-abbaubare Kunststoffe werden als abbaubar angepriesen, können dieses Versprechen jedoch nicht einlösen. Es handelt sich um konventionelle Kunststoffe mit Additiven, die zwar die Fragmentierung zu kleinen Teilen beschleunigen, aber nicht den biologischen Abbauprozess. Die entstandenen Mikroplastikpartikel werden weder in der freien Natur noch unter Kompostbedingungen innerhalb eines vertretbaren Zeitraums vollständig biologisch abgebaut.^{10,12,64} Oxo-abbaubare Kunststoffe sind somit kritisch zu hinterfragen. Laut einer noch nicht publizierten Studie der ETH Zürich gibt es in der Schweiz – im Gegensatz zu Ländern aus dem Mittleren Osten, bzw. aus Südamerika – allerdings keine breite Verwendung von oxo-abbaubaren Kunststoffen. Wichtige Schweizer Handelsunternehmen verzichten bewusst auf den Einsatz solcher Kunststoffe.⁶⁵

4.4 Senken von Plastik

Als Senken von Plastik werden Orte oder Prozesse verstanden, wo das Plastik für lange Zeit verbleibt. Senken für Plastik in der Umwelt sind zum heutigen Zeitpunkt wenig verstanden. Als Senken gelten die Ozeane⁶⁶, Sedimente von Ozeanen und Gewässern⁶⁷, sowie Böden⁴³. Auch der Klärschlamm gilt als Senke, da in diesen die zurückgehaltenen Kunststoffe aus der Abwasserreinigung gelangen³⁶. Da der Klärschlamm in der Schweiz verbrannt wird, kann der Kunststoff darin nicht mehr in die Umwelt gelangen. Eine weitere Senke ist das im Zuge der Reinigung des öffentlichen Raumes eingesammelte Plastik, welches der Verbrennung zugeführt wird und ebenfalls nicht mehr in die Umwelt gelangen kann. Eine letzte Senke sind Strassenabwasserbehandlungsanlagen (vgl. Kapitel 3.3).

4.5 Fazit

Kunststoffe finden sich in allen Umweltkompartimenten und reichern sich in den meisten auch an, da die Abbauraten im Vergleich zu den Eintragsraten in die Umwelt sehr klein sind.

Kunststoffpartikel sind insbesondere in der Luft und in Fliessgewässern mobil und können von diesen Kompartimenten in andere transferiert werden. In Ozeanen, Sedimenten von Gewässern und Ozeanen, sowie in Böden reichern sich Kunststoffe dagegen an.

Die Transport- und Transferprozesse sind stark abhängig von lokalen (z.B. reduzierte Fliessgeschwindigkeit in einem Stauwehr) und zeitlichen Faktoren (z.B. erhöhte Fliessgeschwindigkeit während Unwettern). Weitere Einflussfaktoren sind die Partikelform, -grösse und -dichte.

5. Auswirkungen von Kunststoffen in der Umwelt (Impacts)

Mikro- und Makroplastik werden durch Menschen und Tiere aufgenommen, entweder mit der Nahrung oder über die Atemwege.

Die Effekte von Mikroplastik auf Menschen und Tiere unter gängigen Konzentrationen in der Umwelt sind noch kaum verstanden. In Laborstudien wurden negative Effekte bei hohen Mikroplastikkonzentrationen für einzelne Arten nachgewiesen. Es wird vermutet, dass die Effekte von diversen Faktoren abhängen, wie z.B. Partikelgrösse oder Oberflächenzusammensetzung. Die Kunststoffpartikel selbst, oder die darin enthaltenen Monomere oder Additive können toxische Effekte auslösen. Ob diese Effekte auch bei den heutigen Umweltkonzentrationen auftreten, muss noch geklärt werden.

Makroplastik kann zu Verletzungen von Tieren führen durch Verheddern z.B. in Fischernetzen oder Verletzungen der Darmwand. Weiter kann es zu Verhungern führen aufgrund von reduziertem Magenvolumen. Langfristig zerfällt es zu sekundärem Mikroplastik und kann so potenziell weitere Effekte verursachen.

Insgesamt hängt das Risiko für Menschen und Tiere davon ab, welche Effekte möglich sind und wie gross die Exposition ist. Beides kann zurzeit noch nicht schlüssig abgeschätzt werden und muss weiter untersucht werden.

5.1 Die Beurteilung von Effekten und Risiken

«Alle Dinge sind Gift, und nichts ist ohne Gift; allein die Dosis machts, dass ein Ding kein Gift ist.» Paracelsus^j.

Ganz grundsätzlich haben alle Stoffe negative Auswirkungen auf Menschen und Tiere, falls die eingenommene Dosis hoch genug ist. Bei geringer Dosis sind jedoch keine Effekte zu erwarten. Das gleiche gilt für Mikroplastik und Makroplastik sowie dessen Bestandteile.

Um das Risiko für Menschen und Tiere zu evaluieren, braucht es daher drei Informationen:

— *Exposition*: Wie gross sind die Mengen, denen der Mensch oder das Tier ausgesetzt ist? Dazu gehören einerseits Konzentrationen im Wasser, Boden, in der Luft und in der Nahrung und andererseits die Aufnahmepfade, also auf welchem Weg das Mikroplastik aufgenommen wird. In der Ökotoxikologie wird typischerweise die gemessene oder modellierte Konzentration im Boden oder Wasser verwendet (MEC: measured environmental

^j In: Septem Defensiones 1538. Werke Bd 2, Darmstadt 1965, S. 510

concentration, PEC: predicted environmental concentration), bei Menschen zum Beispiel die berechnete täglich aufgenommene Dosis (durch die Atmung, mit der Nahrung, über die Haut).

