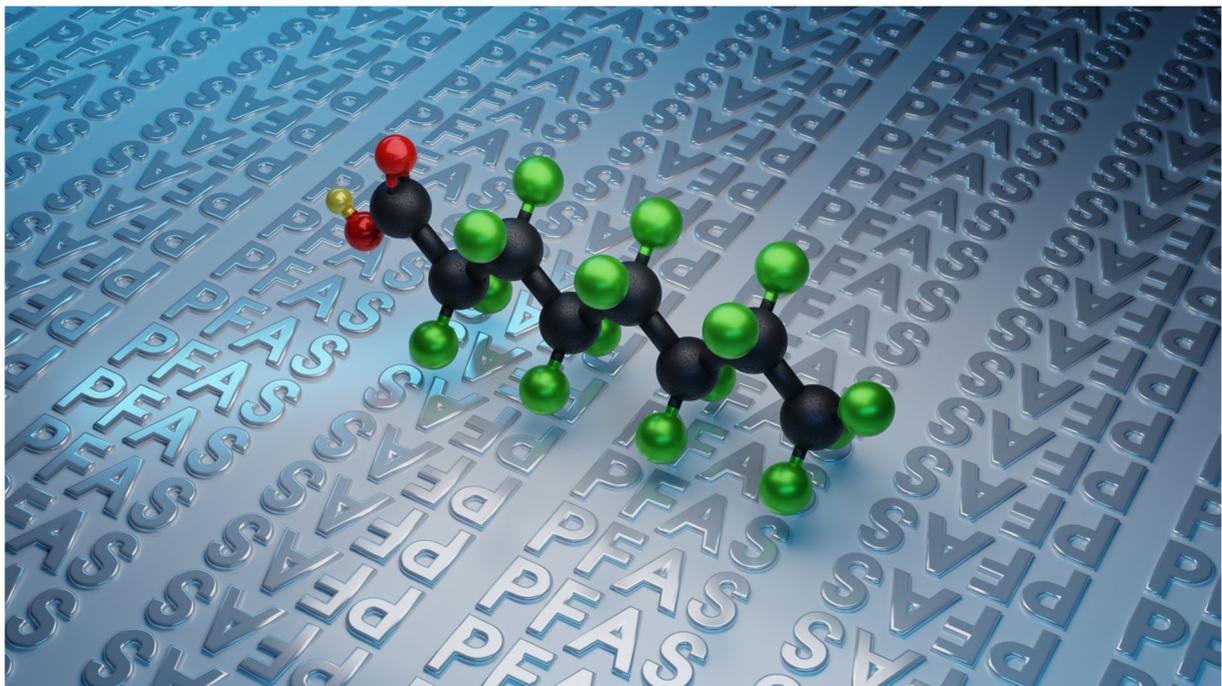


Projekt PFAS im Bereich Altlasten und Abfall

«Lösungsansätze für den Umgang mit PFAS-belasteten Standorten»

Ergebnisbericht der Altlasten- und Abfall-Arbeitsgruppen
BAFU-Kantone 2022/2023



Bern, 23. Oktober 2024

im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)

Impressum

Auftraggeber

Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abt. Abfall und Rohstoffe, Sektion Altlasten,
CH-3003 Bern

Auftragnehmer und Berichtsverfasser

Bernhold Hahn
Fachspezialist Altlasten
Ausserdorfstrasse 26
8052 Zürich
bernhold.hahn@gmx.ch

Begleitung BAFU

Monika Schwab-Wyssner	BAFU, Abt. Abfall und Rohstoffe (Projektleitung)
André Laube	BAFU, Abt. Abfall und Rohstoffe (Teilprojektleitung)
Rolf Kettler	BAFU, Abt. Abfall und Rohstoffe

Arbeitsgruppen im Rahmen des Projekts «PFAS im Bereich Altlasten»

Im Rahmen des Projekts «PFAS im Bereich Altlasten» haben folgende Arbeitsgruppen bei der Bearbeitung dieses Berichts mitgewirkt: Projekt-Fachausschuss, Arbeitsgruppe PFAS Altlasten sowie Arbeitsgruppe PFAS Abfall. Die Teilnehmer dieser Arbeitsgruppen sind nachfolgend genannt.

Hinweis

Dieser Bericht wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst.
Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

In diesem Ergebnisbericht sind die wesentlichen Lösungsansätze als Ergebnis der Diskussionen in den beiden Arbeitsgruppen Altlasten und Abfall sowie dem Fachausschuss dargestellt. Die Inhalte sind Vorschläge und Empfehlungen der Arbeitsgruppen und haben nicht denselben rechtlichen Stellenwert wie eine Vollzugshilfe des BAFU.

Dieser Ergebnisbericht widerspiegelt den Stand des Wissens Anfang 2024 mit den bisherigen Erfahrungen zum Umgang mit PFAS-belasteten Standorten und Abfällen. Er berücksichtigt aber auch die noch fehlende Erfahrung in verschiedenen abfall- und altlastenrechtlichen Bereichen.

Es sei zudem darauf hingewiesen, dass nicht bei allen Lösungsansätzen in den Arbeitsgruppen Einstimmigkeit herrschte, sondern es wurden teilweise auch abweichende Meinungen vertreten. Die hier dargestellten Lösungsansätze geben die Mehrheitsmeinung wieder. Bei hoher Relevanz wird auf die Minderheitsmeinung hingewiesen.

Begleitung Projekt-Fachausschuss

Mathieu Buchs	BAFU
Dörte Carstens	Kanton LU
Yves Degoumois	Kanton VS
Bettina Flury	Kanton ZH
Sebastien Fracheboud	Kanton VD
Bernhold Hahn	Externe Projektunterstützung
Rolf Kettler	BAFU
André Laube	BAFU
Michael Madliger	Kanton AG
Monika Schwab	BAFU (Projektleitung)
Christiane Wermeille	BAFU

Arbeitsgruppe PFAS Altlasten

Thomas Back	Kanton TG
Sybille Büsser	Kanton SG
Denise Bussien-Grosjean	Kanton VD
Nicolle Chollet	Kanton BE
Afifé El Korh	BAFU
François Gainon	Kanton NE
Carole Guggenheim	Kanton ZH
Bernhold Hahn	Externe Projektunterstützung
Rolf Kettler	BAFU
Monika Schwab	BAFU (Projektleitung und Leitung Arbeitsgruppe)
Matthias Stuhmann	Kanton BL
Murielle Voutaz	Kanton VS
Eva Zellmann	Kanton BS

Arbeitsgruppe PFAS Abfall

Bernhold Hahn	Externe Projektunterstützung
Julian Hügli	Kanton NW
Mario Karrer	Kanton NW
Rolf Kettler	BAFU
André Laube	BAFU (Leitung Arbeitsgruppe)
Thierry Pralong	Kanton VS
Nadine Schneider	Kanton ZH
David Schönbächler	Kanton AG
Mauro Togni	Kanton TI
Patrick Walser	Kanton TG

Inhalt

I. Allgemeiner Teil	7
1. Ausgangslage / Zielsetzung	7
2. Begriffe im Zusammenhang mit Boden und Untergrund	9
3. Konzentrationswert für PFAS nach Anhang Altlasten-Verordnung.....	9
4. VVEA-Grenzwerte für Feststoffe	10
5. Umfang des Analytikprogramms für PFAS	12
6. Feststoffproben – Gesamtgehalt oder VVEA-Eluat?	16
7. PFAS-Grundbelastung im Oberboden	19
8. PFAS-Belastungen im Unterboden sowie Untergrund	21
9. PFAS im Grundwasser.....	22
II. Altlastenrechtliche Aspekte	23
10. Entscheidungsbäume für den KbS-Eintrag	23
11. Abgrenzung von PFAS-belasteten Standorten im KbS	23
12. Priorisierung der Untersuchungen von Standorten mit PFAS-Verdacht.....	28
13. Untersuchungsstrategie im Rahmen der Technischen Untersuchung.....	30
14. Kriterien für die Löschung aus dem KbS.....	32
15. Dringlichkeit von Sanierungsmassnahmen	32
16. Sanierungen – Methoden und Massnahmen	33
17. Sicherung als Sanierungsmassnahme.....	34
18. Mögliche Kriterien für einen Sanierungsunterbruch.....	34
19. Bauvorhaben auf PFAS-belasteten Standorten.....	35
III. Abfallrechtliche Aspekte	36
<i>Situation PFAS-Belastung</i>	36
20. Ausgangslage hinsichtlich Abfallentsorgung	36
21. Vorläufige Kenntnisse über PFAS-Belastungen in Deponien	37
22. Konsequenzen der festgestellten PFAS-Belastungen für die Klassierung des Abfalls und die Entsorgungswege	38
<i>Behandlung</i>	40
23. Bodenwäsche	40
24. Thermische Behandlung und Verwertung.....	41
<i>Verwertung</i>	42
25. T-Wert und bedingte Verwertung.....	42
<i>Ablagerung</i>	43
26. Grenzwerte für die Ablagerung von Abfällen.....	43
27. Umgang mit nicht verwertbarem überschüssigem Boden.....	45
28. Vollzug bei Planung, Genehmigung, Begleitung.....	46

Anhänge

- Anhang 1: Notiz zur Herleitung eines Toxizitätsgewichteten PFAS-Summenwertes als Konzentrationswert nach Anhang 1 AltIV, Stand 22.04.2024**
- Anhang 2: Tabelle «Liste der relevanten Aktivitäten für 30 (+36) PFAS-Stoffe», Stand 29.8.2023**
- Anhang 3: Expertenbericht «Hilfestellungen für den Eintrag in den Kataster der belasteten Standorte (KbS)», Magma AG, vom 30.01.2023**
- Anhang 4: Zusammenfassung «Sanierung von PFAS-kontaminierten Standorten», Stand 04.08.2023**
- Anhang 5: Notiz zur Herleitung eines PFAS-Summenwertes als Grenzwert nach VVEA für die Ablagerung von Abfällen, Stand 20.8.2024**

I. Allgemeiner Teil

1. Ausgangslage / Zielsetzung

PFAS (poly- und perfluorierte Alkylverbindungen) sind seit einigen Jahren stark in den Fokus von Forschung, Behörden, KonsumentInnen, Politik sowie den Medien gerückt. So praktisch ihre wasser-, fett- und schmutzabweisenden Eigenschaften in zahlreichen Anwendungen (Outdoor-Bekleidung, Feuerlöschschäume, Lebensmittelverpackungen, Teflonbeschichtungen etc.) sind, so problematisch ist ihre chemische und thermische Stabilität in der Umwelt. Sie werden aufgrund ihrer Persistenz auch als «forever chemicals» bezeichnet. Sie sind inzwischen ubiquitär in allen Umweltmedien nachweisbar, wobei auf belasteten Standorten mitunter hohe PFAS-Konzentrationen gemessen werden. In Kombination mit ihrer erheblichen Toxizität sind sie als «Emerging Contaminants» zur grossen Herausforderung geworden. Studien in EU-Ländern haben gezeigt, dass viele Menschen PFAS-Konzentrationen ausgesetzt sind, die über den von der europäischen Lebensmittelsicherheitsbehörde (EFSA) empfohlenen Referenzwerten liegen.

Das BAFU hat sich zusammen mit den Kantonen seit 2019 dem Thema PFAS gewidmet, unter anderem im Projekt «PFAS und belastete Standorte in der Schweiz». Die Arbeiten wurden von einer Begleitgruppe bestehend aus Vertretern und Vertreterinnen der Altlastenfachstellen verschiedener Kantone begleitet. In diesem Rahmen wurden Grundwasserproben im (weiteren) Abstrombereich von ca. 30 Standorten untersucht, die möglicherweise PFAS eingesetzt haben. Dabei wurden teilweise hohe PFAS-Konzentrationen festgestellt. In Anlehnung an deutsche Arbeitshilfen wurden Grundlagen zum Umweltverhalten, der Toxikologie, der Analytik und dem Einsatz von PFAS zusammengetragen sowie erste Ansätze zu Kriterien für den Eintrag in den Kataster der belasteten Standorte (KbS), für Beurteilungswerte, die Untersuchungsstrategie und die Sanierungsverfahren erarbeitet. Diese technischen Grundlagen sind im Bericht **«Entscheidungsgrundlagen für den Vollzug bei PFAS-belasteten Standorten in der Schweiz»**¹ der Arcadis Schweiz AG vom Juli 2021 publiziert, welcher eine wesentliche Grundlage für diesen Ergebnisbericht bildet.

Mit dem im Jahr **2022 gestarteten Projekt «PFAS im Bereich Altlasten und Abfall»** wurden Lösungen bzw. Lösungsansätze für den Umgang mit PFAS-belasteten Standorten entwickelt. Ziel des Projektes war die Entwicklung von vollzugstauglichen Instrumenten in den Bereichen Untersuchung, Beurteilung und Sanierung von PFAS-belasteten Standorten sowie für den Bereich Entsorgung PFAS-haltiger Abfälle. Die gesetzlichen Rahmenbedingungen sind durch das Umweltschutzgesetz (USG), das Gewässerschutzgesetz (GSchG), die Altlasten-Verordnung (AltIV), die Abfallverordnung (VVEA) sowie die Verordnung über die Abgabe zur Sanierung von Altlasten (VASA) vorgegeben. Es soll sichergestellt werden, dass belastete Standorte saniert werden, wenn sie zu schädlichen oder lästigen Einwirkungen führen. Zudem sollen Abfälle aus der Sanierung von Altlasten und von Bauvorhaben auf belasteten Standorten umweltverträglich entsorgt werden.

Dazu wurden zwei Arbeitsgruppen mit Vertretern und Vertreterinnen von BAFU sowie kantonalen Altlasten- und Abfallfachstellen gebildet:

- Arbeitsgruppe PFAS Altlasten
- Arbeitsgruppe PFAS Abfall

¹ <https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/altlasten/externe-studien-berichte/expertenbericht-pfas.pdf.download.pdf/entscheidungsgrundlagen-vollzug-PFAS-belastete-standorte.pdf>

Die Zusammensetzung dieser Arbeitsgruppen wurde von der Konferenz der Vorsteher der Umweltschutzämter KVV bzw. dem Cercle Déchets konstituiert und ist im Vorspann ersichtlich.

Übergeordnet wurde ein Fachausschuss mit Vertretern und Vertreterinnen verschiedener Kantone zur Diskussion und Überprüfung der in den Arbeitsgruppen erarbeiteten Vorschläge eingesetzt.

Zur Vorbereitung der wesentlichen Thematiken in den beiden Arbeitsgruppen sowie zur Festigung eines gemeinsamen Verständnisses für die altlastenrechtlichen und abfallrechtlichen Fragestellungen erfolgte im März 2022 ein gemeinsamer Workshop mit den Teilnehmenden der beiden PFAS-Arbeitsgruppen sowie dem Fachausschuss.

2. Begriffe im Zusammenhang mit Boden und Untergrund

- A-Horizont: Oberboden,
Humus: oberste Schicht, in der Regel meist ca. 20 bis 30 cm mächtig
- B-Horizont: Unterboden,
unter dem Oberboden liegend, meist ca. 30 bis 70 cm mächtig
- C-Horizont: Mineralischer Untergrund
- Boden: A- und B-Horizont
Oberste, unversiegelte Erdschicht, in der Pflanzen wachsen können (Art. 7 Abs. 4^{bis} USG)
- Aushub: Aushub- und Ausbruchmaterial gemäss Art. 3 Bst. f VVEA,
Material, das bei Bauarbeiten ausgehoben respektive ausgebrochen wird.

Die Unterscheidung der Horizonte entspricht der Beschreibung in Abbildung 1 der BAFU-Vollzugshilfe «Beurteilung von Boden im Hinblick auf seine Verwertung²».



3. Konzentrationswert für PFAS nach Anhang 1 Altlasten-Verordnung

Hinweis: detaillierte Informationen zur Herleitung eines Konzentrationswertes gemäss AltIV für PFAS sind in der separaten Notiz vom 22.04.2024 «Herleitung eines toxizitätsgewichteten PFAS-Summenwert als Konzentrationswert nach Anhang 1 AltIV» des BAFU enthalten. Diese Notiz ist dem Ergebnisbericht als Anhang 1 angefügt. Nachfolgend sind deshalb nur die wichtigsten Aspekte aufgeführt.

Die Altlasten-Verordnung enthält derzeit keine Konzentrationswerte für die Stoffgruppe der PFAS. Gemäss Anh. 1 Abs. 1 AltIV gilt: «Sind für Stoffe, die Gewässer verunreinigen können und mit denen

² <https://www.bafu.admin.ch/uv-2112-d>

ein Standort belastet ist, keine Konzentrationswerte festgelegt, so legt die Behörde solche mit Zustimmung des BAFU im Einzelfall nach den Vorschriften der Gewässerschutzgesetzgebung fest.» Auf Grund des zunehmenden Handlungsbedarfs hat das BAFU – unter Berücksichtigung des aktuellen Stands der Erkenntnisse – einen toxizitätsgewichteten PFAS-Summenwert hergeleitet, welcher zur altlastenrechtlichen Beurteilung herangezogen werden kann. Da dieser Wert derzeit nicht in der AltIV aufgeführt ist, muss er standortspezifisch von der zuständigen Behörde – sowie mit Zustimmung des BAFU – angeordnet werden.

Zur altlastenrechtlichen Klassierung für die Schutzgüter Grundwasser und Oberflächengewässer wird derzeit der toxizitätsgewichtete Summenwert (TEQ-Summenwert) von mindestens^(*) 9 definierten PFAS-Einzelstoffen herangezogen:

derzeitiger Konzentrationswert: 50 ng TEQ / l

(PFBA, PFPeA, PFHxA, PFHpA, PFOA, PFNA, PFBS, PFHxS und PFOS)

(*): falls zusätzliche PFAS-Einzelstoffe gemessen werden, sind diese im Summenwert zu berücksichtigen. Zum Umfang des Analytikprogramms siehe Kapitel 5.

Nach derzeitigem Kenntnisstand handelt es sich dabei um diejenigen PFAS, welche am häufigsten und in messbaren Konzentrationen auftreten, so dass damit die meisten PFAS-Standorte erfasst und klassiert werden können. Für diese 9 PFAS-Einzelstoffe wurden die entsprechenden Toxizitätsäquivalenzfaktoren zur Gewichtung bestimmt. Weitere Details zu diesen 9 PFAS-Einzelstoffen und den zugehörigen Toxizitätsäquivalenzfaktoren (TEF) sind in der oben erwähnten Notiz des BAFU vom 22.04.2024, welche als Anhang 1 angefügt ist, enthalten.

Die aktuelle Bestimmungsgrenze für die oben genannten PFAS-Einzelstoffe beträgt 1 ng/l. Dabei handelt es sich um den ungewichteten Messwert ohne Multiplikation mit dem entsprechenden Toxizitätsäquivalenzfaktor. Für andere PFAS sollte ebenfalls diese Bestimmungsgrenze angestrebt werden. Wenn sachlich begründet werden kann, dass sich diese Bestimmungsgrenze für einzelne PFAS nicht erreichen lässt, kann einzelfallweise eine höhere Bestimmungsgrenze zugelassen werden. Allfällige Messwerte unterhalb dieser Bestimmungsgrenze fliessen als Nullwerte in die Summenberechnung ein.

Zur Messmethodik wird auf die Vollzugshilfe des BAFU «Messmethoden im Abfall- und Altlastenbereich - Stand 2022» verwiesen.

4. VVEA-Grenzwerte für Feststoffe

Hinweis: In diesem Kapitel sind die wichtigsten Grundsätze aufgeführt, welche bei der Anwendung von Feststoff-Grenzwerten bei PFAS zu berücksichtigen sind. Detaillierte Informationen zur Herleitung respektive Festlegung der abfallrechtlichen Grenzwerte, welche momentan in der Praxis Anwendung finden, sind im Anhang 5 sowie im Kapitel 26 ersichtlich.

Feststoffwert als ungewichteter Summenwert

In der Regel wird bei Grenzwerten die Einzelstoffbeurteilung angewandt. Da PFAS eine Vielzahl von Einzelstoffen umfassen und für etliche noch keine bewertenden Grundlagendaten vorliegen, ist eine

entsprechende Einzelstoffbeurteilung für PFAS wenig geeignet, weshalb mit Summenwerten gearbeitet wird. Im Vergleich zum Konzentrationswert nach AltIV handelt es sich bei den im Folgenden diskutierten Feststoffgrenzwerten um PFAS-Summenwerte, welche aus den ungewichteten PFAS-Einzelwerten bestehen, ohne Berücksichtigung der unterschiedlichen Toxizitäten der PFAS-Einzelstoffe. Wenn man die Toxizität beim Feststoff-Summenwert berücksichtigen wollte, müsste man neben den Toxizitätsfaktoren zusätzlich auch die Adsorptionseigenschaft jedes Einzelstoffes und die standort-spezifischen Matrixeigenschaften mit einrechnen, denn diese beeinflussen ebenfalls die Freisetzung der PFAS und damit die Gesamtoxizität des PFAS-haltigen Abfalls. Da die Erstellung dieser Datengrundlage enorm aufwändig wäre, ist dies in der Praxis nicht vollziehbar. Zudem bestehen derzeit noch Wissenslücken zum genauen Verhalten der einzelnen PFAS im Untergrund. Dennoch kann man vereinfachend festhalten, dass Toxizität und Sorption der einzelnen PFAS stark korrelieren, d.h. weil die langkettigen PFAS sowohl im Körper stärker akkumulieren als auch stärker sorbieren, sind sie zwar toxischer, sie werden jedoch auch schlechter ausgewaschen. Somit gleichen sich die Effekte zu einem gewissen Grad aus. Deshalb ist es im Sinne der Umweltgefährdung und der Praktikabilität vertretbar, bei den Feststoffgrenzwerten auf die absolute, toxikologisch ungewichtete PFAS-Konzentration abzustellen.

Der Summenwert für Feststoffe umfasst im Minimum die gleichen 9 PFAS-Einzelstoffe, welche auch für den Konzentrationswert AltIV herangezogen werden:

Feststoffwert für PFAS:

- **Summenwert von mindestens 9 PFAS-Einzelstoffe (PFBA, PFPeA, PFHxA, PFHpA, PFOA, PFNA, PFBS, PFHxS und PFOS).**
- **Falls zusätzliche PFAS-Einzelstoffe detektiert werden, fliessen diese in den Summenwert mit ein.**

Hinweis: Betrachtungen zum Umfang bzw. zur Erweiterung des Analytikprogramms sowie zur möglichen Anwendung von Eluat-Untersuchungen finden sich in den nachfolgenden Kapiteln 5 und 6. Zur Messmethodik wird auf die Vollzugshilfe des BAFU «Messmethoden im Abfall- und Altlastenbereich - Stand 2022» verwiesen.

Analytische Bestimmungsgrenze für PFAS in Feststoffproben und ihre Anwendung zur Beurteilung

Die analytische Feststoff-Bestimmungsgrenze für die neun PFAS-Einzelstoffe beträgt gemäss aktuellem Stand 0.1 µg/kg. In Einzelfällen können höhere Bestimmungsgrenzen für einzelne Stoffe zugelassen werden, wenn sich sachlich begründen lässt, warum die 0.1 µg/kg nicht erreicht werden können.

PFAS sind keine natürlich vorkommenden Stoffe, sondern anthropogen, das heisst sie existieren in der Umwelt nicht, sondern gelangen erst durch menschliche Tätigkeiten in die Umwelt. Sie dürfen somit per Definition in unverschmutzten Abfällen nicht vorkommen (siehe auch BAFU-Vollzugshilfe «Herleitung von Konzentrationswerten und Feststoff-Grenzwerten³»). Damit entspricht die Bestimmungsgrenze dem Grenzwert für unverschmutztes Aushubmaterial.

- **U-Wert (= Grenzwert für unverschmutztes Aushubmaterial nach Anh. 3 Ziff. 1 VVEA):
Aktuell existiert für PFAS noch kein U-Wert in der VVEA. Gemäss üblicher Anwendung für chemische Schadstoffe anthropogenen Ursprungs entspricht der U-Wert der Bestimmungsgrenze pro PFAS-Einzelstoff und beträgt 0.1 µg/kg.**

³ www.bafu.admin.ch/uv-1333-d

Weitere abfallrechtliche Grenzwerte gemäss VVEA

Für PFAS sind noch keine Grenzwerte auf Verordnungsebene festgelegt. Deswegen ist die Zustimmung des BAFU zu Grenzwerten im Einzelfall nach Anhang 3 Ziffer 3 und Anhang 5 Ziffer 6 VVEA erforderlich. Dies betrifft folgende Werte:

- T-Wert: Grenzwert für schwach (tolerierbar) verschmutztes Aushubmaterial nach Anh. 3 Ziff. 2 VVEA
- B-Wert: Grenzwert für Material zur Ablagerung auf Deponien des Typs B nach Anh. 5 Ziff. 2.3 VVEA
- E-Wert: Grenzwert für Material zur Ablagerung auf Deponien des Typs E nach Anh. 5 Ziff. 5.2 VVEA

Zur Herleitung dieser Werte werden üblicherweise der Konzentrationswert nach AltIV sowie die generelle Mobilität des Schadstoffs in der Abfallmatrix herangezogen. Bei PFAS ist dies problematisch, weil einerseits Summenwerte verwendet werden (im Fall des Konzentrationswertes AltIV zusätzlich toxizitätsgewichtet), welche eine unterschiedliche Zusammensetzung aufweisen können. Andererseits ist an dieser Stelle die hohe ubiquitäre – anthropogen bedingte – Grundbelastung im Oberboden zu berücksichtigen, welche im Kapitel 7 detailliert betrachtet wird. Des Weiteren gelten für PFAS die Massnahmen zur Verringerung oder Verhinderung der Freisetzung aus Abfällen gemäss POP-Konvention (SR 0.814.03). Schliesslich existieren derzeit auch noch keine bodenschutzrechtlichen Richt- und Prüfwerte für PFAS, welche die Beurteilung der Verwertung von Boden zulassen.

Deswegen können die abfallrechtlichen Grenzwerte für PFAS nicht alleine auf die toxikologische Gefährdungsabschätzung abstellen, sondern müssen auch die technische Machbarkeit, die Vollziehbarkeit, das Vorkommen in verschiedenen Abfallströmen sowie die Grundbelastung des Oberbodens berücksichtigen.

Bis zu einer definitiven Festlegung und Aufnahme in die VVEA erfordert die Anwendung von abfallrechtlichen Grenzwerten eine Zustimmung des BAFU im Einzelfall. Aktuell empfiehlt das BAFU folgende Werte zu verwenden:

- **T-Wert: 2.5 µg/kg (ungewichtete Σ PFAS)**
- **B-Wert: 5.0 µg/kg (ungewichtete Σ PFAS)**
- **E-Wert: 5.0 µg/kg (ungewichtete Σ PFAS)**

Werte, denen das BAFU zugestimmt hat, haben für den betreffenden Standort denselben rechtlichen Stellenwert wie ein Wert, der in einer Verordnung aufgeführt ist. Der von der Behörde angeordnete Wert ist für den entsprechenden Einzelfall rechtlich verbindlich.

Eine detaillierte Betrachtung zur Herleitung dieser momentanen Praxis sowie den daraus entstehenden Konsequenzen findet sich in Kapitel 26. Dort ist auch beschrieben, dass die Mehrheit der Arbeitsgruppe tiefere Werte für T- und B-Qualität befürwortet.

5. Umfang des Analytikprogramms für PFAS

«Minimalprogramm 9 Einzel-PFAS»

Zur altlastenrechtlichen Klassierung für die Schutzgüter Grundwasser und Oberflächengewässer wird gemäss Kapitel 3 der **toxizitätsgewichtete Summenwert (TEQ-Summenwert) von 9 PFAS-Einstoffen herangezogen (PFBA, PFPeA, PFHxA, PFHpA, PFOA, PFNA, PFBS, PFHxS und PFOS)**. Nach derzei-

tigem Kenntnisstand handelt es sich dabei um diejenigen PFAS, welche am häufigsten und in messbaren Konzentrationen auftreten, so dass damit die meisten PFAS-Standorte erfasst und klassiert werden können. Für diese 9 Einzel-PFAS wurden die entsprechenden Toxizitätsäquivalenzfaktoren (TEF) zur Gewichtung bestimmt. Diese 9 Einzelparameter werden nachfolgend als «Minimalprogramm» bezeichnet. Für die Beurteilung von Feststoffproben ist als Minimalprogramm ebenfalls der Summenwert dieser 9 PFAS-Einzelstoffe heranzuziehen, allerdings ohne Toxizitätsgewichtung (vgl. Kap. 4).

Erweiterung des Minimalprogramms

Historische Abklärungen lassen unter Umständen vermuten, dass am Standort noch weitere PFAS z.B. in Form von Vorläuferverbindungen oder aus speziellen Anwendungen vorkommen könnten. In solchen Fällen ist das Messprogramm entsprechend zu erweitern und die fraglichen Stoffe sind auch in den PFAS-Summenwert mit aufzunehmen. Mittels einer umfassenden Literaturrecherche wurde eine Übersicht über die wichtigsten, in den jeweiligen Branchen/Prozessen verwendeten und nachgewiesenen PFAS-Einzelstoffe geschaffen. Diese Tabelle **«Liste der relevanten Aktivitäten für 30 (+36) PFAS-Stoffe»**, Stand **29.8.2023**, ist als Anhang 2 integriert. Mit dieser Liste ist bei entsprechenden Verdachtsmomenten das Minimalprogramm zu erweitern.

«Vollprogramm» gemäss Angebot von Analytiklaboren

Für eine umfassende Abklärung der Situation bzw. bei Unsicherheiten über den PFAS-Einsatz ist auch ein «Vollprogramm» möglich, mit welchem sowohl der Standortinhaber als auch die zuständige Vollzugsbehörde eine noch grössere Sicherheit erhalten. Für solch ein Vollprogramm können die von den Analytiklaboren angebotenen PFAS-Untersuchungsprogramme herangezogen werden, welche derzeit in der Schweiz bis zu 40 Einzelstoffe umfassen (Stand 2024). Auf Grund erster Erfahrungen wird empfohlen, in diesen «Vollprogrammen» die Einzelstoffe Capstone A/B, ADONA, 6:2-FTS, 8:2-FTS sowie GEN-X zu ergänzen, sofern diese dort fehlen, aber vom betreffenden Labor gemessen werden können.

Aufgrund fehlender toxikologischer Grundlagendaten existieren allerdings nur für einige wenige PFAS entsprechende Toxizitätsäquivalenzfaktoren. Das BAFU hat für alle bis anhin in der Schweiz in relevanten Konzentrationen gemessenen PFAS-Einzelstoffe die Toxizitätsäquivalenzfaktoren auf seiner Webseite publiziert⁴. Werden für eine altlastenrechtliche Beurteilung der Schutzgüter Grundwasser und Oberflächengewässer weitere Toxizitätsäquivalenzfaktoren benötigt, ist von einer Fachperson zu prüfen, ob sich mit ausreichender Zuverlässigkeit solche Faktoren ableiten lassen. Hierzu gibt es verschiedene Methoden. Ein Vorgehensansatz besteht beispielsweise darin, gestützt auf strukturverwandte Verbindungen mit bekannter Toxizität und Toxikokinetik zu versuchen, die Eigenschaften des Zielstoffs vorherzusagen (sogenannter Read-Across). Die daraus hergeleiteten Toxizitätsäquivalenzfaktoren werden dann dem BAFU im Rahmen der Genehmigung des Konzentrationswertes zur Zustimmung vorgelegt. Die genehmigten Werte werden vom BAFU gesammelt und den Vollzugsbehörden auf der vorangehend erwähnten BAFU-Webseite zur Verfügung gestellt.

⁴ <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/altlasten/fachinformationen/altlastenbearbeitung.html> > Konzentrationswerte. Die Toxizitätsäquivalenzfaktoren sind auch im Anhang 1 «BAFU-Notiz vom 22.04.2024 zum AltIV-Konzentrationswert» aufgeführt.

Entscheidung Umfang Analytikprogramm durch die kantonale Vollzugsbehörde

Die zuständige kantonale Vollzugsbehörde entscheidet über die Durchführung des Minimalprogramms, eines erweiterten Programms oder eines Vollprogramms. Dazu gibt es verschiedene Vorgehensweisen. Diese sind nachfolgend aufgeführt und stellen eine Empfehlung im Sinne einer Hilfestellung dar:

- 1. Grundsätzlich soll immer mindestens das Minimalprogramm mit den vom BAFU empfohlenen 9 PFAS-Einzelsubstanzen (mit bekannten Toxizitätsäquivalenzfaktoren) untersucht werden.**
- 2. Wenn die Historische Untersuchung Hinweise auf zusätzliche relevante PFAS ergibt, sind diese entsprechend in das Untersuchungsprogramm aufzunehmen. Dazu kann die Excel-Tabelle «Liste der relevanten Aktivitäten für 30 (+36) PFAS-Stoffe» Hilfestellung bieten (Anhang 2). Für eine altlastenrechtliche Beurteilung sind dann die entsprechenden Toxizitätsäquivalenzfaktoren mit einzurechnen.**
- 3. Für eine umfassende Kenntnis möglicher PFAS-Belastungen am Standort kann auch ein «Vollprogramm» durchgeführt werden (möglicher Umfang siehe oben).**

Für die Anwendung der erweiterten Untersuchungen bestehen folgende Möglichkeiten:

- 4. Bei nicht gesicherten spezifischen Verdachtsmomenten kann in einer ersten Untersuchungskampagne ein Vollprogramm untersucht werden. Je nach Resultat wird dann der Analysenumfang in der zweiten Runde reduziert (bis mindestens Minimalprogramm). Für die Durchführung eines erweiterten Untersuchungsprogramms oder Vollprogramms in der Anfangsphase spricht einerseits der Erkenntnisgewinn. Andererseits geben die Resultate dem Standortinhaber die Sicherheit, dass PFAS, welche möglicherweise – mit zunehmender Erfahrung – zukünftig als relevant erachtet werden, bereits untersucht wurden.**
- 5. Dieses Vorgehen kann auch nur auf einzelne, ausgewählte Proben angewandt werden (Reduktion der Kosten).**
- 6. Umgekehrt kann bei geringeren Verdachtsmomenten (z.B. Betriebe mit nicht gesichertem PFAS-Einsatz, bereits untersuchte Standorte, Erfahrungen bei bestimmten Prozessen etc.) der Untersuchungsumfang der Voruntersuchung auf das Minimalprogramm begrenzt werden.
Falls PFAS-Belastungen gefunden werden, kann das Untersuchungsprogramm in der Detailuntersuchung gemäss den vorliegenden Verdachtsmomenten erweitert werden.**

Anpassung durch fortlaufenden Erkenntnisgewinn

Wenn in den nächsten Jahren die Erkenntnisse aus den Untersuchungen der PFAS-Standorte darauf hinweisen, dass einzelne zusätzliche PFAS eine so hohe Bedeutung besitzen, dass sie grundsätzlich in das Minimalprogramm aufgenommen werden sollten, wird das BAFU den Umfang des Minimalprogramms entsprechend anpassen.

Bedeutung und Anwendung des TOP-Assay

Der TOP-Assay (engl.: Total Oxidizable Precursor) ist eine Labormethode, die (unbekannte) Vorläuferverbindungen von PFAS oxidativ in Perfluorcarbonsäuren (PFCA) umwandelt. Die PFCA sind Endprodukte der Oxidation und können dann massenspektrometrisch (LC-MS/MS) quantifiziert werden. Mit einem Vergleich der unbehandelten und behandelten Probe lässt sich (semiquantitativ) die vorhandene Konzentration an Vorläuferverbindungen ermitteln.

Wenn der Top Assay im Rahmen einer Voruntersuchung nach Art. 7 AltIV zeigt, dass am Standort mit einer «grossen Menge» an unbekanntem Vorläuferverbindungen (engl. «Precursor») bzw. anderen in der Einzelstoffanalytik nicht quantifizierten PFAS zu rechnen ist, ist der Standort vor der definitiven Klassierung weiter zu untersuchen. Auf Grund noch nicht ausreichender Erfahrungen bei komplexen PFAS-Belastungen kann bis auf Weiteres folgende Faustregel angewendet werden:

Die «grosse Menge» an unbekanntem Vorläuferverbindungen ist dann relevant, wenn die Summe der nach der Oxidation neu hinzugekommenen Carbonsäuren doppelt so gross ist wie die Summe der vor der Oxidation als Einzelstoffe gemessenen Sulfon- und Carbonsäuren (PFSA und PFCA) und Vorläuferverbindungen (Precursor).

Als Formel ausgedrückt:

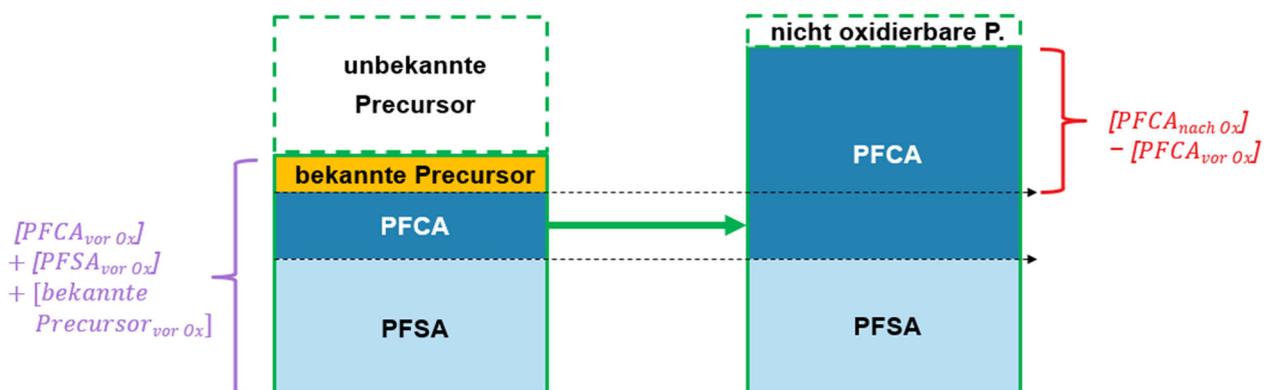
$$\frac{[PFCA_{nach\ Ox}] - [PFCA_{vor\ Ox}]}{[PFCA_{vor\ Ox}] + [PFSA_{vor\ Ox}] + [bekannte\ Precursor\ vor\ Ox]} > 2$$

Dies ist nur eine sehr grobe Abschätzung des Potentials an unbekanntem Vorläuferverbindungen an einem Standort. Die Abschätzung erlaubt keine quantitativen Aussagen oder Aussagen zum Gefährdungspotential.

Beträgt der Quotient mehr als 2, empfiehlt es sich, in weiteren Untersuchungen die Schadstoffsituation präziser abzuklären. Ergibt sich daraus, dass:

- a) der PFAS-Summen-Konzentrationswert nicht überschritten wird und
- b) trotz hoher Gehalte im TOP-Assay keine schädlichen oder lästigen Einwirkungen bestehen und auch nicht die konkrete Gefahr dazu besteht,

kann der Standort hinsichtlich PFAS als weder überwachungs- noch sanierungsbedürftig beurteilt werden.



Verfahrensprinzip des TOP-Assay: Perfluorcarbonsäuren (PFCA) sowie bekannte und unbekanntem Vorläuferverbindungen (Precursor) werden zu PFCA oxidiert. Die Perfluorsulfonsäuren (PFSA) bleiben von der Oxidation weitgehend unberührt. Die Vorläuferverbindungen lassen sich jedoch nicht restlos alle oxidieren und einige PFCA werden durch die Oxidation soweit abgebaut, dass sie im analytischen Fenster des LC-MS/MS nicht mehr nachgewiesen werden (C-Kettenlänge mit weniger als 4 C-Atomen). Daher ist das Verfahren nur semiquantitativ.

Möglichkeiten und Grenzen des TOP-Assay

- Der TOP-Assay liefert eine Aussage über das **Potential an Vorläuferverbindungen** (Precursor) an einem Standort. Allerdings ist der TOP-Assay eine aggressive Oxidation unter laborkontrollierten Bedingungen. Eine derart vollständige Umwandlung der Vorläuferverbindungen ist unter natürlichen Bedingungen meist nicht zu erwarten. Zudem ist die Umwandlung im Rahmen des TOP-Assays nicht zwingend dieselbe wie im natürlichen Standortmilieu (Bsp.: Umwandlung zu PFHxA im Top-Assay vs. Umwandlung zu PFHxS im natürlichen Milieu).
- Beim TOP-Assay können neu gebildete Verbindungen mit einer Kettenlänge unter C4 nicht nachgewiesen werden. Wenn durch die aggressive Oxidation Vorläuferverbindungen in kleinere Bruchstücke umgewandelt werden, gehen diese deshalb in der Summe verloren.
- Wegen der Abspaltung von Endgruppen ergeben sich durch die Oxidation **Massenverluste**.
- Es erfolgt **keine Gewichtung nach Toxizitätsäquivalenzfaktoren**.
- Methodenbedingt kann es zu **Verlusten** kommen (z.B. Verflüchtigung von PFBA bei der Probenvorbereitung; eine lange Lagerung kann zur Bildung stabiler Produkte führen; Adsorption langkettiger PFAS bei Extraktions- und Oxidationsschritten).
- Die TOP-Assay-Untersuchungsstrategie und Messmethode sind **noch nicht standardisiert**. Das schränkt die Vergleichbarkeit von Ergebnissen aus unterschiedlichen Laboren ein.
- Der TOP-Assay liefert einige Informationen zur Kettenlänge und zu verzweigten und linearen Isomeren. Er quantifiziert oder identifiziert aber weder die **Strukturen einzelner Vorläuferverbindungen**, noch quantifiziert er die gesamte fluorierte Masse in einer Probe.
- **Trotzdem kann die vertiefte Auswertung der Ergebnisse aus TOP-Assays wertvolle Informationen im Rahmen einer Detailuntersuchung liefern bzw. der Planung und Dimensionierung einer PFAS-Behandlungsanlage zugrunde gelegt werden.**

6. Feststoffproben – Gesamtgehalt oder VVEA-Eluat?

Zur Standortabgrenzung sowie zur abfallrechtlichen Einordnung von Feststoffen ist bei PFAS auf den ungewichteten Feststoff-Summenwert (Gesamtgehalt, siehe Kapitel 4) abzustellen. Mit der TVA-Änderung von 2010 wurde entschieden, die Grenzwerte für abzulagernde Abfälle anhand von Gesamtgehalten festzulegen, weil diese ein verlässliches Mass für das Schadstoffpotenzial darstellen. Dieser Ansatz soll auch für PFAS beibehalten werden.

Der VVEA-Eluatwert ist als Grenzwert massgebend, wenn ein Abfall auf einer Deponie des Typs C abgelagert werden soll. Zur Beurteilung ist in diesem Fall auf die toxizitätsgewichtete Summe abzustellen.

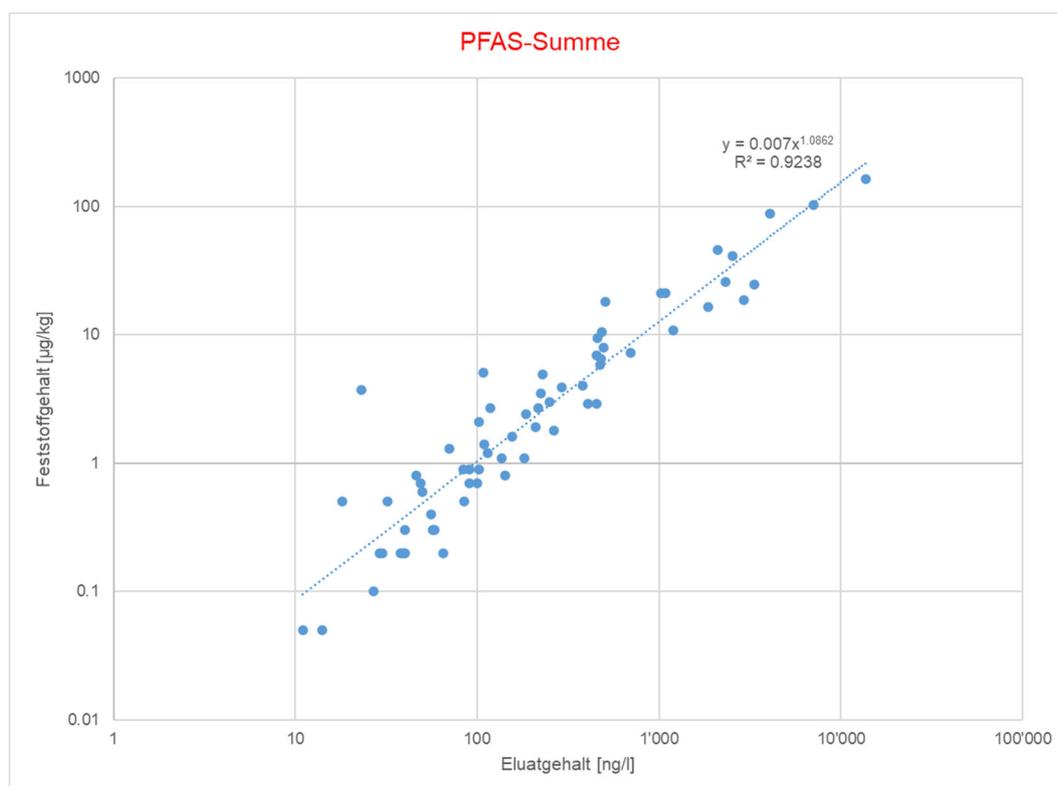
Erste Erfahrungen zur Korrelation von Gesamtgehalt und Eluat gemäss VVEA

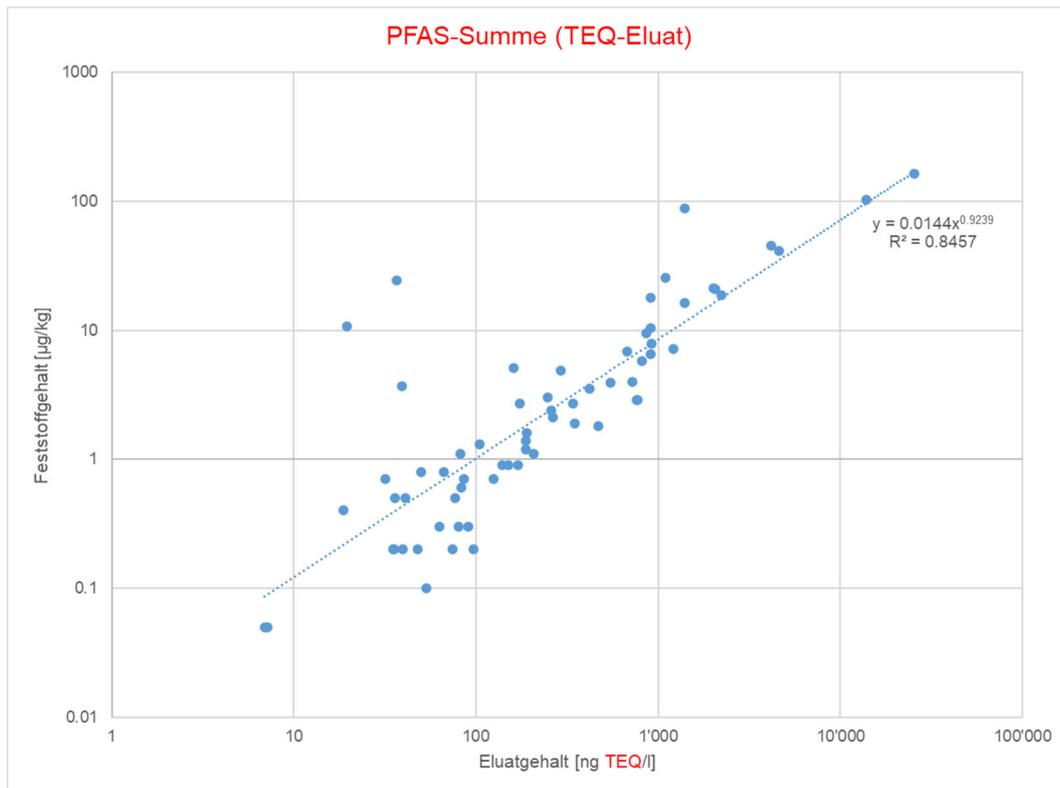
In der Arbeitsgruppe PFAS Altlasten stellte sich die Frage, ob für die Standortabgrenzung bei PFAS-Belastungen der VVEA-Eluatwert heranzuziehen ist, weil so die Grundwassergefährdung durch PFAS-Auswaschungen besser abgebildet werden kann.

