

Per- und polyfluorierte Alkylverbindungen (PFAS) in der Umwelt

Infoblatt

Per- und polyfluorierte Alkylverbindungen (PFAS) umfassen eine Gruppe von mehreren Tausend Chemikalien, die in zahlreichen Industrieprozessen und Verbraucherprodukten eingesetzt werden, so zum Beispiel in Beschichtungen und Löschenmitteln. In der Umwelt sind die Stoffe sehr stabil und werden in Lebewesen und der Umwelt fast überall nachgewiesen. Dies ist besorgniserregend, weil sich PFAS in Wildtieren und Menschen anreichern können und teilweise toxisch sind. Am bekanntesten sind die langketigen Verbindungen Perfluoroktansäure (PFOA) und Perfluoroktansulfonsäure (PFOS) (Abb.1). Die Verwendung von PFOS und PFOA ist inzwischen weitgehend verboten. Die Stoffe wurden jedoch in vielen Anwendungen durch andere kurzkettige und polymere PFAS ersetzt, über deren Verhalten weniger bekannt ist.

Struktur und Verwendung

PFAS sind organische Verbindungen aus Kohlenstoffketten verschiedener Länge, bei denen die Wasserstoffatome vollständig (perfluoriert) oder teilweise (polyfluoriert) durch Fluoratome ersetzt sind. Viele PFAS sind fett-, wasser- und schmutzabweisend, ausserdem temperatur- und chemikalienbeständig und wirken als Tenside. Durch diese einzigartigen Eigenschaften finden die Stoffe Anwendung in schützenden Beschichtungen von Polstermöbeln, Outdoorbekleidung und Lebensmittelverpackungen, Antihaftbeschichtungen von Pfannen, Imprägniersprays, Skiwachsen, Kältemitteln und Feuerlöschschäumen, aber auch in Pestiziden und in Arzneimitteln.



Eintrag und Verhalten

PFAS können bei ihrer Herstellung und Verwendung oder bei der Entsorgung von Abfall und Abwasser in die Umwelt eingebracht werden. Wichtige Quellen sind die Produktionsorte der fluorierten Polymere sowie ihre Anwendung in Feuerlöschschäumen und in zahlreichen anderen Bereichen. PFAS sind aufgrund der starken Kohlenstoff-Fluor-Bindungen sehr persistent und bauen sich in der Umwelt wenn überhaupt nur zu anderen persistenten PFAS ab. Während langketige PFAS an Böden und Sedimente sorbieren und sich in Organismen anreichern können, sind kurzkettige PFAS gut wasserlöslich und sehr mobil. Daher haben PFAS ein hohes Kontaminationspotential für Lebensmittel, Oberflächen- und Grundwasser und Trinkwasserquellen. Manche PFAS können über die Luft transportiert werden, andere werden über Meereströmungen verbreitet. So reichern sich die Stoffe auch in abgelegenen und unberührten Gebieten wie der Arktis an.

Vorkommen in der Umwelt

In Europa wurden PFAS in Grundwasser, Gewässern, Organismen, Boden und Luft nachgewiesen [1, 2]. Besonders verschmutzt sind Gebiete rund um industrielle Produktionsanlagen, Flughäfen, Militärbasen und Feuerwehrübungsplätze, an denen PFAS-haltige Löschschäume eingesetzt wurden [3, 4].

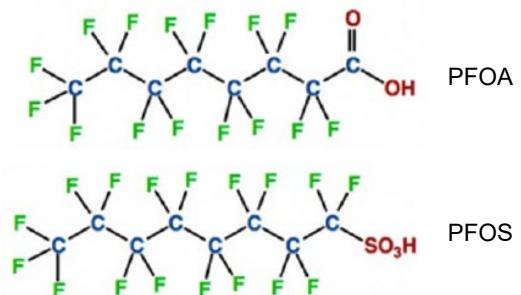


Abb. 1: PFAS werden häufig in Löschschäumen eingesetzt. Auch wenn der Einsatz von Perfluoroktansulfonsäure (PFOS) und Perfluoroktansäure (PFOA) und ihrer Vorläuferverbindungen inzwischen weitgehend verboten ist, werden diese Stoffe immer noch regelmäßig in der Umwelt nachgewiesen.