- *Toxizität*: Welche Effekte werden bei welchen Konzentrationen und Mengen ausgelöst? Unterhalb welcher Konzentration treten keine Effekte auf? In der Ökotoxikologie wird der Wert häufig mit dem PNEC (predicted no effect concentration) festgelegt, in der Toxikologie mit dem ADI (acceptable daily intake) TDI (tolerable daily intake) oder DNEL (derived no effect level).
- *Risikoabschätzung*: Ist mit der abgeschätzten Exposition mit negativen Auswirkungen auf Menschen und / oder Tieren zu rechnen? Das Risiko berechnet sich wie folgt:

$$\text{Risikoquotient} = \frac{\text{Exposition}}{\text{Toxizität}}$$

Ein Risiko besteht, sobald die Exposition gleich gross oder grösser ist als die benötigte Konzentration, um einen Effekt auszulösen. Eine Risikobewertung erfolgt typischerweise jeweils für Menschen, aquatische und terrestrische Tiere.

Nicht Teil einer klassischen Risikoanalyse, aber je nach Fragestellung relevant, sind die Auswirkungen auf Ökosysteme. Beispiele für Auswirkungen auf das Ökosystem sind das Verschleppen von Arten durch Plastik⁵ (z.B. am Plastik haftende Tiere oder Mikroorganismen werden an neue Standorte verschleppt), oder die Reduktion der Bodenfruchtbarkeit aufgrund der abnehmenden Aktivität von Regenwürmern⁴². Diese Auswirkungen wurden im Zusammenhang mit Makro- und Mikroplastik bisher noch kaum untersucht und werden hier nicht weiter ausgeführt.

Der aktuelle Wissensstand zu den Auswirkungen von Kunststoffen auf Menschen und Tiere wird nachfolgend ausgeführt.

5.2 Auswirkungen auf den Menschen

Zu den Effekten von Mikroplastik auf den Menschen ist noch sehr wenig bekannt. Mikroplastik wird von Menschen über die Nahrung oder durch die Atmung als Teil des lungengängigen Feinstaubs in den Körper aufgenommen⁶⁸.

Mikroplastik wurde in verschiedenen **Nahrungsmitteln** nachgewiesen. Messungen sind aber aufgrund unterschiedlicher **Methoden** schwierig zu vergleichen und mit Unsicherheiten verbunden. Gründe sind die zurzeit noch schwierige Identifizierung und Quantifizierung von Mikroplastik in Nahrungsmitteln, unter anderem da Verunreinigungen im Labor eine grosse Herausforderung darstellen und teilweise nicht ausgeschlossen werden können⁶⁹.

Bisher wurde Mikroplastik in frischen und verarbeiteten **Produkten** nachgewiesen: in Muscheln (0.2 – 4 Partikel/g), Fischen, Honig (0.166 Fasern und 0.009 Fragmente pro g), Salz (0.007 – 0.68 Partikel/g) und Bier (0.025 Fasern, 0.033 Fragmente und 0.017 Partikel pro ml) ^{68–70}. Bei tierischen Lebensmitteln wird meist nicht genauer untersucht, wo im Nahrungsmittel sich das Mikroplastik befindet. Dies ist aber wichtig, da Mikroplastik im Magen-darmtrakt eines Speisefisches nicht gleich relevant ist wie im Muskelfleisch, da Menschen Fischgedärme im Normalfall nicht verspeisen ^{68–70}. Anders verhält es sich mit Muscheln, wo die Gedärme mitgegessen werden ⁷⁰. Mikroplastik kann im Rohprodukt enthalten sein, oder später während des Produktionsprozesses, durch den Abrieb von Verpackungen oder durch Transport in der Innenluft in die Nahrungsmittel gelangen ⁷⁰. Auch im **Trinkwasser** wurde Mikroplastik nachgewiesen, wie die Weltgesundheitsorganisation WHO in ihrer Studie festhält. Gemäss der WHO geht man zurzeit nicht von einem Gesundheitsrisiko durch Mikroplastik im Trinkwasser aus, es bestehen jedoch noch enorme Wissenslücken. ⁷¹ In der Schweiz gibt es bis jetzt keinen Nachweis für Mikroplastik im Trinkwasser ³⁵.

Eine erste Studie mit acht Menschen aus Europa und Asien hat Mikroplastik im Stuhl von allen Probanden gefunden ⁷². Dies bestätigt einerseits, dass Menschen Mikroplastik mit der Nahrung **aufnehmen**, und andererseits, dass zumindest ein Teil davon wieder **ausgeschieden** wird.

Es wurde noch kaum untersucht, ob die Mikroplastikpartikel vom Darm oder von der Lunge in den Blutkreislauf, Gewebe und Organe gelangen können (**Absorption** und **Translokation**). Die Europäische Food Safety Authority (EFSA) geht davon aus, dass Partikel <150 µm die Darmwand durchqueren können, aber weniger als 0.3% davon tatsächlich absorbiert werden. Nur sehr kleine Partikel (<1.5 µm) können in die Organe eindringen. Sowohl absorbierte als auch nicht-absorbierte Partikel können wieder ausgeschieden werden. ⁷⁰ Es wird vermutet, dass die Absorption durch verschiedene Faktoren wie Partikelgrösse, Hydrophobizität, Oberflächenladung, funktionelle Gruppen oder angelagerte Proteinschichten beeinflusst wird ⁶⁸.

Zu den **Effekten** von **Mikroplastik** auf den Menschen ist noch sehr wenig bekannt. Grundsätzlich wären Effekte in der Lunge, im Darm oder falls sie absorbiert werden, auch an anderen Stellen im Körper möglich. Untersuchungen in der Lufthygieneforschung haben gezeigt, dass Feinstaub- und Nanopartikel zu Atemweg- und Kreislaufkrankheiten führen können ^{29,68,73,74}. Ausserdem könnten Entzündungsreaktionen ausgelöst werden ^{68,73}.