Hinsichtlich der Beurteilung einer Grundwassergefährdung ist eine Entscheidung für den Feststoffwert dann problemlos, wenn eine robuste Korrelation zwischen den beiden Werten besteht. Erste Erfahrungen aus kantonalen Abklärungen, welche aber noch nicht ausreichend für einen wissenschaftlichen Entscheid sind, weisen eher auf eine fehlende bzw. schwache Korrelation hin. Im Wesentlichen ergeben sich voneinander abweichende Korrelationen aus den unterschiedlichen Sorptionseigenschaften der PFAS-Einzelsubstanzen. Diese werden bei PFAS von vielen physikalischen und chemischen Bodenmatrizeigenschaften beeinflusst. Wissenschaftliche Studien nennen u.a. den Adsorptionskoeffizienten K_{OC} , den gesamten organischen Kohlenstoff TOC, den pH, die Anionenaustauschkapazität und Eisengehalt.

Erfassen der Korrelation durch analytische Versuche

Dessen ungeachtet wurde bei einer Untersuchung der Bachema zur Korrelation von Feststoff- und Eluat-Untersuchungen (24 h-Eluat gemäss VVEA) über die Gesamtheit von 66 Proben Aushubmaterial aus verschiedenen Standorten eine recht gute Korrelation festgestellt. Demnach entspricht ein Eluat von 50 ng TEQ/l (= Konzentrationswert nach AltIV) ungefähr einem Feststoffgehalt von 0.5 µg/kg. Gemäss dieser Näherung würde ein Feststoffgehalt von 5 µg/kg zu einem Eluatgehalt in der Grössenordnung von 500 ng TEQ/l führen (zehnfacher Konzentrationswert AltIV). Hierbei handelt es sich allerdings um eine grobe Abschätzung über 66 Proben verschiedenster, nicht näher charakterisierter Standorte. **Im Einzelfall kann die Korrelation deutlich abweichen oder sie ist schlechter bis kaum erkennbar.** Bei den Messungen handelt es sich ausschliesslich um Messungen an Untergrundproben. Ob die beschriebene Korrelation auch für Oberboden gilt, lässt sich auf Grund dieser Messungen nicht beurteilen.





Hinweis: Es wurden bei 66 Proben von Aushubmaterial sowohl der Feststoffgehalt als auch das 24h-Eluat gemessen. Gemessen wurden die «9 BAFU-PFAS» (PFBA, PFPeA, PFHxA, PFHpA, PFOA, PFNA, PFBS, PFHxS, PFOS). Daten zur Herkunft der Proben sind NICHT in auswertbarem Umfang vorhanden. Alle Messwerte wurden daher «blind» gepoolt.

Auch wenn die Ergebnisse der Bachema keine wissenschaftliche und fundierte Untersuchung darstellen und weitere Untersuchungen und Erfahrung aus der Praxis erforderlich sind, weisen die Daten auf eine ungefähre Grössenordnung hin, welche beispielsweise für Gefährdungsabschätzungen herangezogen werden kann. So kann bereits bei Aushub-Feststoffbelastungen im tiefen Bereich von 0.5 µg/kg ein Eluatwert im Bereich von 50 ng TEQ/l erwartet werden. Auch wenn dieser Wert je nach Situation deutlich variieren kann, muss gemäss obiger Korrelation schon bei Feststoffbelastungen unter 1 µg/kg mit einer Überschreitung des aktuell gültigen Konzentrationswertes nach Anhang 1 AltIV gerechnet werden.

Fazit

Für die Standortabgrenzung im KbS sowie für die Material- / Abfallcharakterisierung nach VVEA gilt der ungewichtete Feststoffwert.

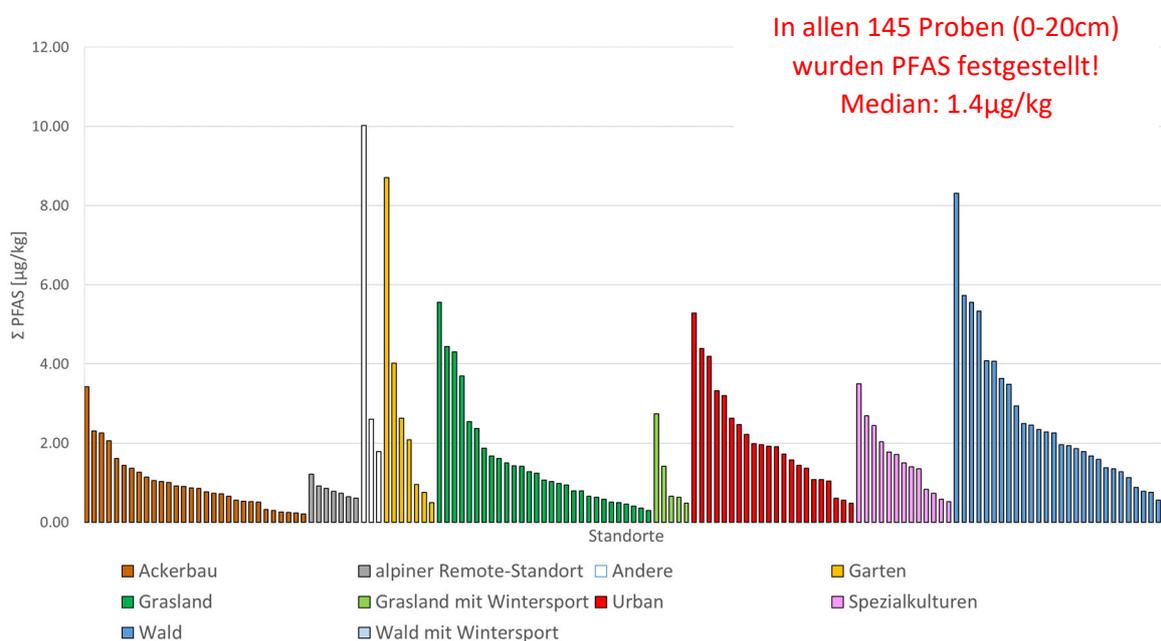
Eine für die Vollzugspraxis ausreichend erhärtete Korrelation zwischen Feststoffwert und VVEA-Eluatwert konnte bis dato noch nicht ermittelt werden. Der VVEA-Eluatwert kann aber zusätzlich zur Entscheidungsfindung bzw. Beurteilung der Standortsituation beitragen (Gefährdungsabschätzung). Informationen aus zukünftigen Messungen zur Eluat-Feststoff-Korrelation sollen gesammelt und ausgewertet werden. Ziel ist ein besseres Verständnis des Verhaltens von PFAS im Untergrund.

7. PFAS-Grundbelastung im Oberboden

Im Rahmen einer vom BAFU initiierten und finanzierten nationalen Studie⁵ wurden im Sommer 2022 in allen 145 untersuchten Oberbodenproben (0-20 cm Tiefe, Standorte ohne Verdacht auf Belastungen, Rückstellproben unterschiedlichen Alters) PFAS gefunden. Der Median liegt bei 1.4 µg/kg (Σ30 PFAS), dabei liegen 94 % aller Messwerte unter 5 µg/kg. Da es sich um schweizweit verschiedenste Standorte handelt und in ALLEN Proben PFAS gefunden wurden, muss man hier von einer Grundbelastung sprechen. Die PFAS-Belastung ändert sich nur geringfügig, wenn anstelle der 30 gemessenen PFAS nur die 9 PFAS gemäss «Minimalprogramm» in Kapitel 5 (PFBA, PFPeA, PFHpA, PFHxA, PFOA, PFNA, PFBS, PFHxS, PFOS) aufsummiert werden. Dies bestätigt damit die derzeitige Anwendung des Summenwertes für Grundwasser, Oberflächengewässer sowie Feststoffproben mit Beschränkung auf die Messung der 9 «BAFU-PFAS», zumindest in den Fällen, bei denen aus der Historie des Standorts keine Hinweise auf die Verwendung weiterer PFAS ableitbar sind (vgl. hierzu auch Kap. 5).

Da PFAS von Menschen hergestellt und damit anthropogenen Ursprungs sind, handelt es sich auch nicht um eine geogene Hintergrundbelastung. **Wegen des Vorkommens von PFAS in allen Oberbodenproben wird der Einfachheit halber von einer Grundbelastung gesprochen.**

Die ubiquitären Belastungen im Oberboden werden durch vergleichbare Untersuchungen im europäischen Ausland gestützt, bei denen sich überall ein sehr ähnliches Bild präsentiert. Sogar in den Wäldern Schwedens fern von anthropogenen Einflüssen wurden im Boden ähnliche PFAS-Belastungen gefunden.⁶



⁵ Basilius Thalmann et al. Per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS) in Schweizer Böden. Spektrum Altlasten 6/2022. <https://doi.org/10.21256/zhaw-26586>. Die Studie umfasste Standorte aus der Nationalen Bodenbeobachtung (NABO), dem Biodiversitätsmonitoring (BDM) und ausgewählte Standorte aus dem Kanton Wallis.

⁶ M. Söregård et al. (2022), Spatial distribution and load of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in background soils in Sweden, Chemosphere 295 (2022) 133944, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133944>

Die analytischen Bestimmungen wurden in einem nichtschweizerischen Labor vorgenommen und durch eine Wiederholung der Messungen von ausgewählten Proben in einem schweizerischen Labor bestätigt. Verschleppungen oder Querkontaminationen können durch Plausibilisierungen der Resultate ausgeschlossen werden. Die detaillierten Ergebnisse und weitere Informationen zur PFAS-Studie der NABO wurden in der Zeitschrift «Spektrum Altlasten 06/22» publiziert⁷.

Ableitung eines Wertes für die Grundbelastung im Oberboden

In der Praxis hat sich bei anderen Schadstoffen mit einer geogenen Hintergrundbelastung bewährt, ab einer 3-10fachen Überschreitung der Hintergrundbelastung von einer echten Belastung zu sprechen. Damit ist eine klare Unterscheidung möglich. Mit einer vergleichbaren Anwendung auf die PFAS-Grundbelastung im Oberboden kann hier in erster Näherung ab einem PFAS-Summenwert von 5 µg/kg im Oberboden von einer eindeutigen Bodenbelastung gesprochen werden (ca. 3.5-fach über dem Median von 1.4 µg/kg, knapp 95% der Messwerte < 5 µg/kg).

Fazit

Zur Unterscheidung von der ubiquitären PFAS-Grundbelastung wird für PFAS-Belastungen im Oberboden ein Wert von 5 µg/kg stipuliert (ungewichtete Summe der mindestens 9 PFAS gemäss BAFU-Notiz im Anhang 1 [PFBA, PFPeA, PFHpA, PFHxA, PFOA, PFNA, PFBS, PFHxS, PFOS]).

Bedeutung der Grundbelastung im Oberboden für die Standortabgrenzung im KbS

Durch die hohe PFAS-Grundbelastung des Oberbodens ergibt sich, dass erst Bereiche mit einer PFAS-Belastung über 5 µg/kg im Oberboden (Σ PFAS) als belasteter Standort zu betrachten sind. Diese können eine Auswirkung auf tieferliegende Schichten sowie die Schutzgüter Grundwasser/Oberflächengewässer haben und rechtfertigen damit einen Eintrag in den KbS. Somit ist hier die Grundbelastung für die Standortabgrenzung anzuwenden.

Die Berücksichtigung der bodenrechtlichen Werte (Richt-/Prüf-/Sanierungswert gemäss VBBo) wird hier ausgeklammert, da diese Werte derzeit noch nicht festgelegt sind. Wenn ausschliesslich das Schutzgut Boden bei einem Standort betroffen ist, ist aus altlastenrechtlicher Sicht nur der Bereich mit einer Überschreitung des Sanierungswertes gemäss Artikel 12 Absatz 1 AltIV in Verbindung mit Anhang 3 AltIV von Bedeutung.

Ein KbS-Eintrag des Oberbodens bei Überschreitung der Grundbelastung (Summe aller PFAS über 5 µg/kg) ist dennoch gerechtfertigt, weil sich nach ersten Erfahrungen solche Bodenbelastungen bereits negativ auf die Schutzgüter Grundwasser und Oberflächengewässer (durch Verlagerung, Auswaschung etc.) auswirken können. Dies ist im Rahmen der technischen Untersuchung zu überprüfen.

Bedeutung der Grundbelastung im Oberboden für die Entsorgung

Die Verwertung von Boden stützt sich auf die VBBo (SR 814.12). Abgetragener Ober- und Unterboden müssen möglichst vollständig verwertet werden – u.a. nach massgebendem Richt- respektive Prüfwert. Dieselben sind jedoch zurzeit für PFAS noch nicht festgelegt. Somit wird erwartet, dass weiterhin Boden mit einer PFAS-Belastung bis 5 µg/kg (Σ PFAS) prioritär und mehrheitlich verwertet und nicht abgelagert wird. Zumal die Akkumulation grösserer Mengen PFAS-grundbelasteten Oberbodens

⁷ <https://doi.org/10.21256/zhaw-26586>

in Deponien ohne Abdichtungs- und ohne vorgeschriebene Entwässerungsmassnahmen (Deponietypen A und B) auch keine sinnvolle Alternative darstellt. Weitere Diskussionen hierzu siehe Teil III Abfallrechtliche Aspekte.

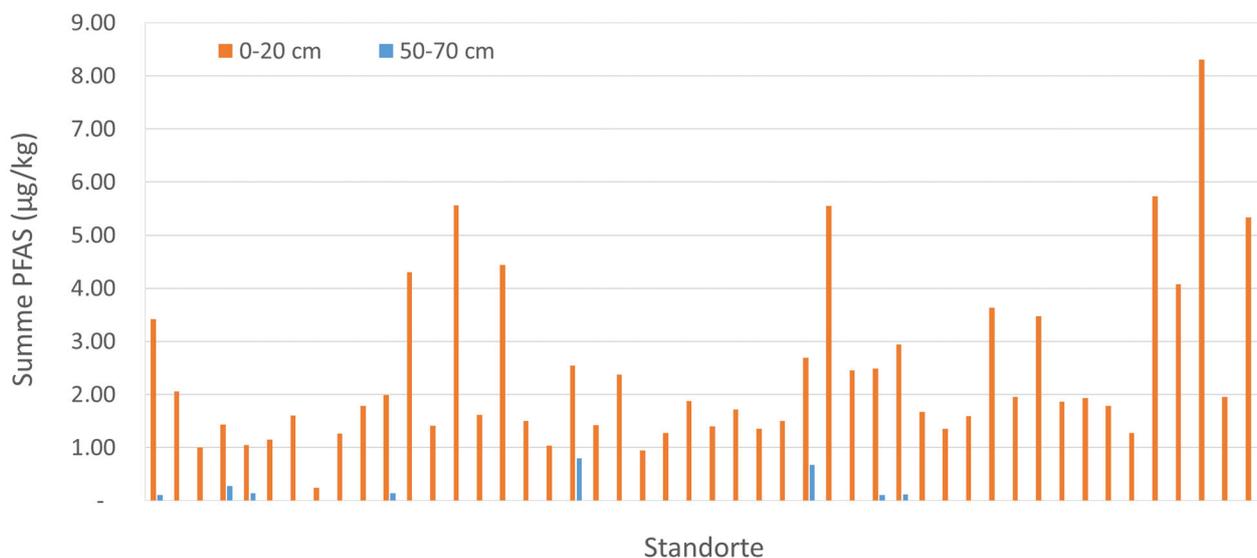
8. PFAS-Belastungen im Unterboden sowie Untergrund

Mit den Resultaten aus der Bodenuntersuchungs-Studie 2022 (vgl. Kap. 7) stellt sich die Frage, ob auch im Unterboden oder im mineralischen Untergrund eine ubiquitäre Belastung vorliegt. Deswegen hat das BAFU bei 47 von 145 NABO-Standorten in einem zweiten Schritt Rückstellproben aus 50-70 cm Bodentiefe analysieren lassen (entspricht in den meisten Fällen einem B-Horizont, teilw. auch C-Horizont). Unter diesen 47 Proben befinden sich sowohl solche mit einer hohen als auch solche mit einer mittleren oder tiefen PFAS-Belastung im Oberboden (A-Horizont). Alle Nutzungsarten (Ackerbau, Grasland, Wald, Spezialkulturen, Urban) sind unter den 47 Proben vertreten. Es besteht eine ähnlich gute Repräsentativität wie bei den 145 Proben des A-Horizontes.

Bestimmt wurde ebenfalls die Summe von 30 PFAS. Folgende Ergebnisse wurden erhalten:

- Nur in 8 von 47 Proben konnten überhaupt PFAS nachgewiesen werden (Bestimmungsgrenze 0.1 µg/kg).
- Daraus ergibt sich, dass in 39 Proben (83%) keine PFAS nachgewiesen werden konnten (Daranter sind auch Standorte mit einer Belastung des A-Horizonts von über 5 µg/kg (ΣPFAS)).
- In 6 Proben lag der Wert zwischen 0.1 und 0.3 µg/kg.
- In 2 Proben wurde ein Wert von ca. 0.7 bzw. 0.8 µg/kg gefunden (< Medianwert für Oberboden von 1.4 µg/kg).
- Hauptanteil der gemessenen Belastung bilden vor allem PFOA und PFOS, vereinzelt auch MeFOSA (Methyl-perfluorooctansulfonamid inkl. Derivate).

Es liegt also nur in weniger als 20% der Proben mit A-Horizontbelastung auch eine PFAS-Belastung im B-Horizont vor, und diese liegt mehrheitlich im sehr tiefen Bereich zwischen 0.5 µg/kg und der Bestimmungsgrenze von 0.1 µg/kg (ΣPFAS).



Fazit

Im B-Horizont kann keine PFAS-Grundbelastung (d.h. keine ubiquitären PFAS-Belastungen) festgestellt werden. Dies kann auch für den gesamten C-Horizont (mineralischer Untergrund) angenommen werden.

9. PFAS im Grundwasser

Bereits 2007 und 2008 waren im Rahmen einer Pilotstudie der Nationalen Grundwasserbeobachtung NAQUA erstmals PFAS an einzelnen Messstellen im Schweizer Grundwasser untersucht und nachgewiesen worden. Ebenfalls durch die NAQUA fand 2021 eine umfassende Pilotstudie zu PFAS statt, bei der alle knapp 550 NAQUA-Messstellen beprobt und auf insgesamt 26 verschiedene PFAS untersucht wurden. Darunter sind auch die 20 PFAS berücksichtigt, für die in der EU ein Grenzwert im Trinkwasser festgelegt wurde. Die analytische Bestimmungsgrenze lag zwischen 0.001 und 0.0005 µg/l.

Die Ergebnisse der umfassenden NAQUA-Messreihe vom Oktober 2023 zeigen:

- an ca. der Hälfte der 550 NAQUA-Messstellen werden PFAS im Grundwasser nachgewiesen
- an rund 8% der Messstellen liegt der Summenwert für die 26 PFAS bei mehr als 0.025 µg/l
- an rund 2% der Messstellen liegt der Summenwert für die 26 PFAS bei mehr als 0.1 µg/l

Zum Vergleich: der derzeit angewandte Konzentrationswert für PFAS nach Altlasten-Verordnung liegt bei 0.05 µg TEQ / l (50 ng TEQ/l, siehe Kapitel 3). Die aktuell gültigen, aber veralteten und nach heutigem Wissensstand deutlich zu hohen Höchstwerte der TBDV⁸ (je 0.3 µg/l für PFOS und PFHxS und 0.5 µg/l für PFOA) für Trinkwasser werden an einer der NAQUA-Messstellen im Grundwasser überschritten.

Das verbreitete Vorkommen von PFAS im Grundwasser bestätigte auch die PFAS-Trinkwasserkampagne 2023 des Verbands der Kantonschemiker der Schweiz. In rund der Hälfte der analysierten Trinkwasserproben wurden PFAS gemessen.

Weitere Infos zu diesen Messreihen von 2007/2008 und 2023, den Ergebnissen und die derzeitige Beurteilung finden sich auf der Webseite des BAFU unter dem Stichwort Grundwasser⁹.

⁸ Verordnung des EDI über Trinkwasser sowie Wasser in öffentlich zugänglichen Bädern und Duschanlagen vom 16. Dezember 2016 (TBDV, SR 817.022.11)

⁹ [PFAS im Grundwasser \(admin.ch\)](#)

II. Altlastenrechtliche Aspekte

10. Entscheidungsbäume für den Kbs-Eintrag

Zur Unterstützung der Vollzugsbehörden bezüglich Beurteilung von PFAS-Verdachtsmomenten und Kriterien für einen Kbs-Eintrag wurden Entscheidungsbäume für verschiedene Branchen und Prozesse erstellt. Diese orientieren sich an der bisherigen BAFU-Vollzugshilfe «Erstellung des Katasters der belasteten Standorte» und sind in einem Bericht **«Hilfestellungen für den Eintrag in den Kataster der belasteten Standorte (Kbs)» der Magma AG vom 30.01.2023** zusammengefasst. Der Bericht der Magma AG ist als Anhang 3 angefügt.

Nachfolgend werden an dieser Stelle die wichtigsten Prinzipien vorgestellt, welche für den Umgang mit PFAS-belasteten Standorten im Kbs von Bedeutung sind:

- Auf Grund der aktuell noch geringen Erfahrungen mit unterschiedlichen PFAS-Belastungen sind Standorte bei einem PFAS-Verdacht im Kbs als untersuchungsbedürftig zu klassieren.
- Aus dem gleichen Grund wird auf eine Bagatellgrenze als Entscheidungskriterium verzichtet.
- Wenn die Frage nach dem Einsatz von PFAS-haltigen Produkten bei den aufgeführten Prozessen mit «Unbekannt» beantwortet wird, ist dies mit einem «Ja» gleichzusetzen.

Mit zunehmender Erfahrung können die oben genannten Prinzipien überprüft und bei entsprechender Datengrundlage für einzelne Prozesse angepasst werden. Für weitere Details wird auf den oben genannten Bericht im Anhang verwiesen.

11. Abgrenzung von PFAS-belasteten Standorten im Kbs

PFAS-spezifische Ausgangslage

Für Standorte im Kbs gilt, dass die Belastung von Abfällen stammt und eine beschränkte Ausdehnung aufweist. Dies bedeutet, dass der Standort von einer allfälligen Grundbelastung im Untergrund oder einer diffusen Oberbodenbelastung abgrenzbar sein muss. Im Falle von PFAS ist zu beachten, dass im Unterboden/mineralischen Untergrund (ab B-/C-Horizont) keine Grundbelastungen vorliegen, im Oberboden dagegen in der Regel mit einer PFAS-Grundbelastung zu rechnen ist (siehe Kapitel 7 und 8).

Spezialfall Oberboden: wenn nur das Schutzgut Boden betroffen ist (d.h. die Schutzgüter Grundwasser, Oberflächengewässer und Luft nicht vorhanden sind), erfolgt die Standortabgrenzung im Boden durch den Konzentrationswert in Anh. 3 AltIV (Sanierungswert gemäss VBBo). Für Landwirtschaft und Gartenbau (Anh. 3 Ziff. 1 AltIV) ist dieser Wert noch nicht festgelegt, Für Flächen, auf denen Kinder regelmässig spielen (Anh. 3 Ziff. 2 AltIV), hat das BAFU einem Wert von 30 µg/kg zugestimmt.

Feststoffwerte für die Standortabgrenzung bei PFAS-belasteten Standorten

Eine Abgrenzung im Bereich Oberboden muss die ubiquitäre PFAS-Grundbelastung berücksichtigen. Diese kann Werte bis 5 µg/kg (Σ PFAS) erreichen. Bei Gehalten über 5 µg/kg muss von einem PFAS-

Eintrag auf Grund eines Prozesses, einer Anlage oder eines Ereignisses ausgegangen werden. Eine solche Belastung führt zu einem KbS-Eintrag: da bereits die Grundbelastung im Oberboden aus toxikologischer Sicht als eher hoch zu bewerten ist, muss bei einer Überschreitung überprüft werden, ob eine Verlagerung dieser Belastung in die Tiefe (in den Untergrund und in die Schutzgüter Grundwasser oder Oberflächengewässer) stattfinden konnte.

Im Unterboden (B-Horizont) sowie im mineralischen Untergrund liegt nach den bisherigen Untersuchungen keine PFAS-Grundbelastung vor (siehe Kapitel 8). Definitionsgemäss ergibt sich daraus, dass die Bestimmungsgrenze (0.1 µg/kg je Einzelstoff PFAS) den Wert für unverschmutztes Material (U-Wert) definiert. Der U-Wert ist somit auch als Wert für die Standortabgrenzung im ungesättigten Untergrund anzuwenden.

Konsequenz aus der sehr hohen Grundbelastung im Oberboden

Auf Grund der speziellen Situation mit einer PFAS-Grundbelastung ausschliesslich im Oberboden ergibt sich, dass unterschiedliche Werte für die Standortabgrenzung im Oberboden (5 µg/kg, ΣPFAS) und im ungesättigten Unterboden/mineralischen Untergrund (0.1 µg/kg je Einzelstoff) anzuwenden sind. Sofern in beiden Bereichen eine Belastung vorliegt, ergibt sich die Gesamtausdehnung des belasteten Standorts im KbS aus der Vereinigungsmenge der beiden Ausdehnungen.

Bedeutung des unmittelbaren Abstrombereichs

Aus der Standortabgrenzung resultiert der unmittelbare Abstrombereich, welcher für die altlastenrechtliche Klassierung relevant ist. In der Regel lässt sich damit die Gefährdung, welche vom Standort auf die Schutzgüter (Grundwasser und/oder Oberflächengewässer) ausgeht, gut beurteilen. Daneben gibt es in der Praxis aber auch Fälle (z.B. bei CKW-Standorten), bei welchen mit dieser Anwendung der unmittelbare Abstrombereich so weit vom Schadensherd entfernt zu liegen kommt, dass an der Standortgrenze im Schutzgut kein Sanierungsbedarf mehr resultiert, obwohl insgesamt ein sehr hohes Schadstoffpotenzial mit einer entsprechenden Umweltgefährdung vorliegt. Dieses Risiko der Unterschätzung bei der Auswertung muss ersten Erfahrungen nach auch bei PFAS-Standorten als realistisch bewertet werden. Wegen der hohen Toxizität von PFAS ist eine derartige Situation unbedingt zu vermeiden.

Analyse der aktuellen Situation

Eine Überprüfung von aktuellen PFAS-Fällen aus verschiedenen Kantonen hat gezeigt, dass es keinen wesentlichen Unterschied macht, ob die Standortabgrenzung im Untergrund mit dem U-Wert oder einem höheren Wert (z.B. 1 oder 2 µg/kg) erfolgt. Nach ersten Erfahrungen nimmt vor allem bei punktuellen PFAS-Einträgen der horizontale Belastungsgradient schnell ab.

In der Vollzugspraxis sind aber auch bereits Abweichungen davon aufgetreten. Diese werden nachfolgend anhand zweier Praxisbeispiele betrachtet:

Praxisbeispiel 1: grosse Standortausdehnung, aber keine eigentliche Schadstoffquelle

Es sind derzeit einige wenige Fälle bekannt, bei welchen durch Anwendung des U-Wertes im Untergrund eine sehr grosse Standort-Ausdehnung resultiert, aber keine eigentliche Schadstoffquelle vorliegt oder bisher gefunden werden konnte. In solchen **Einzelfällen** soll von den allgemeinen Regeln zur Festlegung des unmittelbaren Abstrombereichs abgewichen werden können. Ob und wie genau

hängt aber stark vom Wissensstand der lokalen Situation und der Plausibilität bzgl. möglicher Schadstoffquellen ab. Grundsätzlich ist in solchen Fällen zu prüfen, ob (ohne Schadstoffquelle bzw. ohne physische Verbindung zu einem anderen Schadensherd) überhaupt ein KbS-Standort vorliegt.

Praxisbeispiel 2: eindeutige Schadstoffquelle erkannt, gleichzeitig grosse Standortausdehnung wegen Kriterium U-Wert oder wegen weitläufiger Grundbelastung (häufiger als Praxisbeispiel 1)

Bereits häufiger aufgetreten sind Fälle, bei welchen ein relevanter PFAS-Schadensherd lokalisiert wurde, aber noch in sehr grosser Distanz dazu der U-Wert im Untergrund überschritten ist bzw. die Belastung $> 5 \mu\text{g}/\text{kg}$ (ΣPFAS) im Oberboden eine grosse Ausdehnung hat. Dies führt dazu, dass der unmittelbare Abstrombereich so weit entfernt vom relevanten Schadensherd liegt, dass kein Sanierungsbedarf resultiert. Hier kann eine Entkopplung der Messstelle für den unmittelbaren Abstrom von der Standortabgrenzung eine pragmatische Lösung darstellen. Dabei hängt vom **Einzelfall** ab, wo die Messstelle zu platzieren ist. Sie soll aber nicht in Belastungsbereichen liegen, welche dem Hot-spot zuzurechnen sind. Als **maximale** Belastung wird ein PFAS-Wert von $2.5 \mu\text{g}/\text{kg}$ (ΣPFAS) empfohlen (siehe auch die weiter unten folgende Visualisierung).

Zusammenfassung

- Der Wert für die Standortabgrenzung im Oberboden ergibt sich aus der PFAS-Grundbelastung im Oberboden und lautet somit $5 \mu\text{g}/\text{kg}$ (ΣPFAS). Sonderfall: Wenn nur das Schutzgut Boden betroffen ist, ergibt sich die Standortabgrenzung aus dem Sanierungswert gemäss Anhang 3 AltIV.
- Als Wert für die Standortabgrenzung im Untergrund (in der ungesättigten Zone) gilt – in Analogie zu anderen Schadstoffen – für PFAS der U-Wert ($0.1 \mu\text{g}/\text{kg}$ je Einzelstoff).
- Wenn beide Bereiche von PFAS-Belastungen betroffen sind, resultiert die gesamte Standortabgrenzung und somit der Katastereintrag aus der Vereinigungsmenge der beiden Belastungsausdehnungen.
- Daraus ergibt sich der unmittelbare Abstrombereich mit der Messstelle für die altlastenrechtliche Klassierung, welche direkt ausserhalb der Standortabgrenzung liegt.
- Für den Spezialfall, dass ein PFAS-Schadensherd vorliegt, welcher von weitreichenden schwachen Belastungen umgeben ist und damit eine grosse Standortausdehnung aufweist, kann die Messstelle für die altlastenrechtliche Klassierung näher an den Schadensherd gelegt werden. Die Lage der Messstelle ist abhängig von der Situation einzelfallweise zu bestimmen und zu begründen. Sie hängt von der Abnahme der Belastung mit zunehmender Distanz zur Quelle ab, soll aber nicht in Untergrundbereichen liegen, welche eine PFAS-Belastung $> 2.5 \mu\text{g}/\text{kg}$ (ΣPFAS) aufweisen.
- Falls trotz einer grösseren Standortausdehnung kein eigentlicher Schadensherd vorliegt, und die Untersuchungen als plausibel und ausreichend beurteilt werden, kann im Einzelfall mit Begründung ein standortspezifischer Abgrenzungswert festgelegt werden. Voraussetzung ist aber, dass überhaupt ein belasteter Standort im Sinne des Altlastenrechts vorliegt.

Zur Veranschaulichung der Anwendung Standortabgrenzung gemäss obiger Betrachtung:

« Normalfall »

Die Standortgrenze ergibt sich aus der Vereinigungsmenge von:

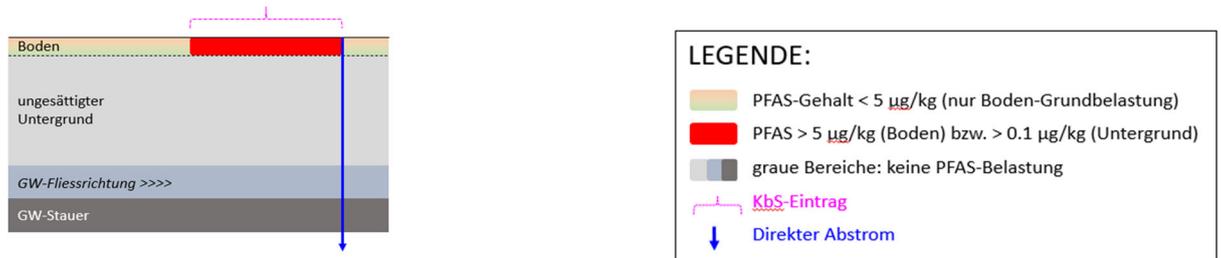
- I. Belastungsperimeter im **ungesättigten Untergrund**. Grenze = 0.1 µg/kg je Einzelstoff (U-Wert)
- II. Belastungsperimeter im **Boden**. Grenze = 5 µg/kg (Summe gemessene PFAS)

Der direkte Abstrombereich fällt mit der Standortgrenze zusammen.

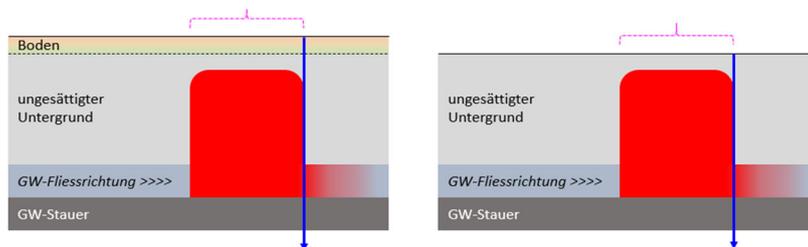
*Hinweis: Die Belastung im **gesättigten** Untergrund kann vorerst nicht als Standortabgrenzungskriterium herangezogen werden, da die Transportprozesse derzeit noch nicht ausreichend abgeklärt sind.*

Hinweis: Erste Erfahrungen im Ausland zeigen, dass sich die PFAS bei versickerten Löschwässern im Grenzbereich zwischen ungesättigter und gesättigter Zone ausbreiten können, es sind aber auch schon einzelne Fälle bekannt, bei welchen PFAS in tieferen Bereichen der gesättigten Zone gemessen wurden.

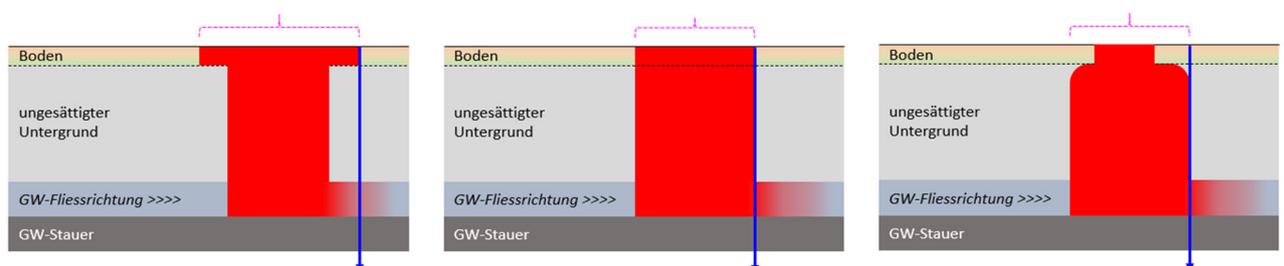
Standorte, bei denen nur der Boden PFAS-belastet ist:



Standorte, bei denen nur der Untergrund PFAS-belastet ist:



Standorte, bei denen sowohl der Boden als auch der Untergrund PFAS-belastet sind:



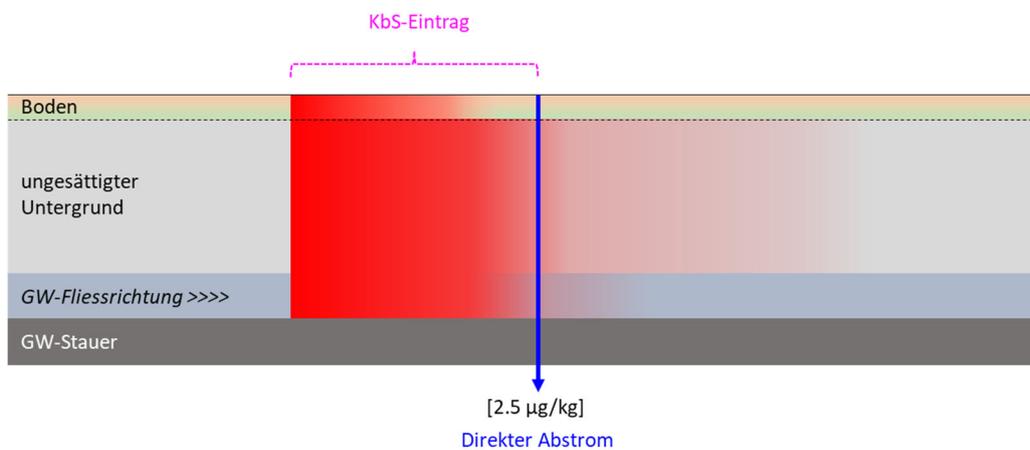
«Sonderfall» Standorte, bei welchen das Risiko besteht, dass der direkte Abstrombereich für die altlastenrechtliche Klassierung (zu) weit vom Hotspot entfernt festgelegt wird (vgl. Praxisbeispiel 2)

Sonderfall 1:

- Standorte bei denen zusätzlich zu einem Hotspot weitere vergleichsweise geringe Belastungen im ungesättigten Untergrund anzutreffen sind. Als Ursache für die zusätzliche Belastung kommen beispielweise Einträge aus der Bodennutzung in Frage oder horizontale Transportprozesse aus dem Hotspot hinaus (z.B. Windverfrachtungen, ev. auch Materialverschiebungen bei Bauprojekten).

Für die Festlegung der Messstelle des direkten Abstrombereichs kann hier im ungesättigten Untergrund ein höherer Wert als 0.1 µg/kg gewählt werden.

Faustregel: Die Messstelle für den direkten Abstrom wird dort festgelegt, wo der stärkste Konzentrationsabfall auftritt (= Ende des Hotspot-Bereichs). Der Abgrenzungswert soll **maximal 2.5 µg/kg** (ΣPFAS) betragen. Stärkere Belastungen im Untergrund zählen immer zum belasteten Standort.



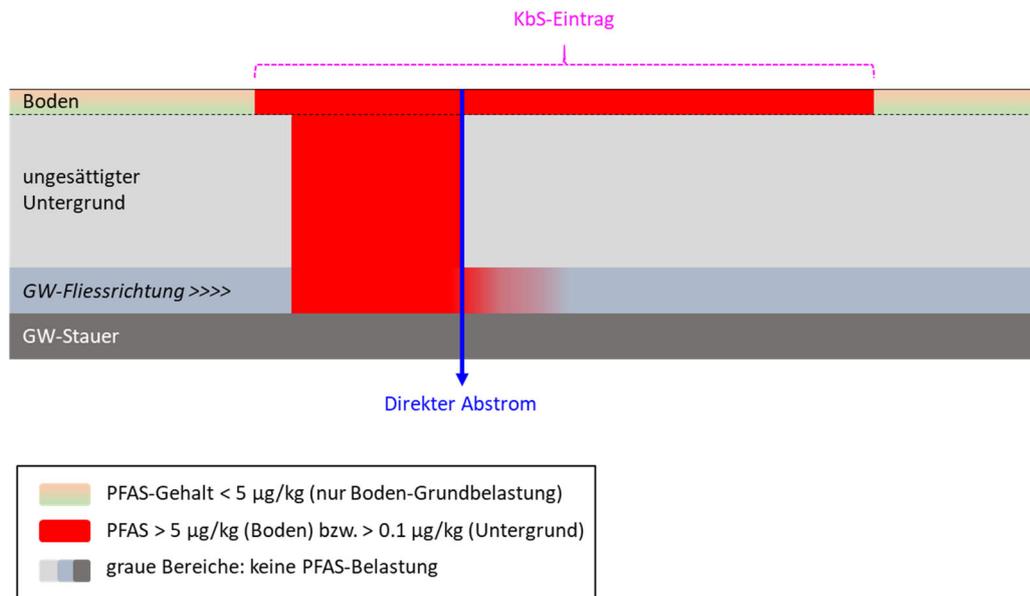
	PFAS-Gehalt < 5 µg/kg (nur Boden-Grundbelastung)
	PFAS > 5 µg/kg (Boden) bzw. > 0.1 µg/kg (Untergrund)
	graue Bereiche: keine PFAS-Belastung

Sonderfall 2:

- Standorte bei denen die Belastung >5 µg/kg (ΣPFAS) im Oberboden weit über den Hotspot im Untergrund hinaus reicht. Als Ursache für die grossflächige Bodenbelastung kommen beispielweise Windverfrachtungen von Löschschaum bei Brandübungsplätzen in Frage.

Die Standortabgrenzung für den KbS-Eintrag erfolgt weiterhin anhand des Belastungsperimeters im Boden, mit Grenze = 5 µg/kg (ΣPFAS).

Als direkter Abstrom wird hingegen das Ende des Hotspot-Bereichs im ungesättigten Untergrund festgelegt, d.h. dort, wo der stärkste Konzentrationsabfall auftritt. Dies muss im Einzelfall und unter Berücksichtigung der lokalen Situation bestimmt werden. Der Abgrenzungswert soll **maximal 2.5 µg/kg** (ΣPFAS) betragen (siehe Sonderfall 1). Exaktere Kriterien können hierzu auf Grund fehlender Erfahrungen noch nicht festgelegt werden.



12. Priorisierung der Untersuchungen von Standorten mit PFAS-Verdacht

Die Entscheidungsbäume gemäss der «Hilfestellung für den Eintrag in den Kataster der belasteten Standorte (KbS)» der Magma AG (siehe Anhang 3) sollen die kantonalen Altlastenfachstellen bei der Entscheidung unterstützen, ob Standorte hinsichtlich möglicher PFAS-Belastungen in den KbS eingetragen werden sollen. Dabei werden - neben einigen neuen KbS-Standorten - verschiedene bisherige KbS-Standorte mit einem PFAS-Verdacht belegt und zwar unabhängig vom derzeitigen Status der Klassierung. Dies kann zu einer arbeitsintensiven Überarbeitung des KbS führen, weil ein PFAS-Verdacht ohne detaillierte Kenntnisse über deren Einsatz etc. zu einem Untersuchungsbedarf führt.

Folgende Kategorien von PFAS-belasteten Standorten können daraus im KbS resultieren:

- a) Neue Standorte auf Grund eines PFAS-Verdachts
- b) Bisher als nicht untersuchungsbedürftig klassierte Standorte (Standorte ohne schädliche oder lästige Einwirkungen, Klassierung gemäss Art. 5 AltIV) werden wegen PFAS-Verdacht neu untersuchungsbedürftig.
- c) Zusätzlicher PFAS-Verdacht bei den aktuell untersuchungsbedürftigen Standorten
- d) «Nachträglicher» PFAS-Verdacht bei bereits gemäss Art. 8 AltIV untersuchten und klassierten Standorten

zu a):

Derzeit kann noch nicht abgeschätzt werden, wie viele neue Standorte sich ergeben (z.B. Brandübungsplätze der Gemeinden o.ä.).

zu c):

Bei den aktuell untersuchungsbedürftigen Standorten kann der PFAS-Verdacht in die geplanten oder zukünftigen altlastenrechtlichen Abklärungen integriert werden.

zu b) und d):

Hier ist zu erwarten, dass eine grössere Anzahl von Standorten, welche derzeit ohne einen altlastenrechtlichen Überwachungs- oder Sanierungsbedarf im KbS verzeichnet sind, nachträglich mit einem PFAS-Verdacht belegt werden müssen und dadurch untersuchungsbedürftig werden. Dabei kann es sich sowohl um gemäss Art. 5 AltIV klassierte Standorte oder um bereits untersuchte und gemäss Art. 8 AltIV klassierte Standorte handeln.

