

Stand: 30. November 2021

Leitfaden zur PFAS-Bewertung

**Empfehlungen für die bundeseinheitliche Bewertung von
Boden- und Gewässerverunreinigungen sowie für die Entsorgung
PFAS-haltigen Bodenmaterials**

INHALTSVERZEICHNIS

1	Veranlassung	6
2	Einführung	8
3	Grundlage für die Ableitung von Bewertungsmaßstäben	10
4	Analytik	12
4.1	Stoffspektrum	12
4.2	Analysenverfahren	13
4.3	Herstellung von Eluaten zur Bodenuntersuchung	14
5	Beurteilungskriterien und Anwendungshinweise	16
5.1	Wasser	16
5.1.1	Grundwasser	16
5.1.2	Oberflächengewässer	17
5.1.3	Abwasser	19
5.1.3.1	Emissionsbezogene Anforderungen	19
5.1.3.2	Weitergehende immissionsseitige Anforderungen	19
5.1.3.3	Abschätzung der Gewässerbelastung durch rechnerische Ermittlung	21
5.2	Klärschlamm / Düngemittel	21
5.3	Boden - Wirkungspfadbezogene Gefahrenbeurteilung	22
5.3.1	Wirkungspfad Boden-Grundwasser	22
5.3.2	Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze	23
5.3.3	Wirkungspfad Boden-Mensch (direkter Kontakt)	24
6	Umgang mit PFAS-haltigem Bodenmaterial	25
6.1	Allgemeines	25
6.2	Verwertung von Bodenmaterial auf, in oder unter/außerhalb einer durchwurzelbaren Bodenschicht	29
6.2.1	Verwertung von Bodenmaterial auf/in einer durchwurzelbaren Bodenschicht	30
6.2.2	Auf- und Einbringen von Bodenmaterial unter- /außerhalb einer durchwurzelbaren Bodenschicht	30
6.3	Verwertung von Bodenmaterial in technischen Bauwerken	31
6.4	Umlagerung von Bodenmaterial im Rahmen der Sanierung	31
6.5	Verwertung und Beseitigung auf Deponien	32
	Glossar	34
	Anhang	36

I.	Eintragswege in die Umwelt	36
I.1	Schaumlöschmittel der Feuerwehren	36
I.2	PFAS-Eintrag über organische Reststoffe	37
I.3	Abwasser	37
I.4	Altlasten und schädliche Bodenveränderungen	38
I.4.1	Altstandorte	38
I.4.2	Altablagerungen und Altdeponien	38
I.4.3	Sonstige Hinweise	38
I.5	Atmosphärischer Eintragspfad	39
II.	Gesetzliche Grundlagen	39
II.1	Europäische Regelungen	39
II.2	Bundesweite Regelungen zur Begrenzung von PFAS in der Umwelt	42
II.3	Oberflächengewässer - Erläuterungen zur Ableitung von PNEC und UQN	42
III.	PFAS-Verwendungen	44
IV.	Übersicht über die nach ISO 21675:2019-10 analysierbaren Verbindungen	46
V.	Fallbeispiele aus den Ländern	48
V.1	Baden-Württemberg	48
V.2	Bayern	49
V.3	Nordrhein-Westfalen	50

Leitfaden zur PFAS-Bewertung - Empfehlungen für die bundeseinheitliche Bewertung von Boden- und Gewässerverunreinigungen sowie für die Entsorgung PFAS-haltigen Bodenmaterials

Erarbeitet durch die Bund/Länder Arbeitsgruppe PFAS (PFC)
unter Mitwirkung insbesondere von:

Bieber, Andreas	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
Biegel-Engler, Dr. Annegret	Umweltbundesamt
Gierig, Dr. Michael	Landesamt für Umwelt (BY)
Keese, Klaus	Landesamt für Bau und Liegenschaften (NI)
Klose, Astrid	Behörde für Umwelt und Energie (HH)
Maier, Dr. Ursula	Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft (BW)
Raffelsiefen, Markus	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
Schroers, Stefan	Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz (NW)
Straßburger, Dr. Thomas	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
Ungermann, Dr. Andrea	Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft (BW)
Wiedenhöft, Claudia	Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz (NW)

1 Veranlassung

Seit einigen Jahren werden zunehmend Schadensfälle und Verunreinigungen mit organischen Fluorverbindungen (per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen bzw. per- and polyfluoroalkyl substances – PFAS) in Boden und Gewässern bekannt.