Mikroplastikpartikel könnten **Monomere** oder **Oligomere** freisetzen, die toxische Effekte hervorrufen. Es wird vermutet, dass die Monomere meist biologisch inert sind (z.B. bei PE oder PP), es gibt aber Ausnahmen. So sind z.B. Bisphenol A (Baustein von Polycarbonat) oder Styrol (Baustein von Polystyrol) hormonaktive Substanzen. Analog könnten auch **Additive** wie Phthalate freigesetzt werden und Effekte hervorrufen (z.B. Beeinträchtigung der Embryonalentwicklung). ⁷⁴ Auch an Mikroplastik adsorbierte **Umweltschadstoffe** könnten im menschlichen Körper freigesetzt werden und damit die Schadstoffexposition bei Menschen erhöhen. Erste Abschätzungen für

Bisphenol A sowie die Umweltschadstoffe polyzyklische aromatische Kohlenstoffe (PAK) und polychlorierte Biphenyle (PCB) deuten aber darauf hin, dass die durch Mikroplastik aufgenommene Menge sehr gering ist im Vergleich zur Aufnahme über andere Wege^{70,74}. Dies könnte der Fall sein, falls beispielsweise Additive aus Verpackungen in die Nahrung gelangen. Aufgrund dieser ersten Hochrechnungen schliessen die Autoren, dass die Aufnahme von Mikroplastik-gebundenen Bestandteilen vernachlässigbar ist im Vergleich zu den über die üblichen Pfade (beispielsweise die Nahrung) aufgenommenen Bestandteilen, es besteht hierzu aber noch Forschungsbedarf. Insbesondere gilt diese Abschätzung nur für jene Bestandteile, welche auch tatsächlich über andere Aufnahmewege aufgenommen werden.

Insgesamt können die Auswirkungen von Mikroplastik auf den Menschen zurzeit noch nicht abgeschätzt werden und sollten weiter untersucht werden.

5.3 Auswirkungen auf Organismen (Tiere)

Auswirkungen von Plastik auf Organismen sind möglich durch Makroplastik, Mikroplastik, Bestandteile von Plastik und Schadstoffe, welche am Plastik adsorbiert sind.

Zahlreiche Studien zeigen, dass **Makroplastik** negative Auswirkungen auf Tiere haben kann. Fische, Vögel oder Schildkröten können sich verheddern, strangulieren oder das Plastik löst im Magendarmtrakt falsche Sättigungsgefühle aus, was bis zum Tod durch Verhungern führen kann. Bekannt sind Beispiele aus den Meeren⁴³, die gleichen Effekte sind für Süsswasser- und Landtiere grundsätzlich möglich, wurden bisher aber nicht nachgewiesen.

Ebenfalls klar belegt ist, dass zahlreiche Organismen **Mikroplastik aufnehmen**. Mikroplastik wurde in zahlreichen **aquatischen Organismen** (Fische und Invertebraten) und in **Vögeln** gefunden^{43,75,86}. Auch in der Schweiz wurde Mikroplastik in Plankton, Fischen und Vögel identifiziert⁴⁶. Die Aufnahme erfolgt hauptsächlich über die Nahrung, bei Fischen zudem über die Kiemenatmung^{1,75}. Es gibt Hinweise darauf, dass ein relevanter Anteil des aufgenommenen Mikroplastiks bei Fischen und Invertebraten direkt wieder ausgeschieden wird, wobei die Rate abhängig von der Tierart und der Form des Mikroplastiks ist⁷⁵. Die Absorption und Translokation sehr kleiner Mikroplastikpartikel (< 5 µm) durch das Darmgewebe wurde in verschiedenen Weichtieren und Fischen beobachtet. Der zugrundeliegende Mechanismus sowie die maximale Partikelgrösse sind jedoch noch unklar und müssen genauer untersucht werden⁷⁵. Gemäss ECHA können zurzeit experimentelle Artefakte nicht ausgeschlossen werden, d.h., dass es sich bei den Messungen z.B. um Kontaminationen handeln könnte¹. Über **terrestrische Organismen** liegen kaum Daten vor. Eine chinesische Feldstudie fand Mikroplastik in 94% der untersuchten terrestrischen Vögel⁷⁶. Eine weitere Studie zeigte auf, dass Mikroplastik durch Würmer und Hühner aufgenommen wird, im Falle der Hühner wurde ebenfalls gezeigt, dass ein Teil wieder ausgeschieden wird⁷⁷.

Die **Auswirkungen von Mikroplastik** in der Umwelt auf Organismen sind bisher noch wenig verstanden. Der aktuelle Wissensstand für **aquatische** Organismen wurde kürzlich zusammengefasst. Die ersten vorhandenen Studien untersuchten meist marine Invertebraten. Vereinzelt wurden auch marine Fische sowie Süsswasserinvertebraten und -fische untersucht. Häufig untersucht wurden die klassischen Endpunkte wie erhöhte Mortalität, reduziertes Wachstum oder Fortpflanzung. Der Studienautor merkt jedoch auch an, dass die Effekte oft bei eher hohen Konzentrationen gemessen wurden. Da es zurzeit keine standardisierten Testmethoden gibt, sind die Experimente mit Vorsicht zu interpretieren und zu vergleichen. Die vorhandenen Daten decken ausserdem nicht das ganze Spektrum an möglichen Expositionen ab: Viele Experimente verwendeten z.B. sphärische Polystyrolpartikel. Wie sich andere Polymere oder andere Partikelformen verhalten, ist zurzeit noch schwierig abzuschätzen. Ausserdem wurden die meisten Experimente mit sehr kleinen Partikeln durchgeführt ($< 100 \mu\text{m}$), es gibt jedoch nur wenige Feldstudien, welche diese Partikelgrössen in der Umwelt messen (vgl. auch Kapitel 4.1).⁷⁵ Man vermutet, dass die Effekte stark von der Partikelgrösse abhängen^{74,75}. Wie auch bei der Aufnahme von Mikroplastik fehlen in Bezug auf die Auswirkungen von Mikroplastik Studien zu **terrestrischen** Organismen weitgehend; es liegen vereinzelte Studien, wie z.B. für Regenwürmer vor, wo reduzierte Fortpflanzung oder reduziertes Wachstum beobachtet wurde^{42,61,78}. Auch bei Springschwänzen wurden diese Effekte beobachtet, obwohl es keine klaren Hinweise gab, dass sie den Mikroplastik aufnahmen⁷⁹.

