

WIE GELANGEN PFAS IN DIE FLIESSGEWÄSSER?

QUELLEN UND EINTRAGSPFADE VON PER- UND POLYFLUORIERTEN ALKYLSTANZEN

PFAS gelangen über verschiedene anthropogene Quellen in die Gewässer. Eine grosse Herausforderung besteht darin, die Vielzahl bislang unbekannter Einträge spezifischen Quellen zuzuordnen. In diesem Artikel werden die Grundzüge einer Stoffflussbetrachtung für den Kanton Zürich vorgestellt und anhand der umfangreichen Messdaten quantitativ beschrieben und diskutiert.

Rebecca Schneiter, AWEL, Abfallwirtschaft

Christian Götz; Edith Durisch-Kaiser; Pius Niederhauser; Maya Zea Escamilla, AWEL, Gewässerschutz

Nadine Schneider, AWEL, Abfallwirtschaft

RÉSUMÉ

SOURCES ET VOIES D'ENTRÉE DES SUBSTANCES PER- ET POLYFLUOROALKYLÉES (PFAS) DANS LES COURS D'EAU

Les PFAS pénètrent dans les cours d'eau par différentes sources d'origine anthropique. L'un des grands défis consiste à identifier les sources spécifiques de ces nombreux apports encore inconnus. L'analyse des charges de PFAS (OFEV-9) sur la base des données mesurées depuis 2021 permet de tirer cinq conclusions essentielles: environ 35% de la pollution provient des rejets des stations d'épuration des eaux usées (STEP) dans les cours d'eau, tandis que 9% provient des eaux usées domestiques. Les lixiviats de décharge contribuent à environ 1% de la charge totale, un chiffre qui peut toutefois être beaucoup plus élevé au niveau régional. Environ 22% de la charge dans les effluents des STEP provient probablement des eaux usées industrielles et commerciales. Au total, 65% des apports de PFAS sont diffus et ne peuvent actuellement être attribués à aucune source spécifique.

En l'absence d'une technologie efficace permettant d'éliminer les PFAS de l'eau et des eaux usées, il est impératif de mettre rapidement en œuvre des mesures à la source, de renforcer le plan d'action national et d'intensifier le dialogue sociopolitique. Une solution durable ne pourra être trouvée qu'en réduisant considérablement la consommation de PFAS, une mesure largement soutenue par les spécialistes en sciences environnementales.

EINLEITUNG

Per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS) sind eine umfangreiche Gruppe synthetisch hergestellter Chemikalien, die aufgrund ihrer wasser-, fett- und schmutzabweisenden Eigenschaften in zahlreichen industriellen Anwendungen- sowie Konsumprodukten eingesetzt werden [1-4]. In der Struktur sind sie ähnlich wie Tenside aufgebaut mit hydrophiler Kopfgruppe und einer stark hydrophoben, fluorierten Kohlenstoffkette, die den PFAS eine hohe Persistenz und Mobilität verleiht [5, 6]. Infolgedessen können sie sich – je nach Substanz – in Wasser und Luft weit verbreiten und in der Umwelt anreichern [1, 7, 8]. Zudem sind viele PFAS bioakkumulierend und weisen toxische Eigenschaften auf [2, 9]. Emissionen in die Umwelt können während sämtlicher Produktions- und Nutzungsphasen auftreten, von der Herstellung über den industriellen und gewerblichen Einsatz sowie in der Verwendung von Konsumprodukten bis hin zur Abfallbehandlung [8, 10].

Die grosse Anzahl an PFAS-Substanzen sowie die unterschiedlichen Verhaltensweisen stellen eine erhebliche Herausforderung für die Quantifizierung von PFAS-Frachten in aquatischen Systemen dar. Ihre Umweltrelevanz in bereits sehr geringen Konzentrationen und das hohe Potenzial von Vorläufersubstanzen verstärken diese Problematik, insbesondere für die Laboranalytik

Kontakt: C. Götz, christian.goetz@bd.zh.ch

(Titelfoto: AWEL, Kt. Zürich)

(s. Infobox). Darüber hinaus ist die Entfernung von PFAS aus dem Wasser technisch sehr anspruchsvoll. Nach aktuellem Wissensstand eignen sich beispielsweise Verfahren mit Aktivkohle oder Ionentauscher [11]. Es werden laufend neue spezifische Verfahren entwickelt. Zur Einschätzung der Belastungssituation mit PFAS startete der Kanton Zürich 2024 und 2025 umfassende Messkampagnen im Umwelt- und Lebensmittelbereich. Das Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL) untersuchte dabei Fliessgewässer, Abwasserreinigungsanlagen, Deponiesickerwasser, Industrieabwasser, häusliches Abwasser, Regenabwasser aus Siedlungsgebieten sowie Seesedimente. Der vorliegende Artikel befasst sich mit dem Stofffluss bis in die Zürcher Fliessgewässer und der Frachtsummenberechnung der neun vom Bundesamt für Umwelt (BAFU) empfohlenen PFAS-Substanzen. Damit wird eine erste Einschätzung der Belastungssituation ermöglicht und eine Diskussion der wichtigsten Eintragspfade angestossen.

MATERIAL UND METHODEN

UNTERSUCHUNGSPROGRAMM UND -PERIMETER

Zwischen den Jahren 2021 und 2025 wurden im Kanton Zürich die wichtigsten Fliessgewässer, die Zu- und Abflüsse von 60 kommunalen Abwasserreinigungsanlagen (ARA), Proben von häuslichem Abwasser aus drei Siedlungsgebieten sowie Sickerwasser aus 16 Deponien in Betrieb und in Nachsorge untersucht.