In Nordrhein-Westfalen wurde bereits im Jahr 2006 die (illegale) Aufbringung von kontaminierten Bioabfallgemischen und sogenannten "Bodenverbessern" auf landwirtschaftlich genutzten Flächen im Hochsauerland als wesentlicher Eintragspfad für außergewöhnlich hohe Belastungen mit Perfluorooctansäure (PFOA) und Perfluorooctansulfonsäure (PFOS) in der Ruhr identifiziert. Die anschließende intensive Befassung mit dem Thema hat gezeigt, dass bundesweit vielfältige Ursachen für Boden- und Gewässerverunreinigungen mit PFAS und eine Vielzahl von Schadensfällen bestehen. Einer der größten Schadensfälle befindet sich in Bayern. Dort wird PFOA im Umfeld eines Industrieparks mit ansässigen Fluorpolymerherstellern und -verwendern auf einer Gesamtfläche von mittlerweile 230 km² in Boden-, Grundwasser- und Oberflächengewässerproben nachgewiesen.

In Baden-Württemberg wurden 2013 erstmalig PFAS-Verunreinigungen in einem Brunnen der Trinkwasserversorgung Rastatt festgestellt. Untersuchungen ergaben, dass Böden und Grundwasser in den Regionen Rastatt, Baden-Baden und Mannheim mit PFAS verunreinigt sind. Es ist anzunehmen, dass die Ursache dieser PFAS-Verunreinigungen Papierschlamm-Kompostgemische waren, die über mehrere Jahre auf landwirtschaftlich bewirtschafteten Flächen aufgebracht wurden. In Mittel- und Nordbaden sind flickenteppichartig Flächen von mehreren hundert Hektar teilweise erheblich mit PFAS verunreinigt.

Bundesweit stehen viele PFAS-Schadensfälle in Boden und Grundwasser aber vorrangig im Zusammenhang mit der Verwendung von fluorhaltigen Schaumlöschmitteln bei Feuerwehreinsätzen und -übungen sowie dem Einsatz PFAS-haltiger Hilfsstoffe beispielsweise in Galvanik- und Textilveredelungsanlagen.

Aufgrund der erheblichen Umweltauswirkungen hatte die Umweltministerkonferenz (UMK) Ende 2016 einen Bericht zur Dimension der Umweltbelastung durch PFAS angefordert und unter dem Titel „Bericht zu perfluorierten Verbindungen; Reduzierung/Vermeidung, Regulierung und Grenzwerte, einheitliche Analyse- und Messverfahren für fluororganische Verbindungen“ Ende September 2017 veröffentlicht¹.

Daneben beschloss die UMK, dass Bund und Länder einheitliche Vorgaben für die Bewertung und Sanierung von Boden- und Gewässerverunreinigungen sowie für die Entsorgung PFAS-haltiger Materialien erarbeiten. Hierzu wurde auf Bitten der Bund-/Länderarbeitsgemeinschaften Bodenschutz (LABO) und Wasser (LAWA) eine Ad-hoc Arbeitsgruppe (Fachgruppe PFAS) eingerichtet – unter Einbindung von Vertreterinnen und Vertretern des Bundes und der Länder². Die Arbeitsgruppe hat den vorliegenden Leitfaden entwickelt. Weiterhin wurde der Forschungsbedarf herausgearbeitet und in einem eigenen Positionspapier dargestellt.

Die zuständigen Vollzugsbehörden der Bundesländer wie z.B. Bayern und Baden-Württemberg, haben auf der Grundlage eigener Bewertungen und Empfehlungen bereits weitergehende Erfahrungen mit der PFAS-Problematik machen können. Die Erfahrungen zeigen, dass ein belastbarer Vollzug anhand vorläufiger Bewertungsgrundlagen grundsätzlich möglich ist. Bislang fehlt es jedoch an bundeseinheitlichen Regelungen.

Großflächige wie auch kleinräumige PFAS-Umwelteinträge unterschiedlichster Ursachen zeitigen Folgen, die direkte Auswirkungen insbesondere auf die Trinkwasserversorgung und auf die landwirtschaftliche

¹ https://www.umweltministerkonferenz.de/umlbeschluesse/umlaufBericht2017_19.pdf

² Mitgewirkt haben Vertreterinnen und Vertreter der Bund-/Länderarbeitsgemeinschaften Bodenschutz (LABO), Wasser (LAWA), Abfall (LAGA) und des Bund-/Länder-Arbeitskreises Abwasser (BLAK Abwasser).

Produktion haben können. Wasserversorgern entstehen erhebliche Kosten für die Wasseraufbereitung mit der Folge einer Anhebung der Wassergebühren, Landwirte können Produkte nicht mehr vermarkten oder müssen die Produktion umstellen.

Bei großflächigen Verunreinigungen ergeben sich auch Probleme in Bezug auf die Ausweisung von Baugebieten sowie den Umgang mit verunreinigtem Erdaushub. Damit ist auch die Bereitstellung von Deponekapazitäten betroffen und vielerorts eine noch ungelöste Aufgabe.

