



zukunft
SEIT 1909
denken

WASSER • ABWASSER • ABFALL

■ EXPERT:INNENPAPIERE

des Österreichischen Wasser- und Abfallwirtschaftsverbandes (ÖWAV)

ÖWAV-Expert:innenpapier

Per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS) in der aquatischen Umwelt

Erstellt vom ÖWAV-Unterausschuss „PFAS“ der Fachgruppe „Qualität und Hygiene“
im ÖWAV

Wien 2026

Dieses Expert:innenpapier ist das Ergebnis ehrenamtlicher, technisch-wissenschaftlicher
Gemeinschaftsarbeit.

Dieses Expert:innenpapier ist eine wichtige, jedoch nicht die einzige Erkenntnisquelle für eine fachgerechte Lösung. Durch seine Anwendung entzieht sich niemand der Verantwortung für eigenes Handeln oder für die richtige Anwendung im konkreten Fall. Eine etwaige Haftung der Urheber ist ausgeschlossen.

Hinweis:

Bei allen Personenbezeichnungen in diesem Expert:innenpapier gilt die gewählte Form für alle Geschlechter.

Impressum

Medieninhaber, Verleger und Hersteller: Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband, Wien

Es wird darauf hingewiesen, dass sämtliche Angaben dieser Publikation trotz sorgfältiger Bearbeitung ohne Gewähr erfolgen und eine Haftung der Autor:innen, Mitwirkenden oder des Verlags ausgeschlossen ist.

Dieses Werk und seine Teile sind urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte, insbesondere das Recht der Vervielfältigung, Verbreitung und Übersetzung werden ausdrücklich vorbehalten. Kein Teil dieses Werkes darf in irgendeiner Form (durch Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) ohne vorherige schriftliche Genehmigung des Verlags reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme gespeichert, verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Redaktion, Satz und Layout: Mag. Fritz Randl (ÖWAV)

© 2026 by Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband.

VORWORT

PFAS bzw. per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen sind eine umfangreiche Substanzgruppe und jüngst im Fokus medialer Berichterstattung, wissenschaftlicher Forschung und administrativer Vorgaben. Auch im ÖWAV schlug das Thema PFAS in den letzten Jahren auf. Eine Reihe von Ausschüssen im ÖWAV begann sich vermehrt mit PFAS zu beschäftigen. Bald war klar, dass es sich bei diesem Thema um eine Querschnittsmaterie mit Bezügen zu vielen unterschiedlichen Themen der Wasser- und Abfallwirtschaft handelt.

Dies erkennend, begann der ÖWAV Arbeitsausschuss „Spurenstoffe“ im Jahr 2023 an diesem Expert:innenpapier zu arbeiten. Bald wurde allerdings auch klar, dass aufgrund der Vielfältigkeit der Aufgaben dieses Ausschusses eine Erweiterung der Expert:innengruppe zur Behandlung des Themas PFAS im ÖWAV erforderlich war. Dies führte im Jahr 2024 zur Gründung des ÖWAV-Unterausschusses „PFAS“, dessen klare Ausrichtung eine umfassende Behandlung des Themas PFAS, basierend auf einer stark interdisziplinären Zusammensetzung mit Fachleuten aus den unterschiedlichsten Themenbereichen der Wasser- und Abfallwirtschaft ist. Eine der ersten Aufgaben dieses Ausschusses wurde es, das Expert:innenpapier „PFAS in der aquatischen Umwelt“ zu ergänzen und fertigzustellen. Dank der Mithilfe einer Reihe von ausgewiesenen Fachleuten ist dies gelungen. Ein inhaltlich hochwertiges Endprodukt liegt nun vor. Wir hoffen, dass es eine große und interessierte Leser:innenschaft finden wird und den faktenbasierten Umgang mit diesem Thema fördert.

Das vorliegende Expert:innenpapier beschäftigt sich speziell mit jenen Aspekten der PFAS, die einen Zusammenhang mit dem und eine besondere Bedeutung für das Schutzgut Wasser aufweisen. In Hinblick auf den adressierten Personenkreis richtet sich das Papier somit primär an Expert:innen in den Bereichen Trinkwasser, Abwasser und aquatische Umwelt. In der Tradition der ÖWAV-Expert:innenpapiere soll dieses Papier Grundlagen für eine sachliche Diskussion sowie Abschätzung der Problematik in den einzelnen Sektoren der Wasser- aber auch Abfallwirtschaft darstellen und einen kompakten Überblick über das komplexe Themenfeld der PFAS geben, ohne dabei zu umfangreich zu werden.

ÖSTERREICHISCHER
WASSER- UND ABFALLWIRTSCHAFTSVERBAND

Wien, im Jänner 2026

An der Erstellung dieses ÖWAV-Expert:innenpapiers haben mitgewirkt:

Eine erste Version dieses Expert:innenpapiers wurde vom ÖWAV-AA „Spurenstoffe“ erstellt. Dabei wurde das Kapitel „Chemische Analytik“ von Vertreter:innen des ÖWAV-AA „Analytikplattform“ beigesteuert. Eine Ergänzung und die Fertigstellung erfolgte durch die Expert:innen des im Jahre 2024 neu gegründete ÖWAV-UA „PFAS“.

Ausschussleitung:

Univ.-Prof. DI Dr. Matthias ZESSNER, Technische Universität Wien

DIⁱⁿ Barbara PERTHEN-PALMISANO, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Klima- und Umweltschutz, Regionen und Wasserwirtschaft, Wien

Weitere Autor:innen:

DI Dr. Rainer BRAUN, Amt der Oberösterreichischen Landesregierung, Linz

DI Dr. Manfred CLARA, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Klima- und Umweltschutz, Regionen und Wasserwirtschaft, Wien

DIⁱⁿ Monika DENNER, Umweltbundesamt, Wien,

Univ.-Lekt. Mag. Dr. Gernot DÖBERL, Umweltbundesamt, Wien

Marcello ENTNER, BSc., Fachverband der chemischen Industrie Österreich, Wien

a.o.Univ.-Prof.ⁱⁿ DIⁱⁿ Dr.ⁱⁿ Maria FÜRHACKER, Universität für Bodenkultur Wien

Mag. Richard GUHSL, Wirtschaftskammer Österreich, Wien

Mag.^a Dr.ⁱⁿ Christina HARTMANN, MSc. MSc.Tox., Umweltbundesamt, Wien

Mag.^a Dr.ⁱⁿ Romana HORNEK-GAUSTERER, ERT, FH Technikum Wien

DI Dr. Andreas-Marius KAISER, Umweltbundesamt, Wien

Ass.-Prof. Mag. Dr. Norbert KREUZINGER, Technische Universität Wien

DIⁱⁿ Dr.ⁱⁿ Katharina LENZ, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Klima- und Umweltschutz, Regionen und Wasserwirtschaft, Wien

DI Oliver MANN, ESW Consulting WRUSS ZT GmbH, Wien

DIⁱⁿ Dr.ⁱⁿ Vera SCHÖNGRUBER, Amt der Oberösterreichischen Landesregierung, Linz

Associate Prof. Dr.ⁱⁿ Ottavia ZOBOLI, MSc, Technische Universität Wien

Weitere Mitglieder des ÖWAV-Arbeitsausschusses „Analytikplattform“

Für den ÖWAV:

Magdalena SENITZA, MSc, Bereichsleitung Qualität & Hygiene im ÖWAV, Wien

INHALTSVERZEICHNIS

	Abstract	5
1	EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG DES EXPERT:INNENPAPIERS	6
2	KLASSIFIZIERUNG, STRUKTUR UND EIGENSCHAFTEN VON PFAS	7
3	ANWENDUNG VON PFAS IN INDUSTRIELLEN PROZESSEN UND KONSUMGÜTERN	9
4	FREISETZUNG UND EINTRAGSPFADE VON PFAS IN DIE AQUATISCHE UMWELT ...	12
5	TECHNOLOGIEN ZUR BEHANDLUNG VON PFAS-BELASTETEN WÄSSERN.....	15
6	MOBILITÄT UND PERSISTENZ IN DER UMWELT	19
7	BEDEUTUNG VON PFAS IN DER AQUATISCHEN UMWELT	20
8	ANREICHERUNG IN DER NAHRUNGSKETTE	21
9	CHEMISCHE ANALYTIK	22
10	TFA: EIGENSCHAFTEN, UMWELTVERHALTEN, QUELLEN UND REGULATORIK.....	25
11	UNTERGRUND- UND GRUNDWASSERKONTAMINATIONEN DURCH PFAS AUS FEUERLÖSCHSCHÄUMEN	27
12	CHEMIKALIENRECHTLICHE VORGABEN UND ENTWICKLUNGEN.....	28
13	MONITORING UND WASSERRECHTLICHER RAHMEN.....	30
14	MASSNAHMEN, RISIKOMANAGEMENT IN ÖSTERREICH.....	32
15	ZUSAMMENFASSUNG.....	33
16	LITERATUR	36

Abstract

PFAS sind eine große Gruppe von Chemikalien, die zum einen aufgrund nützlicher Eigenschaften in den unterschiedlichsten Bereichen Einsatz finden, zum anderen aufgrund ihrer extrem hohen Umweltpersistenz auch „Forever Chemicals“ genannt werden. Zudem sind viele PFAS mobil, bioakkumulierend und toxisch und erregen daher im Bereich der Wasser- und Abfallwirtschaft eine hohe Aufmerksamkeit und teilweise Besorgnis.

Eine Freisetzung von PFAS in die aquatische Umwelt ist während des gesamten Lebenszyklus möglich: während der industriellen Produktion, der Verarbeitung industrieller Produkte, der direkten Nutzung von Konsumgütern, der Alterung und Abgabe aus Konsumgütern über deren gesamte Nutzungszeit oder im Zuge der Abfallbehandlung oder -entsorgung. Konventionelle Abwasserreinigung stellt nur eine schwache Barriere gegen Einträge in die aquatische Umwelt dar.

Bei der Entfernung von PFAS aus der Wasserphase nach Trennverfahren kommt derzeit vor allem die Adsorption an Aktivkohle zum Einsatz. Auch Nanofiltration bzw. Umkehrosmose sind technisch ausgereift. Bei Regeneration der Aktivkohle oder der Entsorgung von Regeneraten oder Konzentraten ist grundsätzlich darauf zu achten, dass dabei PFAS gesichert zerstört oder abgelagert werden sollten, was derzeit eine große Herausforderung darstellt. Eine Technologie mit weitgehender Zerstörung von PFAS bietet aktuell nur die thermische Oxidation bei einer ausreichend hohen Temperatur (1000–1500 °C) und entsprechender Verweildauer. Andere reduktive bzw. oxidative Verfahren sind entweder technisch erst in einem Versuchsstadium oder führen lediglich zu einer Verkürzung der PFAS-Kettenlängen.

In der Wasserrahmenrichtlinie ist PFOS (Perfluorooctansulfonsäure) seit 2013 für Oberflächengewässer als prioritär gefährlicher Stoff identifiziert, wobei die in Österreich gemessenen Konzentrationen teilweise über der Umweltqualitätsnorm liegen. Verpflichtende Messungen von PFOS für ausgewählte industrielle Einleiter und kommunale Kläranlagen erfolgten erstmals 2023. Die europäische Trinkwasserrichtlinie sieht ab 2026 wahlweise zwei Parameter für die Erfassung von PFAS vor. Einer von diesen, der Parameter „Summe der PFAS“, umfasst die Summe von 20 ausgewählten perfluorierten Alkylsäuren und sieht einen Grenzwert von 0,10 µg/l vor. Dieser wurde in die österreichische Trinkwasserverordnung übernommen.

Bei der (historischen) Verwendung von AFFF (Aqueous Film Forming Foam)-Löschschäumen dürfte es sich um den für Österreich wichtigsten Eintragspfad von PFAS in den Untergrund und das Grundwasser handeln. Als Hauptkontaminanten bei bisher drei identifizierten Belastungshotspots tritt dabei jeweils PFOS auf. Aufgrund der geschilderten Problematik ist davon auszugehen, dass in den nächsten Jahren weitere ähnlich gelagerte Fälle in Zusammenhang mit Feuerlöschübungsplätzen bei Großstandorten auftreten werden.

Bei der Herstellung und Verwendung von PFAS setzen die chemikalienrechtlichen Regelungen an. Für PFOS, PFOA (Perfluorooctansäure) und PFHxS (Perfluorhexansulfonsäure) gibt es bereits aktuell starke Nutzungsbeschränkungen bzw. -verbote. Darüber hinaus wird in der EU eine weitgehende Beschränkung aller PFAS-Anwendungen einschließlich der Fluorpolymere diskutiert. In Österreich umfasst der im Jahr 2023 publizierte Nationale PFAS-Aktionsplan die prioritären Handlungsfelder. Spezifisch auf den Bereich Altlasten zugeschnitten ist die im Jahr 2024 veröffentlichte PFAS-Strategie im Rahmen der Vollziehung des Altlastensanierungsgesetzes.

1 EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG DES EXPERT:INNENPAPIERS

Obwohl bereits seit den frühen 2000er-Jahren ein Thema, findet sich der Begriff bzw. die Abkürzung PFAS (per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen), die für eine umfangreiche Substanzgruppe steht, jüngst vermehrt im Fokus medialer Berichterstattung, wissenschaftlicher Forschung und administrativer Vorgaben. PFAS werden aufgrund ihrer Stoffeigenschaften – sie sind thermisch, chemisch und biologisch stabil sowie sowohl hydrophob als auch lipophob – in einer Vielzahl von Produkten in allen Bereichen unserer Gesellschaft, im täglichen Leben, in Industrie und Gewerbe eingesetzt. Einige dieser erwünschten Eigenschaften, insbesondere deren Stabilität bzw. Persistenz in Kombination mit anderen Eigenschaften wie Mobilität, Bioakkumulation und Toxizität, können allerdings ungewollte Effekte für die Umwelt haben. Da PFAS durch konventionelle sowie weitergehende technische Behandlungsschritte nicht oder nur mit hohem Aufwand aus dem Wasserkreislauf entfernt werden können, stellen sie nicht nur für die Umwelt selbst, sondern auch für die Weiternutzung des Wassers durch den Menschen ein herausforderndes Thema dar.

Dieses Expert:innenpapier beschäftigt sich in erster Linie mit jenen Aspekten der PFAS, die einen Zusammenhang mit dem und eine besondere Bedeutung für das Schutzgut Wasser aufweisen. In Hinblick auf den adressierten Personenkreis richtet sich das Papier somit primär an Expert:innen in den Bereichen Trinkwasser, Abwasser und aquatische Umwelt mit dem Ziel einer Zusammenstellung von evidenzbasierten Fakten und Zahlen zur Thematik PFAS im anthropogenen Wasserkreislauf. Dafür werden der Stand des Wissens in relevanten Themenbereichen dargestellt und die mit der Thematik verbundenen Probleme diskutiert. In der Tradition der in der Vergangenheit von ÖWAV-Expert:innenpapieren behandelten Themenbereiche „organische Spurenstoffe“ sowie „Mikroplastik“ soll dieses Papier somit Grundlagen für eine sachliche Diskussion sowie Abschätzung der Problematik in den einzelnen Sektoren der Wasserwirtschaft darstellen und einen kompakten Überblick über das komplexe Themenfeld PFAS geben, ohne dabei zu umfangreich zu werden. Durch die Referenzierung auf weiterführende und vertiefende Literaturstellen sowie Berichte kann das Papier jedoch auch als Ausgangspunkt für eine intensivere Beschäftigung mit der Thematik herangezogen werden.

2 KLASSIFIZIERUNG, STRUKTUR UND EIGENSCHAFTEN VON PFAS

Klassifizierung und Struktur

Per- und polyfluorierte Alkylverbindungen bilden eine umfangreiche, ständig wachsende Gruppe von Chemikalien. 2025 listet PubCHEM mehr als 7 Mill. PFAS nach OECD-Definition (PubCHEM 2025). Der Vorschlag zur EU-Beschränkung umfasst rund 10.000 PFAS (ECHA 2023d). Die chemischen und physikalischen Eigenschaften der einzelnen Verbindungen können mitunter stark voneinander abweichen. Was sie jedoch eint, sind besonders stabile Kohlenstoff-Fluor (CF)-Bindungen.

PFAS können als organische aliphatische Verbindungen und organische Verbindungen mit aliphatischen Seitenketten verstanden werden, bei denen die Kohlenstoff-Wasserstoff (CH)-Bindungen durch CF-Bindungen ersetzt wurden. Bei perfluorierten Alkylverbindungen wurden alle CH-Bindungen, funktionelle Gruppen ausgenommen, durch CF-Bindungen ersetzt, bei polyfluorierten Alkylverbindungen zumindest zwei. Seit 2021 gibt es auch einen OECD-Vorschlag zur Vereinheitlichung der Definition:

„PFAS sind definiert als fluorierte Stoffe, die mindestens ein vollständig fluoriertes Methyl- oder Methylenkohlenstoffatom (ohne ein daran gebundenes H/Cl/Br/I-Atom) enthalten, d. h. mit einigen wenigen Ausnahmen, jede Chemikalie mit mindestens einer perfluorierten Methylgruppe (-CF₃) oder einer perfluorierten Methylengruppe (-CF₂-) ist ein PFAS.“ (OECD 2021)

Strukturell ähnliche PFAS können in der Regel einzelnen PFAS-Untergruppen zugeordnet werden, deren Vertreter meist ähnliche chemische und physikalische Eigenschaften aufweisen (siehe Abb. 1). Dabei kann man in erster Linie hochmolekulare Polymere von niedermolekularen Verbindungen unterscheiden. Zu den Polymeren zählen zum Beispiel Fluorkunststoffe wie Polytetrafluorethylen (PTFE), aber auch per- und polyfluorierte Polyether und seitenkettenfluorierte Polymere. Zu den niedermolekularen Verbindungen zählen zum Beispiel Perfluoralkane, Perfluoralkylether, per- und polyfluorierte Alkylsäuren (PFAA, PolyFAAS) und viele mehr. PFAA beinhalten wiederum die Gruppe der perfluorierten Carbonsäuren (PFCA) und der Sulfonsäuren (PFSA), zu denen die derzeit wohl bekanntesten und am besten untersuchten PFAS-Verbindungen zählen, z. B. Perfluorooctansäure (PFOA) und Perfluorooctansulfonsäure (PFOS).

Eigenschaften

Die Eigenschaften von PFAS – stabil, hydrophob, lipophob – hängen vor allem von denen des Fluoratoms und der CF-Bindung ab. Letztere ist eine der stärksten Bindungen der organischen Chemie. Sie ist einer der Hauptgründe, warum PFAS hohen Temperaturen standhalten können und gegenüber Chemikalien und UV-Strahlen stabil sind. Auch die Biokompatibilität und schwere biologische Abbaubarkeit – etwa durch Enzyme oder Mikroorganismen – ist darauf zurückzuführen. Ein weiterer Grund ist die dichte Elektronenpackung in den Fluoratomen. Diese schirmen die Kohlenstoffatome ab und tragen damit zusätzlich zur Reaktionsträgheit und Beständigkeit dieser Verbindungen bei.

