



Unterschätzte Eintragspfade:
Langzeitbeobachtungen zeigen
Mengen, Zusammensetzung,
Quellen und Umweltfaktoren
von Makroabfällen im Rhein

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|----|
| 1. Informationen und Forderungen des KRAKE e.V. (Vorwort) | |
| Informationen und Forderungen | 3 |
| | |
| 2. Kurzfassung der Studie: The river Rhine transports around 4,000 tonnes of macrolitter towards the North Sea each year | |
| Kurzfassung der Studie | 5 |
| Wichtige Punkte | 8 |
| Vorgehen, Datenanalyse und Hochrechnung | 10 |
| Ergebnisse | 13 |
| Einordnung der Ergebnisse und Ausblick | 19 |
| Referenzen | 22 |

Informationen und Forderungen des KRAKE e.V.

Die Vermüllung wird anschaulicher, wenn man konkrete Müllteile innerhalb einer Kategorie betrachtet und linear auf den Rhein hochrechnet (dies wurde in der Studie zusammengefasst).

- 548.000 Plastikflaschen kleiner als 0,5 Liter schwimmen jährlich an Köln vorbei. Davon sind 382.000 Pfandflaschen, davon 113.000 vom Unternehmen Coca-Cola. Außerdem 138.000 kleine Schnaps-Plastikflaschen ohne Pfand.
- 222.000 Plastikflaschen größer als 0,5 Liter treiben jährlich an Köln vorbei. 95% (211.000) sind Pfandflaschen und 42.000 vom Unternehmen Coca-Cola.
- 1.400.000 Glasflaschen sind im Jahr 2024 laut der Auswertung im Rhein an Köln vorbeigeschwommen.
 - 26% dieser Flaschen sind Pfandflaschen (370.000). Davon sind 308.000 Bierflaschen;
 - 30% der Flaschen sind Wein oder Sektflaschen (429.000).
 - 24% der Glasflaschen sind kleine Schnapsflaschen (339.000).
 - 13% sind große Schnapsflaschen (187.000).
 - 100.000 kleine und große Glas-Schnapsflaschen sind der Marke Jägermeister zuzuordnen.
- 1.170.000 Süßigkeiten-Verpackungen schwimmen jährlich an Köln vorbei.
- 428.000 Feuerzeuge schwimmen jährlich an Köln vorbei.
- 63.000 Schuhe schwimmen jährlich an Köln vorbei.
- 56.000 Capri Sun (oder ähnliche Produkte) schwimmen jährlich an Köln vorbei.
- Bezüglich der viel diskutierten Flaschendeckel, die inzwischen an der Flasche befestigt in den Handel kommen, werden die Daten aktuell noch ausgewertet.
- Anhand der industriell gefertigte Kunststoffpellets und Plastikpartikel, die wir als Beifang in der RheinKrake fanden, müssen wir von Millio-

nen solcher Teile ausgehen, die ebenfalls über den Rhein in die Nordsee gelangen.

Forderungen 1: Grenzwerte, Monitoring, Maßnahmen gegen Mülleintrag und Einsammeln.

Solange keine effektiven Maßnahmen umgesetzt sind, die verhindern, dass Müll in die Umwelt gelangt, hat die Gesellschaft die Verantwortung, den verursachten Müll einzusammeln. Der Bund muss endlich Verantwortung für die Sauberkeit des Rheins übernehmen. Der Ausstieg aus der Vermüllung der Flüsse, Meere und der Natur muss eingeleitet werden. Hierfür benötigen wir Grenzwerte (z.B. wie bei Nord- und Ostsee [OSPAR & HELCOM]), ein Monitoring und effektive Maßnahmen zur Vermeidung sowie zum Einsammeln benötigt. Finanzieren ließe sich das über den Einwegkunststofffonds (EWKFond) und die EU-Verpackungsverordnung, bei denen die Kosten direkt den Hauptverursachern auferlegt werden. So tragen die Produkte die Kosten der Sammlung oder verschwinden vom Markt.

Wenn der Bund nicht proaktiv Verantwortung übernimmt, müssen die zuständigen Behörden für die Unterhaltungslast (in Köln die Bezirksregierung Köln) hier Maßnahmen vorgeben. Der EU-Grenzwert für Müll an Küsten ist 20 Teile auf 100 Metern. In Köln haben wir bis zu 600 Teile auf 2 Metern gefunden.

Forderungen 2: Fördertopf für Clean Up Vereine/ Events/Aktionen finanziert durch verursachende Produkte

Es gibt Müllgebühren, Recyclinggebühren, Abgaben für den Grünen Punkt, den EWKFond. Das Geld fließt häufig in die Kommunen und die öffentlichen Entsorgungsträger. Das ist gut so. Aber wir Müllsammler übernehmen die Orte, wo es anstrengend ist hin zu gehen. Und zahlen auch noch selbst für Müllsäcke oder dürfen den Müll nicht mal in der Kommune abgeben. Uns hat die Stadtreinigung immer gesagt, da dürfen wir

nicht hin, zu aufwendig, teuer und gefährlich ...
Nach Schätzungen gelangen 2-4% des Mülls in die Umwelt. Dementsprechend sollten auch 2-4% des Geldes uns zustehen, bzw. dem Verkehrsministerium wenn es den Rhein übernimmt.

Wir schlagen vor, einen Fördertopf für Clean-Up-Vereine/Events/Aktionen aufzusetzen, verwaltet durch Ihre Ministerien oder andere Organisationen. Aus diesem Fördertopf können dann die entsprechenden Vereine ihre Arbeiten organisieren. Auch hier geht es darum, dass die Kosten direkt den Hauptverursachern auferlegt werden. So tragen die Produkte die Kosten der Sammlung oder verschwinden vom Markt.

Gefördert
durch:

wepa
STIFTUNG

Kurzfassung der Studie

Kurzfassung von: The river Rhine transports around 4,000 tonnes of macrolitter towards the North Sea each year

Autoren: Nina Gnann¹, Katharina Höreth², Nicolas Schweigert³, Mariele Evers², Thomas A. Ternes⁴, Leandra Hamann⁵

¹ Department of Geosciences, Eberhard Karls University Tübingen, 72070 Tübingen, Germany

² Department of Geography, University of Bonn, 53115 Bonn, Germany

³ K.R.A.K.E. (Kölner Rhein-Aufräum-Kommando-Einheit) e.V., 51105 Cologne, Germany

⁴ Federal Institute of Hydrology, Am Mainzer Tor 1, Koblenz 56068, Germany

⁵ Bonn Institute for Organismic Biology, Section 2, Animal Diversity, University of Bonn, 53121 Bonn, Germany

Jahr: 2026

Publiziert in: Communications Sustainability

DOI: 08. Januar 2026; <https://doi.org/10.1038/s44458-025-00007-5>

Einleitung

Unsachgemäße Müllentsorgung führt weltweit dazu, dass sich immer mehr Abfall – vor allem Plastik¹⁻³ – in Flüssen, Seen und Meeren ansammelt^{4,5}. Wenn sich dieser Trend fortsetzt, wird sich die Menge an Plastikmüll in Gewässern bis zum Jahr 2060 voraussichtlich verdreifachen⁶. Das hat gravierende Folgen: Tiere verheddern sich im Müll oder fressen ihn, die menschliche Gesundheit kann beeinträchtigt werden, und verstopfte Abwassersysteme erhöhen das Risiko für Überschwemmungen^{7,8}.