Grundsätzlich liegt der Entscheid, in welcher Reihenfolge bzw. mit welcher Priorisierung die Untersuchung der oben genannten vier Kategorien angegangen werden soll, bei der zuständigen kantonalen Behörde. **Der nachfolgende Vorschlag für eine mögliche Priorisierung kann den kantonalen Vollzugsbehörden zur Unterstützung dienen.**

- 1. Brandübungsplätze Betriebe (Werksfeuerwehren) sowie Feuerwehr-Ausbildungsstätten (darunter neue Standorte)**
 - 2. Untersuchungsbedürftige Betriebe, Unfallstandorte (inkl. Brände) und Deponien (= Bearbeitung im Rahmen des aktuellen Vollzugs) ***
 - 3. Brandübungsplätze Gemeinden (darunter neue Standorte) ***
 - 4. Bisher nicht untersuchungsbedürftige Standorte (Klassierung gemäss Art. 5 AltIV) sowie bereits untersuchte oder sanierte Standorte (Klassierung gemäss Art. 8 AltIV) */****
- * **zusätzliche Priorisierung unter Berücksichtigung der Schutzgüter (Gefährdungsabschätzung, Nutzung von Flächen, Gewässern etc.)**
- ** **vorzugsweise Nutzung der bereits vorhandenen Beprobungsstellen**

Zu 1:

Auf Grund der Erfahrung, dass bei betrieblichen Brandübungsplätzen und Feuerwehr-Ausbildungsstätten ein äusserst hohes Schadstoffpotenzial vorliegen kann, wird eine prioritäre Abklärung dieser Standorte empfohlen.

Zu 2:

Bei diesen Standorten sind die derzeit untersuchungsbedürftigen KbS-Einträge oder bereits vorliegende Pflichtenhefte mit dem PFAS-Verdacht gemäss den Entscheidungsbäumen zu ergänzen. Die bisherige Priorisierung durch die kantonale Behörde kann dabei in aller Regel beibehalten werden. Es wird zudem die Berücksichtigung eines möglichen Einflusses auf die Nahrungskette und damit des Schutzguts Mensch empfohlen (lokale Situation bzgl. Trinkwasser, Gewässer, Fische, etc.). Damit kann sich einzelfallweise die Priorität des Untersuchungsbedarfs erhöhen (siehe Hinweis zu *).

Zu 3:

Brandübungsplätze der Gemeinden weisen häufig wechselnde Standorte auf und werden zudem seltener genutzt als betriebliche Brandübungsplätze. Sofern aber Informationen über ein höheres Schadstoffpotenzial vorliegen, sind diese in eine höhere Priorität aufzunehmen.

Zu 4:

Es wird empfohlen, die vorhandenen Ressourcen vorerst auf die Standorte der oben genannten Prioritäten 1, 2 und 3 zu konzentrieren. Aus diesen Bearbeitungen werden sich dann zu einzelnen Branchen und Prozessen wesentliche Erkenntnisse ergeben, ob und welche Standorte der Priorität 4 dann auf PFAS überprüft werden sollen.

Es können aber 3 Ausnahmen formuliert werden:

- a) es ist auf Grund vorhandener Kenntnisse bereits jetzt bekannt, dass die auf dem Standort ausgeführten Tätigkeiten zu einem hohen PFAS-Eintrag führen konnten. Dann ist die Aufnahme in eine höhere Priorität angezeigt.
- b) es besteht auf Grund der Lage des Standorts eine erhöhte Gefährdung für den Menschen (v.a. über die Nahrungskette, z.B. Lage an einem fischreichen Gewässer, intensiver landwirtschaftlicher Anbau etc.). Dann ist eine Aufnahme in eine höhere Priorität zu prüfen (siehe Hinweis zu *).
- c) falls noch funktionierende Grundwasser-Messstellen vorhanden sind, kann mit relativ geringem finanziellem Aufwand überprüft werden, ob eine für das Schutzgut Grundwasser relevante PFAS-Belastung vorhanden ist. Solche KbS-Standorte können somit relativ einfach zum Erfahrungsgewinn beitragen (siehe Hinweis zu **).

13. Untersuchungsstrategie im Rahmen der Technischen Untersuchung

Die nachfolgenden Empfehlungen beziehen sich auf Standorte mit einem PFAS-Verdacht oder bereits nachgewiesenen PFAS-Belastungen, welche sich im Stadium der Technischen Voruntersuchung befinden. Sie fokussieren dabei auf den Stellenwert von Grundwasser- bzw. Oberflächengewässer-Proben im Vergleich zu Feststoffproben, sowie auf mögliche Kriterien zum Verzicht von Beprobungen.

Grundsätzlich gilt: da bisher immer noch umfassende Erfahrungen bzgl. Ausbreitung und Einwirkung von PFAS-Belastungen auf die Schutzgüter fehlen, sind Untersuchungen der möglichen betroffenen Schutzgüter von grosser Bedeutung. Erste Erfahrungen weisen beispielsweise darauf hin, dass auch weniger starke PFAS-Belastungen im Untergrund (z.B. im Bereich 1 µg/kg) zu einer relevanten Gefährdung von Grundwasser oder Oberflächengewässer führen können. Deswegen sollte auf die Beprobung dieser beiden Schutzgüter – sofern sie betroffen sein könnten – nur ausnahmsweise verzichtet werden.

Tiefe Feststoffbelastungen sind für sich alleine genommen kein ausreichendes Kriterium für den Verzicht auf Grundwasser-/Oberflächengewässer-Beprobungen. Zusammen mit einer hydrogeologischen Begründung kann jedoch im Einzelfall ein Verzicht auf Grundwasserbeprobungen diskutiert werden. Dazu müssen verschiedene Aspekte wie Repräsentativität der Untergrundproben, Bedeutung des Schutzguts, Wahrscheinlichkeit des PFAS-Einsatzes etc. herangezogen werden. Ein allfälliger Verzicht ist entsprechend gut zu begründen.

Dagegen gilt für Standorte mit **hohem Verdacht** bzgl. PFAS-Einsatz – beispielsweise Brandübungsplätze – oder mit **nachgewiesenem Einsatz** von PFAS-haltigen Produkten: die gefährdeten Schutzgüter (Grundwasser, Oberflächengewässer, Boden) sind **immer** zu untersuchen, auch wenn in ersten Feststoffproben keine PFAS nachgewiesen werden konnten.

Falls im Untergrund trotz Anfangsverdacht keine PFAS-Belastungen festgestellt werden (< U-Wert, d.h. < Bestimmungsgrenze), aber wegen anderen Schadstoffen eine Beprobung von Grund- und/oder Oberflächenwasser stattfindet, wird empfohlen, PFAS in das Analysenprogramm aufzunehmen. So kann man mit verhältnismässig geringem Aufwand bzw. Kosten zusätzliche Erkenntnisse sammeln und der Standortinhaber erhält weitere Sicherheit.

Neben der Plausibilisierung der Feststoffproben (Repräsentativität für den Standort) ist auch die **Plausibilisierung der Messresultate von Grundwasserproben im unmittelbaren Abstrombereich** wichtig: bei Belastungen unterhalb des altlastenrechtlichen Handlungsbedarfs (beispielsweise < 10% Konzentrationswert AltIV im Gewässerschutzbereich A₀), aber über der Bestimmungsgrenze von 1 ng/l je Einzelsubstanz, muss folgendes überprüft werden: besteht ausreichende Kenntnis über die

Feststoffbelastung am Standort? Ist die Schadstoffquelle ausreichend bekannt? Gibt es eventuell andere Belastungen oder bereits zuströmende PFAS-Belastungen im Grundwasser? Solange dieses **Wissen über die Standortsituation** nicht ausreichend ist, ist bei PFAS-Belastungen im Grundwasser über der Bestimmungsgrenze **nach derzeitigem Wissensstand keine Löschung** aus dem KbS vorzunehmen, auch wenn das Kriterium für einen altlastenrechtlichen Handlungsbedarf unterschritten wird.

Falls im Oberboden Belastungen über der Grundbelastung (d.h. $> 5 \mu\text{g}/\text{kg}$ ($\sum\text{PFAS}$)) vorliegen, muss in diesen Bereichen überprüft werden, ob eine vertikale Migration stattgefunden hat (Untergrundproben B-/C-Horizont, gegebenenfalls bis zur gesättigten Zone).

Wegen der hohen Grundbelastung im Oberboden sowie des tiefen U-Wertes besteht bei den Sondierungsarbeiten (z.B. Baggerschlitzten) eine erhöhte Gefahr von Verschleppungen. Eine Fehlinterpretation ist damit schnell möglich.

Erste Erfahrungen (vor allem in urbanen Gebieten) zeigen, dass bei Nachweis von PFAS im Grundwasser des Abstrombereichs eine Beprobung des Zustrombereichs sehr wichtig ist.

Als Unterstützung zur Beurteilung können bei sehr tiefen Feststoffbelastungen (nahe U-Wert) auch Eluat-Untersuchungen nach AltIV dienen. Diese sollen aber ergänzend betrachtet werden und nicht den Feststoff-Wert ersetzen.

Fazit

Ausgehend von den oben genannten Aspekten Diskussionen ergeben sich folgende Empfehlungen für die Untersuchung von PFAS-belasteten Standorten (im Rahmen der Technischen Untersuchung):

- **Bei Standorten mit hohem PFAS-Verdacht (d.h. nachgewiesenem Einsatz von PFAS-haltigen Produkten, Brandübungsplätze etc.) sind die möglichen betroffenen Schutzgüter immer auf PFAS zu untersuchen, unabhängig von Feststoffresultaten (d.h. auch, wenn deren PFAS-Gehalt $< \text{U-Wert}$ liegt).**
- **Für alle anderen Standorte (unabhängig vom PFAS-Verdacht) gilt: wenn eine PFAS-Belastung im Untergrund $> \text{U-Wert}$ vorliegt, sind die möglicherweise betroffenen Schutzgüter immer auf PFAS zu untersuchen.**
- **Wenn im Untergrund des belasteten Standorts keine PFAS über der Bestimmungsgrenze gemessen werden ($< \text{U-Wert}$) soll eine Einzelfallbeurteilung klären, ob ein Verzicht auf eine Schutzgutbeprobung möglich ist. Diese sollte unter Berücksichtigung von Schutzgutbedeutung, Repräsentativität der Untergrundproben, hydrogeologischer Bewertung etc. durchgeführt werden.
Sofern das Schutzgut wegen anderen Schadstoffen beprobt wird: Empfehlung zur Aufnahme von PFAS ins Analysenprogramm (Erkenntnisgewinn und Sicherheit für den Standortinhaber).**
- **Bei der Beurteilung der Resultate sind ausserdem zu berücksichtigen: eine allfällige Belastung im Zustrombereich, ggf. vorhandene Überschreitungen der Grundbelastung im Oberboden und mögliche Verschleppungen bei Sondierungen.**

14. Kriterien für die Löschung aus dem KbS

Für die Löschung eines PFAS-belasteten Standortes aus dem KbS gelten die üblichen Anforderungen wie bei allen anderen Schadstoffen: keine von Abfällen stammenden Belastungen am Standort einerseits sowie kein altlastenrechtlicher Handlungsbedarf für die vorhandenen Schutzgüter andererseits.

Damit erfolgt die Löschung aus dem KbS bei

- **Unterschreitung des U-Werts im ungesättigten Untergrund (d.h. U-Wert = 0.1 µg/kg (entspricht der Bestimmungsgrenze je PFAS-Einzelstoff) und**
- **Unterschreitung des PFAS-Gehalts im Oberboden von 5 µg/kg (maximale Grundbelastung, Summe aller gemessenen PFAS) und**
- **Keine PFAS im Grundwasser nachgewiesen bzw. keine Differenz zw. Zu- und Abstrom. Falls im Grundwasser PFAS über der Bestimmungsgrenze (1 ng/l je Einzelstoff) gemessen werden, aber die Anforderungen an einen altlastenrechtlichen Handlungsbedarf nicht erfüllt sind, ist für eine Löschung aus dem KbS eine umfassende Plausibilisierung erforderlich. Das heisst, eine allfällige anderweitige Belastung des Grundwassers ist abzuklären. Ausserdem müssen die Löschungskriterien für Untergrund und Boden ausreichend nachgewiesen werden. Damit soll ausgeschlossen werden, dass keine unentdeckten PFAS-Belastungen vorhanden sind.**

Die ersten beiden Anforderungen gelten für den gesamten Standort, auch wenn die zur altlastenrechtlichen Klassierung massgebliche Messstelle näher an den Schadensherd gelegt wurde (siehe Sonderfall 2 in Kapitel 11). Diese Messstelle dient nur für die altlastenrechtliche Beurteilung und nicht für die Löschung aus dem KbS.

15. Dringlichkeit von Sanierungsmassnahmen

Die Dringlichkeit von Sanierungsmassnahmen hängt gemäss Art. 14 und 15 AltIV in erster Linie von der Gefährdung der Schutzgüter ab. Sie ist also bezogen auf das Schutzgut zu ermitteln und zu beurteilen. Dabei ist kein PFAS-spezifisches Vorgehen erforderlich. Allerdings müssen die Eigenschaften von PFAS (Persistenz und hohe Toxizität) sowie die bisherigen Erfahrungen zur Ausbreitung dieser Stoffe berücksichtigt werden.

Mögliche Hilfestellungen zur Beurteilung von Werten wie Fracht oder Höhe der Konzentrationswert-Überschreitung u.a. können derzeit nicht gegeben werden, da noch keine ausreichenden Erfahrungen vorliegen. Wie bei allen anderen Schadstoffen sind gemäss Vollzugshilfe «Sanierungsbedarf sowie Ziele und Dringlichkeit einer Sanierung»¹⁰ grundsätzlich das Ausmass der Einwirkungen und der Eintrittszeitpunkt der Einwirkungen für die Beurteilung der Dringlichkeit massgebend. Insbesondere sind zu beachten: Ausdehnung der Belastung, Hintergrundbelastung im Grundwasser/Oberflächengewässer, hydrogeologische Gegebenheiten, Ausbreitungs-/Verschleppungsgefahr, Auswirkungen auf die Nahrungskette etc.

¹⁰ <https://www.bafu.admin.ch/uv-1828-d>

16. Sanierungen – Methoden und Massnahmen

Im Expertenbericht der Arcadis «Entscheidungsgrundlagen für den Vollzug bei PFAS-belasteten Standorten in der Schweiz» vom Juli 2021 findet sich eine Zusammenstellung und Beurteilung der bis dahin bekannten Versuchsstudien bzw. in der Praxis angewendeten Sanierungsmethoden bei PFAS-Belastungen. Der Stand 2021 war gemäss Expertenbericht, dass bisher noch keine ausreichenden Erfahrungen zu PFAS-Sanierungen in der Praxis vorliegen, welche zu eindeutigen Aussagen bzgl. Machbarkeit und Wirksamkeit einzelner Methoden führen.

Im Rahmen des Projektes «PFAS im Bereich Altlasten und Abfall» hat das BAFU im Frühjahr 2023 eine weitere umfassende Literaturrecherche durchgeführt. Dabei sollte festgestellt werden, ob seit dem Bericht Arcadis 2021 im Inland, aber auch im Ausland neue Erkenntnisse vorliegen, welche zu ersten Empfehlungen führen können.

Der Anhang 4 dieses Berichts enthält die Zusammenfassung dieser Literaturrecherche. Die ausführlichen Ergebnisse sind in Excel-Tabellen zusammengestellt, welche auf Anfrage beim BAFU bezogen werden können.

Es kann festgehalten werden, dass es weiterhin kaum Sanierungen in der Praxis gibt, welche als abgeschlossen oder erfolgreich beurteilt werden können. Zwar gibt es inzwischen mehrere Pilotstudien oder gross angelegte Versuche, diese sind aber entweder noch nicht abgeschlossen oder können (derzeit) noch nicht als erfolgreich beurteilt werden. Viele Sanierungsmethoden für PFAS-Standorte wurden bisher nur im Labor an synthetischen Proben (Boden bzw. Wasser mit PFAS dotiert) oder an realen Proben mit kleinen Volumina (Säulenversuche) durchgeführt. Eine Übertragung der Methoden auf den eigentlichen Standort steht in fast allen Fällen noch aus.

Als am ehesten erfolgsversprechend für belastetes Aushubmaterial gelten momentan die Methoden der Bodenwäsche sowie der thermischen Behandlung. Zu diesen zwei Behandlungsmethoden werden derzeit auch Versuche in der Schweiz durchgeführt (siehe Kapitel 23 und 24). Immobilisierung wird dagegen aktuell als langfristig unsicher bewertet.

Für die Behandlung von Grundwasser oder Abwasser werden vor allem die Wirksamkeit von Aktivkohle, Ionenaustauscherharzen oder der Umkehrosiose untersucht. Dabei ist nach ersten Erkenntnissen die Effizienz der Entfernung bei langkettigen PFAS höher als bei kurzkettigen. Praktikable Lösungen werden hier am ehesten in Kombinationen verschiedener Behandlungen gesehen (z.B. hintereinander geschaltete Behandlungsschritte).

Fazit

Da in der Schweiz wie auch international noch keine umfangreichen Erfahrungen zu Wirksamkeit, Verhältnismässigkeit und Nachhaltigkeit von einzelnen Sanierungsmassnahmen vorliegen, kann derzeit keine abschliessende Empfehlung abgegeben werden. Als erfolgversprechende Ansätze gelten bisher die Bodenwäsche sowie die thermische Behandlung, beides off-site-Massnahmen. Eine Übersicht des aktuellen Wissensstands findet sich in Anhang 4 «Zusammenfassung Sanierung von PFAS-kontaminierten Standorten» (Anhang 4). Die ausführliche Zusammenstellung der Literaturrecherche (Excel) kann auf Anfrage beim BAFU bezogen werden.

17. Sicherung als Sanierungsmassnahme

Eine Sicherung wird – im Vergleich zu anderen Sanierungsmethoden wie Aushub etc. – oft als kostengünstigere bzw. verhältnismässige Massnahme in Betracht gezogen. Eine Massnahme zur Reduktion der Mobilität kann beispielsweise eine Versiegelung oder auch eine Immobilisierung sein. Wesentliches Kriterium dazu ist die Nachhaltigkeit: eine Sicherung kann nur als nachhaltig bewertet werden, wenn der Sanierungsbedarf auch nach Wegfall der technischen Sicherungsmassnahmen durch Alterung derselben über die 1-2 Generationen hinaus nicht mehr besteht. Dies ist in der Regel durch einen natürlichen Abbau oder durch langsames Auswaschen gegeben. Auch für Immobilisierungen (Spezialfall einer Sicherung) ist die Langzeitwirkung von Bedeutung.

Diese Anforderungen sind für PFAS bisher aber noch nicht ausreichend bewertbar oder nachweisbar. Eine Immobilisierung kann deswegen derzeit nicht als nachhaltige Sanierungsmethode in Betracht gezogen werden. Auch eine nennenswerte Auswaschung ist allenfalls nur für kurzzeitige PFAS zu erwarten.

➔ **Deswegen kann eine Sicherung bei PFAS-Belastungen immer nur temporär sein und stellt somit keine vollwertige Sanierungsmassnahme dar.**

Als Sofortmassnahme zur Verhinderung eines relevanten Impacts auf ein Schutzgut kann eine Sicherung aber sinnvoll sein, beispielsweise wenn mittelfristig ein Aushub geplant ist. Auch wenn aktuell keine andere Massnahme zielführend scheint, ist im Einzelfall abzuklären, ob eine Sicherung eine sinnvolle Zwischenlösung mit absehbarem Zeithorizont darstellt. Selbst als Sofortmassnahme sind die üblichen Aspekte (Beeinträchtigung/Gefährdung, Dringlichkeit, Kosten, Grundbelastungen, Folgen einer Zustandsänderung u.v.a.) zu prüfen.

Da sich der Stand der Technik bzgl. Behandlungs-/Entsorgungsmethoden in den nächsten Jahren vermutlich stark weiterentwickeln wird, stehen Zwischenlager oder Monodeponien als mittelfristige Zwischenlösung zur Diskussion. Dabei ist zu bedenken, dass diese mit der Zeit zu Kapazitätsengpässen führen und das eigentliche Problem der Entsorgung nur zeitlich hinausgezögert wird. Deswegen könnte je nach Dringlichkeit der Sanierung ein Zuwarten mit den Sanierungsmassnahmen besser sein als ein Zwischenlager.

18. Mögliche Kriterien für einen Sanierungsunterbruch

*Hinweis: wenn **nach** bereits durchgeführten Sanierungsmassnahmen, welche aber nicht ausreichend erfolgreich waren, temporär, d.h. vorerst auf weitere Sanierungsmassnahmen verzichtet wird, spricht man von einem «Sanierungsunterbruch». Ein Aufschub von Sanierungsmassnahmen («Sanierungsaufschub») vor der Durchführung erster Sanierungsmassnahmen ist dagegen über die Dringlichkeit gemäss Art. 15 AltIV zu beurteilen und in der Regel mit zusätzlichen Anforderungen (z.B. periodische Überprüfung möglicher Sanierungsmassnahmen) verbunden. Ein Sanierungsaufschub entspricht daher dem üblichen Vorgehen bei Altlastenbearbeitungen und ist nicht Gegenstand der nachfolgenden Diskussionen.*

Auf Grund ihrer Eigenschaften stellen PFAS hohe Anforderungen an eine erfolgreiche Sanierung dar. Das Problem, dass mit einem verhältnismässigen Aufwand die Sanierungsziele gemäss AltIV nicht erreicht werden, ist auch bei anderen Schadstoffen wie beispielsweise CKW bekannt und wurde im Rahmen des Projektes ChloroNet ausführlich diskutiert (vgl. BAFU-Vollzugshilfe «Umgang mit CKW-

Standorten»¹¹). Gemäss Art. 15 AltIV ist dann eine Anpassung des Sanierungsziels zu prüfen. Eine Lösung kann in Einzelfällen ein Sanierungsunterbruch sein: der Standort muss zwar – trotz bereits durchgeführter Sanierungsmassnahmen – auf Grund der Schutzgutgefährdung weiterhin als sanierungsbedürftig klassiert werden, weitere Massnahmen werden aber vorerst nicht durchgeführt. Dazu wurden speziell für CKW-belastete Standorte 19 Kriterien aufgestellt, welche zur Beurteilung eines Sanierungsunterbruchs herangezogen werden können. Anforderungen für dieses Vorgehen und die 19 Kriterien, welche sich in der Praxis bereits bewährt haben, sind in der oben erwähnten BAFU-Vollzugshilfe «Umgang mit CKW-Standorten» beschrieben.

Auch für PFAS-Belastungen bieten **einige der 19 Kriterien eine gute Hilfestellung** für eine Beurteilung der Verhältnismässigkeit von zusätzlichen Sanierungsmassnahmen (z.B. Bedeutung des Schutzgutes hinsichtlich seiner Nutzbarkeit, bisheriger Sanierungserfolg, bauliche Massnahmen). Für andere der 19 Kriterien müssen für eine Beurteilung aber konkrete Werte vorliegen, welche derzeit für PFAS noch nicht abgeleitet werden können (z.B. wann ist ein Schadstoffpotenzial oder eine Fracht hoch/tief?).

Fazit

Zur Beurteilung eines Sanierungsunterbruchs bei PFAS-belasteten Standorten kann die Liste mit den CKW-Kriterien derzeit als Hilfestellung im Sinne einer Check-Liste betrachtet werden, damit keine wesentlichen Aspekte vergessen gehen. Eine Anpassung einzelner Kriterien auf PFAS wird später bei ausreichender Datenlage erfolgen.

19. Bauvorhaben auf PFAS-belasteten Standorten

Bei Bauvorhaben besteht häufig ein erhöhter zeitlicher Handlungsbedarf, vor allem aus wirtschaftlichen Gründen. Wichtigste Anforderung dabei ist die Einhaltung von Art. 3 AltIV, welcher besagt, dass eine spätere Sanierung nicht wesentlich erschwert werden darf. Dies kann im Fall von PFAS zu einem deutlich höheren Arbeitsaufwand und damit entsprechenden Kosten führen. Bauvorhaben auf PFAS-belasteten Standorten müssen daher grundsätzlich als anspruchsvoll betrachtet werden.

Wie bei anderen Schadstoffen können auch bzgl. PFAS spezielle Anforderungen für die Erteilung der Baubewilligung gestellt werden (beispielsweise Zielwerte, begleitende Massnahmen etc.). Diese sind aber jeweils standortspezifisch im Einzelfall zu formulieren.

Fazit

Ein besonderes Vorgehen für PFAS-Standorte im Rahmen von Bauvorhaben ergibt sich nach derzeitigem Wissensstand nicht. Wichtigste Anforderung ist und bleibt die Einhaltung von Art. 3 AltIV.

¹¹ <https://www.bafu.admin.ch/uv-1833-d>

III. Abfallrechtliche Aspekte

Die nachfolgenden Kapitel sind in die folgenden **Themenbereiche** eingeteilt:

- **Situation PFAS-Belastung**
- **Behandlung**
- **Verwertung**
- **Ablagerung**

Situation PFAS-Belastung

20. Ausgangslage hinsichtlich Abfallentsorgung

Im abfallrechtlichen Bereich sind durch den Umgang mit PFAS-haltigen Abfällen neben dem ursprünglichen Abfallverursacher oder Standortinhaber auch weitere Akteure wie Entsorgungsunternehmen oder Abfallanlagenbetreiber etc. unmittelbar betroffen. Entsorgungslösungen sollen umweltverträglich, technisch machbar und wirtschaftlich tragbar sein. Dabei sind in Anbetracht der Persistenz der PFAS deren Eliminierungsgrad und bei Abfallablagerungen der erforderliche Langzeitunterhalt entscheidend mitzubedenken.

Es ergibt sich folgende Ausgangslage:

- Es fehlen PFAS-Richt- und Prüfwerte für Bodenbelastungen und PFAS-Grenzwerte im Abfallbereich auf Verordnungsebene.
- Der Überblick über die PFAS-Belastung in den verschiedenen Abfällen ist beschränkt.
- PFAS werden kantonale sehr unterschiedlich in den Untersuchungen berücksichtigt.
- Der vom BAFU hergeleitete altlastenrechtliche Konzentrationswert nach Anhang 1 AltIV von 50 ng TEQ/l (siehe Kapitel 3) ist auf Grund des risikobasierten Ansatzes sinnvoll. Allerdings wären die darauf basierend hergeleiteten Feststoffgrenzwerte niedriger als die bereits vorhandene Grundbelastung in Schweizer Oberböden (siehe Kapitel 7).
- Die robuste Bestimmungsgrenze für PFAS in Feststoffen von 0.1 µg/kg ergab sich erst in jüngerer Vergangenheit. Deshalb wurde für die bisherige Entsorgungsbeurteilung bei vielen Untersuchungen eine hohe Bestimmungsgrenze (1 µg/kg oder höher) oder das Eluat herangezogen.
- Es gibt eine PFAS-Grundbelastung im Oberboden; kein Oberboden ist frei von PFAS. Dies kann Konsequenzen für die Verwertung von Boden haben, die aber erst mit Festlegung eines Richt- und Prüfwerts nach VBBo klar werden.
- Erste Untersuchungen zeigen, dass Sickerwässer von Deponien teilweise stark mit PFAS belastet sind. Dies betrifft nicht nur Deponien des Typs E, sondern auch des Typs B und C sowie ältere Deponien. Die Ursachen dafür sind nicht klar.

Die nachfolgenden Lösungsansätze und Vorgaben beziehen sich auf den aktuellen Wissensstand und sind bei neuen Erkenntnissen jeweils zu überprüfen.

21. Vorläufige Kenntnisse über PFAS-Belastungen in Deponien

In vielen Kantonen sind PFAS derzeit noch nicht im Überwachungsprogramm enthalten, deshalb fehlen Daten, um die Situation schweizweit ausreichend beurteilen zu können. Auf Grund der Bedeutung des Themas PFAS wird sich diese Situation schrittweise ändern.

Erste Untersuchungen zeigen aber, dass PFAS-Belastungen in Deponien generell eine Bedeutung zukommt. Vorliegende Beispiele (nicht abschliessend):

- Kanton ZH: 25 Deponien bzw. -kompartimente verschiedenster Art wurden auf ihren PFAS-Konzentrationen im Sickerwasser überprüft¹². Fast in allen Sickerwässern wurden PFAS gefunden, bei der Mehrheit wurde eine Überschreitung des 10fachen Konzentrationswertes AltIV, also von 500 ng TEQ/l festgestellt.
- Kanton TG: bei 3 von 11 Deponien des Typ B wurde im Deponiesickerwasser ein Wert von 500 ng TEQ/l überschritten.
- Kanton TI: Bei mehreren alten Kehrichtdeponien wurden PFAS im Sickerwasser detektiert.
- Kanton VS: Das Sickerwasser einer neuen Deponie, auf welcher nur analytisch untersuchtes Aushubmaterial (Konzentration im Eluat < 50 ng TEQ/l) abgelagert wurde, zeigt schliesslich Konzentrationen von über 50 ng TEQ/l.

Diese Beispiele zeigen, dass nicht nur ehemalige, sondern auch neue, in Betrieb stehende Deponien der Typen B bis E von PFAS-Belastungen betroffen sind.

Unbekannt ist derzeit, welche Abfallarten zu den teilweise hohen Sickerwasserbelastungen führen. Auf Grund der hohen Heterogenität von Deponiematerial sowie der erschwerten Rückverfolgbarkeit bei älteren Deponien wird eine Untersuchung des Deponiematerials als wenig zielführend beurteilt. Dagegen sollen grössere, einheitlichere Abfallströme (z.B. Schlacken) auf ihren PFAS-Gehalt untersucht werden.

Aufnahme von PFAS in Deponie-Monitoringprogramme

Zuständig für die Festlegung der Deponie-Monitoringprogramme sind die kantonalen Bewilligungsbehörden. Das Programm kann sich nach dem Vollzugshilfe-Modulteil «Gefährdungsabschätzung bei Deponien»¹³ richten. Dabei besteht die Möglichkeit, spezifische Schadstoffe wie PFAS ins Monitoringprogramm aufzunehmen. Die Parameterliste in der genannten Vollzugshilfe soll bei der nächsten Überarbeitung entsprechend ergänzt werden.

Fazit

Die Überprüfung des Deponiesickerwassers auf PFAS ist wichtig für die Beurteilung der Gesamtsituation. Deshalb sollen PFAS in die Deponie-Monitoringprogramme aufgenommen werden (vgl. auch Vollzugshilfe-Modulteil «Gefährdungsabschätzung bei Deponien»).
Kenntnisse über die Herkunft der PFAS-Belastungen in Deponien sind am ehesten durch die Analy-

¹² https://www.zh.ch/content/dam/zhweb/bilder-dokumente/themen/umwelt-tiere/abfall-rohstoffe/abfall-wirtschaft/publikationen/deponien/bericht_deponiesickerwasser.pdf

¹³ <https://www.bafu.admin.ch/uv-1826-d>

tik «homogener» Abfälle grosser Mengen (z.B. KVA-Schlacke, Mischabbruch etc.) oder durch Untersuchungen bei neuen Deponien mit bekanntem Abfallinventar zu erhalten. Solche Untersuchungen sind anzugehen.

22. Konsequenzen der festgestellten PFAS-Belastungen für die Klassierung des Abfalls und die Entsorgungswege

Folgende Fakten bilden die Ausgangslage für eine Abfallklassierung¹⁴ sowie für mögliche Entsorgungswege (Grundlagen dazu siehe vorangegangene Kapitel):

- Da es sich bei PFAS um künstliche, vom Menschen hergestellte und in die Umwelt gebrachte Schadstoffe handelt, gilt die Bestimmungsgrenze als Unterscheidung zwischen unverschmutzt und verschmutzt. Sie beträgt für PFAS derzeit 0.1 µg/kg je Einzelstoff.
- Die ubiquitären Belastungen des Oberbodens wurden durch umfangreiche Messkampagnen belegt. Daraus kann eine Grundbelastung des Oberbodens abgeleitet werden. Deren Obergrenze wird mit 5 µg/kg (ΣPFAS) festgeschrieben (vgl. Kap. 7).
- Eine analytische Beprobung von Oberboden auf PFAS findet nur bei gegebenen Verdachtsmomenten statt. Eine generelle Pflicht zur PFAS-Analytik wird trotz Grundbelastung nicht als verhältnismässig angesehen.
- Im Gegensatz zum Oberboden konnte im Unterboden sowie im mineralischen Untergrund keine ubiquitäre PFAS-Grundbelastung festgestellt werden (vgl. Kap. 8).
- Gemäss VBBo gelten Böden, deren Schadstoffgehalte die Richtwerte einhalten, aus bodenchemischer Sicht als verwertbar und müssen gemäss VBBo und VVEA möglichst vollständig verwertet werden. Bisher gibt es noch keinen Richt- oder Prüfwert nach VBBo für PFAS.
- Bisherige Vergleichsmessungen zwischen Feststoff- und Eluatgehalten (vgl. Kap. 6) lassen darauf schliessen, dass bereits bei einem Gehalt von 5 µg/kg (ΣPFAS) toxikologisch kritische Konzentrationen im Sickerwasser auftreten können, welche ein Mehrfaches über dem aktuellen Konzentrationswert gemäss AltIV liegen.
- Daraus ergibt sich, dass Material mit einer PFAS-Belastung über 5 µg/kg (ΣPFAS) nicht für eine Ablagerung auf einer Deponie geeignet ist. Andernfalls müsste das Sickerwasser vor einer Einleitung in die Kanalisation oder in ein Gewässer allenfalls über Jahrzehnte hinaus mit Aktivkohle oder vergleichbar aufwändigen Verfahren vorbehandelt werden.

Abgetragener Oberboden

Da nur bei gegebenen Verdachtsmomenten analytisch auf PFAS beprobt wird, werden in den meisten Fällen keine chemischen PFAS-Analysen durchgeführt. Abgetragener Oberboden wurde bzw. wird deshalb zumindest mit PFAS-Grundbelastung verwertet. Nicht verwertbarer respektive überschüssiger Oberboden, der keine organoleptischen Auffälligkeiten aufweist, wird auf A- oder B-Deponien

¹⁴ [Klassierung von Bauabfällen \(ohne Holzabfälle und metallische Abfälle\) sowie Abfälle aus der Behandlung von Bauabfällen \(admin.ch\)](#)

abgelagert. Auch Böden, die als schwach bzw. wenig belastet klassiert werden und nicht vor Ort verwertet werden können, gelangen auf Deponien des Typs B. Es ist davon auszugehen, dass in der Vergangenheit auf diesen Deponie-Typen bereits nennenswerte Massenströme von Oberboden mit einer gewissen PFAS-Belastung abgelagert wurden.

Unterboden und mineralischer Untergrund (B- und C-Horizont)

Für die Zulassung des Abfalls in einer Deponie gilt der jeweilige Grenzwert eines Schadstoffs gemäss VVEA, unabhängig ob es sich um belasteten Boden oder mineralischen Untergrund oder andere Abfälle handelt. Deswegen gilt auch für Unterboden und mineralischen Aushub, dass bis zu einem PFAS-Gehalt von 5 µg/kg (Σ PFAS) eine Deponierung grundsätzlich möglich ist. Die Anforderung zur Trennung der Bauabfälle gemäss Art. 17 Abs. 1 VVEA ist aber immer zu beachten. Bei Bauarbeiten ist also die Separation von abgetragenen Ober- und Unterboden einerseits und Aushubmaterial andererseits vorzunehmen. Dem kommt aufgrund der PFAS-Grundbelastung im Oberboden besondere Bedeutung zuteil.

Für die Zulassung der Ablagerung auf einer Deponie des Typs A nennt die VVEA eine abschliessende Liste von grundsätzlich als unverschmutzt eingeschätzten Abfällen. Namentlich sind für Boden die VBBo-Richtwerte einzuhalten und für mineralisches Aushubmaterial soll dessen Unverschmutztheit bestätigt werden können. Wegen des Verwertungsanspruchs an die Ressource Boden, der die VBBo-Richtwerte einhält, sollte in der Regel kein Boden auf Typ-A-Deponien abgelagert werden¹⁵. Diese Prämisse wird wegen der PFAS-Grundbelastung umso wesentlicher, denn die Akkumulation von PFAS ist gerade in Deponien des Typs A aus Sicht Gewässerschutz nicht ideal. Dagegen ist die Situation im Fall von nicht verwertbarem, «unverdächtigem» bzw. nachweislich unverschmutztem Aushubmaterial anders. Da sich gezeigt hat, dass im Untergrundmaterial (inkl. B-Horizont) nahezu keine Grundbelastung besteht, sollten keine PFAS-bedingten Probleme auftreten.

Fazit

- **Eine Analyse auf PFAS erfolgt nur, wenn ein spezifischer Verdacht besteht. Andere Analysen erfolgen weiterhin nach Massgabe von Anh. 5 Ziff. 2.3 bzw. Ziff. 5.2 VVEA. Dies entspricht dem üblichen Vorgehen wie auch bei anderen Schadstoffen.**
- **Die Bestimmungsgrenze im Feststoff für PFAS liegt derzeit bei 0.1 µg/kg je Einzelstoff. Aushub und Ausbruchmaterial, welches diesen Wert (so genannter «U-Wert») einhält, gilt abfallrechtlich als unverschmutzt nach Anh. 3 Ziff. 1 VVEA.**
- **Ein Richtwert für PFAS gemäss VBBo für Oberboden existiert derzeit nicht, dessen Verwertung ist somit erschwert.**
- **Unterschiedliche Werte für Oberboden einerseits und mineralisches Aushubmaterial andererseits im Hinblick auf die Zulassung zur Ablagerung wird als schwierig zu vollziehen erachtet.**
- **Daher kann Boden und Aushubmaterial mit einer PFAS-Belastung bis zu 5 µg/kg (ungewichteter Summenwert) abgelagert werden (siehe Kapitel 26).**

¹⁵ Vorbehältlich physisch oder durch invasive gebietsfremde Organismen beeinträchtigter Boden (vgl. [Beurteilung von Boden im Hinblick auf seine Verwertung \(admin.ch\)](#))

- Bei Bauarbeiten ist die Trennung von abgetragenen Ober- / Unterboden und mineralischem Aushubmaterial (Art. 17 Abs. 1 VVEA) auch im Sinne der prioritären Verwertung vorzunehmen.
- Da unverschmutztes mineralisches Aushubmaterial ohne Verdachtsmomente keine nennenswerte PFAS-Grundbelastung aufzuweisen scheint, kann es auf einer Deponie Typ A abgelagert werden. Die Ablagerung ist jedoch nur zulässig, wenn eine Verwertung nicht möglich ist (Art. 17 Abs. 1 Bst. b VVEA).
- Material mit einer PFAS-Belastung > 5 µg/kg ist zu behandeln.

Behandlung

Material mit einer PFAS-Belastung über 5 µg/kg (Σ PFAS) darf nicht auf einer Deponie abgelagert und muss somit behandelt werden. Gemäss bisherigem Kenntnisstand gelten für belastetes Aushubmaterial momentan die Methoden der Bodenwäsche sowie der thermischen Behandlung am ehesten als erfolgsversprechend (vgl. auch Kapitel 16).

23. Bodenwäsche

Mit der Behandlungsmethode der Bodenwäsche gelangen Schadstoffe ins Washwasser oder werden in der Feinfraktion aufkonzentriert. 2022/2023 wurden Waschversuche mit PFAS-belastetem Material in zwei Bodenwaschanlagen in den Kantonen TG und ZH durchgeführt. Zudem wurde ein Pilotversuch von den beiden Kantonen TG und ZH begleitet. Nachfolgend sind die wichtigsten Aspekte und Erkenntnisse aufgeführt:

- Bisher wurde vor allem Material mit geringer bis mittlerer PFAS-Belastung gewaschen (von 3 - 11 µg/kg (Σ PFAS)). Gemäss ersten Resultaten ist für die meisten Fraktionen ein Behandlungsziel von 1.0 µg/kg (Σ PFAS) erreichbar (mittel- und grobkörnige, teilweise auch feinkörnige Fraktionen).
- Bei einem Versuch mit einer PFAS-Belastung von > 300 µg/kg (Σ PFAS) konnte in den meisten Fraktionen eine Abreicherung auf < 2.5 µg/kg (Σ PFAS) erreicht werden.
- Weitere Versuche mit stärker belastetem Material sind geplant. Hierbei soll auch der Einfluss von Fremdstoffen sowie organischem Anteil auf den Behandlungserfolg untersucht werden.
- Gemäss ihren Beobachtungen gingen beide Betreiber davon aus, dass schweizweit bis zu 100'000 t/a PFAS-belastetes Material anfallen werden. Die Kapazität der Bodenwaschanlagen wäre dafür ausreichend.
- Die grösste Entfrachtung findet erwartungsgemäss durch Aufkonzentrierung von PFAS in den Filterkuchen statt. Dieser muss anschliessend thermisch behandelt werden. Für diesen erwarteten zukünftigen hohen Massenstrom ist eine ausreichende Kapazität der thermischen Behandlung erforderlich.
- Die Entfrachtung ins Prozesswasser soll weiter optimiert werden. Für die Behandlung des PFAS-belasteten Prozesswassers sind ausreichende Aktivkohlefilter oder andere Behandlungsstufen erforderlich.

Fazit

Die bisherigen Versuche zeigen, dass die Bodenwäsche eine machbare Behandlungsmethode für PFAS-belastetes Material darstellt mit dem Effekt der Reduktion zu beseitigender Materialmengen. Ein Zielwert im Bereich von 1.0 µg/kg (Σ PFAS) erscheint für einen Grossteil der erhaltenen Fraktionen realistisch. Weitere Versuche mit unterschiedlichen Materialien und Belastungen sind erforderlich.

24. Thermische Behandlung und Verwertung

Die thermische Behandlung ist für stark PFAS-belastetes Material ein wesentlicher Entsorgungsweg – unter der Bedingung, dass die PFAS dabei zerstört oder unumkehrbar umgewandelt werden und weder eine Umwelt- noch Gesundheitsgefährdung verursacht wird. Sie wird für die zukünftigen Materialströme Filterkuchen aus der Bodenwäsche von grosser Bedeutung sein. Das thermisch behandelte mineralische Material kann anschliessend verwertet werden.

Thermische Bodenbehandlungsanlage / Desorptionsanlage

Nach einer mechanischen Vorbehandlung wird das mineralische Material in einem Drehrohrofen bei bis zu 560 °C unter Sauerstoffmangel und mit einer Verweilzeit von rund 20 Minuten thermisch behandelt. Schadstoffe werden zerstört respektive in die Gasphase überführt. Schliesslich folgt eine mehrstufige Abgasreinigung mit Entstaubung, thermischer Nachverbrennung, Waschstufe und Festbettadsorber. Die in der Schweiz bestehende thermische Bodenbehandlungskapazität ist gering und aktuell vorwiegend für die Behandlung von Quecksilber-Kontaminationen ausgelastet, so dass ausländische Anlagen angesteuert werden. Gesuchsteller für einen Export müssen nachweisen, dass die vorgesehene Entsorgung umweltverträglich ist und die Anforderungen an die Umweltverträglichkeit nach schweizerischem Umweltrecht einhält. Exportbewilligungen für die Behandlung von PFAS-belastetem mineralischem Material in ausländische thermische Bodenbehandlungsanlagen konnten schon ausgestellt werden. Die Bedingungen des BAFU für den Export, in Abhängigkeit der Anlagenkonfiguration, waren:

- PFAS-Gehalt (Summenwert) der Abfälle limitiert auf 1 mg/kg
- Temperatur bei der Nachverbrennung der PFAS-haltigen Abfälle 1200 °C .

Zementwerk

Im Zementwerk kann Aushubmaterial nach entsprechender Vorbereitung (Brechen, Mahlen) in das Drehrohr der Anlage eingebracht und bei Temperaturen von rund 1400 °C zu Klinker gebrannt werden. Da die Rohmehlzugabe grundsätzlich von der «kalten Seite» her erfolgt, PFAS jedoch erst ab einer Temperatur von >1000 °C zerstört werden, muss die Verwertung für PFAS-belastetes Material entweder von der «heissen Seite» her erfolgen, also bei der Hauptfeuerung, oder die Abluft müsste bei >1000 °C nachverbrannt werden. Erste Versuche im Zementwerk der Holcim im Kanton AG hatten im Winterhalbjahr 2022/23 begonnen. Inzwischen – Stand Juni 2024 – erhielt das Zementwerk die Bewilligung für die Aufgabe von PFAS-haltigen Schlämmen über der Flamme am Ofenkopf. Die wesentlichen Rahmenbedingungen sind:

- Nur Aufgabe über Flamme am Ofenkopf, Temperaturen 1100 bis 2000 °C, ~ 30 sec
- Pumpfähiger Schlamm max. PFAS-Gehalt (Summenwert) von 500 µg/kg TS
- Monitoring (Abgas, Boden)

- Limitierte Jahrestonnage für Filterkuchen und Schlämme (Strassensammlerschlämme und PFAS-belastetes Material)

Die erfolgte Bewilligung ist anlagenspezifisch und basiert auf Artikel 10 VeVA in Verbindung mit Artikel 24 Absatz 1 und Anhang 4 Ziffer 4.2 VVEA.

In der Folge ist darauf zu achten, dass die jeweiligen Annahmebedingungen von Entsorgungsanlagen auch in denjenigen Kantonen bekannt sein müssen, welche Entsorgungskonzepte mit Abfallanlieferungen in ausserkantonalen Anlagen genehmigen müssen. Das Vorhandensein der Bewilligung für die Annahme von PFAS-Abfällen bei ausserkantonalen Anlagen ist vorgängig abzuklären.

Fazit

Eine erste Bewilligung für die Verwertung von PFAS-belastetem, mineralischem Material in einem schweizerischen Zementwerk ist erteilt (Stand Juni 2024). Diese ist anlagenspezifisch und mit entsprechenden Auflagen ausgestaltet.