In Abhängigkeit von Eintragsursachen, PFAS-Verteilungsmuster aber auch des Umfangs der verunreinigten Flächen sind die Betroffenheit der Bevölkerung und die Auswirkungen jedoch regional stark unterschiedlich.

Bei relativ kleinräumigen Belastungen von Boden und Grundwasser können in der Regel Sanierungsmaßnahmen ergriffen werden. Bei großen flächenhaften Verunreinigungen sind Sanierungsmaßnahmen aus Gründen der Verhältnismäßigkeit nicht oder oft nur teilweise möglich, hier steht das Schadensmanagement im Vordergrund.³ Gleichwohl können erhebliche Kosten für die Länder anfallen, beispielsweise für dringend erforderliche Untersuchungs- und Forschungsprojekte, die dem vorsorgenden Verbraucherschutz oder einer regionalen Weiterentwicklung „trotz Schadensfall“ dienen.

Mit diesem Leitfaden werden ein Bewertungsrahmen sowie beurteilungsrelevante Hintergrundinformationen zur Verfügung gestellt. Damit soll vor allem den Vollzugsbehörden Hilfestellung bei der Bewertung von PFAS-Einträgen in Gewässer oder in den Boden gegeben werden. Zusätzlich enthält der Leitfaden Maßstäbe für die Bewertung von Untersuchungsergebnissen und für Entscheidungen über ggf. erforderliche weitergehende Maßnahmen bei bestehenden Boden- und Gewässerverunreinigungen.

Abweichungen von diesen Empfehlungen können im Rahmen von Einzelfallbeurteilungen sinnvoll sein. Generell gilt, dass dieser Leitfaden eine rechtsverbindliche bundesweite oder sogar europaweite Bewertung nicht ersetzen kann.

³ Umweltbundesamt (2020): Sanierungsmanagement für lokale und flächenhafte PFAS-Kontaminationen <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/sanierungsmanagement-fuer-lokale-flaechenhafte-pfas>

2 Einführung

In diesem Leitfaden wird die - auch im internationalen Bereich gebräuchliche - Bezeichnung PFAS, durchgehend verwendet, anstelle der deutschen Bezeichnung PFC (per- und polyfluorierte Chemikalien).

PFAS kommen nicht natürlich vor, sondern sind anthropogenen Ursprungs. Aktuell umfasst diese Stoffgruppe mehrere tausend Verbindungen⁴. Allen PFAS gemeinsam sind vollständig (per-) oder teilweise (poly-) fluorierte aliphatische Kohlenstoffketten mit einer funktionellen Gruppe.

Aufgrund ihrer vielfältigen Verwendungen existieren verschiedenste Eintragspfade in die Umwelt. Die perfluorierten Vertreter der Stoffgruppe sind in der Umwelt außerordentlich stabil. Sie werden praktisch nicht abgebaut. Deshalb lassen sie sich mittlerweile auch außerhalb von Schadensfällen in Spuren überall in der Umwelt (ubiquitär) nachweisen, auch in industriefernen Gebieten. Der Großteil der PFAS sind polyfluorierte Stoffe, sie können unter Umweltbedingungen zu perfluorierten Carbon- und Sulfonsäuren abgebaut werden. Sie werden deshalb auch Vorläuferverbindungen genannt (englische Bezeichnung ‚precursor‘).

Der vorliegende Leitfaden befasst sich mit PFAS mit mehr als drei fluorierten C-Atomen. PFAS werden in langkettige und kurzkettige Verbindungen unterteilt, da sie unterschiedliche chemische Eigenschaften aufweisen. Als langkettig gelten nach einer Definition der OECD⁵ alle Perfluorcarbonsäuren mit acht und mehr perfluorierten Kohlenstoffatomen (also beginnend mit Perfluoroctansäure) und alle Perfluorsulfonsäuren mit sechs und mehr perfluorierten Kohlenstoffatomen (also beginnend mit Perfluorhexansulfonsäure). Aus der Stoffbezeichnung ist häufig die Anzahl der Kohlenstoffatome erkennbar.