Um solche Umweltbelastungen zu verhindern, müssen Maßnahmen wie Müllvermeidung, Recycling und Aufräumaktionen durchgeführt werden. Zuverlässige Daten zum Müll helfen bei der Maßnahmenfindung. Es ist wichtig zu wissen, woher der Makroabfall kommt, wie viel davon in die Umwelt gelangt und wie wirksam Gegenmaßnahmen sind^{1,9}.

Über die Flüsse gelangt ein großer Teil des Mülls in die Meere. Deshalb eignen sich Flüsse, besonders gut, um den Mülleintrag zu überwachen^{10,11}. Bisherige Methoden – etwa visuelle Beobachtungen oder das Abfangen von Müll mit Netzen oder Barrieren – haben jedoch

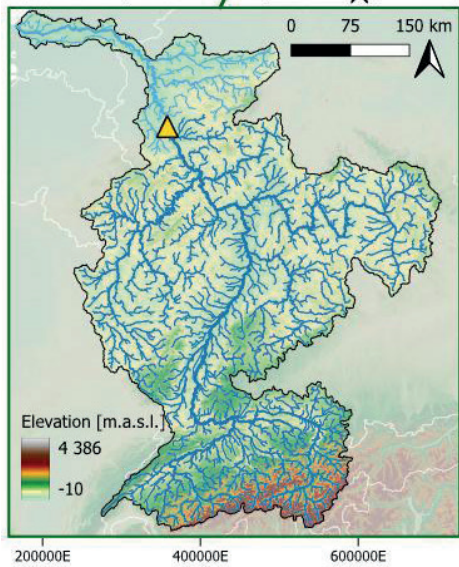
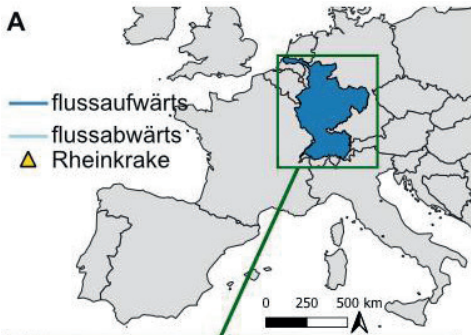
Nachteile: Sie sind entweder ungenau, weil sie vom Wetter oder der Sicht abhängen¹⁰, oder sie sind sehr aufwendig und teuer.

In dieser Studie wird die Müllbelastung des Rheins untersucht. Der Rhein gehört zu den größten schiffbaren Flüssen Europas. In seinem Einzugsgebiet leben rund 49 Millionen Menschen¹². Für 16 Monate wurde eine eigens entwickelte Müllfalle namens RheinKrake (RK) im Rhein eingesetzt, um den schwimmenden und unter der Wasseroberfläche treibenden Makroabfall kontinuierlich zu sammeln und anschließend auszuwerten (Abbildung 1).¹²

Die RK wurde alle zwei Wochen von Freiwilligen im Rahmen eines Bürgerforschungsprojekts geleert. Der gesammelte Müll wurde nach internationalen Richtlinien sortiert und in 183 Kategorien eingeteilt¹³. Zusätzlich wurden Herkunft, Nutzung und mögliche Eintragsquellen untersucht, um den Müll mit kulturellen und Umweltfaktoren in Verbindung zu bringen. Auf Basis eines Jahres ohne Hochwasser wurde schließlich geschätzt, wie viel Makroabfall (MA) der Rhein jährlich in Richtung Nordsee transportiert.

1

A



B

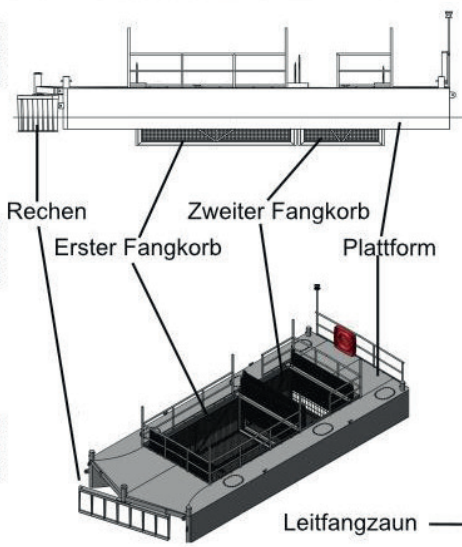


Abbildung 1: Standort und Aufbau der RheinKrake (RK). A) Standort der RK (gelbes Dreieck) bei Köln im Rheineinzugsgebiet (blau), das sich in ein oberes (dunkelblau) und ein unteres (hellblau) Einzugsgebiet unterteilt¹⁴⁻¹⁶. B) Konstruktionszeichnung und Fotos der angefertigten RK (spiegelverkehrt) mit Eingang auf der linken Seite. Makroabfall (MA) wird in den beiden Körben zurückgehalten. Der schwimmende Leitfangzaun ist mit dem Ufer verbunden und leitet MA zur RK.

Wichtige Punkte

Wichtige Punkte

Der Rhein transportiert **jährlich rund 27 bis 42 Millionen Makroabfall-Objekte** in Richtung Nordsee – das entspricht etwa 3 000 bis 4 700 Tonnen.

Etwa **70 Prozent des Abfalls bestehen aus Kunststoffen**, vor allem aus Einwegprodukten wie Feuerwerksresten, Verpackungen, Flaschenverschlüssen und Snack-Folien.

Steigende Wasserstände (z.B. nach Regen oder Hochwasser) **führen zu einem höheren Abfallvorkommen** im Rhein, da mehr Müll vom Ufer gespült wird wird.

Mit gezielten Maßnahmen gegen die 15 häufigsten Abfallarten **ließe sich die Gesamtmenge** theoretisch um über **70 Prozent reduzieren**.

Die Rheinkrake hat sich als **zuverlässiges Bürgerforschungs-Instrument** erwiesen, das ein Jahr lang kontinuierlich Daten lieferte – ein Modell für zukünftige, international vergleichbare Fluss-Monitoring-Projekte.

Vorgehen, Datenanalyse und Hoch- rechnung

Vorgehen, Datenanalyse und Hochrechnung

Die RheinKrake besteht aus zwei hintereinander liegenden Edelstahlkörben mit einer Breite von insgesamt 3 Metern, die mit einer schwimmenden Barriere („Boom“) mit dem Land verbunden sind (Abbildung 1). Dieser leitet den vorbeifließenden Müll gezielt in die Körbe, die bis zu 80 cm tief im Wasser liegen. So können auch kleine Gegenstände bis zu einer Größe von 1 cm gesammelt werden. Die Konstruktion wurde von der Umweltorganisation K.R.A.K.E. – Kölner Rhein-Aufräum-Kommando-Einheit e.V. – entwickelt und wird regelmäßig von Freiwilligen betreut. Sie dient nicht nur der Forschung, sondern auch der Umweltbildung und Einbindung der Bevölkerung.