Im **Grundwasser** der Schweiz wurde 2021 das Auftreten von 26 PFAS im Rahmen einer Pilotstudie der nationalen Grundwasserbeobachtung NAQUA gemessen [5]. An knapp der Hälfte der NAQUA-Messstellen wurden die in dieser Studie erfassten PFAS nachgewiesen (Trifluoressigsäure (TFA) wurde hier noch nicht erfasst, mehr dazu siehe weiter unten). An rund 25 % der Messstellen lag die Summe der analysierten PFAS bei mehr als 0,01 Mikrogramm pro Liter ($\mu\text{g/l}$), an rund 2 % der Messstellen bei mehr als 0,1 $\mu\text{g/l}$. Die aktuell gültigen Höchstwerte der Trinkwasserverordnung (s.u.) wurden lediglich an einer der Messstellen überschritten. Verantwortlich dafür war PFOS, dessen Konzentration dort über dem jetzigen Höchstwert für diese Substanz von 0,3 $\mu\text{g/l}$ lag. An 15 % der Messstellen wurden Konzentrationen über dem geplanten Gruppengrenzwert für PFAS von 0,5 $\mu\text{g/l}$ festgestellt, vor allem in der Nähe von Flughäfen, Industrieanlagen und Feuerwehrübungsplätzen. Sorge macht auch TFA, ein hochmobiles Abbauprodukt zahlreicher PFAS. Laut jüngsten Untersuchungen des BAFU tritt TFA fast überall in Grundwasser auf [6], besonders PFAS aus Kühlmitteln und Pflanzenschutzmitteln scheinen zu dieser TFA-Belastung beizutragen.

PFAS wurden auch in zahlreichen **Oberflächengewässern und Sedimenten** der Schweiz nachgewiesen [7,8]. Außerdem gibt es zahlreiche **belastete Standorte**, besonders betroffen sind Feuerwehrübungsplätze, Galvaniken und Depots. Der Bund erfasst laufend das Vorkommen von PFAS in der Schweiz und hat bereits erste Empfehlungen zum Vorgehen und zur Sanierung an belasteten Standorten abgegeben [9,10]. Material mit einem PFAS-Gehalt von mehr als 5 $\mu\text{g/kg}$ muss behandelt werden. Bis jetzt gibt es allerdings in der Schweiz kaum Anlagen zur Bodenbehandlung.

PFAS werden auch regelmässig in **Wasserorganismen** nachgewiesen [11]. Besonders PFOS und andere langketige PFAS reichern sich dabei über Biomagnifikation in höheren Organismen der Nahrungskette an. In der Schweiz sind die Konzentrationen in Fischen in Gewässern teilweise so hoch, dass diese nicht verzehrt werden dürfen.

Die bereits überwachten und regulierten langketigen PFAS sind nur für einen Teil der PFAS-Belastung in Mensch, Tier und Umwelt verantwortlich. Oft wurden diese Stoffe durch andere kurzkettige und polymere PFAS ersetzt, die ebenfalls in die Umwelt gelangen und in Oberflächen-, Grund- und Trinkwasser nachgewiesen werden [12,13]. Sie reichern sich in (essbaren) Pflanzen an, was zu einer Aufnahme über die Nahrung führen kann [14]. In europäischen Oberflächengewässern werden immer mehr neuartige PFAS nachgewiesen [15].

Toxizität

Einige PFAS gelten als toxisch, dabei reichern sich langketige PFAS in Menschen, Tieren, Sedimenten und Böden an, kurzkettige PFAS in Luft und Wasser. Die Toxizität der Stoffe wurde hauptsächlich für die PFAS-Säuren PFOS und PFOA untersucht. Die Stoffe haben vielfältige Effekte: So wirken

sie auf das Hormonsystem und die Entwicklung, beeinflussen das Immunsystem und erhöhen das Risiko für einige Krebsarten. Die Toxizität in aquatischen Ökosystemen wurde in mehreren Übersichtsartikeln zusammengefasst [16-18]. Die Stoffe beeinträchtigen die Integrität von Zellmembranen und verursachen oxidativen Stress. Die Wirkung mehrerer Einzelstoffe kann sich beeinflussen, und die Anwesenheit von anderen natürlichen und chemischen Stressfaktoren kann die Toxizität der PFAS verstärken.

Regulation

Unter dem **Stockholmer Übereinkommens über persistente organische Schadstoffe** sind die Herstellung, das Inverkehrbringen und die Verwendung von PFOS, PFOA, Perfluorhexansulfosäure (PFHxS) und sowie langketigen perfluorierten Carbonsäuren (PFCA) samt deren Vorläufersubstanzen stark eingeschränkt oder verboten. Eine Reihe weiterer PFAS stehen auf der REACH-Liste der besonders besorgniserregenden Stoffe.

