

Trifluoressigsäure und andere PFAS im Grundwasser – was tragen Pflanzenschutzmittel bei?

Marianne E. Balmer¹, Daniel Baumgartner¹, Ulrich Schaller¹, Peter Bormann², Thomas Poiger¹

¹Agroscope, Pflanzenschutzmittel – Wirkung und Bewertung, 8820 Wädenswil, Schweiz

²Bundesamt für Landwirtschaft, Nachhaltiger Pflanzenschutz und Sorten, 3003 Bern, Schweiz

Auskünfte: Marianne Balmer, E-Mail: marianne.balmer@agroscope.admin.ch

<https://doi.org/10.34776/afs16-132> Publikationsdatum: 1. Oktober 2025



Die wichtigsten Quellen von Trifluoressigsäure (TFA) im Grundwasser sind fluorierte Kältemittel aus Klima- und Kühlanlagen und fluorierte Pflanzenschutzmittel. Zur Belastung mit «klassischen» längerkettigen, hochfluorierten PFAS tragen Pflanzenschutzmittel nicht wesentlich bei. Bild: Peter Bormann, KI-generiert mit Reve Image 1.0 (Reve AI Inc., 2025).

Zusammenfassung

Unter dem Begriff «Per- und polyfluorierte Alkylverbindungen» (PFAS) werden meist längerkettige und hochfluorierte Chemikalien verstanden. In der Schweiz zugelassene Pflanzenschutzmittel gehören nicht zu diesen «klassischen» PFAS. Seit der Einführung einer neuen und sehr umfassenden Definition durch die OECD im Jahr 2021, zählen aber auch diverse Pflanzenschutzmittelwirkstoffe zu den PFAS. Sie weisen in ihrer Molekülstruktur meist eine oder mehrere Trifluormethylgruppen auf, die beim Abbau der Stoffe in der Umwelt in Trifluoressigsäure (TFA) umgewandelt werden können. TFA zählt ebenfalls zu den PFAS und wird verbreitet im Grundwasser gefunden. Als Hauptquelle für TFA in der Umwelt gelten fluorhaltige Kältemittel aus Klimaanlage und Kühlgeräten, die in der Atmosphäre zu TFA abgebaut und mit dem Regen in den

Wasserkreislauf eingetragen werden, gefolgt von fluorierten Pflanzenschutzmittelwirkstoffen. Wie gross der jeweilige Anteil dieser beiden Quellen an der TFA-Belastung des Grundwassers an einem Standort ist, hängt von verschiedenen Faktoren ab und lässt sich noch nicht beziffern. Auch Beistoffe, welche neben den Wirkstoffen in Pflanzenschutzmitteln enthalten sind, werden öfters als mögliche Quellen von PFAS genannt. Unsere Auswertung zeigt, dass PFAS-haltige Beistoffe in Pflanzenschutzmitteln nur sehr selten eingesetzt werden. Ihr Beitrag zur Belastung des Grundwassers im Vergleich zu anderen Quellen ist sehr gering. Dies gilt sowohl für «klassische» PFAS als auch TFA.

Key words: Pesticides, co-formulant, PFAS, trifluoroacetic acid, TFA-formation potential, ground water.

Grosses öffentliches Interesse an PFAS

Derzeit tauchen PFAS fast täglich in den Medien auf, es wird über deren Vorkommen in Böden und Gewässern, in Lebensmitteln oder im menschlichen Körper berichtet. Zu den Auswirkungen dieser Belastungen auf die menschliche Gesundheit oder die Umwelt ist insgesamt noch wenig bekannt. Der Einsatz von einigen «klassischen», also längerkettigen und hochfluorierten PFAS ist heute in Europa und in der Schweiz in der Chemikaliengesetzgebung streng reguliert oder verboten. Wichtige Gründe dafür sind die Langlebigkeit dieser Stoffe in der Umwelt und ihre toxikologischen Eigenschaften. Für zahlreiche andere Vertreter der PFAS ist die Datenlage für eine Beurteilung noch nicht ausreichend.

So verbreitet PFAS als Umweltchemikalien sind, so unterschiedlich sind die einzelnen Stoffe, die unter den Begriff PFAS fallen und so vielfältig ist ihre Herkunft. Auch Pflanzenschutzmittel (PSM) werden oft als mögliche Quelle von PFAS in der Umwelt und besonders für die Belastung von Böden oder des Grundwassers genannt. Grundwasser ist die wichtigste Ressource für Trinkwasser in der Schweiz. Dieses muss für Konsumentinnen und Konsumenten sicher sein und deshalb strenge Anforderungen erfüllen. Grundwasser gilt aber auch grundsätzlich als schützenswertes Gut. Die Belastung mit Chemikalien soll möglichst verhindert werden, unabhängig von deren toxikologischen Eigenschaften. Wir fokussieren in unserem Artikel deshalb auf PFAS im Grundwasser. Wir zeigen auf, dass PSM nicht wesentlich zur Belastung mit häufig untersuchten «klassischen» PFAS beitragen und ordnen ein, welche Rolle PSM bei der Belastung des Grundwassers mit Trifluoressigsäure (TFA) spielen, einem kurzkettigen PFAS, das in der Umwelt weit verbreitet ist.

PFAS und Trifluoressigsäure

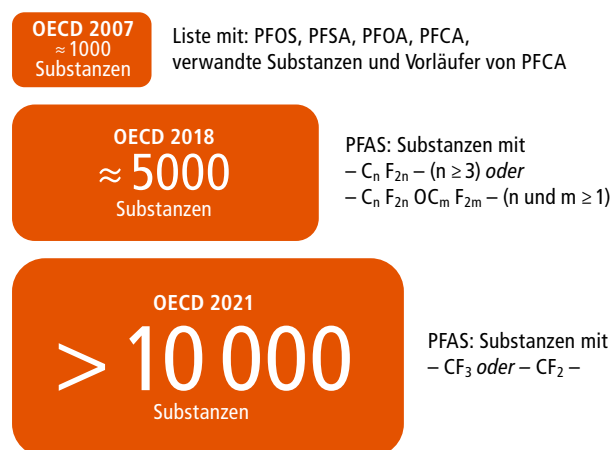
Was sind PFAS?

Die Abkürzung PFAS steht für «per- und polyfluorierte Alkylverbindungen» oder (englisch) «per- and polyfluoroalkyl substances». Dieser allgemeine Begriff umfasst tausende von Stoffen mit ganz unterschiedlichen physikalischen, chemischen und biologischen Eigenschaften, darunter solche, die bei Raumtemperatur gasförmig, flüssig oder fest sind. Kommen PFAS zur Sprache, geht es aber meist um vollständig oder hochfluorisierte Stoffe, zum Beispiel längerkettige Alkylsulfon- und Alkylcarbonsäuren. Diese Stoffe sind oftmals sowohl fett- wie wasserabweisend, thermisch und chemisch

stabil und finden deshalb seit Jahrzehnten vielfältigen Einsatz in industriellen Prozessen und Produkten und (in geringeren Mengen) in Alltagsgegenständen (Glüge *et al.*, 2020; Gains, 2022; Kacan, 2023; Meermann *et al.*, 2024). Im Jahr 2007 wurden rund tausend längerkettige und hochfluorierte Verbindungen zu den PFAS gezählt (OECD, 2007). Abbildung 2 zeigt die chemischen Strukturen ausgewählter «klassischer» PFAS-Verbindungen. Die Definition von PFAS wurde in den letzten Jahren mehrfach erweitert (Buck *et al.*, 2021; Abbildung 1). Neuere Definitionen von PFAS umfassen auch kurzkettige per- oder polyfluorierte Alkylverbindungen. So zählten nach der OECD-Definition von 2018 fast fünftausend Verbindungen zu den PFAS (OECD, 2018). 2021 wurde eine nochmals deutlich breitere Definition vorgeschlagen, wonach alle Verbindungen, welche eine perfluorierte Methylgruppe ($-CF_3$) oder Methylengruppe ($-CF_2-$) enthalten, zu den PFAS zählen (OECD, 2021). Damit wurde eine einfach anwendbare Definition geschaffen und die Unterscheidung zwischen Substanzen, die zu den PFAS zählen und solchen, die nicht dazu zählen, vereinfacht. Diese neue Definition umfasst insgesamt mehr als zehntausend verschiedene Substanzen, von sehr kleinen bis zu sehr komplexen Molekülen und Polymeren (Wang *et al.*, 2021).

Gehören auch PSM-Wirkstoffe zu den PFAS?

Wird die aktuelle OECD-Definition angewendet, gehören auch diverse PSM-Wirkstoffe zu den PFAS, die in



vereinfachte und angepasste Darstellung nach Buck *et al.* (2021)

Abbildung 1 | Entwicklung des Begriffs «per- und polyfluorierte Alkylverbindungen» gemäss den Definitionen der OECD. Das Akronym PFAS wird ab 2018 verwendet. Erst mit der sehr breiten Definition von 2021 werden auch diverse PSM-Wirkstoffe und TFA zu den PFAS gezählt. Für die präzisen Definitionen siehe OECD (2007, 2018, 2021).

der Schweiz zugelassen sind. Ihre chemischen Strukturen und Eigenschaften unterscheiden sich jedoch deutlich von denjenigen der «klassischen» PFAS (Abbildung 3). Wie sich Anzahl und Verkaufsmengen von PFAS-Wirkstoffen in den letzten Jahren entwickelt haben, zeigen wir weiter unten.

Wie sind PFAS reguliert?

Zu den Gesundheits- und Umweltrisiken gibt es erst für wenige ausgewählte PFAS fundierte Kenntnisse. Für zahlreiche andere Vertreter der PFAS ist die Datenlage für eine Beurteilung noch nicht ausreichend. In der Schweiz verbietet die Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung (ChemRRV) die Verwendung einiger «klassischer» PFAS oder schränkt diese stark ein, namentlich PFOS, PFHxS, PFOA und C₉-C₁₄-PFCA, ihre Derivate und Vorläufersubstanzen. Diese Stoffe wurden als «besonders besorgniserregend» identifiziert¹. Einschränkungen für weitere dieser «klassischen» PFAS werden dazu kommen². Wie die Herstellung und Verwendung der ganzen Chemikaliengruppe künftig reguliert werden soll, wird derzeit auf europäischer Ebene unter der Führung der ECHA (European Chemicals Agency) diskutiert (EC, 2020; ECHA, 2024)³.