Zwischen September 2022 und Januar 2024, wurde die Müllfalle alle zwei Wochen geleert (Abbildung 2). Dabei sammelten und sortierten Freiwillige den Abfall nach einem international anerkannten Müll-Auswertungssystem¹³. Insgesamt wurden 183 Müllkategorien ausgewertet – etwa Plastikflaschen, Verpackungen, Gummiteile oder Metallobjekte – und zusätzlich nach Material, Nutzung, Herkunft und Verbrauchergruppen klassifiziert. Jedes Objekt wurde gewogen, vermessen, fotografiert und in einer Smartphone-App erfasst, die eine sofortige digitale Speicherung und wissenschaftliche Kontrolle ermöglichte.

Um das Müllaufkommen besser beurteilen zu können wurden neben den Müllproben auch Umwelt- und Wetterdaten hinzugezogen: Wasserstand, Durchfluss, Windgeschwindigkeit, Temperatur, Regenmenge und Sonnenscheindauer¹⁷⁻¹⁹. Zusätzlich wurden kulturelle Ereignisse wie Karneval, Marathon oder Silvester notiert, um Zusammenhänge zu prüfen.

Für die statistische Auswertung wurde ein Zeitraum von genau einem Jahr ausgewählt. In diesem Zeitraum gab es keine außergewöhnlichen Hochwasserereignisse. Die Daten wurden auf Zusammenhänge zwischen Müllmenge, Jahreszeit und Umweltbedingungen untersucht²⁰. Dabei kamen robuste statistische Verfahren zum Einsatz, die auch Ausreißer berücksichtigten.

Um abzuschätzen, wie viel Makroabfall der Rhein insgesamt transportiert, wurden verschiedene mathematische Hochrechnungen vorgenommen²⁰. Sie berücksichtigen die Fließgeschwindigkeit, den Wasserstand und die Verteilung des Mülls im Flussquerschnitt. So konnte die durchschnittliche Müllkonzentration auf den gesamten Fluss hochgerechnet werden. Besonderes Augenmerk lag auf Einflussfaktoren wie Auftrieb, Strömung und Hochwasser: Manche Müllteile treiben an der Oberfläche, andere sinken zeitweise ab oder werden bei steigenden Wasserständen wieder aufgewirbelt. Da Hochwasser eine große Rolle spielt, wurde ein sogenannter „Anstiegfaktor“ eingeführt, um den Einfluss von steigendem Durchfluss auf die Müllmobilisierung zu berücksichtigen.

Schließlich wurde die ermittelte Müllmenge auf das gesamte Einzugsgebiet des Rheins hochgerechnet, um zu berechnen, wie viel Makroabfall jährlich Richtung Nordsee transportiert wird. Dabei wurden sowohl die Zahl der Gegenstände als auch deren Masse pro Einwohner im gesamten Flusseinzugsgebiet berücksichtigt.

2



Abbildung 2: A) RheinKrake (RK) mit Leitfangzaun, der mit dem Ufer verbunden ist. B) Eingang der RK mit Rechen, die große Äste und Bäume zurückhalten. C) Der Leitfangzaun leitet MA zum Eingang der RK. D) Die RK ist sehr voll und ein Teil der Makroabfälle (MA) befindet sich bereits in den Auffangkörben (Bildnachweis: Simon Taal). E) Die RK wird alle zwei Wochen mit einem Boot angefahren, um sie zu reinigen und Proben zu entnehmen (Bildnachweis: Thorsten Kniewel). F) Freiwillige tragen Wathosen, um den MA aus dem Korb zu holen und in Plastikboxen zu sammeln. Totes Holz und nicht anthropogene Abfälle wurden während der Reinigung entfernt und nicht zum Auswertungsort transportiert. G) Nachdem der MA an Land transportiert wurde, sortieren und kategorisieren Freiwillige jeden Gegenstand mit Hilfe einer speziell entwickelten App. H) Tote und lebende Tiere werden ebenfalls gemessen und überwacht. I) Feuerzeuge sind ein häufig vorkommender MA-Gegenstand, der leicht zu identifizieren ist. J) Nicht geschäumte Kunststofffragmente sind die dritthäufigste Kategorie, die im Rhein gefunden wird. K) Auch wenn Gegenstände <3,818 cm nicht systematisch zurückgehalten werden, findet man oft kleine Abfälle wie Kunststoffgranulat in der RK.

Ergebnisse

Ergebnisse

Insgesamt sammelte die RheinKrake während des Untersuchungszeitraums vom September 2022 bis Januar 2024 20.339 Makroabfall-Objekte, davon 17.523 im statistischen Jahr (November 2022 bis November 2023). Das Gewicht der Objekte ohne Störeinflüsse, wie etwa nasse Kleidung oder mit Wasser gefüllte Flaschen, betrug rund 1,1 Tonnen im statistischen Jahr, was einem Durchschnittsgewicht von 111 Gramm pro Objekt entspricht.

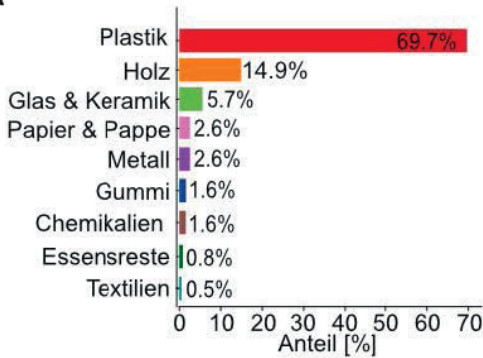
Plastik war mit fast 70 Prozent der häufigste Materialtyp, gefolgt von bearbeitetem Holz (15 %), Glas und Keramik (6 %), Papier und Karton (3 %), Metall (3 %), Gummi und Chemikalien (je 2 %) sowie Lebensmittelresten und Textilien (je unter 1 %, siehe Abbildung 3A). Unter den 183 Müllkategorien wurden 145 tatsächlich im Rhein gefunden, wobei die 15 häufigsten Kategorien 74 Prozent des gesamten Mülls ausmachten (Abbildung 3B). Besonders häufig waren kleine Styroporstücke, Holzreste von Feuerwerkskörpern, Plastikfragmente, Glasflaschen und Plastikdeckel von Getränken. Rund 71 Prozent aller Funde waren kleiner als 20 cm (Abbildung 3C).

Etwa 40 Prozent des Mülls bestand aus Einwegprodukten, meist aus Plastik. Darunter fielen vor allem Feuerwerksreste, Getränkdeckel sowie Verpackungen von Snacks und Süßigkeiten. Wiederverwendbare (Mehrweg-)Objekte machten nur rund 8 Prozent aus, während 21 Prozent sowohl Einweg- als auch Mehrwegcharakter haben konnten (z. B. Glasflaschen oder Blumentöpfe). Etwa 30 Prozent des Mülls ließen sich keiner Nutzung eindeutig zuordnen, meist handelte es sich um Fragmente (Abbildung 3D).