2020 bewertete die **Europäische Behörde für Lebensmittel sicherheit (EFSA)** die Toxizität der wichtigsten und besonders gefährlichen PFAS-Säuren PFOS, PFOA, PFHxS und Perfluoronansäure (PFNA) neu, was zu einem deutlich niedrigeren unbedenklichen Grenzwert für den Menschen (TWI = tolerierbare wöchentliche Aufnahme) führte: dieser liegt aktuell bei 4,4 ng pro kg Körpergewicht für die Summe dieser Stoffe [19]. Der ausschlaggebende Effekt für die Festlegung dieses Grenzwerts war die Immunoxydabilität bei Kindern, die bei höheren Blutkonzentrationen von PFAS zu einer verringerten Antikörperbildung nach Standardimpfungen führte. Die Experten kamen zu dem Schluss, dass ein beträchtlicher Anteil der europäischen Bevölkerung den TWI aufgrund der Aufnahme von PFAS aus Lebensmitteln und Trinkwasser überschreitet. Neue Biomonitoring-Daten aus der Schweiz bestätigen dies: Bei 41 Prozent der gebärfähigen Frauen liegt die PFAS-Konzentration im Blut über dem EFSA-Schwellenwert für eine mögliche reduzierte Immunantwort bei Säuglingen [20].

Die EU hat in ihrer **Trinkwasserrichtlinie** strengere Grenzwerte für PFAS im Trinkwasser festgelegt, die ab Januar 2026 verbindlich werden: Für die Summe von 20 ausgewählten PFAS gilt ein Grenzwert von 0,1 $\mu\text{g/l}$, für die Summe aller PFAS ein Grenzwert von 0,5 $\mu\text{g/l}$. Die Schweizer **Trinkwasserverordnung TBDV** enthält derzeit Höchstwerte von jeweils 0,3 Mikrogramm pro Liter ($\mu\text{g/l}$) für PFOS und PFHxS und einen Höchstwert von 0,5 $\mu\text{g/l}$ für PFOA. Diese Höchstwerte werden laut BLV derzeit in Anlehnung an die Vorgaben der EU überarbeitet und voraussichtlich 2026 durch neue Werte ersetzt.

Die **EU-Wasserrahmenrichtlinie** listet PFOS und ihre Derivate als prioritäre Stoffe mit einem chronischen Umweltqualitätsnorm (AA-EQS) von 0,65 ng/L in Flüssen und Seen und 0,13 ng/L in Meerwasser. Die Stoffe müssen also in Gewässern regelmäßig überwacht werden. 2013 in Nordeuropa entnommenen Proben übertrafen diesen EQS in 27 % der Flusssgebiete und 94 % des Meerwassers [21]. Die EU plant

neu für 25 PFAS einen Summen-EQS von 0,0044 µg/l PFOA-Equivalenten für Oberflächengewässer. Der Wert basiert auf dem Schutz der menschlichen Gesundheit, da die Auswirkungen auf das menschliche Immunsystem als am kritischsten bewertet wurden, und wird relativ zur Wirkung von PFOA als Referenzsubstanz ausgedrückt. Für Grundwasser wurde ein EU-weiter Grenzwert von 0,0044 µg/l (4,4 ng/l) für die Summe von 4 PFAS (PFOS, PFOA, PFHxS und PFNA) vorgeschlagen. Dieser Wert orientiert sich ebenfalls an der humantoxikologischen Bewertung der EFSA. Zusätzlich soll auch die Summen-Anforderung der EU-Trinkwasserrichtlinie für PFAS eingehalten werden. Für PFOS in Fisch legt die Wasserrahmenrichtlinie einen Grenzwert von 9,1 µg/kg Feuchtgewicht fest, um die Gesundheit von Menschen und räuberischen Wildtieren vor einer indirekten Toxizität zu schützen. Auch hier plant die EU neu einen Summenwert für 25 PFAS festzulegen (0,077 µg/kg Feuchtgewicht).

Seit Anfang 2024 gelten in der Schweiz neue, verbindliche Höchstgehalte für die wichtigsten **PFAS in Lebensmitteln** wie Fleisch, Fisch, Eiern, Krebstieren und Muscheln. Diese Höchstgehalte orientieren sich an den EU-Vorgaben von 2023. Für die Summe der vier wichtigsten PFAS (PFOS, PFOA, PFNA, PFHxS) in Fischfilet gelten neu je nach Fischart Höchstwerte zwischen 2 und 35 µg/kg Muskelfleisch. Diese Unterschiede berücksichtigen die unterschiedliche Belastung verschiedener Fischarten. Stichproben von gefangenem Fisch und wissenschaftliche Publikationen [22] zeigen, dass die Höchstwerte in der Schweiz teilweise überschritten werden.