Verwertung

25. T-Wert und bedingte Verwertung

Aushub- und Ausbruchmaterial mit sogenannter tolerierbarer Verschmutzung (T-Material, Anh. 3 Ziff. 2 VVEA) ist zu verwerten. In Art. 19 Abs. 2 VVEA sind dazu vier Verwertungsmöglichkeiten aufgeführt. Der T-Wert wird in der Regel vom Grenzwert für Deponietyp B abgeleitet und liegt im Bereich des halben B-Wertes. T-Material kann zudem bzgl. Herkunft unterschieden werden: einerseits unbehandeltes Aushubmaterial und andererseits Fraktionen aus einer Behandlung (beispielsweise Bodenwäsche) jeweils mit entsprechender analytischer Beprobung. Bei der Behandlung von PFAS-belastetem Material in einer Bodenwaschanlage ist gemäss Anlagenbetreibern nach aktuellem Stand ein Wert von 1 µg/kg (Σ PFAS) erreichbar (siehe Kapitel 23). Dokumentierte, tatsächliche Leistungen von Anlagen über den ganzen Mengen- und PFAS-Belastungsfluss liegen hier nicht vor, aber allenfalls dann nach Abschluss der Versuchsphasen. Bis zu einer definitiven Festlegung abfallrechtlicher Grenzwerte in der VVEA erfordert die Anwendung eines solchen eine Zustimmung des BAFU im Einzelfall. Aktuell wird vom BAFU einem T-Wert von 2.5 µg/kg (Σ PFAS) zugestimmt. Kantone können einen tieferen Wert festlegen.

Im Fall von PFAS muss wegen der hohen Toxizität und Mobilität gewisser PFAS-Einzelstoffe die Umsetzbarkeit der Verwertungswege differenziert beurteilt und realisiert werden. Eine **Verwertung als hydraulisch gebundener Baustoff** (Art. 19 Ziff. 2 Bst. a VVEA, wobei hier nur hydraulisch gebunden anzuwenden ist) sowie als **Deponiebaustoff** (Art. 19 Ziff. 2 Bst. b) wird bis zu einem Wert von 2.5 µg/kg (Σ PFAS) als akzeptabel erachtet. Bei höherem Wert empfiehlt sich eine situative Überprüfung tolerierbarer Verwertung. Die Verwertung als bituminös gebundener Baustoff ist bis zu diesem Zeitpunkt in keiner Anlage zulässig (Art. 19 Ziff. 2 Bst. a VVEA). Die Verwertung als Rohmaterial für Zementklinker in einem Zementwerk ist in der Schweiz bis zu diesem Zeitpunkt in einem Werk, per Zugabe über der Flamme am Ofenkopf, anlagenspezifisch bewilligt. Es handelt sich dabei quasi um die Kombination einer thermischen Behandlung und stofflichen Verwertung des PFAS-Materials. Möglichkeiten ergeben sich auch mit dem Export in ausländische Desorptionsanlagen.

Bei einer **direkten Verwertung vor Ort** (Art. 19 Ziff. 2 Bst. d VVEA) können Belastungen im Bereich von 2.5 µg/kg (ΣPFAS) je nach Situation am Standort (Geologie/Hydrogeologie) unerwünschter Weise zu einem altlastenrechtlichen Handlungsbedarf führen (siehe Abschätzungen Korrelation Feststoff-Eluat in Kapitel 6). Eine direkte Verwertung vor Ort ist daher im Rahmen einer Gefährdungsabschätzung vorgängig situativ zu prüfen.

Fazit

- **Aktuell stimmt das BAFU für PFAS einem T-Wert von 2.5 µg/kg (ΣPFAS) zu (vgl. Kapitel 4). Kantone können einen tieferen T-Wert festlegen und machen teilweise davon Gebrauch.**
- **Die Verwertung von PFAS-belastetem mineralischem Material als hydraulisch gebundener Baustoff oder als Deponiebaustoff (Art. 19 Ziff. 2 Bst. a und b VVEA) ist mit diesem T-Wert von 2.5 µg/kg (ΣPFAS) situativ möglich, je nach konkretem Verwertungsweg.**
- **Bei einer direkten Verwertung von mineralischem Aushub vor Ort (Art. 19 Ziff. 2 Bst. d VVEA) bis zu einem T-Wert von 2.5 µg/kg (ΣPFAS) ist sicherzustellen, dass daraus kein altlastenrechtlicher Handlungsbedarf resultiert.**
- **Eine stoffliche Verwertung bituminös gebunden ist vorderhand nicht zulässig (Art. 19 Ziff. 2 Bst. a VVEA).**
- **Die Verwertung von PFAS-belastetem mineralischem Material als Rohmaterialersatz wird anlagenspezifisch bewilligt und ist zum Zeitpunkt in der Schweiz in einem Zementwerk möglich (von heisser Seite über Flamme) oder über Exportbewilligung in eine geeignete Anlage im Ausland.**

Ablagerung

26. Grenzwerte für die Ablagerung von Abfällen

Hinweis: Die Einstufung der Abfälle erfolgt – in Analogie zu den anderen Schadstoffen – anhand der Feststoffgehalte. Als Unterstützung zur Beurteilung des Gefährdungspotenzials können auch Eluatwerte herangezogen werden. Eine verlässliche Korrelation zwischen Gehalt und Eluat kann nach bisheriger Erfahrung für den PFAS-Summenwert in vielen Fällen nicht hergestellt werden.

Eckpunkte für abfallrechtliche Grenzwerte

Die robuste Bestimmungsgrenze eines nicht geogen vorkommenden, künstlichen Schadstoffes ergibt den Grenzwert für unverschmutztes Material (U-Wert, siehe auch Kapitel 22). Da die Bestimmungsgrenze für PFAS 0.1 µg/kg je Einzelstoff beträgt, gilt Material, welches diesen Wert einhält, abfallrechtlich als unverschmutzt im Sinne von Anh. 3 Ziff. 1 VVEA.

Die Grundbelastung im Oberboden von bis zu 5 µg/kg (ΣPFAS) hat zur Folge, dass bereits heute Material mit Gehalten bis zu dieser Grundbelastung auf Deponien liegt. Zudem können dort auch andere

abgelagerte Abfälle zur PFAS-Gesamtbelastung beitragen, waren doch Abfälle ohne spezifischen Verdacht bis unlängst kaum auf PFAS analysiert worden. Da bereits bei einem PFAS-Gehalt ab 5 µg/kg (Σ PFAS) toxikologisch kritische Eluate resultieren können (siehe Kapitel 6), besteht kein Spielraum, um Material mit PFAS-Gehalt über 5 µg/kg auf Deponien abzulagern. Insofern stimmt das BAFU für die Ablagerung von PFAS-belastetem Material auf Deponien des Typs E derzeit einem Wert von 5 µg/kg (ungewichtete Σ PFAS) zu. Material mit einer PFAS-Belastung > 5 µg/kg ist dagegen zu behandeln.

- **U-Wert für PFAS: 0.1 µg/kg je Einzelstoff**
- **Grenzwert für Deponien Typ E: 5 µg/kg (ungewichtete Σ PFAS)**

Diskussion des Grenzwertes für Deponien Typ B

Für die Diskussion eines Grenzwertes für Deponien Typ B ist die ubiquitäre Belastung im Oberboden einerseits, sowie deren Fehlen im Unterboden und Untergrund andererseits von Bedeutung. Dazu wurde unter anderem geprüft, ob zur Einschränkung der PFAS-Akkumulation in Deponien des Typs B unterschiedliche Grenzwerte für Oberboden und für mineralischen Aushub postuliert werden sollen. Bei der Ablagerung von Abfällen und hinsichtlich der Belastung durch denselben Schadstoff sind unterschiedliche Grenzwerte je nach Abfallkategorie aber kaum vollziehbar, auch da die beiden Materialströme mitunter vermischt bei den Deponien angeliefert werden. Ein einheitlicher PFAS-Grenzwert für Deponien des Typs B ist deswegen zu favorisieren.

Typ B-Deponien unterliegen betreffend Gewässerschutz geringeren Standortanforderungen und haben meist keine Basisabdichtung, ergo soll ein entsprechender Grenzwert in der Regel tiefer sein als der Grenzwert für Abfälle auf Typ E-Deponien, welche eben abgedichtet sind. In Analogie zu anderen Schadstoffen erachtet eine Mehrheit der Arbeitsgruppe einen Typ B-Grenzwert für PFAS im Bereich von 1 µg/kg bis 2.5 µg/kg (Σ PFAS) als praktikabel und verhältnismässig.

Problematisch ist dies dann, wenn im Aushubmaterial grosse Anteile von Oberboden enthalten sind, welcher eine PFAS-Belastung von bis zu 5 µg/kg (Σ PFAS) aufweisen kann. In solchen Fällen müsste eine analytische Untersuchung auf PFAS durchgeführt werden, um sicherzustellen, dass das Material einen Typ B-Grenzwert im Bereich von 1 µg/kg bis 2.5 µg/kg (Σ PFAS) einhält. Diese Anforderung erachtet eine Mehrheit der Arbeitsgruppe als verhältnismässig, nicht zuletzt wegen des geltenden Trennungsgebots nach Art. 17 Abs. 1 VVEA.

Der T-Wert wird normalerweise vom Grenzwert für Deponietyp B abgeleitet und liegt im Bereich des halben B-Wertes. Somit würde sich gemäss Mehrheit der Arbeitsgruppe ein T-Wert von 0.5 µg/kg bis 1.25 µg/kg (Σ PFAS) ergeben. Unter Berücksichtigung der Messungenauigkeiten für den PFAS-Summenparameter wäre ein Wert von mindestens 1 µg/kg (Σ PFAS) angemessener, welcher nach bisherigen Erkenntnissen auch von den Bodenwaschanlagen erreicht werden kann.

Fazit

Eine analytische PFAS-Bestimmung ist wie bei anderen Schadstoffen nur beim Vorliegen entsprechender Verdachtsmomente erforderlich.

Die Mehrheit der Arbeitsgruppe schlägt vor, folgende Werte zu verwenden:

- **U-Wert: 0.1 µg/kg je Einzelstoff**

- T-Wert: 1.0 µg/kg (ungewichtete ΣPFAS)
- B-Wert: 2.5 µg/kg (ungewichtete ΣPFAS)
- E-Wert: 5.0 µg/kg (ungewichtete ΣPFAS)

Ergänzend ist zu beachten, dass bei dem von der Arbeitsgruppe favorisierten B-Wert von 2.5 µg/kg auch ohne spezifischen PFAS-Verdacht eine PFAS-Analytik erforderlich wäre, falls das angelieferte Aushubmaterial grosse Anteile von Oberboden aufweist.

Bis zu einer definitiven Festlegung und Aufnahme in die VVEA erfordert die Anwendung von abfallrechtlichen Grenzwerten eine Zustimmung des BAFU im Einzelfall. Seit Oktober 2022 und aktuell empfiehlt das BAFU folgende Werte zu verwenden:

- U-Wert: 0.1 µg/kg je Einzelstoff
- T-Wert: 2.5 µg/kg (ungewichtete ΣPFAS)
- B-Wert: 5.0 µg/kg (ungewichtete ΣPFAS)
- E-Wert: 5.0 µg/kg (ungewichtete ΣPFAS)

Das BAFU nimmt die Empfehlung der Mehrheit der Arbeitsgruppe zur Kenntnis, verzichtet aber im Moment darauf, seine B- und T-Werteempfehlung anzupassen. Aus Gründen der Rechtssicherheit sollen Grenzwerte nur dann verändert werden, wenn eindeutige sachliche Gründe dies rechtfertigen. Da zurzeit noch viele offenen Fragen zur Vollzugsfähigkeit der niedrigeren, von der Arbeitsgruppe präferierten Werte bestehen und etliche Abklärungen und Untersuchungen laufen, behält das BAFU seine Werteempfehlung vorerst bei. Zudem haben auch einige andere, nicht in den Arbeitsgruppen vertretene Kantone ebenfalls starke Vorbehalte gegenüber den niedrigeren T- und B-Werten geäussert. Im Rahmen der Umsetzung der Motion Maret «22.3929 - Festlegung von PFAS-spezifischen Werten in Verordnungen»¹⁶ wird das BAFU aber eine Neubeurteilung vornehmen und gegebenenfalls seine bisherige Werteempfehlung anpassen.

27. Umgang mit nicht verwertbarem überschüssigem Boden

Gemäss Verwertungsgebot soll unbelasteter abgetragener Boden nicht auf Deponietyp A gelangen¹⁷, sondern der direkten Verwertung als Boden möglichst vor Ort zugeführt werden. In der Praxis wird aber trotzdem Boden ohne spezielle Verdachtsmomente, sogenannter überschüssiger Boden, auf Deponietyp A abgelagert oder deklariert als «Verwertung» zur Wiederauffüllung von Kiesgruben und anderen Materialentnahmestellen verwendet. Problematisch ist dies, weil Boden gemäss heutigem Kenntnisstand eine PFAS-Grundbelastung aufweist. Mit der Ablagerung grösserer Mengen kann eine lokale Aufkonzentrierung der PFAS-Belastung resultieren. Da das Sickerwasser von Deponien des Typs A oder Kiesgruben in der Regel nicht gesammelt und überwacht wird, und solche Standorte meist in sensibleren Schutzgutbereichen liegen als andere Deponietypen, ist derzeit nicht bekannt, welche Auswirkungen aus diesen Ablagerungen bereits jetzt schon resultieren.

Damit ist grundsätzlich zu befürworten, dass nicht nur wegen der Verwertungspflicht, sondern auch wegen der hohen PFAS-Grundbelastung kein Bodenmaterial mehr auf die Deponien des Typs A gelangen soll. Ein generelles Verbot der Ablagerung von überschüssigem Boden in Deponien des Typs A

¹⁶ <https://www.parlament.ch/de/ratsbetrieb/suche-curia-vista/geschaefft?AffairId=20223929>

¹⁷ Vorbehältlich physisch oder durch invasive gebietsfremde Organismen beeinträchtigter Boden (vgl. Modul «Beurteilung von Boden im Hinblick auf seine Verwertung» der «Vollzugshilfe Bodenschutz beim Bauen» <https://www.bafu.admin.ch/uv-2112-d>)

wird aber nicht als zielführend angesehen. Denn dann ist zu befürchten, dass die Massenströme auf Deponien des Typs B umgeleitet werden, was aus Sicht des Ressourcenmanagements ebenfalls nicht erwünscht ist. Zudem müsste ein Typ A-Verbot über die Betriebsbewilligungen (Art. 40 Abs. 3 Bst. c VVEA) oder per VVEA-Änderung (Streichen von Anh. 5 Ziff. 1 Bst. c VVEA) veranlasst werden.

Da das Grundproblem in der zu geringen Verwertungsquote von Bodenmaterial bestehen dürfte, wird eine gezielte aktive Lenkung der Massenströme hin zur Verwertung als zwingend erforderlich erachtet. Dazu sind – unter Einbezug der zuständigen Fachstelle Bodenschutz – bessere Voraussetzungen für die Verwertung zu schaffen (Informationsfluss, «Bodenbörse», etc.).

Vollständigkeitshalber sei erwähnt, dass für die Ablagerung von mineralischem Aushub (Untergrundmaterial) ohne PFAS-Verdacht auf Deponietyp A keine Einwände bestehen, weil hier keine Grundbelastung vorhanden ist. Umso mehr ist bei Bauarbeiten die konsequente Trennung von abgetragenem Unter- und Oberboden einerseits und Aushubmaterial andererseits ganz wesentlich.

Fazit

- **Die Ablagerung von überschüssigem Boden auf Deponien Typ A ist möglichst zu vermeiden (PFAS-Grundbelastung sowie Verwertungsgebot gemäss VVEA).**
- **Ein Ablagerungsverbot von Bodenmaterial auf Deponietyp A wird derzeit nicht empfohlen. Vielmehr ist die Lenkung hin zur direkten Verwertung von Boden intensiv und aktiv zu fördern.**
- **Dazu muss die Thematisierung des Problems in den Kantonen mit der Vollzugsunterstützung der Bodenschutz-Fachstellen intensiviert werden.**
- **Unverschmutztes und nicht verwertbares Aushubmaterial ohne PFAS-Verdacht kann auf Deponietyp A entsorgt werden, da im mineralischen Untergrund keine PFAS-Grundbelastung vorhanden ist.**

28. Vollzug bei Planung, Genehmigung, Begleitung

Wegen der aktuell noch am Anfang stehenden Sanierungen und Entsorgungen von PFAS-belasteten Materialien befindet man sich derzeit in einer gewissen Versuchs- oder Konsolidierungsphase. Bisherige Entsorgungswege führen auch ins Ausland (vor allem zur thermischen Behandlung, teilweise mit Vorbehandlung). Zunehmend werden aber auch in der Schweiz Vorbehandlungen durch Bodenwäsche mit anschliessender Verwertung oder Ablagerung vorgenommen.

Das Entsorgungskonzept (Teil des Sanierungsprojektes sind Massnahmen zur Entsorgung der Abfälle, vgl. Art. 17 Bst. a AltIV) ist das wesentliche Element für die Steuerung und Begleitung der Entsorgung der Abfälle von Anfang bis Ende, die es in dieser Versuchsphase zwingend braucht. Wegen der bisher noch nicht ausreichenden Erfahrung bei PFAS ist auf einen besonderen Detaillierungsgrad zu achten (beispielsweise namentliche Angaben der entsorgenden Anlagen und Deponien). Schon in der Ausschreibung muss die PFAS-Situation berücksichtigt werden. Und zwar einzelfallbezogen und standortspezifisch.

Altlasten- und Abfallfachstellen müssen von den Fachbüros und Bauherren lückenlose, vollständige und transparente Entsorgungskonzepte einfordern und dies auch aktiv kommunizieren. Wünschenswert ist ausserdem ein besserer Einbezug der Bodenschutz-Fachstellen. Hauptverantwortlich ist der Standortkanton des belasteten Standorts, aber auch die Kantone der involvierten Entsorgungsanlagen respektive der schlussendlichen Deponien müssen in die Genehmigung des Entsorgungskonzepts einbezogen werden.

Das bisherige, in vielen Kantonen angewendete elektronische System für die Entsorgung (EGI) kann für die Nachverfolgung nützlich sein.

Abfallabgeber sowie Entsorgungsunternehmen müssen besser aufgeklärt werden, dass die Deklaration zu möglichen PFAS-Gehalten wichtig ist. Da vielfach die Klassierung nur über den VeVA-Code läuft, bleibt die PFAS-Belastung oft unersichtlich; die ergänzende Beschreibung des Abfalls beispielsweise auf dem VeVA-Begleitschein ist hier ganz wesentlich. Eine Aufnahme von PFAS-Anforderungen in die Betriebsbewilligung von geeigneten Behandlungs- und generell Entsorgungsanlagen ist von Vorteil.

Zwischenlager können nur als zeitlicher Puffer für Kapazitätsprobleme in Behandlungsanlagen dienen. Als «Warteraum für neue Technologien» sind sie dagegen nicht geeignet.

Fazit

- **Aktuell werden auf verschiedenen inländischen Anlagen Versuche zur Behandlung/Entsorgung von PFAS-belasteten Materialien durchgeführt. Hierzu ist in jedem Fall eine enge Begleitung durch die involvierten Vollzugsbehörden erforderlich (vgl. Art. 10 VeVA).**
- **Wegen der bisher noch fehlenden Erfahrung bei vielen Akteuren ist in den Entsorgungskonzepten besonders auf Vollständigkeit zu achten (namentliche Nennung der involvierten Anlagen / Deponien, nachweisliche Eignung der Anlagen).**
- **Zur Information aller Akteure (Abfallabgeber und Entsorger) ist eine durchgehende Deklaration der PFAS-Belastung der Abfälle erforderlich.**
- **Neben dem Standortkanton, woher die PFAS-belasteten Abfälle stammen, sind auch die Kantone der involvierten Anlagen/Deponien in die Bewilligung des Entsorgungskonzeptes mit einzubeziehen.**
- **Eine Aufnahme von spezifischen Anforderungen bzgl. PFAS in die Betriebsbewilligungen der jeweiligen Anlagen/Deponien ist wünschenswert.**

Anhang 1

Notiz zur Herleitung eines Toxizitätsgewichteten PFAS-Summenwertes als Konzentrationswert nach Anhang 1 AltIV, Stand 22.04.2024



Notiz zur Herleitung eines Toxizitätsgewichteten PFAS-Summenwertes als Konzentrationswert nach Anhang 1 AltIV¹

Bitte beachten:

Wenn für Stoffe, die Gewässer verunreinigen können und mit denen ein Standort belastet ist, keine Konzentrationswerte festgelegt, so legt die Behörde solche mit Zustimmung des BAFU im Einzelfall nach den Vorschriften der Gewässerschutzgesetzgebung fest (Anh. 1 Abs. 1 AltIV¹).

Für die Stoffgruppe der Per- und polyfluorierte Alkylverbindungen (PFAS) enthält die Altlasten-Verordnung keine Konzentrationswerte, sie sind demnach im Einzelfall herzuleiten. Vorgängig muss die Behörde dafür die Zustimmung des BAFU einholen.

Im nachfolgenden Text erläutert das BAFU die aus seiner Sicht und dem aktuellen Stand der Erkenntnisse folgend die Herleitung eines Toxizitätsgewichteten PFAS-Summenwertes. Dieser Wert ist jedoch nicht allgemeingültig, sondern muss gemäss obiger Bestimmung standortspezifisch von der zuständigen Behörde angeordnet werden.

Die Frage, wie PFAS im Rahmen der Altlastenbearbeitung zu beurteilen sind, wird seit einiger Zeit sehr intensiv und kontrovers diskutiert – nicht nur in der Schweiz. Die Motion 22.3929 von Ständerätin Marianne Maret «Festlegung von PFAS-spezifischen Werten in Verordnungen»² fordert den Bundesrat auf, in der Altlasten-Verordnung PFAS-spezifische Grenzwerte festzulegen. Im Folgenden wird beschrieben, wie das BAFU einen Konzentrationswert nach Anhang 1 AltIV für PFAS herleitet.

Leider liegen derzeit zu vielen der mehreren tausend Einzelverbindungen umfassenden Stoffgruppe der PFAS keine oder nur sehr spärliche toxikologische Grundlagendaten vor. Am besten untersucht sind die beiden Verbindungen PFOS und PFOA. Mit zunehmendem Kenntnisstand wird jedoch immer offensichtlicher, dass man die PFAS bisher hinsichtlich ihrer Umweltrelevanz und ihrer gesundheitlichen Auswirkungen unterschätzt hat. In der Folge wurden bestehende PFAS-Grenzwerte in vielen Ländern nach unten korrigiert. Ein internationaler Konsens und breit abgestützte Grenzwerte zur Beurteilung von PFAS-belasteten Standorten oder Abfällen liess sich bisher nur in Ansätzen erreichen. Den neuesten Wissensstand und eine erste internationale Wertvorgabe widerspiegeln die Opinion der EFSA vom September 2020³ sowie die im Januar 2021 revidierte EU-Trinkwasserrichtlinie⁴. Die EFSA empfiehlt eine wöchentliche Höchstdosis (tolerable weekly intake, TWI) von 4.4 Nanogramm pro Kilogramm Körpergewicht für die Summe der 4 Verbindungen PFOA, PFNA, PFHxS und PFOS. Die Berechnung basiert auf den Toxizitätsdaten zu PFOA und es wird unterstellt, dass die 4 Verbindungen identische Toxizitäten

¹ Verordnung über die Sanierung von belasteten Standorten vom 26. August 1998 (Altlasten-Verordnung, AltIV, SR 814.680).

² <https://www.parlament.ch/de/ratsbetrieb/suche-curia-vista/geschaeff?AffairId=20223929>

³ Risk to human health related to the presence of perfluoroalkyl substances in food. EFSA Journal 2020;18(9):6223. <https://www.efsa.europa.eu/en/efsajournal/pub/6223>

⁴ Directive (EU) 2020/2184 of the European Parliament and of the Council of 16 December 2020 on the quality of water intended for human consumption. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2020/2184/oj>



aufweisen. Die EU-Trinkwasserrichtlinie schreibt einen Höchstwert von 100 ng/l für die absolute (ungewichtete) Summe von 20 PFAS oder 500 ng/l für die Summe aller PFAS vor. In der Grössenordnung dieser Werte liegt auch der hier im Folgenden vorgeschlagene Konzentrationswert nach Anhang 1 AltIV.

Bei der PFAS-Stoffklasse mit mehreren tausend Einzelverbindungen macht es keinen Sinn, einzelstoffbasierte Konzentrationswerte festzulegen. Bei allen bisher untersuchten PFAS scheint der zugrundeliegende toxikologische Wirkmechanismus identisch oder zumindest ähnlich zu sein, d.h. alle Stoffe wirken auf die Zielorgane in gleicher Weise ein. Daher ist von einer additiven toxikologischen Wirkung auszugehen. Isolierte, einzelstoffliche Konzentrationswerte würde dem kombinierten Effekt dieser Stoffgruppe nicht gerecht. Ähnlich wie bei Dioxinen/Furanen empfiehlt es sich daher, einen für die Stoffklasse möglichst repräsentativen, toxizitätsgewichteten Summengrenzwert festzulegen. Dieser soll Antwort geben auf die Frage: Wie toxisch ist das messbare PFAS-Gemisch am Standort?

Diese Überlegungen sind der Grund, warum die EU in die Trinkwasserrichtlinie einen bzw. zwei PFAS-Summenwerte aufgenommen hat. Der Schwachpunkt dieser EU-Summenwerte liegt jedoch darin, dass die Einzelstoffe unabhängig von ihrer unterschiedlichen Toxizität aufaddiert werden. Im Allgemeinen scheinen die langkettigen PFAS indes toxischer zu sein als die kurzkettigen Verbindungen, da sie stärker bioakkumulieren bzw. langsamer im Körper abgebaut werden.

Das niederländische Nationale Institut für öffentliche Gesundheit und Umwelt (RIVM) hat 2018 eine Studie⁵ publiziert, in der es aufgrund von Literaturdaten zur Lebertoxizität an Ratten für eine Reihe von PFAS mit Kettenlängen zwischen C₄-C₁₃ relative Potenzfaktoren (RPF) unter Berücksichtigung einer additiven Toxizität beim Vorliegen mehrerer Verbindungen abgeleitet hat. Der Ansatz ist grundsätzlich zielführender und sachgerechter als die ungewichtete Aufsummierung der Einzelsubstanzen. Er hat jedoch eine Schwachstelle darin, dass gemäss EFSA-Opinion der kritische toxikologische Endpunkt nicht die Leberschädigung, sondern die Reduktion der Immunreaktion ist. Ob sich die relativen Potenzfaktoren, die auf Leberschädigungen beruhen, ohne weiteres auf die Immunreaktion übertragen lassen, ist zurzeit nur bedingt mit Daten belegt.

Dennoch hat das RIVM am 7. April 2021 in einem Memorandum⁶ empfohlen, bis auf weiteres mit den von ihnen hergeleiteten Potenzfaktoren zu rechnen, sich aber neu am TWI der EFSA-Opinion als toxikologischem Referenzpunkt zu orientieren. In der Tendenz sei die gewichtete Summe dem ungewichteten Summenwert vorzuziehen. Zudem habe dieses Vorgehen den Vorteil, dass nicht nur die 4 PFAS der EFSA-Opinion beurteilt werden können, sondern die 23 PFAS, für die die RIVM Potenzfaktoren abgeleitet hat (vgl. die nachstehende Liste der 23 Stoffe mit ihren RPF).

Auch das Scientific Committee on Health, Environmental and Emerging Risks (SCHEER) der Europäischen Kommission vertritt die Meinung, dass der Vorschlag der RIVM aktuell der beste verfügbare Ansatz zur Herleitung von Umweltqualitätsstandards (Environmental Quality Standards, EQS) sei⁷. Wir können uns dieser Einschätzung anschliessen. Der RIVM-Ansatz stellt einen pragmatischen und sinnvollen Behelf dar, wenn auch für andere als die 4 PFAS in der EFSA-Opinion Beurteilungswerte festgelegt werden müssen. Er überzeugt grundsätzlich mehr als der Ansatz in der Europäischen Trinkwasserrichtlinie mit einer ungewichteten Summe aus allen C₄-C₁₃ Carbon- und Sulfonsäuren. Die aktuellsten toxikologischen Kenntnisse werden mit der Bezugnahme auf die EFSA-Opinion berücksichtigt.

⁵ Mixture exposure to PFAS: A Relative Potency Factor approach | RIVM
<https://rivm.openrepository.com/handle/10029/622164>

⁶ Memorandum on the implementation of the EFSA sum TWI of PFASs | RIVM
<https://www.rivm.nl/documenten/memorandum-on-implementation-of-efsa-sum-twi-of-pfas>

⁷ https://health.ec.europa.eu/publications/scheer-scientific-opinion-draft-environmental-quality-standards-priority-substances-under-water_en#files

Dem TWI der EFSA-Opinion von 4.4 ng/kg_{KG} pro Woche entspricht umgerechnet, bei einem Körpergewicht von 70 kg und einem täglichen Trinkwasserkonsum von 2 Litern einem Wert von 22 ng/l⁸. Da in einem Gewässerschutzbereichs A_U der halbe Konzentrationswert als Sanierungswert gilt und die Konzentrationswerte sich zumindest in der Grössenordnung an den Trinkwasserwerten orientieren, **empfiehlt das BAFU, als PFAS-Summen-Konzentrationswert den doppelten, aufgerundeten TWI-Wert von 50 ng/l zu verwenden**. Der Konzentrationswert gilt als eingehalten, wenn die mit den substanzspezifischen RPFs gewichtete Summe des PFAS-Gemisches kleiner als 50 ng TEQ/l ist (TEQ = Toxizitätsäquivalenz).

Nicht alle der 23 PFAS, für die Toxizitätsäquivalenzfaktoren hergeleitet wurden, können routinemässig von den Analytiklabors gemessen werden. Gestützt auf bisherige Feldstudien und die Stoffeigenschaften schlägt das BAFU vor, dem Summenwert bis auf weiteres mindestens folgende 9 PFAS-Substanzen zugrunde zu legen: **PFBA, PFPeA, PFHxA, PFHpA, PFOA, PFNA, PFBS, PFHxS, PFOS**. Bei konkretem Verdacht auf weitere relevante PFAS sind diese aber auch in den PFAS-Summenwert aufzunehmen. Dazu werden unter Umständen auch Toxizitätsäquivalenzfaktoren für andere als die 23 erwähnten PFAS benötigt. Für solche Stoffe sind die Toxizitätsäquivalenzfaktoren soweit möglich anhand der verfügbaren Toxizitätsstudien, via Informationen zur Toxikokinetik und durch einen Vergleich mit strukturverwandten Verbindungen (sogenannter Read-Across) herzuleiten. Die Herleitung ist fachlich anspruchsvoll und aufgrund der spärlichen Datenlage mit erheblichen Unsicherheiten behaftet. Im Sinne eines harmonisierten Vollzugs publiziert das BAFU alle zusätzlich hergeleiteten Toxizitätsäquivalenzfaktoren auf seiner Webseite⁹ und empfiehlt die Verwendung dieser Faktoren (vgl. auch die nachstehende Liste).

Die **Einzelstoff-Bestimmungsgrenze beträgt 1 ng/l** (ungewichteter Wert, ohne Multiplikation mit dem Toxizitätsäquivalenzfaktor). Dieser Wert ist nach heutigem Stand der Technik in den meisten Fällen erreichbar. Eine höhere Bestimmungsgrenze für einzelne Stoffe kann zugelassen werden, wenn begründet werden kann, warum sich die 1 ng/l im konkreten Fall nicht erreichen lassen.

Messwerte unter der Bestimmungsgrenze fliessen in die Summenberechnung als Nullwerte ein.

Das BAFU weist darauf hin, dass sich in Abhängigkeit der Erkenntnisse in den PFAS-Arbeitsgruppen, nach Vorliegen von neuen wissenschaftlichen Daten, nach Durchführung weiterer Messungen zu PFAS-Belastungen in der Schweiz, mit zunehmender Vollzugserfahrung und allfällig neuer Rechtsetzung die Notwendigkeit ergeben könnte, den hier aufgeführten Konzentrationswert anzupassen. Wir sind uns bewusst, dass diese Unsicherheit für alle Beteiligten unangenehm ist und den Vollzug erschwert, sie ist aber angesichts der vielen aktuell noch offenen wissenschaftlichen/technischen Fragen im Umgang mit PFAS-Belastungen unvermeidlich.

⁸ 4.4 ng/kg_{KG} pro Woche / 7 Tage * 70 kg * 2 Lt, (=tägl. H₂O-Konsum) = 22 ng/l

⁹ <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/altlasten/fachinformationen/altlastenbearbeitung.html>
> Konzentrationswerte für Stoffe, die nicht in Anhang 1 oder 3 AltIV enthalten sind

TABELLE: RELATIVE POTENZFAKTOREN (RELATIV POTENCY FACTORS, RPF) VON 23 PFAS GEMÄSS RIVM 2021 (MEMORANDUM ON THE IMPLEMENTATION OF THE EFSA SUM TWI OF PFASs)

Abkürzung	Stoffname	CAS-Nr.	RPF bzw. TEF ¹⁾
PFBA	Perfluorbutansäure	375-22-4	0.05
PFPeA	Perfluorpentansäure	2706-90-3	0.05
PFHxA	Perfluorhexansäure	307-24-4	0.01
PFHpA	Perfluorheptansäure	375-85-9	1
PFOA ²⁾	Perfluorooctansäure	335-67-1	1
PFNA	Perfluornonansäure	375-95-1	10
PFDA	Perfluordecansäure	335-76-2	10
PFUnDA	Perfluorundecansäure	2058-94-8	4
PFDoDA	Perfluordodecansäure	307-55-1	3
PFTrDA	Perfluortridecansäure	72629-94-8	3
PFTeDA	Perfluortetradecansäure	376-06-7	0.3
PFHxDA	Perfluorhexadecansäure	67905-19-5	0.02
PFODA	Perfluorooctadecansäure	16517-11-6	0.02
PFBS	Perfluorbutansulfonsäure	375-73-5	0.001
PFPeS	Perfluorpentansulfonsäure	2706-91-4	0.6
PFHxS	Perfluorhexansulfonsäure	355-46-4	0.6
PFHpS	Perfluorheptansulfonsäure	375-92-8	2
PFOS	Perfluorooctansulfonsäure	1763-23-1	2
PFDS	Perfluordecansulfonsäure	335-77-3	2
HFPO-DA (~GenX)	Perfluor(2-propoxypropansäure)	62037-80-3	0.06
ADONA	Perfluoro-4,8-dioxa-3H-nonansäure	958445-44-8	0.03
6-2 FTOH	6-2 Fluortelomeralkohol	647-42-7	0.02
8-2 FTOH	8-2 Fluortelomeralkohol	678-39-7	0.04

¹⁾ In den Publikationen der RIVM werden die Toxizitätsäquivalenzfaktoren TEF als Relativ Potency Factors (RPF) bezeichnet. Die beiden Begriffe werden hier synonym verwendet.

²⁾ PFOA wird als toxikologischer Referenzpunkt verwendet und besitzt daher den TEF von 1.

ZUSÄTZLICH HERGELEITETE TOXIZITÄTSÄQUIVALENZFAKTOREN (TEF) AUS ANDEREN GESUCHEN UM ZU-
STIMMUNG ZU EINEM PFAS-SUMMEN-KONZENTRATIONSWERT, DENEN DAS BAFU ZUGESTIMMT HAT BZW.
HERLEITUNGEN IM AUFTRAG DES BAFU

Abkürzung	Stoffname	CAS-Nr.	TEF
Capstone A	Capstone A	80475-32-7	0.05
Capstone B	Capstone B	34455-29-3	0.001
4:2-FTS	4:2-Fluortelomer-sulfonsäure	757124-72-4	0.2
6:2-FTS	6:2-Fluortelomer-sulfonsäure	27619-97-2	0.2
8:2-FTS	8:2-Fluortelomer-sulfonsäure	39108-34-4	1
PFNS	Perfluornonansulfonsäure	68259-12-1	10
PFOSA	Perfluoroctansulfonamid	754-91-6	2
EtFOSA	N-Ethylperfluoroctansulfonamid	4151-50-2	2
MeFOSA	N-Methylperfluoroctansulfonamid	31506-32-8	2
EtFOSAA	N-Ethylperfluoroctansulfonamidoessigsäure	2991-50-6	2
MeFOSAA	N-Methylperfluoroctansulfonamidoessigsäure	2355-31-9	2

Für die Notiz: R. Kettler / BAFU / 22.04.2024

Anhang 2

Excel-Tabelle «Liste der relevanten Aktivitäten für 30 (+36) PFAS-Stoffe», Stand 29.8.2023

Liste des activités pertinentes pour 30 (+36) substances PFAS / Liste der relevanten Aktivitäten für 30 (+36) PFAS-Stoffe

ont été utilisés ou dont les produits contiennent des PFAS. La liste n'est pas exhaustive. Mise à jour : 29.08.2023.

verwendet wurden oder deren Produkte PFAS enthalten. Die Liste ist nicht vollständig. Stand: 29.08.2023

Disclaimer:

Dies ist ein Dokument der beiden Arbeitsgruppen "Altlasten" und "Abfall" des Projekts "PFAS im Bereich Altlasten". In den Arbeitsgruppen waren das BAFU sowie Delegierte der KVV aus den kantonalen Altlasten- und Abfallfachstellen vertreten. Das Dokument dient informellen Zwecken. Die Inhalte haben keinen rechtlichen Stellenwert, sondern sind Empfehlungen der Arbeitsgruppe. Es widerspiegelt den damaligen Stand des Wissens und wird nicht nachgeführt.

Der offizielle Projekt-Abschlussbericht wird nach Freigabe durch den Projektausschuss auf der Webseite des BAFU publiziert.

Ceci est un document des deux groupes de travail "Sites pollués" et "Déchets" du projet "PFAS dans le domaine des sites pollués". L'OFEV ainsi que des délégués de la CCE issus des services cantonaux chargés des sites pollués et des déchets étaient représentés dans les groupes de travail. Le contenu du document n'a pas de valeur juridique et sert à des fins informelles ; il s'agit de recommandations des groupes de travail. Il reflète l'état des connaissances au moment de sa rédaction et ne sera pas mis à jour.

Le rapport final officiel du projet sera publié sur le site Internet de l'OFEV après validation par le comité de projet.

Relevante betroffene Tätigkeiten (nach Glüge et al., 2020 und zitierter Literatur) – N: nachgewiesen; V: verwendet (früher oder gegenwärtig); P: patentiert

	Name	CAS Nr.	Luft- und Raumfahrtindustrie	Bauen und Konstruktion	Chemische Industrie	Metallplattierung durch Elektroplattierung (Electroplating)			Elektronikindustrie	
						Verchromung	Ätzen von piezoelektrischen Keramikfiltern	Nano-Beschichtung durch gepulstes Plasma zur Herstellung von Smartphones	gedruckte Schaltungen	Herstellung von elektrischen Ausrüstungen, Geräten und Komponenten
PFBA	Perfluorbutansäure	375-22-4							N	
PFPeA	Perfluorpentansäure	2706-90-3								
PFHxA	Perfluorhexansäure	307-24-4								
PFHpA	Perfluorheptansäure	375-85-9								
PFOA	Perfluoroctansäure	335-67-1			V			V		
PFNA	Perfluorononansäure	375-95-1								
PFDA	Perfluordecansäure	335-76-2								
PFUnDA	Perfluorundecansäure	2058-94-8								
PFDoDA	Perfluordodecansäure	307-55-1								
PFTriDA	Perfluortridekansäure	72629-94-8								
PFTeDA	Perfluortetradecansäure	376-06-7								
PFBS	Perfluorbutansulfonsäure	375-73-5								
PFPeS	Perfluorpentansulfonsäure	2706-91-4								
PFHxS	Perfluorhexansulfonsäure	355-46-4								
PFHpS	Perfluorheptansulfonsäure	375-92-8								
PFOS	Perfluoroctansulfonsäure	1763-23-1	V			V	V		N	
PFNS	Perfluoronansulfonsäure	68259-12-1								
PFDS	Perfluordecansulfonsäure	335-77-3								
(P)FOSA	Perfluoroctansulfonamid	754-91-6				P			N	
(N-)MeFOSA	N-Methylperfluoroctansulfonamid	31506-32-8								
(N-)MeFOSAA	N-Methylperfluoroctansulfonamid-Säure	2355-31-9								
(N-)EtFOSA	N-Ethylperfluoroctansulfonamid	4151-50-2								
EtFOSAA	N-Ethylperfluoroctansulfonamidoessigsäure	2991-50-6								
4:2 FTS	1H,1H,2H,2H-Perfluor-1-hexansulfonsäure	757124-72-4								
6:2 FTS	1H,1H,2H,2H-Perfluor-1-octansulfonsäure	27619-97-2				V			N	N
8:2 FTS	1H,1H,2H,2H-Perfluor-1-dekansulfonsäure	39108-34-4								
HFPO-DA (GenX)	2,3,3,3-Tetrafluor-2-(heptafluoropropoxy)propansäure	13252-13-6			V					
DONA	4,8-Dioxa-3H-perfluorononansäure	919005-14-4								
9Cl-PF3ONS	9-Chlorohexadecafluoro-3-oxanonan-1-sulfonsäure	73606-19-6				V				
8:2-FTUCA	2H-Perfluor-2-decensäure	70887-84-2								

Andere Substanzen

PFODA	Perfluorooctadecansäure	16517-11-6								
ADONA	Ammoniumsalz von DONA	958445-44-8			V					
6:2 FTOH	6:2 Alkohol Fluortelomer	647-42-7								
8:2 FTOH	8:2 Alkohol Fluortelomer	678-39-7								
EtFOSE	N-Ethylperfluorooctansulfonamid-Ethanol	1691-99-2								
4:2 monoPAP	4:2-Fluortelomerphosphat-Monoester	150065-76-2								
6:2 monoPAP	6:2-Fluortelomerphosphat-Monoester	57678-01-0								
8:2 monoPAP	8:2-Fluortelomerphosphat-Monoester	57678-03-2								
10:2 monoPAP	10:2-Fluortelomerphosphat-Monoester	57678-05-4								
4:2 diPAP	4:2-Fluortelomerphosphat-Diester	135098-69-0								
6:2 diPAP	6:2-Fluortelomerphosphat-Diester	57677-95-9								
4:2/6:2 diPAP	4:2/6:2 Fluortelomerphosphat-Diester	1158182-59-2								
6:2/8:2 diPAP	6:2/8:2 Fluortelomerphosphat-Diester	943913-15-3								
6:2/10:2 diPAP	6:2/10:2 Fluortelomerphosphat-Diester	1578186-50-1								
6:2/12:2 diPAP	6:2/12:2 Fluortelomerphosphat-Diester	1578186-69-2								
8:2 diPAP	8:2 Fluortelomerphosphat-Diester	678-41-1								
8:2/10:2 diPAP	8:2/10:2 Fluortelomerphosphat-Diester	1158182-60-5								
8:2/12:2 diPAP	8:2/12:2 Fluortelomerphosphat-Diester	1578186-42-1								
10:2 diPAP	10:2 Fluortelomerphosphat-Diester	1895-26-7								
6:2 triPAP	6:2-Fluortelomerphosphat-Triester	165325-62-2								
6:2/6:2/8:2 triPAP	6:2 Fluortelomerphosphat-Triester	1578186-53-4								
6:2/8:2/8:2 triPAP	6:2/8:2/8:2 Fluortelomerphosphat-Triester	1578186-56-7								
6:2/8:2/10:2 triPAP	6:2/8:2/10:2 Fluortelomerphosphat-Triester	1578186-64-7								
6:2/6:2/10:2 triPAP	6:2/6:2/10:2 Fluortelomerphosphat-Triester	1578186-57-8								
8:2 triPAP	8:2 Fluortelomerphosphat-Triester	149790-22-7								
monoSAmPAP	EtFOSE-based phosphate monoester									
diSAmPAP	EtFOSE-based phosphate diester	2965-52-8								
triSAmPAP	EtFOSE-based phosphate triester	2250-98-8								
	Ammonium-(n:2)-Fluortelomerphosphat-Monoester	65530-71-4		V						
	Diammonium-(n:2)-Fluortelomerphosphat-Monoester	65530-72-5		V						
	Ammonium-(n:2)-Fluortelomerphosphat-Diester	65530-70-3		V						
	Zonyl FSP	67479-86-1								
	Zonyl FSN	65545-80-4								
	Zonyl FSA	57534-43-7								
	Zonyl FSE	83653-37-6								
	Zonyl FSN 100	52550-44-4								

wenig oder keine Informationen

9 PFAS, die vom BAFU als minimales Messprogramm vorgeschlagen sind.

Relevante betroffene Tätigkeiten (nach Glüge et al., 2020 und zitiert)

	Name	CAS Nr.	Energieindustrie		Herstellung von Metallprodukten		Bergbau- industrie	Öl- und Gasindustrie			Fotografische Industrie
			Li-Batterien	Abscheidung von CO2 aus den Verbrennungsgasen von Kohlekraftwerken	Behandlung und Beschichtung	Herstellung von Metallprodukten		Stickstoff-Flotation	Oberflächenbehandlung der Tanks, um sie oleophob zu machen	Kohlenwasserstoff-Schaummittel	
PFBA	Perfluorbutansäure	375-22-4									V
PFPeA	Perfluorpentansäure	2706-90-3									
PFHxA	Perfluorhexansäure	307-24-4									
PFHpA	Perfluorheptansäure	375-85-9									
PFOA	Perfluoroctansäure	335-67-1						N			V
PFNA	Perfluorononansäure	375-95-1	N								
PFDA	Perfluordecansäure	335-76-2									
PFUnDA	Perfluorundecansäure	2058-94-8									
PFDoDA	Perfluordodecansäure	307-55-1									
PFTriDA	Perfluortridecansäure	72629-94-8									
PFTeDA	Perfluortetradecansäure	376-06-7									
PFBS	Perfluorbutansulfonsäure	375-73-5								P (K-PFBS)	
PFPeS	Perfluoropentansulfonsäure	2706-91-4									
PFHxS	Perfluorhexansulfonsäure	355-46-4									
PFHpS	Perfluorheptansulfonsäure	375-92-8									
PFOS	Perfluorooctansulfonsäure	1763-23-1									
PFNS	Perfluorononsulfonsäure	68259-12-1									
PFDS	Perfluordecansulfonsäure	335-77-3									
(P)FOSA	Perfluorooctansulfonamid	754-91-6			N					P	
(N-)MeFOSA	N-Methylperfluorooctansulfonamid	31506-32-8									
(N-)MeFOSAA	N-Methylperfluorooctansulfonamid-Säure	2355-31-9									
(N-)EtFOSA	N-Ethylperfluorooctansulfonamid	4151-50-2			N						
EtFOSAA	N-Ethylperfluorooctansulfonamidoessigsäure	2991-50-6									
4:2 FTS	1H,1H,2H,2H-Perfluor-1-hexansulfonsäure	757124-72-4									
6:2 FTS	1H,1H,2H,2H-Perfluor-1-octansulfonsäure	27619-97-2	N			N					
8:2 FTS	1H,1H,2H,2H-Perfluor-1-dekansulfonsäure	39108-34-4									
HFPO-DA (GenX)	2,3,3,3-Tetrafluor-2-(heptafluoropropoxy)propansäure	13252-13-6									
DONA	4,8-Dioxa-3H-perfluorononansäure	919005-14-4									
9Cl-PF3ONS	9-Chlorohexadecafluoro-3-oxanonan-1-sulfonsäure	73606-19-6		P							
8:2-FTUCA	2H-Perfluor-2-decansäure	70887-84-2									

Andere Substanzen

PFODA	Perfluorooctadecansäure	16517-11-6									
ADONA	Ammoniumsalz von DONA	958445-44-8									
6:2 FTOH	6:2 Alkohol Fluortelomer	647-42-7									
8:2 FTOH	8:2 Alkohol Fluortelomer	678-39-7						N			
EtFOSE	N-Ethylperfluorooctansulfonamid-Ethanol	1691-99-2	N							P	
4:2 monoPAP	4:2-Fluortelomerphosphat-Monoester	150065-76-2									
6:2 monoPAP	6:2-Fluortelomerphosphat-Monoester	57678-01-0									
8:2 monoPAP	8:2-Fluortelomerphosphat-Monoester	57678-03-2									
10:2 monoPAP	10:2-Fluortelomerphosphat-Monoester	57678-05-4									
4:2 diPAP	4:2-Fluortelomerphosphat-Diester	135098-69-0									
6:2 diPAP	6:2-Fluortelomerphosphat-Diester	57677-95-9									
4:2/6:2 diPAP	4:2/6:2 Fluortelomerphosphat-Diester	1158182-59-2									
6:2/8:2 diPAP	6:2/8:2 Fluortelomerphosphat-Diester	943913-15-3									
6:2/10:2 diPAP	6:2/10:2 Fluortelomerphosphat-Diester	1578186-50-1									
6:2/12:2 diPAP	6:2/12:2 Fluortelomerphosphat-Diester	1578186-69-2									
8:2 diPAP	8:2 Fluortelomerphosphat-Diester	678-41-1									
8:2/10:2 diPAP	8:2/10:2 Fluortelomerphosphat-Diester	1158182-60-5									
8:2/12:2 diPAP	8:2/12:2 Fluortelomerphosphat-Diester	1578186-42-1									
10:2 diPAP	10:2 Fluortelomerphosphat-Diester	1895-26-7									
6:2 triPAP	6:2-Fluortelomerphosphat-Triester	165325-62-2									
6:2/6:2/8:2 triPAP	6:2 Fluortelomerphosphat-Triester	1578186-53-4									
6:2/8:2/8:2 triPAP	6:2/8:2/8:2 Fluortelomerphosphat-Triester	1578186-56-7									
6:2/8:2/10:2 triPAP	6:2/8:2/10:2 Fluortelomerphosphat-Triester	1578186-64-7									
6:2/6:2/10:2 triPAP	6:2/6:2/10:2 Fluortelomerphosphat-Triester	1578186-57-8									
8:2 triPAP	8:2 Fluortelomerphosphat-Triester	149790-22-7									
monoSAmPAP	EtFOSE-based phosphate monoester										
diSAmPAP	EtFOSE-based phosphate diester	2965-52-8									
triSAmPAP	EtFOSE-based phosphate triester	2250-98-8									
	Ammonium-(n:2)-Fluortelomerphosphat-Monoester	65530-71-4									
	Diammonium-(n:2)-Fluortelomerphosphat-Monoester	65530-72-5									
	Ammonium-(n:2)-Fluortelomerphosphat-Diester	65530-70-3									
	Zonyl FSP	67479-86-1						V			
	Zonyl FSN	65545-80-4									
	Zonyl FSA	57534-43-7									
	Zonyl FSE	83653-37-6									
	Zonyl FSN 100	52550-44-4									

wenig oder keine Informationen
9 PFAS, die vom BAFU als minimales Messprogramm vorgeschlagen sind.