Eine weitere Eigenschaft, die eine CF-Bindung auszeichnet, ist die geringe Polarisierbarkeit. Die Dichte der Elektronen lässt sich kaum durch elektrische Felder anderer Moleküle beeinflussen. Intermolekulare Wechselwirkungen sind daher sehr schwach und eine sehr niedrige Oberflächenaktivität ist die Folge.

Die meisten PFAS enthalten neben einer hydrophoben fluorierten Kohlenstoffkette zusätzlich funktionelle Gruppen (z. B. Säuren, Alkohole, Säureamide etc.). Dazu zählen auch die bereits genannten PFCA und PFSA (Per- und polyfluorierte Sulfonsäuren). Die hydrophile Carbonsäure- bzw. Sulfonsäuregruppe zusammen mit der hydrophoben fluorierten Kohlenstoffkette ist die Ursache für ihren amphiphilen Charakter. Diese als Fluortenside bekannten Stoffe können Mizellen bilden, die Oberflächenspannung von Flüssigkeiten herabsetzen und sich an Oberflächen anreichern.

Darüber hinaus sind noch das Molekulargewicht (kleines Molekül, großes Molekül, Polymer etc.) und andere Strukturmerkmale (verzweigt, linear, aromatisch etc.) entscheidend bei der Frage, welche chemischen, physikalischen und physiologischen Eigenschaften ein Vertreter der PFAS besitzt.

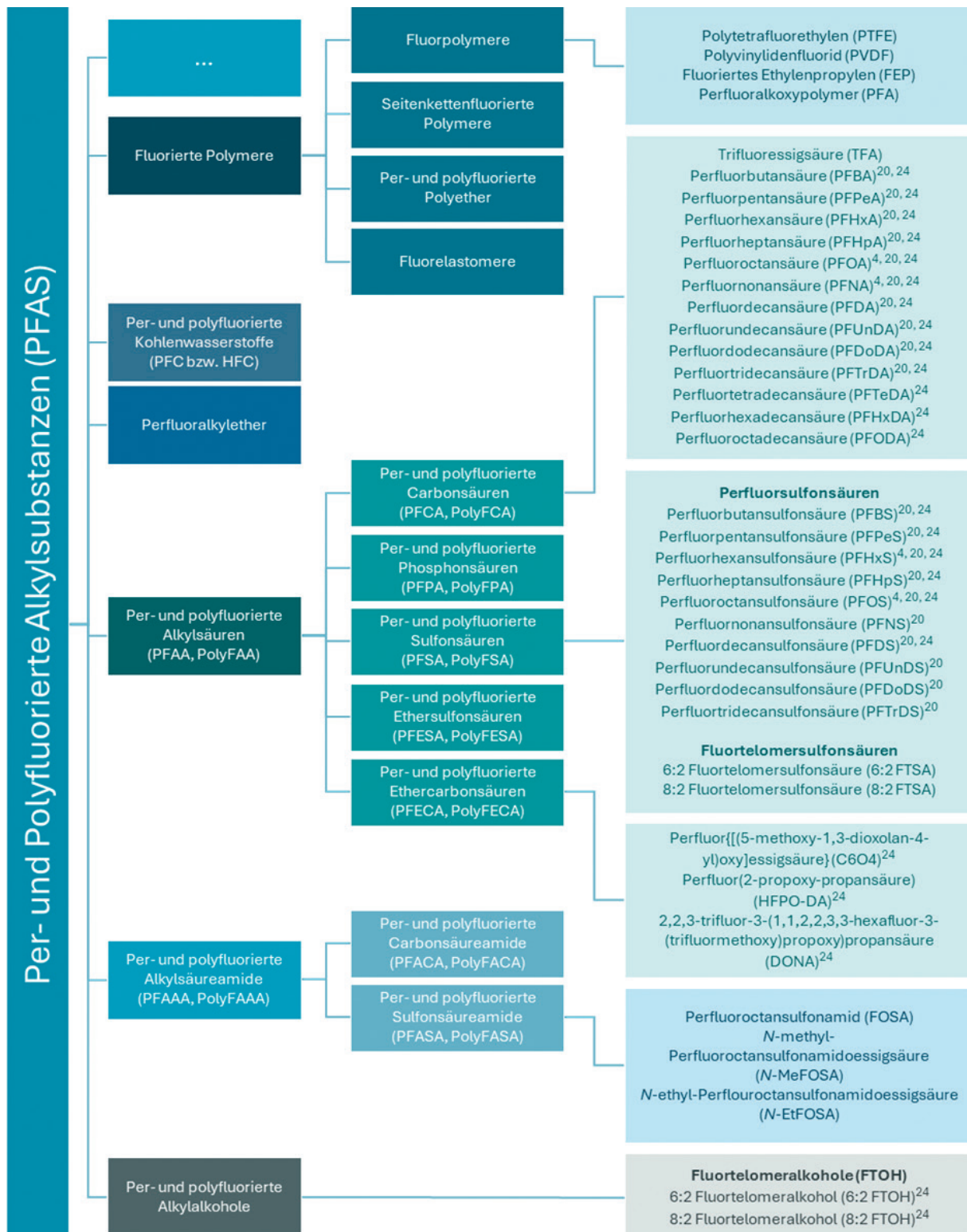


Abb. 1 Überblick über PFAS-Untergruppen: ⁴ ... Von der Europäischen Behörde für Lebensmittelsicherheit (EFSA) zur toxikologischen Bewertung von PFAS verwendete Verbindungen (PFAS-4). ²⁰ ... PFAS, die als chemische Parameter in der EU-Trinkwasserrichtlinie bzw. der österreichischen Trinkwasserverordnung gelistet sind (PFAS-20). ²⁴ ... PFAS, die zur Ergänzung der derzeit in Überarbeitung befindlichen EU-Wasserrahmenrichtlinie vorgeschlagen werden (PFAS-24). Die unter die PFAS-20 bzw. PFAS-24 fallenden Verbindungen umfassen sowohl die protonierte Form als auch deren Salze und Isomere.

3 ANWENDUNG VON PFAS IN INDUSTRIELLEN PROZESSEN UND KONSUMGÜTERN

Sowohl die Herstellung und Weiterverarbeitung als auch die Verwendung von PFAS sind in der EU/in Österreich mit einer großen wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Bedeutung verbunden. Europa ist in stark verzweigte, globale Lieferketten integriert, und auch private Konsument:innen haben mittlerweile Anteil am Import von PFAS-relevanten Produkten durch den globalen Versandhandel. Besondere chemische und physikalische Eigenschaften machten PFAS seit Jahrzehnten (1940er-Jahre) geeignet für viele Anwendungen in der Güterproduktion und in Produkten selbst. Die Stoffe können, je nach Design, u. a. öl- oder wasserabweisend, chemikalienbeständig, hitzebeständig, stabil gegen Bakterien, Licht und UV-Strahlung, nicht brennbar sein oder Isolationseigenschaften (gegenüber elektrischem Strom) aufweisen. In Form von „Persistenz“ wird diese Stabilität im EU-Chemikalienrecht zunehmend als Gefahreneigenschaft ausgelegt, da viele PFAS bei Freisetzungen in die Umwelt hohe Verweildauern aufweisen.

Beispiele für Anwendungen von PFAS in Produktionsprozessen

Die Vermeidung von Verschleiß, die Minimierung des Ressourcen- und Energieeinsatzes und die Haltbarkeit von Komponenten und Anlagen sind betriebswirtschaftlich gebotene Ziele in produzierenden Unternehmen. Auch das bestehende EU-Recht (z. B. Industrieemissions-RL, Emissionsgesetzgebungen) verpflichtet Unternehmen zur Energie- und Materialeffizienz und gibt teils strenge Risikomanagementmaßnahmen und Sicherheitspraktiken vor, um die Freisetzung von Chemikalien in allen Phasen von Herstellungsprozessen in die Umwelt zu verhindern.

Es gibt nur sehr wenige Produktionsbranchen, in denen keine PFAS eingesetzt werden.

Einige beispielhafte Anwendungen für den Einsatz von PFAS sind:

- Elektro- und Elektronikindustrie: breite Anwendung in der Halbleiterproduktion und in Hochspannungssystemen, Trennmittel in Prozesschemikalien etc.
- Pharmazeutische Industrie, chemische Industrie, Lebensmittelindustrie, Papierindustrie etc: chemisch beständige (Rohr- und Reaktor-)Beschichtungen in Prozessanlagen, Herstellung von pharmazeutischen Intermediates etc.
- Metallindustrie und metallverarbeitende Industrie: Dichtungen, Schmierstoffe und Korrosionsschutz in den Produktionsanlagen, Netzmittel/Sprühnebelunterdrückung in der Galvanik etc.
- Alle Produktionsbranchen (Lebensmittelindustrie, Papierindustrie, Chemische Industrie, Baustoffindustrie, Öl- und Gasindustrie, Automobilindustrie etc): Hochleistungsdichtungen (Temperatur, Druck, Chemikalien, pH etc.), Schmierstoffe, Pumpenkomponenten, Korrosionsschutz, flächige Beschichtungen gegen mechanischen Abrieb oder Chemikalien, Isolierungen, Additive in Kunststoffformulierungen, Pneumatik und Hydraulik in der Anlagentechnik, Membranen, Ventile, korrosionsbeständige Beschichtungen für Tanks und Lagerbehälter; Brandschutzmaterial und Feuerbekämpfungsmittel etc.
- Materialprüfung und Labore: Einsatz in der zeitgemäßen Analytik wie Chromatographie, Massenspektroskopie, Sensorik etc.

Beispiele für Anwendungen von PFAS in industriell hergestellten Produkten (Infrastruktur, Gebäudetechnik, Gesundheitssektor, Produktion)

- Brandschutz und -bekämpfung: Feuerlöschschäume und Konzentrate für Spezialanwendungen (flüssige Brennstoffe).
- Kälte- und Klimatechnik, Mechatronik: Kältemittel in Wärmepumpen, Kühlanlagen und Klimaanlage; Dichtungen, Schmierstoffe, Isoliermaterialien, Korrosionsschutz etc.
- Medizintechnik und Produkte: Spezialbeschichtungen für Implantate, Komponenten in Diagnostik- und Laborausrüstungen, Beschichtungen für medizinische Geräte, Nahtmaterial, Herzklappen,

Katheter, Anwendungen für minimal-invasive Eingriffe und Diagnostik, Augen- und Kontaktlinsen-optik etc.

Hygiene und Biokompatibilität von Materialien haben hier eine hohe Bedeutung; u. a. sind Normen der Medizinprodukte-Verordnung und der PSAV (Verordnung Persönliche Schutzausrüstung) einzuhalten.

- Elektro- und Elektronikprodukte: PFAS sind in sehr vielen elektronischen Bauteilen enthalten, Verwendung in Hochspannungs-Schaltanlagen, Beschichtungen für Leistungsschalter und Transformatoren, Isolationssysteme für elektrische Leiter etc.
- Pharmaprodukte: fluorierte Wirkstoffe und Additive zur Verbesserung der Wirksamkeit von Medikamenten.
- Verpackungsprodukte: Fett- und Feuchtigkeitsbarriere oder andere hygienisch relevante Eigenschaften zum Schutz verschiedenster, teils hochwertiger Produkte für Medizin, Pharmazie oder Kosmetik aber auch für Fast Food, Mikrowellenpopcorn oder Anwendungen wie Einweggeschirr, Backpapier etc.
- Textil-, Bekleidungs-, Schuh- und Lederindustrie: Arbeitnehmer:innenschutz durch Beschichtungen gegen Wasser, Öl, Chemikalien, Schmutz, sterile OP-Textilien, Ausrüstung von Einsatzkräften (Feuerwehren, Exekutive, Militär etc.).
- Sonstige verarbeitende Industrie: Hydrophobierungen in Beschichtungen und Lacken, Beschichtungen einer Vielzahl von Produkten, Copolymere für spezielle Barriereeigenschaften.
- Landwirtschaft: Pflanzenschutzmittel.

Beispiele für Anwendungen von PFAS in Konsumgütern bzw. im Haushalts- oder Freizeitbereich (Anwendungen rückläufig aufgrund von freiwilligen Ausstiegen oder Beschränkungen)

- Food-Contact-Materialien (Lebensmittelverpackungen, Take Away, Einwegverpackungen etc.),
- Antihalt-Beschichtungen im Haushalt (Pfannen, Küchenzubehör etc.),
- schmutzabweisende Vorbehandlung von Möbeln und Einrichtungsgegenständen,
- Outdoor-Bekleidung mit wasserabweisenden und atmungsaktiven Imprägnierungen,
- Imprägnierungen für Textilien, Heimtextilien, Schuhe oder Sportartikel, mit wasser-, fett- und schmutzabweisenden Eigenschaften,
- Kosmetikprodukte.

Die überwiegende Mehrheit dieser Produkte für den privaten Sektor wird mittlerweile von außerhalb der EU importiert. Für Beschränkungen von PFAS, die unter die POP (Persistent Organic Pollutants)-Verordnung (Verordnung (EU) 2019/1021) fallen, gelten für Importprodukte dieselben Regelungen wie für im Binnenmarkt hergestellte. Die Einhaltung der Regelungen ist Aufgabe der behördlichen Importkontrollen.

Bedeutung für strategische Ziele der EU wie EU Green Deal, EU Chips Act, Elektromobilität oder 5G-Datenübertragung

Die Europäische Union ist mit zahlreichen internationalen Herausforderungen konfrontiert. Um die Souveränität Europas in Bereichen wie Energiewirtschaft, Telekommunikation, Transport, Versorgung mit Medikamenten oder Versorgung mit Rohstoffen auszubauen, wurden mittlerweile einige Rechtsakte und Strategien auf EU-Ebene ins Leben gerufen. Beispielhaft gelten folgende Anwendungen als wichtig und zugleich PFAS-sensibel, weil diese teilweise technisch schwer ersetzbar sind, und gleichzeitig die Anwendungen gesellschaftlich, gesundheitlich oder sicherheitstechnisch wichtig sind:

- Digitalisierung (Chips, Halbleiter-Bauelemente),
- Grüne Wasserstoffelektrolyse bzw. Brennstoffzellen (Membranen),
- Energiesektor: PV-Solarzellen, Windkraftwerke (Hochleistungsbauteile und -schmierstoffe), Batterien (Elektrolyte, Bindemittel in Kathoden) stationär,
- E-Mobilität,

- Medizinische Produkte und Anwendungen,
- Öffentlicher Verkehr und Transport (z. B. Schienenverkehr und -infrastruktur),
- Kältemittel in Hochtemperatur-Wärmepumpen (80–130 °C) für Dampferzeugung und Fernwärme, Strominfrastruktur (Isolierung von Schaltanlagen, Leitungen, Digitalisierung etc.).

Herausforderungen im Zusammenhang mit PFAS-Anwendungen

- Viele Produkte oder deren Komponenten werden mittlerweile außerhalb der EU gefertigt und importiert. Die Vielfalt der eingesetzten PFAS hat dadurch zugenommen. Eine effektive Kontrolle stellt für Behörden eine große Herausforderung dar.
- Vermeidung, dass PFAS bei Produktion, Gebrauch und Entsorgung in die Umwelt gelangen, insbesondere bei frei verfügbaren Produkten und Verbrauchsartikeln.
- Dauerhafte Zerstörung von PFAS-Verbindungen am Lebensende.
- Kreislaufführung von PFAS-haltigen Produkten.
- Entwicklung zeitnaher Alternativen und Substitute, insbesondere für eine Vielzahl von maßgeschneiderten Spezialanwendungen. In einigen Bereichen von z. B. Konsumprodukten sind Alternativen bereits etabliert und können so die PFAS-Exposition des Menschen bzw. den Eintritt in die Umwelt verringern.

4 FREISETZUNG UND EINTRAGSPFADE VON PFAS IN DIE AQUATISCHE UMWELT

Wie in Kapitel 3 dargestellt, haben PFAS einen extrem breit gefächerten Einsatzbereich. Eine Freisetzung in die Umwelt ist dabei während des gesamten Lebenszyklus möglich. Das bedeutet, Emissionen können während (i) der industriellen Produktion, (ii) der Verarbeitung industrieller Produkte, (iii) der direkten Nutzung von Konsumgütern, (iv) der Alterung und Abgabe aus Konsumgütern über deren gesamte Nutzungszeit oder (v) im Zuge der Abfallbehandlung auftreten (Abb. 2) und sowohl direkt in die Wasserphase (Oberflächenabschwemmung, Grundwasserinfiltration, Abwassereintrag etc.) als auch auf den Boden oder in die Luft erfolgen. Über den Luftpfad findet der Eintrag in die aquatische Umwelt entweder direkt über Niederschlag und Oberflächenabfluss und Deposition auf die Wasseroberfläche oder indirekt nach Deposition über den Boden statt. Der Boden kann als zeitweiliger Puffer gegenüber dem Grundwasser dienen, jedoch auch selbst wieder PFAS langfristig abgeben und so zur Belastung der aquatischen Umwelt beitragen.

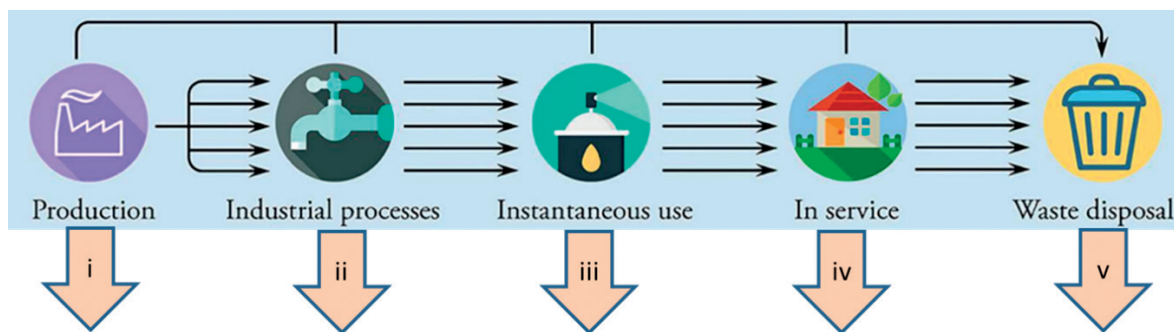


Abbildung 2 PFAS-Verluste in die Umwelt erfolgen während des gesamten Lebenszyklus von der Produktion bis zur Entsorgung (modifiziert nach Li et al. 2021).