Im Kanton St. Gallen wurden bei Kontrollen erhöhte PFAS-Werte in Fleisch und Milch festgestellt wurden. Die PFAS

gelangten dort über kontaminiertes Quellwasser und Pflanzen in die Nahrungskette und reichertem sich in Nutztieren an. Dadurch wurden die gesetzlichen Grenzwerte in Fleisch und vereinzelt auch in Milch (vorgeschlagener Grenzwert) überschritten. Bei der Bewertung von PFAS sollte der One-Health-Ansatz angewendet werden: Nur wenn alle exponierten Kompartimente und Umweltkreisläufe betrachtet werden, lassen sich die komplexen Wechselbeziehungen zwischen Mensch, Tier und Umwelt erfassen und deren Gesundheit ganzheitlich schützen.

Ausblick

In der Schweiz werden derzeit in Erfüllung der Motion Maret Vorschläge für neue Grenzwerte für PFAS für verschiedene Kompartimente erarbeitet.

Ab 2026 treten in der Europäischen Union schrittweise umfangreiche Beschränkungen für die Nutzung spezifischer PFAS in Kraft: Die Verwendung von Perfluorhexansäure (PFHxA) und verwandter Stoffe wird weitgehend unterbunden, außerdem wird die Verwendung von PFAS in Feuerlöschschäumen stark eingeschränkt.

Die Europäische Chemikalienagentur (ECHA) hat im Frühjahr 2023 einen Vorschlag zur weitgehenden Beschränkung aller PFAS in der EU veröffentlicht. Dieser befindet sich aktuell im Entscheidungsprozess und könnte ab 2026/2027 in Kraft treten. Ziel des Vorschlags ist ein Verbot oder eine starke Einschränkung von Herstellung, Verwendung und Importieren fast aller PFAS. Derzeit wird überprüft, welche Anwendungen von PFAS in den verschiedenen Einsatzgebieten unverzichtbar sind und nicht durch andere Stoffe ersetzt werden können.

Literatur

- [1] Brunn, H., Arnold, G., Körner, W. et al. (2023) PFAS: forever chemicals—persistent, bioaccumulative and mobile. Reviewing the status and the need for their phase out and remediation of contaminated sites. Environmental Sciences Europe 35, 20 (2023). <https://doi.org/10.1186/s12302-023-00721-8>.
- [2] PFAS pollution in European waters, EEA Briefing Briefing no. 19/2024, https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/pfas-pollution-in-european-waters?utm_source=chatgpt.com&activeTab=4bef7e95-a0ad-494d-beb7-cc4d1c879431
- [3] Hu, X.C., Andrews, D.Q., Lindstrom, A.B., Bruton, T.A., Schaider, L.A., Grandjean, P., Lohmann, R., Carignan, C.C., Blum, A., Balan, S.A., Higgins, C.P., Sunderland, E.M. (2016) Detection of Poly- and Perfluoroalkyl Substances (PFASs) in U.S. Drinking Water Linked to Industrial Sites, Military Fire Training Areas, and Wastewater Treatment Plants, Environmental Science & Technology Letters 3, 344-350
- [4] IPEN, 2018, Fluorine-free firefighting foams (3F) viable alternatives to fluorinated aqueous film-forming foams (AFFF), Independent Expert Panel Convened by IPEN Stockholm Convention POPRC-14 Rome.
- [5] <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wasser/grundwasser/grundwasser-qualitaet/pfas-im-grundwasser.html#:~:text=PFAS%20im%20Grundwasser>
- [6] <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wasser/grundwasser/grundwasser-qualitaet/tfa-im-grundwasser.html>
- [7] https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/wasser/fachinfo-daten/nawa-pfas-oberflaechengewaesser-2021.pdf/download.pdf/Tabelle_PFAS_OW_2023_DE.pdf
- [8] Casado-Martinez, C., Pascariello, S., Polesello, S., Valsecchi, S., Babut, M., Ferrari, B.J.D. (2021) Sediment quality assessment framework for per- and polyfluoroalkyl substances: results from a preparatory study and regulatory implication. Integrated Environmental Assessment and Management