Relevante betroffene Tätigkeiten (nach Glüge et al., 2020 und zitiert)

	Name	CAS Nr.	Herstellung von Kunststoff und Gummi			Halbleiter-Industrie				Holz-Industrie				
			Kunstrasen	Pflegemittel für Fluoroelastomer-Formulierungen	Hilfe bei der Verarbeitung von nicht-fluorierten Polymeren zu Kunststoffen und Harzen	Antireflex-Unterschicht	Antireflexions-beschichtung der Oberfläche	Nassätzmittel für die Herstellung von Halbleiter-bauelementen	Generator von Photosäuren im Photoresist	Resopal	OSB-Platten (Oriented Lamellen Board)	Spanplatte	Holzbretter	
PFBA	Perfluorbutansäure	375-22-4										N		
PFPeA	Perfluorpentansäure	2706-90-3				P					N	N	N	N
PFHxA	Perfluorhexansäure	307-24-4										N	N	N
PFHpA	Perfluorheptansäure	375-85-9									N	N	N	N
PFOA	Perfluoroctansäure	335-67-1											N	
PFNA	Perfluorononansäure	375-95-1												
PFDA	Perfluordecansäure	335-76-2												
PFUnDA	Perfluorundecansäure	2058-94-8												
PFDoDA	Perfluordodekansäure	307-55-1												
PFTriDA	Perfluorotridekansäure	72629-94-8												
PFTeDA	Perfluortetradekansäure	376-06-7												
PFBS	Perfluorobutansulfonsäure	375-73-5		(V)		P				V				
PFPeS	Perfluoropentansulfonsäure	2706-91-4												
PFHxS	Perfluorhexansulfonsäure	355-46-4												N
PFHpS	Perfluorheptansulfonsäure	375-92-8												N
PFOS	Perfluoroctansulfonsäure	1763-23-1	N							V				N
PFNS	Perfluoronansulfonsäure	68259-12-1												
PFDS	Perfluordekansulfonsäure	335-77-3										N		
(P)FOSA	Perfluoroctansulfonamid	754-91-6												
(N)MeFOSA	N-Methylperfluoroctansulfonamid	31506-32-8												
(N)MeFOSAA	N-Methylperfluoroctansulfonamid-Saure	2355-31-9												
(N)EtFOSA	N-Ethylperfluoroctansulfonamid	4151-50-2												
EtFOSAA	N-Ethylperfluoroctansulfonamidoessigsäure	2991-50-6												
4:2 FTS	1H,1H,2H,2H-Perfluor-1-hexansulfonsäure	757124-72-4												
6:2 FTS	1H,1H,2H,2H-Perfluor-1-octansulfonsäure	27619-97-2	N		N					N				
8:2 FTS	1H,1H,2H,2H-Perfluor-1-dekansulfonsäure	39108-34-4						N						
HFPO-DA (GenX)	2,3,3,3-Tetrafluor-2-(heptafluoropropoxy)propansäure	13252-13-6												
DONA	4,8-Dioxa-3H-perfluorononansäure	919005-14-4												
9Cl-PF3ONS	9-Chlorohexadecafluoro-3-oxanonan-1-sulfonsäure	73606-19-6												
8:2-FTUCA	2H-Perfluor-2-decansäure	70887-84-2												

Andere Substanzen														
PFODA	Perfluorooctadecansäure	16517-11-6												
ADONA	Ammoniumsalz von DONA	958445-44-8												
6:2 FTOH	6:2 Alkohol Fluortelomer	647-42-7												
8:2 FTOH	8:2 Alkohol Fluortelomer	678-39-7												
EtFOSE	N-Ethylperfluorooctansulfonamid-Ethanol	1691-99-2												
4:2 monoPAP	4:2-Fluortelomerphosphat-Monoester	150065-76-2												
6:2 monoPAP	6:2-Fluortelomerphosphat-Monoester	57678-01-0												
8:2 monoPAP	8:2-Fluortelomerphosphat-Monoester	57678-03-2												
10:2 monoPAP	10:2-Fluortelomerphosphat-Monoester	57678-05-4												
4:2 diPAP	4:2-Fluortelomerphosphat-Diester	135098-69-0												
6:2 diPAP	6:2-Fluortelomerphosphat-Diester	57677-95-9												
4:2/6:2 diPAP	4:2/6:2 Fluortelomerphosphat-Diester	1158182-59-2												
6:2/8:2 diPAP	6:2/8:2 Fluortelomerphosphat-Diester	943913-15-3												
6:2/10:2 diPAP	6:2/10:2 Fluortelomerphosphat-Diester	1578186-50-1												
6:2/12:2 diPAP	6:2/12:2 Fluortelomerphosphat-Diester	1578186-69-2												
8:2 diPAP	8:2 Fluortelomerphosphat-Diester	678-41-1												
8:2/10:2 diPAP	8:2/10:2 Fluortelomerphosphat-Diester	1158182-60-5												
8:2/12:2 diPAP	8:2/12:2 Fluortelomerphosphat-Diester	1578186-42-1												
10:2 diPAP	10:2 Fluortelomerphosphat-Diester	1895-26-7												
6:2 triPAP	6:2-Fluortelomerphosphat-Triester	165325-62-2												
6:2/6:2/8:2 triPAP	6:2 Fluortelomerphosphat-Triester	1578186-53-4												
6:2/8:2/8:2 triPAP	6:2/8:2/8:2 Fluortelomerphosphat-Triester	1578186-56-7												
6:2/8:2/10:2 triPAP	6:2/8:2/10:2 Fluortelomerphosphat-Triester	1578186-64-7												
6:2/6:2/10:2 triPAP	6:2/6:2/10:2 Fluortelomerphosphat-Triester	1578186-57-8												
8:2 triPAP	8:2 Fluortelomerphosphat-Triester	149790-22-7												
monoSAmPAP	EtFOSE-based phosphate monoester													
diSAmPAP	EtFOSE-based phosphate diester	2965-52-8												
triSAmPAP	EtFOSE-based phosphate triester	2250-98-8												
	Ammonium-(n:2)-Fluortelomerphosphat-Monoester	65530-71-4												
	Diammonium-(n:2)-Fluortelomerphosphat-Monoester	65530-72-5												
	Ammonium-(n:2)-Fluortelomerphosphat-Diester	65530-70-3												
	Zonyl FSP	67479-86-1												
	Zonyl FSN	65545-80-4												
	Zonyl FSA	57534-43-7												
	Zonyl FSE	83653-37-6												
	Zonyl FSN 100	52550-44-4												

wenig oder keine Informationen
 9 PFAS, die vom BAFU als minimales Messprogramm vorgeschlagen sind.

Relevante betroffene Tätigkeiten (nach Glüge et al., 2020 und zitiert)

	Name	CAS Nr.	Kleider					Autoindustrie		
			atmungsaktive Membranen	behandelte Kleidung (wasserabweisend)	Sportkleidung / -socken	Berufskleidung (medizinisches Personal, Piloten, Feuerwehrleute)	OP-Kittel, Vliesstoffkleidung	allgemeine Verwendung - auf der 'Global Automotive Declarable Substance List' aufgeführt	Scheibenschwefelbarkeit	Wachs und Poliermittel
PFBA	Perfluorbutansäure	375-22-4	N	N		N	N			
PFPeA	Perfluorpentansäure	2706-90-3	N	N		N	N			
PFHxA	Perfluorhexansäure	307-24-4	N	N		N	N			N
PFHpA	Perfluorheptansäure	375-85-9	N	N		N	N			
PFOA	Perfluoroctansäure	335-67-1	N	N		N	N	N		N
PFNA	Perfluorononansäure	375-95-1	N	N		N	N			
PFDA	Perfluordecansäure	335-76-2	N	N		N	N			
PFUnDA	Perfluorundecansäure	2058-94-8	N	N		N	N			
PFDoDA	Perfluordodecansäure	307-55-1	N	N		N	N			
PFTriDA	Perfluortridecansäure	72629-94-8		N						
PFTeDA	Perfluortetradecansäure	376-06-7		N						
PFBS	Perfluorobutansulfonsäure	375-73-5	N	N		N				
PFPeS	Perfluoropentansulfonsäure	2706-91-4		N						
PFHxS	Perfluorhexansulfonsäure	355-46-4	N	N						
PFHpS	Perfluorheptansulfonsäure	375-92-8	N							
PFOS	Perfluorooctansulfonsäure	1763-23-1	N	N	N					
PFNS	Perfluoronansulfonsäure	68259-12-1								
PFDS	Perfluordekansulfonsäure	335-77-3								
(P)FOSA	Perfluorooctansulfonamid	754-91-6		N						
(N-)MeFOSA	N-Methylperfluorooctansulfonamid	31506-32-8		N						
(N-)MeFOSAA	N-Methylperfluorooctansulfonamid-Säure	2355-31-9								
(N-)EtFOSA	N-Ethylperfluorooctansulfonamid	4151-50-2								
EtFOSAA	N-Ethylperfluorooctansulfonamidoessigsäure	2991-50-6								
4:2 FTS	1H,1H,2H,2H-Perfluor-1-hexansulfonsäure	757124-72-4								
6:2 FTS	1H,1H,2H,2H-Perfluor-1-octansulfonsäure	27619-97-2		N		N				
8:2 FTS	1H,1H,2H,2H-Perfluor-1-dekansulfonsäure	39108-34-4		N		N				
HFPO-DA (GenX)	2,3,3,3-Tetrafluor-2-(heptafluorpropoxy)propanensäure	13252-13-6								
DONA	4,8-Dioxa-3H-perfluorononansäure	919005-14-4								
9Cl-PF3ONS	9-Chlorohexadecafluoro-3-oxanonan-1-sulfonsäure	73606-19-6								
8:2-FTUCA	2H-Perfluor-2-decensäure	70887-84-2								

Andere Substanzen

PFODA	Perfluorooctadecansäure	16517-11-6								
ADONA	Ammoniumsalz von DONA	958445-44-8								
6:2 FTOH	6:2 Alkohol Fluortelomer	647-42-7		N					N	N
8:2 FTOH	8:2 Alkohol Fluortelomer	678-39-7		N					N	N
EtFOSE	N-Ethylperfluorooctansulfonamid-Ethanol	1691-99-2		N						
4:2 monoPAP	4:2-Fluortelomerphosphat-Monoester	150065-76-2								
6:2 monoPAP	6:2-Fluortelomerphosphat-Monoester	57678-01-0								
8:2 monoPAP	8:2-Fluortelomerphosphat-Monoester	57678-03-2								
10:2 monoPAP	10:2-Fluortelomerphosphat-Monoester	57678-05-4								
4:2 diPAP	4:2-Fluortelomerphosphat-Diester	135098-69-0								
6:2 diPAP	6:2-Fluortelomerphosphat-Diester	57677-95-9								
4:2/6:2 diPAP	4:2/6:2 Fluortelomerphosphat-Diester	1158182-59-2								
6:2/8:2 diPAP	6:2/8:2 Fluortelomerphosphat-Diester	943913-15-3								
6:2/10:2 diPAP	6:2/10:2 Fluortelomerphosphat-Diester	1578186-50-1								
6:2/12:2 diPAP	6:2/12:2 Fluortelomerphosphat-Diester	1578186-69-2								
8:2 diPAP	8:2 Fluortelomerphosphat-Diester	678-41-1								
8:2/10:2 diPAP	8:2/10:2 Fluortelomerphosphat-Diester	1158182-60-5								
8:2/12:2 diPAP	8:2/12:2 Fluortelomerphosphat-Diester	1578186-42-1								
10:2 diPAP	10:2 Fluortelomerphosphat-Diester	1895-26-7								
6:2 triPAP	6:2-Fluortelomerphosphat-Triester	165325-62-2								
6:2/6:2/8:2 triPAP	6:2 Fluortelomerphosphat-Triester	1578186-53-4								
6:2/8:2/8:2 triPAP	6:2/8:2/8:2 Fluortelomerphosphat-Triester	1578186-56-7								
6:2/8:2/10:2 triPAP	6:2/8:2/10:2 Fluortelomerphosphat-Triester	1578186-64-7								
6:2/6:2/10:2 triPAP	6:2/6:2/10:2 Fluortelomerphosphat-Triester	1578186-57-8								
8:2 triPAP	8:2 Fluortelomerphosphat-Triester	149790-22-7								
monoSAM-PAP	EtFOSE-based phosphate monoester									
diSAM-PAP	EtFOSE-based phosphate diester	2965-52-8								
triSAM-PAP	EtFOSE-based phosphate triester	2250-98-8								
	Ammonium-(n:2)-Fluortelomerphosphat-Monoester	65530-71-4								V
	Diammonium-(n:2)-Fluortelomerphosphat-Monoester	65530-72-5								V
	Ammonium-(n:2)-Fluortelomerphosphat-Diester	65530-70-3								V
	Zonyl FSP	67479-86-1								
	Zonyl FSN	65545-80-4								
	Zonyl FSA	57534-43-7								
	Zonyl FSE	83653-37-6								
	Zonyl FSN 100	52550-44-4								

wenig oder keine Informationen
 9 PFAS, die vom BAFU als minimales Messprogramm vorgeschlagen sind.

Relevante betroffene Tätigkeiten (nach Glüge et al., 2020 und zitiert)

	Name	CAS Nr.	Reinigungsmittel für starre/feste Oberflächen				Farben, Lacke, Beschichtungen		Kochutensilien		Dispersion	Elektronische Geräte
			fluorierte Tenside	Geschirr und Gläser	Entfernung von Ca-Sulfat aus Umkehrosmembranen	Stahlschrauben nach der Ni-Plattierung	Farben	Beschichtungen	wiederverwendbare Koch-/Backunterlagen (Blätter, Folien)	Backartikel aus antihafbeschichtetem Silikon		
PFBA	Perfluorbutansäure	375-22-4		N				N			N	
PFPeA	Perfluorpentansäure	2706-90-3						N				
PFHxA	Perfluorhexansäure	307-24-4						N				
PFHpA	Perfluorheptansäure	375-85-9						N				
PFOA	Perfluoroctansäure	335-67-1		N			V	N	N			
PFNA	Perfluorononansäure	375-95-1						N				
PFDA	Perfluordecansäure	335-76-2		N				N				
PFUnDA	Perfluorundecansäure	2058-94-8						N				
PFDoDA	Perfluordodekansäure	307-55-1						N				
PFTriDA	Perfluortridekansäure	72629-94-8						N				
PFTeDA	Perfluortetradekansäure	376-06-7						N				
PFBS	Perfluorobutansulfonsäure	375-73-5							N			
PFPeS	Perfluoropentansulfonsäure	2706-91-4										
PFHxS	Perfluorhexansulfonsäure	355-46-4										
PFHpS	Perfluorheptansulfonsäure	375-92-8										
PFOS	Perfluorooctansulfonsäure	1763-23-1				N					N	
PFNS	Perfluoronansulfonsäure	68259-12-1										
PFDS	Perfluordekansulfonsäure	335-77-3										
(P)FOSA	Perfluorooctansulfonamid	754-91-6									N	
(N)MeFOSA	N-Methylperfluorooctanesulfonamid	31506-32-8										
(N)MeFOSAA	N-Methylperfluorooctanesulfonamid-Säure	2355-31-9										
(N)EtFOSA	N-Ethylperfluorooctanesulfonamid	4151-50-2										
EtFOSAA	N-Ethylperfluorooctanesulfonamidoessigsäure	2991-50-6								N		
4:2 FTS	1H,1H,2H,2H-Perfluor-1-hexansulfonsäure	757124-72-4										
6:2 FTS	1H,1H,2H,2H-Perfluor-1-octansulfonsäure	276199-97-2						N			N	
8:2 FTS	1H,1H,2H,2H-Perfluor-1-dekansulfonsäure	39108-34-4										
HFPO-DA (GenX)	2,3,3,3-Tetrafluor-2-(heptafluoropropoxy)propansäure	13252-13-6										
DONA	4,8-Dioxa-3H-perfluorononansäure	919005-14-4										
9Cl-PF3ONS	9-Chlorohexadecafluoro-3-oxanonan-1-sulfonsäure	73606-19-6										
8:2-FTUCA	2H-Perfluor-2-decensäure	70887-84-2										

Andere Substanzen

PFODA	Perfluorooctadecansäure	16517-11-6									
ADONA	Ammoniumsalz von DONA	958445-44-8									
6:2 FTOH	6:2 Alkohol Fluortelomer	647-42-7	N	N			V	N	N	N	
8:2 FTOH	8:2 Alkohol Fluortelomer	678-39-7	N	N				N	N	N	
EtFOSE	N-Ethylperfluorooctanesulfonamid-Ethanol	1691-99-2									
4:2 monoPAP	4:2-Fluortelomerphosphat-Monoester	150065-76-2									
6:2 monoPAP	6:2-Fluortelomerphosphat-Monoester	57678-01-0									
8:2 monoPAP	8:2-Fluortelomerphosphat-Monoester	57678-03-2									
10:2 monoPAP	10:2-Fluortelomerphosphat-Monoester	57678-05-4									
4:2 diPAP	4:2-Fluortelomerphosphat-Diester	135098-69-0									
6:2 diPAP	6:2-Fluortelomerphosphat-Diester	57677-95-9									
4:2/6:2 diPAP	4:2/6:2 Fluortelomerphosphat-Diester	1158182-59-2									
6:2/8:2 diPAP	6:2/8:2 Fluortelomerphosphat-Diester	943913-15-3									
6:2/10:2 diPAP	6:2/10:2 Fluortelomerphosphat-Diester	1578186-50-1									
6:2/12:2 diPAP	6:2/12:2 Fluortelomerphosphat-Diester	1578186-69-2									
8:2 diPAP	8:2 Fluortelomerphosphat-Diester	678-41-1									
8:2/10:2 diPAP	8:2/10:2 Fluortelomerphosphat-Diester	1158182-60-5									
8:2/12:2 diPAP	8:2/12:2 Fluortelomerphosphat-Diester	1578186-42-1									
10:2 diPAP	10:2 Fluortelomerphosphat-Diester	1895-26-7									
6:2 triPAP	6:2-Fluortelomerphosphat-Triester	165325-62-2									
6:2/6:2/8:2 triPAP	6:2 Fluortelomerphosphat-Triester	1578186-53-4									
6:2/8:2/8:2 triPAP	6:2/8:2/8:2 Fluortelomerphosphat-Triester	1578186-56-7									
6:2/8:2/10:2 triPAP	6:2/8:2/10:2 Fluortelomerphosphat-Triester	1578186-64-7									
6:2/6:2/10:2 triPAP	6:2/6:2/10:2 Fluortelomerphosphat-Triester	1578186-57-8									
8:2 triPAP	8:2 Fluortelomerphosphat-Triester	149790-22-7									
monoSAmPAP	EtFOSE-based phosphate monoester										
diSAmPAP	EtFOSE-based phosphate diester	2965-52-8									
triSAmPAP	EtFOSE-based phosphate triester	2250-98-8									
	Ammonium-(n:2)-Fluortelomerphosphat-Monoester	65530-71-4	V					V			
	Diammonium-(n:2)-Fluortelomerphosphat-Monoester	65530-72-5	V					V			
	Ammonium-(n:2)-Fluortelomerphosphat-Diester	65530-70-3	V					V			
	Zonyl FSP	67479-86-1			V						
	Zonyl FSN	65545-80-4			V						
	Zonyl FSA	57534-43-7			V						
	Zonyl FSE	83653-37-6									
	Zonyl FSN 100	52550-44-4									

wenig oder keine Informationen
 9 PFAS, die vom BAFU als minimales Messprogramm vorgeschlagen sind.

Relevante betroffene Tätigkeiten (nach Glüge et al., 2020 und zitiert)

	Name	CAS Nr.	Feuerlöschschäume		Flammhemmend	Produkte für Böden							Laborausrüstungen
			AFFF	AR-FFFF		Flammschutzmittel für Polycarbonat-Harze	Teppichböden / Teppiche (synthetisch)	Teppichböden / Teppiche (Nylon)	Teppichschutzmittel	Polierwachs für Böden	elastisches Linoleum (Vinyl)	Reinigung von Vinyl- und Linoleumbelägen	
PFBA	Perfluorbutansäure	375-22-4	N			N	N		N				N
PFPeA	Perfluorpentansäure	2706-90-3	N			N	N		N			N	
PFHxA	Perfluorhexansäure	307-24-4	N			N	N		N			N	
PFHpA	Perfluorheptansäure	375-85-9	N			N	N		N			N	
PFOA	Perfluoroctansäure	335-67-1	N			N	N		N				
PFNA	Perfluorononansäure	375-95-1	N			N	N		N				
PFDA	Perfluordecansäure	335-76-2	N			N	N		N				
PFUnDA	Perfluorundecansäure	2058-94-8	N			N	N		N				
PFDoDA	Perfluordodecansäure	307-55-1	N			N	N		N				
PFTriDA	Perfluortridecansäure	72629-94-8											
PFTeDA	Perfluortetradecansäure	376-06-7											
PFBS	Perfluorobutansulfonsäure	375-73-5	N		V	N			N				
PFPeS	Perfluoropentansulfonsäure	2706-91-4	N										
PFHxS	Perfluorhexansulfonsäure	355-46-4	N		V (K-PFHxS)	N			N				
PFHpS	Perfluorheptansulfonsäure	375-92-8	N										
PFOS	Perfluorooctansulfonsäure	1763-23-1	N			N			N	N		N	
PFNS	Perfluoronansulfonsäure	68259-12-1											
PFDS	Perfluordekansulfonsäure	335-77-3	N						N			N	
(P)FOSA	Perfluorooctansulfonamid	754-91-6	N										
(N)MeFOSA	N-Methylperfluorooctanesulfonamid	31506-32-8											
(N)MeFOSAA	N-Methylperfluorooctanesulfonamid-Säure	2355-31-9											
(N)EtFOSA	N-Ethylperfluorooctanesulfonamid	4151-50-2									N		
EtFOSAA	N-Ethylperfluorooctanesulfonamidoessigsäure	2991-50-6											
4:2 FTS	1H,1H,2H,2H-Perfluor-1-hexansulfonsäure	757124-72-4											
6:2 FTS	1H,1H,2H,2H-Perfluor-1-octansulfonsäure	27619-97-2	N	N		N							
8:2 FTS	1H,1H,2H,2H-Perfluor-1-dekansulfonsäure	39108-34-4											
HFPO-DA (GenX)	2,3,3,3-Tetrafluor-2-(heptafluoropropoxy)propansäure	13252-13-6											
DONA	4,8-Dioxa-3H-perfluorononansäure	919005-14-4											
9Cl-PF3ONS	9-Chlorohexadecafluoro-3-oxanonan-1-sulfonsäure	73606-19-6											
8:2-FTUCA	2H-Perfluor-2-decensäure	70887-84-2											

Andere Substanzen

PFODA	Perfluorooctadecansäure	16517-11-6											
ADONA	Ammoniumsalz von DONA	958445-44-8											
6:2 FTOH	6:2 Alkohol Fluortelomer	647-42-7	N						N	N			
8:2 FTOH	8:2 Alkohol Fluortelomer	678-39-7	N						N	N			
EtFOSE	N-Ethylperfluorooctanesulfonamid-Ethanol	1691-99-2								N			
4:2 monoPAP	4:2-Fluortelomerphosphat-Monoester	150065-76-2											
6:2 monoPAP	6:2-Fluortelomerphosphat-Monoester	57678-01-0											
8:2 monoPAP	8:2-Fluortelomerphosphat-Monoester	57678-03-2											
10:2 monoPAP	10:2-Fluortelomerphosphat-Monoester	57678-05-4											
4:2 diPAP	4:2-Fluortelomerphosphat-Diester	135098-69-0											
6:2 diPAP	6:2-Fluortelomerphosphat-Diester	57677-95-9											
4:2/6:2 diPAP	4:2/6:2 Fluortelomerphosphat-Diester	1158182-59-2											
6:2/8:2 diPAP	6:2/8:2 Fluortelomerphosphat-Diester	943913-15-3											
6:2/10:2 diPAP	6:2/10:2 Fluortelomerphosphat-Diester	1578186-50-1											
6:2/12:2 diPAP	6:2/12:2 Fluortelomerphosphat-Diester	1578186-69-2											
8:2 diPAP	8:2 Fluortelomerphosphat-Diester	678-41-1											
8:2/10:2 diPAP	8:2/10:2 Fluortelomerphosphat-Diester	1158182-60-5											
8:2/12:2 diPAP	8:2/12:2 Fluortelomerphosphat-Diester	1578186-42-1											
10:2 diPAP	10:2 Fluortelomerphosphat-Diester	1895-26-7											
6:2 triPAP	6:2-Fluortelomerphosphat-Triester	165325-62-2											
6:2/6:2/8:2 triPAP	6:2 Fluortelomerphosphat-Triester	1578186-53-4											
6:2/8:2/8:2 triPAP	6:2/8:2/8:2 Fluortelomerphosphat-Triester	1578186-56-7											
6:2/8:2/10:2 triPAP	6:2/8:2/10:2 Fluortelomerphosphat-Triester	1578186-64-7											
6:2/6:2/10:2 triPAP	6:2/6:2/10:2 Fluortelomerphosphat-Triester	1578186-57-8											
8:2 triPAP	8:2 Fluortelomerphosphat-Triester	149790-22-7											
monoSAmPAP	EtFOSE-based phosphate monoester												
diSAmPAP	EtFOSE-based phosphate diester	2965-52-8											
triSAmPAP	EtFOSE-based phosphate triester	2250-98-8											
	Ammonium-(n:2)-Fluortelomerphosphat-Monoester	65530-71-4								V			
	Diammonium-(n:2)-Fluortelomerphosphat-Monoester	65530-72-5								V			
	Ammonium-(n:2)-Fluortelomerphosphat-Diester	65530-70-3								V			
	Zonyl FSP	67479-86-1											
	Zonyl FSN	65545-80-4											
	Zonyl FSA	57534-43-7											
	Zonyl FSE	83653-37-6											
	Zonyl FSN 100	52550-44-4											

wenig oder keine Informationen
 9 PFAS, die vom BAFU als minimales Messprogramm vorgeschlagen sind.

Relevante betroffene Tätigkeiten (nach Glüge et al., 2020 und zitiert)

	Name	CAS Nr.	Lederindustrie			Schmiermittel und Fette	Medizinische Geräte				Papier und Verpackungen
			Imprägnierung von Leder	Schuhcreme	Imprägnierspray (Leder, Textilien)		Schmiermittel	CCD-Farbfiler in Videoendoskopen	Zahnpasta, Mundspülung	Zahnseide	
PFBA	Perfluorbutansäure	375-22-4	N		N						N
PFPeA	Perfluorpentansäure	2706-90-3	N								N
PFHxA	Perfluorhexansäure	307-24-4	N	N	N						N
PFHpA	Perfluorheptansäure	375-85-9	N		N						N
PFOA	Perfluoroctansäure	335-67-1	N	N	N						N
PFNA	Perfluorononansäure	375-95-1	N		N						N
PFDA	Perfluordecansäure	335-76-2	N		N						N
PFUnDA	Perfluorundecansäure	2058-94-8	N		N						N
PFDoDA	Perfluordodecansäure	307-55-1	N		N						N
PFTriDA	Perfluortridecansäure	72629-94-8	N		N						N
PFTeDA	Perfluortetradecansäure	376-06-7	N		N						N
PFBS	Perfluorobutansulfonsäure	375-73-5	N		N					N	
PFPeS	Perfluoropentansulfonsäure	2706-91-4	N								
PFHS	Perfluorhexansulfonsäure	355-46-4	N								
PFHpS	Perfluorheptansulfonsäure	375-92-8	N								
PFOS	Perfluorooctansulfonsäure	1763-23-1	N				N			N	N
PFNS	Perfluoronansulfonsäure	68259-12-1									
PFDS	Perfluordekansulfonsäure	335-77-3	N								
(P)FOSA	Perfluorooctansulfonamid	754-91-6			N						
(N-)MeFOSA	N-Methylperfluorooctanesulfonamid	31506-32-8									
(N-)MeFOSAA	N-Methylperfluorooctanesulfonamid-Säure	2355-31-9									
(N-)EiFOSA	N-Ethylperfluorooctanesulfonamid	4151-50-2									
EiFOSAA	N-Ethylperfluorooctanesulfonamidoessigsäure	2991-50-6									
4:2 FTS	1H,1H,2H,2H-Perfluor-1-hexansulfonsäure	757124-72-4									
6:2 FTS	1H,1H,2H,2H-Perfluor-1-octansulfonsäure	27619-97-2									
8:2 FTS	1H,1H,2H,2H-Perfluor-1-dekansulfonsäure	39108-34-4									
HFPO-DA (GenX)	2,3,3,3-Tetrafluor-2-(heptafluoropropoxy)propansäure	13252-13-6									
DONA	4,8-Dioxa-3H-perfluorononansäure	919005-14-4									
9Cl-PF3ONS	9-Chlorohexadecafluoro-3-oxanonan-1-sulfonsäure	73606-19-6									
8:2-FTUCA	2H-Perfluor-2-decensäure	70887-84-2									

Andere Substanzen

PFODA	Perfluorooctadecansäure	16517-11-6									
ADONA	Ammoniumsalz von DONA	958445-44-8									
6:2 FTOH	6:2 Alkohol Fluortelomer	647-42-7		N	N			P	N		N
8:2 FTOH	8:2 Alkohol Fluortelomer	678-39-7		N	N			P	N		N
EiFOSE	N-Ethylperfluorooctanesulfonamid-Ethanol	1691-99-2									V
4:2 monoPAP	4:2-Fluortelomerphosphat-Monoester	150065-76-2									
6:2 monoPAP	6:2-Fluortelomerphosphat-Monoester	57678-01-0									N
8:2 monoPAP	8:2-Fluortelomerphosphat-Monoester	57678-03-2									N
10:2 monoPAP	10:2-Fluortelomerphosphat-Monoester	57678-05-4									N
4:2 diPAP	4:2-Fluortelomerphosphat-Diester	135098-69-0									
6:2 diPAP	6:2-Fluortelomerphosphat-Diester	57677-95-9									N
4:2/6:2 diPAP	4:2/6:2 Fluortelomerphosphat-Diester	1158182-59-2									
6:2/8:2 diPAP	6:2/8:2 Fluortelomerphosphat-Diester	943913-15-3									N
6:2/10:2 diPAP	6:2/10:2 Fluortelomerphosphat-Diester	1578186-50-1									N
6:2/12:2 diPAP	6:2/12:2 Fluortelomerphosphat-Diester	1578186-69-2									N
8:2 diPAP	8:2 Fluortelomerphosphat-Diester	678-41-1									N
8:2/10:2 diPAP	8:2/10:2 Fluortelomerphosphat-Diester	1158182-60-5									
8:2/12:2 diPAP	8:2/12:2 Fluortelomerphosphat-Diester	1578186-42-1									
10:2 diPAP	10:2 Fluortelomerphosphat-Diester	1895-26-7									N
6:2 triPAP	6:2-Fluortelomerphosphat-Triester	165325-62-2									N
6:2/6:2/8:2 triPAP	6:2 Fluortelomerphosphat-Triester	1578186-53-4									N
6:2/8:2/8:2 triPAP	6:2/8:2/8:2 Fluortelomerphosphat-Triester	1578186-56-7									N
6:2/8:2/10:2 triPAP	6:2/8:2/10:2 Fluortelomerphosphat-Triester	1578186-64-7									N
6:2/6:2/10:2 triPAP	6:2/6:2/10:2 Fluortelomerphosphat-Triester	1578186-57-8									N
8:2 triPAP	8:2 Fluortelomerphosphat-Triester	149790-22-7									N
monoSAmPAP	EiFOSE-based phosphate monoester										
diSAmPAP	EiFOSE-based phosphate diester	2965-52-8									
triSAmPAP	EiFOSE-based phosphate triester	2250-98-8									
	Ammonium-(n-2)-Fluortelomerphosphat-Monoester	65530-71-4									
	Diammonium-(n-2)-Fluortelomerphosphat-Monoester	65530-72-5									
	Ammonium-(n-2)-Fluortelomerphosphat-Diester	65530-70-3									
	Zonyl FSP	67479-86-1									
	Zonyl FSN	65545-80-4									
	Zonyl FSA	57534-43-7									
	Zonyl FSE	83653-37-6									
	Zonyl FSN 100	52550-44-4									

wenig oder keine Informationen
 9 PFAS, die vom BAFU als minimales Messprogramm vorgeschlagen sind.

Relevante betroffene Tätigkeiten (nach Glüge et al., 2020 und zitiert)

	Name	CAS Nr.	Kosmetika und Pflegeprodukte														
			Kosmetika im Allgemeinen	BB/CC Creme, Foundation	Körper- lotion/-creme/-öl	Abdeckstift/ Concealer	Creme/ Lidschatten	Eyeliner, Augen- stift	High- lighter	Balsam/ Lippen- stift, Lipgloss	Puder	Peeling	Sonnen- schutz- mittel	Haarcrèmes, Spülungen und Conditioner	Haarspray/ -schaum	Maniküre- produkte	
PFBA	Perfluorbutansäure	375-22-4	N	N	N	N	N					N	N				
PFPeA	Perfluorpentansäure	2706-90-3	N	N	N	N	N	N				N	N				
PFHxA	Perfluorhexansäure	307-24-4	N	N	N	N	N	N			N	N	N				N
PFHpA	Perfluorheptansäure	375-85-9	N	N	N	N	N	N			N	N	N	N			N
PFOA	Perfluoroctansäure	335-67-1	N	N	N	N	N	N			N	N		N			N
PFNA	Perfluorononansäure	375-95-1	N	N	N	N	N	N			N	N		N	N		N
PFDA	Perfluordecansäure	335-76-2	N	N	N	N	N	N			N	N		N			N
PFUnDA	Perfluorundecansäure	2058-94-8	N	N	N	N	N	N			N	N		N			N
PFDoDA	Perfluordodecansäure	307-55-1	N	N	N	N	N	N			N	N		N			N
PFTriDA	Perfluortridecansäure	72629-94-8	N	N	N	N	N	N			N	N		N			N
PFTeDA	Perfluortetradecansäure	376-06-7	N	N	N	N	N	N			N	N		N			N
PFBS	Perfluorobutansulfonsäure	375-73-5									N	N		N			
PFPeS	Perfluoropentansulfonsäure	2706-91-4															
PFHxS	Perfluorhexansulfonsäure	355-46-4															
PFHpS	Perfluorheptansulfonsäure	375-92-8															
PFOS	Perfluorooctansulfonsäure	1763-23-1															
PFNS	Perfluoronansulfonsäure	68259-12-1															
PFDS	Perfluordekansulfonsäure	335-77-3															
(P)FOSA	Perfluorooctansulfonamid	754-91-6															
(N-)MeFOSA	N-Methylperfluorooctanesulfonamid	31506-32-8															
(N-)MeFOSAA	N-Methylperfluorooctanesulfonamid-Saure	2355-31-9															
(N-)EtFOSA	N-Ethylperfluorooctanesulfonamid	4151-50-2															
EtFOSAA	N-Ethylperfluorooctan- sulfonamidoessigsäure	2991-50-6															
4:2 FTS	1H,1H,2H,2H-Perfluor-1-hexansulfonsäure	757124-72-4															
6:2 FTS	1H,1H,2H,2H-Perfluor-1-octansulfonsäure	27619-97-2	N	N	N	N										N	
8:2 FTS	1H,1H,2H,2H-Perfluor-1-dekansulfonsäure	39108-34-4															
HFPO-DA (GenX)	2,3,3,3-Tetrafluor-2-(heptafluoropropoxy)propansäure	13252-13-6															
DONA	4,8-Dioxa-3H-perfluorononansäure	919005-14-4															
9Cl-PF3ONS	9-Chlorohexadecafluoro-3-oxanonan-1- sulfonsäure	73606-19-6															
8:2-FTUCA	2H-Perfluor-2-decensäure	70887-84-2															

Andere Substanzen

PFODA	Perfluorooctadecansäure	16517-11-6															
ADONA	Ammoniumsalz von DONA	958445-44-8															
6:2 FTOH	6:2 Alkohol Fluortelomer	647-42-7															
8:2 FTOH	8:2 Alkohol Fluortelomer	678-39-7															
EtFOSE	N-Ethylperfluorooctanesulfonamid-Ethanol	1691-99-2															
4:2 monoPAP	4:2-Fluortelomerphosphat-Monoester	150065-76-2	N														
6:2 monoPAP	6:2-Fluortelomerphosphat-Monoester	57678-01-0	N														
8:2 monoPAP	8:2-Fluortelomerphosphat-Monoester	57678-03-2	N														
10:2 monoPAP	10:2-Fluortelomerphosphat-Monoester	57678-05-4	N														
4:2 diPAP	4:2-Fluortelomerphosphat-Diester	135098-69-0	N														
6:2 diPAP	6:2-Fluortelomerphosphat-Diester	57677-95-9	N														
4:2/6:2 diPAP	4:2/6:2 Fluortelomerphosphat-Diester	1158182-59-2	N														
6:2/8:2 diPAP	6:2/8:2 Fluortelomerphosphat-Diester	943913-15-3	N														
6:2/10:2 diPAP	6:2/10:2 Fluortelomerphosphat-Diester	1578186-50-1	N														
6:2/12:2 diPAP	6:2/12:2 Fluortelomerphosphat-Diester	1578186-69-2	N														
8:2 diPAP	8:2 Fluortelomerphosphat-Diester	678-41-1	N														
8:2/10:2 diPAP	8:2/10:2 Fluortelomerphosphat-Diester	1158182-60-5	N														
8:2/12:2 diPAP	8:2/12:2 Fluortelomerphosphat-Diester	1578186-42-1	N														
10:2 diPAP	10:2 Fluortelomerphosphat-Diester	1895-26-7	N														
6:2 triPAP	6:2-Fluortelomerphosphat-Triester	165325-62-2															
6:2/6:2/8:2 triPAP	6:2 Fluortelomerphosphat-Triester	1578186-53-4															
6:2/8:2/8:2 triPAP	6:2/8:2/8:2 Fluortelomerphosphat-Triester	1578186-56-7															
6:2/8:2/10:2 triPAP	6:2/8:2/10:2 Fluortelomerphosphat-Triester	1578186-64-7															
6:2/6:2/10:2 triPAP	6:2/6:2/10:2 Fluortelomerphosphat-Triester	1578186-57-8															
8:2 triPAP	8:2 Fluortelomerphosphat-Triester	149790-22-7															
monoSAmPAP	EtFOSE-based phosphate monoester																
diSAmPAP	EtFOSE-based phosphate diester	2965-52-8															
triSAmPAP	EtFOSE-based phosphate triester	2250-98-8															
	Ammonium-(n:2)-Fluortelomerphosphat-Monoester	65530-71-4															
	Diammonium-(n:2)-Fluortelomerphosphat-Monoester	65530-72-5															
	Ammonium-(n:2)-Fluortelomerphosphat-Diester	65530-70-3															
	Zonyl FSP	67479-86-1															V
	Zonyl FSN	65545-80-4															
	Zonyl FSA	57534-43-7															
	Zonyl FSE	83653-37-6															V
	Zonyl FSN 100	52550-44-4															

wenig oder keine Informationen
 9 PFAS, die vom BAFU als minimales Messprogramm vorgeschlagen sind.