Emissionen während der Produktion und Verarbeitung sind vor allem dort relevant, wo große industrielle Standorte vorhanden sind. Diese können zu schwerwiegenden Belastungen aller Umweltkompartimente führen, wie eine Reihe internationaler Beispiele belegt. Eine entsprechende Belastung mit Relevanz für Österreich ist mit dem Chemiepark Gendorf (Bayern), einer PFAS-Produktionsstätte an der Alz, einem Zubringer zum Inn, bekannt. Eine Schließung dieses Standorts für das Jahr 2025 wurde angekündigt. Trotzdem sind weiterhin und langfristig (diffuse) Emissionen aus der kontaminierten Umgebung zu erwarten (Zessner et al. 2025).

Emissionen aus einer unmittelbaren Nutzung von PFAS-haltigen Materialien in das Grundwasser treten vor allem auf, wenn es sich um eine Nutzung mit offener Freisetzung handelt. Dies ist z. B. beim Einsatz von Feuerlöschschäumen der Fall. Ähnliches gilt beim Einsatz von Pestiziden, wo vor allem TFA (Trifluoressigsäure) als das PFAS mit der geringsten Kettenlänge als Abbauprodukt entstehen kann und so in die Umwelt gelangt (näheres zu TFA siehe Kapitel 13). Alterung und Austrag aus der verbauten Umwelt kann dort eine Rolle spielen, wo PFAS-haltige Materialien eingesetzt werden. Die Lagerung von PFAS-haltigen Stoffen im Freien ohne Sammlung und Ableitung der Oberflächenwässer zu Kläranlagen ist ebenfalls als mögliche Belastungsquelle für das Grundwasser zu berücksichtigen.

Bei Tätigkeiten unter Nutzung PFAS-haltiger Produkte und deren Freisetzung (Putzen, Wäschewaschen, Geschirrspülen etc.) in Innenräumen oder bei geregelter Ableitung von Oberflächenwasser über die Kanalisation, können eine direkte Belastung des Grundwassers vermieden und PFAS über die Kanalisation abgeleitet werden. Da Abwasserreinigung für PFAS nur eine schwache Barriere darstellt, ist jedoch durch Nutzung PFAS-haltiger Produkte eine PFAS-Freisetzung in Haushalt, Gewerbe und Industrie (Indirekteinleiter) über das Abwasser bzw. den Kläranlagenablauf zu beachten. Typischerweise erfolgt hier eine Ableitung in Fließgewässer. Eine Grundwasserbelastung ist allerdings durch undichte Bauwerke und Kanäle möglich. PFAS werden nach derzeitigem Wissensstand nur zum Teil im Klärschlamm zurückgehalten. Während der Rückhalt von kurzkettigen PFAS sehr gering ist, nimmt dieser bei langkettigen zu. Auch

Sulfonsäuren dürften eine bessere Adsorbierbarkeit aufweisen als Carboxylsäuren. Durch eine landwirtschaftliche Nutzung von Klärschlamm oder Klärschlammkompost kann es aber lokal zu einer erhöhten Belastung der beaufschlagten Böden kommen. Dies wurde vor allem für PFOS (Perfluoroctansulfonsäure) nachgewiesen (Armellini et al. 2024).

Eine große Rolle kommt bei der Freisetzung von PFAS auch der Abfallbehandlung zu. Speziell dort, wo über lange Zeit kommunaler Abfall mit PFAS-haltigen Produkten abgelagert wurde, können diese Standorte heute wesentliche PFAS-Quellen sein. Bei der Verbrennung von PFAS-haltigen Abfällen ist zu beachten, dass die Zerstörungseffizienz unter den spezifischen Rahmenbedingungen der Anlage (z. B. Verbrennungstemperatur, Abfallzusammensetzung, Verweilzeit, Anlagenkonfiguration) differieren kann.

Bekannte Standorte mit hoher Belastung von Böden und Grundwasser mit PFCA und PFSA sind derzeit in Österreich vor allem im Zusammenhang mit dem langfristigen Einsatz von PFAS-haltigen Feuerlöschschäumen (Aqueous Film Forming Foam – AFFF) assoziiert (Brielmann et al. 2023 und Kapitel 14). Daneben können auch Standorte von Hausmülldeponien eine potenzielle Quelle erheblicher lokaler Grundwasserbelastungen darstellen (Liu et al. 2023). Erhöhte Grundwasserbelastungen mit TFA (Trifluoressigsäure) können dagegen neben einer ubiquitären Hintergrundbelastung vor allem auf landwirtschaftliche Aktivitäten und damit verbundene Aufbringung von Pflanzenschutzmitteln zurückgeführt werden (Sturm et al. 2023; Joerss et al. 2024 und Kapitel 13).

Die Belastung von Fließgewässern mit PFAS ist zumeist nur durch eine Summenwirkung unterschiedlicher Herkunftsbereiche und Eintragspfade zu erklären. Eine Emissionsmodellierung über Stoffbilanzmodelle, wie es z. B. Guidance Document No. 28 der Europäischen Kommission für die Erstellung von Inventaren für Emissionen prioritärer Stoffen (EC 2012) vorgeschlagen wird, stellt ein bewährtes Instrument zur Identifikation der relevanten Herkunftsbereiche und damit eine wesentliche Grundlage für die Abschätzung der Wirksamkeit von Gewässerschutzmaßnahmen dar. Aus einer Anwendung des MoRE-Modells für PFAS im oberen Einzugsgebiet (Zessner et al. 2025) ist in Abb. 3 der relative Anteil des Beitrags unterschiedlicher Eintragspfade an der PFAS-Belastung der Donau oberhalb von Wien und oberhalb von Budapest beispielhaft für jene PFAS dargestellt, die in der Donau über einer Bestimmungsgrenze von 1 ng/l gefunden wurden. Neben dem Einfluss von punktförmigen Eintragspfaden wie industriellen und kommunalen Kläranlagen, ist auch die Bedeutung diffuser Einträge deutlich zu erkennen. Vor allem Altlasten (AFFF-Applikationen, Altstandorte von Deponien) dürften dabei eine erhebliche Rolle spielen.

PFAS-Belastungen von Fließgewässern sind nicht nur in Hinblick auf die Belastung aquatischer Ökosysteme relevant, sondern können auch über Bioakkumulation und den Verzehr von Fischen oder als Transportpfad in die Trinkwassergewinnung über Uferfiltration (z. B. an der Donau in Bratislava oder Budapest) zur Belastung der Bevölkerung beitragen. Bei der Uferfiltration ist zu berücksichtigen, dass diese für PFAS nur eine geringe Barriere darstellt (Obeid et al. 2023).

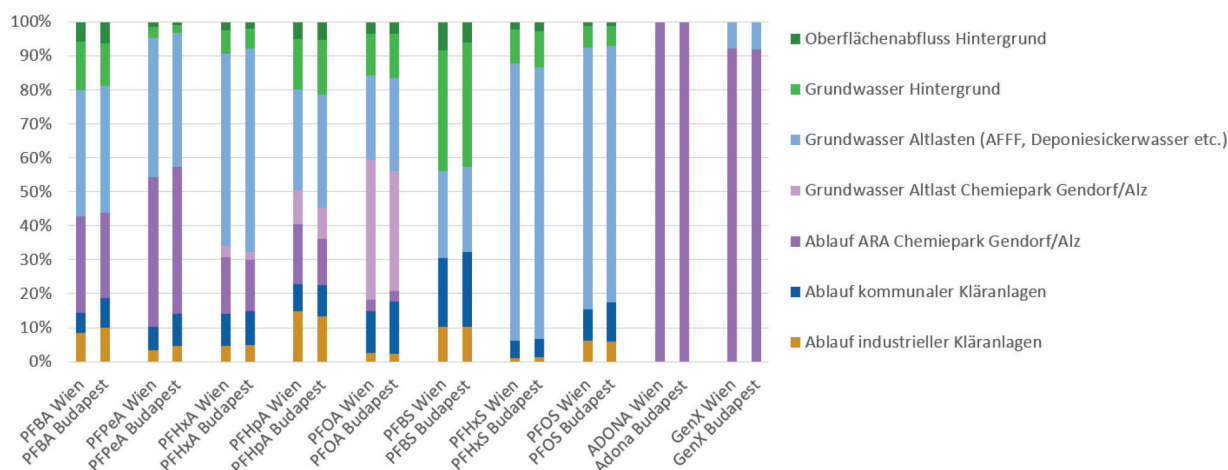


Abb. 3 Über Emissionsmodellierung abgeschätzter Anteil der Eintragspfade an der Belastung durch unterschiedliche PFAS in der Donau oberhalb von Wien (PFAS Wien) und oberhalb von Budapest (PFAS Budapest) für den Zeitraum 2016–2022 (modifiziert nach Zessner et al. 2025). Folgende Herkunftsbereiche für die Emissionsfrachten in die Donau sind relativ zueinander dargestellt: Oberflächenabfluss und Grundwasser Hintergrund sind Emissionsfrachten, die über Oberflächenabfluss oder Grundwasser in die Fließgewässer des Einzugsgebiets eingetragen werden und nicht auf spezifische Altlasten zurückzuführen sind; Grundwasser Altlasten bezeichnet einen Herkunftsbereich von Frachten, die in Abhängigkeit von der Bevölkerungsdichte zu Emissionen führen, die über die Hintergrundbelastung hinausgehen und überwiegend auf die Ausbringung von AFFF oder alte kommunale Deponien zurückzuführen sind; Grundwasser Altlast Chemiepark bezeichnet Einträge, die auf die Belastung der Region um die PFAS-Produktionsstätte bei Gendorf an der Alz zurückzuführen sind und über das Grundwasser in die Fließgewässer eingetragen werden. Ablauf ARA Chemiepark Gendorf/Alz bezeichnet Frachten, die aus den direkten Emissionen der Abwasserreinigungsanlage des Chemieparks stammen; Ablauf kommunale und industrielle Kläranlagen bezeichnet den Anteil der Emissionsfrachten, die auf die Summe der kommunalen oder industriellen Kläranlagen (ohne Chemiepark Gendorf) zurückzuführen sind.

5 TECHNOLOGIEN ZUR BEHANDLUNG VON PFAS-BELASTETEN WÄSSERN

Die große Variabilität an chemischen und physikalischen Eigenschaften, die unterschiedlichen Kettenlängen der individuellen PFAS sowie TFA stellen eine Herausforderung für deren Entfernung aus PFAS-belasteten Wässern dar (Glüge et al. 2020; Kempisty & Racz 2021). Abhängig von der vorhandenen Konzentration an PFAS im Rohwasser sowie den zu erreichenden Zielkonzentrationen gibt es jedoch verschiedene Technologien, um diese aus der aquatischen Umwelt bzw. den flüssigen Stoffströmen der (Siedlungs-) Wasserwirtschaft zu entfernen. Alle diese Technologien sind jedoch mit Einschränkungen verbunden. Insbesondere die Polarität (hydrophiler kurzkettiger Spezies sowie lipophiler langkettiger Vertreter) ist nicht nur für deren Mobilität und das Verhalten in der Umwelt, sondern auch bei den Entfernungstechnologien von zentraler Bedeutung. Zudem ist auch die neben der fluorierten Alkylgruppe vorhandene hydrophile Gruppe (Sulfat- oder Carboxyl-Gruppe) relevant.

Bei den Technologien muss zudem unterschieden werden, ob es a) zu einer tatsächlichen Veränderung der Ausgangssubstanz im Sinne eines teilweisen oder vollständigen Abbaus (z. B. Verkürzung der Alkylkette oder Freisetzung von TFA bzw. Defluorination und somit Mineralisierung) kommt oder b) eine Entfernung aus der betrachteten Matrix (z. B. Grundwasser, Boden) ohne Veränderung der Ursprungssubstanz durch Anlagerung an einen Feststoff (Adsorber, Ionentauscher) und damit Anreicherung in einer anderen Matrix erfolgt. Abhängig von der Ausgangskonzentration kann eine initiale Anreicherung der PFAS aus dem zu behandelnden Wasser in einem hochkonzentrierten Teilstrom sinnvoll sein, der dann gezielt weiterbehandelt wird. Grundsätzlich sind PFAS und TFA aufgrund der starken CF-Bindung sehr stabil, was einem biologischen und technologischen Abbau entgegensteht.

Weiters ist für die Evaluierung der Entfernungstechnologien zu beachten, ob die Entfernung auf die Konzentrationen der einzelnen Verbindungen bezogen wird oder auf die Entfernung des toxikologischen Potenzials der Mischung aller auftretenden PFAS. Dies ist insofern relevant, als längerkettige PFAS grundsätzlich ein höheres toxikologisches Potenzial aufweisen als kürzerkettige Spezies und TFA, technologisch jedoch auch besser zurückgehalten werden bzw. zu kürzerkettigen Spezies umgebaut werden können.

Biologische Methoden

Biologische Prozesse zum Abbau von PFAS finden sich vereinzelt zwar in der Literatur und werden auch in der Umwelt beobachtet, jedoch kommt es hierbei ausschließlich zu einer Transformation längerkettiger Spezies zu kürzeren, nicht zum Abbau in vollständig defluorinierte Endprodukte (Berhanu et al. 2023; Kempisty & Racz 2021). Biologische Abbauprozesse sind dennoch ein wachsender Bereich der Forschung, ihre Anwendung erfordert jedoch oft lange Behandlungszeiten und ist durch die Notwendigkeit spezifischer Umweltbedingungen begrenzt (Tang et al. 2024). Es gibt zudem keine Hinweise auf die biologische Metabolisierung von TFA.

Adsorptionstechniken

Adsorption an verschiedenen Medien ist eine der zentralen Möglichkeiten, PFAS aus unterschiedlichen Wassermatrizes zu entfernen, wobei die Entfernung grundsätzlich mit der Kettenlänge der PFAS sowie der hydrophilen Endgruppe korreliert. PFAS > C4 (PFHpA (Perfluorheptansäure) bzw. PFHpS und längere Ketten) – und damit die toxikologisch relevanteren Spezies – werden durch natürliche und technische adsorptive Prozesse durchaus gut zurückgehalten; Perfluorsulfonsäuren besser als Perfluorcarbonsäuren; TFA wird nicht entfernt.

Das am meisten etablierte und erforschte Adsorptionsmaterial ist Aktivkohle (granuliert und pulverförmig), wobei auch andere Materialien zur PFAS-Adsorption möglich sind (Gagliano et al. 2020; Kempisty & Racz 2021):

- Ionentauscharze speziell für kurzkettige PFAS,
- natürliche Polymere (z. B. β -Cyclodextrin) bzw.
- künstlich hergestellte Adsorber (z. B. Tonmineralien).

Ein vielversprechender Forschungsfokus liegt gegenwärtig in Ansätzen zur Erhöhung der Adsorptionsfähigkeit von Aktivkohle für kurzkettige PFAS $\leq C4$ und TFA. Dafür sind insbesondere spezielle, oberflächenverändernde Aktivierungsprozesse (z. B. Lee et al. 2024) oder die Kombination mit Metalloxiden (MeO) zu nennen. MeO werden etwa in Form von Nanopartikeln in der Porenstruktur der Kohle verankert (siehe z. B. Parka et al. 2015). In beiden Fällen wird neben der hydrophoben Anlagerung der fluorierten Kohlenstoffkette, den Van-der-Waals-Kräften zwischen PFAS und Kohle und einer Porenbindung durch physikalische Einschließung insbesondere die elektrostatische Anziehung an geladene Oberflächen als Aspekt der Physiosorption verstärkt und damit die Adsorption der kleinen Moleküle in Summe deutlich erhöht. Zudem lässt sich bei MeO neben der verstärkten Adsorption über den Einsatz von nullwertigem Eisen (Fe (0)) auch ein Fenton-Oxidationsprozess umsetzen, der imstande ist, auch kürzerkettige PFAS abzubauen.

Die Entfernung von PFAS und TFA über Ionenaustauscher beruht auf dem Prinzip, dass im Wasser gelöste Ionen gegen Ionen auf einem festen Trägermaterial (in der Regel einem Harz) ausgetauscht werden. Dieser Prozess ist besonders bei der Abreinigung von anionischen, negativ geladenen PFAS effektiv. Hier werden stark basische Anionenaustauscherharze mit hoher Selektivität für organische Anionen eingesetzt, deren aktive Gruppen (oft quartäre Ammoniumgruppen) fest im Harz verankert sind und deren Gegenionen (Cl^- oder OH^-) beim Kontakt mit PFAS im Wasser durch diese ersetzt werden. Bei der Anwendung ist darauf zu achten, dass keine Moleküle aus dem Harz in das zu behandelnde Wasser übertreten. Ein kompetitiver Austausch mit anderen Ionen der Wassermatrix beeinträchtigt insbesondere bei hohen Salzkonzentrationen die Effizienz. Die Regenerate aus den Ionentauschern müssen getrennt entsorgt bzw. behandelt werden, eignen sich jedoch sehr gut zur Anreicherung von PFAS für einen weiteren destruktiven Entfernungsprozess.

Membranfiltration

Filtrationsanwendungen mittels technischer Membranen sind aktuell die einzige Möglichkeit, mit einer einzelnen Technologie alle PFAS aus einer wässrigen Matrix zu entfernen. Hierbei werden jedoch Membranen mit einem Cut-Off hin zur Umkehrosmose benötigt, um alle Kontaminanten zu entfernen. Die PFAS werden dabei in einem Retentatstrom aufkonzentriert, der etwa 20 % der behandelten Wassermenge ausmacht und nicht in die Umwelt abgeleitet werden soll. Auch die membrangetriebenen Prozesse eignen sich sehr gut zur Anreicherung von PFAS für einen weiteren destruktiven Entfernungsprozess.

Weitere Verfahren

Verfahren, die tatsächlich zu einem Abbau (Verkürzung der Alkylkette; Freisetzung von F^-) führen, beruhen in der Regel auf Red-Ox-Prozessen, bei denen Elektronen entweder auf die Molekülstruktur der PFAS übertragen (reduktive Prozesse) oder entfernt werden (oxidative Prozesse). Die Bereitstellung der Redox-äquivalente beruht dabei auf unterschiedlichsten physikalischen und/oder chemischen Prozessen, worin sich die Verfahren dann auch technologisch unterscheiden. Der Mechanismus der reduktiven und oxidativen Prozesse wird etwa in Deng et al. (2021) anhand von PFOS und PFOA (Perfluorooctansäure) detailliert beschrieben. Eine ausschließliche Oxidation durch eine Ozonung, wie sie in der Trinkwasseraufbereitung oder für die weitergehende Abwasserreinigung zum Einsatz kommt, führt zu keinem Abbau von PFAS und TFA. Elektrochemische Prozesse und AOP (Advanced Oxidation Processes) bieten jedoch eine Möglichkeit, speziell längerkettige PFAS abzubauen, wobei hier üblicherweise ebenfalls nur eine Transformation zu kürzeren PFAS erreicht wird. Beispiele zu Technologien, die auf Red-Ox-Prozessen beruhen, sind in etwa Fang et al. (2024), Gar Alalm & Boffito (2022) und Mojiri et al. (2023) beschrieben:

- elektrochemische Verfahren (z. B. Eisen-/Graphitelektroden; BDD – Boron-doped diamond electrode; TiO_2 – Titan-Dioxid electrode),
- photokatalytische Reaktion (z. B. TiO_2 und Licht),
- nZVI – nano Eisen (Nanoscale Zero Valent Iron – nanoskaliges nullwertiges Eisen),
- Advanced Oxidation Processes (AOPs): UV/Persulfat ($\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$) | UV/ H_2O_2 | Ozon/UV,
- Plasma (thermisch | nichtthermisch).