Die sechs Einzugsgebiete (EZG) der Flüsse Limmat, Glatt, Töss, Reppisch, Furtbach und Jonen entwässern einen Grossteil der Kantonsfläche. Sie bilden den Untersuchungsperimeter im Kanton Zürich für die Ermittlung von Eintrag, Transport und Export der PFAS-Frachten (Fig. 1). Über diesen Perimeter sind Zürichsee, Greifensee und Pfäffikersee abgedeckt sowie das EZG des Obersees und des Linthkanals. Die sechs EZG werden durch jeweils eine Messstelle definiert, für welche Mischproben entnommen wurden und Abflussmessungen repräsentativ möglich sind. Die Messdaten für die Fliessgewässer wurden mit zwei Stichproben und sechs bis neun Mischproben pro Messstelle über die Jahre 2024 und 2025 verteilt erhoben. Alle Werte wurden gleich gewichtet, gemittelt und mit dem mittleren Abfluss verrechnet. Die Summe dieser sechs EZG ergibt die Ge-

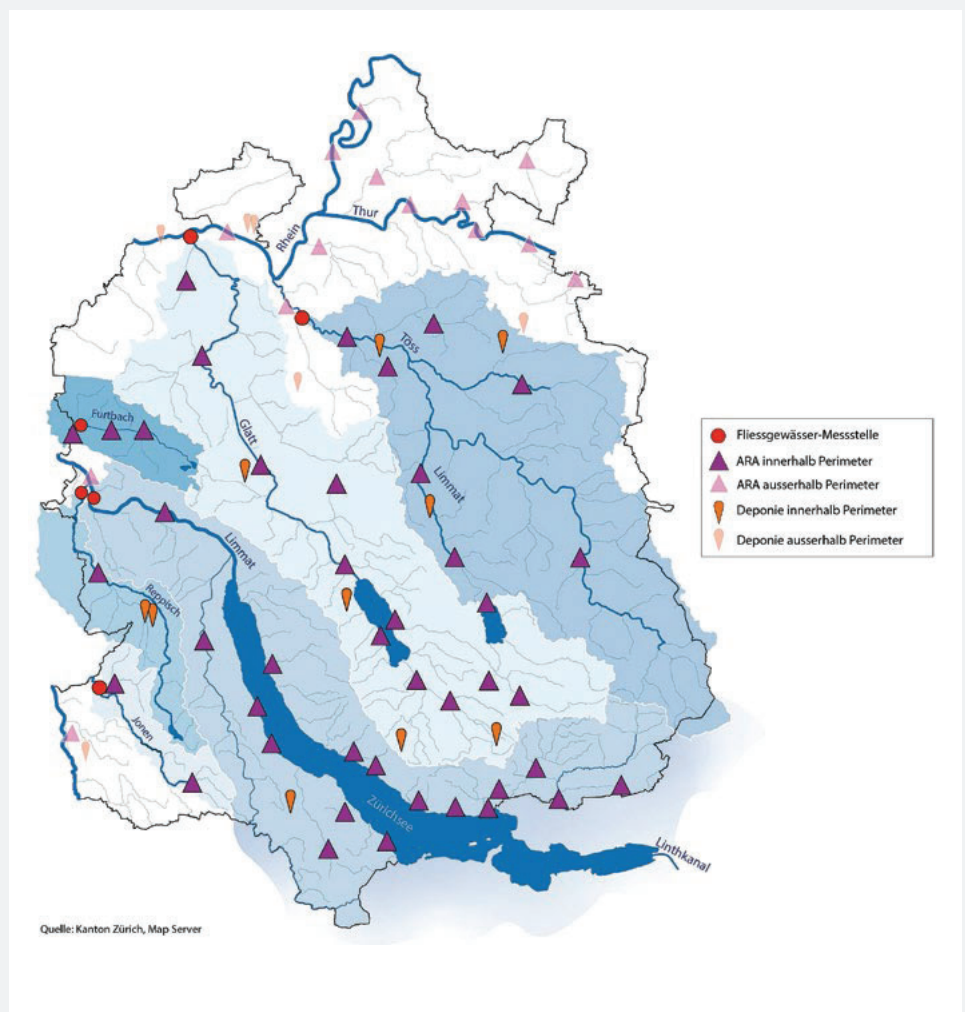


Fig. 1 Untersuchungsperimeter der hydrologischen Einzugsgebiete (EZG) des Kantons Zürich.

Die blau schattierten Flächen stellen die EZG der Fliessgewässer dar, die jeweils mit einer Messstelle (rot) am Auslauf überwacht werden.

samtfracht der gemessenen PFAS für den untersuchten Perimeter.

Die 60 kommunalen Zürcher ARA (> 1000 Einwohnerwerte) in Zu- und Ablauf wurden je sieben mengenproportionale 24-h-Sammelproben entnommen und abflussproportional zu einer 7-Tage-Mischprobe vermengt. Ergänzt wurden die beiden Zürcher Messkampagnen durch Messungen aus den Jahren 2022 und 2023 von acht ausserkantonalen ARA, die in das Einzugsgebiet des Linthkanals und des Obersees entwässern. Um die jeweilige Fracht zu bestimmen, wurde für jede ARA die mittlere PFAS-Konzentration im Ablauf mit dem entsprechenden mittleren Abfluss multipliziert.

Im Kanton Zürich befinden sich 16 Deponien. Von diesen leiten fünf ihr Sickerwasser direkt in Gewässer ein, während elf an die Kanalisation angeschlossen sind. Die Deponien wurden seit 2021 in unregelmässigen Abständen beprobt. Die

berechnete Fracht basiert auf dem Mittelwert aller verfügbaren Konzentrationsmessungen sowie dem mittleren Sickerwasserabfluss pro Deponie.