Langkettige PFAS gelten als persistent und bioakkumulierbar. Im menschlichen Körper können langkettige PFAS an Proteine in Blut, Leber und Niere binden. Im Vergleich zu anderen Chemikalien werden langkettige PFAS sehr langsam ausgeschieden und können sich deshalb im Körper anreichern. Besonders kritisch ist auch die Weitergabe langkettiger PFAS von der Mutter zum Kind während der Schwangerschaft und Stillzeit. Erhöhte Konzentrationen von PFOA und PFOS im menschlichen Blut können Wirkungen von Impfungen vermindern, die Neigung zu Infekten erhöhen, zu erhöhten Cholesterinwerten führen und bei Nachkommen ein verringertes Geburtsgewicht zur Folge haben. In der Muttermilch und im menschlichen Blut der Allgemeinbevölkerung sind langkettige PFAS nachweisbar. Nach der Europäischen Chemikalienverordnung REACH (siehe Anhang II.1) gelten einige dieser Verbindungen als „besonders besorgniserregend“.

Langkettige perfluorierte Carbon- und Sulfonsäuren wurden in den verschiedenen Anwendungsbereichen zunehmend durch komplexe, meist polyfluorierte Verbindungen substituiert, welche als Vorläuferverbindungen fungieren. Deren Abbauprodukte – meist kurzkettige perfluorierte Verbindungen – sind ebenso wenig abbaubar, wie die langkettigen perfluorierten Moleküle. Wegen ihrer geringen Adsorptionsneigung werden kurzkettige PFAS im Boden weniger stark zurückgehalten und verunreinigen so schneller Grund- und Rohwasser. Dagegen werden langkettige Vertreter (z.B. Perfluoroctansulfonsäure [PFOS], oder Perfluordecansäure [PFDA]) meist nur relativ langsam aus Böden ausgewaschen. Grundwasserbelastungen treten deshalb oft erst Jahre bis Jahrzehnte nach einer Exposition des Bodens auf, z.B. nach der Aufbringung PFAS-haltiger Materialien. Vor allem, wenn diese Materialien Vorläuferverbindungen enthalten, die erst im Lauf der Zeit zu den persistenten Endstufen abgebaut werden (vgl. Kap. 4.1).

Insbesondere kurzkettige PFAS können von Pflanzen aufgenommen werden und gelangen so in die Nahrungskette. Konkrete Transferfaktoren für den Wirkungspfad Boden-Pflanze sind noch nicht bekannt, Bis

⁴ <http://www.oecd.org/chemicalsafety/portal-perfluorinated-chemicals/>

⁵ <http://www.oecd.org/chemicalsafety/portal-perfluorinated-chemicals/aboutpfass/Figure1-classification-of-per-and-polyfluoroalkyl-substances%20-PFASs.pdf>

auf wenige Ausnahmen (u.a. PFOS und PFOA) sind die öko- bzw. humantoxikologischen Wirkungen der meisten PFAS sind bislang wenig untersucht, insofern ist das Vorsorgeprinzip eine wichtige Maxime bei der Bewertung.

3 Grundlage für die Ableitung von Bewertungsmaßstäben

Eine wesentliche Grundlage für die Bewertung von Verunreinigungen von Boden und Grundwasser sind die TDI-Werte (Tolerable Daily Intake, tolerierbare tägliche Aufnahmemenge). Der TDI-Wert steht für die Menge eines Stoffes, die über die gesamte Lebenszeit pro Tag ohne gesundheitliche Auswirkungen aufgenommen werden kann. Die TDI-Werte werden als zulässige Menge eines Stoffs je kg Körpergewicht (KG) und Tag (d) angegeben (Masse/(KG*d)). Auch eine wöchentliche oder monatliche Zeitspanne (TWI, Tolerable Weekly Intake bzw. TMI, Tolerable Monthly Intake) kann für die Bewertung sinnvoll sein.

Die gemeinsame LAWA-LABO-Kleingruppe „Ableitung von Geringfügigkeitsschwellenwerten für PFAS“ hat 2017 aus veröffentlichten Studien sog. TDI-analoge Werte für einige PFAS-Verbindungen ermittelt, z.B. jeweils 28,6 Nanogramm pro Kilogramm Körpergewicht und Tag (ng/kg KG*d) für PFOA und PFOS. Vergleicht man die humantoxikologische Wirkung (Schutzgut Trinkwasser) mit der ökotoxikologischen Wirkung (Schutzgut Gewässerorganismen), zeigt sich, dass das Schutzgut Trinkwasser für alle Verbindungen empfindlicher ist als die zu schützenden trophischen Ebenen der Gewässerorganismen. Die Geringfügigkeitsschwellenwerte (GFS-Werte) für PFAS stützen sich daher durchgängig auf humantoxikologische Wirkungen und das Anforderungsprofil der Trinkwasserverordnung. Aufgrund der Löslichkeit vieler PFAS und der damit verbundenen Relevanz für den Wirkungspfad Boden-Grundwasser stehen die GFS-Werte im direkten Zusammenhang mit Werten zur Einstufung von Bodenmaterial (siehe Kapitel 6).