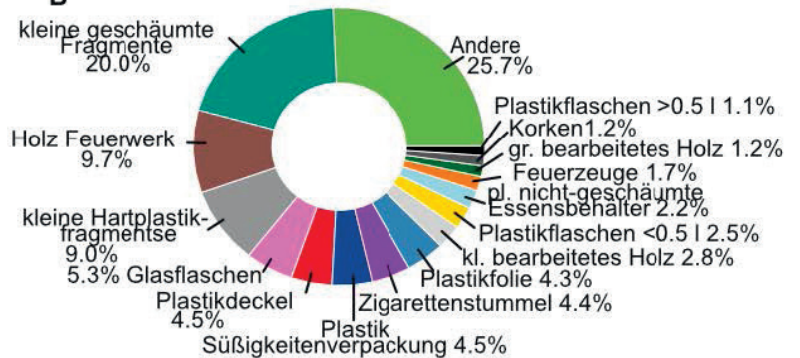
Hinsichtlich der Nutzung stammten die meisten Objekte aus privatem Konsum (56 %). Dazu gehören Abfälle von Getränken, Feuerwerk, Essen oder Rauchen (Abbildung 3F). Nur ein kleiner Anteil ließ sich industriellen (6 %) oder infrastrukturellen Quellen (2 %) zuordnen. Fast der gesamte Abfall – über 99 Prozent – kam vom Land, nicht aus dem Wasser (z. B. Fischerei). Verpackungen machten allein ein Drittel des gesamten Mülls aus, Deckel weitere 7 Prozent.

3

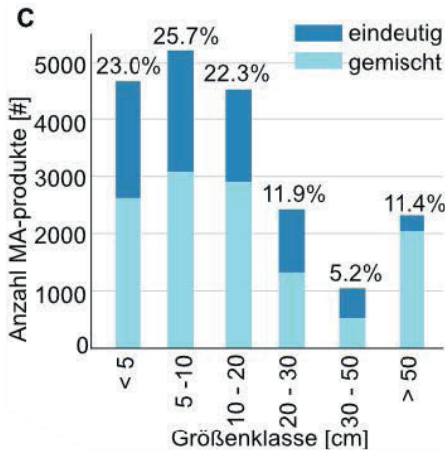
A



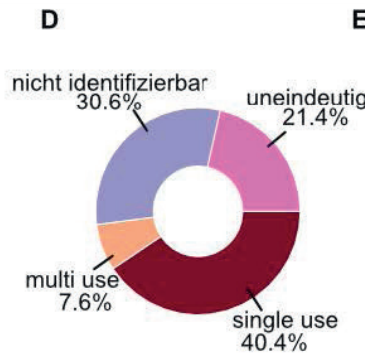
B



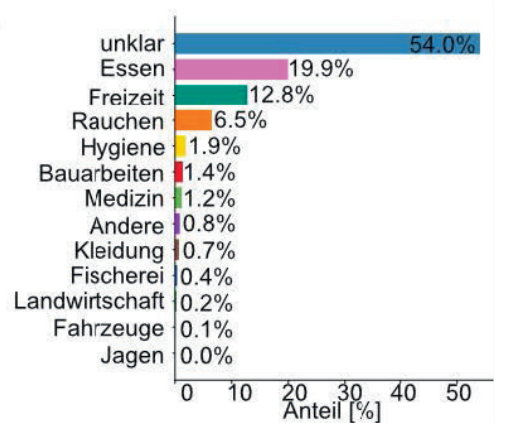
C



D



E



F

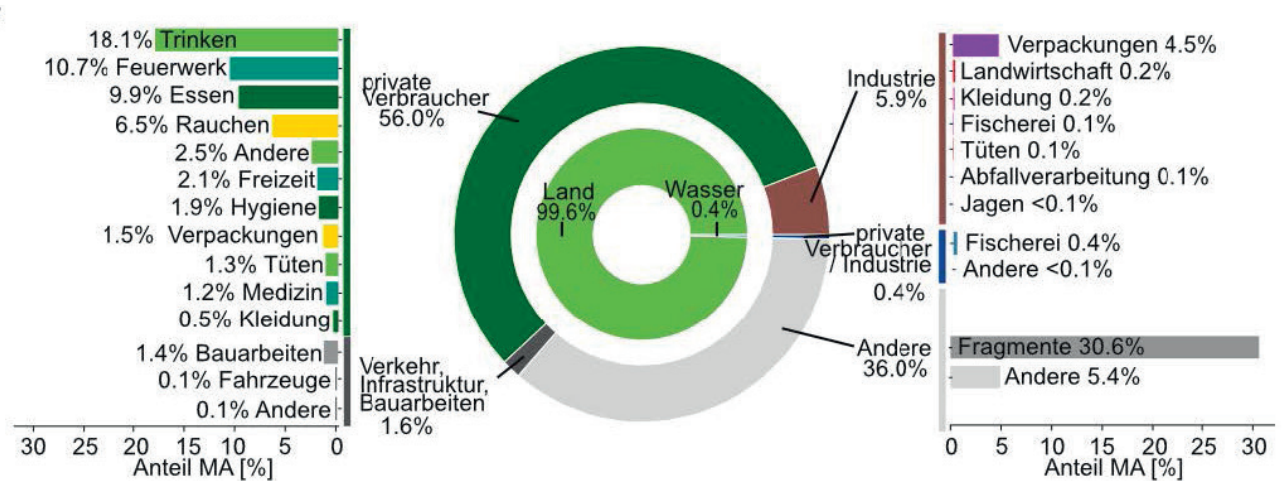
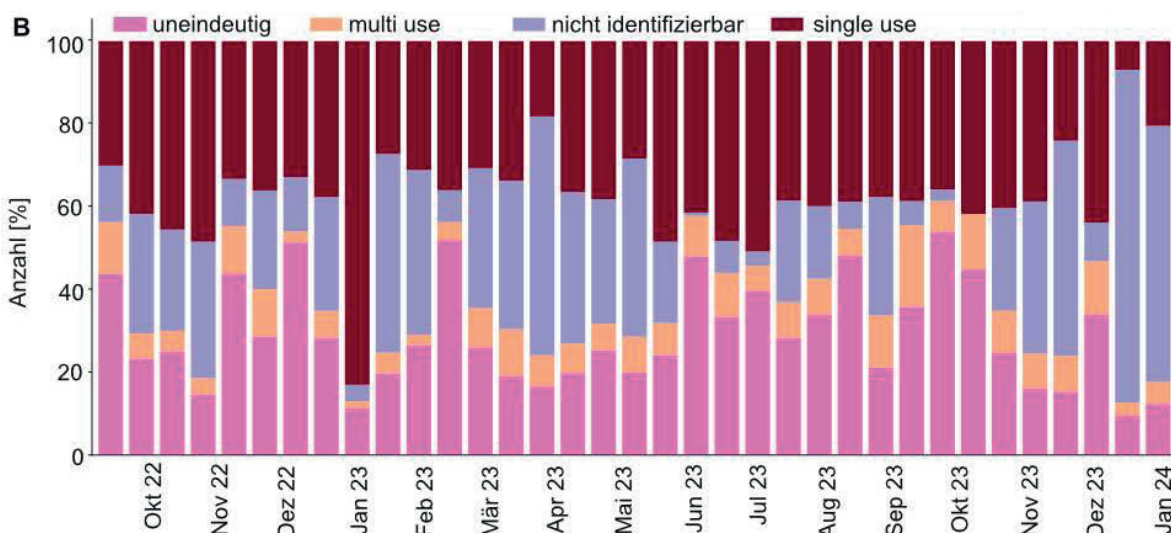
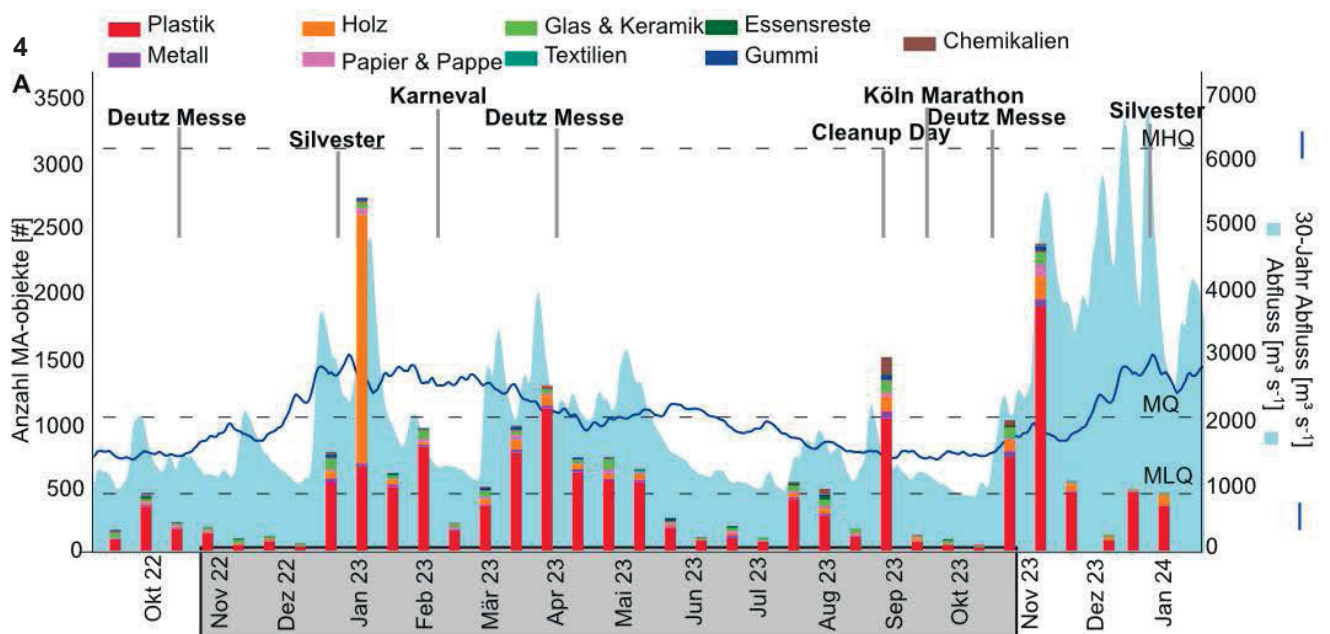