Ausgehend von den toxikologischen Eigenschaften von gut untersuchten PFAS, hat die EFSA (Europäische Behörde für Lebensmittelsicherheit) einen Wert für die tolerierbare wöchentliche Aufnahme (TWI) von 4,4 ng pro kg Körpergewicht für den Menschen abgeleitet (EFSA, 2020). Dafür wurden vier «klassische» PFAS berücksichtigt («PFAS-4», namentlich PFOS, PFHxS, PFOA und PFNA). Dieser TWI dient als Grundlage für die aktuellen Höchstwerte für PFAS in tierischen Lebensmitteln, wie z. B. Eier, Fleisch oder Fisch in der EU, welche seit Anfang 2024 auch in der Schweiz gelten⁴. Für Trinkwasser gilt in der EU ab 2026 ein Höchstwert von 0,1 µg/L für die Summe aus 20 bestimmten länger-kettigen und hochfluorierten PFAS (PFAS-20)⁵. Verschiedene EU-Länder haben zusätzlich nationale Trinkwasserhöchstwerte für die Summe der

PFAS-4 festgelegt⁶. In der Schweiz gibt es derzeit lediglich für drei Vertreter der «klassischen» PFAS Trinkwassergrenzwerte: je 0,3 µg/L für PFHxS und PFOS und 0,5 µg/L für PFOA⁷. Die Höchstwerte werden derzeit in Anlehnung an die Vorgaben der EU überarbeitet. Neue Werte treten voraussichtlich 2026 in Kraft (BLV, 2025a). Pflanzenschutzmittelwirkstoffe – auch solche die zu den PFAS zählen – werden in der Pflanzenschutzmittelverordnung (PSMV)⁸ reguliert und müssen zusätzliche Anforderungen erfüllen, bevor sie zugelassen werden. Für PSM-Wirkstoffe gilt in Grund- und Trinkwasser ein vorsorglicher Anforderungs- bzw. Grenzwert von 0,1 µg/L, unabhängig von ihrer Toxizität⁹.

Was ist TFA?

TFA steht für «Trifluoressigsäure» (das Anion der Trifluoressigsäure) oder (englisch) «trifluoroacetic acid», die kleinste, zu den PFAS zählende Carbonsäure (Abbildung 4). TFA selbst wird in vielen chemischen Prozessen eingesetzt, entsteht aber auch beim Abbau anderer PFAS. Potenziell kann TFA aus allen Verbindungen gebildet werden, welche eine C-CF₃-Einheit in ihrer Molekülstruktur aufweisen und die in der Umwelt nicht persistent sind. Es gibt also mehrere tausend Verbindungen, die potenzielle Vorläufer von TFA sind. TFA selber wird in der Umwelt nicht weiter abgebaut, ist gut wasserlöslich und im Boden sehr mobil (Solomon *et al.*, 2016; Madronich *et al.*, 2023). Wegen der zahlreichen möglichen Quellen und der besonderen Eigenschaften, sollte das Vorkommen von TFA in der Umwelt gesondert von anderen PFAS betrachtet werden. Welches die wichtigsten Quellen von TFA sind und was PSM beitragen, führen wir weiter unten aus.

Was weiss man über die Toxizität von TFA?

Die Auswirkungen von TFA auf die Umwelt oder die menschliche Gesundheit sind noch nicht abschliessend geklärt. Auf europäischer Ebene werden diese derzeit von ECHA und EFSA evaluiert¹⁰. Eine Bewertung der deutschen Behörden zuhanden der ECHA schlägt vor, TFA als reproduktionstoxisch, sehr persistent und sehr

¹ Website der Anmeldestelle Chemikalien: <https://www.anmeldestelle.admin.ch/chem/de/home/themen/pflicht-hersteller/stoffe/besonders-besorgniserregenden-stoffe-svhc.html>

² Für Angaben zu aktuellen und künftigen Regulierungen von PFAS siehe: BAFU (2025b und 2025c) und BLV (2025a).

³ Auf Antrag von Deutschland, Dänemark, den Niederlanden, Norwegen und Schweden prüft die ECHA weitgehende Einschränkungen der Herstellung, Vermarktung und Verwendung von PFAS. Die Fortschritte des Prozesses werden auf der ECHA-Website dokumentiert: <https://echa.europa.eu/de/registry-of-restriction-intentions/-/dislist/details/0b0236e18663449b> und <https://echa.europa.eu/de/hot-topics/perfluoroalkyl-chemicals-pfas>

⁴ Verordnung des EDI über die Höchstgehalte für Kontaminanten (Kontaminantenverordnung, VHK, SR 817.022.15) und BLV (2025a)

⁵ EU-Richtlinie (2020): Richtlinie (EU) 2020/2184 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 2020 über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (Neufassung). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32020L2184&from=DE>

⁶ Nationale Höchstwerte für PFAS-4: Schweden 0,004, Dänemark 0,002 und Deutschland (ab 2028) 0,02 µg/L siehe Livsmedelsverket (2022), Miljö- og Ligestillingsministeriet (2024) bzw. Bundesministerium der Justiz (2023).

⁷ Verordnung des EDI über Trinkwasser sowie Wasser in öffentlich zugänglichen Bädern und Duschanlagen (TBDV, SR 817.022.11).

⁸ Verordnung über das Inverkehrbringen von Pflanzenschutzmitteln (Pflanzenschutzmittelverordnung, PSMV, SR 916.161).

⁹ Gewässerschutzverordnung (GSchV, SR 814.201) und Verordnung des EDI über Trinkwasser sowie Wasser in öffentlich zugänglichen Bädern und Duschanlagen (TBDV, SR 817.022.11).

¹⁰ Informationen zum Auftrag der EFSA, EFSA-Websites «Per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS)»: <https://www.efsa.europa.eu/de/topics/per-and-polyfluoroalkyl-substances-pfas> und «Request for a review of the toxicological reference values for trifluoroacetic acid (TFA)»: <https://open.efsa.europa.eu/questions/EFSA-Q-2024-00502>.

mobil einzustufen. Nach der Konsultationsphase wird die ECHA aufgrund dieses Dossiers und der dazu eingegangenen Kommentare, der EU-Kommission eine Stellungnahme und einen Vorschlag zur Einstufung von TFA unterbreiten. Dieser wird Ende 2026 erwartet¹¹.

Für die Ableitung von Höchstwerten in Lebensmitteln oder Trinkwasser fehlen zurzeit noch die wissenschaftlichen Grundlagen. In der Europäischen Union gibt es für TFA weder harmonisierte, für alle Mitgliedstaaten gültige Grenz- oder Richtwerte noch eine Einstufung der toxikologischen Relevanz als Grundwassermetabolit. Einige EU-Mitgliedstaaten kennen derzeit nationale Richtwerte für TFA in Trinkwasser. So gilt in Deutschland ein Leitwert von 60 µg/L (UBA, 2020a und 2020b) und in Dänemark ein Grenzwert von 9 µg/L (Miljø- og Ligestillingsministeriet, 2023). In der Schweiz gibt es zurzeit keine Höchstwerte für TFA.

PFAS und TFA in Grund- und Trinkwasser

Kommen PFAS im Grundwasser vor?

Als Folge der vielfältigen und häufigen Anwendung und ihrer Langlebigkeit kommen PFAS in der Umwelt verbreitet vor. In der Nationalen Grundwasserbeobachtung NAQUA wurden 2021 in einer Pilotstudie 550 Grundwasserproben auf PFAS untersucht. Analysiert wurden länger-kettige (C₄–C₁₃), mehrheitlich perfluorierte Carbon- und Sulfonsäuren, also «klassische» PFAS. An knapp der Hälfte der Messstellen wurden PFAS nachgewiesen, insgesamt 13 der 26 untersuchten PFAS. Eine Überschreitung der aktuell gültigen Höchstwerte für Trinkwasser (je 0,3 µg/L für PFHxS und PFOS und 0,5 µg/L für PFOA) wurde nur an einer Messstelle festgestellt. Der (voraussichtliche) künftige Trinkwasserhöchstwert von 0,1 µg/L für die Summe von 20 länger-kettigen, hochfluorierten PFAS wurde an 2 % der Messstellen überschritten (BAFU, 2025b). Eine Kampagne des Verbands der Kantonschemiker Schweiz (VKCS) im Jahr 2023 zu PFAS im Trinkwasser kam zu vergleichbaren Ergebnissen. Von fast 600 Trinkwasserproben aus der ganzen Schweiz wurden in knapp der Hälfte PFAS in bestimm-baren Konzentrationen gefunden. Die Summe von 20 PFAS war in den meisten Proben (551 von 564) < 0,05 µg/L und in 5 Proben über dem voraussichtlichen künftigen Höchstwert von 0,1 µg/L (VKCS, 2023; Meier *et al.*, 2024). Die gemessenen Konzentrationen sind vergleichbar mit denjenigen in Trinkwasserproben aus Deutschland (Borchers *et al.*, 2022).

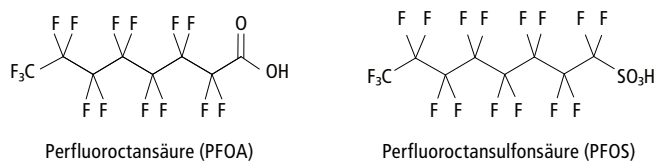


Abbildung 2 | «Klassische» Vertreter länger-kettiger hochfluorierter PFAS. PFOA (eine perfluorierte Alkylcarbonsäure) und PFOS (eine perfluorierte Alkylsulfonsäure) sind in der Umwelt persistent. Ihre Verwendung ist im Chemikalienrecht heute streng reguliert.