In der 2021 novellierten Bundes-Bodenschutz und Altlastenverordnung (BBodSchV) wurden diese GFS-Werte als Prüfwerte für den Wirkungspfad Boden-Grundwasser übernommen.

Die Neufassung der Anfang 2021 in Kraft getretenen Europäischen Trinkwasserrichtlinie (**Richtlinie (EU) 2020/2184 vom 16.12.2020**) listet erstmalig Vertreter aus der PFAS-Gruppe als Schadstoffe auf. Für die 20 aufgeführten Einzelverbindungen kommt ein Summenwert von 0,1 µg/l zur Anwendung oder alternativ 0,5 µg/l, wenn die gesamte PFAS-Gruppe erfasst wird. Die nationale Umsetzung der Richtlinie wird zu einem verstärkten Monitoring führen. Bislang waren Nachweise von PFAS-Belastungen im Grund- bzw. Trinkwasser eher Zufallsfunde als Ergebnisse einer systematischen Überwachung.

Die Europäische Lebensmittelsicherheitsbehörde (EFSA) hatte 2018 eine Neubewertung der gesundheitlichen Risiken durch PFOA und PFOS in Lebensmitteln veröffentlicht und deutlich niedrigere Richtwerte abgeleitet als zuvor⁶. Die tolerierbaren wöchentlichen Aufnahmemengen von 6 ng/kg KG für PFOA und von 13 ng/kg KG für PFOS liegen auch weit unter TDI-analogen Werten der LAWA-LABO-Kleingruppe⁷. Die EFSA hat in ihre Bewertung 2020 erneut überarbeitet und empfiehlt nun einen TWI für die Summe von vier Verbindungen (PFOA, PFOS, Perfluorhexansulfonsäure [PFHxS], und Perfluorononansäure [PFNA]) in Höhe von 4,4 ng/kg KG. Damit hat sie ihre Empfehlung erneut verschärft. Erstmals wurde auch der Gesichtspunkt der Mischtoxizität berücksichtigt.

Aufgrund der vorstehend aufgeführten Entwicklungen wird über eine Anpassung der bisherigen Bewertungsgrundlagen auf nationaler Ebene zu entscheiden sein. Dazu gehört eine Überarbeitung der GFS-Werte und ggf. eine entsprechende Anpassung des Leitfadens. Bis auf weiteres werden die GFS-Werte für PFAS aus 2017 herangezogen, die von einer LAWA-LABO-Kleingruppe unter Verwendung TDI-analoger Werte abgeleitet wurden.

⁶ <https://www.efsa.europa.eu/en/efsajournal/pub/5194>

⁷ Die von der EFSA abgeleiteten Aufnahmemengen geben die Dosis an, die bei lebenslanger Aufnahme keine gesundheitlichen Beeinträchtigungen beim Menschen erwarten lassen. Bis zur Neufestsetzung in 2018 lagen die Werte für die tolerierbare tägliche Aufnahmemenge für PFOS bei 150 und für PFOA bei 1.500 ng/kg KG. Die US Umweltbehörde (EPA) hatte bereits 2016 einen deutlich niedrigeren, gemeinsamen Wert („reference dose“) für beide Verbindungen bestimmt. Für PFOS sind diese nun dreizehn Nanogramm pro Kilogramm Körpergewicht pro Woche, für PFOA sechs Nanogramm.

Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die in der Oberflächengewässerverordnung (OGewV) eingeführte Umweltqualitätsnorm für PFOS (Kap. 5.1.2) noch auf dem veralteten EFSA-Wert von 2008 beruht.

4 Analytik

4.1 Stoffspektrum

Die Stoffgruppe der PFAS umfasst eine Vielzahl verschiedener Einzelsubstanzen. Dieser Leitaden bezieht sich im Wesentlichen auf die in der Tabelle 1 angeführten 13 Verbindungen, für die Geringfügigkeitsschwellen (GFS)-Werte bzw. Gesundheitliche Orientierungswerte (GOW) vorliegen und die nach DIN-Normen analysierbar sind⁸. Für zahlreiche Verbindungen liegt somit kein Bewertungsrahmen vor.

Sollen in begründeten Fällen (z. B. Verunreinigungen mit polyfluorierten Verbindungen) mehr als die in Tabelle 1 genannten PFAS untersucht werden, ist über das zu untersuchende Parameterspektrum im Einzelfall zu entscheiden.