Das häusliche Abwasser wurde mittels einer Messkampagne in drei unterschiedlichen Wohngebieten beprobt, die im Trennsystem entwässert werden. Hierfür wurde in der Schmutzabwasserkanalisation jeweils ein automatisiertes Probenahmesystem installiert, das ausschliesslich bei Trockenwetter stündlich Abwasserproben sammelte. Pro Standort wurden drei Wochenmischproben erfasst und anschliessend analysiert. Mittels dieser Erhebung konnten die PFAS-Konzentrationen ausschliesslich aus häuslichem Abwasser von insgesamt 14 300 natürlichen Personen bestimmt werden. Zur Berechnung der Fracht wurde für das Abwasservolumen der schweizerische Mittelwert des häuslichen Wasserverbrauchs von 142 Liter pro Person und Tag verwendet [12].

LABORANALYTIK

Für die Analyse der PFAS-Konzentrationen kam die Flüssigchromatographie gekoppelt mit Tandem-Massenspektrometrie (LC-MS/MS) zum Einsatz. Die Bestimmungsgrenzen lagen im Bereich von wenigen Nanogramm pro Liter für Wasserproben. Eine Qualitätssicherung wurde durch Blindproben, Doppelbestimmungen und den Einsatz zertifizierter Referenzmaterialien gewährleistet. Die Auswertung erfolgte nach der Empfehlung des Kompetenznetzwerks der kantonalen

Gewässerschutz- und Umweltlaboratorien *Lab'Eaux* [13].

BERECHNUNG DER PFAS-FRACHTSUMMEN

Für die Berechnung der PFAS-Frachten wurde die Summe von neun PFAS-Einzelsubstanzen verwendet, wie sie vom BAFU im Bereich Altlasten empfohlen wird: PFBA, PFPeA, PFHxA, PFHpA, PFOA, PFNA, PFBS, PFHxS und PFOS (BAFU-9). Für diese Stoffpalette werden im Kanton Zürich seit 2021 Messungen durchgeführt. Dadurch liegen mehrjährige

Datenreihen vor, die eine robuste Berechnung der Stoffflüsse ermöglichen. Aktuelle Emissionen von Vorläufersubstanzen (*Precursors*) sind darin jedoch nicht berücksichtigt (*s. Infobox*).

Für eine konsistente quantitative Zuordnung der Eintragspfade und Quellen im Kanton Zürich werden in der Stoffflussrechnung hauptsächlich Messdaten innerhalb des definierten Perimeters berücksichtigt (*Fig. 2*). Insgesamt vierzehn ARA und sechs Deponien werden nicht einbezogen (*Fig. 3*), da sie flussabwärts der letzten Messstelle in die Fliessgewässer einleiten.

DISKUSSION: QUELLEN UND EINTRAGSPFADE

Die Zusammenführung der PFAS-Frachten in einer vereinfachten Stoffflussdarstellung ermöglicht den quantitativen Vergleich und die Diskussion von zwei Summenbetrachtungen. Zuerst für die Bezugsgrösse der sechs EZG der Fliessgewässer des Perimeters und danach ausschliesslich für die verschiedenen Einträge in den 55 ARA-Zuläufen.

EINTRÄGE IN FLIESSGEWÄSSER

Die sechs EZG des Perimeters (*Fig. 1*) transportieren zusammen eine tägliche PFAS-Fracht (BAFU-9) von 90,8g und bilden die Bezugsgrösse 100% (*Tab. 1*). Die aufgeführten Frachten der einzelnen EZG zeigen sehr deutliche Unterschiede der PFAS-Einträge. Zu beachten ist, dass sich im EZG der Limmat der Zürichsee befindet, dessen Einfluss auf den Stofffluss derzeit noch unklar ist. Die Bedeutung der Sedimente als Senken für PFAS und die Bedeutung der thermischen Schichtung des Sees auf die Konzentrationen im Seeabfluss sind bislang noch ungenügend geklärt. Die Gegenüberstellung der

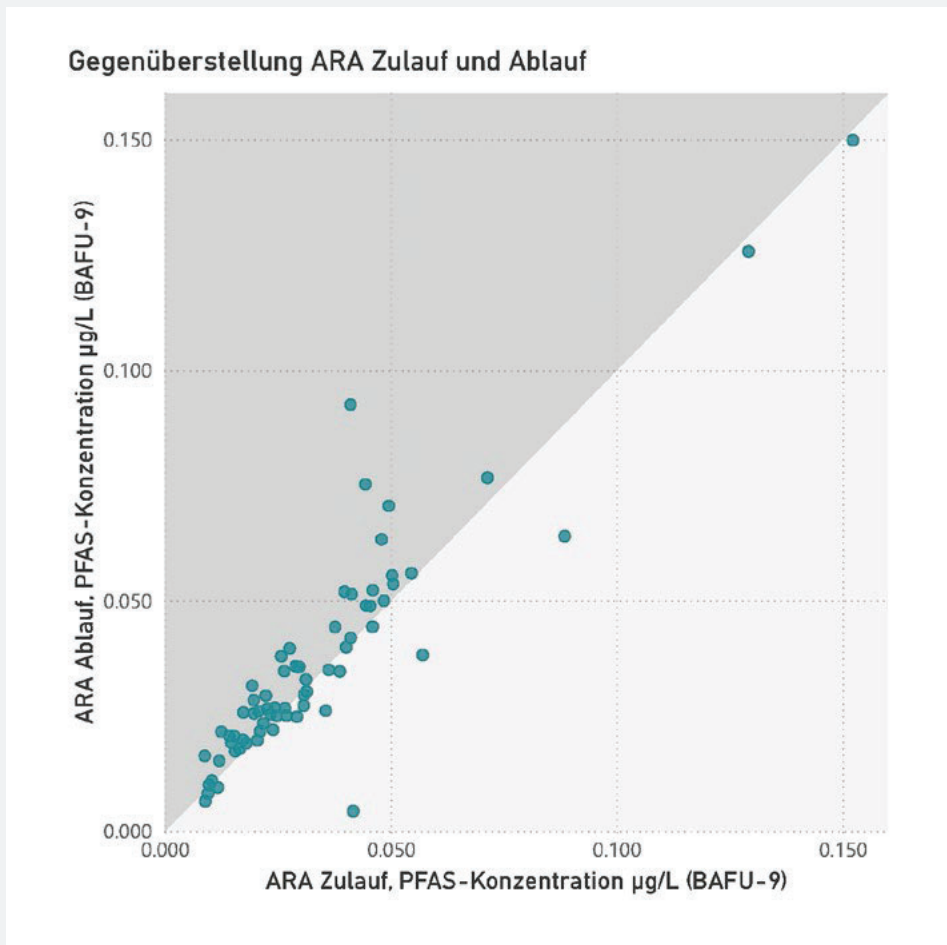


Fig. 2 Vergleich der gemittelten PFAS-Konzentrationen (BAFU-9) von ARA-Zulauf und -Ablauf.