Anzumerken ist, dass der Großteil dieser Technologien bisher nur in Laborversuchen getestet wurde, und diese Technologien aufgrund ihrer Komplexität und Kosten noch nicht großtechnisch umgesetzt wurden.

Eine weitere Technologie zur Entfernung von PFAS bietet die „Schaumfraktionierung“. Hierbei wird Luft bzw. Gas (N_2 , Ar etc.) mittels Belüfter in das zu behandelnde Wasser eingeblasen, wobei sich eine Schaumphase an der Wasseroberfläche bildet. Wegen ihrer tensidartigen Eigenschaften reichern sich in dieser Schaumphase überwiegend langkettige PFAS ($> \text{C}_6$) an. Spezielle Additive ermöglichen auch das Abtrennen von kurzkettigeren PFAS mit dieser Technologie. Die Schaumphase wird abgezogen, weiter aufkonzentriert (OPEC Systems 2020) und muss schlussendlich wie das Konzentrat aus den Membranfiltrationen entsprechend entsorgt und weiter behandelt werden.

Sonolyse ist eine weitere derzeit in der Forschung untersuchte Technologie, welche mittels Schalls bei bestimmten Frequenzen (350–600 kHz) eine Kavitation der PFAS erzeugt, sodass diese vollständig zerstört werden können (Kempisty & Racz 2021).

Zusammenfassung

Die erwähnten Technologien werden in Abb. 4 zusammenfassend miteinander verglichen, wobei die Kriterien „Einsatzreife“ bzw. generelle Marktverfügbarkeit (als TRL – Technology Readiness Level bzw. Technologie-Reifegrad), die grundsätzliche Eignung zur Abreicherung von PFAS im zu behandelnden Wasser und eine Anreicherung in einem verfahrenstechnischen Teilstrom dargestellt werden. In jenen Fällen, in denen zwar eine Abreicherung in der wässrigen Phase, jedoch keine Kettenverkürzung bis hin zu TFA oder Defluorination zu Fluorid (F) bzw. Flusssäure (HF) erfolgt, kommt es durch den Transfer aus der flüssigen Phase im selben Ausmaß immer zu einer Anreicherung in einem Teilstrom bzw. in einer Festphase (in Abb. 4 als „Anreicherung in Teilmatrix“ bezeichnet). Diese Aufkonzentration erlaubt etwa eine zweistufige Behandlung eines geringeren Volumens und verbreitert die Möglichkeiten zum Einsatz weiterer Technologien, die bei niedrigen Konzentrationen und hohem volumetrischen Durchsatz weniger effizient sind.

Abb. 4 verdeutlicht auch, dass es bei nicht wenigen Technologien durchaus zu einer Verkürzung der Kettenlängen langkettiger PFAS hin zu kurzkettigen Spezies kommt, dass für einen Abbau bis hin zu TFA bzw. für eine vollständige Defluorination zu Fluorid (F) bzw. Flusssäure (HF) jedoch nur sehr beschränkt Technologien zur Verfügung stehen, die zudem meist noch einen niedrigen Reifegrad bzw. eine geringe Verfügbarkeit aufweisen.

Eine ausgereifte Technologie mit weitgehender Zerstörung von PFAS bietet aktuell nur die thermische Oxidation bei einer ausreichend hohen Temperatur (1000–1500 °C) und entsprechender Verweildauer. Hierbei werden alle organischen Fluorverbindungen weitgehend zu CO_2 , H_2O und HF (und weitere) abgebaut.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die 4. Reinigungsstufe auf Kläranlagen gemäß der europäischen kommunalen Abwasserrichtlinie 2024 („EU-KARL“) keine Senke für insbesondere die kurzkettigen PFAS darstellt.

biologische Prozesse					
biologischer Abbau					
Anlagerung an Biomasse					
Membrantechnologien					
Nanofiltration / Umkehrosmose	↑				
drucklose Membrantechnologien	↓				
Adsorptionstechniken					
Adsorption Aktivkohle	↑				
Adsorption Ionentauscher	→				
Adsorption Natürliche Polymere	↓				
Adsorption Aktivkohle + MeO	↓				
Adsorption Aktivkohle + MeO + Fenton	↓				
weitere Techniken					
Ozonung (4. Reinigungsstufe)	↑				
Elektrochemisch (zB. BDD Elektroden)	→				
Plasma (thermisch nicht-thermisch)	→				
AOP (H ₂ O ₂ + O ₃ mit/ohne UVc)	↑				
nZVI (Nanoscale Zero Valent Iron)	↓				
photokatalytisch (zB. Photolyse)	→				
Sonolyse	→				
Schaumfraktionierung	→				
thermische Oxidation (Verbrennung)	↑				
	TRL bzw. Einsatzreife	Abreicherung in Rohwasser	Anreicherung in Teilmatrix	„Kettenverkürzung“	TFA F
Legende					
	↑	„hoch“		„ja“ bzw. „hoch“	
	→	„mittel“		„teilweise“ bzw. „bis zu einem gewissen Grad“	
	↓	„gering“		„nein“	

Abbildung 4 Zusammenfassung der im Kapitel 5 besprochenen Technologien zur Entfernung von PFAS aus Rohwässern

6 MOBILITÄT UND PERSISTENZ IN DER UMWELT

Unter Mobilität versteht man die Tendenz einer Substanz, sich nach ihrer Freisetzung in die Umwelt über kurze oder lange Strecken auszubreiten und in Gewässer, einschließlich Trink- und Grundwasser, zu gelangen. Stoffe, die schnell biologisch abbaubar sind oder stark an den Boden adsorbieren, sind in der Regel für die aquatische Umwelt weniger problematisch als Stoffe, die sehr persistent und wenig adsorptiv sind. Aus diesem Grund werden sogenannte persistente, mobile und toxische Stoffe (PMT) bzw. sehr persistente und sehr mobile Stoffe (vPvM) als besonders kritisch für die Belastung von Wasserressourcen angesehen.

Die Mobilität von neutralen Stoffen hängt von der Persistenz und dem $\log K_{OC}$ -Wert, also wie stark die Stoffe im Boden bzw. Sedimenten gebunden werden, ab (Gustafson et al. 1989). Für die Sorption an den Boden spielen daher für neutrale Stoffe hauptsächlich hydrophobe Wechselwirkungen eine Rolle. Bei ionischen Stoffen ist die Mobilität komplexer und hängt von der ionischen Wechselwirkung zwischen der Matrix (Boden, Schlamm und Sediment) und dem Stoff ab, daher spielen die Ladung des Stoffs und die Charakteristika des Bodens (z. B. Austauschkapazität für Ionen, pH-Wert) eine wesentliche Rolle (Sigmund et al. 2022; Arp & Slinde 2018). Für PFAS gilt: je länger die Kette der perfluorierten Alkylsäuren (PFAA: C5–C15) ist, desto höher ist auch die Adsorption über hydrophobe Wechselwirkungen (ECHA 2022a). Die Zunahme der Sorption mit der Kettenlänge konnte für Sedimente, Böden und Schlämme mit perfluorierten Carbonsäuren (PFCAs), perfluorierten Sulfonsäuren (PFSA), perfluorierten Phosphonsäuren (PFPA) und perfluorierten Phosphinsäuren (PFPIA) gezeigt werden (z. B. Higgins & Luthy 2006; Lee & Mabury 2017). Generell sorbieren zudem PFSA stärker als PFCAs, die Sorption steigt mit der Kettenlänge (Campos-Pereira et al. 2018). Dem gegenüber nimmt die Mobilität mit geringerer Kettenlänge zu.

Neben ihrer Mobilität sind PFAS aufgrund ihrer CF-Bindungen auch extrem persistent und manche gehören daher zu den vPvM-Stoffen (sehr persistent und sehr mobil). Die nicht-fluorierten Anteile von Vorläuferstoffen können in der Umwelt zu extrem persistenten sogenannten „arrow-head“-PFAS umgewandelt werden. Die möglichen Transformationen der nicht-fluorierten Anteile umfassen atmosphärische Oxidationen, metabolische Transformationen und Hydrolysereaktionen, übrig bleiben (zum Großteil) kleinere Moleküle mit vollständig fluorierten Kohlenstoffketten und einer funktionellen Kopf- oder Seitengruppe (z. B. Carboxyl-Gruppe), die oft negativ geladen sind und zu einer höheren Polarität und damit Mobilität führen (ECHA 2022b).

vPvM-Stoffe haben aufgrund der Bioverfügbarkeit ein sehr hohes Potenzial für die Exposition des Menschen über Nahrungsmittel, vor allem über kontaminiertes Trinkwasser. Ultra-kurzkettige PFAS (C1–C3) werden vermehrt in ionischen Flüssigkeiten, wie z. B. in Lithiumbatterien angewendet, generell sind diese Stoffe in Hinblick auf ihr Umweltverhalten und ihre Toxizität nicht gut untersucht (Brunn et al. 2023). Die Trifluoressigsäure (TFA) ist weltweit verbreitet und deren Konzentrationen im Wasser steigen an (Cousins et al. 2019 b).

Drei PFAS wurden bereits im Rahmen der Identifikation als besonders besorgniserregende Stoffe (Substance of very high concern, engl.) unter REACH als mobil eingestuft: PFBS (Perflourbutansulfonsäure, ECHA 2019a), HFPO-DA bzw. GenX (Perfluor(2-propoxy-propansäure), ECHA 2019b), und PFHxA (Perfluorhexansäure, ECHA 2021). Die genannten Stoffe sind zudem sehr persistent. PFBS und HFPO-DA sind zudem sehr mobil und PFHxA ist mobil. Die $\log K_{OC}$ -Werte zu einzelnen individuellen PFAS, die gemäß CLP-Verordnung (Classification, Labelling and Packaging, EU 2023/707) als mobil oder sehr mobil klassifiziert wurden, finden sich z. B. in Umweltbundesamt (2023a) und in ECHA (2022 a).

7 BEDEUTUNG VON PFAS IN DER AQUATISCHEN UMWELT

Informationen zur Toxizität sind lediglich für eine begrenzte Anzahl von PFAS vorhanden, unter anderem für eine Reihe langkettiger perfluorierter Carbon- und Sulfonsäuren. Im Rahmen der CLP-Verordnung (EC) Nr. 1272/2008 sind z. B. PFOA, PFNA (Perfluorononansäure), PFDA (Perfluordecansäure) sowie PFOS u. a. als vermutlich kanzerogen (Carc. 2), reproduktionstoxisch (Repr. 1B) und als potenziell schädigend für Säuglinge über die Muttermilch (Lact.) harmonisiert eingestuft. Zusätzlich liegt eine harmonisierte Einstufung von PFOS, PFOA, PFNA und PFHpA (Perfluorheptansäure) als organschädigend (STOT RE 1) vor. Hinsichtlich der aquatischen Toxizität sind PFOS als Aquatisch Chronisch 2 und die TFA als Aquatisch Chronisch 3 eingestuft. Ebenfalls gibt es eine harmonisierte Einstufung für eine akute Gesundheitsschädlichkeit bei Verschlucken, Hautkontakt und Einatmen (Acute Tox. 4) für TFA, PFOS, PFOA und PFNA. Eine Reihe von PFAS, darunter PFBS, PFHxS (Perfluorhexansulfonsäure) sowie PFHpA (Perfluorheptansäuren) und deren Salze, HFPO-DA und ihre Salze und Acylhalogenide, PFOA und ihr Ammoniumsalz, PFNA und PFDA sowie deren Natrium- und Ammoniumsalze und PFUnDA (Perfluorundecansäure), PFDoDA (Perfluordodecansäure), PFTrDA (Perfluortridecansäure) und PFTeDA (Perfluortetradecansäure) sind weiters als besonders besorgniserregende Substanzen (SVHC) aufgrund ihrer toxischen Eigenschaften und/oder ihrer Persistenz bzw. ihres Bioakkumulationspotenzials identifiziert (ECHA 2023c).

Die Ergebnisse von Tierstudien sowie epidemiologischer Untersuchungen zeigen, dass bestimmte PFAS mit verschiedenen Arten von Schilddrüsenerkrankungen, Krebs, Immuntoxizität, Lebertoxizität, Reproduktions- und Entwicklungstoxizität in Zusammenhang stehen (ATSDR 2021).

Im Menschen können bestimmte PFAS (z. B. PFOA) den Fettstoffwechsel beeinflussen und den Cholesterinspiegel sowie bestimmte Leberenzymwerte im Serum erhöhen (EFSA 2018). Vor allem das Risiko für das sich in Entwicklung befindliche Immunsystem von Ungeborenen durch die Summe von PFOA, PFNA, PFHxS und PFOS wird als besonders kritisch erachtet und es wurde darauf basierend von der EFSA (= Europäische Behörde für Lebensmittelsicherheit = European Food Safety Authority) eine tolerierbare wöchentliche Aufnahmemenge von 4,4 ng/kg Körpergewicht abgeleitet (EFSA 2020). Im Gesundheitssektor des Europäischen Wirtschaftsraums werden die durch die PFAS-Belastung verursachten Kosten auf 52 bis 84 Mrd. Euro pro Jahr geschätzt (Goldenman 2019).

In aquatischen Organismen können PFAS zu einer Reihe von negativen Effekten führen. Diese umfassen unter anderem eine Reproduktions- und Entwicklungstoxizität, Störungen der Sexual- sowie Schilddrüsenhormone, Störungen des Immunsystems sowie Schädigungen auf neurologischer und Entwicklungsebene. Für diese Effekte gibt es verschiedene Auslöser wie beispielsweise oxidativer Stress oder auch direkte Interaktionen mit biologischen Makromolekülen. Die damit verbundenen Änderungen führen u. a. zu Veränderungen in Geweben, Intersex, Apoptose, Schilddrüsenstörungen, beeinträchtigte Embryonalentwicklung sowie Geschlechterverteilung in Populationen (Lee et al. 2020).

8 ANREICHERUNG IN DER NAHRUNGSKETTE

Bioakkumulation in Organismen und Menschen

Im Organismus binden insbesondere längerkettige PFAS an Albumin und andere Proteine im Blut, sie zirkulieren daher im Körper und werden in Organen wie der Leber und den Nieren angereichert (Trier et al. 2017; Forsthuber et al. 2020). Die Halbwertszeiten von PFAS variieren je nach Organismus, Kettenlänge und Struktur. Während die Halbwertszeiten von PFHxS, PFOS und PFOA in Mäusen und Ratten wenige Tage betragen, liegen diese beim Menschen im Bereich mehrerer Jahre. Halbwertszeiten von kurzkettigen PFAS sind wesentlich geringer, sie werden leichter mit dem Urin ausgeschieden als langkettige. Geschätzte bzw. berechnete Halbwertszeiten beim Menschen sind 25,8 Tage für PFBS, 5,3–8,5 Jahre für PFHxS, 3,4–5,4 Jahre für PFOS und 2,7–3,8 Jahre für PFOA (Li et al. 2018; Olsen et al. 2007, 2009; DeWitt 2015). Die Bioakkumulation nimmt in der Regel mit der Länge der Perfluoralkylkette zu. Unter REACH erfüllen PFOA, PFNA und PFDA das Kriterium für bioakkumulierend (B) und z. B. PFUnDA, PFDoDA, PFTrDA, und PFTeDA und PFHxS das Kriterium für sehr bioakkumulierend (vB). Momentan gibt es jedoch noch zu wenig Daten, um das Bioakkumulationspotenzial für alle PFAS zu belegen, zumal die Anzahl der PFAS-Verbindungen tausende Stoffe umfasst. Die PFAS-Analysen in Tieren beschränken sich auf bekannte PFAS (PFBA (Perfluorbutansäure), PFPeA (Perfluorpentansäure), PFHxA, PFOA, PFNA, PFDA, PFUnDA, PFDoDA, PFTrDA, PFTeDA, und PFPeDA bzw. PFBS, PFPeS (Perfluorpentansulfonsäure), PFHxS, PFHpS (Perfluorheptansulfonsäure), PFOS, PFNS (Perfluoronansulfonsäure) und PFDS (Perfluordecansulfonsäure)), es ist jedoch davon auszugehen, dass die Gesamt-PFAS-Belastung in Tieren wesentlich höher ist und zahlreiche weitere unbekannte und analytisch nicht erfasste Verbindungen und Transformationsprodukte umfasst.

Bioakkumulation in Pflanzen

Die Anreicherung von PFAS in Pflanzen ist aufgrund der strukturellen Unterschiede der einzelnen PFAS komplex. Kleinere Moleküle wie kurzkettige PFAS sind mobiler, haben einen niedrigeren Log KOC und reichern sich typischerweise in oberirdischen Pflanzenteilen an. Langkettige PFAS sind eher in den Wurzeln zu finden (Li et al. 2022). PFAS konnten als Hintergrundkonzentration in den österreichischen Nationalparks Donauauen und Neusiedlersee in allen untersuchten Umweltmatrizes (Wasser- und Bodenproben sowie Wildpflanzen) nachgewiesen werden. In 18 verschiedenen Wildpflanzenarten, allesamt mehrjährige Arten, wurde PFBA (C4) mit Abstand in der höchsten Konzentration nachgewiesen, gefolgt von PFOS. Als mögliche Quellen der Belastung wurden Abwässer aus Kläranlagen, Emissionen aus Müllverbrennungsanlagen sowie atmosphärische Deposition identifiziert. Aus den gemessenen Hintergrundkonzentrationen lässt sich derzeit keine akute Gefährdung für Mensch und Umwelt ableiten; zugleich wird deutlich, wie wichtig eine fortlaufende Überwachung durch entsprechende Monitoring-Programme ist (Weinbauer et al. 2025). Bestimmte fluorhaltige Pflanzenschutzmittelwirkstoffe, wie beispielsweise Flufenacet, Tritosulfuron oder Flurtamon, können durch Abbau im Boden zu TFA metabolisiert werden. Das im Bodenwasser gelöste TFA kann anschließend von Pflanzen über die Wurzeln aufgenommen und so in die oberirdischen Pflanzenteile transportiert werden. Bislang gibt es keine Hinweise dafür, dass Pflanzen TFA metabolisch umwandeln oder abbauen können. Folglich verbleibt das aufgenommene TFA weitgehend unverändert in der Pflanze, vorwiegend in wässrigen Geweben wie Blättern und Sprossen.