Trotz der beschriebenen Schwierigkeiten wurden erste **Risikoabschätzungen** für **aquatische Systeme** in Europa und andere Weltregionen durchgeführt^{1,75,80,81}, eine auf die Schweiz ausgelegte Abschätzung liegt nicht vor. Die vorliegenden Studien kamen zum Schluss, dass die zurzeit in der Umwelt gemessenen Mikroplastikkonzentrationen meist mehr als zwei Grössenordnungen unter den Effektkonzentrationen liegen. In zwei der Studien wurden vereinzelte hochbelastete Gebiete identifiziert, welche potenziell schädliche Konzentrationen enthalten könnten (küstennahe Meeresgebiete⁸¹, ein Ort in Asien⁸⁰). Insgesamt reflektieren diese Risikoabschätzungen aber erst den aktuellen Wissensstand und sind noch mit grosser Vorsicht zu interpretieren^{1,80,81}. In den Risikoabschätzungen werden insgesamt folgende vier Herausforderungen genannt: Erstens die Herleitung der ökotoxikologischen Grenzwerte. So werden noch nicht genügend Tierarten abgedeckt und Daten zu chronischen Effekten fehlen weitgehend. Zweitens werden die Umweltkonzentrationen von kleinen Partikeln selten gemessen und somit sehr wahrscheinlich unterschätzt. Drittens ist zu beachten, dass die Konzentrationen in Zukunft zunehmen, wenn Plastik weiterhin in die Umwelt eingetragen wird. Und viertens sind diese Studien erst für aquatische Systeme verfügbar; systematische Daten und Vergleiche für Sedimente und Böden fehlen.

Eine erste grobe Abschätzung für landwirtschaftliche **Böden** wurde in der Studie von Agroscope vorgenommen. Aus den in die landwirtschaftlichen Böden eingetragenen Mengen wurde eine Bodenkonzentration von 0.2 g Mikroplastik/kg Boden abgeleitet (siehe auch Kapitel 4.1) und mit ökotoxikologischen Studien aus der wissenschaftlichen Literatur verglichen. Dort finden sich negative Effekte auf Bodenlebewesen ab einer Konzentration von

1 g Mikroplastik/kg Boden. Daraus wurde abgeleitet, dass zurzeit kein Risiko besteht. Diese Abschätzung ist aber mit Unsicherheiten behaftet, da sie auf einer begrenzten Anzahl ökotoxikologischer Daten beruht und diese nicht standardisiert erhoben wurden. Unter anderem decken sie die Vielfalt der Kunststoffe und der Organismen noch nicht genügend ab, und es muss damit gerechnet werden, dass die Mikroplastikkonzentration in Zukunft zunehmen wird.²⁷ Eine Studie hat bei Regenwürmern ab Konzentrationen von 0.06 g Mikroplastik/kg Boden keine negativen Effekte auf die klassischen Endpunkte wie Mortalität, Wachstum oder Fruchtbarkeit gemessen, jedoch wurden negative Effekte im Darm inklusive einer Immunreaktion beobachtet⁷⁸. Dies zeigt, dass negative Effekte bei umweltrelevanten Konzentrationen noch genauer zu untersuchen sind.

Insgesamt zog ECHA 2019 die Schlussfolgerung, dass zurzeit keine abschliessende Risikobeurteilung möglich ist und nicht ausgeschlossen werden kann, dass zurzeit oder in der Zukunft keine Effekte durch die Partikel auftreten können¹.

In Bezug auf die **Luft** liegen keine Risikoabschätzungen spezifisch für Mikroplastik vor. Allerdings enthält die Luftreinhalte-Verordnung Immissionsgrenzwerte für Feinstaub. Bei der Einhaltung der Immissionsgrenzwerte sind nach heutigem Wissensstand Menschen, Tiere, Pflanzen, ihre Lebensgemeinschaften und -räume sowie Böden usw. im Allgemeinen vor schädlichen und lästigen Auswirkungen von Feinstaub inkl. darin enthaltenem Mikroplastik geschützt.

Kunststoffpartikel können analog wie beim Menschen auch im Tier **Monomere**, **Oligomere** oder **Additive** freisetzen und so Effekte hervorrufen (siehe Kapitel 5.2). Es ist zurzeit aber noch nicht möglich einzuschätzen, ob aus Mikroplastikpartikeln relevante Chemikalienmengen migrieren, um solche Effekte hervorzurufen¹. Modellierung bezüglich Umweltschadstoffe weisen aber darauf hin, dass die Exposition durch die normale Nahrung relevanter ist^{82,83}. Der Einfluss der Verwitterung von Plastikpartikeln auf die Freisetzung von potenziell toxischen Stoffen sowie auf das Sorptionsverhalten von Schadstoffen ist noch wenig verstanden und muss untersucht werden^{84,85}.

5.4 Fazit

Die potenziellen Auswirkungen von Kunststoffen auf Menschen, Tiere und ganze Ökosysteme sind vielfältig, komplex und insgesamt noch wenig verstanden. Die Effekte reichen von mechanischen Auswirkungen auf den ganzen Organismus oder dessen Verdauungs- und Atemsystem, bis zu biochemischen Auswirkungen auf zellulärer Ebene. Konkrete Auswirkungen auf Organismen sind im Labor unter relativ hohen Kunststoffkonzentrationen nachgewiesen. Erste Risikoabschätzungen für Gewässer lassen dagegen vermuten, dass zurzeit das Risiko für aquatische Organismen gering ist. Diese Abschätzungen sind jedoch mit grossen Unsicherheiten behaftet. Im Weiteren fehlen Daten für Böden weitgehend. Eine Einordnung der Risiken ist somit unter heute in der Umwelt gefundenen Konzentrationen für Menschen, Tiere

und Ökosysteme noch nicht möglich. Eine Ausnahme bildet die Luft: Ein kleiner Teil des Mikroplastiks in der Luft fällt unter Feinstaub und für diesen enthält die Luftreinhalte-Verordnung Immissionsgrenzwerte. Bei deren Einhaltung sind nach heutigem Wissensstand Menschen, Tiere, Pflanzen, ihre Lebensgemeinschaften und -räume sowie Böden usw. im Allgemeinen vor schädlichen und lästigen Auswirkungen von Feinstaub inkl. darin enthaltenem Mikroplastik geschützt.