Messstelle	Fracht FG	ARA	Fracht ARA-Abläufe	ARA-Ab-läufe an FG	DS ₆	Fracht DS ₆ in FG	DS ₆ an FG	Fracht-Differenz zu FG	Anteil der Differenz an FG
	g/Tag	Anzahl	g/Tag	%	Anzahl	g/Tag	%	g/Tag	%
Glatt vor Rhein	21,5	16	8,2	38,1	1	0,06	0,3	13,3	61,9
Limmat bei Dietikon	54,7	25	19,3	35,3	0	0	0	35,4	64,7
Töss bei Freienstein	10,1	8	2,5	24,8	1	0,03	0,3	7,6	75,2
Reppisch bei Dietikon	2,5	1	0,6	25,6	0	0	0	1,86	74,4
Furtbach bei Otelfingen	1,3	3	0,8	59,1	0	0	0	0,52	40,9
Jonen bei Zwillikon	0,68	2	0,4	54,4	0	0	0	0,31	45,6
Total Perimeter	90,8	55	31,8	35,0	2	0,1	0,1	59,0	65,0

Tab. 1 Auflistung der PFAS-Frachten in Fliessgewässer (FG), ARA-Ausläufen und Deponiesickerwasser mit Einleitung in Gewässer (DS₆) innerhalb des Perimeters.

HERAUSFORDERUNG VON PFAS-SUMMENBETRACHTUNG

Die Berechnung und Beurteilung der gesamten PFAS-Belastung ist aufgrund der Vielzahl an Substanzen mit unterschiedlichen chemischen Eigenschaften anspruchsvoll. Es ist davon auszugehen, dass einige der derzeit eingesetzten und in die Umwelt emittierten PFAS nicht bekannt sind und mit den aktuell verfügbaren analytischen Methoden nicht erfasst werden. Fortschritte in der Analytik liefern jedoch laufend neue Erkenntnisse.

Die vom BAFU im Altlastenbereich empfohlene PFAS-Summe umfasste bis Sommer 2025 die neun Einzelsubstanzen, die weit verbreitet in Wasser anzutreffen und heute grösstenteils verboten sind – sogenannte «Legacy-PFAS». Im Sommer 2025 wurden den neun Substanzen sieben weitere für die Umwelt relevante Substanzen hinzugefügt. Auswertungen unserer erweiterten Messdaten zeigen, dass Substanzen wie 6:2-FTS und 6:2-FTAB (Capstone B) erheblich zur Erhöhung der PFAS-Frachten beitragen. *Figur 3* verdeutlicht, dass sich die Summe der PFAS-Konzentration unter Berücksichtigung dieser zwei Substanzen in ARA-Ausläufen deutlich erhöhen.

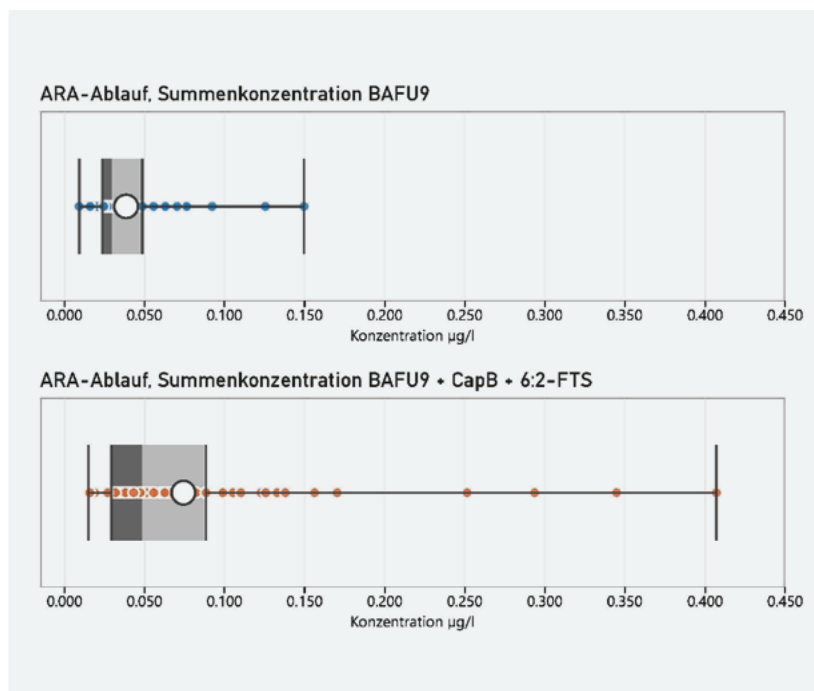


Fig. 3 Vergleich der mittleren Summe der Konzentrationen der BAFU-9 mit der Summe von elf Substanzen (BAFU-9, Capstone B und 6:2-FTS) im Auslauf von 60 Zürcher ARA.

Die Messmethode TOP-Assay (*Total Oxidisable Precursors*) ermöglicht die Identifikation von Vorläuferverbindungen. Dabei werden alle PFAS mit einem starken Oxidationsmittel zu bekannten Verbindungen umgewandelt. Die Differenz vor und nach der Oxidation dient als Mass für die Konzentration unbekannter Vorläuferverbindungen. Daten liegen uns jedoch nur vereinzelt vor.