Relevante betroffene Tätigkeiten (nach Glüge et al., 2020 und zitiert)

	Name	CAS Nr.	Pestizide		Kunststoffe, Gummi und Harze			Druckerei	Klebstoffe	Schweißen	Sportartikel			
			in Lösungen nachgewiesen	Insektizid (Ameisen und Kakerlaken)	Gummi (Kühlschrank)	Antistatikum aus Kunststoff oder Gummi	Harz				Druckfarbe	Klempnerflussmittel mit bleihaltigem Lötzinn	Skiwachs	Schmiermittel für Fahrräder
PFBA	Perfluorbutansäure	375-22-4									N	N		
PFPeA	Perfluorpentansäure	2706-90-3									N			
PFHxA	Perfluorhexansäure	307-24-4									N			N
PFHpA	Perfluorheptansäure	375-85-9									N	N		
PFOA	Perfluoroctansäure	335-67-1	N								N	N		N
PFNA	Perfluorononansäure	375-95-1									N			
PFDA	Perfluordecansäure	335-76-2									N			
PFUnDA	Perfluorundecansäure	2058-94-8									N			
PFDoDA	Perfluordodekansäure	307-55-1									N			
PFTriDA	Perfluortridekansäure	72629-94-8									N			
PFTeDA	Perfluortetradekansäure	376-06-7									N			
PFBS	Perfluorbutansulfonsäure	375-73-5				P	N						P	
PFPeS	Perfluorpentansulfonsäure	2706-91-4												
PFHxS	Perfluorhexansulfonsäure	355-46-4			N									
PFHpS	Perfluorheptansulfonsäure	375-92-8												
PFOS	Perfluorooctansulfonsäure	1763-23-1			N	P		N		N (PFOS-ammonium)	N			
PFNS	Perfluoronansulfonsäure	68259-12-1												
PFDS	Perfluordekansulfonsäure	335-77-3												
(P)FOSA	Perfluorooctansulfonamid	754-91-6												
(N-)MeFOSA	N-Methylperfluorooctansulfonamid	31506-32-8												
(N-)MeFOSAA	N-Methylperfluorooctansulfonamid-Saure	2355-31-9												
(N-)EiFOSA	N-Ethylperfluorooctansulfonamid	4151-50-2		V										
EiFOSAA	N-Ethylperfluorooctansulfonamidoessigsäure	2991-50-6												
4:2 FTS	1H,1H,2H,2H-Perfluor-1-hexansulfonsäure	757124-72-4												
6:2 FTS	1H,1H,2H,2H-Perfluor-1-octansulfonsäure	27619-97-2												
8:2 FTS	1H,1H,2H,2H-Perfluor-1-dekansulfonsäure	39108-34-4												
HFPO-DA (GenX)	2,3,3,3-Tetrafluor-2-(heptafluoropropoxy)propansäure	13252-13-6												
DONA	4,8-Dioxa-3H-perfluorononansäure	919005-14-4												
9Cl-PF3ONS	9-Chlorohexadecafluoro-3-oxanonan-1-sulfonsäure	73606-19-6												
8:2-FUCA	2H-Perfluor-2-decensäure	70887-84-2												

Andere Substanzen

PFODA	Perfluorooctadecansäure	16517-11-6									N			
ADONA	Ammoniumsalz von DONA	958445-44-8												
6:2 FTOH	6:2 Alkohol Fluortelomer	647-42-7									N	N	N	
8:2 FTOH	8:2 Alkohol Fluortelomer	678-39-7						N		N	N		N	
EiFOSE	N-Ethylperfluorooctansulfonamid-Ethanol	1691-99-2												
4:2 monoPAP	4:2-Fluortelomerphosphat-Monoester	150065-76-2												
6:2 monoPAP	6:2-Fluortelomerphosphat-Monoester	57678-01-0												
8:2 monoPAP	8:2-Fluortelomerphosphat-Monoester	57678-03-2												
10:2 monoPAP	10:2-Fluortelomerphosphat-Monoester	57678-05-4												
4:2 diPAP	4:2-Fluortelomerphosphat-Diester	135098-69-0												
6:2 diPAP	6:2-Fluortelomerphosphat-Diester	57677-95-9												
4:2/6:2 diPAP	4:2/6:2 Fluortelomerphosphat-Diester	1158182-59-2												
6:2/8:2 diPAP	6:2/8:2 Fluortelomerphosphat-Diester	943913-15-3												
6:2/10:2 diPAP	6:2/10:2 Fluortelomerphosphat-Diester	1578186-50-1												
6:2/12:2 diPAP	6:2/12:2 Fluortelomerphosphat-Diester	1578186-69-2												
8:2 diPAP	8:2 Fluortelomerphosphat-Diester	678-41-1												
8:2/10:2 diPAP	8:2/10:2 Fluortelomerphosphat-Diester	1158182-60-5												
8:2/12:2 diPAP	8:2/12:2 Fluortelomerphosphat-Diester	1578186-42-1												
10:2 diPAP	10:2 Fluortelomerphosphat-Diester	1895-26-7												
6:2 triPAP	6:2-Fluortelomerphosphat-Triester	165325-62-2												
6:2/6:2/8:2 triPAP	6:2 Fluortelomerphosphat-Triester	1578186-53-4												
6:2/8:2/8:2 triPAP	6:2/8:2/8:2 Fluortelomerphosphat-Triester	1578186-56-7												
6:2/8:2/10:2 triPAP	6:2/8:2/10:2 Fluortelomerphosphat-Triester	1578186-64-7												
6:2/6:2/10:2 triPAP	6:2/6:2/10:2 Fluortelomerphosphat-Triester	1578186-57-8												
8:2 triPAP	8:2 Fluortelomerphosphat-Triester	149790-22-7												
monoSAmPAP	EiFOSE-based phosphate monoester													
diSAmPAP	EiFOSE-based phosphate diester	2965-52-8												
triSAmPAP	EiFOSE-based phosphate triester	2250-98-8												
	Ammonium-(n:2)-Fluortelomerphosphat-Monoester	65530-71-4												
	Diammonium-(n:2)-Fluortelomerphosphat-Monoester	65530-72-5												
	Ammonium-(n:2)-Fluortelomerphosphat-Diester	65530-70-3												
	Zonyl FSP	67479-86-1												
	Zonyl FSN	65545-80-4												
	Zonyl FSA	57534-43-7												
	Zonyl FSE	83653-37-6												
	Zonyl FSN 100	52550-44-4							V					

wenig oder keine Informationen
 9 PFAS, die vom BAFU als minimales Messprogramm vorgeschlagen sind.

Relevante betroffene Tätigkeiten (nach Glüge et al., 2020 und zitiert)

	Name	CAS Nr.	Textilien und Polsterung		Antibeschlagn-Sprays und -Tücher
			Flecken- und fettabweisende Textilien und Tapeten	Imprägnierspray (Textilien)	
PFBA	Perfluorbutansäure	375-22-4	N	N	
PFPeA	Perfluorpentansäure	2706-90-3	N		
PFHxA	Perfluorhexansäure	307-24-4	N	N	
PFHpA	Perfluorheptansäure	375-85-9	N		
PFOA	Perfluoroctansäure	335-67-1	N	N	
PFNA	Perfluorononansäure	375-95-1	N		
PFDA	Perfluorodecansäure	335-76-2	N	N	
PFUnDA	Perfluorundecansäure	2058-94-8	N		
PFDoDA	Perfluordodecansäure	307-55-1	N		
PFTriDA	Perfluortridecansäure	72629-94-8	N		
PFTeDA	Perfluortetradecansäure	376-06-7	N		
PFBS	Perfluorobutansulfonsäure	375-73-5	N		
PFPeS	Perfluoropentansulfonsäure	2706-91-4	N		
PFHxS	Perfluorhexansulfonsäure	355-46-4	N		
PFHpS	Perfluoroheptansulfonsäure	375-92-8	N		
PFOS	Perfluorooctansulfonsäure	1763-23-1	N		
PFNS	Perfluoronansulfonsäure	68259-12-1			
PFDS	Perfluordekansulfonsäure	335-77-3	N	N	
(P)FOSA	Perfluorooctansulfonamid	754-91-6			
(N-)MeFOSA	N-Methylperfluorooctansulfonamid	31506-32-8			
(N-)MeFOSAA	N-Methylperfluorooctansulfonamid-Säure	2355-31-9			
(N-)EtFOSA	N-Ethylperfluorooctansulfonamid	4151-50-2			
EtFOSAA	N-Ethylperfluorooctansulfonamidoessigsäure	2991-50-6			
4:2 FTS	1H,1H,2H,2H-Perfluor-1-hexansulfonsäure	757124-72-4			
6:2 FTS	1H,1H,2H,2H-Perfluor-1-octansulfonsäure	27619-97-2			
8:2 FTS	1H,1H,2H,2H-Perfluor-1-dekansulfonsäure	39108-34-4			
HFPO-DA (GenX)	2,3,3,3-Tetrafluor-2-(heptafluoropropoxy)propansäure	13252-13-6			
DONA	4,8-Dioxa-3H-perfluorononansäure	919005-14-4			
9Cl-PF3ONS	9-Chlorohexadecafluoro-3-oxanonan-1-sulfonsäure	73606-19-6			
8:2-FTUCA	2H-Perfluor-2-decansäure	70887-84-2			

Andere Substanzen

PFODA	Perfluorooctadecansäure	16517-11-6			
ADONA	Ammoniumsalz von DONA	958445-44-8			
6:2 FTOH	6:2 Alkohol Fluortelomer	647-42-7	N	N	N
8:2 FTOH	8:2 Alkohol Fluortelomer	678-39-7			N
EtFOSE	N-Ethylperfluorooctansulfonamid-Ethanol	1691-99-2			
4:2 monoPAP	4:2-Fluortelomerphosphat-Monoester	150065-76-2			
6:2 monoPAP	6:2-Fluortelomerphosphat-Monoester	57678-01-0			
8:2 monoPAP	8:2-Fluortelomerphosphat-Monoester	57678-03-2			
10:2 monoPAP	10:2-Fluortelomerphosphat-Monoester	57678-05-4			
4:2 diPAP	4:2-Fluortelomerphosphat-Diester	135098-69-0			
6:2 diPAP	6:2-Fluortelomerphosphat-Diester	57677-95-9			
4:2/6:2 diPAP	4:2/6:2 Fluortelomerphosphat-Diester	1158182-59-2			
6:2/8:2 diPAP	6:2/8:2 Fluortelomerphosphat-Diester	943913-15-3			
6:2/10:2 diPAP	6:2/10:2 Fluortelomerphosphat-Diester	1578186-50-1			
6:2/12:2 diPAP	6:2/12:2 Fluortelomerphosphat-Diester	1578186-69-2			
8:2 diPAP	8:2 Fluortelomerphosphat-Diester	678-41-1			
8:2/10:2 diPAP	8:2/10:2 Fluortelomerphosphat-Diester	1158182-60-5			
8:2/12:2 diPAP	8:2/12:2 Fluortelomerphosphat-Diester	1578186-42-1			
10:2 diPAP	10:2 Fluortelomerphosphat-Diester	1895-26-7			
6:2 triPAP	6:2-Fluortelomerphosphat-Triester	165325-62-2			
6:2/6:2/8:2 triPAP	6:2 Fluortelomerphosphat-Triester	1578186-53-4			
6:2/8:2/8:2 triPAP	6:2/8:2/8:2 Fluortelomerphosphat-Triester	1578186-56-7			
6:2/8:2/10:2 triPAP	6:2/8:2/10:2 Fluortelomerphosphat-Triester	1578186-64-7			
6:2/6:2/10:2 triPAP	6:2/6:2/10:2 Fluortelomerphosphat-Triester	1578186-57-8			
8:2 triPAP	8:2 Fluortelomerphosphat-Triester	149790-22-7			
monoSamPAP	EtFOSE-based phosphate monoester				
diSamPAP	EtFOSE-based phosphate diester	2965-52-8			
triSamPAP	EtFOSE-based phosphate triester	2250-98-8			
	Ammonium-(n:2)-Fluortelomerphosphat-Monoester	65530-71-4			
	Diammonium-(n:2)-Fluortelomerphosphat-Monoester	65530-72-5			
	Ammonium-(n:2)-Fluortelomerphosphat-Diester	65530-70-3			
	Zonyl FSP	67479-86-1			
	Zonyl FSN	65545-80-4			
	Zonyl FSA	57534-43-7			
	Zonyl FSE	83653-37-6			
	Zonyl FSN 100	52550-44-4			

wenig oder keine Informationen

9 PFAS, die vom BAFU als minimales Messprogramm vorgeschlagen sind.

Articles de synthèse sur les activités historiques et actuelles ayant utilisé des PFAS / Übersichtsartikel über historische und aktuelle Aktivitäten, die PFAS verwendet haben

Pour la liste des brevets, consulter les deux publications ci-dessous / Eine Liste der Patente finden Sie in den beiden folgenden Publikationen

Glüge, J., Scheringer, M., Cousins, I.T., DeWitt, J., 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). *Environmental Science Processes & Impacts*, 22, 2345.

Gaines, L.G., 2023. Historical and current usage of per-and polyfluoroalkyl substances (PFAS): A literature review. *American Journal of Industrial Medicine*, 66(5), 353-378.

Références / Referenzen

Backe, W.J., Day, T.C., Field, J.A., 2013. Zwitterionic, cationic, and anionic fluorinated chemicals in aqueous film forming foam formulations and groundwater from US military bases by nonaqueous large-volume injection HPLC-MS/MS. *Environmental science & technology*, 47(10), 5226-5234.

Barzen-Hanson, K.A., Roberts, S.C., Choyke, S., Oetjen, K., McAlees, A., Riddell, N., McCrindle, R., Ferguson, P.L., Higgins, C.P., Field, J.A., 2017. Discovery of 40 Classes of Per- and Polyfluoroalkyl Substances in Historical Aqueous Film-Forming Foams (AFFFs) and AFFF-Impacted Groundwater.

Bečanová, J., Melymuk, L., Vojta, Š., Komprdová, K., Klánová, J., 2016. Screening for perfluoroalkyl acids in consumer products, building materials and wastes. *Chemosphere*, 164, 322-329.

Blom, C., Hanssen, L., 2015. Analysis of per-and polyfluorinated substances in articles. (M-360)

Borg, D., Ivarsson, J., 2017. Analysis of PFASs and TOF in Products.

Boucher, J.M., Cousins, I.T., Scheringer, M., Hungerbühler, K., Wang, Z., 2018. Toward a comprehensive global emission inventory of C4–C10 perfluoroalkanesulfonic acids (PFASs) and related precursors: focus on the life cycle of C6-and C10-based products. *Environmental Science & Technology Letters*, 6(1), 1-7.

Brinch, A., Jensen, A.A., Christensen, F., 2018. Survey of Chemical Substances in Consumer Products-Risk Assessment of Fluorinated Substances in Cosmetic Products No. 169.

Buck, R.C., Murphy, P.M., Pabon, M., 2012. Chemistry, Properties, and Use of Commercial Fluorinated Surfactants. In *The Handbook of Environmental Chemistry - Polyfluorinated Chemicals and Transformation Products*, edited by Thomas P. Knepper and Frank T. Lange, 17:1–24. Springer Berlin Heidelberg.

D'Agostino, L.A., Mabury, S.A. 2014. Identification of Novel Fluorinated Surfactants in Aqueous Film Forming Foams and Commercial Surfactant Concentrates. *Environmental Science and Technology* 48 (1): 121–29.

Dinglasan-Panlilio, M.J.A., Mabury, S.A., 2006. Significant residual fluorinated alcohols present in various fluorinated materials. *Environmental Science & Technology*, 40(5), 1447-1453.

Fiedler, S., Pfister, G., Schramm, K.W., 2010. Poly- and perfluorinated compounds in household consumer products. *Toxicological and Environ Chemistry*, 92(10), 1801-1811.

Gebbink, W.A., Ullah, S., Sandblom, O., Berger, U., 2013. Polyfluoroalkyl phosphate esters and perfluoroalkyl carboxylic acids in target food samples and packaging—method development and screening. *Environmental Science and Pollution Research*, 20, 7949-7958.

Guo, Z., Liu, X., Krebs, K.A., Roache, N.F., 2009. Perfluorocarboxylic acid content in 116 articles of commerce. Research Triangle Park, NC: US Environmental Protection Agency.

Hauser, H., Füglistner, L., Scheffelmaier, T., 2020. Verwendung von Fluortensiden in der Galvanikbranche: Übersicht über die Situation in der Schweiz.

Herkert, N.J., Kassotis, C.D., Zhang, S., Han, Y., Pulikkal, V.F., Sun, M., Fergusson, L., Stapleton, H.M., 2022. Characterization of per-and polyfluorinated alkyl substances present in commercial anti-fog products and their in vitro adipogenic activity. *Environmental Science & Technology*, 56(2), 1162-1173.

Herzke, D., Posner, S., Olsson, E., 2009. Survey, screening and analyses of PFCs in consumer products. Project report. Mölndal: Swerea IVF AB, 9, 47.

Janousek, R.M., Lebertz, S., Knepper, T.P., 2019. Previously unidentified sources of perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances from building materials and industrial fabrics. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 21(11), 1936-1945.

KEMI Swedish Chemical Agency, 2015. Occurrence and Use of Highly Fluorinated Substances and

Kissa, Erik. 2001. *Fluorinated Surfactants and Repellents*. Marcel Dekker AG.

Kotthoff, M., Müller, J., Jüriling, H., Schlummer, M., Fiedler, D., 2015. Perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances in consumer products. *Environmental Science and Pollution Research*, 22, 14546-14559.

Lerner, S., 2015. *The Teflon Toxin*. The Intercept, series available online at <https://theintercept.com/series/the-teflon-toxin/> (accessed September 4, 2018).

Liu, X., Guo, Z., Krebs, K.A., Pope, R.H., Roache, N.F., 2014. Concentrations and trends of perfluorinated chemicals in potential indoor sources from 2007 through 2011 in the US. *Chemosphere*, 98, 51-57.

Mumtaz, M., Bao, Y., Liu, L., Huang, J., Cagnetta, G., Yu, G., 2019. Per-and polyfluoroalkyl substances in representative fluorocarbon surfactants used in Chinese film-forming foams: levels, profile shift, and environmental implications. *Environmental Science & Technology Letters*, 6(5), 259-264.

Norden, 2020. SPIN - Substances in Preparations in Nordic Countries.

Norwegian Environment Agency, 2017. Investigation of Sources of PFBS into the Environment (M-759).

Peaslee, G.F., Wilkinson, J.T., McGuinness, S.R., Tighe, M., Caterisano, N., Lee, S., Gonzales, A., Roddy, M., Mitchell, K., 2020. Another pathway for firefighter exposure to per-and polyfluoroalkyl substances: Firefighter textiles. *Environmental Science & Technology Letters*, 7(8), 594-599.

Poulsen, P.B., Jensen, A.A., Wallström, E., Aps, E.N.P.R.O., 2005. More environmentally friendly alternatives to PFOS-compounds and PFOA. *Environmental Project*, 1013, 2005.

Schultes, L., Vestergren, R., Volkova, K., Westberg, E., Jacobson, T., Benskin, J. P., 2018. Per-and polyfluoroalkyl substances and fluorine mass balance in cosmetic products from the Swedish market: implications for environmental emissions and human exposure. *Environmental Science: Processes & Impacts*,

Schulze, P.E., Norin, H., 2006. Fluorinated pollutants in all-weather clothing. *Friends of the Earth Norway*.

Trier, X., Taxvig, C., Rosenmai, A.K., Pedersen, G.A., 2018. PFAS in paper and board for food contact: Options for risk management of poly-and perfluorinated substances. *Nordic Council of Ministers*.

UNEP, 2017. Guidance for the Inventory of Perfluorooctane Sulfonic Acid (PFOS) and Related Chemicals Listed under Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants (UNEP/POPS/COP.7/INF/26).

USEPA, 2016. Chemical Data Reporting under the Toxic Substances Control Act. 2016.

Wang, Z., Cousins, I.T., Berger, U., Hungerbühler, K., Scheringer, M., 2016. Comparative assessment of the environmental hazards of and exposure to perfluoroalkyl phosphonic and phosphinic acids (PFPA and PFPiAs): current knowledge, gaps, challenges and research needs. *Environment international*, 89, 235-247.

Références / Referenzen (pour les mousses anti-incendie; für Feuerlöschschäume)

Dauchy, X., Boiteux, V., Bach, C., Rosin, C., Munoz, J.F., 2017. Per- and polyfluoroalkyl substances in firefighting foam concentrates and water samples collected near sites impacted by the use of these foams.

Houtz, E.F., Higgins, C.P., Field, J.A., Sedlak, D.L., 2013. Persistence of perfluoroalkyl acid precursors in AFFF-impacted groundwater and soil. *Environmental science & technology*, 47(15), 8187-8195.

Weiner, B., Yeung, L.W., Marchington, E.B., D'Agostino, L.A., Mabury, S.A., 2013. Organic fluorine content in aqueous film forming foams (AFFFs) and biodegradation of the foam component 6: 2 fluorotelomermercaptopalkylamido sulfonate (6: 2 FTSAS). *Environmental Chemistry*, 10(6), 486-493.

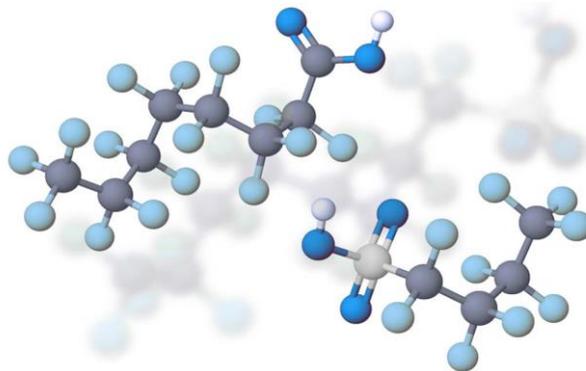
Anhang 3

Expertenbericht «Hilfestellungen für den Eintrag in den Kataster der belasteten Standorte (KbS)», Magma AG, vom 30.01.2023

Entscheidungsgrundlagen für den Vollzug bei PFAS-belasteten Standorten in der Schweiz

Hilfestellungen für den Eintrag in den Kataster der belasteten Standorte (KbS)

Expertenbericht im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)



Auftragsnummer: 21 201.1

Datum: 30.1.2023

Version: v1.1 [230130_PFAS_Katastereintrag.docx]

Auftraggeberin

Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abt. Boden und Biotechnologie, Sektion Altlasten,
CH-3003 Bern

Auftragnehmerin

magma AG Geologie Umwelt Planung, CH-8408 Winterthur

Berichtsverfasser

Reto Philipp magma AG

Begleitung BAFU

Rolf Kettler BAFU, Abt. Boden und Biotechnologie

Monika Schwab-Wyssler BAFU, Abt. Boden und Biotechnologie (Projektleitung)

Christiane Wermeille BAFU, Abt. Boden und Biotechnologie (Sektionschefin Altlasten)

Projekt «PFAS im Bereich Altlasten»

Im Rahmen des Projekts «PFAS im Bereich Altlasten» hat die Arbeitsgruppe «Altlasten» bei der Bearbeitung dieses Berichts mitgewirkt. Die Arbeitsgruppe «Altlasten» ist mit Vertretern der folgenden Kantone konstituiert: BE, BL, BS, NE, SG, TG, VD, VS, ZH.

Hinweis

Dieser Bericht wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst.
Für den Inhalt ist allein die Auftragnehmerin verantwortlich.

Inhalt

1	Einleitung, Ziele.....	3
1.1	Ausgangslage.....	3
1.2	Ziele.....	3
2	Methode.....	4
2.1	Die Branchennummern nach und NOGA und ASW:.....	5
2.2	PFAS-haltige und PFAS-freie Löschschäume.....	5
2.3	Branchenspezifische Fragen.....	5
2.4	Zeitfenster.....	5
2.5	Auswertung.....	5
2.6	Weiterer Untersuchungsbedarf von PFAS-Standorten.....	6
	Anhang 1: Grundlagen.....	8
	Anhang 2: Branchenspezifische Entscheidungsbäume.....	9

Titelbild:

oben: Struktur von Perfluoroktansäure (PFOA, $C_8HF_{15}O_2$); unten: Struktur von Perfluorbutansulfonsäure (PFBS, $C_4HF_9O_3S$). Quelle: www.ecori.org

1 Einleitung, Ziele

1.1 Ausgangslage

PFAS sind perfluorierte (vollfluorierte) und polyfluorierte (teilfluorierte) Alkylsubstanzen. Es sind mehr als 4'500 Verbindungen bekannt, darunter viele Vorläufersubstanzen, welche zu perfluorierten Verbindungen abgebaut werden können. PFAS werden aufgrund ihrer besonderen Eigenschaften (fett- und wasserabweisende Polymerschichten, hohe thermische, chemische und biologische Stabilität, Bildung von benetzenden Filmen) sehr vielfältig verwendet.

Etliche Kantone analysieren im Rahmen von Monitorings oder Untersuchungen von belasteten Standorten PFAS und sammeln so laufend Erkenntnisse zur Verbreitung von PFAS im Grundwasser und in Böden. Aufgrund der neuen Erkenntnisse gehen von zahlreichen

- ▶ Brandübungsplätzen mit Einsatz von Löschschaum,
- ▶ Betriebsstandorten, auf welchen PFAS bei der gewerblichen oder industriellen Produktion eingesetzt wurden oder werden,
- ▶ Deponien, auf welchen Brandschutt bzw. Brandabfälle, PFAS-haltige Produkte oder Produktionsabfälle entsorgt wurden oder worden sind und
- ▶ Brandereignissen, bei welchen zur Brandbekämpfung Löschschaum eingesetzt worden ist,

bedeutende Umwelteinwirkungen aus [2]. Standorte, bei denen feststeht oder mit grosser Wahrscheinlichkeit zu erwarten ist, dass sie belastet sind, müssen in den Kataster der belasteten Standorte erfasst werden.

Art. 5 AltIV

Untersuchungsbedürftige Standorte müssen im Rahmen einer Voruntersuchung, die in der Regel aus einer historischen und einer technischen Untersuchung besteht, untersucht werden. In der Voruntersuchung werden die für die Beurteilung der Überwachungs- und Sanierungsbedürftigkeit erforderlichen Angaben ermittelt und im Hinblick auf die Gefährdung der Umwelt bewertet (Gefährdungsabschätzung).

Art. 7 und 8 AltIV

1.2 Ziele

Die vorliegende Hilfestellung soll Hinweise darauf geben, ob ein Brandübungsplatz, ein Betriebsstandort, eine Abfallablagerung oder ein Brandereignis hinsichtlich möglicher Belastungen durch PFAS in den Kataster der belasteten Standorte eingetragen werden soll.

2 Methode

Bei den Abb. 1 aufgeführten Branchen und Tätigkeiten kommen seit den 1960er Jahren PFAS-haltige Substanzen zum Einsatz:

Abb. 1:
Branchen und Tätigkeiten, bei welchen PFAS-haltige Substanzen verwendet werden.

Die Nummern vor den einzelnen Branchen und Tätigkeiten verweisen auf die Entscheidungsbaume im Anhang 2.

*]

Branchenunabhängige Beurteilung: Dieser Entscheidungsbaum ist *zusätzlich* zu den branchenspezifischen Entscheidungsbäumen zu beurteilen

Betriebsstandorte	
<p>Feuerwehr, Zivilschutz, Betriebs-/Werkfeuerwehren:</p> <p>B1 Ausbildungseinrichtungen Brandbekämpfung mit Einsatz von Löschschaum, Brandübungsplätze, Zivilschutz-Ausbildungszentren</p> <p>B2 Betriebs-/Werkfeuerwehren: Raffinerien, *) Petrochemie, grosse Tanklager, chemische Industrie, Kunststoffverarbeitung, Reifenherstellung, Flughäfen, Militärflugplätze</p>	<p>Gewerbliche / industrielle Produktion mit untergeordnetem Einsatz von PFAS oder Einsatz in geringen Mengen</p> <p>B6 Chemische Industrie: Herstellung Pflanzenschutzmitteln, Fluorpolymeren, Reinigungs- und Kosmetikprodukten, Lacke und Farben mit PFAS-Additiven, u.a.m.</p> <p>B7 Wäscherei, chemische Reinigung: Imprägnieren von Textilien</p> <p>B8 Papier- und Kartongewerbe: Herstellung von beschichteten Kartonprodukten und Verpackungen</p> <p>B9 Halbleiterindustrie, Leiterplattenherstellung</p> <p>B10 Herstellung von Druckerzeugnissen, Vervielfältigung von Ton-, Bild- und Datenträgern (Fotoindustrie)</p> <p>B11 Einsatz von Hochleistungs-*) Hydraulikflüssigkeiten inkl. Wartungs- und Reparaturbetriebe der Luftfahrt</p> <p>B12 Automatische Löschschaumeinrichtungen *) Lager und Umschlag von brand- und/oder explosionsgefährlichen Gütern oder Flüssigkeiten</p>
<p>Gewerbliche / industrielle Produktion mit häufigem Einsatz von PFAS</p> <p>B3 Herstellung und Wartung von Feuerlöschern und Feuerlöschanlagen</p> <p>B4 Metallbearbeitung, Galvanik: Galvanikbäder, Oberflächenveredlung, Wärmebehandlung</p> <p>B5 Textilgewerbe: Herstellung von wasserabweisenden Textilien</p> <p>B6 Chemische Industrie: Herstellung von Feuerlöschschäumen, Imprägniermitteln, Skiwachsen</p>	
Abfallbeseitigung	
<p>Entsorgung von PFAS-haltigen Abfällen, Feuerlöschübungen auf Deponien,</p> <p>A1 Deponien zur Entsorgung von PFAS-haltigen Produkten oder Produktionsabfällen</p> <p>A2 Brandübungsplätze auf Deponien</p>	
Unfallstandorte	
	<p>Brandbekämpfung</p> <p>U1 Brandereignisse mit Einsatz von Löschschaum</p>

Die Vorgehensweise zur Erfassung von Standorten mit möglichen PFAS-Belastungen mit den Entscheidungsbäumen in Anhang 2 orientiert sich an den branchenspezifischen Entscheidungsbäumen der Vollzugshilfe [3] zur Erstellung des Katasters der belasteten Standorte.

Auf Übungsanlagen zur Brandbekämpfung kommen oft PFAS-haltige Löschschäume zum Einsatz. Diese Übungsanlagen können zu bedeutenden PFAS-Emissionen führen: Entscheidungsbaum B1.

Mit den Entscheidungsbäumen B2 bis B12 werden Betriebe beurteilt, welche PFAS bei gewerblichen und industriellen Produktionsprozessen verwenden können.

Für Abfallablagerungen und Brandereignisse wurden separate Entscheidungsbäume erstellt: Entscheidungsbäume A1, A2 und U1.

2.1 Die Branchennummern nach und NOGA¹ und ASW²:

Der NOGA-Code und der ältere ASW-Code sind Branchencodes, der es ermöglicht, die „Unternehmen“ und „Arbeitsstätten“ aufgrund ihrer wirtschaftlichen Tätigkeit zu klassieren. Der NOGA-Code und der ASW-Code sind von vielen kantonalen Fachstellen bei der Erstellung des Katasters der belasteten Standorte ausgewertet und erfasst worden. Diese Codes ermöglichen das Auffinden von PFAS-relevanten Betrieben in bestehenden Datenbanken.

2.2 PFAS-haltige und PFAS-freie Löschschäume

Die folgende Tabelle listet PFAS-haltige und PFAS-freie Löschschäume auf, welche

- ▶ auf Brandübungsplätzen (Entscheidungsbäume A2, B1, B2),
- ▶ bei der Herstellung und Wartung von Feuerlöschern und Feuerlöschanlagen (B3),
- ▶ bei automatischen Feuerlöscheinrichtungen (B12) sowie
- ▶ bei der Bekämpfung von Brandereignissen (U1)

zu beurteilen sind ([1]):

Tab. 1:
Fluorhaltige und
fluorfreie
Löschschäume ([1])

*Liste nicht
abschliessend*

Fluorhaltige Produkte		Produkte ohne Fluor	
AFFF	Wasserfilmbildender Schaum	Class A	Schaum / Netzmittel für Branklasse A
AFFF / AR	do. alkoholbeständig	MBS	Mehrbereichsschaummittel
FP	Proteinschaum mit Fluortensiden	P	Proteinschaum
FP / AR	do. alkoholbeständig	FFF	Fluorfreier Schaum
FFFP	Wasserfilmbildender Proteinschaum mit Fluortensiden	FFF / AR	do. alkoholbeständig
FFFP / AR	do. alkoholbeständig		

2.3 Branchenspezifische Fragen

Die Entscheidungsbäume in Anhang 2 enthalten Fragen zu Tätigkeiten oder Produktionsprozessen, bei welchen PFAS erfahrungsgemäss zum Einsatz kommen.

Die Entscheidungsbäume B2, B11 und B12 sind branchenunabhängig. Sie sind zusätzlich zu den branchenspezifischen Entscheidungsbäumen zu beurteilen.

2.4 Zeitfenster

Die Synthese von PFAS begann in den 1950er Jahren. Ab den frühen 1960er Jahren wurden PFAS bei der industriellen und gewerblichen Produktion verwendet. PFAS-haltige Löschschäume sind seit 1963 bekannt. Ab Beginn der 1970er Jahre wurden PFAS häufig eingesetzt.

2.5 Auswertung

Die Entscheidungsbäume in Anhang 2 führen zu einem Eintrag in den Kataster der belasteten Standorte, wenn innerhalb des angegebenen Zeitfensters

¹ Nomenclature Générale des Activités économiques

² Allgemeine Systematik der Wirtschaftszweige

- ▶ PFAS-haltige Löschschaume eingesetzt worden sind oder
- ▶ gewerbliche / industrielle Produktionsprozesse, bei welchen PFAS verwendet werden, ausgeführt worden sind.

Wenn am Standort nachweislich weder PFAS-haltige Löschschaume eingesetzt worden sind noch gewerbliche / industrielle Produktionsprozesse stattgefunden haben kann auf einen Eintrag in den Kataster der belasteten Standorte verzichtet werden.

Diese Beurteilung bezieht sich nur auf das mögliche PFAS-Schadstoffpotenzial am Standort. Vorbehalten bleibt in jedem Fall ein Katastereintrag aufgrund von anderen belastungsrelevanter Umständen bzw. anderen Schadstoffen.

2.6 Weiterer Untersuchungsbedarf von PFAS-Standorten

Art. 5 Abs. 4 Bst. b
AltIV

Standorte, die gemäss den Entscheidungsbäumen in Anhang 2 für einen Eintrag in den Kataster der belasteten Standorte vorgesehen sind, müssen in der Regel auch im Rahmen einer Voruntersuchung untersucht werden, dies insbesondere auch darum, weil die branchenspezifischen Fragen oder der Einsatz von PFAS-haltigen oder PFAS-freien nur durch Befragungen im Rahmen einer Historischen Untersuchung verifiziert werden können.

magma AG, Winterthur, 30.1.2023

Sachbearbeiter: Reto Philipp, Dr. sc. nat. ETH/SIA



Reto Philipp, Dr. sc. nat. ETH/SIA



Eike Kreikenbaum, Dipl.-Geograph

Version	Korreferat	Korrekturen	Schlusskontrolle
v0.1 (30.6.2022)	1.7.2022 / Cb	1.7.2022 / Ph	1.7.2022 / Ph
v1.0 (8.12.2022)	28.11.2022 / BAFU	6.12.2022 / Ph	8.12.2022 / Ph
v1.1 (30.1.2023)	16.1.2023 / BAFU	30.1.2023 / Ph	30.1.2023 / Ph

mitglied
sia

Member of
USIC

Anhang 1: Grundlagen

Gesetzliche Grundlagen:

AltIV Verordnung vom 26. August 1998 über die Sanierung von belasteten Standorten (Altlasten-Verordnung; AltIV). – SR 814.680.

Projektbezogene Grundlagen:

- [1] Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft des Kantons Zürich AWEL: PFAS-Merkblatt für Altlastenvollzug Kt. Zürich. – 9.6.2022, <https://www.zh.ch/de/umwelt-tiere/abfall-rohstoffe/altlasten-belastete-standorte.html>.
- [2] Arcadis (2021): Entscheidungsgrundlagen für den Vollzug bei PFAS-belasteten Standorten in der Schweiz. Expertenbericht im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU). – 12.7.2021, <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/altlasten/publikationen-studien/studien.html>.
- [3] BUWAL (2001): Erstellung des Katasters der belasteten Standorte. - Vollzug Umwelt, VU-3411-D.

Anhang 2: Branchenspezifische Entscheidungsbäume

	A1	Abfallentsorgung: Entsorgung von PFAS-haltigen Abfällen	10
	A2	Abfallentsorgung: Feuerlöschübungen auf Deponien	11
	B1	Ausbildungseinrichtungen Brandbekämpfung mit Einsatz von Löschschaum, Brandübungsplätze, Zivilschutz-Ausbildungszentren	12
	B2	Betriebs-/Werkfeuerwehren: Raffinerien, Petrochemie, grosse Tanklager,	13
*)	*)	chemische Industrie, Kunststoffverarbeitung, Reifenherstellung, Flughäfen, Militärflugplätze	
Branchenunabhängige Beurteilung: Dieser Entscheidungsbaum ist zusätzlich zu den branchenspezifischen Entscheidungsbäumen zu beurteilen	B3	Herstellung und Wartung von Feuerlöschern und Feuerlöschanlagen	14
	B4	Metallbearbeitung, Galvanik: Galvanikbäder, Oberflächenveredlung, Wärmebehandlung	15
	B5	Textilgewerbe: Herstellung von wasserabweisenden Textilien	16
	B6	Chemische Industrie: Herstellung von Feuerlöschschäumen, Imprägniermitteln, Skiwachsen, Pflanzenschutzmitteln, Fluorpolymeren, Reinigungs- und Kosmetikprodukten, Lacke und Farben mit PFAS-Additiven, u.a.m.	17
	B7	Wäscherei, chemische Reinigung: Imprägnieren von Textilien	18
	B8	Papier- und Kartongewerbe: Herstellung von beschichteten Kartonprodukten und Verpackungen	19
	B9	Halbleiterindustrie, Leiterplattenherstellung	20
	B10	Herstellung von Druckerzeugnissen, Vervielfältigung von Ton-, Bild- und Datenträgern (Fotoindustrie)	21
	B11	Einsatz von Hochleistungs-Hydraulikflüssigkeiten inkl. Wartungs- und	22
*)	*)	Reparaturbetriebe der Luftfahrt	
	B12	Automatische Löschschaumeinrichtungen: Lager und Umschlag von	23
*)	*)	brand- und/oder explosionsgefährlichen Güter oder Flüssigkeiten	
	U1	Brandereignisse mit Einsatz von Löschschaum	24

A1 Abfallentsorgung:
Entsorgung von PFAS-haltigen Abfällen

ASW 8414 NOGA 90.99 Abfallablagerung, Deponie

Entsorgung von Brandschutt oder Brandabfällen:

Wurden oder werden auf der Deponie Brandschutt oder Brandabfälle entsorgt?

nein

ja

unbekannt

Ablagerungszeitraum:

nach 1960

nein

ja

Entsorgung von PFAS haltigen Betriebsabfällen:

Wurden oder werden auf der Deponie gewerbliche PFAS-haltige Betriebsabfälle entsorgt?

Beispiele:

- Galvanikschlämme
- Produktionsabfälle mit PFAS-Additiven
- Abfälle aus der Produktion von beschichteten Kartonprodukten und Verpackungen
- wasserabweisende Textilien, Vliese, Membrane
- ...

(Liste nicht vollständig)

nein

ja

unbekannt

Ablagerungszeitraum:

nach 1960

nein

ja

Kein Eintrag im Kataster der belastete Standorte
aufgrund Einsatz und Verwendung von PFAS
(vorbehalten bleibt ein Eintrag aufgrund anderer belastungsrelevanter Kriterien)

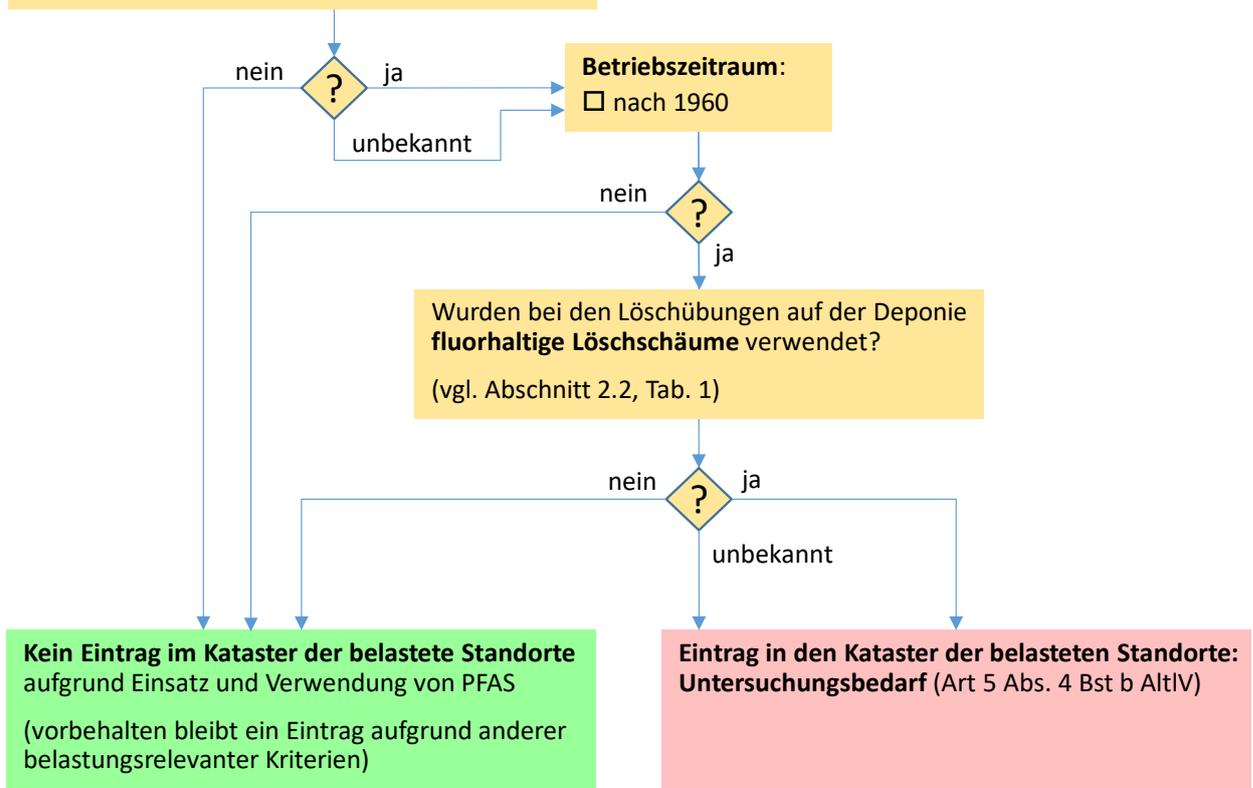
Eintrag in den Kataster der belasteten Standorte:
Untersuchungsbedarf (Art 5 Abs. 4 Bst b AltIV)

A2 Abfallentsorgung:
Feuerlöschübungen auf Deponien

ASW	NOGA	
8414	90.99	Abfallablagerung, Deponie
9134	75.26	Übungsanlage für Brandbekämpfung

Ausbildungen / Übungen zur Brandbekämpfung:

Fanden oder finden auf der Deponie Ausbildungen oder Übungen zur Brandbekämpfung statt, bei welchen Löschschaum eingesetzt wurde oder wird?

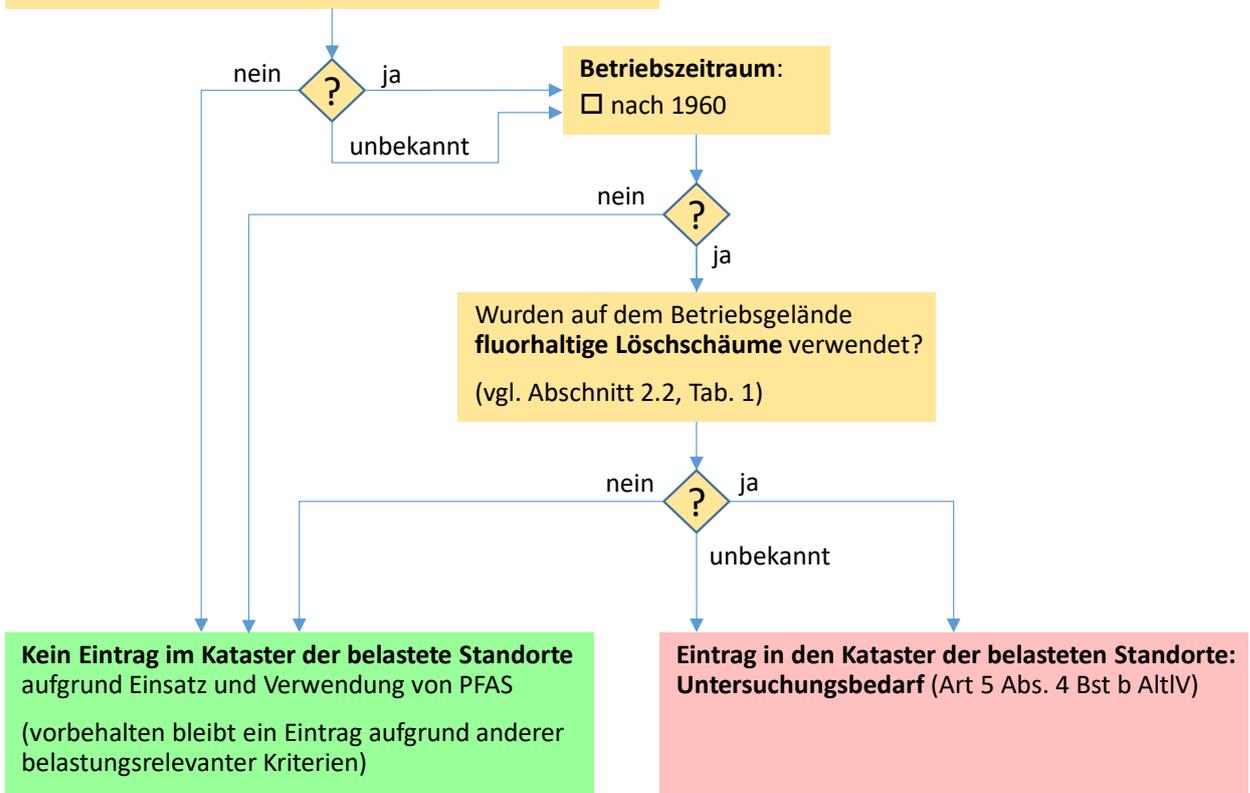


B1 **Ausbildungseinrichtungen Brandbekämpfung mit Einsatz von Löschschaum**
 Brandübungsplätze, Zivilschutz-Ausbildungszentren

ASW	NOGA	
6455	62.55	Werkstatt für Feuerlöscher
9133	75.25	Feuerwehr
9134	75.26	Übungsanlage für Brandbekämpfung
9142	75.22	Zivilschutz

Ausbildungs-/Übungsanlage zur Brandbekämpfung:

Wurde oder wird auf dem Betriebsgelände eine Ausbildungs- oder Übungsanlage zur Brandbekämpfung betrieben, auf welcher Löschschaum eingesetzt wurde bzw. wird?