Wenn die Kunststoffeinträge nicht vermindert werden, werden die Konzentrationen in der Umwelt zunehmen. Zudem zerfällt Makroplastik mit der Zeit zu Mikroplastik, wodurch die Anzahl Partikel in der Umwelt zusätzlich ansteigt. Aus diesem Grund kann zurzeit nicht ausgeschlossen werden, dass die Kunststoffkonzentrationen künftig auf ein Niveau steigen, auf dem sie Effekte hervorrufen können. Für eine diesbezügliche Aussage fehlen aber bisher einheitliche Daten und Hochrechnungen für Konzentrationen in Umweltkompartimenten und Transportprozesse. Hohe Konzentrationen sind potenziell dort möglich, wo sich Plastik anreichert, z.B. in Gewässersedimenten oder Böden neben stark befahrenen Strassen. Zeitlich befristete hohe Konzentrationen könnten bei Starkniederschlagsereignissen in dicht besiedelten Einzugsgebieten auftreten, da dann grosse Kunststoffmengen mit unbehandelten Strassen- und Siedlungsabwässern in die Gewässer gelangen. Zudem könnten bei solchen Ereignissen Kunststoffe aus Flusssedimenten und Böden remobilisiert werden.

Daraus kann man schlussfolgern, dass im Sinne des Vorsorgeprinzips zur Begrenzung künftiger Risiken für Menschen und Tiere eine Verringerung des Kunststoffeintrags in die Umwelt wichtig ist. Die SAPEA wie auch die ECHA empfehlen der Europäischen Kommission im Sinne des Vorsorgeprinzips, Kunststoffeinträge in die Umwelt zu reduzieren und Auswirkungen vorzubeugen, resp. diese abzumildern, da eine Risikoanalyse unter der heutigen Datenlage noch nicht möglich sei^{1,3}.

Um die Risiken des Kunststoffeintrags in die Schweizer Umwelt generell, aber auch regional und lokal besser einzuschätzen, ist ein vertieftes Verständnis folgender Prozesse zentral:

- In die Umwelt eingetragene Mengen der wichtigsten Kunststoffquellen über die dominanten Eintragspfade;
- Transportprozesse von Partikeln innerhalb und zwischen den Umweltkompartimenten;
- Eintragspfade und Transportprozesse auch für sehr kleine Partikel, die durch bisherige Studien kaum abgedeckt sind;
- Auswirkungen von Kunststoffpartikeln unter realistischen Umweltkonzentrationen auf Menschen, Tiere und Ökosysteme;
- Berücksichtigung räumlicher Faktoren (z.B. Anzahl Seen und Wehre vor einem Flussabschnitt), um lokal besonders belastete oder gefährdete Ökosysteme und Lebensgemeinschaften zu identifizieren.
- Identifikation besonders belasteter und gefährdeter terrestrischer Ökosysteme.

6. Abkürzungsverzeichnis des Berichts

- a: Jahr
- ABS: Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer
- ADI: acceptable daily intake
- ARA: Abwasserreinigungsanlage
- ASA: Acrylnitril-Styrol-Acrylat
- BPA: Bisphenol A
- cm: Zentimeter
- cm³: Kubikzentimeter
- DNEL: Derived no effect level, Konzentration, unter der nach dem Kenntnisstand der Wissenschaft keine Beeinträchtigung der menschlichen Gesundheit erwartet wird.
- ECHA: European Chemicals Agency
- EFSA: European Food Safety Authority
- Empa: Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
- EPS: Expandiertes Polystyrol
- EU: Europäische Union
- g: Gramm
- g/(Kopf*a): Gramm pro Kopf und Jahr
- g/cm³: Gramm pro Kubikzentimeter
- GESAMP: Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection
- HD: High-density, hohe Dichte
- HDPE: High-density Polyethylen
- kg: Kilogramm
- KVA: Kehrlichtverbrennungsanlage
- LD: Low-density, niedrige Dichte
- LLD: Linear low-density, linear mit niedriger Dichte
- LDPE: Low-density Polyethylen
- m: Meter
- m³: Kubikmeter
- MD: Medium-density, mittlere Dichte
- MEC: measured environmental concentration
- mg: Milligramm
- mg/kg: Milligramm pro Kilogramm (Konzentration)
- ml: Milliliter

- mm: Millimeter
- nm: Nanometer
- PA: Polyamid, Nylon
- PAK: Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
- Partikel/m³: Anzahl Partikel pro Kubikmeter (Konzentration)
- PCB: Polychlorierte Biphenyle
- PE: Polyethylen
- PEC: predicted environmental concentration
- PET: Polyethylenterephthalat
- PM_{2.5}: Partikel, deren Durchmesser weniger als 2.5 Tausendstel-Millimeter beträgt, PM steht für Particulate Matter (Feinstaub)
- PM₁₀: Partikel, deren Durchmesser weniger als 10 Tausendstel-Millimeter beträgt, PM steht für Particulate Matter (Feinstaub)
- PMMA: Polymethylmethacrylat, Plexiglas
- PNEC: predicted no effect concentration
- PP: Polypropylen
- PS: Polystyrol
- PUR: Polyurethan
- PVC Polyvinylchlorid
- SABA: Strassenabwasserbehandlungsanlagen
- SAN: Styrol-Acrylnitril-Copolymere
- SAPEA: Science Advice for Policy by European Academies
- SCCR BIOSWEET: Biomass for Swiss Energy Future: Swiss Competence Center for Energy Research.
- t: Tonne
- t/a: Tonnen pro Jahr
- TDI: tolerable daily intake
- µm: Mikrometer
- UV: Ultraviolettstrahlung
- WHO: World Health Organization, Weltgesundheitsorganisation
- >: grösser als
- ≥: grösser/gleich gross als
- <: kleiner als
- ≤: kleiner/gleich gross als