Frachtsummen in den Fliessgewässern und den ARA-Abflüssen innerhalb des Perimeters ergibt für die 55 ARA eine Fracht von 31,8 g/Tag, was einem Anteil von rund 35% der Gesamtfracht entspricht. Die mittlere PFAS-Konzentration (BAFU-9) in den Abläufen aller Zürcher ARA beträgt 0,039 µg/l, weist jedoch eine hohe Variabilität auf (*Fig. 3*).

Im Kanton Zürich leiten fünf Deponien ihr Sickerwasser direkt in Gewässer ein. Davon liegen jedoch lediglich zwei innerhalb des betrachteten Perimeters. Mit einer gemeinsamen PFAS-Fracht von rund 0,1 g/Tag ist ihr Beitrag zur Gesamtfracht vergleichsweise gering.

Bei starkem Niederschlag gelangen PFAS über Mischwasserentlastungen aus der

Kanalisation direkt in die Gewässer, wie dies bereits von anderen Spurenstoffen bekannt ist. Unabhängig vom Ausbaustand der ARA-Reinigungsstufen für organische Spurenstoffe ist die Eliminationseffizienz für die Substanzen BAFU-9 vernachlässigbar. Bei 48 von 69 ARA sind die Konzentrationen (BAFU-9) im Ablauf aufgrund von Rücklösungs- bzw. Umbauprozessen [14] sogar leicht höher als in den Zuläufen (*Fig. 2*). Somit können PFAS mit Ozon oder Aktivkohle nicht effizient aus dem Abwasser entfernt werden. Die Aufrüstungen der ARA um zusätzliche Reinigungsstufen, wie beispielsweise Umkehrosmose, ist unverhältnismässig, da solche Verfahren nach heutigem Stand der Technik einen sehr hohen technischen und finanziellen Aufwand erfordern. Die resultierende Frachtdifferenz (BAFU-9) des Perimeters aus den Reinigungsprozessen der ARA beläuft sich auf 2,8 g/Tag, was 3% der Gesamtfracht in Fliessgewässer entspricht und die Differenz zwischen ARA-Zuläufen und -Abläufen beschreibt.

EINTRÄGE IN ARA-ZULÄUFE

Es gelangen verschiedene PFAS-Einträge auf die ARA, die miteinander verglichen werden können. Die Fracht (BAFU-9) aller ARA-Zuläufe innerhalb des Perimeters beträgt 29 g/Tag und wird in der *Tabelle 2* als 100% referenziert.

Von insgesamt zehn Deponien mit Anschluss an die Kanalisation liegen acht innerhalb des betrachteten Perimeters (*Fig. 1*). Zusammen verursachen diese Deponien eine PFAS-Fracht von rund 1 g/Tag und tragen damit etwa 3% zur gesamten PFAS-Fracht in den ARA-Zuläufen des Perimeters bei (*Tab. 2*). Auf Ebene des Perimeters ist dieser Beitrag vergleichsweise gering, für die lokal betroffenen ARA und das Gewässer stellt er jedoch eine relevante, punktuelle PFAS-Quelle dar. Kantonsweit liegen drei der fünf grössten Deponien ausserhalb des Perimeters, weisen jedoch hohe PFAS-Einträge auf. In den Zuläufen der jeweils betroffenen lokalen ARA machen diese Einträge etwa 30% bis über 90% der PFAS-Fracht aus (BAFU-9). Diese punktuellen Quellen sind daher für die Beurteilung lokaler Einleitbedingungen besonders relevant und lassen sich im Gegensatz zu diffusen Quellen gezielt identifizieren.

Die Messdaten für häusliches Abwasser zeigen hinsichtlich Konzentration und

Messstelle	Fracht ARA-Zuläufe	Anzahl DS _K	Fracht DS _K in ARA-Zuläufe	DS _K an ARA	E _{ang}	WAS-H in ARA-Zuläufen	WAS-H an ARA-Zuläufen	Fracht-Differenz zu ARA-Zuläufen	Anteil der Differenz an ARA-Zuläufen
	g/Tag	Anzahl	g/Tag	%	Anzahl	g/Tag	%	Fracht	%
Glatt vor Rhein	7,7	3	0,4	1,9	374 096	2,1	9,6	5,2	68,1
Limmat bei Dietikon	17,4	1	0,02	0,0	842 207	4,6	8,5	12,7	73,3
Töss bei Freienstein	2,1	2	0,42	4,2	211 495	1,2	11,5	0,5	24,6
Reppisch bei Dietikon	0,66	2	0,06	2,4	28 966	0,2	6,4	0,4	66,8
Furtbach bei Otelfingen	0,70	0	0	0	36 842	0,2	16,0	0,5	71,1
Jonen bei Zwillikon	0,39	0	0	0	22 979	0,1	18,6	0,3	67,6
Total Perimeter	29,0	8	1,0	3,1	1 516 585	8,3	28,8	19,7	68,1

Tab. 2 Auflistung der PFAS-Frachten in ARA-Zuläufen, Deponiesickerwasser mit Einleitung in Kanalisation (DS_K) und häusliches Abwasser (WAS-H) innerhalb des Perimeters.

Messstelle	E _{ang}	Mittlere Fracht	Mittlere Fracht pro Person
	Anzahl	mg/Tag	µg/Tag
Wohngebiet 1	12 000	75,57	6,29
Wohngebiet 2	1300	6,06	4,66
Wohngebiet 3	1000	5,58	5,58
Mittelwert			5,51

Tab. 3 Herleitung des Mittelwertes für PFAS-Fracht pro Tag und an die ARA angeschlossene Person (E_{ang}). Messkampagne häusliches Abwasser Kanton Zürich.