Insbesondere fluorhaltige Schaumlöschmittel, z.B. AFFF⁹, können zu Verunreinigungen mit PFAS führen, die nicht in dieser Liste enthalten sind. Nach einem Einsatz solcher Löschschäume sollte daher das Untersuchungsspektrum erweitert werden. Hier kommen insbesondere Polyfluoralkylbetaine in Betracht, die z.B. als PFOS-Ersatzstoffe in Capstone™-Produkten¹⁰ enthalten sind. Nicht alle diese Betaine können als Einzelsubstanz nachgewiesen werden, so dass unter Umständen auch eine Erfassung als Summenparameter (siehe Kapitel 4.2) sinnvoll sein kann.

Tabelle 1: Nach DIN-Normen analysierbare PFAS

Substanz	Abkürzung	Summenformel	CAS-Nr.	Perfluorierte Kettenlänge
Perfluorbutansäure	PFBA	C ₄ HO ₂ F ₇	375-22-4	kurzkettig
Perfluorpentansäure	PFPeA	C ₅ HO ₂ F ₉	2706-90-3	
Perfluorhexansäure	PFHxA	C ₆ HO ₂ F ₁₁	307-24-4	
Perfluorheptansäure	PFHpA	C ₇ HO ₂ F ₁₃	375-85-9	
Perfluoroctansäure	PFOA	C ₈ HO ₂ F ₁₅	335-67-1	langkettig
Perfluornonansäure	PFNA	C ₉ HO ₂ F ₁₇	375-95-1	
Perfluordecansäure	PFDA	C ₁₀ HO ₂ F ₁₉	335-76-2	
Perfluorbutansulfonsäure	PFBS	C ₄ HO ₃ F ₉ S	375-73-5	kurzkettig
Perfluorhexansulfonsäure	PFHxS	C ₆ HO ₃ F ₁₃ S	355-46-4	langkettig
Perfluorheptansulfonsäure	PFHpS	C ₇ HO ₃ F ₁₅ S	357-92-8	
Perfluoroctansulfonsäure	PFOS	C ₈ HO ₃ F ₁₇ S	1763-23-1	
6:2-Fluortelomersulfonsäure	6:2 FTSA (H4PFOS)	C ₈ H ₅ O ₃ F ₁₃ S	27619-97-2	kurzkettig
Perfluoroctansulfonamid	PFOSA	C ₈ H ₂ F ₁₇ NO ₂ S	754-91-6	langkettig

⁸ Sowohl für die Analytik in Wasserproben nach DIN 38407-42 als auch in Schlamm, Kompost und Boden nach DIN 38414-14 ist die Anwendbarkeit des jeweiligen Verfahrens auf weitere Substanzen nicht ausgeschlossen, ist jedoch im Einzelfall zu prüfen.

⁹ AFFF oder A3F ist die Abkürzung für Aqueous Film Forming Foam (deutsch etwa ‚wasserfilmbildendes Schaummittel‘)

¹⁰ PFOS-freies Handelsprodukt (DuPont), das in Feuerlöschmitteln eingesetzt wird; enthält Polyfluoralkylbetaine.

Mittlerweile liegt mit der ISO 21675:2019-10¹¹ eine Norm vor, die ein Verfahren für bis zu 30 Einzelsubstanzen liefert (Umfang vgl. Anhang IV).

4.2 Analysenverfahren

Die Analytik der per- und polyfluorierten Carbon- und Sulfonsäuren erfolgt in Trink-, Grund-, Oberflächen- und behandeltem Abwasser nach DIN 38407-42 (F42): „Bestimmung ausgewählter polyfluorierter Verbindungen (PFAS) in Wasser – Verfahren mittels Hochleistungs-Flüssigkeitschromatographie und massenspektrometrischer Detektion (HPLC-MS/MS) nach Fest-Flüssig-Extraktion“ (März 2011). Untersuchungsstellen/Labore geben Bestimmungsgrenzen in Bodeneluaten meist bei 5 bis 10 ng/l für Einzelverbindungen an, z.T. sind Bestimmungsgrenzen von 1 ng/l erreichbar.

Um das Potenzial von PFAS-Verunreinigungen in Materialien abzuschätzen, kann es erforderlich sein, Feststoffgehalte zu bestimmen. Im Gewässersediment, Klärschlamm, Kompost und Boden erfolgt die Bestimmung nach DIN 38414-14 (S14): „Bestimmung ausgewählter polyfluorierter Verbindungen (PFAS) in Schlamm, Kompost und Boden – Verfahren mittels Hochleistungs-Flüssigkeitschromatographie und massenspektrometrischer Detektion (HPLC-MS/MS)“ (August 2011). Die untere Anwendungsgrenze des Verfahrens wird mit 10 µg/kg angegeben. Derzeit werden Bestimmungsgrenzen je Einzelsubstanz von 1 bis 10 µg/kg, in Ausnahmen 0,1 µg/kg genannt. Für die Ermittlung der Hintergrundbelastung von Boden (ubiquitäre Belastung) ist eine untere Anwendungsgrenze von 0,1 µg/kg erforderlich.