7. Literaturverzeichnis

1. ECHA. *Annex XV Restriction Report*. European Chemicals Agency, Helsinki, Finland. (2019).
2. GESAMP. *Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: part 2 of a global assessment*. GESAMP, Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection. (2016).
3. SAPEA. *A Scientific Perspective on Microplastics in Nature and Society*. SAPEA, c/o acatech, Berlin, Deutschland (2019).
4. Kunststoff-Schweiz. *Kunststoff-Wissen*. (2019). Verfügbar unter: <https://www.kunststoff-schweiz.ch/html/kunststoff-wissen.html>. (Abgerufen am: 20.2.2019)
5. Bertling, J., Bertling, R. & Hamann, L. *Kunststoffe in der Umwelt: Mikro- und Makroplastik. Ursachen, Mengen, Umweltschicksale, Wirkungen, Lösungsansätze, Empfehlungen*. Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT (2018).
6. O'Connor, I., Golsteijn, L. & Hendriks, A. J. Review of the partitioning of chemicals into different plastics: Consequences for the risk assessment of marine plastic debris. *Mar. Pollut. Bull.* **113**, 17–24 (2016).
7. PlasticsEurope. *Plastics – the Facts*. Der Verband der Kunststoffherzeuger. (2018).
8. Kawecki, D. & Nowack, B. Polymer-specific modelling of the environmental emissions of seven commodity plastics as macro- and microplastics. *Environ. Sci. Technol.* **53**, 9664–9676 (2019).
9. DIN. *DIN EN 16575: Biobasierte Produkte; Deutsche Fassung*. (2014).
10. Europäische Kommission. *Bericht der Kommission an das europäische Parlament und den Rat über die Auswirkungen der Verwendung von oxo-abbaubarem Kunststoff, einschliesslich oxo-abbaubarer Kunststofftragetaschen, auf die Umwelt*. Europäische Kommission, Brüssel, Belgien. (2018).
11. BAFU. *Biokunststoff - alles abbaubar?* (2018). Verfügbar unter: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/abfall/dossiers/biokunststoff-alles-abbaubar.html>. (Abgerufen am: 4.3.2019)
12. Hann, S., Ettlinger, S., Gibbs, A. & Hogg, D. *The Impact of the Use of Oxo-degradable Plastic on the Environment Final report*. Eunomia Research & Consulting Ltd, Bristol, BS1 4Qs, UK. (2016).
13. BAFU. *Littering*. (2018). Verfügbar unter: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/abfall/fachinformationen/abfallpolitik-und-massnahmen/littering.html>. (Abgerufen am: 4.3.2019)
14. BAFU. *Feinstaub*. 2020 Verfügbar unter <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/luft/fachinformationen/luftqualitaet-in-der-schweiz/feinstaub.html>. (Abgerufen am: 25.02.2020)
15. Schelker, R. & Geisselhardt, P. *Kunststoff-Verwertung Schweiz. Bericht Module 1 und 2*. Redilo, Basel, Schweiz. (2011).

16. Swiss Plastics. *Wirtschaftsdaten 2018*. Swiss Plastics, Aarau, Schweiz. (2019).
17. Baier, U., Haubensak, M., Rüter, R. & Ulmer, S. *BAW vergären & kompostieren?* Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften, BIOSWEET Swiss Competence Center for Energy Research. (2016).
18. Hahladakis, J. N., Velis, C. A., Weber, R., Iacovidou, E. & Purnell, P. An overview of chemical additives present in plastics: Migration, release, fate and environmental impact during their use, disposal and recycling. *J. Hazard. Mater.* **344**, 179–199 (2018).
19. UBA. *OECD Emission Scenario Document: Additives in the Rubber Industry IC 15 ('others'). Exposure Assessment of the environmental Releases of Chemicals in the Rubber Industry*. Volume 4. Updated. Umweltbundesamt, Berlin, Deutschland. (2003).
20. Kfz-Technik. *Reifenaufbau*. (2019). Verfügbar unter: <https://www.kfztech.de/kfztechnik/fahrwerk/reifen/reifenaufbau.htm>. (Abgerufen am: 5.11.2019)
21. PlasticsEurope. *Plastics – the Facts 2017*. Der Verband der Kunststoffherzeuger. (2017).
22. Petrecycling. *Zahlen & Fakten*. 2019 Verfügbar unter: <https://www.petrecycling.ch/de/wissen/zahlen-fakten/kennzahlen>. (Abgerufen am: 29.11.2019)
23. Schleiss, K. *Bericht zur Analyse von Fremdstoffen in Kompost und festem Gärgut der Kompostier- und Vergärungsanlagen in der Schweiz gemäss ChemRRV*. UMWEKO GmbH, Grenchen, Schweiz. (2017).
24. Wältli, C. & Almeida, J. *Ent-Sorgen? Abfall in der Schweiz illustriert*. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Zustand Nr. **1615**: 46 S. (2016).
25. Boucher, J., Faure, F., Pompini, O., Plummer, Z. & Wieser, O. (Micro) plastic fluxes and stocks in Lake Geneva basin. *Trends Anal. Chem.* **112**, 66–74 (2019).
26. Hann, S. et al. *Investigating options for reducing releases in the aquatic environment of microplastics emitted by (but not intentionally added in) products*. Eunomia Research & Consulting Ltd. Bristol, and ICF, London, UK. (2018).
27. Kalberer, A., Kawecki-Wenger, D. & Bucheli, T. *Plastikströme in der Schweizer Landwirtschaft und ihr Risikopotenzial für Böden*. Agrar. Schweiz **10**, 416–423 (2019).
28. Sieber, R., Kawecki-Wenger, D. & Nowack, B. Dynamic probabilistic material flow analysis of rubber release from tires into the environment. *Environ. Pollut. in press*, (2019).
29. Janssen, N. & Harrison, R. M. The Policy Relevance of Wear Emissions from Road Transport, Now and in the Future. An International Workshop Report and Consensus Statement. *Journal Air Waste Manag. Assoc.* **63**, 136–149 (2013).
30. Kreider, M. L., Panko, J. M., Mcate, B. L., Sweet, L. I. & Finley, B. L. Physical and chemical characterization of tire-related particles: Comparison of particles generated using different methodologies. *Sci. Total Environ.* **408**, 652–659 (2010).
31. Mani, T., Hauk, A., Wal, U. & Burkhardt-Holm, P. Microplastics profile along the Rhine River. *Sci. Rep.* **5**, (2015).
32. Mani, T. et al. Repeated detection of polystyrene microbeads in the Lower Rhine. *Environ. Pollut.* **245**, 634–641 (2019).