B2 Betriebs-/Werkfeuerwehren: Raffinerien, Petrochemie, grosse Tanklager, chemische Industrie, Kunststoffverarbeitung, Reifenherstellung, Flughäfen, Militärflugplätze

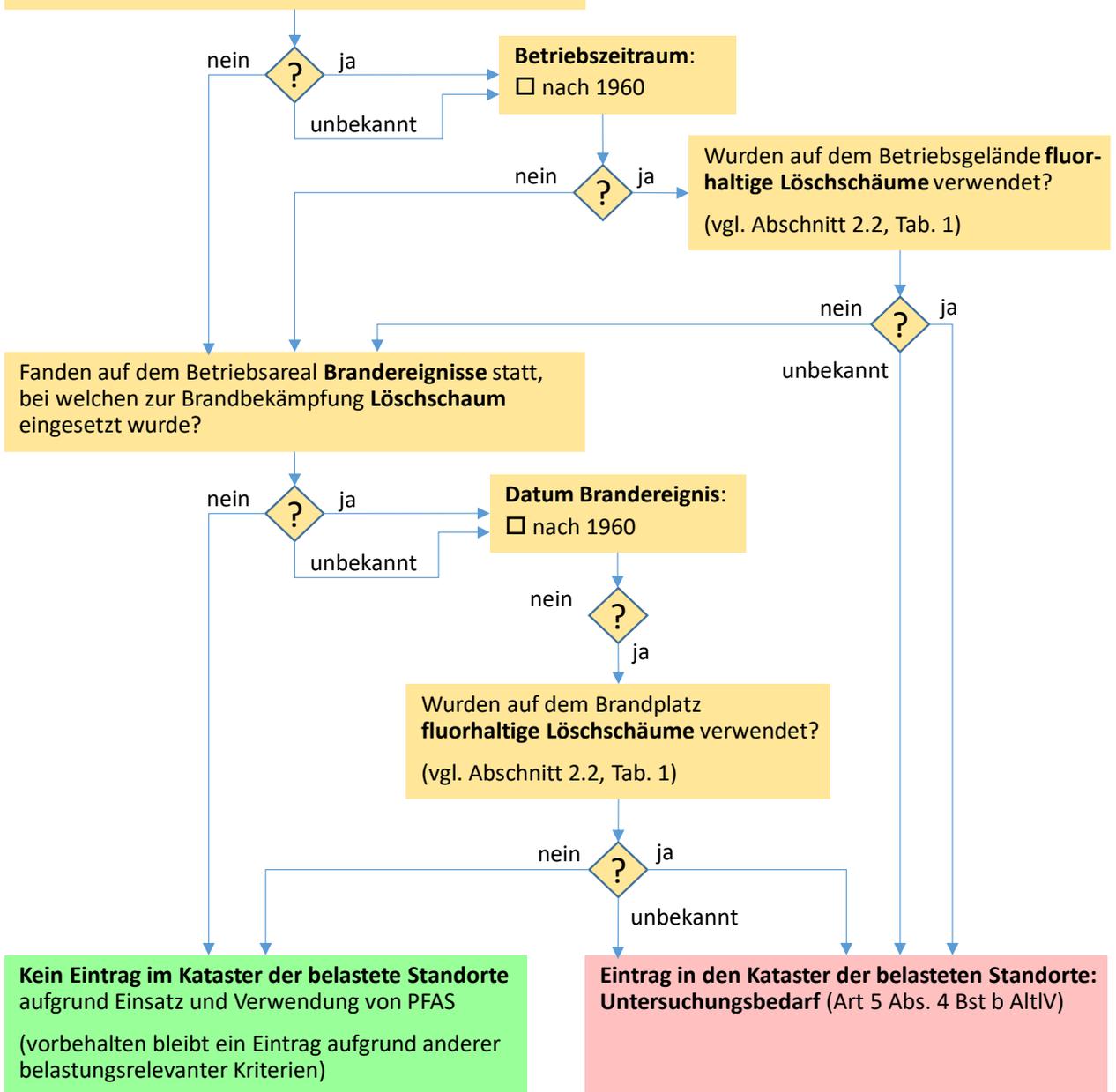
diverse Branchen, zum Beispiel:

ASW	NOGA	
3140	23.20	Mineralölindustrie, Mineralölverarbeitung
31	24	Chemische Industrie
32	25	Herstellung von Gummi und Kunststoffwaren
5194, 5195	51.51	Tanklager
644	62.4	Luftfahrt

Branchenunabhängige Beurteilung: Dieser Entscheidungsbaum ist *grundsätzlich* bei allen Betrieben zu prüfen, welche über eine eigene Betriebs-/Werkfeuerwehr verfügen.

Ausbildungs-/Übungsanlage zur Brandbekämpfung:

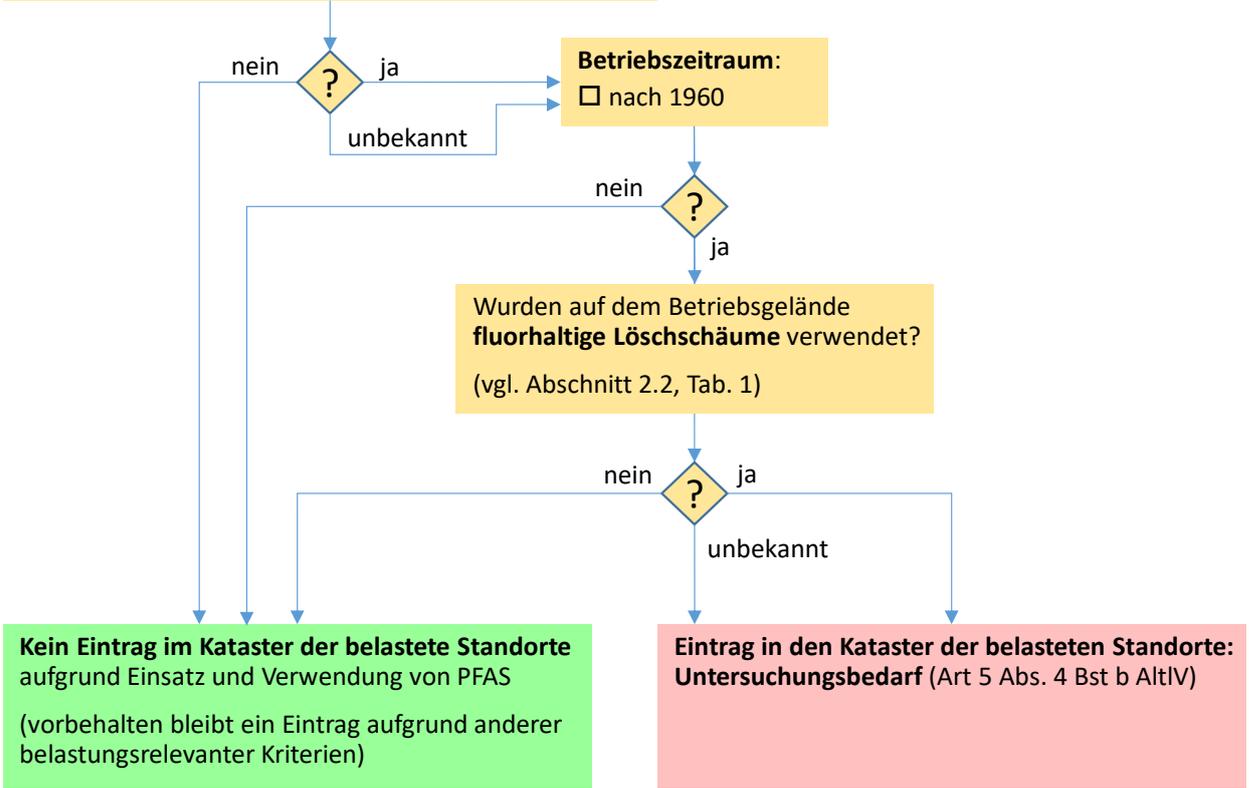
Wurde oder wird auf dem Betriebsgelände eine Ausbildungs- oder Übungsanlage zur Brandbekämpfung betrieben, auf welcher Löschschaum eingesetzt wurde bzw. wird?



B3 Herstellung und Wartung von Feuerlöschern und Feuerlöschanlagen:
Einsatz, Umschlag oder Lagerung von Feuerlöschschäumen

ASW 6455 NOGA 62.55 Werkstatt für Feuerlöscher

- Wurden oder werden auf dem Betriebsgelände folgende **Tätigkeiten** ausgeübt:
- Herstellen von Feuerlöschern oder Feuerlöschanlagen,
 - Zerlegen und Warten von Feuerlöschern oder Feuerlöschanlagen,
 - Befüllen von Feuerlöschern oder Feuerlöschanlagen mit Löschschaum,
 - Testen von Feuerlöschern oder Feuerlöschanlagen in einer Brandbekämpfungsanlage.



B4 Metallbearbeitung, Galvanik
Galvanikbäder, Oberflächenveredlung, Wärmebehandlung

ASW 3443 NOGA 28.51 Oberflächenveredlung, Härtung, Wärmebehandlung

Wurden oder werden auf dem Betriebsareal folgende **Tätigkeiten** ausgeübt:

- Hartverchromung, Glanzverchromung, Zinkverchromung,
- Verkupferung, Vernickelung, Vergoldung,
- Verzinnen, Vermessingen, Galvanisieren mit Palladium/Rhodium,
- Galvanisieren von Polymeren.

nein ja

unbekannt

Wurden oder werden auf dem Betriebsareal folgende **Produkte** verwendet:

- Entschäumungsmittel,
- Netzmittel,
- Nebelinhibitor.

nein ja

unbekannt

Betriebszeitraum:

- nach 1960

nein ja

ja

Kein Eintrag im Kataster der belastete Standorte
aufgrund Einsatz und Verwendung von PFAS
(vorbehalten bleibt ein Eintrag aufgrund anderer belastungsrelevanter Kriterien)

Eintrag in den Kataster der belasteten Standorte:
Untersuchungsbedarf (Art 5 Abs. 4 Bst b AltIV)

B5 Textilgewerbe:
Herstellung von wasserabweisenden Textilien

ASW	NOGA	
2414	24.70	Herstellung von Chemiefasern
2460	17.30	Textilveredelung
2471	17.51	Herstellung von Teppichen
2516	18.24	Herstellung von Sport- und Freizeitbekleidung
2517	18.21	Herstellung von Arbeits- und Berufskleidung
2543	17.40	Herstellung von sonstigen konfektionierten Textilien

Wurden oder werden auf dem Betriebsareal folgende **Textilien** hergestellt oder verarbeitet:

- Funktionsbekleidung, Schutzbekleidung,
- Textilien für Schuhe,
- Textilien für die Automobil- oder Luftfahrtindustrie,
- Textilien für Polster- oder Outdoor-Möbel,
- Sonnen- und Regenschutztextilien,
- Teppiche,
- Zelte,
- Technische Textilien und Dichtungen für die Bauindustrie (z.B. Vliese, Membrane).



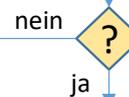
Wurden oder werden auf dem Betriebsareal folgende **Tätigkeiten** ausgeübt:

- Veredlung von Oberflächen,
- Imprägnieren von Textilien.



Betriebszeitraum:

- nach 1960



Kein Eintrag im Kataster der belastete Standorte
aufgrund Einsatz und Verwendung von PFAS
(vorbehalten bleibt ein Eintrag aufgrund anderer belastungsrelevanter Kriterien)

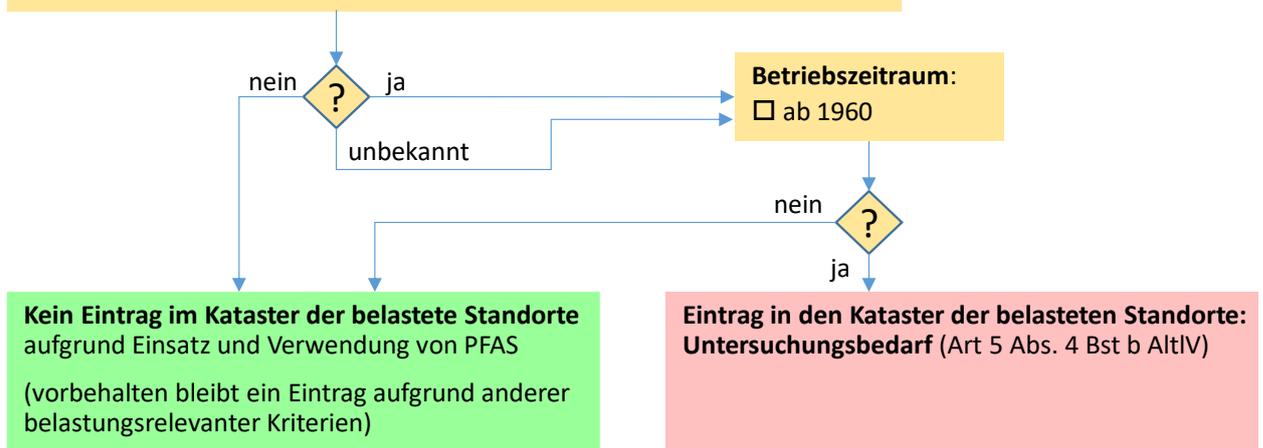
Eintrag in den Kataster der belasteten Standorte:
Untersuchungsbedarf (Art 5 Abs. 4 Bst b AltIV)

B6 Chemische Industrie: Herstellung von chemischen Erzeugnissen

ASW	NOGA	
311	24.1	Herstellung von chemischen Grundstoffen und Zwischenprodukten
3113	24.16	Herstellung von Kunststoffen in Primärformen
3134	24.66	Herstellung von Kunststoff-Additiven
3122	24.12	Herstellung von Farbstoffen und Pigmenten
3123	24.30	Herstellung von Anstrichmitteln, Druckfarben und Kitten
3125	24.51	Herstellung von Seifen, Wasch- und Reinigungsmittel
3127	24.52	Herstellung von Duft- und Körperpflegemitteln
3129	24.20	Herstellung von Pflanzenschutzmitteln
3135	24.6	Herstellung von sonstigen chemischen Erzeugnissen

Wurden oder werden auf dem Betriebsareal folgende **Produkte** hergestellt oder verarbeitet:

- Fluorpolymere: voll- und teilfluorierte Kunststoffe,
- Farben mit PFAS-Additiven (spezielle Wandfarben, Tinten, Druckfarben),
- Haushaltspflegemittel, Schönheitspflegemittel, Duftstoffe,
- Emulgatoren,
- Pflanzenschutzmittel,
- Feuerlöschschäume,
- Wachse (auch Skiwachs),
- Oberflächenveredlungsmittel, Entschäumungsmittel, Netzmittel,
- Imprägnierungsmittel, Imprägniersprays,
- Dicht- und Schmiermittel, Hochleistungs-Hydraulikflüssigkeiten,
- Entwicklerflüssigkeiten,
- Tenside für die Erdölförderung,
- Additive für Lithiumbatterien,
- Flammschutz für PC-Harze.

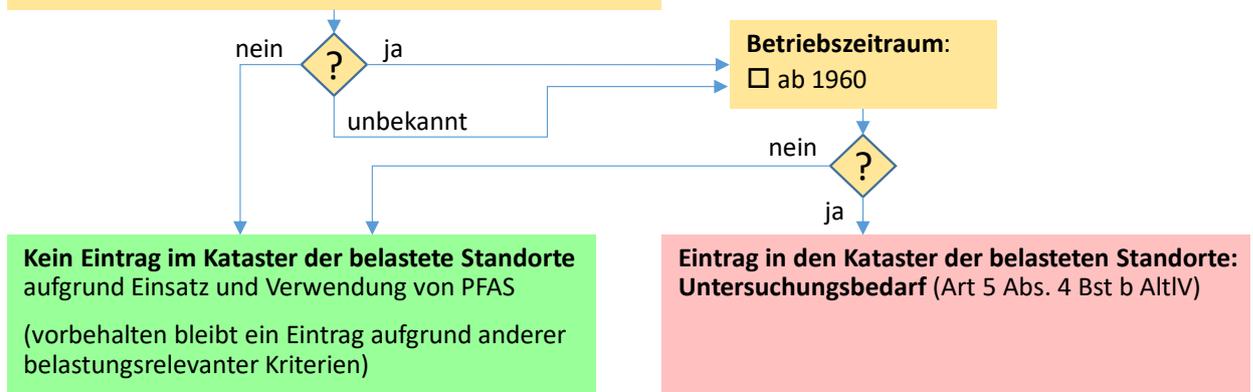


B7 Wäscherei, chemische Reinigung: Imprägnieren von Textilien

ASW	NOGA	
7611	93.01A	Wäscherei
7612	93.01B	Chemische Reinigung

Wurden oder werden auf dem Betriebsareal folgende **Tätigkeiten** zum Imprägnieren oder Olephobieren von Textilien ausgeführt:

- Aufsprühen von Imprägniermitteln,
- Imprägnieren in Bädern.

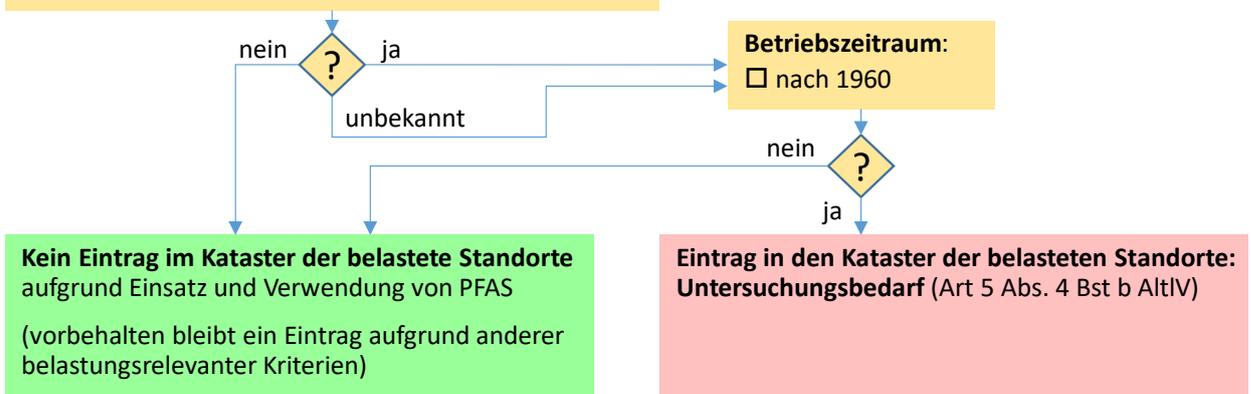


B8 Papier- und Kartongewerbe:
Herstellung von beschichteten Kartonprodukten und Verpackungen

ASW	NOGA	
2712	21.12	Herstellung von Papier, Karton und Pappe
2721	21.24	Herstellung von Tapeten

Wurden oder werden auf dem Betriebsareal folgende **Produkte** hergestellt oder verarbeitet:

- wasser-/fett-/schmutzabweisende Lebensmittelkontaktpapiere, Backpapiere,
- Lebensmittelverpackungen, Getränkeverpackungen aus oberflächenbehandeltem Karton,
- Tapeten,
- oberflächenveredelte Spezialpapiere.

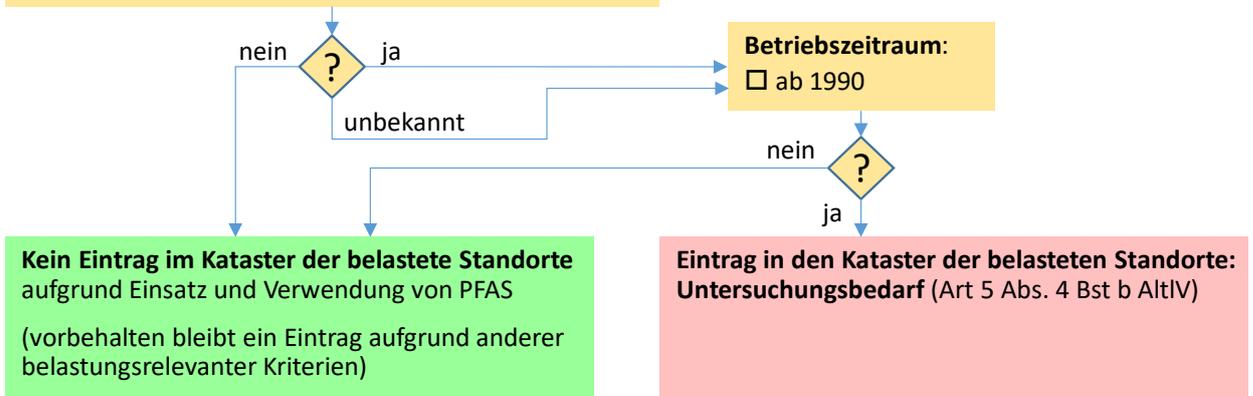


B9 Halbleiterindustrie:
Verwendung von Lösungen und Lacken mit PFAS-Zusätzen

ASW	NOGA	
361	32.1 bis 33.4	Elektrotechnik, Elektronik
3622	32.10	Herstellung von elektronischen Bauelementen
3623	22.24	Herstellung von elektrotechnischen Erzeugnissen
6454	62.54	Werkstatt für elektronische oder optronische Geräte

Wurden oder werden auf dem Betriebsareal folgende **Tätigkeiten** ausgeführt:

- Herstellung von elektronischen Platinen,
- Herstellung von optischen Erzeugnissen mit Fotolithographie.

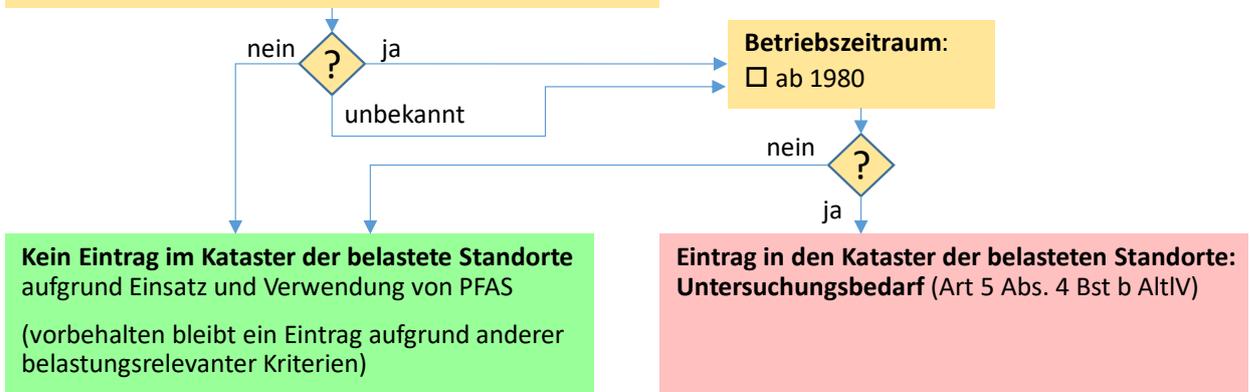


B10 Herstellung von Druckerzeugnissen,
Vervielfältigung von Ton-, Bild- und Datenträgern (Fotoindustrie):

ASW	NOGA	
2812	22.24	Reproduktionsbetrieb (Fotolitho- und Chlichebetrieb)
3830	22.24	Foto- und Film labore

Wurden oder werden auf dem Betriebsareal folgende **Tätigkeiten** ausgeführt:

- Herstellung von Filmen,
- Herstellung von Fotopapier,
- Herstellung von Fotoplatten,
- Herstellung von Entwicklerflüssigkeiten.



B11 Einsatz von Hochleistungs-Hydraulikflüssigkeiten
inkl. Wartungs- und Reparaturbetriebe der Luftfahrt

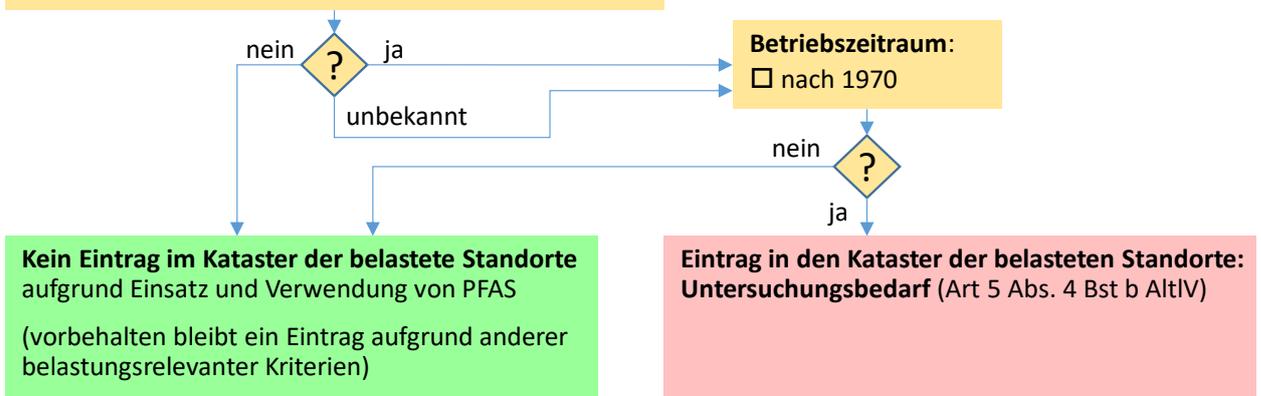
diverse Branchen, zum Beispiel:

ASW	NOGA	
6451	62.51	Hangar für Wartung und Unterhalt von Luftfahrzeugen
6453	62.53	Werkstatt für Wartungs- und Unterhaltsarbeiten
6456	62.56	Turbinenprüfstand

Branchenunabhängiger Beurteilung: Dieser Entscheidungsbaum ist *grundsätzlich* bei allen Betrieben zu prüfen, welche Hochleistungs-Hydraulikflüssigkeiten einsetzen.

Wurden oder werden auf dem Betriebsareal folgende **Produkte** eingesetzt, umgeschlagen oder gelagert:

Hochleistungs-Hydraulikflüssigkeiten.



Kein Eintrag im Kataster der belastete Standorte
aufgrund Einsatz und Verwendung von PFAS
(vorbehalten bleibt ein Eintrag aufgrund anderer belastungsrelevanter Kriterien)

Eintrag in den Kataster der belasteten Standorte:
Untersuchungsbedarf (Art 5 Abs. 4 Bst b AltIV)

B12 Automatische Löschschaumeinrichtungen :
Lager- und Umschlagbereiche von brand- und/oder explosionsgefährlichen Gütern und Flüssigkeiten

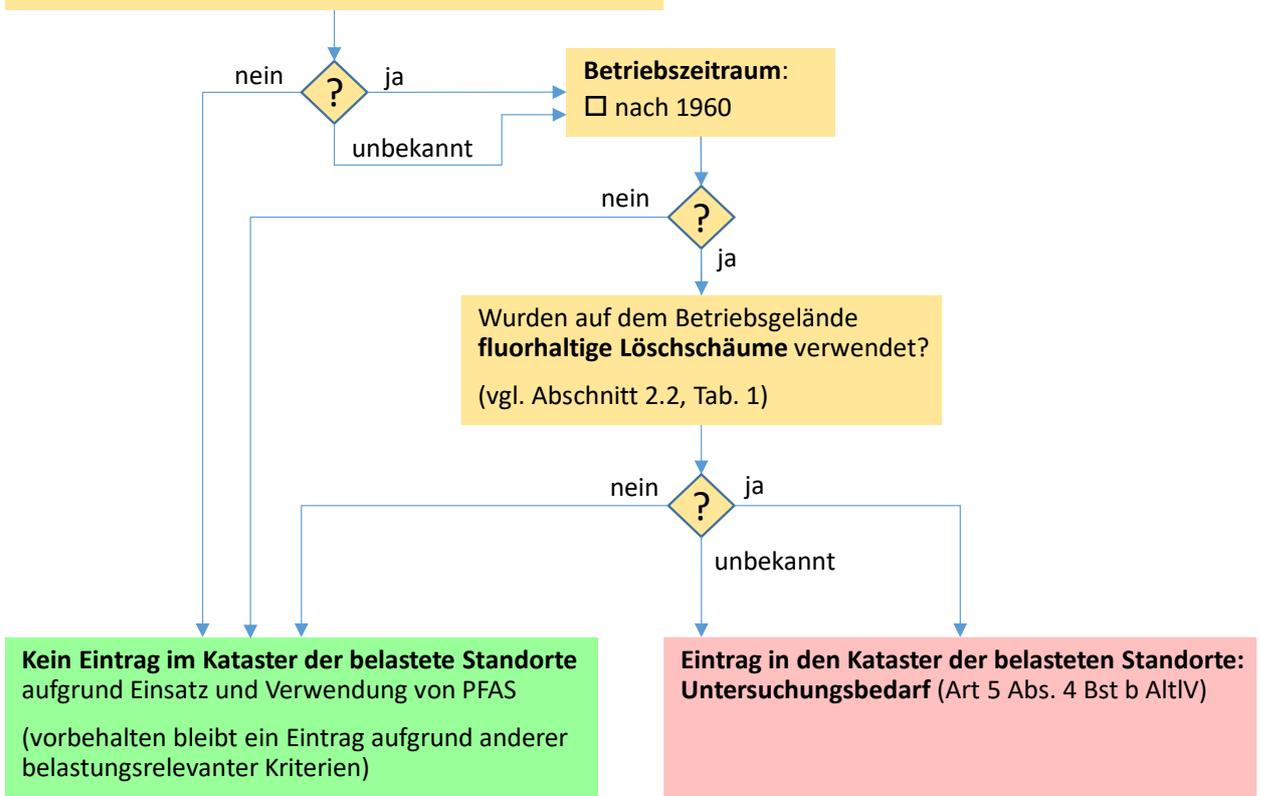
diverse Branchen, zum Beispiel:

ASW	NOGA	
5192	51.51	flüssige Brenn- und Treibstoffe, Mineralölerzeugnisse
5193	51.51	feste und flüssige Brenn- und Treibstoffe

Branchenunabhängiger Beurteilung: Dieser Entscheidungsbaum ist *grundsätzlich* bei allen Betrieben zu prüfen, welche über eine automatische Löschschaum-einrichtung verfügen.

Automatische Löschschaumeinrichtungen:

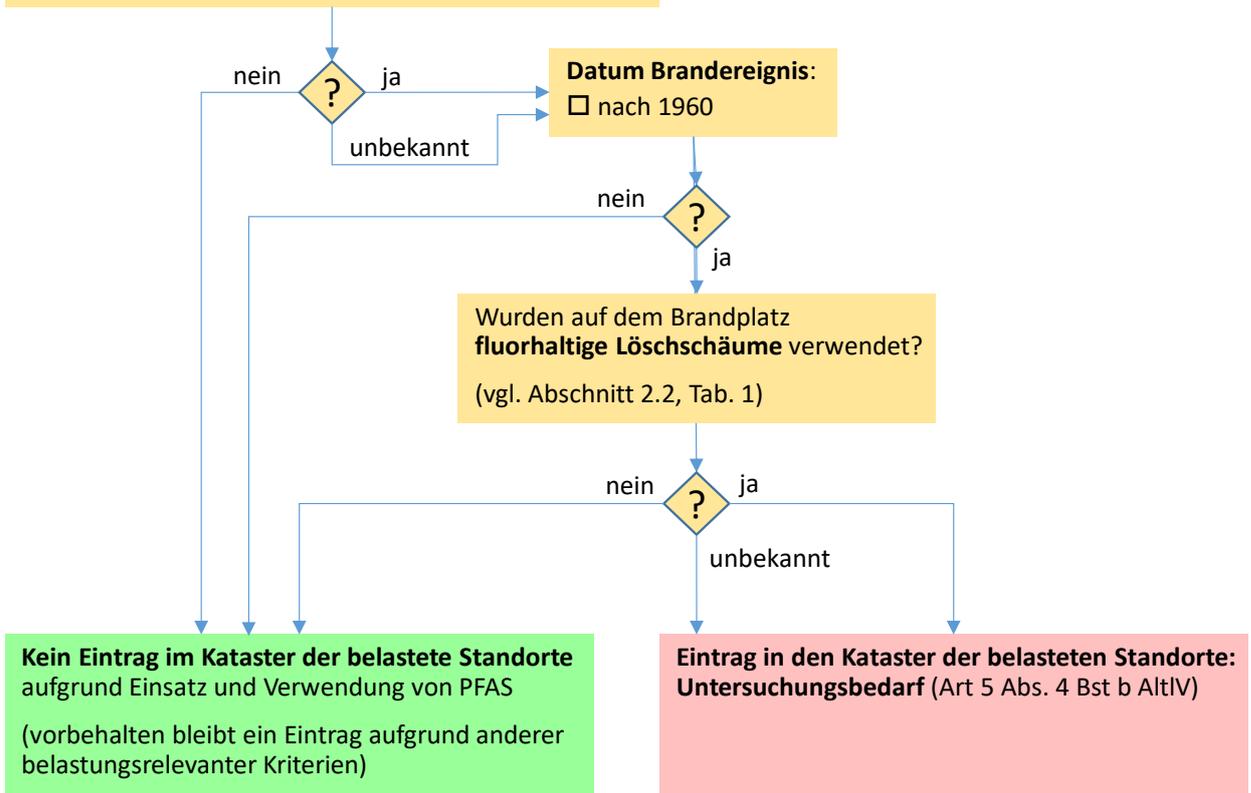
Wurde oder wird auf dem Betriebsgelände eine automatische Feuerlöscheinrichtung mit Löschschaum betrieben?



U1 Brandereignis mit Einsatz von Löschschaum

ASW	NOGA	
9811	98.11	Verkehrsunfall, Transportunfall
9812	98.12	Betriebsunfall

Brandereignis, Brandbekämpfung:
 Wurde bei der Brandbekämpfung Löschschaum eingesetzt?



Anhang 4

Zusammenfassung «Sanierung von PFAS-kontaminierten Standorten», Stand 04.08.2023

Die ausführliche Zusammenstellung der Literaturrecherche (Excel) kann auf Anfrage beim BAFU bezogen werden

Sanierung von PFAS-kontaminierten Standorten

Stand: 04.08.2023

(Zusammenfassung auf der Grundlage der wissenschaftlichen Literatur, die seit dem Bericht von Arcadis [2021] veröffentlicht wurde).

Disclaimer:

Dies ist ein Dokument der beiden Arbeitsgruppen "Altlasten" und "Abfall" des Projekts "PFAS im Bereich Altlasten". In den Arbeitsgruppen waren das BAFU sowie Delegierte der KVV aus den kantonalen Altlasten- und Abfallfachstellen vertreten. Das Dokument dient informellen Zwecken. Die Inhalte haben nicht denselben rechtlichen Stellenwert wie eine Vollzugshilfe des BAFU. Das Dokument widerspiegelt den damaligen Stand des Wissens und wird nicht nachgeführt.

Die Methoden zur Sanierung von Altlasten werden gemäß den Vollzugshilfen des Bundesamtes für Umwelt (BAFU, 2014) in drei Kategorien eingeteilt: 1) Dekontamination, 2) Sicherung, 3) MNA (monitored natural Attenuation). Viele Methoden zur Sanierung von mit PFAS kontaminierten Standorten befinden sich noch in der Entwicklung und wurden bisher nur im Labor an synthetischen Lösungen oder an kleinen Volumina kontaminierter Boden- oder Wasserproben getestet. Bisher wurden mehrere Berichte veröffentlicht, die den Stand des Wissens über PFAS und Sanierungsmethoden detailliert beschreiben (z.B. Arcadis, 2021, 2023; Statens Geotekniska Institut (Schweden), 2022).

1. Experimentelle Studien / Modellierungen

1.1. Dekontamination / Containment - Immobilisierung

Es wurden zahlreiche experimentelle Laborstudien durchgeführt, um die Wirksamkeit und Durchführbarkeit verschiedener Dekontaminations- und Sicherungs-/Immobilisierungsmethoden zu untersuchen. Zusätzlich zu den konventionellen Behandlungsmethoden (Adsorption an Aktivkohle, Bodenwäsche) :

- **Behandlung von Boden und Untergrund:**
 - Immobilisierung, Stabilisierung: Injektion eines Adsorptionsmittels (Harz, Mineralien, MatCARETM, RemBindTM) ;
 - Stabilisierung mit Hilfe von Zement + Adsorbens, elektrokinetische Sanierung) ;
 - Phytosanierung ;
 - Boden-/Unterbodenwäsche in-situ und ex-situ
- **Behandlung von Grundwasser:**
 - Adsorption: Aktivkohle, Ionenaustauscherharze, Mineralien (Ton, Zeolith), Biomaterialien, Nanomaterialien, Polymere, ionische Fluorogele, PerfluorAd® ;
 - Membranfiltration (Umkehrosiose, Nano- und Ultrafiltration) ;
 - Pump and treat ;
 - In-situ Schaumfraktionierung (Luft, Ozon) ;
 - Sonolyse (Ultraschall) ;
 - Biologischer Abbau ;
 - Fortgeschrittene Oxidation/Reduktion, Photokatalyse ;
 - (photo)elektrochemische Verfahren: Elektrokatalyse, elektrochemische Oxidation, Elektrokoagulation, superkritische Wasseroxidation (SCWO) ;
 - Phytoremediation
 - Plasmabestrahlung ;
 - Bestrahlung mit Elektronen- oder Gammastrahlen ;
 - Mikrowellen
- **Thermische und mechanische Verfahren zur Zerstörung von PFAS**
 - Verbrennung bei hohen Temperaturen ;

- Thermische Desorption ;
- Mechanische Vernichtung ("ball milling")

(für Referenzen siehe die Excel-Tabelle "PFAS-Sanierung_Neueste Veröffentlichungen", Version 02.2023, französische Version)

1.2. Monitored natural attenuation (MNA)

Obwohl diese Methode aufgrund der Persistenz von PFAS in der Umwelt nicht in Frage kommt, wurden einige Studien durchgeführt, um das Potenzial von MNA zu ermitteln, wenn andere Methoden nicht anwendbar sind. Newell et al. (2021a, 2021b) präsentieren Richtlinien für die Anwendung von MNA bei der Behandlung von Grundwasser, das mit PFAS kontaminiert ist, sowie wissenschaftliche Grundlagen, um die Merkmale von Standorten zu definieren, an denen MNA allein oder in Kombination mit einer anderen Technik eine Sanierungsoption sein könnte.

2. Pilot- oder gross angelegte Studien zwischen 2014 und 2022

2.1. Bewertung von Methoden zur Aufbereitung von Trinkwasser und Grundwasser

Es wurden Studien durchgeführt, um die Wirksamkeit der Behandlungsmethoden zu bestimmen, die in Trinkwasseraufbereitungsanlagen für die PFAS-Sanierung eingesetzt werden (Takagi et al., 2011; Appleman et al., 2014; Inyang & Dickenson, 2017; Boone et al., 2019; Belkouteb et al., 2020). Die Studie von Takagi et al. (2011) zielte darauf ab, die Entwicklung der PFOA- und PFOS-Konzentrationen in Wasserproben zu bestimmen, die in jeder Stufe der Trinkwasseraufbereitung (unbehandeltes Wasser, Sedimentation, Sandfiltration, Ozonbehandlung, Aktivkohlefiltration, Chlorbehandlung) in 5 Trinkwasseraufbereitungsanlagen in der Region Osaka in Japan entnommen wurden. Appleman et al. (2014) führten ebenfalls eine groß angelegte Studie durch, um 15 Behandlungsmethoden zu bewerten, die üblicherweise für die Trinkwasseraufbereitung in 20 Quellen in den Staaten Wisconsin (1), Oklahoma (1), Alaska (1), California (2), Alabama (1), Colorado (2), Ohio (1), Nevada (1), Minnesota (1) und New Jersey (9) verwendet werden. In einer weiteren Studie wurden Wasserproben aus 25 Trinkwasseraufbereitungsanlagen in den USA analysiert (Boone et al., 2019).

Eine gross angelegte Studie wurde auch zwei Jahre lang von 2015 bis 2017 von Belkouteb et al. (2020) durchgeführt, um die Wirksamkeit der Trinkwasseraufbereitung durch Adsorption an granulierten Aktivkohlefiltern (GAC) zur Entfernung von PFAS in Wasserproben aus einer Trinkwasseraufbereitungsanlage in der Stadt Uppsala (Schweden) zu bewerten. Inyang & Dickenson (2017) verglichen die Sorptionsleistung von PFAS durch verschiedene Arten von Biokohle oder granulierter Aktivkohle mit Hilfe von Prüfstandtests oder einer Pilotstudie. Abwasser aus einer Kläranlage in Las Vegas und Rohwasser aus dem Lake Mead im südlichen Nevada wurden für die Sorptionskinetik- und/oder Isothermenexperimente verwendet.

Vier Pilotstudien wurden in der Region Veneto (Nordost-Italien) durchgeführt, wo poly- und perfluorierte organische Mikroschadstoffe im Grundwasser von industrialisierten Gebieten gefunden wurden, nachdem eine fluorchemische Anlage PFAA freigesetzt hatte. Die Ausdehnung der Kontamination wird auf 200 km² geschätzt (WHO, 2017). Drei Studien untersuchten die Wirksamkeit von Adsorbentien (Conte et al., 2015; Zaggia et al., 2016; Bertanza et al., 2020), während die vierte Studie die Wirksamkeit einer Phytosanierungsanlage zur Entfernung von PFAS aus dem Wasser zu bestimmen suchte (Ferrario et al., 2022). Andere Studien hatten ebenfalls PFAS im Fluss Lambro in der Nähe von Mailand im Po-Becken nachgewiesen (Castiglioni et al., 2015).

2.1.1. Adsorption auf Aktivkohle oder Ionenaustauscherharzen

Die "**konventionellen**" Methoden der Trinkwasseraufbereitung - Eisen- oder Alaunkoagulation, Mikro-/Ultrafiltration oder granuläre Filtration, Belüftung, Oxidation (Permanganat, UV/Wasserstoffperoxid) und Desinfektion (Ozonierung, Chlordioxid, Chlorierung, and Chloraminierung) - haben **keine Wirksamkeit** gezeigt (Tagaki et al., 2011; Appleman et al., 2014; Boone et al., 2019), mit einer Entfernungsrate von im Allgemeinen < 44% (sogar eine Erhöhung der kurzkettigen PFAS durch Uferfiltration; Appleman et al., 2014). Im Gegensatz dazu zeigte die Adsorptionsmethode auf Ionenaustauscherharzen (z.B. Purolite® FerriX A33E) oder Aktivkohle (Norit 816 oder Calgon F300 und F600) eine gute Wirksamkeit bei der Entfernung von langkettigen PFAS (Entfernungsrate > 67%), aber einen Austausch des adsorbierten PFBA durch langkettige PFAS im Laufe der Behandlung; Appleman et al., 2014).

Die Wirksamkeit der Adsorptionsbehandlung an **Aktivkohle** ist abhängig vom Alter der Filter und dem Durchfluss der Anlage: Die Wirksamkeit ist höher, wenn die Durchflussrate durch den Filter reduziert ist (Belkouteb et al., 2020), sowie bei "jungen/jüngsten" Filtern. Ältere Aktivkohlefilter (>1 Jahr in Gebrauch) zeigen keine Wirksamkeit mehr (Entfernungsrate von 92-100% bei neuen Filtern, die nach 120 Tagen abnimmt und nach mehreren Monaten auf weniger als -100% sinkt; Tagaki et al., 2011; Belkouteb et al., 2020). Alle diese Studien zeigten eine bessere Entfernung von langkettigen PFAS und PFSA im Vergleich zu PFCA durch Adsorption an **Ionenaustauscherharzen** oder Aktivkohle. Im Gegensatz dazu zeigte die **Umkehrosmosefiltration** eine höhere Effizienz, da sie alle analysierten PFAS (Entfernungsraten von > 47 bis > 99%, aber häufig > 80%) unabhängig von der Länge der Kohlenstoffkette entfernen konnte (Appleman et al., 2014). Gemäß den Ergebnissen der von Inyang & Dickenson (2017) durchgeführten Studie zeigt Aktivkohle eine höhere Effizienz bei der Entfernung von PFOA und PFOS als Biokohle. Die Affinität von Biokohle für PFOA war in Oberflächenwasser höher als in behandeltem Abwasser.

Conte et al. (2015) und Zaggia et al. (2016) führten Pilotstudien durch, um die Wirksamkeit der Entfernung von vier PFAS (PFBA, PFBS, PFOA und PFOS) aus Trinkwasser unter Verwendung verschiedener Adsorbentien zu bestimmen: **Ionenaustauscherharze** A600E, PAD500, PAD428, MN102 in der Studie von Conte et al. (2015), **Aktivkohlegranulat** und Purolite®-Ionenaustauscherharze A600E nicht hydrophob, A520E schwach hydrophob und A532E stark hydrophob in der Studie von Zaggia et al. (2006). Die Wasserproben wurden in der Nähe und in mehreren Trinkwasseraufbereitungsanlagen in der Region Veneto, Italien, entnommen. Die Ergebnisse zeigten eine abnehmende Adsorptionskapazität in der Reihenfolge PFOS > PFOA > PFBS > PFBA, was darauf hindeutet, dass die Sorption durch die Kettenlänge und den pKa-Wert des PFAA beeinflusst wird. Langkettige PFAS werden besser an die Harze adsorbiert als kurzkettige PFAS. Alle Harze zeigen eine hohe Entfernungseffizienz (95-100%) von PFOA und langkettigem PFOS. Etwa 95-100% des PFBS wird von den Harzen MN102, A600E, A520E und A532E entfernt, während PFBA nur von den Harzen A600E, A520E und A532E zu >95% entfernt wird. Die Studien zeigten einen **starken Zusammenhang zwischen der Hydrophobizität der funktionellen Austauschgruppe des Harzes und seiner Fähigkeit, PFAS zu entfernen**: Die Sorptionskapazität von PFSA ist besser als die von PFCA. Die Sorptionskapazität nimmt mit der Behandlungszeit ab, da die Harze dann regeneriert werden müssen. Zaggia et al. (2016) zeigten, dass die Menge an Regenerationsabwässern, die verbrannt werden müssen, um 96,5% reduziert wird, wenn **Umkehrosmose mit Vakuumverdampfung** während der Regeneration gekoppelt wird. Das A532E Harz ist nur unter besonderen Bedingungen unter Verwendung von konzentrierten Lösungsmitteln (Methanol, Ethanol) und 1% NH₄Cl regenerierbar.