- [9] Entscheidungsgrundlagen für den Vollzug an PFAS belasteten Standorten in der Schweiz (2021). Studie im Auftrag des BAFU <https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/altlasten/externe-studien-berichte/expertenbericht-pfas.pdf.download.pdf/entscheidungsgrundlagen-vollzug-PFAS-belastete-standorte.pdf>
- [10] Projekt PFAS im Bereich Altlasten und Abfall: Lösungsansätze für den Umgang mit PFAS-belasteten Standorten. Ergebnisbericht der Altlasten- und Abfall-Arbeitsgruppen BAFU-Kantone 2022/2023 (2024) Im Auftrag des BAFU https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/altlasten/externe-studien-berichte/projekt-pfas-im-bereich-altlasten-und-abfall-loesungsansaetze-fuer-den-umgang-mit-pfas-belasteten-standorten.pdf.download.pdf/Ergebnisbericht_Projekt_PFAS_de.pdf
- [11] Houde, M., De Silva, A.O., Muir, D.C.G., Letcher, R.J., 2011. Monitoring of perfluorinated compounds in aquatic biota: an updated review. Environ. Sci. Technol. 45 (19), 7962–7973.
- [12] Gebbink, W.A., van Asseldonk, L., van Leeuwen, S.P.J. (2017) Presence of Emerging Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFASs) in River and Drinking Water near a Fluorochemical Production Plant in the Netherlands, Environmental Science & Technology 51, 11057-11065
- [13] Sun, M., Arevalo, E., Strynar, M., Lindstrom, A., Richardson, M., Kearns, B., Pickett, A., Smith, C., Knappe, D.R.U. (2016) Legacy and Emerging Perfluoroalkyl Substances Are Important Drinking Water Contaminants in the Cape Fear River Watershed of North Carolina, Environmental Science & Technology Letters 3, 415-419
- [14] Ghisi, R., Vameralia, T., Manzetti, S. (2019) Accumulation of perfluorinated alkyl substances (PFAS) in agricultural plants: A review, Environmental Research 169, 326-341
- [15] Xiao, F. (2017) Emerging poly- and perfluoroalkyl substances in the aquatic environment: A review of current literature, Water Research 124, 482-495
- [16] Giesy, J.P., Naile, J.E., Khim, J.S., Jones, K.C., Newsted, J.L (2010) Aquatic toxicology of perfluorinated chemicals. Reviews of Environmental Contamination and Toxicology 202, 1–52
- [17] Ding G, Peijnenburg WJGM. 2013. Physicochemical properties and aquatic toxicity of poly- and perfluorinated compounds. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 43, 598–678
- [18] Ahrens, L. und Bundschuh, M. (2014) Fate and effects of poly- and perfluoroalkyl substances in the aquatic environment: A review. Environmental Toxicology and Chemistry, 33, 1921–1929
- [19] EFSA, 2020, Risk to human health related to the presence of perfluoroalkyl substances in food, <https://www.efsa.europa.eu/en/efsajournal/pub/6223>
- [20] Jaus, A., Fragnière Rime, C., Riou, J., Brüschiweiler, B. J. Bochud, M., von Goetz, N. (2025) Serum biomonitoring of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in the adult population of Switzerland: Results from the pilot phase of the Swiss health study. Environment International 198, 109382
- [21] Nguyen, M. A., Wiberg, K., Ribeli, E., Josefsson, S. Futter, M., Gustavsson, J., Ahrens, L. (2017) Spatial distribution and source tracing of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in surface water in Northern Europe, Environmental Pollution 220, 1438-1446
- [22] Valsecchi et al. (2021) Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) in Fish from European Lakes: Current Contamination Status, Sources, and Perspectives for Monitoring, Environmental Toxicology and Chemistry—Volume 40, Number 3—pp. 658–676 (<https://setac.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/etc.4815>).

Übersicht über die Situation in der Schweiz 2024: https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/altlasten/fachinfo-daten/symposium_2024_praesentationen.pdf.download.pdf/Symposium%202024%20Pr%C3%A4sentationen.pdf ; <https://cercleau.ch/mediathek/tagung-2024-pfas-ewige-chemikalien-in-unseren-gewaessern/>

Ansprechpersonen

Dr. Marion Junghans, marion.junghans@oekotoxzentrum.ch, +41 58 765 5401
 Dr. Alexandra Kroll, alexandra.kroll@oekotoxzentrum.ch, +41 58 765 5487
 Dr. Anke Schäfer, anke.schaefer@oekotoxzentrum.ch, +41 58 765 5436

Überarbeitete Version, Oktober 2025