PFAS-Zusammensetzung ein weitgehend einheitliches Bild (Fig. 4). Im personenreichsten Siedlungsgebiet Ort 1 (Tab. 3) wurde in einer Wochenmischprobe ein Wert von 0,052 µg/l gemessen. Alle übrigen Proben lagen bei durchschnittlich 0,037 µg/l (± 0,006 µg/l). Abgesehen von 6:2-FTAB (Capstone B) und PFDA in geringen Konzentrationen wurden aus dem umfangreichen Messprogramm keine weiteren PFAS-Einzelsubstanzen analysiert. Die PFAS-Fracht aus häuslichem Abwasser lässt sich somit anhand der BAFU-9-Substanzen realistisch einschätzen. Die mittlere tägliche PFAS-Fracht (BAFU-9) pro Person beträgt 5,5 µg/Tag. Hochgerechnet auf die insgesamt 1,516 Mio. an ARA angeschlossenen Personen (E_{ang}) innerhalb des betrachteten Perimeters, ergibt sich eine Frachtsumme von 8,3 g/Tag, was knapp 29% der Gesamtfracht in den ARA-Zuläufen entspricht (Tab. 2). Ein alternativer Abschätzungsansatz auf Basis von acht ARA-Zuläufen ohne Industrie oder Deponieeinleitungen ergibt eine vergleichbare PFAS-Fracht von rund 7 µg pro Person und Tag (BAFU-9). Unter Berücksichtigung der Anteile aus häuslichem Abwasser und eingeleitetem Deponiesickerwasser verbleibt in den ARA-Zuläufen eine Frachtdifferenz von 19,7 g/Tag, was rund 68% der Ge-

samfracht der ARA-Zuläufe im Perimeter entspricht. Diese Differenz ist vermutlich überwiegend dem Industrie- und Gewerbeabwasser zuzuordnen [15]. Darüber hinaus kommen weitere PFAS-Quellen im Siedlungsgebiet in Betracht [16]. Die ersten konkreten Hinweise aus Messungen in Industrieabwässern deuten darauf hin, dass aus einzelnen Betrieben relevante Frachten emittiert werden. Für eine Bilanzierung dieser Einträge ist die Datenlage aber nicht ausreichend.

DIFFUSE EINTRÄGE IN FLIESSGEWÄSSER

Für diffuse PFAS-Einträge in die Fließgewässer ergibt sich rechnerisch eine Frachtdifferenz von 59 g/Tag, was rund 65% der Gesamtfracht des Perimeters entspricht (Tab. 1). Erste stichprobenartige Messungen von Regenabwasser aus Siedlungsgebieten weisen Konzentrationen von 0,02 bis 0,08 µg/l auf. So ist anzunehmen, dass Regenabwasser einen relevanten Eintragspfad darstellt. Eine quantitative Skalierung ist aus diesen Messdaten jedoch nicht möglich.

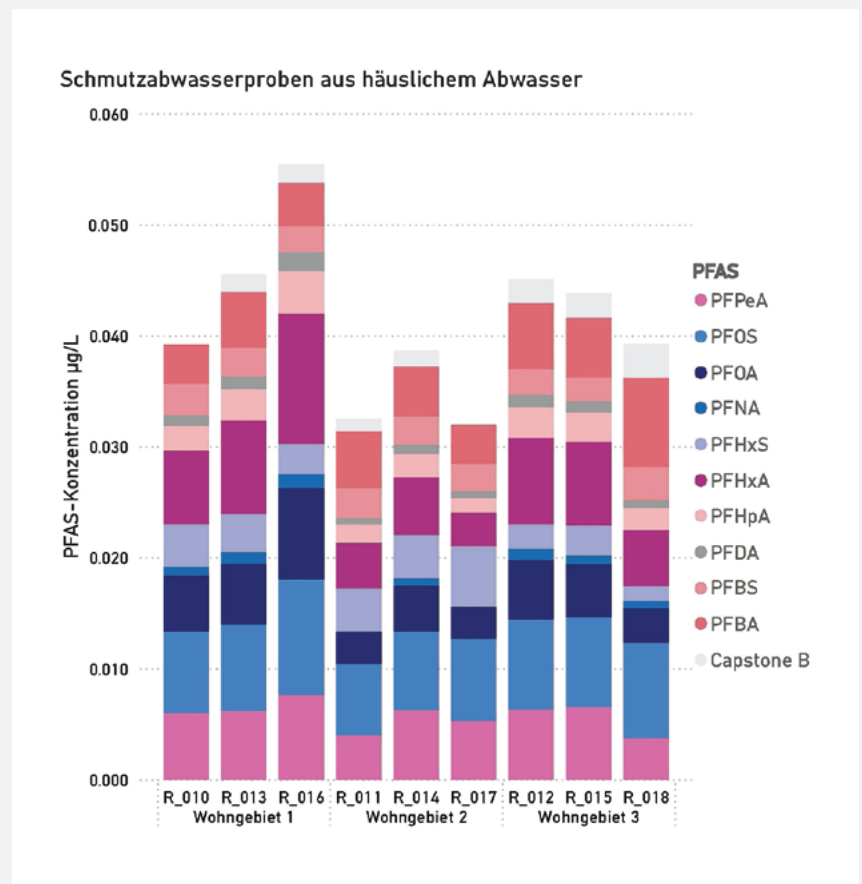


Fig. 4 PFAS-Konzentrationen im häuslichen Abwasser (Wochenmischproben) gemessen bei Trockenwetter. Messkampagne Kanton Zürich 2025.