9 CHEMISCHE ANALYTIK

Einzelsubstanzen

Zur Bestimmung der PFAS in wässrigen Matrices werden in Österreich meist folgende zwei Norm-Methoden angewendet: EN 17892 (2024) sowie DIN 38407-42 (2011).

Für die Analytik der meisten PFAS hat sich die LC-MS als Stand der Technik etabliert. Dabei wird die Probe entweder direkt analysiert oder vorher über SPE (solid-phase extraction)-Kartuschen aufkonzentriert.

Die Schwierigkeit bei der Analytik der PFAS liegt in der großen Bandbreite der chemisch-physikalischen Eigenschaften dieser Stoffgruppe. Es müssen kurz- bis langkettige Verbindungen mit unterschiedlichen Fluorierungsgraden und Polaritäten bestimmt werden. Die Herausforderung beginnt bereits bei der Probenahme. Die längerkettigen PFAS (ab ca. $C > 10$) beginnen vermehrt an den Gefäßwänden der Probenahmegebinde zu adsorbieren und sind dementsprechend für die nachfolgende Analytik nicht mehr zur Gänze zugänglich. Daher muss bei der direkten Analytik von längerkettigen PFAS (ab ca. $C > 10$) sichergestellt sein, dass die Zugabe von Methanol bereits im Probenahmegefäß stattfindet. Hierbei hat sich die Zugabe von 30–50 % Methanol zur wässrigen Probe bewährt. Bei der Messung über SPE-Kartuschen muss sichergestellt sein, dass das Probenahmegefäß bei der Extraktion mit Methanol nachgespült wird. Der hohe Anteil an organischem Lösungsmittel könnte Verluste bei SPE-Probenvorbereitung bzw. Probleme bei der nachfolgenden HPLC-Messung bereiten. Gerade die kurzkettigen Substanzen zeigen schlechtere Peakformen und Empfindlichkeiten in Gegenwart von hohen Methanol-Konzentrationen und es kann auch vermehrt zu Signalüberlagerungen kommen.

Eine weitere Herausforderung stellen Blindwerte dar. PFAS sind Substanzen, die in vielen Produkten Anwendung finden, so auch bei der Herstellung von Bekleidung, Papier, Kunststoffen und analytischen Geräten. Auf dem Weg von der Probenahme bis hin zur Analytik stecken viele Möglichkeiten zur Kontamination der Wasserprobe. Bei der Probenahme muss darauf geachtet werden, dass durch die Bekleidung, das Probenahmeequipment oder die verwendeten Gebinde keine PFAS ungewollterweise an die Wasserprobe abgegeben werden. Bei der Analytik wiederum besteht die Gefahr der Erzeugung falsch positiver Signale durch Kontaminationen über das analytische Messsystem, wie Schlauchverbindungen und Lösungsmittel sowie Teile aus PTFE (Polytetrafluorethylen) und PVDF (Polyvinylidenfluorid). Regelmäßige Blindwertkontrollen sind notwendig.

Bei der massenseitigen Detektion in der LC-MS-Analytik hat die Probenmatrix einen großen Einfluss auf die Ionisation und beeinflusst damit auch direkt das Messergebnis, da es zu einer Unterdrückung oder Verstärkung des Messsignals kommen kann. Daher ist der Einsatz entsprechender interner Standards zur Qualitätssicherung bei der Quantifizierung unumgänglich. Limitierend hierbei sind jedoch deren Verfügbarkeit und die Kosten.

Welche Verbindungen sind zu untersuchen?

Gemäß EU-Trinkwasserrichtlinie (RL (EU) 2020/2184) und österreichischer Trinkwasserverordnung (TWV) sind aus der Schadstoffgruppe der PFAS 20 Einzelsubstanzen zu bestimmen. Dies umfasst die Perfluorcarbonsäuren und die Perfluorsulfonsäuren mit jeweils 4 bis 13 Kohlenstoffatomen (siehe Abb. 1). In dem von der Europäischen Kommission im Oktober 2022 vorgelegten Vorschlag zur Aufnahme von PFAS in die „Environmental Standards Directive“ ist demgegenüber die Bestimmung von 24 Einzelsubstanzen vorgesehen, wobei der Vorschlag einerseits zusätzliche Substanzen enthält, andererseits enthält er nicht alle der 20 PFAS aus der Trinkwasserrichtlinie.

Im Kommissionsvorschlag gelistete Substanzen (Oktober 2022), die über die 20 PFAS der Trinkwasserverordnung hinausgehen:

PFTeDA, PFHxDA (Perfluorhexadecansäure), PFODA (Perfluoroctadecansäure), 6:2 FTOH (6:2-Fluortelomeralkohol), 8:2 FTOH (8:2-Fluortelomeralkohol), GenX HFPO-DA bzw. GenX, DONA (2,2,3-trifluor-3-[1,1,2,2,3,3-hexafluor-3-(trifluormethoxy)propoxy]propansäure), C6O4 (Perfluor{[(5-methoxy-1,3-dioxolan-4-yl)oxy]essigsäure}) (siehe Abb. 1).

Hinweis: Für die Analyse von unpolaren PFAS wie z. B. Fluortelomeralkoholen ist eine GC-MS-Analytik notwendig.

Summenparameter

Aufgrund der großen Anzahl an Substanzen, die dem Spektrum der PFAS zugeordnet werden, ist die vollständige Erfassung dieser Substanzgruppe über die Einzelstoffanalytik schwierig bis unmöglich. Heute sind gerade einmal weniger als 1 % aller PFAS über eine Einzelstoffanalytik zugänglich. Daher wird an der Entwicklung von Summenparametern als Ergänzung zur Einzelstoffanalytik geforscht. Folgende Methoden stehen derzeit zur Verfügung:

Total Oxidisable Precursor-Assay (TOPa):

Der größte Anteil der polyfluorierten Verbindungen, die zu den Vorläuferverbindungen zählen, ist mit der reinen Einzelstoffanalytik nicht bestimmbar. Nach dem TOP-Assay-Verfahren von Houtz und Sedlak (2012) können durch eine alkalische Oxidation diese Vorläuferverbindungen in bestimmbare Perfluorcarbonsäuren (PFCA) umgewandelt und mittels LC-MS bestimmt werden.

Der TOPa als Summenparameter wird nur als Konventionsparameter anzuwenden sein und bedarf daher im Vorfeld einer grundlegenden regulatorischen Standardisierung. Entsprechende Normierungsvorhaben sind z. B. in Deutschland im Laufen.

Adsorbierbares organisch gebundenes Fluor (AOF), Extrahierbares organisch gebundenes Fluor (EOF):

Hierbei handelt es sich um eine summenparametrische Analytik mittels Verbrennungs-Ionenchromatographie (CIC). Beim AOF werden organische Fluorverbindungen durch Adsorption auf Aktivkohle angereichert bzw. beim EOF nach Extraktion. Danach wird die Aktivkohle bzw. das Lösungsmittel verbrannt und dabei werden sämtliche Fluorverbindungen zu Fluorwasserstoff (HF) oxidiert. Die Quantifizierung erfolgt ionenchromatographisch als Fluorid. Bei der Messung von Umweltproben scheint sich der AOF für wässrige Proben und der EOF für Feststoffe zu etablieren. Die erreichbaren Bestimmungsgrenzen sind aber in etwa um den Faktor 1000 höher als bei der Einzelsubstanzanalytik und daher eher für kontaminierte Standorte bzw. Schadensfälle anwendbar.

Für die AOF-Analytik gibt es neben einer aktuellen DIN 38409-59 (2022) auch den Entwurf zur ÖNORM EN ISO 18127 (ISO/DIS 18127:2024).

Aktuelle praktische Erfahrungen wie z. B. im Altlastenbereich bei der Herstellung von Bodeneluaten oder bei der Messung von schwierigen Probenmatrizes wie Kläranlagenzuläufen und Deponiesickerwässern zeigen, dass es durchaus noch Entwicklungsbedarf bei den erwähnten Summenparametern gibt. Bei Bodeneluaten und schwierigen Probenmatrizes sind teilweise unplausibel hohe AOF-Werte auffällig geworden, wodurch sich die Interpretierbarkeit des Summenparameters im Vergleich zur Einzelstoffanalytik teilweise schwierig gestaltet.

TTR-TR β CALUX®-Bioassay:

Der TTR-TR β CALUX®-Bioassay ist ein In-vitro-Testsystem, das zur Bewertung der potenziellen endokrinen Wirkung von Umweltchemikalien wie PFAS entwickelt wurde. Im Fokus steht dabei die Beeinflussung der Schilddrüsenhormonaktivität, insbesondere über den Schilddrüsenhormon-Rezeptor β . Beim Vorhandensein von PFAS in der Probe wird das Hormon T4 vom TTR-Rezeptor in den Testzellen verdrängt. Die damit einhergehende Veränderung des Lumineszenzsignals wird gemessen. Im Gegensatz zur chemischen Einzelstoffanalytik wird beim Bioassay effektebasiert die Wirkung aller Substanzen gemessen, die denselben biologischen bzw. toxikologischen Effekt haben. Dies hat allerdings auch den Nachteil, dass Substanzen mit ähnlichen Wirkungen auf den TTR-Rezeptor wie PFAS ebenfalls die Ergebnisse des entsprechenden biologischen Wirktests beeinflussen können und daher zu Verzerrungen der Ergebnisse oder zu falsch positiven Ergebnissen führen. Für einfache Matrices (z. B. Grundwasser oder Kläranlagenabläufe) kann der Bioassay für ein erstes grobes Screening in Betracht gezogen werden. Für die Untersuchung von komplexen Matrices (z. B. Deponiesickerwasser oder Kläranlagenzulaufe) sowie für die Überwachung und Bewertung des Parameters „PFAS gesamt“ ist der Bioassay (derzeit) nicht geeignet (UBA 2023).

Der TTR-TR β CALUX®-Bioassay reagiert mit einer Vielzahl verschiedener PFAS. Während der Bioassay vor allem bei langkettigen PFAS gut reagiert, binden kurzkettige PFAS (z. B. TFA) kaum bis gar nicht an den TTR-Rezeptor (Sosnowska et al. 2025).

Die Bestimmungsgrenze liegt derzeit bei ca. 0,5 μg PFAS /l bzw. 0,5 μg PFOA-Äquivalente/l.

Ultrakurzkettige PFAS

In jüngster Zeit geraten zunehmend ultrakurzkettige PFAS in den Fokus der Aufmerksamkeit, die aufgrund der höheren Polarität hohes Potenzial haben, sich im Wasserkreislauf fortzubewegen. Gemäß OECD-Definition (OECD 2021) wird Trifluoressigsäure (TFA, als Trifluoracetat) als PFAS-Verbindung mit der kürzesten Kettenlänge definiert und wurde bereits ubiquitär in Wasserproben nachgewiesen. PFAS mit einer Kettenlänge $< C\ 4$ finden bislang noch keine Berücksichtigung in der analytischen Normung bzw. in der EU-Trinkwasserrichtlinie. Die ultrakurzkettigen PFAS können bislang mit herkömmlicher Reversed-phase-Chromatographie nur unzureichend erfasst werden. Hierfür könnten sich beispielsweise die Ionentauschchromatographie in Kombination mit Massenspektrometrie bzw. Mixed-Mode-Säulen als Alternativen bewähren. Allerdings sind diese neuen Verfahren bislang noch wenig in der Praxis erprobt.

10 TFA: EIGENSCHAFTEN, UMWELTVERHALTEN, QUELLEN UND REGULATORIK

Chemische Eigenschaften

Die Trifluoressigsäure (TFA, CF_3COOH , CAS-Nr. 76-05-1) ist eine ultra-kurzkettige Perfluorcarbonsäure (PFCA) und zählt gemäß OECD-Definition zur Stoffgruppe der PFAS (Wang et al. 2021). TFA zeichnet sich durch eine außergewöhnlich hohe chemische Stabilität aus: Die CF-Bindung der CF_3 -Gruppe ist resistent gegenüber oxidativen und reduzierenden Einflüssen, Hydrolyse sowie biologischem Abbau. TFA ist sehr gut wasserlöslich und liegt unter Umweltbedingungen ($\text{pK}_a = 0,3\text{--}0,4$) fast ausschließlich als Trifluoracetat-Anion CF_3COO^- vor (ECHA 2023a; Solomon et al. 2016).

Umweltverhalten und Persistenz

In der Umwelt ist TFA extrem persistent und mobil. Aufgrund ihrer hohen Wasserlöslichkeit und geringen Sorption an Böden kann TFA leicht ins Grundwasser gelangen (Umweltbundesamt 2023b). Bisher sind keine natürlichen Abbaupfade von TFA in der aquatischen Phase bekannt (Lueken et al. 2010). Die Verbindung reichert sich daher im Wasserkreislauf an und ist mittlerweile ubiquitär nachweisbar – vom Niederschlag über Oberflächengewässer bis hin zu Grund- und Trinkwasser (Arp et al. 2024).

Quellen und Eintragspfade

TFA entsteht in der Umwelt hauptsächlich als Abbauprodukt anthropogener Vorläufersubstanzen, die mindestens eine CF_3 -Gruppe enthalten (Freeling & Björnsdóttir 2023). TFA stellt das stabile Endprodukt dieser Abbauprozesse dar und wird somit in der Umwelt nicht weiter abgebaut (Scheurer et al. 2017). Zu den Vorläufersubstanzen zählen beispielsweise fluorierte Kältemittel (z. B. HFO-1234yf), bestimmte Pflanzenschutzmittel (z. B. Fluopyram, ca. 40 % der auf dem Markt befindlichen Pflanzenschutzmittel enthalten eine C--CF_3 -Gruppe; Ogawa et al. 2020) sowie Arzneimittel wie das antivirale Medikament Nirmatrelvir/Ritonavir (Paxlovid®). In Österreich sind laut einer aktuellen Übersicht 26 PFAS-Pestizidwirkstoffe mit TFA-Bildungspotenzial zugelassen, wobei die beiden mengenmäßig am stärksten eingesetzten PFAS-Wirkstoffe, Flufenacet und Fluazinam, ein größeres Potenzial zur Freisetzung von TFA aufweisen als die Summe der übrigen 24 PFAS-Wirkstoffe (Global 2000 2024).

11 UNTERGRUND- UND GRUNDWASSERKONTAMINATIONEN DURCH PFAS AUS FEUERLÖSCHSCHÄUMEN

PFAS-haltige AFFF-Löschschäume werden seit etwa Mitte der 1960er-Jahre vornehmlich zum Löschen von Flüssigkeitsbränden eingesetzt. In derartigen Schäumen sind bzw. waren PFAS teilweise in sehr hohen Konzentrationen enthalten – PFOS etwa noch in den 1990er-Jahren in Konzentrationen bis zu 10 g/l (UBA 2022b). Nach den ersten Anwendungsbeschränkungen bzw. -verboten kamen ab den 2000er-Jahren vermehrt PFOS-Ersatzstoffe, wie z. B. 6:2 FTS, Capstone A/B, GenX oder PFBS zum Einsatz.

In Anbetracht fehlender Standorte mit PFAS-Primärproduktion dürfte es sich bei der (historischen) Verwendung von AFFF-Löschschäumen um den in Österreich wichtigsten Eintragungspfad von PFAS in den Untergrund und das Grundwasser handeln. Es ist das einzige Eintragungsszenario, bei dem größere Mengen an PFAS direkt in den Untergrund eingebracht wurden. In diesem Zusammenhang sind vor allem Feuerlöschübungsplätze relevant, bei denen der Löschschaumeintrag in regelmäßigen Intervallen und über längere Zeiträume erfolgte. Derartige Übungsplätze sind sowohl im Umfeld von Freiwilligen Feuerwehren als auch von Berufs- oder Betriebsfeuerwehren vorhanden und werden regelmäßig genutzt. Bei Betriebsstandorten, an denen Brände besonders starke Auswirkungen haben können, wie z. B. bei Großtanklagern oder Flughäfen, sind Löschübungen gesetzlich oder per Bescheid vorgeschrieben (BMK 2024b).

Auf Basis der Ergebnisse der GZÜV-Sondermessprogramme (siehe Kapitel 13) und der „POPMON-Studien“ (AGES & Umweltbundesamt 2018, 2021) wurden in Österreich bis dato drei konkrete Standorte identifiziert, von denen sehr weitreichende Grundwasserverunreinigungen durch PFAS ausgehen. Bei allen dreien handelt es sich um Altstandorte im Sinne des Altlastensanierungsgesetzes, bei denen die Kontaminationen des Untergrunds und des Grundwassers auf die historische Verwendung von PFAS-haltigen AFFF-Feuerlöschschäumen zu Übungszwecken zurückzuführen sind und bei denen Sanierungsmaßnahmen notwendig sind bzw. sein werden (Altlast S23 „Flughafen Salzburg“ (UBA 2022b), Altlast ST37 „Feuerwehrschießplatz Lebring“ (UBA 2024) und das Umfeld des Flughafens Linz-Hörsching).

Je nach Größe des Übungsbereichs sind von den erheblichen PFAS-Kontaminationen mehrere hunderttausend Kubikmeter Untergrundvolumen betroffen. Die vom kontaminierten Untergrund ausgehenden Schadstofffahnen weisen im unmittelbaren Grundwasserabstrom sehr hohe PFAS-Konzentrationen von bis zu deutlich über 10 µg/l (PFAS-20) auf, sind aufgrund der hohen Mobilität der PFAS mehrere Kilometer lang (Konzentrationen > 0,1 µg/l) und beeinträchtigen zum Teil auch Trinkwasserversorgungsanlagen. Als Hauptkontaminanten sind in allen drei Fällen PFOS sowie untergeordnet PFHxS festzustellen. Teilweise sind auch die oben genannten PFOS-Ersatzstoffe (hauptsächlich 6:2 FTSA – Fluortelomersulfonsäure) oder deren kurzkettige perfluorierte Abbauprodukte (z. B. PFPeA) in hohen Konzentrationen nachzuweisen (UBA 2022b, 2024).

Aufgrund der geschilderten Problematik ist davon auszugehen, dass in den nächsten Jahren weitere ähnlich gelagerte Fälle in Zusammenhang mit Feuerlöschübungsplätzen bei Großstandorten (Flughäfen, Tanklager) auftreten werden, bei denen Sanierungsmaßnahmen notwendig sein werden. Erfahrungen mit kleineren Übungsplätzen von Freiwilligen Feuerwehren fehlen bis dato und werden derzeit im Rahmen eines Pilotprojekts im Bezirk Leibnitz gewonnen (BMK 2024b).