Bertanza et al. (2020) führten eine gross angelegte Studie in einer Region durch, die von einer Wasserkontamination auf einer Fläche von ca. 200 km² betroffen war. Die Studie verfolgte die Entwicklung der PFAS-Konzentrationen über einen Zeitraum von fünf Jahren in Wasserproben aus einer Trinkwasseraufbereitungsanlage in der Region Veneto. Bei der Wasseraufbereitung mit Aktivkohle erreichten die PFAS den Durchbruch in der folgenden Reihenfolge: PFBA, PFPeA, PFHxA, PFBS, PFOA. Die Autoren beobachteten eine Korrelation zwischen dem Durchbruchverhalten der PFAS und der Länge der C-F-Kette (Durchbruch der kurzkettigen PFAS vor den langkettigen PFAS), dem Typ des hydrophilen Kopfes (Durchbruch der PFCA vor den PFSA) und den Verteilungskoeffizienten n-Oktanol/Wasser logP und logD.

2.1.2 Injektion von Reagenzien oder Adsorbentien in einen Aquifer.

Mc Gregor (2020) führte eine **Pilotstudie** durch, um festzustellen, ob die Injektion von Reagenzien (Wasserstoffperoxid H₂O₂, Natriumpersulfat Na₂S₂O₈) **oder Adsorbentien (Pulveraktivkohle, kolloidale Aktivkohle, Biochar, Ionenaustauscherharz)** in einen nicht begrenzten sandigen Aquifer die PFAS-Konzentration in Gegenwart von Kohlenwasserstoffen aus Erdöl abschwächen kann (Standort in Zentralkanada). Die Reagenzien oder Adsorbentien wurden an sechs verschiedenen Stellen in der reaktiven permeablen Zone injiziert. Die PFAS-Konzentrationen des Grundwassers betragen 24000 µg/L PFPeA, max. 6200 µg/L Pentafluorbenzoesäure, max. 16100 µg/L PFHxA, max. 6080 µg/L PFHpA, max. 450 µg/L PFOA und max. 140 µg/L PFNA. Anschliessend wurden 18 Monate lang Proben aus dem Grundwasser genommen. Den Ergebnissen zufolge wurde **keine Wirksamkeit von Na-Persulfat und H-Peroxid** beobachtet, während die PFAS-Konzentrationen im Wasser, das mit den vier **Adsorbentien** behandelt wurde, **unterhalb der Nachweisgrenze** lagen. Ein teilweiser bis vollständiger Durchbruch der PFAS über den Zeitraum von 18 Monaten wurde mit Ausnahme der kolloidalen Aktivkohle beobachtet. Nach der Injektion war die **kolloidale Aktivkohle** gleichmäßig im Zielbereich des Aquifers verteilt, während die pulverförmige Aktivkohle und die Biokohle bevorzugt in einer dünnen Schicht aus grobem Sand verteilt waren.

2.1.3. Phytosanierung

Ferrario et al. (2022) führten eine **Pilotstudie** über eine Anlage zur Phytosanierung von Wasser aus einem mit PFAS verunreinigten Brunnen in Lonigo (Region Veneto) mit Schilfrohr *Phragmites australis* durch. Mit dieser Studie sollte das Potenzial der Phytoremediation für die Behandlung von PFAS-verseuchtem Wasser aufgezeigt werden. Die Schilfpflanzen absorbierten PFAS-Konzentrationen von bis zu 13 ng/g. Die Aufnahme durch die Pflanzen stieg mit der Expositionszeit (2,5 ng/g für Schilf, das nach 6 Monaten geschnitten wurde, und 13 ng/g für Schilf, das 16 Monate nach Beginn der Sanierung geschnitten wurde). Die Phytosanierung führte zu einer Verringerung des PFAS-Massenstroms um 30-50%, wobei diese Verringerung keine Abhängigkeit von den physikalisch-chemischen Eigenschaften der einzelnen Substanzen zeigte. Die Ergebnisse zeigten auch, dass eine höhere Konzentration von PFAS im Wasser die Eliminierungseffizienz verbessert, indem die Aufnahme durch die Pflanzen begünstigt wird. Die Phytoremediation ist ein vielversprechendes und nachhaltiges Verfahren, erfordert jedoch eine anschliessende Hochtemperaturverbrennung des kontaminierten Schilfs, um die PFAS dauerhaft zu entfernen.

2.1.4. Surface-Active Foam Fractionation® (Oberflächenaktive Schaumfraktionierung)

Die Wirksamkeit der SAFF-Technik ("Surface-Active Foam Fractionation®") für die Behandlung von mit PFAS kontaminiertem Wasser wurde von Burns et al. (2021, 2022) in zwei **Pilotstudien** bewertet. In der ersten Studie (Burns et al., 2021) wurde die SAFF-Methode zur Behandlung von Grundwasser an einem Standort des australischen Verteidigungsministeriums im Army Aviation Centre Oakey angewendet. In der zweiten Studie wurde ein kommerzieller Feldversuch zur Wirksamkeit der SAFF-Methode für die PFAS-Sanierung in einer Sickerwasserfassung der Telge Recycling Plant in Schweden durchgeführt, wo 23 Probenahmekampagnen über 10 Monate durchgeführt wurden, um die PFAS-Konzentrationen in den Einflüssen und Abwässern zu analysieren. 80.000 m³ Sickerwasser wurden ohne Vorbehandlung behandelt. Die SAFF-Methode erfordert keine chemischen Reagenzien oder Adsorptionsmittel, obwohl eine zusätzliche Behandlung mit einem Ionenaustauscherharz alle nachweisbaren Spuren von PFAS entfernen kann (Burns et al., 2021). Das Ausmass der PFAS-Entfernung korreliert mit dem Adsorptionskoeffizienten der Moleküle an der Gas-Flüssigkeits-Grenzfläche. Wenn dieser größer als $1,0 \times 10^{-6}$ m ist, werden fast alle PFAS entfernt.

Langkettige PFAS sind leichter zu entfernen als kurzkettige PFAS, die einen niedrigeren Adsorptionskoeffizienten aufweisen. Es wird angenommen, dass das Vorhandensein von gelösten Elektrolyten, die für das "harte" Grundwasser am australischen Standort typisch sind (Burns et al., 2021), die Adsorptionskoeffizienten und damit die Wirksamkeit von SAFF in salzigem und brackigem Abwasser aus Umkehrosioseanlagen verbessert. Am australischen Standort zeigte die SAFF-Technik eine Entfernungseffizienz von $\geq 99.5\%$ der PFOS-, PFHxS- und PFOA-Aggregate (Burns et al., 2021).

Am schwedischen Standort zeigte die SAFF-Technik ähnliche Ergebnisse mit einer Entfernungseffizienz von $\geq 98.7\%$ für PFOS, $\geq 99.7\%$ für PFOA und $\geq 98.8\%$ für PFHxS. Die durchschnittlichen Konzentrationen des behandelten Eluats betragen ≤ 2.34 ng/L PFOS, ≤ 1.28 ng/L PFOA und ≤ 1.00 ng/L PFHxS; mit dem Ziel, die Konzentration von PFOS auf < 50 ng/L zu reduzieren (Burns et al., 2022). Die Ergebnisse beider **Studien belegen, dass die SAFF-Technik selbst bei Sickerwasser mit komplexer chemischer Zusammensetzung wirksam ist** und keine Abhängigkeit von den klimatischen Bedingungen zeigt.

2.1.5. Ozonisierungsverfahren

Eine weitere **Pilotstudie** zur **Trinkwasseraufbereitung** wurde von Franke et al. (2019) durchgeführt, um die Wirksamkeit der Methode "Advance ozonation processes", die auf der Methode "Heterogeneously catalysed ozonation" basiert, zu bewerten. Eine Laborstudie hatte zuvor die bessere Wirksamkeit einer Kombination aus Ozon, Persulfat und einem Katalysator bei der Entfernung von PFAS aus dem Wasser nachgewiesen. Die Ergebnisse der Pilotstudie zeigen, dass die Konzentration von 18 PFAS bei Anwendung der im Labor ermittelten Kombination innerhalb von drei Stunden Behandlungszeit signifikant abnimmt. Die Wirksamkeit der Entfernung von PFAS variiert mit der Länge der Fluorkohlenstoffkette unabhängig von der funktionellen Gruppe, mit Entfernungsraten von 98%, 64% und 55% für C7-C11, C12-C17 und C4-C6 PFAS. Nach Ansicht der Autoren könnte diese Technik leicht als Teil eines Wasseraufbereitungszuges eingesetzt werden, wobei jedoch die mögliche Produktion von toxischen Umwandlungsprodukten zu berücksichtigen ist.

2.2. Sanierung von mit PFAS kontaminierten Böden und Untergrund

In jüngster Zeit wurden verschiedene Methoden zur Sanierung kontaminierter Böden in Pilot- und Feldstudien angewandt: Ex-situ-Bodenwäsche (Høisæter et al., 2021; Grimison et al., 2022; Quinnan et al., 2022), In-situ-Bodenwäsche (Høisæter et al., 2021), Phytosanierung (Gobelius et al., 2017), Immobilisierung durch Stabilisierung und Verfestigung (Sörengård et al., 2019, 2021).

2.2.1. Phytosanierung

Gobelius et al. (2017) bewerteten die Wirksamkeit von Phytosanierung auf die Konzentrationen von 26 PFAS in AFFF-kontaminiertem Boden und Grundwasser ($\Sigma 26$ PFAS von 16-160 ng/g bzw. 1200-34000 ng/L) auf einem Übungsgelände für die Brandbekämpfung auf dem Arlanda-Flughafen in Stockholm (Schweden). Es wurden Proben der verschiedenen Gewebe (Wurzeln, Stämme/Kerne, Zweige, Blätter/Nadeln) von verschiedenen Bäumen und Sträuchern (Silberbirke, Fichte, Kirsche, Eberesche, Podagra, Walderdbeere) genommen. Die Analysen ergaben sehr unterschiedliche PFAS-Konzentrationen der Pflanzen und Biokonzentrationsfaktoren (Verhältnis Pflanze/Boden), die in den vegetativen Teilen am höchsten waren. So ermittelten die Autoren, dass ein System des schrittweisen Holzeinschlags mit gemischten Silberbirken- und Fichtenbeständen + regelmäßiger Ernte von Birkenblättern und -saft + einer Unterschicht aus Ägopoden potenziell 1,4 g/Jahr $\Sigma 26$ PFAS pro Hektar kontaminierten Standortes beseitigen könnte. Die Autoren schlagen alternative Ansätze vor: 1) Birkendickicht + Unterwuchs mit Ährenfarn, wodurch 0.65 g/Jahr/ha $\Sigma 26$ PFAS entfernt werden können, oder 2) einfache Wiese mit Ährenfarn, wodurch 0.55 g/Jahr/ha $\Sigma 26$ PFAS entfernt werden können.

2.2.2. Bodenwäsche

Zwei neuere Studien (Grimison et al., 2022; Quinnan et al., 2022) versuchten, die Leistungsfähigkeit von Bodenwaschanlagen (Aushub, vor Ort) bei der Sanierung von PFAS-belasteten Böden (hoher PFOS-Gehalt) aufgrund der Verwendung von AFFF-Schäumen in Südaustralien (Grimison et al., 2022) und den USA (Eielson Air Force Base in Fairbanks, Alaska; Quinnan et al., 2022) zu ermitteln. Quinnan et al. (2022) trennten die groben Bodenfraktionen (Sand, Kies) vor Ort und separierten die feinen Fraktionen (Ton, Schluff) zur Weiterverarbeitung (Deponierung, thermische Desorption, Stabilisierung) und Minimierung der Abfallproduktion. Die Behandlung des Bodens erforderte den Einsatz von Wasser,

aber auch von Zusatzstoffen, Tensiden und physikalischen Methoden, um die angestrebten Behandlungsziele zu erreichen. Grimison et al. (2022) verwendeten das SourceZone®-Verfahren, das von Ventia Services Pty Ltd (Sydney, Australien) und CleanEarthTechnologies Inc. (Halifax, Nova Scotia, Kanada) entwickelt wurde. Für das Waschen des **kontaminierten, tonreichen Bodens (2200 t)** wurden keine Lösungsmittel verwendet. Der behandelte Boden enthielt vor der Behandlung eine Gesamtmasse von 7330 g PFAS, die sich auf die verschiedenen Fraktionen (Kies, Sand, Feinanteil) verteilten. Nach der Behandlung wurden $71 \pm 29\%$ der ursprünglichen Masse an PFAS im Boden in die Waschlösung desorbiert. Nach dem Waschen wurde das kontaminierte **Prozesswasser gefiltert** (Aktivkohlegranulat, Ionenaustauscherharze). 90% der PFAS aus dem Boden konnten in die Waschlösung überführt werden und $>99,9\%$ der PFAS aus der Lösung wurden anschließend durch die Aktivkohle gefiltert. Insgesamt wurde eine Entfernungseffizienz von 97,1% für PFCAs und 94,9% für PFASs erreicht. Die Restfraktion von PFAS war in Lehm höher als in Kies und Sand, wobei Kies aufgrund der Anwesenheit anderer Partikeltypen (z.B. Tonaggregate) mehr PFAS zurückhielt.

Eine ähnliche Behandlungseffizienz wurde von Quinnan et al. (2022) für PFOS erzielt: Kies (98.1-94.6%) > Sand (96.1-88.6%) > Feinfraktion (61.8 bis -7.7%). Das Sanierungsziel von $>99\%$ PFOS wurde jedoch nur für die grobe Fraktion auf einmal erreicht. Da die Feinfraktionen mehr PFAS zurückhalten können, waren zwei oder drei Behandlungsphasen erforderlich. Die Behandlungseffizienz ermöglichte die Wiederverwendung des behandelten Bodens vor Ort, wobei die Feinfraktionen ebenfalls wiederverwendet werden können, wenn die PFAS-Konzentrationen nach der Behandlung unter den angestrebten Zielen liegen (Quinnan et al., 2022). Nach Grimison et al. (2022) ist die **Wirksamkeit der Entfernung von PFAS unabhängig von der Konzentration im Boden**, aber abhängig von der Chemie der PFAS (funktionelle Gruppe, Länge der Kohlenstoffkette): Langkettige PFAS ($>C8$) werden weniger gut in das Waschwasser überführt, da sie weniger mobil sind als kurzkettige PFAS, obwohl eine kleine Menge in den behandelten Böden verbleiben könnte.

Die Wirkung von Bodenparametern auf die in-situ-Sorption von PFAS in einem Boden, der durch die Verwendung von AFFF-Schäumen historisch kontaminiert wurde, wurde mit Hilfe von **Sorptionstests** in einer experimentellen Studie untersucht (Hubert et al., 2023). Die Ergebnisse zeigten, dass: 1) der Kd-Wert für die verschiedenen Bodenfraktionen mit abnehmender Korngröße (Fraktionen von 8 mm bis <0.063 mm) und dem Anstieg des organischen Kohlenstoffgehalts steigt, 2) die Korngrößenfraktion und ihre mineralische Zusammensetzung die Sorption von PFOS im Boden beeinflussen und 3) Böden mit größeren Körnern besser für die Bodenwäsche geeignet sind, während die grobkörnigen Fraktionen (Kies) und die feinkörnigen Fraktionen (Ton, Schluff) getrennt werden sollten, um den Bodenwaschprozess zu optimieren.

Høisæter et al. (2021) verglichen die Methoden der **In-situ-Bodenwäsche** und der **Bodenwäsche durch Aushub** in einer Pilotstudie an einem Standort, der durch die Verwendung von AFFF-Schäumen für das Feuerlöschtraining belastet war (35 km nordöstlich von Oslo, Norwegen). Der Boden/Untergrund ist sandig, die vadose Zone erstreckt sich bis in eine Tiefe von 3-4 m. Die In-situ-Bodenwaschanlage wurde mit einem bereits vorhandenen Pump-and-Treat-System verbunden: Das in die gesättigte Zone gepumpte Wasser wird mit Aktivkohle behandelt und dann durch ein perforiertes Rohr vor dem Pumpsystem wieder in den Boden eingeleitet. Das Wasser perkoliert dann in die vadose Zone, wobei es die PFAS aus dem Boden/Untergrund auswäscht und sie zum Grundwasser transportiert, das erneut nach unten gepumpt wird. 23-73% des PFOS wurden beim Abbruch der In-situ-Wäsche entfernt (11-62% durch Ex-situ-Wäsche), aber die Autoren weisen darauf hin, dass das Ziel von 100% entferntem PFOS durch eine Verlängerung der Waschzeit erreicht werden könnte.

In einer experimentellen Studie schlugen Senevirathna et al. (2021) ein ähnliches Verfahren zur In-situ-Sanierung von mit PFOS kontaminierten Böden vor, das folgende Schritte umfasst: Spülen des Bodens mit Lösungsmittel, Abpumpen von Grundwasser, Rückgewinnung des Lösungsmittels und Behandlung des mit PFOS kontaminierten Wassers. Im Gegensatz zur Pilotstudie von Høisæter et al. (2021), in der nur Grundwasser verwendet wurde, stellten die Autoren fest, dass mehr als 98% des PFOS durch die Verwendung einer Spüllösung mit einem Bettvolumen von 50% Ethanol, das mit Wasser versetzt wurde, entfernt werden konnte. Nach der Rückgewinnung des Ethanols wurde das PFOS aus dem Wasser entfernt, das mit den Harzen PFA694E, K6362, MP 62, Amberlite IRA 67 und Dowexoptopore V493 wirksam gepumpt wurde. Die Autoren schlugen daraufhin einen Standort in Australien vor, um die Methode in großem Maßstab zu testen.

Kürzlich wurde in einer Feldstudie (unter Verwendung einer Testzelle) die Wirkung der In-situ-Wäsche eines verunreinigten Bodens unter Verwendung von AFFF-Schäumen auf die Massenentfernung von PFAA aus dem Boden/Untergrund in der ungesättigten Zone und deren Auswaschung in das Porenwasser ermittelt (Schaefer et al., 2023). Die Entwicklung der PFAA-Konzentration im Porenwasser in Abhängigkeit von der Entfernung der PFAA-Masse wurde mit Hilfe von Lysimetern verfolgt, während der Waschvorgang zeitweise unterbrochen wurde. Die Autoren stellten fest, dass die fraktionierte Abnahme der PFAAs-Konzentrationen im Porenwasser während des Waschens größer war als die fraktionierte Abnahme der Entfernung der PFAAs-Masse aus dem Boden/Untergrund: Beispielsweise nahm die PFOS-Konzentration im Porenwasser um 76% ab, aber nur 7,4% der PFOS-Masse wurde aus dem Boden entfernt. Schaefer et al. (2023) schlagen vor, dass es möglich wäre, weniger strenge Kriterien für die Bodensanierung anzuwenden als diejenigen, die eine Äquivalenz zwischen der Entfernung der PFAS-Masse aus dem Boden/Untergrund und ihrer Freisetzung durch Auslaugung implizieren. So würde bereits die Entfernung eines bescheidenen Anteils von PFAAs (vor allem PFASs >C6) aus dem Boden/Untergrund das Grundwasser schützen.

2.2.3. Immobilisierung durch Stabilisierung und Verfestigung

Söregård et al. (2019, 2021) veröffentlichten zwei Studien, um die Sanierungstechnik durch Stabilisierung und Verfestigung mit Hilfe von experimentellen Laborstudien und einer Pilotstudie zu bewerten. In der ersten (experimentellen) Studie versuchten die Autoren, das Immobilisierungspotenzial von PFAS in einem alten Boden zu bestimmen, der mit PFAS (mit Zusatz von künstlichen Spurenstoffen) mit oder ohne Zusatzstoffe kontaminiert war. Es wurden 14 PFAS-Substanzen untersucht (C3-C10 PFCAs; C4, C6 und C8 PFASs; FOSAs; 6:2 und 8:2 FTSAs). Um das Sorptionsverhalten von 7 Additiven zu vergleichen, wurde jede Substanz einer Matrix aus Zement, Asche und Schlacke zugesetzt: Aktivkohle, Zeolithpulver, Rembind®, Hydrotalcit, Bentonit, Chitosan und Calciumchlorid (Konzentration des Additivs 2%). Die Ergebnisse zeigten eine Verringerung der Auswaschung für 13 der 14 gemessenen PFAS (mit Ausnahme von PFBA) um 70% und 94% bei Zugabe von Aktivkohle bzw. Rembind®. 99,9% der langkettigen PFAS (z.B. PFOS) wurden bei allen Behandlungen mit diesen beiden Zusätzen stabilisiert. Die Immobilisierungseffizienz hängt also von der Länge der Fluorkohlenstoffkette und der funktionellen Gruppe ab: Die Effizienz steigt um 11-15% pro CF3-Gruppe und ist für PFASs um 49% höher als für PFCAs.

In der zweiten Studie verglichen Söregård et al. (2021) die Auswaschraten von 18 PFAS-Substanzen (C4-C11 PFCAs, C4, C6 und C8 PFASs, 6:2 und 8:2 FTSAs, C8-FOSAs und C8-FOSAs) in Labortests ("batch and monolith leaching tests") und anschließend in einer Pilotstudie, die realitätsnahe Bedingungen reproduzierte. Bodenproben (30% Sand, 28% Schluff/Schluff, 42% Ton) wurden von einem mit AFFF kontaminierten Standort in Uppsala (Schweden) entnommen, der als Risikogebiet für Trinkwasserkontamination identifiziert wurde. 3 Tonnen behandelter kontaminierter Boden (mit einem Verhältnis von 15% Bindemittel (Zement) und 0,2% Aktivkohlegranulat pro 85% Boden) und 3 Tonnen unbehandelter Boden wurden Bedingungen ausgesetzt, die 6 Jahre natürlichen Niederschlag simulierten, um die langfristige Wirksamkeit der Methode vorherzusagen. Die Eliminierungsrate von PFAS aus dem Eluat betrug > 97% für PFHxA, PFOA, PFHxS und PFOS, aber nur < 3% für kurzkettiges PFPeA. Der Kd-Wert stieg im Laufe der Zeit um das 2 bis 40fache an, wobei die Werte in der Pilotstudie höher waren als in der Laborstudie. Es wurde auch ein "Screening" (> 3000 PFAS) durchgeführt, um die Wirkung der Sanierungsmethode auf nicht identifizierte PFAS zu identifizieren. FHxSA und 3:2 FTOH wurden identifiziert, jedoch mit einer niedrigen Eliminationsrate (-13 bzw. 11%). Die niedrige Intensität von FHxSA in Verbindung mit einer großen Unsicherheit kann die scheinbar negative Eliminierungsrate erklären. Im Gegensatz dazu hat 3:2 FTOH eine kurze Fluorkohlenstoffkette (C3), was die geringe Wirksamkeit der Methode bei der Immobilisierung von kurzkettigen PFAS bestätigt, die bei PFCAs beobachtet wurde.

Der Bericht von Arcadis (2021) zeigt die verschiedenen Methoden, die für die Sanierung des Grundwassers identifiziert wurden, je nach Entwicklungsstadium und Durchführbarkeit der Maßnahmen (Abbildung 1 unten). Einige Methoden könnten sich aufgrund der hohen Kosten und der möglichen Umweltauswirkungen nicht auf dem Markt durchsetzen.

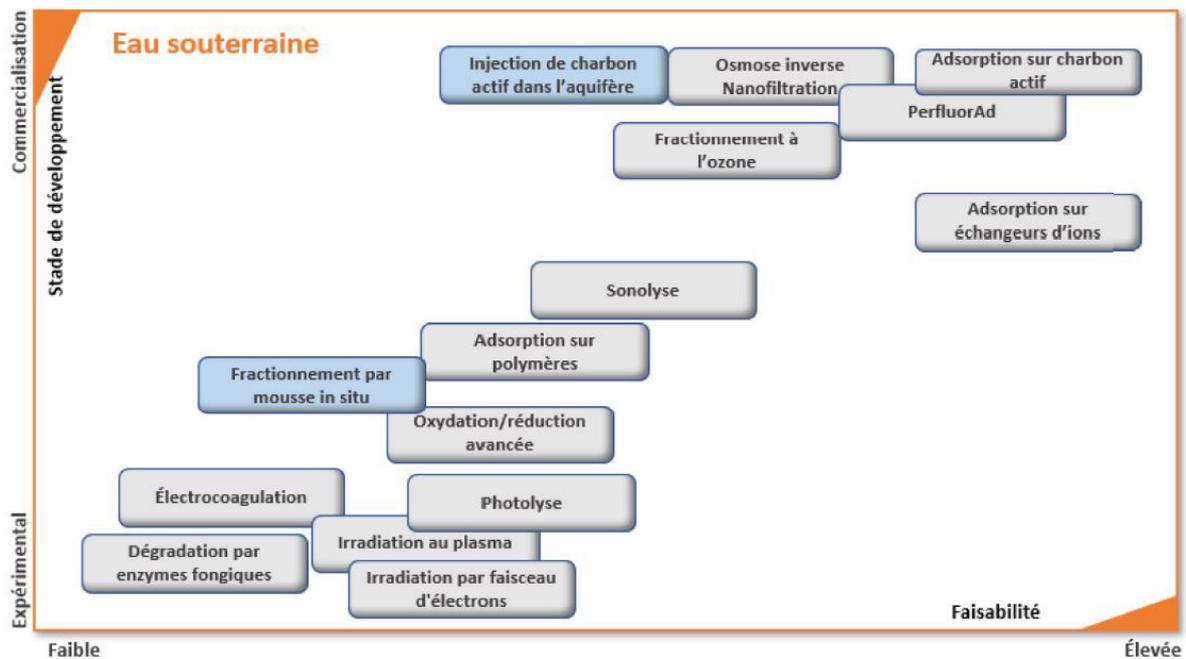


Figure 1. Methoden der In-situ- (blau) und Pump & Treat-Sanierung (grau) von Grundwasser (UBA, 2020; Arcadis, 2021).

Mehrere Unternehmen haben sich auf die Sanierung von Boden und Wasser spezialisiert, die mit PFAS verunreinigt sind, z.B. :

- Ventia ([Ventia | PFAS remediation](#)) und CleanEarth Technologies Inc ([Wastewater Solutions | Clean Earth \(cleanearthinc.com\)](#)) die das patentierte SourceZone® -Verfahren entwickelt haben;
- AECOM ([AECOM to launch PFAS solution DE-FLUORO™ at CleanUp 2019 in Adelaide](#)), die eine neue elektrochemische Oxidationstechnologie DE-FLUORO™ zur permanenten Entfernung von PFAS (Test für die Entfernung von PFAS aus kontaminiertem Wasser) einführte;
- EPOC ENVIRO ([Homepage - Epc Enviro](#)), die die Methode der Surface Active Foam Fractionation (SAFF®) zur Entfernung von PFAS aus Wasser entwickelt hat.

2.3. Fazit

Verschiedene Methoden wurden in Pilot- und Grossstudien zur Sanierung von mit PFAS belasteten oder kontaminierten Standorten eingesetzt. Für die Wasseraufbereitung werden derzeit routinemäßig oder in großem Maßstab die Adsorption an Aktivkohle oder Ionenaustauscherharzen, die Umkehrosmose, die Surface Foam Active Fractionation (SAFF) und fortgeschrittene Ozonierungsverfahren eingesetzt. Die Entfernungseffizienz von langkettigen PFAS ist oft höher als die von kurzkettigen PFAS, die mobiler sind. Lösungen werden derzeit entwickelt (z.B. serielle Prozessketten, Methoden zur Vernichtung von PFAS).

Ex-situ- und In-situ-Waschverfahren wurden für die Bodensanierung entwickelt und eingesetzt. Diese Methoden haben sich für PFCA mit einer Kettenlänge von C4-C8 und PFSA als wirksam erwiesen. Die getesteten Immobilisierungstechniken scheinen kurzfristig (1 Jahr) wirksam zu sein, um die Ausbreitung von PFAS zu stoppen, aber ihre langfristige Wirksamkeit bleibt ungewiss (keine Beseitigung von PFAS).

Bei den Sanierungsmethoden müssen Umweltfragen im Zusammenhang mit der Ausgrabung und/oder der Abfallentsorgung (Regeneration der Harze) sowie das Risiko der Produktion von toxischen Abbauprodukten berücksichtigt werden.

3. Referenzen

- Appleman, T.D., Higgins, C.P., Quiñones, O., Vanderford, B J., Kolstad, C., Zeigler-Holady, J.C., Dickenson, E.R., 2014. Treatment of poly-and perfluoroalkyl substances in US full-scale water treatment systems. *Water research*, 51, 246-255.
- Arcadis, 2021. Entscheidungsgrundlagen für den Vollzug bei PFAS-belasteten Standorten in der Schweiz. Autoren: Lukas Gasser, Thomas Held, Fritz Krieg, Luzia Karthirner, Alicia Lipsky, Michael Reinhard. Studie im Auftrag des BAFU. Rapport, 103 pp.
- Arcadis, 2023. State of the Art PFAS- An overview of knowledge gaps and research needs soil and groundwater. Autoren: Tessa Pancras, Hans Slenders, Daan Buijtenhuijs, Danne Post. Rapport, 47 pp.
- Belkouteb, N., Franke, V., McCleaf, P., Köhler, S., Ahrens, L., 2020. Removal of per-and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in a full-scale drinking water treatment plant: Long-term performance of granular activated carbon (GAC) and influence of flow-rate. *Water Research*, 182, 115913.
- Bertanza, G., Capoferri, G.U., Carmagnani, M., Icarelli, F., Sorlini, S., Pedrazzani, R., 2020. Long-term investigation on the removal of perfluoroalkyl substances in a full-scale drinking water treatment plant in the Veneto Region, Italy. *Science of The Total Environment*, 734, 139154.
- Boone, J.S., Vigo, C., Boone, T., Byrne, C., Ferrario, J., Benson, R., Donohue, J., Simmons, J.E., Kolpin, D.W., Furlong, E., Glassmeyer, S.T., 2019. Per-and polyfluoroalkyl substances in source and treated drinking waters of the United States. *Science of the Total Environment*, 653, 359-369.
- Burns, D J., Stevenson, P., Murphy, P.J., 2021. PFAS removal from groundwaters using Surface-Active Foam Fractionation. *Remediation Journal*, 31(4), 19-33.
- Burns, D.J., Hinrichsen, H.M., Stevenson, P., Murphy, P.J., 2022. Commercial-scale remediation of per-and polyfluoroalkyl substances from a landfill leachate catchment using Surface-Active Foam Fractionation (SAFF®). *Remediation Journal*, 32(3), 139-150.
- Castiglioni, S., Valsecchi, S., Polesello, S., Rusconi, M., Melis, M., Palmiotto, M., Manenti, A., Davoli, E., Zuccato, E., 2015. Sources and fate of perfluorinated compounds in the aqueous environment and in drinking water of a highly urbanized and industrialized area in Italy. *Journal of hazardous materials*, 282, 51-60.
- Conte, L., Falletti, L., Zaggia, A., Milan, M., 2015. Polyfluorinated organic micropollutants removal from water by ion exchange and adsorption.
- Ferrario, C., Peruzzi, C., Cislighi, A., Polesello, S., Valsecchi, S., Lava, R., Zanon, F., Santovito, G., Barausse, A., Bonato, M., 2022. Assessment of Reed Grasses (*Phragmites australis*) Performance in PFAS Removal from Water: A Phytoremediation Pilot Plant Study. *Water*, 14(6), 946.
- Franke, V., Schäfers, M.D., Lindberg, J.J., Ahrens, L., 2019. Removal of per-and polyfluoroalkyl substances (PFASs) from tap water using heterogeneously catalyzed ozonation. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 5(11), 1887-1896.
- Gobelius, L., Lewis, J., Ahrens, L., 2017. Plant uptake of per-and polyfluoroalkyl substances at a contaminated fire training facility to evaluate the phytoremediation potential of various plant species. *Environmental science & technology*, 51(21), 12602-12610.
- Grimison, C., Knight, E R., Nguyen, T.M.H., Nagle, N., Kabiri, S., Bräunig, J., Navarro, D.A., Kookana, R.S., Higgins, C., McLaughlin, M.J., Mueller, J.F., 2022. The efficacy of soil washing for the remediation of per-and poly-fluoroalkyl substances (PFASs) in the field. *Journal of Hazardous Materials*, 130441.
- Høisæter, Å., Arp, H. P. H., Slinde, G., Knutsen, H., Hale, S. E., Breedveld, G. D., Hansen, M. C., 2021. Excavated vs novel in situ soil washing as a remediation strategy for sandy soils impacted with per-and polyfluoroalkyl substances from aqueous film forming foams. *Science of The Total Environment*, 794, 148763.
- Hubert, M., Arp, H.P.H., Hansen, M.C., Castro, G., Meyn, T., Asimakopoulos, A.G., Hale, S.E., 2023. Influence of grain size, organic carbon and organic matter residue content on the sorption of per-and polyfluoroalkyl substances in aqueous film forming foam contaminated soils-Implications for remediation using soil washing. *Science of The Total Environment*, 162668.

- Inyang, M., Dickenson, E.R., 2017. The use of carbon adsorbents for the removal of perfluoroalkyl acids from potable reuse systems. *Chemosphere*, 184, 168-175.
- McGregor, R. (2020). Six pilot-scale studies evaluating the in-situ treatment of PFAS in groundwater. *Remediation Journal*, 30(3), 39-50.
- OFEV, 2014. Évaluation des variantes d'assainissement. L'environnement pratique UV-1401-F, 34 pp.
- Quinnan, J., Morrell, C., Nagle, N., Maynard, K.G., 2022. Ex situ soil washing to remove PFAS adsorbed to soils from source zones. *Remediation Journal*, 32(3), 151-166.
- Schaefer, C.E., Lavorgna, G.M., Lippincott, D.R., Nguyen, D., Schaum, A., Higgins, C.P., Field, J., 2023. Leaching of Perfluoroalkyl Acids during Unsaturated Zone Flushing at a Field Site Impacted with Aqueous Film Forming Foam. *Environmental Science & Technology* 57(5), 1940-1948.
- Senevirathna, S.T.M.L.D., Mahinroosta, R., Li, M., Krishna Pillai, K., 2021. In situ soil flushing to remediate confined soil contaminated with PFOS-an innovative solution for emerging environmental issue. *Chemosphere*, 262, 127606.
- Söregård, M., Gago-Ferrero, P., Kleja, D.B., Ahrens, L., 2021. Laboratory-scale and pilot-scale stabilization and solidification (S/S) remediation of soil contaminated with per-and polyfluoroalkyl substances (PFASs). *Journal of Hazardous Materials*, 402, 123453.
- Söregård, M., Kleja, D.B., Ahrens, L., 2019. Stabilization and solidification remediation of soil contaminated with poly-and perfluoroalkyl substances (PFASs). *Journal of Hazardous Materials*, 367, 639-646.
- Statens Geotekniska Institut (Suède), 2022. Åtgärdstekniker för PFAS i jord och grundvatten / Kunskapssammanställning (Sanierungstechniken für PFAS in Boden und Grundwasser / Zusammenfassung des Gutachtens). Autoren: Michael Pettersson, Malin Montelius, Dan Berggren Kleja, Anja Enell. Rapport, 56 pp.
- Takagi, S., Adachi, F., Miyano, K., Koizumi, Y., Tanaka, H., Watanabe, I., Tanabe, S., Kannan, K., 2011. Fate of perfluorooctanesulfonate and perfluorooctanoate in drinking water treatment processes. *Water research*, 45(13), 3925-3932.
- Umweltbundesamt (UBA) (2020), Sanierungsmanagement für lokale und flächenhafte PFAS-Kontaminationen – Abschlussbericht, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-07-13_texte_137-2020_handbuch_pfas.pdf.
- World Health Organization (WHO). Keeping Our Water Clean: The Case of Water Contamination in Veneto Region, Italy. WHO: Geneva, Switzerland, 2017.
- Zaggia, A., Conte, L., Falletti, L., Fant, M., Chiorboli, A., 2016. Use of strong anion exchange resins for the removal of perfluoroalkylated substances from contaminated drinking water in batch and continuous pilot plants. *Water research*, 91, 137-146.

Anhang 5

Notiz zur Herleitung eines PFAS-Summenwertes als Grenzwert nach VVEA für die Ablagerung von Abfällen, Stand 20.8.2024



Aktenzeichen: BAFU-357.13-9/26/3
Geschäftsfall:

Notiz zur Herleitung eines PFAS-Summenwertes als Grenzwert nach VVEA¹ für die Ablagerung von Abfällen

Bitte beachten:

Per- und polyfluorierte Alkylverbindungen (PFAS) sind in der VVEA nicht geregelt, die Verordnung enthält keine allgemein gültigen Grenzwerte für diese Stoffklasse. In Fällen mit fehlenden Grenzwerten kommen Anhang 3 Ziffer 3 und Anhang 5 Ziffer 6.2 VVEA¹ zur Anwendung. Diese besagen:

- Sind für Stoffe, die im Aushub- und Ausbruchmaterial festgestellt werden, keine Grenzwerte festgelegt, so beurteilt die Behörde die Abfälle mit Zustimmung des BAFU im Einzelfall nach den Vorschriften der Umwelt- und Gewässerschutzgesetzgebung. (Anh. 3 Ziff. 3 VVEA)
- Enthalten Abfälle umweltgefährdende Stoffe, für welche die Ziffern 1–5 keine Grenzwerte enthalten, legt die kantonale Behörde solche mit Zustimmung des BAFU im Einzelfall nach den Vorschriften der Umwelt- und Gewässerschutzgesetzgebung fest. (Anh. 5 Ziff. 6.2 VVEA)

Für die Vollzugsbehörden besteht somit die Möglichkeit, im Einzelfall, d.h. pro Standort, Werte festzulegen, denen für den betreffenden Standort dieselbe Rechtskraft wie die in der VVEA festgelegten Grenzwerte zukommt. Vorgängig muss die Behörde dafür die Zustimmung des BAFU einholen.

Im nachfolgenden Text erläutert das BAFU die aus seiner Sicht und dem aktuellen Stand der Erkenntnisse folgend die Herleitung der PFAS-Feststoff-Grenzwerte. Diese Werte sind nicht allgemeingültig, sondern müssen gemäss obigen Bestimmungen standortspezifisch von der zuständigen Behörde angeordnet werden.

Es steht der kantonalen Vollzugsbehörde frei, im Einzelfall niedrigere als die hier beschriebenen VVEA-Grenzwerte zu beantragen und dann mit der BAFU-Zustimmung festzulegen. Sie kann auch die Ablagerung von PFAS-haltigen Abfällen auf einzelne geeignete Deponien beschränken.

Die Frage, wie PFAS im Rahmen der Altlastenbearbeitung zu beurteilen sind, wird seit einiger Zeit sehr intensiv und kontrovers diskutiert – nicht nur in der Schweiz. Die Motion 22.3929 von Ständerätin Marianne Maret «Festlegung von PFAS-spezifischen Werten in Verordnungen»² fordert den Bundesrat auf, in der Abfallverordnung (VVEA) PFAS-spezifische Grenzwerte festzulegen. Im Folgenden wird beschrieben, wie das BAFU die VVEA-Feststoff-Grenzwerte für PFAS herleitet.

Als VVEA-Grenzwerte zur Ablagerung von PFAS-haltigen Abfällen hat das BAFU bis Ende 2022 eluatbasierten Werten zugestimmt (5 ng TEQ/l als U-Wert, 50 ng TEQ/l als B-Wert, 500 ng TEQ/l als E-Wert). Diese leiteten sich aus dem Konzentrationswert nach Anhang 1 AltIV³ ab, der seinerseits auf der toxikologischen Gefährdungsabschätzung der Europäischen Behörde für Lebensmittelsicherheit EFSA aus dem Jahre 2020 beruht⁴. Eine Untersuchung von rund 150 als unbelastet geltenden Böden der Schweiz

¹ Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen vom 4. Dezember 2015 (Abfallverordnung, VVEA, SR 814.600).

² <https://www.parlament.ch/de/ratsbetrieb/suche-curia-vista/geschaeft?AffairId=20223929>

³ Verordnung über die Sanierung von belasteten Standorten vom 26. August 1998 (Altlasten-Verordnung, AltIV, SR 814.680).

⁴ Gemäss EFSA-Opinion 2020 (Risk to human health related to the presence of perfluoroalkyl substances in food. EFSA Journal 2020;18(9):6223. <https://www.efsa.europa.eu/en/efsajournal/pub/6223>) beträgt die tolerierbare wöchentliche Aufnahmemenge (TWI) an PFHxS, PFOS, PFOA und PFNA 4.4 ng pro Kilogramm Körpergewicht, was umgerechnet, bei einem Körpergewicht



hat aber im Sommer 2022 gezeigt, dass von einer ubiquitären PFAS-Grundbelastung in den Oberböden auszugehen ist. PFAS wurden bei jeder Messung nachgewiesen; das Minimum lag bei 0.2 µg/kg, der Median betrug 1.4 µg/kg und 95% aller Messwerte weisen Gehalte bis 5 µg/kg auf.

Vor diesem Hintergrund hat sich das BAFU entschieden, bei der einzelfallweisen Zustimmung zu VVEA -Ablagerungsgrenzwerten für Abfälle mit per- und polyfluorierten Alkylverbindungen (PFAS) von den bisher üblichen 24-Std-VVEA-Eluatwerten auf Feststoff-basierte Grenzwerte zu wechseln. Das BAFU hat dies in einem Schreiben an die Abfall- und Altlastenfachstellen von Bund und Kantonen am 31. Januar 2023 kommuniziert. Das BAFU empfiehlt aktuell, folgende PFAS-Grenzwerte zu verwenden:

- **U-Wert** (Grenzwert für unverschmutztes Aushubmaterial nach Anh. 3 Ziff. 1 VVEA): **0.1 µg/kg**
(Dieser Wert entspricht der Bestimmungsgrenze pro PFAS-Einzelstoff. Höhere Bestimmungsgrenzen für einzelne Stoffe können zugelassen werden, wenn sich sachlich begründen lässt, warum die 0.1 µg/kg nicht erreicht werden können.)
- **T-Wert** (Grenzwert für schwach (oder tolerierbar) verschmutztes Aushubmaterial nach Anh. 3 Ziff. 2 VVEA): **2.5 µg/kg**
(Bis auf Weiteres bedingte Verwertung in Bezug auf Art. 19 Abs. 2 VVEA: Bst. a: Herstellung von ausschliesslich hydraulisch gebundenen Baustoffen zulässig. Bst. b und d: Verwertung nach Vorgabe des Standortkantons. Bst. c: Herstellung von Zementklinker ausschliesslich bei Vorliegen und gemäss entsprechender kantonaler Betriebsbewilligung⁵ des Zementwerks.)
- **B-Wert** (Grenzwert für Material zur Ablagerung auf Deponien des Typs B nach Anh. 5 Ziff. 2.3 VVEA): **5 µg/kg**
(Dieser Wert berücksichtigt die PFAS-Grundbelastung in den Schweizer Oberböden.)
- **E-Wert** (Grenzwert für Material zur Ablagerung auf Deponien des Typs E nach Anh. 5 Ziff. 5.2 VVEA): **5 µg/kg**
(Aus toxikologischer Sicht sollte kein Material mit mehr als 5 µg/kg abgelagert werden.)

Jeder PFAS-Grenzwert soll mindestens die Summe der 9 PFAS-Einzelsubstanzen umfassen, die auch dem Summen-Konzentrationswert nach Anhang 1 AltIV zugrunde liegen (PFBA, PFPeA, PFHxA, PFHpA, PFOA, PFNA, PFBS, PFHxS und PFOS). Bei konkretem Verdacht auf weitere relevante PFAS sind diese aber auch in den Feststoff-Summenwert aufzunehmen.

Messwerte unterhalb der Bestimmungsgrenze fliessen als Nullwerte in die Summenberechnung ein.

In Bezug auf die Verwertung von Boden lässt sich momentan folgendes festhalten:

Boden muss verwertet werden, wenn er sich aufgrund seiner Eigenschaften dafür eignet, weder Fremdstoffe noch invasive, gebietsfremde Organismen enthält und die VBBo-Richtwerte⁶ einhält (Art. 18. Abs. 1 VVEA). Für PFAS existieren noch keine Richtwerte. Nach Artikel 5 VBBo muss die zuständige Behörde im Einzelfall beurteilen, ob die Bodenfruchtbarkeit langfristig gewährleistet ist und nötigenfalls Massnahmen ergreifen. Für die Festlegung von Richt-, Prüf- oder Sanierungswerten nach VBBo benötigt der Kanton keine Zustimmung des BAFU, kann sich aber von ihm beraten lassen.

In Abhängigkeit der Erkenntnisse in den PFAS-Arbeitsgruppen, nach Vorliegen von neuen wissenschaftlichen Daten, nach Durchführung weiterer Messungen zu PFAS-Belastungen in der Schweiz, mit zunehmender Vollzugserfahrung und allfällig neuer Rechtsetzung könnten sich die hier aufgeführten Grenzwerte noch ändern. Wir sind uns bewusst, dass diese Unsicherheit für alle Beteiligten unangenehm ist

von 70 kg und einem täglichen Trinkwasserkonsum von 2 Litern einem Wert von 22 ng/l entspricht. Da in einem Gewässerschutzbereichs A₀ der halbe Konzentrationswert als Sanierungswert gilt und die Konzentrationswerte sich zumindest in der Grössenordnung an den Trinkwasserwerten orientieren, empfiehlt das BAFU, als PFAS-Summen-Konzentrationswert den doppelten, aufgerundeten TWI-Wert von 50 ng/l zu verwenden.

⁵ Eine solche Verwertung ist gegebenenfalls anlagenspezifisch geregelt (vgl. Artikel 24 Absatz 1 und Anhang 4 Ziffer 4.2 VVEA).

⁶ Verordnung über Belastungen des Bodens vom 1. Juli 1998 (VBBo, SR 814.12).

und den Vollzug erschwert, sie ist aber angesichts der vielen noch offenen wissenschaftlichen/technischen Fragen im Umgang mit PFAS-Belastungen unvermeidlich.

Für die Notiz: A. Laube, R. Kettler / BAFU / 20.8.2024