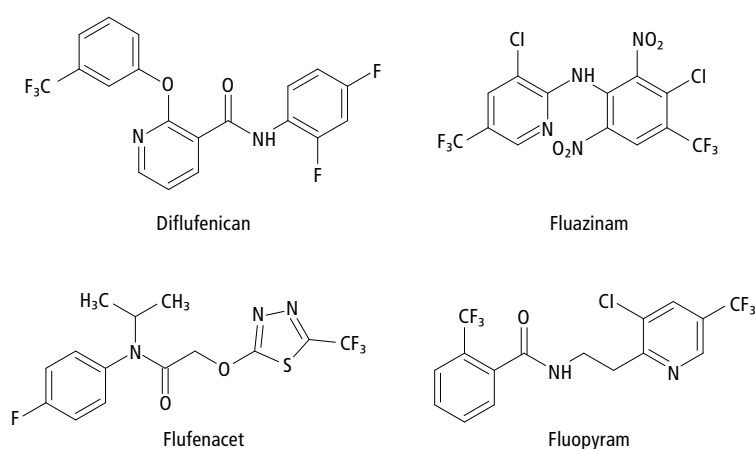


Abbildung 3 | Von den in der Schweiz verkauften Wirkstoffen, welche zu den PFAS zählen, wurden Diflufenican, Fluzinam, Flufenacet und Fluopyram in den letzten Jahren in den grössten Mengen verkauft, nämlich je zwischen etwa 3 und 11 Tonnen pro Jahr. Die Zulassung von Flufenacet wurde Mitte 2025 zurückgezogen. Chemische Struktur und Eigenschaften von PSM-Wirkstoffen unterscheiden sich deutlich von denjenigen der «klassischen» länger-kettigen, hochfluorierten PFAS. PSM-Wirkstoffe sind biologisch aktive Moleküle und werden in der Umwelt abgebaut, wenn auch unterschiedlich rasch.

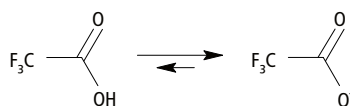


Abbildung 4 | Chemische Struktur von Trifluoressigsäure (TFA). In der Umwelt liegt TFA in deprotonierter Form, als Anion vor (rechts).

In beiden Studien aus der Schweiz werden an Messstellen mit erhöhten PFAS-Belastungen Punktquellen als Hauptursache vermutet. PFAS können zum Beispiel mit Löschschäumen von Brandschutzübungsplätzen in den Untergrund oder über industrielle oder kommunale Abwasserreinigungsanlagen in Fließgewässer gelangen und ins Grundwasser infiltrieren.

¹¹ Pressemitteilung von drei deutschen Bundesämtern vom 26.05.2025: <https://www.umwelt-bundesamt.de/presse/pressemitteilungen/trifluoressigsaeure-tfa-bewertung-fuer-einstufung>

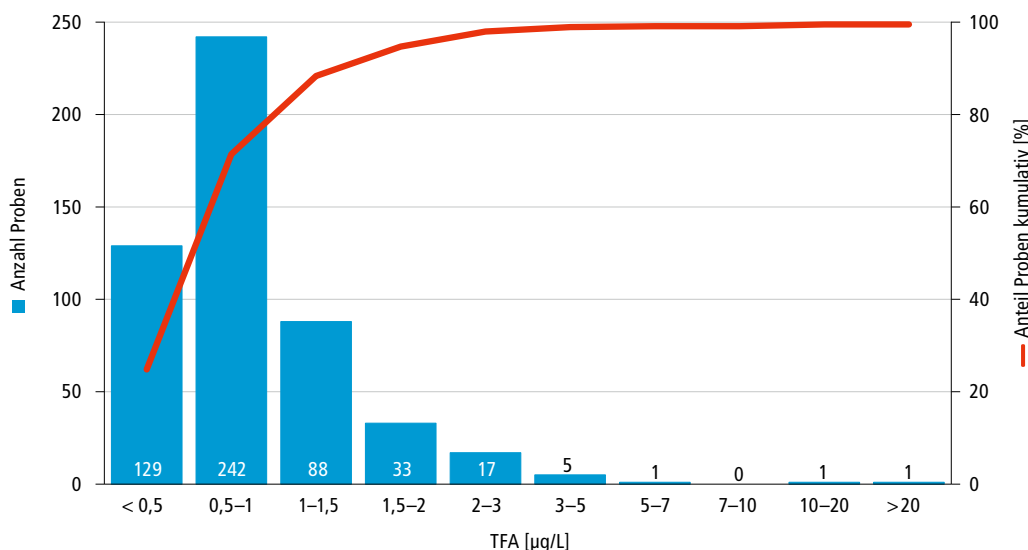


Abbildung 5 | TFA-Konzentrationen in 517 Grundwasserproben von NAQUA-Messstellen (Jahre 2022 und 2023). TFA wurde in fast allen Proben über der Bestimmungsgrenze von maximal 0,2 µg/L gemessen. Quelle: NAQUA (BAFU, 2025c).

Kommt TFA im Grundwasser vor?

Für TFA ist die Situation anders: Die Chemikalie wird flächendeckend im Grund- und Trinkwasser nachgewiesen. Die Konzentrationen sind dabei deutlich höher als diejenigen der anderen untersuchten länger-kettigen, hochfluorierten PFAS. In einer Pilotstudie des NAQUA wurde 2022 und 2023 TFA an praktisch allen der 517 untersuchten Messstellen nachgewiesen. In rund 70 % der Proben lagen die TFA-Konzentrationen unter 1 µg/L, in 95 % der Proben unter 2 µg/L und in Einzelfällen (zwei Proben) über 15 µg/L (BAFU, 2025c).

Die Untersuchung von Trinkwasser zeigte ein ähnliches Bild: In fast allen Proben wurde TFA nachgewiesen (560 von 564)¹². In der Mehrheit der Proben lagen die Konzentrationen unter 1 µg/L (488), in 75 Proben im Bereich von 1–9 µg/L und in zwei Proben über 9 µg/L (VKCS, 2023; Meier *et al.*, 2024). Die Ergebnisse sind vergleichbar mit denjenigen in Deutschland und Österreich (UBA, 2021; BML, 2022).

In der Mehrheit der Grund- und Trinkwasserproben liegen die Konzentrationen auch in einem ähnlichen Bereich wie sie in der Schweiz im Jahresdurchschnitt (2021–2023) in Regenwasser oder in Flüssen (rund 0,3–1 µg/L) gemessen wurden. Welche Bedeutung diese Befunde für die Umwelt oder die menschliche Gesundheit haben, lässt sich derzeit nicht abschliessend beurteilen. In der Schweiz gibt es derzeit keinen Höchstwert für TFA im Trinkwasser. Weitere Informationen zu Regulierung und Toxizität von TFA siehe weiter oben.

¹² Die Bestimmungsgrenze für TFA in Trinkwasser lag je nach Labor bei 0,1 oder 0,2 µg/L.

PFAS in Pflanzenschutzmitteln

Warum gibt es PSM-Wirkstoffe, die PFAS sind?

In der Schweiz oder in Europa sind oder waren keine «klassischen» (länger-kettigen und hochfluorierten) PFAS als PSM-Wirkstoffe zugelassen. Wird jedoch die Definition der OECD von 2021 angewendet, gehören diverse Wirkstoffe zu den PFAS. CF₂- und CF₃-Gruppen in der Molekülstruktur erfüllen verschiedene Funktionen. Verbindungen werden stabiler und lipophiler und werden von Pflanzen oder Schadorganismen besser aufgenommen (Jeschke, 2004). PSM-Wirkstoffe wirken so länger und besser, müssen weniger häufig und können in tieferen Mengen angewendet werden. Diese Funktionalitäten von fluorierten Einheiten werden auch in gewissen Bioziden oder Arzneimitteln genutzt. Verbesserte Stabilität und Wirksamkeit haben aber den Nachteil, dass viele fluorierte Verbindungen in der Umwelt nur langsam abgebaut werden (Alexandrino *et al.*, 2022; Jagani *et al.*, 2025).

Wie viel PFAS-Wirkstoffe werden verkauft?

Um diese Frage zu beantworten, haben wir ausgehend von der chemischen Struktur die Wirkstoffe identifiziert, die zu den PFAS gehören und die öffentlich verfügbaren Verkaufszahlen des BLW (BLW, 2025) ausgewertet. Zwischen 2008 und 2023 waren in der Schweiz 62 verschiedene PSM-Wirkstoffe zugelassen, die Fluor in ihrer Struktur enthalten. Davon zählen 39 zu den PFAS (gemäss OECD-Definition 2021). Die total verkauften Mengen dieser Wirkstoffe bewegten sich zwischen

rund 30 und maximal 46 Tonnen pro Jahr. 2023 wurden 22 verschiedene PFAS-Wirkstoffe gezählt, mit einer verkauften Menge von insgesamt rund 38 Tonnen. Bei den verkauften Mengen ist über den gesamten Zeitraum von 2008 bis 2023 ein leicht ansteigender Trend ersichtlich. Die Anzahl der zugelassenen PFAS-Wirkstoffe hat in den letzten Jahren hingegen abgenommen (Abbildung 6). Eine Liste der betreffenden Wirkstoffe und ihre Verkaufsmengen sind in Poiger *et al.* (2025) zu finden. Abbildung 3 zeigt die chemischen Strukturen der vier PFAS-Wirkstoffe, die in den letzten drei Jahren am meisten verkauft wurden.

Kommen PFAS auch als Beistoffe in PSM vor?

PSM enthalten ausser einem oder mehreren Wirkstoffen auch sogenannte Beistoffe. Diese verleihen den Produkten die für die Anwendung nötigen Eigenschaften. Die genaue Zusammensetzung der Produkte unterliegt dem Geschäftsgeheimnis und ist nicht öffentlich verfügbar. Das führt dazu, dass der Verdacht geäussert wird, PSM-Beistoffe könnten eine bedeutende Quelle von PFAS sein. Im Zulassungsverfahren müssen Gesuchsteller die Zusammensetzung ihrer Produkte gegenüber den Behörden offenlegen. Die behördeneigene Zusammen-

setzungsdatenbank hat es uns ermöglicht, PFAS-haltige Beistoffe und Produkte, in denen diese enthalten sind, zu identifizieren. Wir haben zwei Kategorien von PFAS-haltigen Beistoffen gefunden: einerseits spezielle, hochfluorierte Schaumhemmer und andererseits fluorierte Treibgase. Die Auswertung dieser Informationen¹³ hat aber auch gezeigt, dass Beistoffe, die unter die Definition von PFAS fallen, sehr selten eingesetzt werden.

Tragen Schaumhemmer in PSM zur Belastung mit PFAS bei?