12 CHEMIKALIENRECHTLICHE VORGABEN UND ENTWICKLUNGEN

Internationale Ebene

Das Stockholmer Übereinkommen über persistente organische Schadstoffe beschäftigt sich bereits seit mehr als einem Jahrzehnt aufgrund deren hoher Persistenz mit PFAS. Derzeit sind folgende Stoffgruppen mit spezifischen Ausnahmen beschränkt:

- PFOS und ihre Derivate,
- PFOA, ihre Salze und PFOA-verwandte Verbindungen,
- PFHxS (Perfluorhexansulfonsäure), ihre Salze und PFHxS-verwandte Verbindungen.

Die Gruppe der PFCAs mit einer Kettenlänge von 9–21 wurden bei der 12. Vertragsstaatenkonferenz im Mai 2025 in das Übereinkommen aufgenommen.

EU-Gesetzgebung

In der Chemikalienstrategie für Nachhaltigkeit (Europäische Kommission 2020) schlägt die Europäische Kommission (EK) ein umfassendes Maßnahmenpaket zur schrittweisen Einstellung der Verwendung von PFAS vor, mit Ausnahme jener Anwendungen, die essenziell für die Gesellschaft sind. Dies wird mit der hohen Zahl an Wasser- und Bodenkontaminationen und den gesundheitlichen, ökonomischen und sozialen Kosten begründet.

Bei der Herstellung und Verwendung von PFAS setzen die chemikalienrechtlichen Regelungen an. Die POP-Verordnung (Verordnung (EU) 2019/1021) – basierend auf dem Stockholmer Übereinkommen – verbietet bzw. beschränkt die Herstellung, das Inverkehrbringen, die Verwendung und das Recycling von persistenten organischen Schadstoffen. Die Verwendung von PFOS und ihrer Derivate ist seit 2010 in Europa verboten, mittlerweile ohne Ausnahmen. Die Verwendung von PFOA, ihrer Salze und Vorläuferverbindungen ist seit 2020 stark eingeschränkt. Auch die Beschränkung von PFHxS wurde durch die POP-V umgesetzt. Ergänzend zu den Verboten und Beschränkungen wird an einer EU-weiten Leitlinie zur Umstellung auf fluorfreie Feuerlöschschäume sowie zur Reinigung von PFAS-haltigen Systemen gearbeitet, die im Mai 2025 finalisiert wurde.

Im Rahmen der REACH-Verordnung (Verordnung Nr. 1907/2006/EG) wurden zuletzt die langkettigen PFCAs Perfluorierte Carbonsäuren C9–C14 (Verordnung (EU) 2021/1297) und PFHxA (Verordnung (EU) 2024/2462) in ihrer Anwendung beschränkt. Um die sogenannte „regrettable substitution“ zu verhindern, also den Umstieg auf chemisch ähnliche Stoffe, die auch in ihren Eigenschaften den beschränkten Stoffen entsprechen, wird das Konzept der Gruppenbeschränkung verwendet. Daher legte die Europäische Kommission im Dezember 2024 einen Vorschlag zur Beschränkung aller PFAS in Feuerlöschschäumen vor. Dieser Vorschlag wurde im April 2025 beschlossen. Der Vorschlag sieht einen stufenweisen Totalausstieg aus fluorhaltigen Schäumen vor. Ausnahmen für zivile und militärische Schifffahrt und Sevesoanlagen werden festgelegt.

Im März 2024 legten 5 EU-Mitgliedstaaten ein Dossier zur Beschränkung aller PFAS („Universelle PFAS-Beschränkung“) vor. Dieses extrem umfangreiche Dossier sieht eine weitgehende Beschränkung aller PFAS-Anwendungen einschließlich der Fluorpolymere vor. Wo noch keine Alternativen vorhanden sind, werden zeitlich unbegrenzte bzw. 5 bis 12 Jahre andauernde Ausnahmen vorgeschlagen. Die Anwendungen sind in Sektoren eingeteilt und werden auch anhand dieser Sektoren von den wissenschaftlichen Ausschüssen der Europäischen Chemikalienagentur (ECHA = European Chemicals Agency / Europäische Chemikalienagentur) geprüft. Die in einem Begutachtungsverfahren erhaltenen über 5000 Kommentare werden eingearbeitet. Besondere Herausforderungen sind u. a. die Tragweite der Beschränkung (ca. 10.000 Stoffe, beruhend auf der Definition von PFAS durch die OECD aus dem Jahr 2021) und die in manchen Bereichen fehlenden Alternativen. Die Prüfung des Dossiers soll bis Ende 2025 abgeschlossen

sein. Danach muss die Europäische Kommission den Mitgliedstaaten einen Beschränkungsvorschlag vorlegen.

Parallel dazu gibt es im Wasserrecht (siehe Kapitel 13), im EU-Anlagenrecht und Lebensmittelrecht Bemühungen, PFAS zu regulieren. Beispiele:

- EU-Industrieemissions-Richtlinie (IED-RL (EU) 2024/18785/Industrieemissionsportal-VO (EU) 2024/1244): PFOA und PFHxS wurden in Anhang II der Industrieemissionsportal-Verordnung aufgenommen. Bis 31.12.2025 hat die EK einen delegierten Rechtsakt zur Festlegung von zu berichtenden Schadstoffen inkl. Schwellenwerten für die Freisetzungen in Luft, Wasser und Boden zu erlassen.
- EU-Verpackungsverordnung (Packaging und Packaging Waste Regulation, PPWR) (EU) 2025/40: Ab dem 12. August 2026 dürfen Lebensmittelverpackungen, die PFAS enthalten, nicht mehr in Verkehr gebracht werden (Grenzwerte: 25 ppb für einzelne PFAS, 250 ppb für die Summe der PFAS).
- Kommunale-Abwasser-Richtlinie 2024/3019 (Richtlinie (EU) 2024/3019 über die Behandlung von kommunalem Abwasser): Die Richtlinie sieht die Überwachung von Zu- und Abläufen von Kläranlagen auf PFAS (Summe PFAS oder PFAS Gesamt, abhängig vom Vorliegen einer Analyseverfahren) bei der Einleitung in Einzugsgebiete der Trinkwassergewinnung vor. Diese Überwachungsdaten sollen in die 2033 vorgesehene Evaluierung der Richtlinie einfließen. Damit soll geprüft werden, ob die erweiterte Herstellerverantwortung auch auf PFAS ausgedehnt werden soll.

13 MONITORING UND WASSERRECHTLICHER RAHMEN

Perfluoralkylsäuren (PFAAs) stellen mit ihren prominentesten Vertreterinnen PFOS und PFOA jene Untergruppe der PFAS dar, die in den letzten Jahrzehnten am häufigsten hergestellt und verwendet wurde. Für PFOS und PFOA liegen auch umfangreiche Monitoringdaten in unterschiedlichen Kompartimenten der aquatischen Umwelt vor (siehe dazu auch UBA 2022a und ÖWAW 2023).

In der Wasserrahmenrichtlinie (WRRL, RL 2000/60/EG idgF) sind PFOS und PFOS-Derivate seit 2013 als prioritär gefährliche Stoffe identifiziert. Die Ausweisung als prioritär gefährlicher Stoff hat zum Ziel, die Emissionen, Einleitungen und Verluste in Gewässer schrittweise einzustellen. Die Umweltqualitätsnormenrichtlinie (UQN-RL, RL 2008/105/EG in der Version von Richtlinie 2013/39/EU) setzt Umweltqualitätsnormen (UQN) für prioritäre Stoffe in Oberflächengewässer fest, die den guten chemischen Zustand von Oberflächengewässern gemäß WRRL definieren. Für PFOS sieht die UQN-RL eine Zulässige Höchstkonzentrations-UQN (ZHK-UQN) von 36 µg/l und eine Biota-UQN (Fische) von 9,1 µg/kg Feuchtgewicht vor. Ausgehend von dieser Biota-UQN wurde unter Berücksichtigung von Verteilungs- und Anreicherungskoeffizienten auch eine UQN für die wässrige Phase und bezogen auf den Jahresdurchschnitt (JD-UQN) von 0,00065 µg/l festgelegt.

In Umsetzung der WRRL wird alle sechs Jahre im Zuge der Bestandsaufnahme (Ist-Bestandsanalyse) das Risiko der Verfehlung des guten chemischen Zustands von Oberflächengewässern durch prioritäre Stoffe beurteilt, und das Monitoring in Oberflächengewässern dort intensiviert, wo das Risiko einer Zielverfehlung ausgewiesen wurde. Das Monitoring prioritärer Stoffe sowie die Zustandsbewertung gemäß WRRL sind in Österreich im Wasserrechtsgesetz (WRG, BGBl. Nr. 215/1959 idgF), in der Gewässerzustandsüberwachungsverordnung (GZÜV, BGBl. II Nr. 479/2006 idgF) und in der Qualitätszielverordnung Chemie Oberflächengewässer (QZV Chemie OG, BGBl. II Nr. 96/2006 idgF) umgesetzt. PFOS wird seit 2013 regelmäßig im Oberflächengewässer untersucht, wobei die gemessenen Konzentrationen teilweise über der UQN liegen. Im dritten Nationalen Gewässerbewirtschaftungsplan (NGP) wurde in 0,5 % der Gewässer ein nicht guter Zustand auf Basis von Monitoringdaten von PFOS in Biota ausgewiesen (BMLRT 2022). Zudem wurden im Jahr 2023 33 Fließgewässermessstellen der überblicksweisen Überwachung und acht Seen auf 29 PFAS-Einzelstoffe untersucht.

Die WRRL fordert die Erfassung relevanter Emissionen prioritärer und prioritär gefährlicher Stoffe in einem Emissionsregister. In Österreich werden diese Vorgaben durch die Emissionsregisterverordnung (EmRegV-OW 2017, BGBl. II Nr. 207/2017 idgF) umgesetzt. Verpflichtende Messungen von PFOS für ausgewählte industrielle Einleiter und kommunale Kläranlagen erfolgten erstmals 2023. Diese Emissionsdaten bilden eine der wesentlichen Grundlagen der regelmäßigen Bestandsaufnahmen.

Für Grundwasser sehen die WRRL und die Grundwasserrichtlinie (GWRL, RL 2006/118/EG) und auch die Qualitätszielverordnung Chemie Grundwasser (QZV Chemie GW, BGBl. II Nr. 98/2010 idgF) bislang keine Qualitätsstandards (QS) bzw. Schwellenwerte für PFAS vor. Unabhängig davon wurden PFOS und PFOA in den letzten Jahren wiederholt im Rahmen von GZÜV-Sondermessprogrammen im Grundwasser analysiert (Brielmann et al. 2022). Eine umfassende österreichweite Untersuchung von 27 PFAS-Einzelstoffen in ca. 2.000 Messstellen hat im Jahr 2022 stattgefunden (Brielmann et al. 2023).

TFA wurde 2018/ 2019 in belastungsorientiert ausgewählten Messstellen erstmals im Grundwasser gemessen. Im Jahr 2024 wurden TFA sowie die ultrakurzkettigen PFAS PFPrA (Perfluorpropansäure) und PFPrS (Perfluorpropansulfonsäure) in ausgewählten Grundwasserproben und in Jahresmischproben von 33 Fließgewässern untersucht.

Alle Ergebnisse der Gewässerzustandsüberwachung sind in der H2O-Fachdatenbank des Wasserinformationssystems Austria (WISA) öffentlich zugänglich (UBA 2025) und werden in den Wassergüteberichten des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Klima- und Umweltschutz, Regionen und Wasserwirtschaft ([BMLUK 2025](#)) veröffentlicht.

Seit 2020 ist verstärkt die Reglementierung von PFAS in der EU-Wassergesetzgebung zu beobachten. Die europäische Trinkwasserrichtlinie (TWRL, RL 2020/2184/EU) sieht zwei Parameter für die Erfassung von PFAS vor: Der Parameter „Summe der PFAS“ umfasst die Summe von 20 ausgewählten perfluorierten Alkylsäuren und sieht einen Grenzwert von 0,10 µg/l für diese Summe vor. Der Parameter „PFAS gesamt“ bezeichnet die Gesamtheit der PFAS mit einem Grenzwert von 0,50 µg/l in Trinkwasser. Beide Grenzwerte gelten ab 2026 und es bleibt den Mitgliedstaaten überlassen, ob beide Parameter oder nur einer der beiden Parameter in die nationale Gesetzgebung aufgenommen wird. Die österreichische Trinkwasserverordnung (TWV, BGBl. II Nr. 304/2001 idgF) übernimmt den Parameterwert für den Parameter „Summe der PFAS“.

Am 26. Oktober 2022 veröffentlichte die Europäische Kommission einen Entwurf zur Änderung der WRRL, der GWRL und der UQN-RL (EK 2022). Dieser enthält eine UQN für die Summe von 24 PFAS in Oberflächengewässern und in Biota, ausgedrückt als PFOA-äquivalente Konzentrationen. Als JD-UQN in Oberflächengewässern wird ein Wert von 0,0044 µg PFOA-Äquivalente/l und in Biota ein Wert von 0,077 µg PFOA-Äquivalente/kg Nassgewicht vorgeschlagen. Für die Summenbildung werden die Konzentrationen der Einzelsubstanzen mit einem relativen Potenzfaktor (relative potency factor, RPF) multipliziert und anschließend aufsummiert. Der Entwurf der Europäischen Kommission umfasst auch einen Vorschlag zur Änderung der GWRL, in dem eine neue Grundwasserqualitätsnorm von 0,0044 µg PFOA-Äquivalente/l für die Summe von 24 PFAS vorgeschlagen wird. Die Verhandlungen zwischen Europäischer Kommission, Europäischem Parlament und Rat der Europäischen Union sind derzeit noch nicht abgeschlossen.

14 MASSNAHMEN, RISIKOMANAGEMENT IN ÖSTERREICH

Der **Nationale PFAS-Aktionsplan** – Maßnahmen zur Reduktion der Belastung von Mensch und Umwelt durch per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS) in Österreich – wurde vom Umweltbundesamt in Koordination mit dem Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK) entwickelt. Der Aktionsplan soll eine Vorgehensweise vom Auffinden einer Belastungssituation bis hin zum Vollzug eines bestimmten Regelungsbereichs sowie Zuständigkeiten von Behörden aufzeigen und Empfehlungen auch hinsichtlich der Kommunikation formulieren. Ein weiteres wesentliches Element ist die Vorsorge, um Emissionen bzw. Einträge in die Umwelt zu verhindern.

Der Aktionsplan umfasst die prioritären Handlungsfelder Emissionen und Schutz der Umwelt, Schutz des Grund- und Trinkwassers sowie pflanzlicher und tierischer Lebensmittel, Belastung der Menschen und Kommunikation. Es wird dargestellt, welche Maßnahmen bereits getroffen wurden, in welchen Bereichen Datenlücken bestehen, wo weitere Maßnahmen erforderlich sind und wie die Vorsorge und Nachsorge im Fall einer Kontamination funktionieren (BMK 2024a).

Spezifisch auf den Bereich Altlasten zugeschnitten ist die **PFAS-Strategie im Rahmen der Vollziehung des Altlastensanierungsgesetzes** (BMK 2024b). Um bei der Identifizierung von PFAS-Quellen möglichst rasch und effizient vorgehen zu können, wurden alle ALSAG-relevanten Themenbereiche analysiert und daraus erforderliche Maßnahmen für den ALSAG-Vollzug abgeleitet. Als wichtigste, kurzfristig umzusetzende Maßnahmen wurden folgende identifiziert:

- Untersuchung von Altstandorten mit Fluorpolymerproduktion,
- systematische Erfassung von Feuerlöschübungsplätzen und darauf aufbauende Untersuchungen an Standorten mit hohem Risikopotenzial,
- Untersuchung von zivilen und militärischen Flughäfen,
- Untersuchung von Altstandorten und Altablagerungen mit erhöhter Wahrscheinlichkeit eines PFAS-Eintrags in die Umwelt (z. B. Raffinerien und große Tanklager, Galvanikbetriebe, große Hausmülldeponien),
- Etablierung eines PFAS-Forschungsschwerpunkts im Rahmen der Altlastenforschung gemäß Umweltförderungsgesetz.

15 ZUSAMMENFASSUNG

Was sind PFAS?

PFAS steht für per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen. Das ist eine ständig wachsende Gruppe von Chemikalien. 2025 listet PubCHEM mehr als 7 Mill. PFAS nach OECD-Definition (PubCHEM 2025). Der Vorschlag zur EU-Beschränkung umfasst rund 10.000 PFAS (ECHA 2023d). PFAS sind durch besondere chemische und physikalische Eigenschaften für viele Anwendungen geeignet. Die Stoffe können, je nach Design, u. a. öl- oder wasserabweisend, chemikalienbeständig, hitzebeständig, stabil gegen Bakterien, Licht und UV-Strahlung, nicht brennbar sein oder Isolationseigenschaften (elektrischer Strom) aufweisen.

Wo werden PFAS verwendet?

Einerseits werden PFAS in der überwiegenden Anzahl der Branchen im Produktionsprozess eingesetzt (z. B. Schmierstoffe, Pumpenkomponenten, Korrosionsschutz, flächige Beschichtungen gegen mechanischen Abrieb oder Chemikalien, Isolierungen etc.). Andererseits gibt es eine Vielzahl von Anwendungen von industriell hergestellten Produkten im Bereich der Infrastruktur, der Gebäudetechnik oder im Gesundheitssektor (z. B. Brandschutz und -bekämpfung, Kälte- und Klimatechnik, Mechatronik, Medizintechnik und deren Produkte, Pflanzenschutzmittel, Tenside und Benetzungsmittel), aber auch in Konsumgütern des Haushalts- und Freizeitbereichs (z. B. Antihafbeschichtungen, schmutzabweisende Behandlung von Einrichtungsgegenständen, Outdoorkleidung, Imprägnierung für Textilien und Kosmetikprodukte).

Wie gelangen PFAS in die aquatische Umwelt?

Eine Freisetzung von PFAS in die Umwelt ist während des gesamten Lebenszyklus möglich: während (i) der industriellen Produktion, (ii) der Verarbeitung industrieller Produkte, (iii) der direkten Nutzung von Konsumgütern, (iv) der Alterung und Abgabe aus Konsumgütern über deren gesamte Nutzungszeit oder (v) im Zuge der Abwasser- und Abfallbehandlung. Emissionen erfolgen zum einen direkt in die Wasserphase, wobei die konventionelle Abwasserreinigung eine schwache Barriere bietet. Zum anderen erfolgen Emission in die Luft oder auf den Boden. In diesem Fall findet der Eintrag in die aquatische Umwelt indirekt über den Luftpfad nach Deposition bzw. über den Boden statt. Der Boden kann dabei als zeitweiliger Puffer gegenüber dem Grundwasser dienen, jedoch auch selbst wieder PFAS langfristig abgeben und so zur Belastung der aquatischen Umwelt beitragen.

Über welche Technologien kann PFAS aus dem Wasser entfernt werden, um den Eintrag in die Umwelt zu vermeiden oder Trinkwasser aufzubereiten?