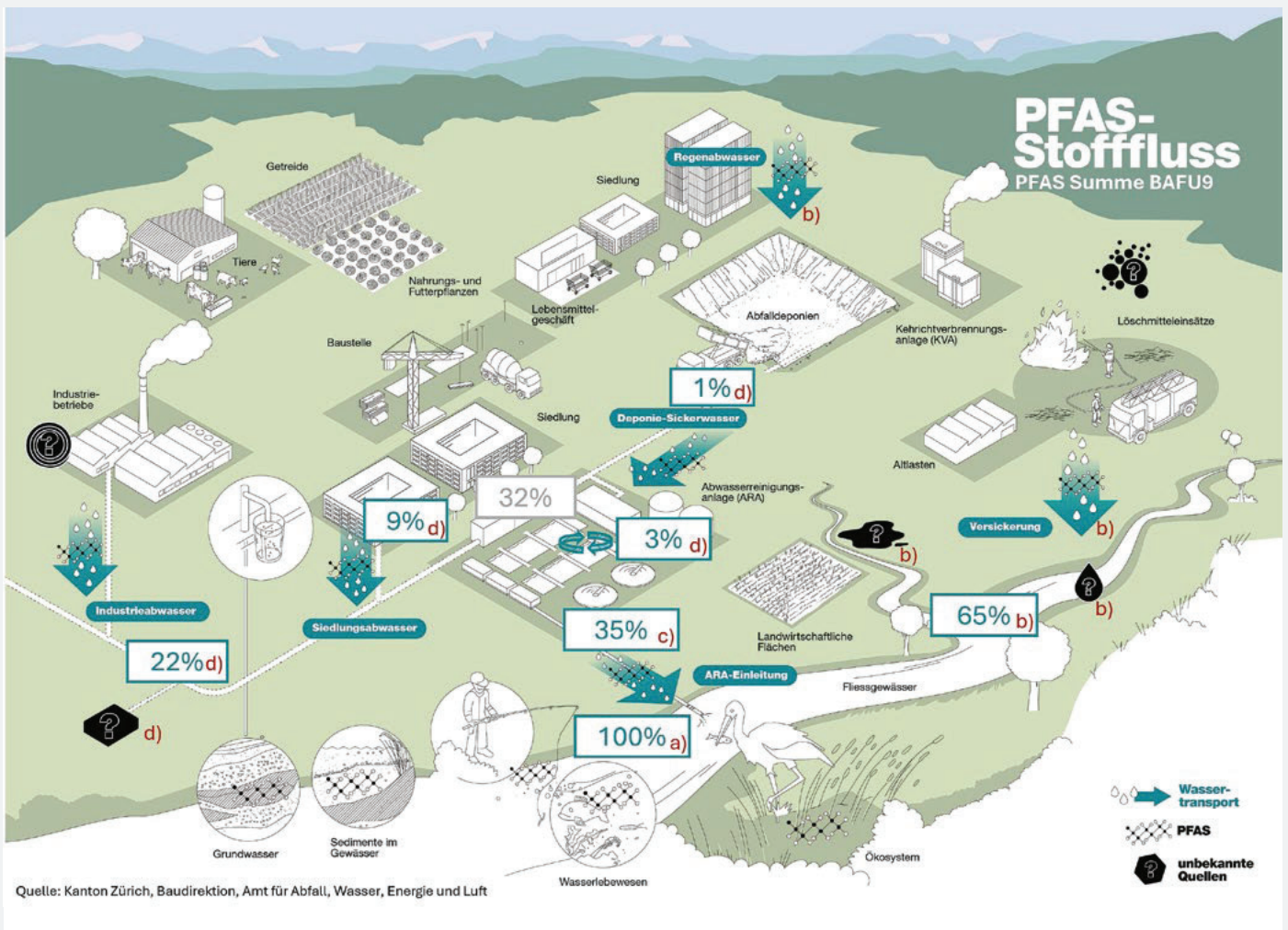


Fig. 5 Schematische Darstellung des PFAS-Stoffflusses im Kanton Zürich (PFAS BAFU-9): a) PFAS-Gesamtfracht der Fliessgewässer, b) Frachtanteile aus diffusen Einträgen und c) Einträge über die ARA-Ausläufe. d) Einträge, die über das Kanalisationssystem auf die ARA gelangen. In grau dargestellt ist die Zwischensumme der ARA-Zuläufe.

In der Literatur werden PFAS-Belastungen im Regenabwasser dennoch häufig mit Siedlungsgebieten in Verbindung gebracht [17]. Die diffusen Einleitungen in Fliessgewässer können von einer Vielzahl potenzieller Quellen herrühren. In Fig. 5 sind belastete Standorte, belastete Böden und Regenabwasser als wesentliche Eintragungspfade schematisch dargestellt.

SCHLUSSFOLGERUNGEN

Aus der Gegenüberstellung der PFAS-Fracht (BAFU-9) aus Quellen und Eintragungspfad in die Fliessgewässer (Fig. 5) lassen sich für den betrachteten Perimeter des Kantons Zürich fünf zentrale Schlussfolgerungen ziehen:

(I) Rund 35% der PFAS-Fracht gelangen über die Ausläufe der ARA in die Fliessgewässer, da die Elimination der neun Substanzen (BAFU-9) insgesamt vernachlässigbar ist.

(II) Ca. 9% der PFAS-Fracht stammen aus häuslichem Abwasser und erreichen die Fliessgewässer über die ARA.

(III) Ebenfalls über die ARA gelangen PFAS aus Deponiesickerwässer in die Fliessgewässer. Ihr Anteil an der Gesamtfracht des Perimeters beträgt ca. 1%. Regional kann er jedoch deutlich höher ausfallen und auf einzelnen ARA beträgt er mehr als ein Drittel.

(IV) Die Differenz der PFAS-Fracht in den ARA-Zuläufen von 22% kann vermutlich zu einem grossen Teil dem Industrie- und Gewerbeabwasser zugeordnet werden.

(V) Insgesamt 65% der PFAS-Fracht sind auf diffuse Einträge zurückzuführen und können aktuell keinen spezifischen Quellen zugeordnet werden (Fig. 5).