Schaumhemmer werden vielen PSM als Beistoff zugesetzt. Sie vermindern die Schaumbildung bei der Zubereitung der Spritzbrühe. Die zugesetzten Mengen sind gering, weniger als 1 % der Produktzusammensetzung. Einige wenige dieser Schaumhemmer enthalten PFAS. Dabei handelt es sich um Gemische aus längerkettigen (C₆-C₁₈) Perfluoralkylphosphon- und Perfluoralkylphos-

¹³ Die Zusammensetzungsdatenbank wurde durchsucht nach Komponenten, welche Fluor enthalten. Beistoffe, die selber unter die Definition von PFAS fallen oder die aus einem Gemisch bestehen, welches ein PFAS als Komponente enthält, wurden identifiziert. Da auch die Gehalte der Beistoffe in den betroffenen Produkten bekannt sind, kann in Kombination mit den Verkaufszahlen die verkaufte Menge an PFAS-haltigen Beistoffen ermittelt werden. Produktverkaufszahlen werden durch das BLW jährlich erhoben und standen für diese Recherche zur Verfügung.

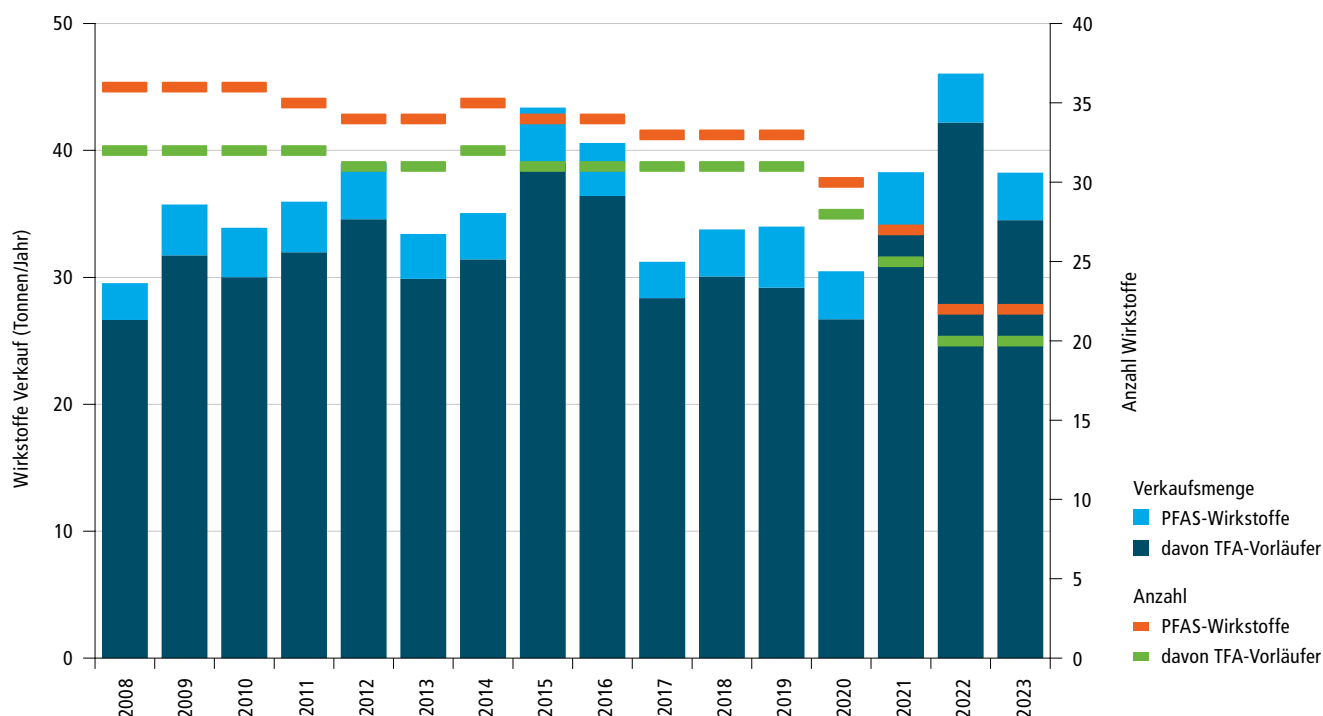


Abbildung 6 | Von 2008 bis 2023 jährlich in der Schweiz verkaufte Menge an PSM-Wirkstoffen, die gemäss OECD-Definition von 2021 zu den PFAS zählen (Säulen). Der dunkle Teil der Säule gibt an, welcher Anteil davon auf Wirkstoffe entfällt, bei deren Abbau potenziell TFA gebildet werden kann. Die Anzahl der zugelassenen Wirkstoffe, die zu den PFAS zählen bzw. TFA bilden können, hat im betrachteten Zeitraum abgenommen (orange bzw. grüne Marken).

phinsäuren¹⁴ und 10–30 % Wasser (Tabelle 1). Diese PFAS-haltigen Schaumhemmer wurden und werden aber nur in wenigen Produkten eingesetzt: im Zeitraum von 2014 bis 2023 waren acht verschiedene Produkte zugelassen, welche PFAS-haltige Schaumhemmer enthielten. Nicht alle davon waren auch im Verkauf. Heute ist von diesen acht Produkten noch eines zugelassen. Der Gehalt dieser Schaumhemmer in den (früher) zugelassenen Produkten lag zwischen ca. 0,05 und 0,25 %. Die jährlich mit PSM verkauften Mengen dieser PFAS-haltigen Schaumhemmer lag im Bereich von ca. 1 bis 6 kg, im Mittel bei rund 3 kg pro Jahr für 2014–2023. Detaillierte Angaben zu den Verkaufsmengen sind in Tabelle 2 zu finden.

Es kann nicht vollständig ausgeschlossen werden, dass PFAS-haltige Schaumhemmer an einzelnen Standorten zur Belastung des Grundwassers beitragen. Im Vergleich zu Emissionen aus anderen Quellen, dürfte die mit PSM verkaufte Menge an längerkettigen, hochfluorierten PFAS aber sehr klein sein¹⁵. PSM sind insgesamt *keine* bedeutende Quelle für «klassische» PFAS.

Wie bedeutend sind fluorierte Treibgase aus PSM?

Gewisse PSM werden in Aerosoldosen verkauft. Diese enthalten neben dem Wirkstoff und anderen Beistoffen auch ein Treibgas. In einigen derzeit bewilligten PSM wird ein fluorhaltiges Treibgas (1,3,3,3-Tetrafluorpropen) verwendet (Tabelle 1). Nach der neusten Definition der OECD (2021) zählt 1,3,3,3-Tetrafluorpropen zu den PFAS. Derzeit sind in der Schweiz vier PSM-Produkte

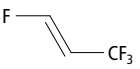
mit 1,3,3,3-Tetrafluorpropen als Beistoff zugelassen. Die mit diesen Produkten jährlich verkaufte Menge dieses Treibgases nahm von rund 100 kg im Jahr 2018 auf rund 1000 kg im Jahr 2023 zu. Vor 2018 war kein Produkt mit 1,3,3,3-Tetrafluorpropen oder einem anderen fluorierten Treibgas zugelassen (Tabelle 2). Bei der Anwendung gelangt das Gas in die Atmosphäre und wird dort unter Bildung von TFA abgebaut, das mit dem Regen in den Wasserkreislauf gelangt.

1,3,3,3-Tetrafluorpropen gehört zu den sogenannten HFO-Gasen (ungesättigte, teilweise fluorierte Kohlenwasserstoffe). Diese werden auch in Industrie und Alltagsprodukten als Treibgase eingesetzt. Ihre wichtigste Verwendung finden sie aber als Kältemittel in Kühl- und Klimaanlage. Es gibt derzeit noch kein umfassendes Inventar für die in der Schweiz eingesetzten Mengen dieser Stoffe. Modellrechnungen ausgehend von Messungen von HFO-Gasen in der Atmosphäre ergaben für die EU geschätzte Emissionen von insgesamt fast 4000 Tonnen pro Jahr (Henne *et al.*, 2025), skaliert für die Grösse der Bevölkerung ergibt dies für die Schweiz rund 80 Tonnen freigesetzte HFO-Gase pro Jahr. Die Emission von 1,3,3,3-Tetrafluorpropen aus der Verwendung von

¹⁴ Einige Komponenten dieser Schaumhemmer (Perfluoralkylphosphonsäuren) sind potenzielle Vorläufer von Perfluorcarbonsäuren (PFCA), die im Chemikalienrecht reguliert sind.

¹⁵ Informationen zu verwendeten oder emittierten Mengen von verschiedenen PFAS-Kategorien sind mit Ausnahme von PSM kaum verfügbar. Eine Abschätzung für die EU geht von einer Freisetzung von jährlich rund 75 000 Tonnen PFAS aus, davon > 50 % fluorierte Gase (Kacan, 2023). Skaliert für die Bevölkerungszahl (449 Mio in der EU, 9 Mio in der Schweiz), ergibt dies für die Schweiz Emissionen von rund 750 Tonnen PFAS pro Jahr, ohne fluorierte Gase.

Tabelle 1 | PFAS-haltige Beistoffe in PSM, die in der Schweiz zwischen 2014 und 2023 verkauft wurden.

Funktion des Beistoffs	Schaumhemmer	Treibgas
Handelsnamen Beistoff	Fluowet PP; Fluowet PL 80; Fluowet PL 80B; Masurf FS-780	Solstice 1234ze; R-1234ze; HFO-1234ze
PFAS-Komponente im Beistoff	Gemische aus C ₆ -C ₁₂ -Perfluoralkylphosphonsäuren und bis-C ₆ -C ₁₂ -Perfluoralkylphosphonsäuren oder Gemische aus C ₆ -C ₁₈ -Perfluoralkylphosphonsäuren und bis-C ₆ -C ₁₈ -Perfluoralkylphosphonsäuren	Tetrafluorpropen
Chemische Struktur der PFAS-Komponente	$\text{F}_3\text{C}(\text{CF}_2)_5-\text{P}(\text{OH})(\text{O})-(\text{CF}_2)_5-\text{CF}_3$ Beispiel: bis-C₆-Perfluoralkylphosphonsäuren $\text{F}_3\text{C}(\text{CF}_2)_5-\text{P}(\text{OH})(\text{O})-\text{OH}$ Beispiel: C₆-Perfluoralkylphosphonsäuren	 trans-1,3,3,3-Tetrafluorprop-1-en
PFAS-Gehalt im Beistoff	ca. 70–90 %	100 %
Beistoffgehalt in Produkten	< 1 %	ca. 40 %

PSM ist im Vergleich zu anderen Quellen also nicht sehr bedeutend.