Abbildung 3: Analyse der Makroabfall (MA)-Objekte nach Anzahl (20.339 Stück), die während des Probenahmezeitraums von 16 Monaten (24.09.2022 – 13.01.2024) in der RheinKrake (RK) zurückgehalten wurden. A) Materialzusammensetzung von MA. B) Die 15 häufigsten MA-Kategorien. C) Anzahl MA und prozentualer Anteil nach sechs Größenklassen. Die eindeutige Klasse entspricht Objekten der zugewiesenen Größenklasse, während die gemischte Größenklasse Objekte dieser Größenklasse und aller kleineren Größen enthält. D) Anteil von MA basierend auf der Nutzungsdauer. E) MA-Verwendung, gruppiert nach der MA-Liste, die von der MSFD Technical Group on Marine Litter (MSFD TG ML) in enger Zusammenarbeit mit den EU-Mitgliedstaaten und der Regional Sea Convention erstellt wurde. F) MA gruppiert nach der in dieser Studie²⁰ entwickelten angepassten Klassifizierung, einschließlich drei Ebenen, die Quelle, Sektoren und Verwendung beschreiben.

Die Müllmenge schwankte im Jahresverlauf stark (Abbildung 4A): Pro Sammeltermin wurden zwischen 67 und 2724 Objekte erfasst. Der Höchstwert trat kurz nach Silvester 2022/2023 auf – zu diesem Zeitpunkt fanden sich fast 2000 Feuerwerksreste, etwa das Dreifache des Durchschnitts. Im darauffolgenden Jahr war der Effekt deutlich geringer (59 Stück). Hier waren auch die Umweltbedingungen sowie die Situation an der RK anders als im Vorjahr. Andere

Großereignisse wie Karneval oder Marathon zeigten dagegen keine messbaren Einflüsse.

Der Anteil von Plastik blieb das ganze Jahr über hoch (Abbildung 4A). Besonders häufig waren kleine Fragmente, deren Anteil je nach Sammeldatum stark schwankte. Ebenfalls regelmäßig gefunden wurden Abfälle aus den Bereichen Getränke, Lebensmittel und Verpackungen (Abbildung 4C).