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt sind keine technischen Massnahmen verfügbar, um

DANKSAGUNG

Grossen Dank an das Team des Gewässerschutzlabors für die Probenahme und Analysen der grossen Anzahl Proben und Jürg Sinniger und Katharina Weber für das kritische Durchlesen. Ein besonderer Dank geht an Roland Ryser (zeichenfabrik) für die tolle grafische Umsetzung des PFAS-Stoffflusses. Danke für das rege Mitdiskutieren und die fachlichen Inputs aller Beteiligten im AWEL im vergangenen Jahr in der komplexen Stoffflussbetrachtung der PFAS-Substanzen in Gewässer und Abwasser.

PFAS effizient aus dem Wasserkreislauf zu entfernen. Es ist daher entscheidend, dass rasch Massnahmen an der Quelle ergriffen werden, um weitere Einträge einzudämmen oder zu verhindern [5, 18]. Die Erarbeitung des Aktionsplans des Bundes zu PFAS ist schnellstmöglich an die Hand zu nehmen, damit gewinnbrin-

gende Massnahmen geprüft und schweizweit umgesetzt werden können. Darüber hinaus gilt es, den gesellschaftlichen und politischen Dialog zum Thema PFAS aktiv voranzutreiben [6]. Wissenschaft und Behörden sollten verstärkt darauf hinweisen, dass eine wirksame und langfristige nachhaltige Lösung nur durch eine substanzielle Reduktion des PFAS-Verbrauchs erreichbar ist.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Rudin, E. et al. (2025): PFAS: Vorkommen, Risiken und Handlungsansätze, Swiss Academies Factsheets 20 (4). https://scnat.ch/de/uuid/i/abf3e252-a389-5e05-9363-4ba2cfb80cca-Swiss_Academies_Factsheets
- [2] ECHA (2023): Candidate List of substances of very high concern for Authorisation. Verfügbar unter: <https://www.echa.europa.eu/candidate-list-table>
- [3] ECHA (2022a): European Chemical Agency. Annex XV Restriction Report. Proposal for Restriction: Per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs), 22.03.2023. <https://echa.europa.eu/documents/10162/f605d4b5-7c17-7414-8823-b49b9fd43aea>
- [4] ECHA (2022b): European Chemical Agency. Annex XV Restriction Report. Proposal for Restriction: Per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs), Anhang B, 22.03.2023. <https://echa.europa.eu/documents/10162/6f4a2076-7221-67a3-64f7-c67cc307f59c>
- [5] Cousins, I.T. et al. (2019b): Why is high persistence alone a major cause of concern? *Environmental Science. Processes & impacts* 21(5), 781–792. <https://doi.org/10.1039/c8em00515j>
- [6] Cousins, I. T. et al. (2022): Outside the Safe Operating Space of a New Planetary Boundary for Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS), *Environmental Science & Technology*, 56(16), 11172–11179. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c02765>
- [7] Brunn, H. et al. (2023): 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(20). <https://doi.org/10.1186/s12302-023-00721-8>
- [8] Figuière, R. et al. (2025): An Overview of Potential Alternatives for the Multiple Uses of Per- and Polyfluoroalkyl Substances. *Environ. Sci. Technol.* 59, 2031–2042. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.4c09088>
- [9] Lee, J. W. et al. (2020): Adverse effects of perfluoroalkyl acids on fish and other aquatic organisms: A review. *Science of the Total Environment*, 707, 135334. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135334>
- [10] Li L. et al. (2021): Filling in the Blanks: A New Tool to Predict Chemical Pathways from Production to Exposure. *Environmental Health Perspectives* 129(12). <https://doi.org/10.1289/EHP10756>
- [11] Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute (VSA) (2025): Stand der Technik bei der Entfernung von PFAS aus gefasstem Deponiesickerwasser und gepumptem verunreinigtem Grundwasser von belasteten Standorten. Leitfaden zum Stand der Technik. <https://vsa.ch/Mediathek/leitfaden-elimination-pfas-aus-deponiesickerwasser-und-gepumptem-grundwasser/>
- [12] SVGW (2024): Website: Wasserversorgung, Nutzung. <https://www.svgw.ch/wasser/kommunikationstools/wasserversorgung/nutzung/#haushaltsverbrauch>
- [13] Lab'Eaux (2025): Empfehlung zur Bestimmung von PFAS in Fließgewässern mittels Mischproben in automatischen Probenehmern
- [14] Lenka, S. P. et al. (2021): A review of the occurrence, transformation, and removal of poly- and perfluoroalkyl substances (PFAS) in wastewater treatment plants, *Water Res.*, 199, 117187. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117187>
- [15] Randl, F. (2026): Per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS) in der aquatischen Umwelt, Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband
- [16] Krlovic, N. et al. (2024): Exploring the variability of PFAS in urban sewage: a comparison of emissions in commercial versus municipal urban areas, *Environ. Sci.: Processes Impacts*, 26, 1868-1878. <https://doi.org/10.1039/D4EM00415A>
- [17] Kali, S. E. et al. (2025): Stormwater discharges affect PFAS occurrence, concentrations, and spatial distribution in water and bottom sediment of urban streams. *Water Research*, 271, 122973. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.122973>
- [18] Kroll, A. et al. (2025): Mit Grenzwerten lassen sich PFAS nicht eindämmen. SCNAT Netzwerk. https://scnat.ch/de/uuid/i/946cda08-e3dc-5a32-a58a-c9b412648093-%C2%ABMit_Grenzwerten_lassen_sich_PFAS_nicht_eind%C3%A4mmen%C2%BB



Positionspapier Mikroplastik

14'000 t Reifenabrieb pro Jahr
3'400 t Mikroplastik pro Jahr
gelangen in unsere Gewässer.

Der VSA fordert Massnahmen zum
Schutz der Gewässer vor
Mikroplastik.

vsa.ch/Positionspapiere