Die Bedeutung von Kältemitteln als Quelle von TFA in der Umwelt diskutieren wir weiter unten.

Sind PSM eine Quelle von TFA?

PSM-Wirkstoffe, die zu den PFAS zählen und eine C-CF₃-Gruppe in ihrer Molekülstruktur enthalten, sind TFA-Vorläufersubstanzen. Beim Abbau im Boden, entsteht (potenziell) TFA als Metabolit. Zwischen 2008 und 2023 waren insgesamt 35 verschiedene TFA-Vorläufer als PSM-Wirkstoffe zugelassen. Die Anzahl der verschiedenen Wirkstoffe (in jeweils bewilligten Produkten) hat zwischen 2008 und 2023 um gut einen Drittel abgenommen, von 32 auf 20 Wirkstoffe (Abbildung 6, Poiger *et al.*, 2025). Zwei dieser Wirkstoffe sind seit Mitte 2025 nicht mehr genehmigt¹⁶. Wie rasch und zu welchem Anteil TFA in der Umwelt gebildet wird, ist je nach Wirkstoff verschieden¹⁷ und für die meisten Stoffe noch schlecht untersucht (UBA, 2021). Es kann davon ausgegangen werden, dass die Bildungsraten hoch sind, also die im Wirkstoff enthaltenen C-CF₃-Einheiten überwiegend zu TFA umgewandelt werden.

Wie viel TFA kann aus PSM gebildet werden?

Wie viel TFA aus den in der Schweiz von 2008 bis 2023 verkauften Pflanzenschutzmittelwirkstoffen *maximal* gebildet werden kann, haben wir ausgehend von Verkaufszahlen (BLW, 2025) geschätzt. Dafür haben wir angenommen, dass die Bildungsrate von TFA aus den Wirkstoffen bei 100 % liegt. Das so berechnete maximale TFA-Bildungspotenzial lag zwischen rund 10 Tonnen (2020) und 16 Tonnen (2022) bei durchschnittlich 11,5 Tonnen TFA pro Jahr mit leicht steigendem Trend über den ganzen Zeitraum. Am meisten trugen jeweils die Wirkstoffe Fluazinam (20–41 %), Flufenacet (19–29 %), Diflufenican (4–11 %) und Fluopyram (ab 2013, 6–18 %) zum TFA-Bildungspotenzial bei (Abbildung 7). Detaillierte Angaben zur Berechnung der maximalen TFA-Bildung sowie Angaben zu allen beitragenden Wirkstoffen sind in Poiger *et al.* (2025) zu finden. Für ganz Europa wurde das Bildungspotenzial aus PSM-Wirkstoffen auf rund 3200 Tonnen TFA pro Jahr geschätzt (für die Jahre 2011–2017 und unter Berücksichtigung von 18 Wirkstoffen, wovon auch 14 in der Schweiz zugelassen sind). Die Wirkstoffe Flufenacet, Fluazinam und Diflufenican trugen auch in

Tabelle 2 | Verkaufsmengen PFAS-haltiger Beistoffe in PSM und Anzahl der bewilligten Produkte, welche diese Beistoffe enthalten. Angaben für die Schweiz von 2014 bis 2023.

2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
PFAS-haltige Schaumhemmer in PSM									
Anzahl bewilligte Produkte (davon im Verkauf)									
8 (2)	4 (2)	4 (1)	n.a.	1 (1) §	1 (1) §	1 (1) §	1 (1) §	1 (1) §	1 (1) §
Verkaufte Menge (kg pro Jahr) #									
2,3	2,6	1,4	n.a.	3,6	2,5	3,0	4,4	6,0	5,3
Fluorhaltige Treibgase in PSM									
Anzahl bewilligte Produkte (davon im Verkauf)									
n.r.	n.r.	n.r.	n.r.	1 (1)	2 (2)	2 (2)	2 (2)	3 (2)	3 (3)
Verkaufte Menge (kg pro Jahr)									
–	–	–	–	110	n.a.	580	670	800	1050

Angegeben ist die Verkaufsmenge für den Beistoff (Schaumhemmer), die effektive Menge an PFAS ist etwas tiefer, da der Beistoff auch noch 10–30 % Wasser enthält.

§ Zu diesem Produkt gibt es zusätzlich mehrere Verkaufserlaubnisse. Diese sind bei der verkauften Menge berücksichtigt. Eine Verkaufserlaubnis bedeutet, dass eine Zweitfirma mit Einverständnis der Inhaberin der Originalbewilligung das identische Produkt unter ihrem eigenen Namen verkauft.

n.r. kein Produkt mit diesem Beistoff zugelassen

n.a. Verkaufszahlen nicht auswertbar

dieser Studie am meisten zum TFA-Bildungspotenzial bei (Joerss *et al.*, 2024).

Die Bildung von TFA aus dem durch die Verwendung von PSM emittierten Treibgas 1,3,3,3-Tetrafluorpropen ist im Vergleich zum Potenzial von PSM-Wirkstoffen unbedeutend¹⁸. Angaben zu fluorierten Treibgasen als Beistoffe in PSM sind weiter oben zu finden.

Einträge von TFA ins Grundwasser

Was sind die wichtigsten Quellen für TFA in der Umwelt?

Fluorhaltige PSM-Wirkstoffe gelten als Chemikalien-Gruppe mit beträchtlichem Potenzial für die Bildung von TFA in der Umwelt. Das mit Abstand grösste Potenzial für TFA-Emissionen wird aber fluorierten Gasen zugeschrieben, die als Kältemittel und Treibgase eingesetzt werden. Andere Quellen werden als insgesamt weniger bedeutend angesehen¹⁹.

Kältemittel gelangen beim Befüllen, Betreiben und Entsorgen von Klimaanlage und Wärmepumpen in die Atmosphäre. Bereits seit den 1990er Jahren ersetzen

¹⁶ Die Wirkstoffe Flufenacet und Tritosulfuron sind seit dem 1. Juli 2025 in der Schweiz nicht mehr genehmigt, dürfen aber noch bis zum 01.01.2026 verkauft und bis zum 01.01.2027 bzw. bis zum 01.07.2026 verwendet werden (BLW, 2025b)

¹⁷ In Laborversuchen zum Abbau von Wirkstoffen im Boden wurde eine Bildungsrate von 81 % TFA aus Flufenacet nach 91 Tagen gefunden (EFSA, 2024), für Tritosulfuron waren es erst 34 % am Ende der Versuche nach 122 Tagen (EFSA, 2023).

¹⁸ Gemäss WMO (2011) beträgt die Bildungsrate von TFA aus trans-1,3,3,3-Tetrafluorpropen in der Atmosphäre < 10 %, bei einer in PSM verkauften Menge von ca. 1 Tonne (2023) Tetrafluorpropen also weniger als 0,1 Tonnen TFA.

¹⁹ Zum TFA-Bildungspotenzial von anderen Chemikaliengruppen, etwa Bioziden, Human- und Tierarzneimitteln oder in anderen Produkten eingesetzten fluorierten Chemikalien gibt es kaum Schätzungen. Bezüglich Emissionen von TFA in die Umwelt werden diese aber als weniger bedeutend betrachtet (UBA, 2021).

HFKW (teilweise fluoriierte Kohlenwasserstoffe) zunehmend die ozonschichtschädigenden FCKW (vollständig halogenierte Fluorchlorkohlenwasserstoffe). Seit 2015 kommen vermehrt sogenannte HFO-Kältemittel zum Einsatz (Behringer *et al.*, 2021; BAFU, 2024a). Sowohl HFKW wie auch HFO werden in der Atmosphäre unter Bildung von TFA abgebaut und gelangen mit dem Regen in den Wasserkreislauf. Im Vergleich zu HFKW werden die neueren HFO deutlich rascher abgebaut, entsprechend rascher und lokaler erfolgt auch die Bildung von TFA (Luecken *et al.*, 2010)²⁰. Mit dem vermehrten Einsatz von HFKW- und HFO-Kältemitteln wird in der Atmosphäre mehr TFA gebildet. Für Deutschland wurde für das Jahr 2020 die maximale TFA-Bildung aus Kältemitteln auf rund 2400 Tonnen TFA geschätzt, rund fünfmal grösser als das TFA-Bildungspotenzial der verkauften PSM (ca. 450–500 Tonnen für 2016–2019) (Behringer *et al.*, 2021 und Sturm *et al.*, 2023).

Für die Schweiz gibt es bisher noch keine Abschätzung für die (potenzielle) TFA-Bildung aus freigesetzten Kältemitteln. Berechnungen zur Deposition von TFA aus der Atmosphäre, ausgehend von TFA-Messungen in

Niederschlägen, ergeben für die Schweiz eine Menge von 24,5 Tonnen TFA, die pro Jahr – vorwiegend aus Kältemitteln – in die Umwelt gelangen (für 2021–2023, Henne *et al.*, 2025). Dies ist insgesamt gut doppelt so viel, wie potenziell beim Abbau von PSM-Wirkstoffen gebildet werden kann (siehe oben).

Wie gelangt TFA ins Grundwasser?

Einträge über Regen

Ein wichtiger Eintragsweg ins Grundwasser ist die Infiltration von TFA-belasteten Niederschlägen. In einer Studie der Empa und des BAFU wurden 2021–2023 in Regenproben von 14 Standorten in der Schweiz mittlere TFA-Konzentrationen von 0,3 bis rund 1 µg/L gemessen. Die daraus berechnete, mit Niederschlägen eingetragene TFA-Menge lag im Durchschnitt bei 5,9 Gramm pro Hektare und Jahr, wobei die Deposition südlich der Alpen am höchsten (12,8 g/ha/J in Locarno) und in den zentralen Alpen am tiefsten war (3,1 g/ha/J auf dem Jungfrauoch) (Henne *et al.*, 2025). Die in der Schweiz gemessenen TFA-Konzentrationen in Niederschlägen waren vergleichbar mit jenen in Süddeutschland in den Jahren 2018 und 2019, aber rund vier- bis fünfmal so hoch wie in den 1990er Jahren (Freeling *et al.*, 2020, Berg *et al.*, 2000). Diese Beobachtung wird mit dem zunehmenden Einsatz von fluoriierten Kältemitteln erklärt.