Bei Aufbereitungstechnologien wird zwischen Verfahren, bei denen es zu einer tatsächlichen Veränderung des PFAS-Ausgangsstoffs im Sinne eines teilweisen oder vollständigen Abbaus kommt, und Trennverfahren, bei denen aus der betrachteten Matrix (z. B. Abwasser, Grundwasser) ohne Veränderung des Ursprungsstoffs eine Anreicherung in einer anderen Matrix erfolgt, unterschieden. Bei den Trennverfahren kommt derzeit vor allem die Adsorption an Aktivkohle zum Einsatz. Auch Nanofiltration bzw. Umkehrosmose sind technisch ausgereift. Bei Regeneration der Aktivkohle oder der Entsorgung von Regeneraten oder Konzentraten ist darauf zu achten, dass PFAS dabei gesichert zerstört oder abgelagert werden. Eine ausgereifte Technologie mit weitgehender Zerstörung von PFAS bietet aktuell nur die thermische Oxidation bei einer ausreichend hohen Temperatur (1000–1500 °C Grad Celsius) und entsprechender Verweildauer. Andere reduktive oder oxidative Verfahren sind entweder technisch erst in einem Versuchsstadium oder führen lediglich zu einer Verkürzung der PFAS-Kettenlängen zu kurzkettigen PFAS bzw. TFA.

Warum sind PFAS in der aquatischen Umwelt bedenklich?

PFAS weisen aufgrund ihrer chemisch-physikalischen Eigenschaften vielfach eine hohe Mobilität und Persistenz auf. Diese Eigenschaften führen zu einer weitgehenden Verbreitung in der aquatischen Umwelt. Tendenziell nehmen diese Eigenschaften mit geringerer Kettenlänge zu. Informationen zur Toxizität sind lediglich für eine begrenzte Anzahl von PFAS vorhanden, unter anderem für eine Reihe langkettiger perfluorierter Carbon- und Sulfonsäuren. Z. B. sind PFOA, PFNA, PFDA sowie PFOS u. a. als vermutlich kanzerogen, reproduktionstoxisch und als potenziell schädigend für Säuglinge über die Muttermilch eingestuft. Hinsichtlich der aquatischen Toxizität sind PFOS und TFA in unterschiedlichem Ausmaß als aquatisch chronisch toxisch eingestuft. Ebenfalls gibt es eine Einstufung für eine akute Gesundheitsschädlichkeit bei Verschlucken, Hautkontakt und Einatmen für TFA, PFOS, PFOA und PFNA. Eine Reihe von PFAS sind weiters als besonders besorgniserregende Substanzen aufgrund ihrer toxischen Eigenschaften und/oder ihrer Persistenz bzw. Bioakkumulationspotenzials identifiziert.

Wie können PFAS analysiert werden, wie sehen wasserbezogene rechtliche Vorgaben und Monitoring in Österreich aus?

Für die Analytik der meisten PFAS hat sich die LC-MS als Stand der Technik etabliert. Dabei wird die Probe entweder direkt analysiert oder vorher über SPE-Kartuschen aufkonzentriert, um Bestimmungsgrenzen im Bereich von ng/l und darunter erreichen zu können. Es müssen kurz- bis langkettige Verbindungen mit unterschiedlichen Fluorierungsgraden und Polaritäten bestimmt werden, was eine große Herausforderung an die Analytik stellt. In der Wasserrahmenrichtlinie sind PFOS und PFOS-Derivate seit 2013 als prioritär gefährliche Stoffe identifiziert, wobei die gemessenen Konzentrationen teilweise über der UQN liegen. Verpflichtende Messungen von PFOS für ausgewählte industrielle Einleiter und kommunale Kläranlagen erfolgten erstmals 2023. Für Grundwasser sehen die WRRL, die Grundwasserrichtlinie und auch die Qualitätszielverordnung Chemie Grundwasser bislang keine Qualitätsstandards (QS) bzw. Schwellenwerte für PFAS vor. Unabhängig davon wurde eine Vielzahl von PFAS in den letzten Jahren wiederholt im Rahmen von GZÜV-Sondermessprogrammen im Grundwasser analysiert und die Daten sind in der H2O-Fachdatenbank des Wasserinformationssystems Austria öffentlich zugänglich. Die europäische Trinkwasserrichtlinie sieht ab 2026 zwei wahlweise anzuwendende Parameter für die Erfassung von PFAS vor. Der Parameter „Summe der PFAS“ umfasst die Summe von 20 ausgewählten perfluorierten Alkylsäuren und sieht einen Grenzwert von 0,10 µg/l vor. Dieser wurde in die österreichische Trinkwasserverordnung übernommen.

Was ist das Besondere an TFA?

Trifluoressigsäure (TFA) ist eine ultra-kurzkettige Perfluorcarbonsäure. In der Umwelt ist TFA extrem persistent und mobil. Aufgrund ihrer hohen Wasserlöslichkeit und geringen Sorption an Böden kann TFA leicht ins Grundwasser gelangen. Bislang sind keine natürlichen Abbauege von TFA in der aquatischen Umwelt bekannt. Die Verbindung reichert sich daher im Wasserkreislauf an und ist mittlerweile ubiquitär nachweisbar – vom Niederschlag über Grund- und Oberflächengewässer bis hin zu Trinkwasser und Meeresökosystemen. TFA entsteht in der Umwelt hauptsächlich als Abbauprodukt anthropogener Vorläufersubstanzen, die mindestens eine CF₃-Gruppe enthalten. Zu den Vorläufersubstanzen zählen fluorierte Kältemittel, Pflanzenschutzmittel sowie manche Arzneimittel. Unter den PFAS ist TFA jenes, das in vielen Umweltproben in den höchsten Konzentrationen gefunden wird (> 0,5 µg/l), jedoch ist die Toxizität weniger ausgeprägt als bei andern PFAS. Derzeit gibt es weder eine abschließende toxikologische Bewertung noch einen harmonisierten Grenzwert für TFA im Trinkwasser. Das deutsche Umweltbundesamt hat einen Trinkwasserleitwert – eine „toxikologisch tolerierbare Konzentration“ von 60 µg/l – für TFA abgeleitet und weist darauf hin, dass eine Konzentration von 10 µg/l oder weniger TFA im Trinkwasser angestrebt werden sollte.

Wo gibt es bekannte PFAS-Belastungshotspots in Österreich?

PFAS-haltige AFFF-Löschschäume werden seit etwa Mitte der 1960er-Jahre vornehmlich zum Löschen von Flüssigkeitsbränden eingesetzt. In derartigen Schäumen waren (vor allem PFOS) bzw. sind PFAS teilweise in sehr hohen Konzentrationen enthalten. Nach den ersten Anwendungsbeschränkungen bzw. -verboten kamen ab den 2000er-Jahren vermehrt PFOS-Ersatzstoffe, wie z. B. 6:2 FTSA u. a. zum Einsatz. Bei der (historischen) Verwendung von AFFF-Löschschäumen dürfte es sich um den für Österreich wichtigsten Eintragspfad von PFAS in den Untergrund und das Grundwasser handeln. In Österreich sind bis dato drei konkrete Standorte identifiziert, bei denen Sanierungsmaßnahmen notwendig sind bzw. sein werden. Die vom kontaminierten Untergrund ausgehenden Schadstofffahnen weisen im unmittelbaren Grundwasserabstrom sehr hohe PFAS-Konzentrationen von bis zu deutlich über 10 µg/l (PFAS-20) auf. Die Hauptkontaminante ist in allen drei Fällen PFOS. Aufgrund der geschilderten Problematik ist davon auszugehen, dass in den nächsten Jahren weitere ähnlich gelagerte Fälle in Zusammenhang mit Feuerlöschübungsplätzen bei Großstandorten auftreten werden.

Welche Regulatorien und Maßnahmen werden eingesetzt, um der PFAS-Problematik zu begegnen?

Bei der Herstellung und Verwendung von PFAS setzen die chemikalienrechtlichen Regelungen an. EU-Recht verbietet, basierend auf dem Stockholmer Übereinkommen, die Verwendung von PFOS und ihrer Derivate, mittlerweile ohne Ausnahmen. Auch die Verwendung von PFOA, ihrer Salze und Vorläuferverbindungen sowie von PFHxS ist aktuell stark eingeschränkt. 2024 legten 5 EU-Mitgliedstaaten ein Dossier vor, welches eine weitgehende Beschränkung aller PFAS-Anwendungen einschließlich der Fluorpolymere vorsieht. Wo keine Alternativen vorhanden sind, sollen zeitlich unbegrenzte bzw. 5 bis 12 Jahre andauernde Ausnahmen vorgeschlagen werden. Die Prüfung des Dossiers soll bis Ende 2025 abgeschlossen sein. Danach muss die Europäische Kommission den Mitgliedstaaten einen Beschränkungsvorschlag vorlegen. In Österreich umfasst der Nationale PFAS-Aktionsplan die prioritären Handlungsfelder „Emissionen und Schutz der Umwelt“, „Schutz des Grund- und Trinkwassers sowie pflanzlicher und tierischer Lebensmittel“, „Belastung der Menschen“ und „Kommunikation“. Spezifisch auf den Bereich Altlasten zugeschnitten ist die PFAS-Strategie im Rahmen der Vollziehung des Altlastensanierungsgesetzes. Als wichtigste, kurzfristig umzusetzende Maßnahmen wurden folgende identifiziert:

- Untersuchung von Altstandorten mit Fluorpolymerproduktion,
- systematische Erfassung von Feuerlöschübungsplätzen und darauf aufbauende Untersuchungen an Standorten mit hohem Risikopotenzial,
- Untersuchung von zivilen und militärischen Flughäfen,
- Untersuchung von Altstandorten und Altablagerungen mit erhöhter Wahrscheinlichkeit eines PFAS-Eintrags in die Umwelt,
- Etablierung eines PFAS-Forschungsschwerpunkts im Rahmen der Altlastenforschung gemäß Umweltförderungsgesetz.

16 LITERATUR

- AGES & Umweltbundesamt (2018): POPMON. Identifizierung relevanter persistenter organischer Schadstoffe und potenziell belasteter Regionen als Basis für ein risikobasiertes Lebensmittel-Monitoring in Österreich. Endbericht. Wien.
- AGES & Umweltbundesamt (2021): POPMON II. Risikokommunikation und risikobasiertes Monitoring von persistenten organischen Schadstoffen in verschiedenen Umweltmatrices, Futter- und Lebensmitteln an potenziell belasteten Standorten in Österreich. Wien.
- Armellini F., Gruber-Brunhumer M., Humer M., Scheffknecht C., Schupp M., Sexlinger K., Walser L., Wimmer R. et al. (2024): PFAS in Vorarlberg, PFAS-Awareness-Workshop V, 22.11.2024, Umweltinstitut Vorarlberg.
- Arp H. P., Slinde G. A. (2018): PFBS in the Environment: Monitoring and Physical-Chemical Data Related to the Environmental Distribution of Perfluorobutanesulfonic Acid. Norwegian Environmental Agency Report M-1122|2018. Norwegian Geotechnical Institute (NGI).
<https://www.miljodirektoratet.no/globalassets/publikasjoner/M1122/M1122.pdf>
- Arp H. P., Gredelj A., Glüge J., Scheringer M., Cousins I. T. (2024): The Global Threat from the Irreversible Accumulation of Trifluoroacetic Acid (TFA). *Environ Sci Technol.* 2024;58(45):19925–19935.
<https://doi.org/10.1021/acs.est.4c06189>
- ATSDR (2021): Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Toxicological Profile for Perfluoroalkyls [online]. U.S. Department of Health and Human Services. Atlanta, GA [Zugriff am: 20. April 2022].
Verfügbar unter: <https://www.atsdr.cdc.gov/ToxProfiles/tp200.pdf>
- Berhanu A., Mutanda I., Taolin J., Qaria M. A., Yang B., Zhu D. (2023): A review of microbial degradation of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS): Biotransformation routes and enzymes. *Science of The Total Environment* 859, 160010. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160010>
- BMK (2024a): PFAS-Aktionsplan – Maßnahmen zur Reduktion der Belastung von Mensch und Umwelt durch per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS) in Österreich. Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, Wien.
<https://www.bmluk.gv.at/service/publikationen/klima-und-umwelt/pfas-aktionsplan.html>
- BMK (2024b): PFAS-Strategie im Rahmen der Vollziehung des Altlastensanierungsgesetzes. Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, Wien 2024
https://altlasten.gv.at/Ueber_Altlasten/fachthemen/pfas-strategie-altlasten.html
- BMLRT (2022): Nationaler Gewässerbewirtschaftungsplan 2021. Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus, Wien. Online verfügbar unter:
<https://info.bml.gv.at/themen/wasser/wisa/ngp/ngp-2021/textdokument/ngp-2021-textdokument.html>
(20.11.2023)
- Brielmann H., Döberl G., Weiß St., Grath J. (2023): PFAS in Österreichs Grundwasser: Verbreitung, Bewertung und Rolle von Altstandorten als potenzielle Quellen. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft* 75(9-10), 491–502.
- Brielmann H., Grath J., Wemhöner U., Lindinger H., Scheidleder A. (2022): Schadstoffe im Grundwasser – Vorgangsweise zur Identifizierung und Priorisierung von neu auftretenden Spurenstoffen. Pollutants in groundwater – Approach for identification and prioritization of emerging substances. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft* 74(7-8), 293–305. Online verfügbar unter: <https://doi.org/10.1007/s00506-022-00870-9>
(20.11.2023)
- Brunn H., Arnold G., Körner W., Rippen G., Steinhäuser K. G., Valentin I. (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>
- Campos-Pereira H., Ullberg M., Kleja D.B., Gustafsson J.P., Ahrens L. (2018): Sorption of perfluoroalkyl substances (PFASs) to an organic soil horizon – Effect of cation composition and pH. *Chemosphere* 207, 183–191.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.05.012>

- Cousins I.T., Goldenman G., Herzke D., Lohmann R., Miller M., Ng C.A., Patton S., Scheringer M., Trier X., Vierke L., Wang Z., DeWitt J.C. (2019a): The concept of essential use for determining when uses of PFASs can be phased out. *Environ Sci Process Impacts* 21(11):1803–1815. <https://doi.org/10.1039/c9em00163h>
- Cousins I.T., Ng C.A., Wang Z., Scheringer M. (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>
- Deng Y., Liang Z., Lu X., Chen D., Li Z., Wang F. (2021): The degradation mechanisms of perfluorooctanoic acid (PFOA) and perfluorooctane sulfonic acid (PFOS) by different chemical methods: A critical review. *Chemosphere* 283, 131168, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131168>
- DeWitt J. C. (Hg.) (2015): Toxicological Effects of Perfluoroalkyl and Polyfluoroalkyl Substances. Cham: Springer International Publishing: Imprint: Humana. ISBN 978-3-319-15517-3.
- DIN 38407-42 (2011): Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung – Gemeinsam erfassbare Stoffgruppen (Gruppe F) – Teil 42: Bestimmung ausgewählter polyfluorierter Verbindungen (PFC) in Wasser – Verfahren mittels Hochleistungs-Flüssigkeitschromatographie und massenspektrometrischer Detektion (HPLC MS/MS) nach Fest-Flüssig-Extraktion.
- DIN 38409-59 (2022): Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung – Summarische Wirkungs- und Stoffkenngrößen (Gruppe H) – Teil 59: Bestimmung von adsorbierbarem organisch gebundenem Fluor, Chlor, Brom und Iod (AOF, AOCl, AOBr, AOI) mittels Verbrennung und nachfolgender ionenchromatographischer Messung (H 59)
- EC (2012): Common Implementation Strategy for the Water Framework Directive (2000/60/EC), Guidance Document No. 28: Technical Guidance on the Preparation of an Inventory of Emissions, Discharges and Losses of Priority and Priority Hazardous Substances.
- ECHA (2019a): Member State Committee Support Document for identification of Perfluorobutane sulfonic acid and its salts as substances of very high concern because of their hazardous properties which cause probable serious effects to human health and the environment which give rise to an equivalent level of concern to those of CMR and PBT/vPvB substances (Article 57f). European Chemicals Agency. <https://echa.europa.eu/documents/10162/891ab33d-d263-cc4b-0f2d-d84cfb7f424a>
- ECHA (2019b): Member State Committee support document for identification of 2,3,3,3- tetrafluoro-2- (heptafluoropropoxy)propanoic acid, its salts and its acyl halides (covering any of their individual isomers and combinations thereof) as a substance of very high concern because of their hazardous properties which cause probable serious effects to human health and the environment which give rise to an equivalent level of concern to those of CMR1 and PBT/vPvB2 substances (article 57f) European Chemicals Agency. <https://echa.europa.eu/documents/10162/53fa6a5b-e95f-3128-ea9d-fa27f43b18bc>
- ECHA (2021): Committee for Risk Assessment (RAC) and Committee for Socio-economic Analysis (SEAC): Background document to the Opinion on the Annex XV dossier proposing a restriction on undecafluorohexanoic acid (PFHxA), its salts and related substances. ECHA/RAC/RES-O-0000006976-57-01/F. European Chemicals Agency. <https://echa.europa.eu/documents/10162/7830b3db-f564-5f15-3507-e326168fccdd>
- 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>
- 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>
- ECHA (2023a): Registration Dossier – Trifluoroacetic acid, Abschnitt 4.22. European Chemicals Agency. Verfügbar unter: <https://echa.europa.eu/de/registration-dossier/-/registered-dossier/5203/4/22> (eingefroren am 19.05.2023, abgerufen am 20.04.2025)