33. ASTRA. *Strassenabwasser-Behandlungsanlagen (SABA)*. (2019). Verfügbar unter: <https://www.astra.admin.ch/astra/de/home/themen/nationalstrassen/baustellen/bern-wallis/abgeschlossene-projekte/a1-a12-strassenabwasser-behandlungsanlagen--saba-/strassenabwasser-behandlungsanlagen--saba-.html>. (Abgerufen am: 7.2.2019)
34. AWEL. *Belastung des Zürichsees durch die Strassenentwässerung*. AWEL Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft. Baudirektion Kanton Zürich, Zürich. (2009).
35. Cabernard, L., Dursich-Kaiser, E., Vogel, J.-C., Rensch, D. & Niederhauser, P. Mikroplastik in Abwasser und Gewässern. *Aqua Gas* **718**, 78–85 (2016).
36. Mintenig, S., Int-Veen, I., Löder, M. & Gerdt, G. *Mikroplastik in ausgewählten Kläranlagen des Oldenburgisch- Ostfriesischen Wasserverbandes (OOWV) in Niedersachsen*. Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI) Biologische Anstalt Helgoland, Helgoland, 41 pp. (2014).
37. Talvitie, J., Mikola, A., Koistinen, A. & Setälä, O. Solutions to microplastic pollution: Removal of microplastics from wastewater effluent with advanced wastewater treatment technologies. *Water Res.* **123**, 401–407 (2017).
38. Mitrano, D. M. et al. Synthesis of metal-doped nanoplastics and their utility to investigate fate and behaviour in complex environmental systems. *Nat. Nanotechnol.* **14**, 362–368. (2019).
39. Umweltbundesamt. *Plastik in der Donau*. Umweltbundesamt, Wien, Österreich (2015).
40. Bläsing, M. & Amelung, W. Plastics in soil: Analytical methods and possible sources. *Sci. Total Environ.* **612**, 422–435 (2018).
41. BAFU. *Klärschlamm*. (2019). Verfügbar unter: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/abfall/abfallwegweiser-a-z/biogene-abfaelle/abfallarten/klaerschlamm.html>. (Abgerufen am: 5.12.2019)
42. Machado, A., Kloas, W., Zarfl, C., Hempel, S. & Rillig, M. C. Microplastics as an emerging threat to terrestrial ecosystems. *Glob. Chang. Biol.* **24**, 1405–1416 (2017).
43. Rochman, B. C. M. Microplastics research— from sink to source. *Science* **360**. (2018).
44. Bergmann, M., Mützel, S., Primpke, S. & Tekman, M. B. White and wonderful? Microplastics prevail in snow from the Alps to the Arctic. *Sci. Adv.* **5**, 1–11 (2019).
45. Jambeck, J. R. et al. Plastic waste inputs from land into the ocean. *Mar. Pollut.* **347**, (2015).
46. Faure, F., Demars, C., Wieser, O., Kunz, M. & De Alencastro, L. F. Plastic pollution in Swiss surface waters: nature and concentrations, interaction with pollutants. *Environ. Chem.* **12**, 582–591 (2015).
47. Filella, M. & Turner, A. Observational Study Unveils the Extensive Presence of Hazardous Elements in Beached Plastics from Lake Geneva. *Front. Environ. Sci.* **6**, 1–8 (2018).
48. Scheurer, M. & Bigalke, M. Microplastics in Swiss Floodplain Soils. *Environ. Sci. Technol.* **52**, 3591–3598 (2018).

49. Bukowiecki, N. et al. *PM10-Emissionsfaktoren von Abriebspartikeln des Strassenverkehrs (APART)*. Empa: Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt und PSI: Paul Scherrer Institut, Labor für Atmosphärenchemie. (2009).
50. Witzig, C., Pittroff, M., Fiener, P. & Storck, F. *Optimierung der Dichtentrennung und Bestimmung eines Mikroplastik-Tiefenprofils im Zürichsee*. DVGW-Technologiezentrum Wasser Karlsruhe, und Universität Augsburg, Institut für Geographie, Augsburg (2017).
51. Faure, F. & de Alencastro, F. *Evaluation de la pollution par les plastiques dans les eaux de surface en Suisse. Rapport final*. Faculté de l'environnement naturel, architectural et construit (ENAC), Institut d'ingénierie de l'environnement (IIE), Laboratoire central environnemental (GR-CEL), Lausanne (2014).
52. Corradini, F., Bartholomeus, H., Huerta, E., Gertsen, H. & Geissen, V. Predicting soil microplastic concentration using vis-NIR spectroscopy. *Sci. Total Environ.* **650**, 922–932 (2019).
53. He, D. et al. Microplastics in soils: Analytical methods, pollution characteristics and ecological risks. *Trends Anal. Chem.* **109**, 163–172 (2018).
54. Kole, P. J., Löhr, A. J., Belleghem, F. G. A. J. Van & Ragas, A. M. J. Wear and Tear of Tyres : A Stealthy Source of Microplastics in the Environment. *Int. J. Environ. Res. Public Health* **14**, (2017).
55. Braun, U., Jekel, M., Gerdt, G., Ivleva, N. & Reiber, J. *Mikroplastik-Analytik: Probenahme, Probenaufbereitung und Detektionsverfahren*. Diskussionspapier im Rahmen des Forschungsschwerpunktes Plastik in der Umwelt: Quellen, Senken, Lösungsansätze. Eine Initiative des Bundesministeriums für Bildung und Forschung. (2018).
56. Canton Ticino. *Studio sulla presenza di microplastiche nel Lago Ceresio*. Dipartimento del territorio, Seizione della protezione dell'aria dell'acqua e del suolo, Ufficio del monitoraggio ambiente, Bellinzona, Svizzera. (2018).
57. Scheurer, M. & Bigalke, M. Microplastics in Swiss Floodplain Soils. *Environ. Sci. Technol.* **52**, 3591–3598 (2018).
58. Sommer, F. et al. Tire Abrasion as a Major Source of Microplastics in the Environment. *Aerosol Air Qual. Res.* **18**, 2014–2028 (2018).
59. Rummel, C. D., Jahnke, A., Gorokhova, E., Kühnel, D. & Schmitt-Jansen, M. Impacts of biofilm formation on the fate and potential effects of microplastic in the aquatic environment. *Environ. Sci. Technol. Lett.* **4**, 258–267 (2017).
60. Zubris, K. A. V & Richards, B. K. Synthetic fibers as an indicator of land application of sludge. *Environ. Pollut.* **138**, 201–211 (2005).
61. Lwanga, E. H. et al. Microplastics in the Terrestrial Ecosystem: Implications for Lumbricus. *Environ. Sci. Technol.* **50**, 2685–2691 (2016).
62. Maass, S., Daphi, D., Lehmann, A. & Rillig, M. Transport of microplastics by two collembolan species. *Environ. Pollut.* **225**, 456–459 (2017).
63. Dinkel, F. & Kägi, T. *Ökobilanz Entsorgung BAW*. Carbotech, Basel, Schweiz. (2013).
64. Burgstaller, M., Potrykus, A. & Weissenbacher, J. *Gutachten zur Behandlung biologisch abbaubarer Kunststoffe*. BiPRO GmbH - Part of Ramboll, München, Deutschland. (2018).