²⁰ HFO steht für Hydrofluorolefine. Zu den HFO-Kältemitteln gehören insbesondere R-1234ze (1,3,3,3-Tetrafluorpropen) und R-1234yf (2,3,3,3-Tetrafluorpropen). Weil sie in der Atmosphäre rascher abgebaut werden, weisen HFO ein deutlich geringeres Treibhauspotenzial auf als HFKW. Von den HFKW-Gasen trägt R-134a (1,1,1,2-Tetrafluorethan) am meisten zur TFA-Emission bei (Behringer *et al.*, 2021 und Henne *et al.*, 2025).

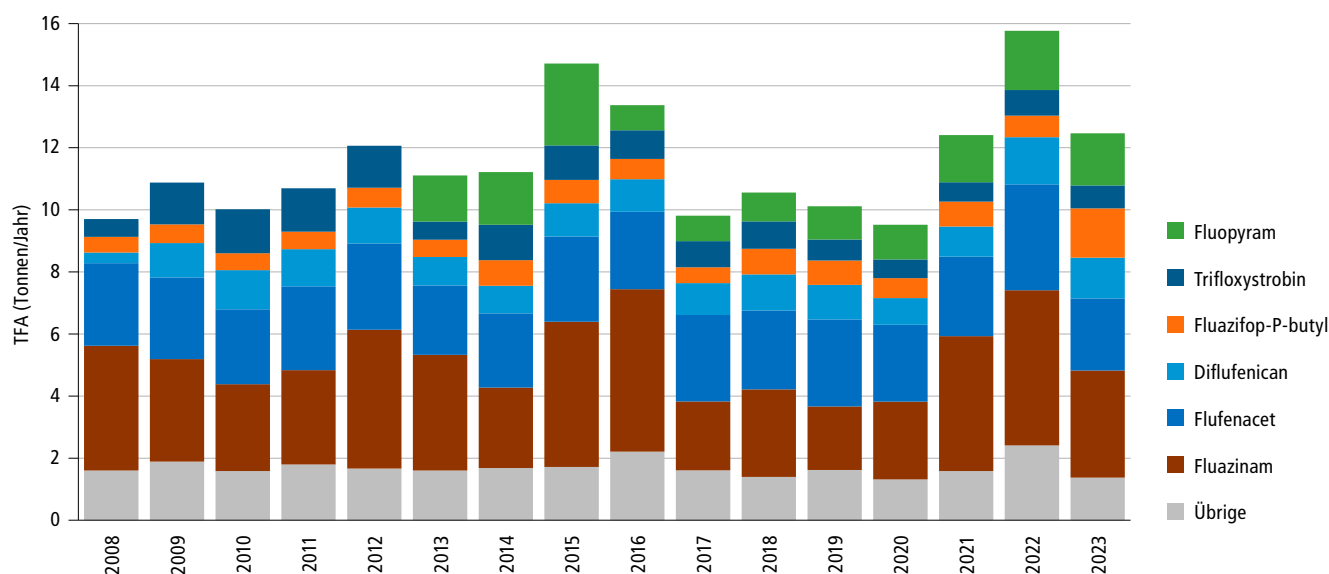


Abbildung 7 | Maximales TFA-Bildungspotenzial der in der Schweiz verkauften Pflanzenschutzmittelwirkstoffe für die Jahre 2008 bis 2023 in Tonnen pro Jahr. Dies unter Annahme, dass die C-CF₃-Einheiten in den Wirkstoffen vollständig in TFA umgesetzt werden. Nicht berücksichtigt in den Verkaufsmengen sind Saatbeizmittel, welche mit gebeiztem Saatgut importiert wurden.

Einträge durch Pflanzenschutzmittel

Während TFA über Niederschläge flächendeckend auf den Boden gelangt, werden Pflanzenschutzmittel gezielt in landwirtschaftlichen Kulturen ausgebracht. Dort wo PSM-Wirkstoffe eingesetzt werden, aus denen TFA entstehen kann, sind sie zweifellos eine Quelle für TFA im Grundwasser.

Einträge aus Punktquellen

Auch belastete Industrieabwässer oder Altlasten können zu TFA-Einträgen ins Grundwasser führen. Solche Punktquellen sind aber gemäss der NAQUA-Pilotstudie nur an vereinzelt Standorten von Bedeutung (BAFU 2025c).

Wie gross ist der Beitrag von PSM?

Bezogen auf die gesamte Fläche der Schweiz ist der Eintrag von TFA aus Kältemitteln über Niederschläge (24,5 Tonnen pro Jahr) bedeutender als die *potenziell* aus PSM gebildete Menge (11,5 Tonnen pro Jahr). Wie gross der jeweilige Anteil dieser beiden Eintragspfade an einzelnen Standorten im Grundwasser tatsächlich ist, hängt von weiteren Faktoren ab.

Von der Menge an TFA, die mit Niederschlägen im Zuströmbereich einer Grundwasserfassung deponiert wird, gelangt nur ein Teil auch ins Grundwasser, da nur ein Teil der Niederschläge in den Boden infiltriert und zur Grundwasserneubildung beiträgt, während der Rest über Bäche und Flüsse abgeführt wird. Pflanzenschutzmittel wiederum, werden nur auf einem Teil der Fläche im Zuströmbereich ausgebracht, wobei der Anteil der behandelten Fläche an der Gesamtfläche sehr unterschiedlich sein kann. Monitoringprogramme zeigen, dass TFA-Konzentrationen in Gebieten mit viel Ackerbau oder Spezialkulturen eher höher sind als in Regionen ohne Pflanzenbau. Dies gilt sowohl für die Schweiz als auch für Deutschland (BAFU, 2025c; Joerss *et al.* 2024; Sturm *et al.*, 2023). Es ist plausibel, dass PSM dort, wo sie eingesetzt werden, massgeblich zur TFA-Belastung des Grundwassers beitragen²¹. In der Schweiz sind dies jedoch meist Regionen, in welchen auch die TFA-Deposition aus der Atmosphäre eher höher ist.

Allerdings widerspiegeln die Konzentrationen im Grundwasser nicht die aktuelle Situation. Grundwasser erneuert sich oft nur sehr langsam und es kann Jahre dauern, bis auf Böden eingetragenes oder aus dem Abbau von PSM gebildetes TFA ins Grundwasser gelangt. Während sich das TFA-Bildungspotenzial der verkauften PSM über die letzten Jahre kaum verändert hat, haben die über Niederschläge deponierten Mengen deutlich zugenommen. Für eine fundierte Einschätzung des relativen Beitrags der beiden Eintragspfade wären wei-

tere Studien nötig. Zurzeit fehlen noch Daten zur Anwendung von PSM auf den jeweiligen Flächen, Daten zu TFA-Bildungsraten der meisten PSM-Wirkstoffe und Informationen zu den hydrogeologischen Eigenschaften der Grundwasserleiter.

Wie geht es weiter?

In der EU und in der Schweiz gibt es verschiedene Anstrengungen, Vorläufersubstanzen von TFA strenger zu regulieren. Die Verwendung von HFKW als Kältemittel wurde bereits eingeschränkt (BAFU, 2025a). Ein Entwurf zur Anpassung der Chemikaliengesetzgebung sieht eine Übernahme der EU-Regelungen für fluoriierte Gase²² vor. Damit sollen auch teilfluorisierte Treibgase (HFO-Gase) in Aerosolpackungen ab 2026 für den Privatgebrauch und ab 2030 vollständig verboten werden. Die Verwendung von HFO als Kältemittel soll ab 2027 eingeschränkt werden (BAFU, 2024b und 2024c)²³.

Im Rahmen der Neubeurteilung von PSM-Wirkstoffen wird der Bildung von TFA als Metabolit deutlich mehr Beachtung geschenkt als bisher. Dies dürfte mittelfristig zu Anwendungseinschränkungen oder Rückzügen von Wirkstoffen führen, die Vorläufer von TFA sind²⁴. In der EU wurde etwa die Genehmigung für den Wirkstoff Flufenacet nicht erneuert²⁵. Flufenacet ist ein TFA-Vorläufer mit vergleichsweise hohem Verkaufsvolumen. In der Schweiz darf Flufenacet nur noch bis Ende 2026 verwendet werden (BLV, 2025b).

In der TFA-Belastung des Grundwassers werden sich diese Anstrengungen erst mit zeitlicher Verzögerung widerspiegeln.

²¹ Wird das potenziell aus PSM gebildete TFA (durchschnittlich 11,5 Tonnen pro Jahr), auf die ganze Fläche der Schweiz (41 285 km²) verteilt, ergeben sich 2,8 g TFA pro Hektare und Jahr aus PSM. Wird aber die Fläche berücksichtigt, auf der die meisten PSM ausgebracht werden (landwirtschaftliche Nutzfläche ohne Kunst- und Naturwiesen und Weiden, ≈ 297 000 ha für 2021–2023), ergibt sich ein TFA-Bildungspotenzial von 39 g TFA/ha/J. (Flächennutzung gemäss Agrarbericht 2024: <https://www.agrarbericht.ch/de/produktion/pflanzliche-produktion/flaechennutzung>)

²² Verordnung (EU) Nr. 2024/573 über fluoriierte Treibhausgase (F-Gas-Verordnung), verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/573/oj/eng>

²³ Für aktuelle und geplante Anwendungsverbote und -einschränkungen für Kältemittel siehe auch Chemikalienrisikoreduktionsverordnung (ChemRRV, SR 814.81) und BAFU (2025d).

²⁴ Als erster EU-Mitgliedstaat widerrief Dänemark die Zulassung von 23 PSM-Produkten mit 6 Wirkstoffen, die Vorläufer von TFA sind. (Medienmitteilung der dänischen Umweltbehörde vom 7. Juli 2025: <https://mst.dk/nyheder/2025/juli/miljoestyrelsen-forbyder-23-pesticidmidler>).