- ECHA (2023b): European Chemical Agency. Annex XV Restriction Report Consultation [online]. Consultation on a proposed restriction on the manufacture, placing on the market and use of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) [Zugriff am: 13. April 2023]. Verfügbar unter: <https://echa.europa.eu/documents/10162/cad38c27-ede8-2268-00c6-939ea066743c>
- ECHA (2023c): Candidate List of substances of very high concern for Authorisation. Verfügbar unter: <https://www.echa.europa.eu/candidate-list-table>
- ECHA (2023d): ECHA/NR/23/04. Verfügbar unter: <https://echa.europa.eu/de/-/echa-publishes-pfas-restriction-proposal>
- EFSA (2018): European Food Safety Authority. Risk to human health related to the presence of perfluorooctane sulfonic acid and perfluorooctanoic acid in food [online]. EFSA Journal, 16(12), e05194 [Zugriff am: 23. August 2022]. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2018.5194>
- EFSA (2020): European Food Safety Authority. Risk to human health related to the presence of perfluoroalkyl substances in food [online]. EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (EFSA CONTAM Panel). Scientific Opinion. *EFSA Journal* 18(9) [Zugriff am: 19. Juni 2022]. Verfügbar unter: <https://efsa.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2903/j.efsa.2020.6223>
- EK (2022): Vorschlag für eine Richtlinie des Europäischen Parlamentes und des Rates zur Änderung der Richtlinie 2000/60/EG zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik, der Richtlinie 2006/118/EG zum Schutz des Grundwassers vor Verschmutzung und Verschlechterung und der Richtlinie 2008/105/EG über Umweltqualitätsnormen im Bereich der Wasserpolitik. COM(2022) 540 final. 26.10.2022, Brüssel, Belgien. Online verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:52022PC0540&qid=1668778588043> (6.11.2023)
- EN 17892 (2024): Wasserbeschaffenheit – Bestimmung ausgewählter Per- und Polyfluoralkylsubstanzen in Trinkwasser – Verfahren mittels Flüssigkeitschromatographie/Tandem-Massenspektrometrie (LC-MS/MS).
- EU 2023/707, COMMISSION DELEGATED REGULATION (EU) 2023/707 of 19 December 2022 amending Regulation (EC) No 1272/2008 as regards hazard classes and criteria for the classification, labelling and packaging of substances and mixtures
- EurEau (2025): Position Paper TFA in Drinking Water Resources <https://www.eureau.org/resources/position-papers/8167-eureau-position-paper-on-tfa/file>
- Europäische Kommission (2020): Chemicals Strategy for Sustainability – Towards a Toxic-Freenvironment. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/ip_20_1839
- Fang J., Li S., Gu T., Liu A., Qiu R., Zhang W. (2024): Treatment of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS): A review of transformation technologies and mechanisms. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 12, 111833. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.111833>
- Forsthuber M., Kaiser A. M., Granitzer S., Hassl I., Hengstschläger M., Stangl H., Gundacker C. (2020): Albumin is the major carrier protein for PFOS, PFOA, PFHxS, PFNA and PFDA in human plasma [online]. *Environment International* 137, 105324. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105324>
- Freeling F., Björnsdóttir M. K. (2023): Assessing the environmental occurrence of the anthropogenic contaminant trifluoroacetic acid (TFA). *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry* 41, 100807. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2023.100807>
- Gagliano E., Sgroi M., Falciglia P. P., Vagliasindi F. G. A., Roccaro P. (2020): Removal of poly- and perfluoroalkyl substances (PFAS) from water by adsorption: Role of PFAS chain length, effect of organic matter and challenges in adsorbent regeneration. *Water Research* 171, 115381. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115381>
- Gar Alalm M., Boffito D. C. (2022): Mechanisms and pathways of PFAS degradation by advanced oxidation and reduction processes: A critical review. *Chemical Engineering Journal* 450, 138352. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.138352>
- Global 2000 (2024): Pestizide, die TFA freisetzen können. Factsheet. Wien: Global 2000 – Friends of the Earth Austria. Verfügbar unter: https://www.global2000.at/sites/global/files/Factsheet_PFAS-Pestizide.pdf (Zugriff: 20. April 2025).

- Glüge J., Scheringer M., Cousins I.T., DeWitt J. C., Goldenman G., Herzke D., Lohmann R., Ng C. A., Trier X., Wang Z. (2020): An overview of the uses of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS). *Environ. Sci.: Processes Impacts* 22, 2345–2373. <https://doi.org/10.1039/D0EM00291G>
- Goldenman G. (2019): The cost of inaction. A socioeconomic analysis of environmental and health impacts linked to exposure to PFAS. Copenhagen: Nordic Council of Ministers. TemaNord. 2019, 007. ISBN 9789289360654
- Gustafson D. I. (1989): Groundwater ubiquity score: A simple method for assessing pesticide leachability, *Environmental Toxicology and Chemistry*, <https://doi.org/10.1002/etc.5620080411>
- Higgins C. P., Luthy R. G. (2006): Sorption of perfluorinated surfactants on sediments. *Environ Sci Technol* 40(23), 7251–7256. <https://doi.org/10.1021/es061000n>
- Houtz E. F., Sedlak D. L. (2012): Oxidative Conversion as a Means of Detecting Precursors to Perfluoroalkyl Acids in Urban Runoff. *Environ Sci Technol* 46(17), 9342–9349. <https://doi.org/10.1021/es302274g>
- Joerss H., Freeling F., van Leeuwen S., Hollender J, Liu X., Nödler K., Wang Z., Yu B., Zahn D., Sigmund G. (2024): Pesticides can be a substantial source of trifluoroacetate (TFA) to water resources, *Environment International* 193. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.109061>
- Kellner M. (2024): PFAS bei der Klärschlammverbrennung. ÖWAV-Klärschlammtagung 2024, 22.11.2024
- Kempisty D. M., Racz L. (Eds.) (2021): Forever chemicals: environmental, economic, and social equity concerns with PFAS in the environment, First edition. ed, Environmental and occupational health series. CRC Press, Boca Raton/London/New York.
- Lee A., Choea J. K., Zoha K. D., Lee Ch., Cho, Y. (2024): Development of ionic-liquid-impregnated activated carbon for sorptive removal of PFAS in drinking water treatment, *Chemosphere* 355, 141872. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141872>
- Lee H., Mabury S. A. (2017): Sorption of Perfluoroalkyl Phosphonates and Perfluoroalkyl Phosphinates in Soils. *Environ Sci Technol* 51(6), 3197–3205. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b04395>
- Lee J. W., Choi K., Park K., Seong C., Yu S. D., Kim P. (2020): Adverse effects of perfluoroalkyl acids on fish and other aquatic organisms: A review. *Sci. Total Environ.* 707, 135334.
- Li J., Sun J., Li P. (2022): Exposure routes, bioaccumulation and toxic effects of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) on plants: A critical review. *Environ Int.* 158, 106891. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106891>
- Li L., Sangion A., Wania F., Armitage J.M., Toose L., Hughes L., Arnot J.A. (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>
- Li Y., Fletcher T., Mucs D., Scott K., Lindh C. H., Tallving P., Jakobsson K. (2018): Half-lives of PFOS, PFHxS and PFOA after end of exposure to contaminated drinking water [online]. *Occupational and Environmental Medicine* 75(1), 46–51. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1136/oemed-2017-104651>
- Liu M., Saracevic E., Kittlaus S., Oudega T., Obeid A., Nagy-Kovács Z., László B., Krlovic N., Saracevic Z., Lindner G., Rab G., Drex J, Zabolli O., Zessner M. (2023): PFAS-Belastungen im Einzugsgebiet der oberen Donau. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft* 75(9-10), 503–514
- Luecken D. J., Waterland R. L., Papasavva S., Taddonio K. N., Hutzell W. T., Rugh, J. P., Andersen, S. O. (2010): Ozone and TFA Impacts in North America from Degradation of 2,3,3,3-Tetrafluoropropene (HFO-1234yf), A Potenzial Greenhouse Gas Replacement. *Environ.Sci. Technol.* 44, 343–348.
- Mojiri A., Zhou J. L., Ozaki N., Karimi Dermani B., Razmi E., Kasmuri N. (2023): Occurrence of per- and polyfluoroalkyl substances in aquatic environments and their removal by advanced oxidation processes. *Chemosphere* 330, 138666. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138666>
- Obeid A. A. A., Oudega T. J., Zabolli O., Gundacker C., Blaschke A. P., Zessner M., Saracevic E., Devau N., Stevenson M. E., Krlovic N., Liu M., Nagy-Kovács Z., László B., Sommer R., Lindner G., Drex J. (2023): The occurrence and persistence of PFAS at riverbank filtration sites in the Upper Danube basin. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft* 75(9-10), 515–527

- OECD (2021): Reconciling Terminology of the Universe of Per- and Polyfluoroalkyl Substances: Recommendations and Practical Guidance. [online]. Organisation for Economic Co-operation and Development. OECD-Environment, Health and Safety Publications Series on Risk Management, 61.
[https://one.oecd.org/document/ENV/CBC/MONO\(2021\)25/En/pdf](https://one.oecd.org/document/ENV/CBC/MONO(2021)25/En/pdf)
- Olsen G. W., Burris J. M., Ehresman D. J., Froehlich J. W., Seacat A. M., Butenhoff J. L., Zobel L. R. (2007): Half-life of serum elimination of perfluorooctanesulfonate, perfluorohexanesulfonate, and perfluorooctanoate in retired fluorochemical production workers [online]. *Environmental Health Perspectives* 115(9), 1298–1305. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1289/ehp.10009>
- Olsen G. W., Chang S.-C., Noker P. E., Gorman G. S., Ehresman D. J., Lieder P. H., Butenhoff J. L. (2009): A comparison of the pharmacokinetics of perfluorobutanesulfonate (PFBS) in rats, monkeys, and humans [online]. *Toxicology* 256(1-2), 65–74. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.tox.2008.11.008>
- Ogawa Y, Tokunaga E, Kobayashi O, Hirai K, Shibata N. (2020). Current Contributions of Organofluorine Compounds to the Agrochemical Industry. *iScience* 23(9):101467. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.isci.2020.101467>
- ÖNORM EN ISO 18127: Wasserbeschaffenheit – Bestimmung von adsorbierbarem organisch gebundenem Fluor, Chlor, Brom und Iod (AOF, AOCl, AOBr, AOI) – Verfahrens mittels Verbrennung und nachfolgender Ionenchromatographischer Messung (ISO/DIS 18127:2024).
- OPEC Systems (2020): Validation of Foam Fractionation as an Effective Treatment Technology.
- ÖWAW (2023): Spurenstoffe – Monitoring, Modellierung und Management. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft* 75(9-10). Online verfügbar unter: <https://link.springer.com/journal/506/volumes-and-issues/75-9>
- Parka H.-S., Kodurua J. R., Chooa K.-H., Lee B. (2015): Activated carbons impregnated with iron oxide nanoparticles for enhanced removal of bisphenol A and natural organic matter. *Journal of Hazardous Materials* 286, 315–324.
<https://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.11.012>
- PubCHEM (2025): https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/#query=MXaUex_cemBNTvJXcC-7cez9oSaWCkjUwYyb0gXIG5IDhw&alias=PFAS%20and%20Fluorinated%20Compounds%20in%20PubChem:%20OECD%20PFAS%20definition (03.07.2025)
- Scheurer M., Nödler K., Freeling F., Janda J., Happel O., Riegel M., Müller U., Storck F.R., Fleig M., Lange F.T., Brunsch A., Brauch H.J. (2017): Small, mobile, persistent: Trifluoroacetate in the water cycle – Overlooked sources, pathways, and consequences for drinking water supply. *Water Res.* 126, 460–471.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.09.045>
- Sigmund G., Arp H. P. H., Aumeier B. M., Bucheli T. D., Chefetz B., Chen W., Droge S. T. J., Endo S., Escher B. I., Hale S. E., Hofmann T., Pignatello J., Reemtsma T., Schmidt T. C., Schönsee C. D., Scheringer M. (2022): Sorption and Mobility of Charged Organic Compounds: How to Confront and Overcome Limitations in Their Assessment. *Environ Sci Technol.* 56(8):4702–4710. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c00570>
- Solomon K. R., Velders G. J. M., Wilson S. R., Madronich S., Longstreth J., Aucamp P. J., Bornman J. F. (2016): Sources, fates, toxicity, and risks of trifluoroacetic acid and its salts: Relevance to substances regulated under the Montreal and Kyoto Protocols. *J. Toxicol. Env. Heal.* 19, 289–304
- Sosnowska A., Mudlaff M., Mombelli E., Behnisch P., Zdybel S., Besselink H., Kuckelkorn J., Bulawska N., Kepka K., Kowalska D., Brouwer A., Puzyn, T. (2025): Identification of new PFAS for severe interference with thyroid hormone transport: A combined in vitro/silico approach. *Journal of Hazardous Materials* 491, 137947.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.137949>
- Sturm S., Freeling F., Brauer F., Vollmer T., aus der Beek T., Karges U. (2023): Trifluoracetat (TFA): Grundlagen für eine effektive Minimierung schaffen – Räumliche Analyse der Eintragspfade in den Wasserkreislauf, Abschlussbericht, TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser, Karlsruhe, IWW Rheinisch-Westfälisches Institut für Wasserforschung gemeinnützige GmbH, Mülheim an der Ruhr, Herausgeber: Umweltbundesamt, TEXTE 102/2023

- Tang Z., Vogel T. M., Wanga Q., Weia Ch., Alia M., Song X. (2024): Microbial defluorination of TFA, PFOA, and HFPO-DA by a native microbial consortium under anoxic conditions. *Journal of Hazardous Materials* 465, 133217. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.133217>
- Trier D. X., Taxvig C., Rosenmai A. K., Pedersen G. A. (2017): PFAS in paper and board for food contact. Options for risk management of poly- and perfluorinated substances. Copenhagen: Nordic Council of Ministers. TemaNord Vol 2017 No 573. ISBN 9789289353298
- UBA (2022a): PFAS-Report 2022. Per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen – Überblick und Situation in Österreich. Im Auftrag des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, Abteilung V/5 Chemiepolitik und Biozide. Umweltbundesamt, Wien. Online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/rep0820.pdf>
- UBA (2022b): Altstandort „Flughafen Salzburg – Feuerlöschübungsgelände“. Gefährdungsabschätzung und Prioritätenklassifizierung. Umweltbundesamt, Wien. https://altlasten.umweltbundesamt.at/altlasten/?servicehandler=sitefiles&UBAID=75947&FN=S23_PRIO.pdf
- UBA (2023): Per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen – Methodenvergleich zur Bestimmung von PFAS in Wasserproben, Report REP-0859, Umweltbundesamt, Wien. <https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/rep0859.pdf>
- UBA (2024): Altstandort „Feuerwehrschießplatz Lebring“. Gefährdungsabschätzung und Prioritätenklassifizierung. Umweltbundesamt, Wien. https://altlasten.umweltbundesamt.at/altlasten/?servicehandler=sitefiles&UBAID=80626&FN=ST37_PRIO.pdf
- UBA (2025) Ergebnisse der Gewässerzustandsüberwachung, H2O-Fachdatenbank des Wasserinformationssystems Austria (WISA). Umweltbundesamt, Wien. <https://wasser.umweltbundesamt.at/h2odb>
- Umweltbundesamt (2020): Trifluoressigsäure (TFA) – Gewässerschutz im Spannungsfeld von toxikologischem Leitwert, Trinkwasserhygiene und Eintragsminimierung. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/362/dokumente/2020_10_20_uba_einordnung_tfa_leitwert.pdf
- Umweltbundesamt (2023a): Prioritised PMT/vPvM substances in the REACH registration database | Umweltbundesamt (Arp H. P. H., Hale S. E., Schliebner I., Neumann M.). Texte 21/2023, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau
- Umweltbundesamt (2023b): Trifluoressigsäure (TFA): Grundlagen für eine effektive Minimierung schaffen – Räumliche Analyse der Eintragspfade in den Wasserkreislauf. Abschlussbericht. Texte 102/2023, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau
- Wang Z., Buser A. M., Cousins I. T., Demattio S., Drost W., Johansson O., Ohno K., Patlewicz G., Richard A. M., Walker G. W., White G. S., Leinela E. (2021): A new OECD definition for per- and polyfluoroalkyl substances. *Environ Sci Technol* 55, 15575–15578. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c06896>
- Weinbauer H., Mann O., Hornek-Gausterer R. (2025): Impact of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in wild plants, soil and water in two Austrian national parks. *Science of the Total Environment* 999, 180346 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.180346>
- Zessner M., Baldwin D., del Val Alonso L., Derx J., Deveau N., Janssen G., Jou Claus S., Kittlaus S., Knoche F., Lions J., Liu M., Markus A., Valstar J., Meesters J., Meijers E., Obeid A., Oudega T., Pathak D., Sprenger C., van Gils J., Wicke D., Winstersen A., Zhiteneva V., Groot H. (2025, in preparation): Deliverable D2.4 – Guidance Document on emission-, fate- and transport modelling for exposure assessment of surface and groundwater. <https://cordis.europa.eu/project/id/101036449/results>



zukunft
SEIT 1909
denken

Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband

Gegründet 1909

1010 Wien, Marc-Aurel-Straße 5

Tel. +43-1-535 57 20, buero@oewav.at, www.oewav.at

Das österreichische **Kompetenz-Zentrum**
für **Wasser-, Abwasser- und Abfallwirtschaft**.

Veranstaltungen

- Österreichische Abfallwirtschaftstagung
- Österreichische Wasserwirtschaftstagung
- Österreichische Umweltrechtstage
- Seminare und Fortbildungskurse zu aktuellen Themen der Wasser- und Abfallwirtschaft
- Erfahrungsaustausch für Betreiber von Abfallbehandlungsanlagen
- Kurse für das Betriebspersonal von Abwasseranlagen, Praktikum auf Lehrklär- und Lehrkanalanlagen, Kanal- und Kläranlagen-Nachbarschaften
- Kurse für das Betriebspersonal von Abfallbehandlungsanlagen
- Kurse in den Bereichen Gewässerpflege, kleine Stau- und Sperrenanlagen, Hochwasserschutz- und Beschneigungsanlagen, Wildbachaufsicht und Neophytenmanagement
- Kurse in den Bereichen Recht & Wirtschaft
- Gemeinsame Veranstaltungen mit in- und ausländischen Fachorganisationen
- Exkursionen

Fachgruppen und Arbeitsausschüsse

- Ausarbeitung von Regelblättern, Arbeitsbehelfen und Merkblättern
- Erarbeitung von Expert:innen-, Positions- und Ausschusspapieren sowie Stellungnahmen zu Gesetzesvorhaben

Beratung und Information

- Auskünfte und individuelle Beratung
- Wasser- und abfallwirtschaftliche Informationsschriften und Beiträge, Öffentlichkeitsarbeit

Veröffentlichungen

- Fachzeitschrift „Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft“ (ÖWAW)
- ÖWAV-Homepage (www.oewav.at)
- ÖWAV-News (HTML-Newsletter)
- Tätigkeitsbericht des ÖWAV
- Veröffentlichungen zu Tagungen und Seminaren des ÖWAV
- Regelblätter*), Arbeitsbehelfe*) und Merkblätter des ÖWAV, Positions- und Ausschusspapiere
- Informationsreihe Betriebspersonal Abwasseranlagen*)
- ÖWAV-WKO-Umweltmerkblätter für Gewerbebetriebe
- KA-Betriebsinfo¹⁾
- Wiener Mitteilungen Wasser-Abwasser-Gewässer¹⁾

Verbindungsstelle (Nationalkomitee) der

- European Water Association – EWA

Mitglied der österreichischen Vertretung zur

- European Union of National Associations of Water Suppliers and Waste Water Services – EurEau (gem. mit ÖVGW)
- International Solid Waste Association – ISWA
- International Water Association – IWA (gem. mit ÖVGW)

*) in Kommission bei Austrian Standards plus GmbH, Wien

¹⁾ Mitherausgeber