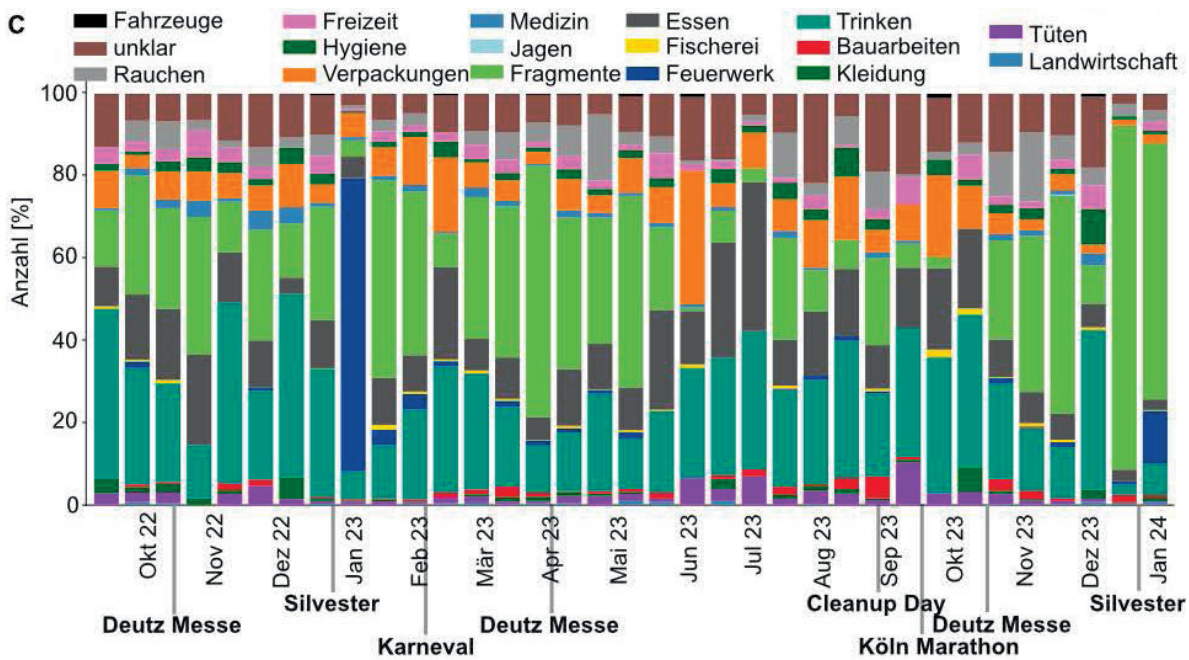


Abbildung 4: Makroabfall (MA)-Mengen über 16 Monate für jedes Probenahmedatum in Bezug auf Abfluss und kulturelle Ereignisse. A) MA-Zusammensetzung nach Material und Abfluss (hellblau)¹⁹. Die dunkelblaue Linie stellt den mittleren Abfluss an der Messstation Köln aus 30 Jahren (1993 bis 2022) dar¹⁷. Die gepunkteten Linien stellen den mittleren Hochwasserabfluss (MHQ), den mittleren Abfluss (MQ) und den mittleren Niedrigwasserabfluss (MNQ) dar. Zu beachten ist, dass der Leitfangzaun vor dem 19.11.2022 und nach dem 18.11.2023 (Statistisches Jahr) entfernt wurde. Das hellgraue Feld auf der x-Achse gibt das Statistikjahr an. B) MA-Zusammensetzung nach Verwendungsart für jedes Probenahmedatum. C) MA-Zusammensetzung nach Quellen für jedes Probenahmedatum.

Von den Umweltfaktoren zeigte vor allem der Anstieg des Wasserstands einen starken Zusammenhang mit der Müllmenge (Abbildung 5). Je stärker der Pegel stieg, desto mehr und vielfältiger Makroabfall wurde erfasst -

insbesondere kleine Objekte (1–5 cm). Wind und Regen hatten einen mäßigen Einfluss. Im Winter (November bis April) wurde signifikant mehr Müll gefunden als im Sommer.

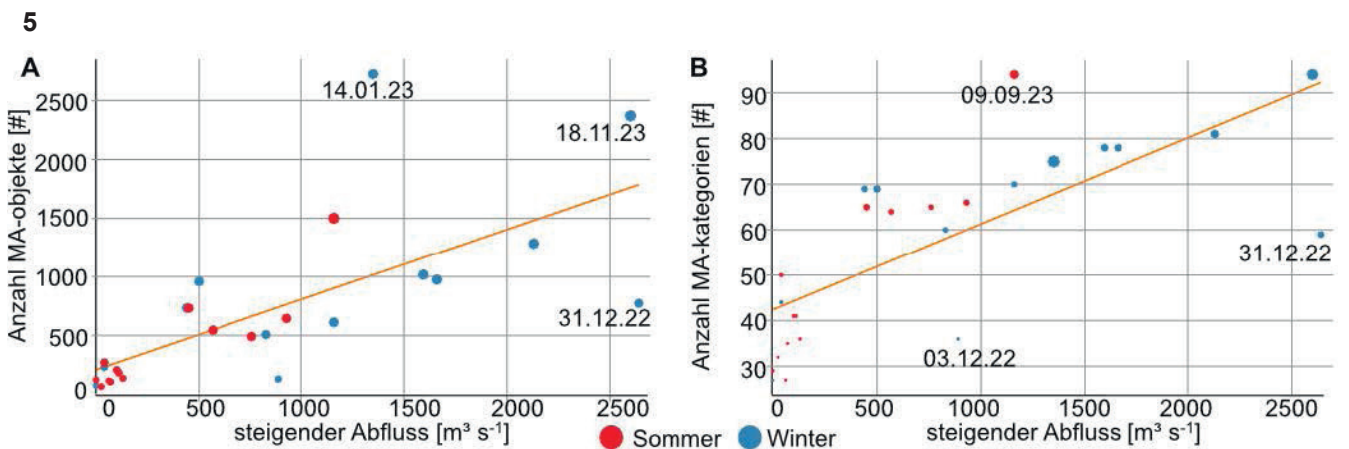


Abbildung 5: Beziehung zwischen Makroabfall (MA) und steigender Abflussmenge. A) Anzahl der MA-Elemente (#) bei steigender Abflussmenge ($p = 0,83, p < 0,05$). B) Anzahl der MA-Kategorien bei steigender Abflussmenge ($p = 0,81, p < 0,05$) für jedes Probenahmedatum (35 Probenahmedaten, 20.339 ML-Elemente). Rote Punkte stehen für Sommer-Probenahmedaten, schwarze Punkte für Winter-Probenahmedaten. Ausreißer sind mit dem jeweiligen Probenahmedatum gekennzeichnet.

Im Durchschnitt transportierte der Rhein bei Köln rund 53.000 Makroabfall-Objekte pro Tag. Die RheinKrake filterte täglich etwa 127.000 m³ Wasser und fing dabei 48 Objekte mit einem Gewicht von 5,4 kg – das entspricht einer durchschnittlichen Konzentration von 0,00036 Objekten pro Kubikmeter (Abbildung 6A).

Hochgerechnet auf die gesamte Flussbreite

ergibt sich ein jährlicher Abfluss von etwa 1,8 Millionen Objekten bzw. über 200 Tonnen Makroabfall. Im linearen bzw. gewichteten Hochrechnungsszenario wird ein Gewicht von 2169 bis 3391,8 Tonnen pro Jahr im Rhein in Köln erreicht (Abbildung 6B). Hochgerechnet auf das gesamte Flusseinzugsgebiet transportiert der Rhein jährlich zwischen 3000 und 4700 Tonnen Makroabfall Richtung Nordsee.