²⁵ EU-Verordnung (2025): Durchführungsverordnung (EU) 2025/910 der Kommission vom 20. Mai 2025 zur Nichterneuerung der Genehmigung für den Wirkstoff Flufenacet gemäss der Verordnung (EG) Nr. 1107/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates und zur Änderung der Durchführungsverordnungen (EU) Nr. 540/2011 und (EU) 2015/408 der Kommission, verfügbar unter: https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_impl/2025/910/oj

Fazit

- Ist von «PFAS» die Rede, sind meist längerkettige, vollständig oder hoch fluorierte Alkylverbindungen gemeint. PSM, die in Europa und der Schweiz bewilligt waren oder sind, sind keine bedeutende Quelle für diese «klassischen» PFAS.
- Beistoffe, welche PFAS enthalten, werden in PSM sehr selten eingesetzt. In der Schweiz wurden von 2014 bis 2023 jährlich zwischen 1–6 kg PFAS-haltige Schaumhemmer und ca. 100–1000 kg fluorierte Treibgase mit PSM verkauft. Im Vergleich zu anderen Quellen sind diese Mengen von geringer Bedeutung.
- Die Definition von PFAS wurde im Laufe der letzten 20 Jahre mehrfach erweitert. Nach der neusten und sehr breiten Definition der OECD werden auch diverse in der Schweiz bewilligte PSM-Wirkstoffe zu den PFAS gezählt. Mitte 2025 waren es 20 Wirkstoffe. Davon sind 18 Wirkstoffe potenzielle Vorläufer von TFA. Die insgesamt verkaufte Menge von PFAS-Wirkstoffen lag bei rund 30 bis 45 Tonnen pro Jahr (2008 bis 2023).
- TFA ist eine der kleinsten, zu den PFAS zählenden Verbindungen. Sie entsteht insbesondere beim Abbau von anderen, in der Umwelt nicht-stabilen PFAS. Als Chemikaliengruppen mit dem mengenmässig höchsten Potenzial für die Bildung von TFA gelten fluorierte Kältemittel aus Klima- und Kühlanlagen, die freigesetzt und in der Atmosphäre zu TFA abgebaut werden, gefolgt von fluorierten PSM-Wirkstoffen, welche im Boden unter Bildung von TFA abgebaut werden.
- Das *maximale* TFA-Bildungspotenzial aus den in der Schweiz verkauften PSM-Wirkstoffen lag im Durchschnitt bei 11,5 Tonnen TFA pro Jahr. Die Deposition von TFA aus der Atmosphäre wird für die ganze Schweiz auf 24,5 Tonnen pro Jahr geschätzt, grösstenteils aus dem Abbau von fluorierten Kältemitteln.
- Während bei PSM bekannt ist, wie hoch die verkauften Mengen an PFAS sind und die maximal in der Umwelt gebildete Menge TFA relativ genau abgeschätzt werden kann, gibt es für andere Anwendungsbereiche noch kaum vergleichbare Informationen.
- TFA wird flächendeckend im Grund- und Trinkwasser nachgewiesen. Die Konzentrationen liegen im Bereich von einigen hundert Nanogramm bis wenigen Mikrogramm pro Liter. Welchen Anteil daran Kältemittel und PSM jeweils haben, variiert zwischen den Zuströmbereichen und hängt von verschiedenen Faktoren ab. Für fundierte Aussagen dazu wären weitere Studien nötig.

- Wie sich diese Belastungen auf die Umwelt und die menschliche Gesundheit auswirken, ist sowohl für die meisten «klassischen» PFAS wie auch für TFA noch nicht hinreichend geklärt. Von den zuständigen Behörden in der EU und in der Schweiz werden grosse Anstrengungen unternommen, diese Wissenslücken zu schliessen und die Regulierung weiterzuentwickeln. ■

Dank

Wir danken Henry Wöhrnschimmel (BAFU) für die Angaben und Hintergrundinformationen zu fluorierten Kältemitteln, TFA in Niederschlägen und zur Regulierung von PFAS im Chemikalienrecht und Miriam Reinhardt (BAFU) für die Bereitstellung der Messergebnisse von TFA aus dem NAQUA-Monitoringprogramm und Informationen dazu, sowie beiden für ihre Kommentare zu einer früheren Version des Manuskriptes. Katja Knauer (BLW) hat die PSM-Produktverkaufszahlen bereitgestellt, Eva Reinhard und Manuel Boss (beide Agroscope) haben mit ihren Rückmeldungen zur Entwicklung des Textes beigetragen. Vielen Dank dafür.

Abkürzungen

BAFU	Bundesamt für Umwelt (Schweiz)
BLV	Bundesamt für Lebensmittelsicherheit und Veterinärwesen (Schweiz)
BLW	Bundesamt für Landwirtschaft (Schweiz)
ECHA	European Chemicals Agency (Europäische Chemikalien Agentur)
EFSA	European Food Safety Authority (Europäische Behörde für Lebensmittelsicherheit)
Empa	Eidgenössische Materialprüfungsanstalt (das interdisziplinäre Forschungsinstitut des ETH-Bereichs für Materialwissenschaften und Technologie)
HFKW	Hydrofluorkohlenwasserstoffe (gesättigte, teilweise fluorierte Kohlenwasserstoffe)
HFO	Hydrofluorolefine (ungesättigte, teilweise fluorierte Kohlenwasserstoffe, werden auch als u-HFKW bezeichnet)
FCKW	Fluorchlorkohlenwasserstoffe (vollständig halogenierte Kohlenwasserstoffe)
NAQUA	Nationale Grundwasserbeobachtung (Schweiz)
PFAS	Per- and polyfluoroalkyl substances (per- und polyfluorierte Alkylverbindungen)
PFAS-4	Summe von PFOS, PFHxS, PFOA und PFNA
PFCA	Perfluorocarboxylic acids (Perfluorcarbonsäuren)
PFHxS	Perfluorohexane sulfonic acid (Perfluorhexansulfonsäure)
PFNA	Perfluorononanoic acid (Perfluorononansäure)
PFOA	Perfluorooctanoic acid (Perfluorooctansäure)
PFOS	Perfluorooctane sulfonic acid (Perfluorooctansulfonsäure)
PFSA	Perfluorosulfonic acids (Perfluorsulfonsäuren)
PSM	Pflanzenschutzmittel
TFA	Trifluoressigsäure, trifluoroacetic acid (Trifluoressigsäure)
TWI	Tolerable weekly intake (tolerierbare wöchentliche Aufnahme)

Literatur

- Alexandrino, D.A.M., Mucha, A.P., Almeida, C.M.R. & Carvalho, M.F. (2022). Atlas of the microbial degradation of fluorinated pesticides. *Critical Reviews in Biotechnology* [Review Article], 42(7), 991–1009. <https://doi.org/10.1080/07388551.2021.1977234>
- BAFU Bundesamt für Umwelt (2024a). Statistik der Anlagen mit Kältemitteln in der Schweiz: 1995–2022. Internetpublikation Stand Mai 2024. www.bafu.admin.ch/kaeltemittel
- BAFU Bundesamt für Umwelt (2024b). Erläuternder Bericht zur Änderung der Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung (ChemRRV; SR 814.81). Verordnungspaket Umwelt, Herbst 2025. Bericht 6. Dezember 2024. 30 pp. <https://www.news.admin.ch/de/nsb?id=103438>
- BAFU Bundesamt für Umwelt (2024c). Grafische Zusammenfassung der Regelungen zum Inverkehrbringen stationärer Anlagen mit Kältemitteln gemäss Entwurf einer Änderung der Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung (ChemRRV SR 814.81), Anhang 2.10 Ziffern 2.1 und 2.2 entsprechend Vernehmlassung vom 6. Dezember 2024. Vorgesehenes Inkrafttreten: 1. Januar 2027. Internetpublikation 05.12.2024. www.bafu.admin.ch/kaeltemittel
- BAFU Bundesamt für Umwelt (2025a). Übersicht über die wichtigsten Kältemittel. Internetpublikation, Stand Februar 2025. www.bafu.admin.ch/kaeltemittel
- BAFU Bundesamt für Umwelt (2025b). Website «PFAS im Grundwasser» www.bafu.admin.ch/naqua-pfas (zuletzt besucht am 16.09.2025)
- BAFU Bundesamt für Umwelt (2025c). Website «TFA im Grundwasser» www.bafu.admin.ch/naqua-tfa (zuletzt besucht am 16.09.2025)
- BAFU Bundesamt für Umwelt (2025d). Website «PFAS – was ist das?» www.bafu.admin.ch/pfas (zuletzt besucht am 16.09.2025)
- Behringer, D., Heydel, F., Gschrey, B., Osterheld, S., Schwarz, W., Warncke, K., Freeling, F., Nödler, K., Henne, S., Reimann, R., Bleep, M., Jörß, W., Liu, R., Ludig, S., Rüdenauer, I., Gartiser, S. (2021). Persistente Abbauprodukte halogener Kälte- und Treibmittel in der Umwelt: Art, Umweltkonzentrationen und Verbleib unter besonderer Berücksichtigung neuer halogener Ersatzstoffe mit kleinem Treibhauspotenzial. Abschlussbericht (im Auftrag des Umweltbundesamtes). Texte 36/2021, 268 pp. ISSN 1862-4804. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/persistente-abbauprodukte-halogener-kaelte>
- Berg, M., Müller, S.R., Mühlemann, J., Wiedmer, A. & Schwarzenbach, R.P. (2000). Concentrations and Mass Fluxes of Chloroacetic Acids and Trifluoroacetic Acid in Rain and Natural Waters in Switzerland. *Journal of Environmental Science and Technology*, 34(13), 2675–2683. <https://doi.org/10.1021/es990855f>
- BML Bundesministerium Land- und Forstwirtschaft, Regionen und Wasserwirtschaft (2022). Wassergüte in Österreich. Jahresbericht 2018–2020. Aktualisierte Version vom 20. Februar 2023, 240 pp. <https://www.bmluk.gv.at/themen/wasser/wasserqualitaet/jahresbericht-2018-2020.html>
- BLV Bundesamt für Lebensmittelsicherheit und Veterinärwesen (2025a). Website «Per- und polyfluorierte Alkylverbindungen (PFAS)» <https://www.blv.admin.ch/blv/de/home/lebensmittel-und-ernaehrung/lebensmittelsicherheit/stoffe-im-fokus/kontaminanten/per-und-polyfluorierte-alkylverbindungen-pfas.html> (zuletzt besucht am 13.08.2025)
- BLV Bundesamt für Lebensmittelsicherheit und Veterinärwesen (2025b). Website «Wirkstoffanpassungen»: <https://www.blv.admin.ch/blv/de/home/zulassung-pflanzenschutzmittel/anwendung-und-vollzug/wirkstoffanpassungen.html> (zuletzt besucht am 08.08.2025)
- BLW Bundesamt für Landwirtschaft (2025) BLW-Website «Verkaufsmengen der Pflanzenschutzmittel-Wirkstoffe» <https://www.blw.admin.ch/de/verkaufsmengen-der-pflanzenschutzmittel-wirkstoffe> (zuletzt besucht am 13.08.2025)
- Borchers, U., Beulker, C., Kämpfe, A., Knapp, H. & Sacher, F. (2022). PFAS im Trinkwasser: ein erster Überblick über Befunde und Herausforderungen für die Wasserversorgung. *Energie / Wasser-Praxis*, 22(9), 64–71. https://energie-wasser-praxis.de/wp-content/uploads/2023/05/ewp_0922_64-71_Borchers.pdf
- Buck, R.C., Korzeniowski, S.H., Laganis, E., & Adamsky, F. (2021). Identification and classification of commercially relevant per- and poly-fluoroalkyl substances (PFAS). *Integrated Environmental Assessment and Management*, 17(5), 1045–1055. <https://doi.org/10.1002/ieam.4450>
- Bundesministerium für Justiz (2023). Zweite Verordnung zur Novellierung der Trinkwasserverordnung vom 20. Juni 2023. *Bundesgesetzblatt*. Teil I, Nr. 159, 65 pp. <https://www.recht.bund.de/bgbli/1/2023/159/VO.html>
- EC European Commission (2020). Poly- and perfluoroalkyl substances (PFAS). Accompanying the document «Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Chemicals Strategy for Sustainability. Towards a Toxic-Free Environment.» Commission Staff Working Document SWD (2020), 249 final, 22 pp. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52020SC0249>
- ECHA European Chemicals Agency (2024). Progress update on the per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS restriction process). Internetpublikation 20. November 2024. https://echa.europa.eu/documents/10162/67348133/pfas_status_update_report_en.pdf
- EFSA European Food Safety Authority (2020). Risk to human health related to the presence of perfluoroalkyl substances in food. Scientific Opinion. *EFSA Journal* 18(9), 6223. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2020.6223>
- EFSA European Food Safety Authority (2023). Peer review of the pesticide risk assessment of the active substance tritosulfuron. Conclusion on pesticide peer review. *EFSA Journal* 21(8), 8142. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2023.8142>
- EFAS European Food Safety Authority (2024). Peer review of the pesticide risk assessment of the active substance flufenacet. Conclusion on pesticide peer review. *EFSA Journal* 22, e8997. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2024.8997>
- Freeling, T., Behringer, D., Heydel, F., Scheurer, M., Ternes, T.A. & Nödler, K. (2020). Trifluoroacetate in Precipitation: Deriving a Benchmark Data Set. *Journal of Environmental Science and Technology*. 54(18), 11210–11219. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c02910>
- Gaines, L.G.T. (2023). Historical and current usage of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS): A literature review. *American Journal of Industrial Medicine*, 66(5), 353–378. <https://doi.org/10.1002/ajim.23362>
- Glüge, J.; Scheringer, M., Cousins J.T., DeWitt, J.C., Goldenman, G., Herzke, D., Lohmann, R., Ng, C.A., Trieri, X. & Wang, Z. (2020). An overview of the uses of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS). *Environmental Science: Processes and Impacts*, 22(12), 2345–2373. <https://doi.org/10.1039/D0EM00291G>
- Henne, S., Storck, F.R., Wöhrnschimmel, H., Leuenberger, M., Vollmer, M.K. & Reimann, S. (2025). Trifluoroacetate (TFA) in Precipitation and Surface Waters in Switzerland: Trends, Source Attribution, and Budget. *EGUosphere* [preprint], <https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-2861>
- Jagani, R., Patel, H., Chovatiya, J. & Andra, S.S. (2025). The rise and risks of fluorinated pesticides: A call for comprehensive Research to address environmental and health concerns. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* [Viewpoint], 73, 2217–2220. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.4c12827>
- Jeschke, P. (2004). The Unique Role of Fluorine in the Design of Active Ingredients for Modern Crop Protection. *ChemBioChem* [Review Article], 2004(5), 570–589. <https://doi.org/10.1002/cbic.200300833>
- 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, 109061. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.109061>
- Kacan, S. (2023). PFAS – quo vadis? Warum werden PFAS reguliert?. Foliensatz UBA Umweltbundesamt. https://www.reach-clp-biozid-helpdesk.de/DE/REACH/Verfahren/Beschraenkungsverfahren/Deutsche_Vorschlaege/PFAS>Downloads
- Luecken, D., 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 Potential Greenhouse Gas Replacement. *Journal of Environmental Science and Technology*, 44(1), 343–348. <https://doi.org/10.1021/es902481f>