65. Wiesinger, H. et al. The identity of oxo-degradable plastics and their use in Switzerland. (*unveröffentlicht*) (2019).
66. Umweltbundesamt. *Mikroplastik: Entwicklung eines Umweltbewertungskonzepts*. Umweltbundesamt, Dessau-Rosslau, Deutschland. (2016).
67. VDI. *Plastik in der Umwelt – Quellen, Senken und Lösungsansätze*. VDI Technologiezentrum GmbH, Düsseldorf, Deutschland. (2015).
68. Wright, S. L. & Kelly, F. J. Plastic and Human Health: A Micro Issue? *Environ. Sci. Technol.* **51**, 6634–6647 (2017).
69. Rist, S., Carney, B., Hartmann, N. B. & Karlsson, T. M. Science of the Total Environment. A critical perspective on early communications concerning human health aspects of microplastics. *Sci. Total Environ.* **626**, 720–726 (2018).
70. EFSA CONTAM PANEL. Presence of microplastics and nanoplastics in food, with particular focus on seafood. *EFSA J.* **14**, (2016).
71. WHO. *Microplastics in drinking-water*. World Health Organization, Geneva, Switzerland. (2019).
72. Schwabl, P. *Assessment of microplastic concentrations in human stool*. Presentation held at United European Gastroenterology Week. Div. Gastroenterology & Hepatology, Medical University of Vienna. (2018)
73. Amato, F. et al. Urban air quality: The challenge of traffic non-exhaust emissions. *J. Hazard. Mater.* **275**, 31–36 (2014).
74. Rist, S., Carney, B., Hartmann, N. B. & Karlsson, T. M. A critical perspective on early communications concerning human health aspects of microplastics. *Sci. Total Environ.* **626**, 720–726 (2018).
75. Burns, E. E. & Boxall, A. B. A. Microplastics in the Aquatic Environment: Evidence for or Against Adverse Impacts and Major Knowledge Gaps. *Environ. Toxicol. Chem.* **37**, 2776–2796 (2018).
76. Zhao, S., Zhu, L. & Li, D. Microscopic anthropogenic litter in terrestrial birds from Shanghai, China: Not only plastics but also natural fibers. *Sci. Total Environ.* **550**, 1110–1115 (2016).
77. Lwanga, E. H. et al. Field evidence for transfer of plastic debris along a terrestrial food chain. *Sci. Rep.* **7**, 1–7 (2017).
78. Rodriguez-seijo, A. et al. Histopathological and molecular effects of microplastics in *Eisenia andrei* Bouché. *Environ. Pollut.* **220**, 495–503 (2017).
79. Zhu, D. et al. Exposure of soil collembolans to microplastics perturbs their gut microbiota and alters their isotopic composition. *Soil Biol. Biochem.* **116**, 302–310 (2018).
80. Adam, V., Yang, T. & Nowack, B. Toward an Ecotoxicological Risk Assessment of Microplastics: Comparison of Available Hazard and Exposure Data in Freshwaters. *Environ. Toxicol. Chem.* **38**, 436–447 (2019).
81. Besseling, E. et al. Quantifying ecological risks of aquatic micro- and nanoplastic. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* **49**, 32–80, (2018).

82. Bakir, A., O'Connor, I. A., Rowland, S. J., Hendriks, A. J. & Thompson, R. C. Relative importance of microplastics as a pathway for the transfer of hydrophobic organic chemicals to marine life. *Environ. Pollut.* **219**, 56–65 (2016).
83. Koelmans, A. A., Bakir, A., Burton, A. & Janssen, C. R. Microplastic as a Vector for Chemicals in the Aquatic Environment: Critical Review and Model-Supported Reinterpretation of Empirical Studies. *Environ. Sci. Technol.* **50**, 3315–3326 (2016).
84. Jahnke, A. et al. Impacts of Weathering Plastic in the Marine Environment. *Environ. Sci. Technol.* **4**, 85–90 (2017).
85. Rummel, C.D. et al. Effects of Leachates from UV-Weathered Microplastic in Cell-Based Bioassays. *Environ. Sci. Technol.* **53**, 9214–9223 (2019).
86. Oekotoxzentrum (2015). Mikroplastik in der Umwelt, Infoblatt. Schweizerisches Zentrum für angewandte Ökotoxikologie, EAWAG-EPFL.