Im Falle von Boden-/Gewässerverunreinigungen ist häufig nicht bekannt, welche fluororganischen Verbindungen enthalten sind und in welcher Konzentration diese vorliegen. Zahlreiche polyfluorierte Substanzen werden in der Umwelt durch meist oxidative Prozesse in stabilere PFAS-Verbindungen umgewandelt (z.B. PFOS, PFOA). Daher ist es für die Bewertung einer Belastungssituation entscheidend, neben den jeweiligen PFAS-Einzelsubstanzkonzentrationen auch zu bestimmen, welche Maximalkonzentrationen der stabilen PFASs sich aus dem jeweils vorliegenden PFAS-Gemisch bilden können. Bislang ist nur eine überschaubare Zahl von Verbindungen aus dieser Schadstoffgruppe als Referenzsubstanzen für die Analytik verfügbar und/oder mit den Routineverfahren erfassbar. Daher laufen aktuell mehrere Vorhaben zur Entwicklung von Summenparametern. Sie ermöglichen als Orientierungswerte eine erste Einschätzung von potenziellen Belastungen durch fluororganische Verbindungen. Hier sind zu nennen:

- AOF (adsorbierbares organisch gebundenes Fluor) für wässrige Proben: Es basiert auf der Anreicherung von fluororganischen Verbindungen an einer geeigneten Aktivkohle und der Bestimmung der adsorbierten Verbindungen nach Verbrennung als Fluorid. Die Bestimmungsgrenze liegt aktuell bei $\leq 2 \mu\text{g/l}$ (Entwurf DIN-Norm).
- EOF (extrahierbares organisch gebundenes Fluor) für Feststoffproben: Die Analytik erfolgt analog der AOF-Bestimmung nach einer vorausgegangenen Extraktion aus festen Proben. Die Bestimmungsgrenze liegt aktuell bei etwa $10 \mu\text{g/kg}$.
- TOP-Assay (Total Oxidizable Precursor): Vorläuferverbindungen werden im Eluat von Feststoffen, Bodenextrakten und in wässrigen Proben durch eine definierte Oxidation zu den persistenten Endstufen - v.a. perfluorierte Carbonsäuren - transformiert und sind damit analytisch erfassbar. Auch lassen sich die niedrigen Bestimmungsgrenzen der PFAS-Routineanalytik erreichen (i.d.R. $< 5\text{-}10 \text{ ng/l}$).

¹¹ ISO 21675:2019-10: Wasserbeschaffenheit - Bestimmung von polyfluorierten Alkylsubstanzen (PFAS) in Wasser - Verfahren mittels Flüssigkeitschromatographie/Tandem-Massenspektrometrie (LC-MS/MS) nach Festphasenextraktion.

Aufgrund der Vielzahl von unbekanntem PFAS-Verbindungen kann die Einzelsubstananalytik in bestimmten Fällen zu einer Unterschätzung des Risikopotentials führen. Ungeachtet noch laufender Normungsarbeiten liefern aber Summenparameter wertvolle zusätzliche Hinweise zu Höhe und räumlicher Verteilung von PFAS-Verunreinigungen in Boden und Wasser.

Für Untersuchungen nahe der Schadstoffquelle wird empfohlen, ergänzend zur Einzelsubstananalytik auch auf die summarischen Parameter AOF, EOF oder TOP-Assay zu analysieren¹². Bei der AOF-Analytik ist jedoch zu berücksichtigen, dass hohe Fluorid-Konzentrationen in der Wasserprobe die AOF-Analytik beeinflussen und dadurch zu überhöhten Messergebnissen und Fehlinterpretationen führen können. Durch den Vergleich der Ergebnisse für die bekannten Einzelsubstanzen mit denen der Summenparameter ergibt sich ein Hinweis auf die Höhe des Anteils unbekannter organischer Fluorverbindungen. Für Untersuchungen fern der Schadstoffquelle, z.B. im Trinkwasser, lässt die Einzelsubstananalytik auf die bekannten PFAS-Verbindungen i.d.R. eine Beurteilung der Belastungssituation zu. Dem liegt die Annahme zugrunde, dass bei polyfluorierten PFAS auf dem Weg von der Schadstoffquelle zwischenzeitlich eine Transformation zu analytisch nachweisbaren Verbindungen stattgefunden hat. Auch hier kann eine Analyse mittels Summenparameter Sicherheit bringen.