- Livsmedelsverket (2022). Livsmedelsverkets föreskrifter om dricksvatten. Utom från trycket den 15 december 2022. LIVSFS 2022:12. ISSN 16513533. <https://www.livsmedelsverket.se/om-oss/lagstiftning1/gallande-lagstiftning/livsfs-202212>
- Madronich, S.; Sulzberger, B., Longstreth, J.D., Schikowski, T., Sulbæk Andersen, M.P., Solomon, K.R. & Wilson, R.S. (2023). Changes in tropospheric air quality related to the protection of stratospheric ozone in a changing climate. *Photochemical & Photobiological Sciences*, 22, 1129–1176. <https://doi.org/10.1007/s43630-023-00369-6>
- Meermann, B., von der Au, M., Potrykus, A., Schramm, B., Obajdin, K., de Bruijne, E.A., Zotz, F. & Broneder C. (2024). Untersuchung des Vorkommens von PFAS (Per- und polyfluorierte Alkylverbindungen) in Abfallströmen. Abschlussbericht (im Auftrag des Umweltbundesamtes). *Texte 85/2024*, 188 pp. ISSN 1862-4804. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/untersuchung-des-vorkommens-von-pfas-per>
- Meier, S., Brodmann, P., Weber, S., Moschet, Ch., Kult, D., Gelmi, T., Lacour, W. & Steinmann, J. (2024). Trinkwasserqualität bezüglich der PFAS-Rückstände. Eine Kampagne der VKCS. *Aqua & Gas*, 2024(03), 22–27. https://www.aquaetgas.ch/wasser/trinkwasser/20240228_ag3_trinkwasserqualität-bezuglich-der-pfas-ruckstaende/
- Miljø- og Ligestillingsministeriet (2023). Bekendtgørelse om vandkvalitet og tilsyn med vandforsyningsanlæg. Retsinformation, BEK nr.1023 af 29/06/2023. Miljømin journal nr. 2023–5529. <https://www.retsinformation.dk/eli/ita/2023/1023>
- Miljø- og Ligestillingsministeriet. (2024). Bekendtgørelse om vandkvalitet og tilsyn med vandforsyningsanlæg. Retsinformation, BEK nr. 940 af 22/07/2024. Miljømin journal nr. 2024–1033. <https://www.retsinformation.dk/eli/ita/2024/940>
- OECD Organisation for Economic Co-operation and Development (2007). Lists of PFOS, PFAS, PFOA, PFCA, related compounds and chemicals that may degrade to PFCA (as revised in 2007), *Series of Risk Management No. 21. ENV/JM/MONO(2006)*, 15, 157 pp. [https://one.oecd.org/document/ENV/JM/MONO\(2006\)15/en/pdf](https://one.oecd.org/document/ENV/JM/MONO(2006)15/en/pdf)
- OECD Organisation for Economic Co-operation and Development (2018). Summary report on the new comprehensive global database of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFASs). *OECD Series on Risk Management of Chemicals, No.39*, OECD Publishing, Paris, 24 pp. <https://doi.org/10.1787/1a14ad6c-en>
- OECD Organisation for Economic Co-operation and Development (2021). Reconciling Terminology of the Universe of Per- and Polyfluoroalkyl Substances: Recommendations and Practical Guidance, *OECD Series on Risk Management, No. 61*, OECD Publishing, Paris, 45 pp. <https://doi.org/10.1787/e458e796-en>
- Poiger T., Baumgartner D. & Balmer M. E. (2025). Maximum formation potential of trifluoroacetic acid (TFA) calculated based on annual sales data for pesticide active ingredients in Switzerland from 2008 to 2023.(1.0) [Data set]. *Zenodo*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15497861>
- 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. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part B*, 19(7), 289–304. <https://doi.org/10.1080/10937404.2016.1175981>
- Sturm, S., Freeling, S., Brauer, S., 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 (im Auftrag des Umweltbundesamtes). *Texte 102/2023*, 80 pp. ISSN 1862-4804. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/trifluoracetat-tfa-grundlagen-fuer-eine-effektive>
- UBA Umwelt Bundesamt (2020a). Ableitung eines gesundheitlichen Leitwertes für Trifluoressigsäure (TFA). Internetpublikation, 6 pp. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/421/dokumente/ableitung_eines_gesundheitlichen_leitwertes_fuer_trifluoressigsaeure_fuer_uba-homepage.pdf
- UBA Umweltbundesamt. (2020b). Trifluoressigsäure (TFA) – Gewässerschutz im Spannungsfeld von toxikologischem Leitwert, Trinkwasserhygiene und Eintragsminimierung. Erläuterungen zur Einordnung des neuen Trinkwasserleitwerts von 60 µg/L. *Bericht*, 20. Oktober 2020. 8 pp. <https://webetox.uba.de/webETOX/public/basics/literatur.do?sessionId=8F0779FB7AF75C9F74B-09FFF4386D9E9?id=24808>
- UBA Umweltbundesamt. (2021). Chemikalieneintrag in Gewässer vermindern – Trifluoracetat (TFA) als persistente und mobile Substanz mit vielen Quellen. *Bericht* November 2021, 52 pp. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/chemikalieneintrag-in-gewaesser-vermindern>
- VKCS Verband der Kantonschemiker Schweiz. (2023). Auswertung VKCS-Kampagne PFAS in Trinkwasser 2023. Bericht 12. Oktober 2023. 24 pp. https://kantonschemiker.ch/wp-content/uploads/2023/10/20231013_d_Bericht_PFAS.pdf
- 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. & Leinala, E. (2021). A New OECD Definition for Per- and Polyfluoroalkyl Substances. [Scientific Opinion]. *Journal of Environmental Sciences and Technology*, 55(23), 15575–15578. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c06896>
- WMO World Meteorological Organization (2011). Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2010. *WMO Global Ozone Research and Monitoring Project*, Report No. 52. 442 pp. <https://library.wmo.int/doi/4/58952>