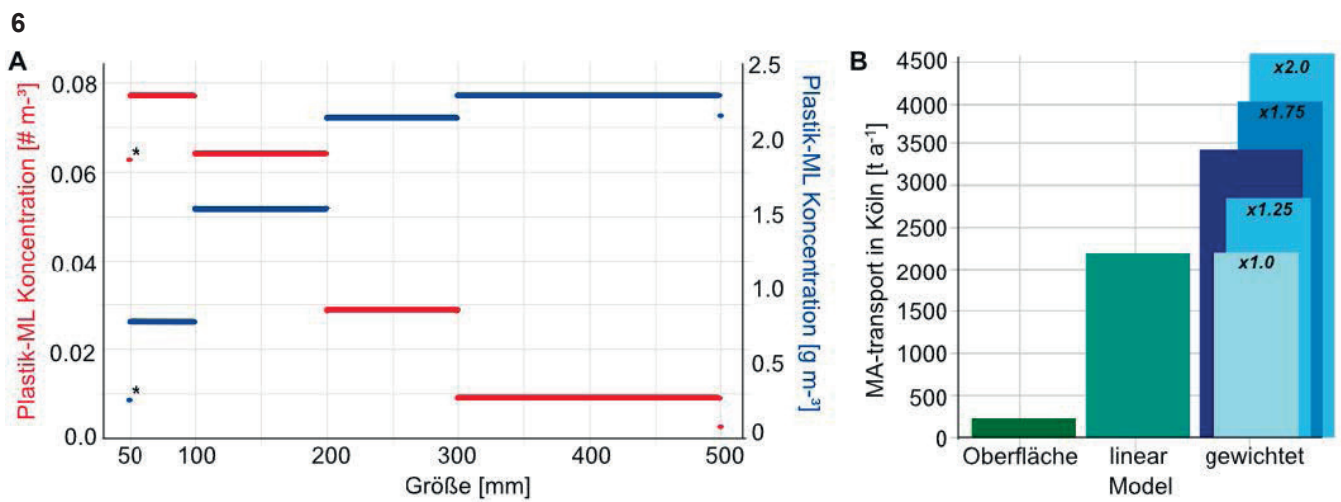


Abbildung 6: Verteilung von Plastik-Makroabfall (MA) in der RheinKrake (RK) und Gesamt-MA-Abfluss an der Messstation Köln mit verschiedenen Extrapolationsszenarien. A) MA-Plastikkonzentration basierend auf Anzahl m⁻³ (rot) und Masse m⁻³ (blau) für jede Größenklasse. Das Sternchen (*) zeigt an, dass diese Größenklasse kleiner ist als die systematische Probenahmegröße und die berechnete Konzentration für <50 mm wahrscheinlich unterschätzt wird. B) MA-Abfluss in Köln basierend auf den drei verschiedenen Extrapolationsmodellen. Das gewichtete Extrapolationsmodell wurde mit einem vertikalen Verteilungsfaktor von 1 bis 2 in Schritten von 0,25 (hellblaue Balken) um den Basiswert von 1,5 (dunkelblauer Balken) berechnet.

Einordnung der Ergebnisse und Ausblick

Einordnung der Ergebnisse und Ausblick

Der Rhein transportiert pro Jahr schätzungsweise 27,0 bis 42,2 Millionen Makroabfallteile in Richtung Nordsee. Das entspricht etwa 3 010,5 bis 4 707,5 Tonnen (siehe Abbildung 6B). Frühere Schätzungen für den Rhein lagen deutlich darunter^{11,21-23}. Ein Hauptgrund für die Abweichung sind methodische Unterschiede: Unsere Messungen liefen durchgehend über 52 Wochen, während frühere Arbeiten oft nur kurze Zeiträume betrachteten. Außerdem ergab sich bei uns ein höheres Durchschnittsgewicht pro Kunststoffteil (24,3 Gramm statt 5,38 Gramm in früheren Studien), was die Gesamtmenge nach oben beeinflusst.

Die Ergebnisse schwanken stark, je nachdem wie, wo und wie lange gemessen wird. Besonders die Verteilung des Abfalls über die Tiefe des Flusses (von der Oberfläche in tiefere Schichten) beeinflusst Hochrechnungen spürbar: Schon kleine Änderungen dieses Faktors können die Gesamtwerte deutlich verdoppeln oder halbieren (Abbildung 6B). Zudem erfasst die Rheinkrake systembedingt Kleinteile unter etwa 3,8 Zentimetern nur eingeschränkt. Da kleiner Abfall zahlreicher ist (Abbildung 6A), wird die Anzahl der transportierten Teile vermutlich eher unterschätzt – das Gesamtgewicht dagegen weniger.

Im europäischen Vergleich trägt der Rhein substantiell zum Makroabfalltransport in Richtung Meer bei. Gegenüber dem Yangtse, dem weltweit größten Einleiter, ist die Gesamtmenge zwar deutlich geringer. Rechnet man jedoch pro Einwohner des Einzugsgebiets, liegt der Rhein nur rund 7,6-mal niedriger – also höher als oft angenommen.

Obwohl Kunststoffe nach Stückzahl dominieren (siehe Abbildung 3A), machen sie einen kleineren Anteil am Gesamtgewicht aus. Andere Materialien wie bearbeitetes Holz, Papier, Karton, Glas,

Keramik, Metalle und Gummi tragen erheblich zum Gewicht bei und können ebenfalls Umwelt- und Gesundheitsrisiken bergen (z. B. scharfe Kanten, Schwermetalle, Zusatzstoffe wie Bisphenol A oder per- und polyfluorierte Chemikalien)²⁴⁻²⁷. Ein reiner Fokus auf Kunststoffe unterschätzt daher die Gesamtbelastung.

Die von uns entwickelte Quellenklassifikation erlaubt es, 64 Prozent des Makroabfalls konkreten Ursprungsgruppen zuzuordnen (mehr als mit der ursprünglichen Einteilung; vgl. Abbildungen 3D und 3E). Einwegprodukte aus privatem Konsum sind dabei ein zentrales Problemfeld: Sie machen rund 40 Prozent des gesamten Makroabfalls aus, darunter besonders Feuerwerksreste, Getränkedeckel, Snack- und Süßwarenverpackungen. Werden die Top-15 Kategorien (Abbildung 3B) gezielt angegangen, ließe sich die Abfallmenge im Rhein theoretisch um 74,3 Prozent senken. Einige dieser Produkte sind bereits reguliert (z. B. Strohhalme, Flaschendeckel, leichte Tragetaschen), andere noch nicht (z. B. viele Feuerwerksartikel). Die neue EU-Vorgabe für angekoppelte Deckel an Einweg-Getränkebehältern könnte laut unseren Daten den schwimmenden Makroabfall um etwa 4,5 Prozent reduzieren; zählt man alle Deckelarten mit, um 7,3 Prozent.

Fragmente (z. B. zerbrochene Kunststoffteile) sind besonders schwer zu managen: Sie sind häufig (Abbildung 3B), oft klein, schwer zuzuordnen und entstehen durch Zerfall größerer Gegenstände (Abbildung 6A). Deshalb ist es entscheidend, identifizierbare Produkte und Quellen früh zu reduzieren, bevor sie zu Fragmenten werden.

Als wichtigster Umweltfaktor für hohe Abfallmengen erwies sich steigender Abfluss: Wenn der Wasserstand rasch ansteigt, werden Uferbereiche überschwemmt und Abfälle mobilisiert (Abbildung 5). Aufräumaktionen

lassen sich daher gezielt an Abflussprognosen koppeln, sowie an Feierlichkeiten wie Silvester anschließen (Abbildungen 4A–C). Saisonale Muster passen dazu: Im Winter wurde signifikant mehr Makroabfall erfasst als im Sommer, auch weil steigender Abfluss häufiger auftritt.

Die RheinKrake hat sich als robustes, verlässliches System erwiesen, das bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten funktioniert. Sie passt sich wechselnden Pegelständen an und hält auch schwerem Treibgut stand. Jedoch ist bei sehr hohen Pegelständen aus Sicherheitsgründen die Möglichkeit zur Leerung eingeschränkt. Außerdem kann Treibgut für kurze Zeit den Eingang der RK blockieren. Für die Zukunft empfehlen wir größere und tiefere Varianten (mehrere Messtiefen, höheres Durchsatzvolumen), mehrere Standorte über die Flussbreite und -länge und kürzere Leerungsintervalle, um zeitliche Spitzen besser aufzulösen und Rückspülverluste zu vermeiden. Zudem sollte die Erfassung perspektivisch Meso- und Mikroabfall abdecken – sofern der Tierschutz gewährleistet ist.

Dass dieses anspruchsvolle Monitoring gelang, verdanken wir dem Bürgerforschungsansatz: Freiwillige und finanzielle Unterstützung (etwa 160 000 Euro) waren entscheidend für Betrieb, Sicherheit und Datenqualität (Fotoprotokoll, Validierung). Für eine europaweit vergleichbare Erfassung empfehlen wir die Nutzung der MSFD-Kategorien, die Veröffentlichung aller Rohdaten und – wo sinnvoll – die Erweiterung um Nutzungs-, Quellen- und Haltbarkeitsgruppen. Mit Blick auf ähnliche Flusssysteme außerhalb Europas können Methode, Ergebnisse und Maßnahmen dazu beitragen, den globalen Eintrag von Makroabfall zu senken.

Referenzen

Referenzen

1. Ballerini, T. et al. Plastic pollution on Durance riverbank: First quantification and possible environmental measures to reduce it. *Front. Sustain.* 3, 1-16; 10.3389/frsus.2022.866982 (2022).
2. Schirinzi, G. F. et al. Riverine anthropogenic litter load to the Mediterranean Sea near the metropolitan area of Barcelona, Spain. *The Science of the total environment* 714, 1-9; 10.1016/j.scitotenv.2020.136807 (2020).
3. Nguyen, K. L. P. & Bui, T.-K. L. Riverbank macro-litters monitoring in downstream of Saigon river, Ho Chi Minh City. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering* 7, 1-6; 10.1016/j.cscee.2023.100306 (2023).
4. United Nations Environment Programme (UNEP). *From Pollution to Solution. A Global Assessment of Marine Litter and Plastic Pollution*. UNEP, 2021.
5. Ostle, C. et al. The rise in ocean plastics evidenced from a 60-year time series. *Nature communications* 10, 1-6; 10.1038/s41467-019-09506-1 (2019).
6. OECD. *Global Plastics Outlook. Policy Scenarios to 2060, 2022*.
7. OECD. *Global Plastics Outlook. Economic Drivers, Environmental Impacts and Policy Options, 2022*.
8. Yang, X., Man, Y. B., Wong, M. H., Owen, R. B. & Chow, K. L. Environmental health impacts of microplastics exposure on structural organization levels in the human body. *The Science of the total environment* 825, 1-13; 10.1016/j.scitotenv.2022.154025 (2022).
9. Lau, W. W. Y. et al. Evaluating scenarios toward zero plastic pollution. *Science* 369, 1455-1461; 10.1126/science.aba9475 (2020).
10. Hurley, R. et al. Measuring riverine macroplastic: Methods, harmonisation, and quality control. *Water research* 235, 1-14; 10.1016/j.watres.2023.119902 (2023).
11. Meijer, L. J. J., van Emmerik, T., van der Ent, R., Schmidt, C. & Lebreton, L. More than 1000 rivers account for 80% of global riverine plastic emissions into the ocean. *Science Advances* 7, 1-13; 10.1126/sciadv.aaz5803 (2021).
12. Center for International Earth Science Information Network at Columbia University (CESIN). *Gridded Population of the World, Version 4 (GPWv4): Population Count*. Available at <https://doi.org/10.7927/H49C6VHW> (2016).
13. Fleet, D., Vlachogianni, T. & Hanke, G. A Joint List of Litter Categories for Marine Macroplastic Monitoring. *Manual for the application of the classification system*. European Commission, 2021.
14. Robinson, N., Regetz, J., and Guralnick, R. P. EarthEnv-DEM90: A nearly-global, void-free, multi-scale smoothed, 90m digital elevation model from fused ASTER and SRTM data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 87, 57-67; 10.1016/j.isprsjprs.2013.11.002 (2014).
15. Eurostat. *GISCO Geodata: Administrative Units - Countries*. Available at <https://ec.europa.eu/eurostat/web/gisco/geodata/administrative-units/countries> (2024).
16. Lehner, B. & Grill, G. Global River Hydrography and Network Routing: Baseline Data and New Approaches to Study the World's Large River Systems. *Hydrological Processes* 27, 2171-2186; 10.1002/hyp.9740 (2013).
17. Waterways and Shipping Office (WSA) Rhein, Hydrology Department. Data on discharge and water level from 1992 until 2022 of the Rhine at the Cologne gauging station. Received via e-Mail (2023).
18. Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Nuclear Safety and Consumer Protection. *Waste Management in Germany 2023. Facts, data, figures, 04/2023*.
19. DWD, Deutscher Wetter Dienst (Climate Data Center). Daily station observations of precipitation, wind gust, wind speed, temperature, sunshine hours for Germany. Available at <https://cdc.dwd.de/portal/202209231028/mapview> (2024).
20. Gnann, N. et al. Rhine River Macrolitter Dataset 09/2022 - 01/2024. Dataset. Available at <https://doi.org/10.5281/zenodo.17108281>.
21. Blondel, E. & Buschman, F. A. Vertical and Horizontal Plastic Litter Distribution in a Bend of a Tidal River. *Front. Environ. Sci.* 10, 1-10; 10.3389/fenvs.2022.861457 (2022).
22. Vriend, P. et al. Rapid Assessment of Floating Macroplastic Transport in the Rhine. *Front. Mar. Sci.* 7; 10.3389/fmars.2020.00010 (2020).
23. van der Wal, M. et al. SFRA0025: Identification and Assessment of Riverine Input of (Marine) Litter. Final Report for the European Commission DG Environment under Framework Contract No ENV.D.2/FRA/2012/0025.
24. Salvador Cesa, F., Turra, A. & Baruque-Ramos, J. Synthetic fibers as microplastics in the marine environment: A review from textile perspective with a focus on domestic washings. *The Science of the total environment* 598, 1116-1129; 10.1016/j.scitotenv.2017.04.172 (2017).
25. Baensch-Baltruschat, B., Kocher, B., Stock, F. & Reifferscheid, G. Tyre and road wear particles (TRWP) - A review of generation, properties, emissions, human health risk, ecotoxicity, and fate in the environment. *The Science of the total environment* 733, 1-19; 10.1016/j.scitotenv.2020.137823 (2020).
26. Liao, C. & Kannan, K. Widespread Occurrence of Bisphenol A in Paper and Paper Products: Implications for Human Exposure. *Environmental science & technology* 45, 9372-9379; 10.1021/es202507f (2011).
27. Brunn, H. et al. PFAS: forever chemicals—persistent, bioaccumulative and mobile. Reviewing the status and the need for their phase out and remediation of contaminated sites. *Environ Sci Eur* 35, 1-50; 10.1186/s12302-023-00721-8 (2023).