4.3 Herstellung von Eluaten zur Bodenuntersuchung

Für die Untersuchung von Bodenproben zur Beurteilung des Sickerwassers ist das Schüttelverfahren nach DIN 19 529 oder der Säulenschnelltest nach DIN 19528 mit einem Wasser-Feststoff (W/F) - Verhältnis von 2:1 anzuwenden.

Weiterhin sind nach DIN 19529:2015-12 die Untersuchungen an feldfrischen oder ggf. auch an getrockneten Proben durchzuführen. Zu beachten ist, dass sowohl das Elutionsverfahren als auch der Trocknungszustand zu deutlich unterschiedlichen Ergebnissen gerade bei der Untersuchung gering belasteter Böden führen kann, wie sie z.B. in Bodendauerbeobachtungsflächen vorliegen¹³. Dies ist bei einem Vergleich von Untersuchungsergebnissen zu berücksichtigen. Ein Trocknungsschritt führt daher zu einer besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse.

Es werden daher für eine bessere Vergleichbarkeit von Analysen-Ergebnissen in Anlehnung an die o.g. DIN die folgenden zusätzlichen Empfehlungen für die Probenvorbereitung gegeben:

- Trocknung der Probe bei max. 40°C bis zur Gewichtskonstanz (Ausnahme: sehr stark humose Böden mit > 8 % Humusanteil können nach Trocknung eine hohe Hydrophobizität aufweisen und sollten daher nur feldfrisch untersucht werden), der Wasserverlust durch Trocknung ist im Protokoll zu vermerken.
- Durchführung der Elution mit 250 g (TM) Boden in 1-l-PP-Flasche nach Abtrennung der Fraktion > 10 mm, der Gewichtsanteil ist im Protokoll zu vermerken und bei der Auswertung zu berücksichtigen.

¹² Die Kosten liegen bei ca. 200 EUR für AOF oder EOF und ca. 500 EUR für die Durchführung des TOP-Assays bei Privatlaboren (Abfrage10/2019)

¹³ Nach vorläufigen Ergebnissen vergleichender Untersuchungen der Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg und des DVGW-Technologiezentrum Wasser erzeugt das Säulungsverfahren auf Bodenproben ohne spezifische PFAS-Belastung i. d. R. deutlich höhere Eluatwerte als die Anwendung des Schüttelverfahrens (<https://pd.lubw.de/42387>). Außerdem können in getrockneten Proben bis zu ca. 10fach höhere PFAS-Konzentrationen im Eluat auftreten als bei feldfrischen Proben.

-
- Verzicht auf einen Filtrationsschritt nach der Zentrifugation, da insbesondere für Precursor Filtrationsverluste nachgewiesen wurden. Falls die Proben für eine Direktmessung zu trüb sind, kann gegebenenfalls eine Ultrazentrifugation durchgeführt werden (im Protokoll zu vermerken).
 - Bei stark humosen Böden mit > 8 % Humusanteil kann mit einem W/F-Verhältnis von 2:1 die für die Analytik erforderliche Menge an Eluat nicht erreicht werden, da der Boden das Wasser zu stark bindet. Hier kann ein W/F-Verhältnis von 10:1 verwendet werden (im Protokoll zu vermerken).

Abweichend vom vorstehend beschriebenen Verfahren werden im Bereich des Abfallrechts zur Prüfung einer Deponierbarkeit von Bodenmaterial Eluatuntersuchungen i.d.R. mit einem W/F-Verhältnis von 10:1 nach DIN EN12457-4:2003-1 durchgeführt. Soll für die Prüfung einer ggf. möglichen Verwertung dann keine zweite Analyse mit einem W/F-Verhältnis von 2:1 erfolgen, können hilfsweise die Ergebnisse der ersten Analyse mit dem Faktor 5 multipliziert werden. Voraussetzung dafür ist allerdings, dass diese deutlich, d.h. mindestens um den Faktor 2, oberhalb der Bestimmungsgrenze liegen, da sonst die Ungenauigkeit zu groß ist.

Wissenschaftlich gestützte Umrechnungsfaktoren liegen nicht vor. Insbesondere für langkettige PFAS kann der Umrechnungsfaktor in der Realität aufgrund von Sorptionseffekten auch geringer als 5 sein. Mit diesem Vorgehen wird aber eine ausreichende Sicherheit geschaffen, damit die höhere Verdünnung beim 10:1-Eluat nicht zu einer Unterschätzung der Belastung führt. Grundsätzlich belastbarer wären jedoch Doppeluntersuchungen, um den jeweils hinterlegten Beurteilungsmaßstäben gerecht zu werden.

Die chemische Analytik der Eluate/Perkolate erfolgt analog nach DIN 38407-42. Der Mindestumfang der Untersuchungsparameter auf PFAS umfasst die in der Tabelle 1 (Kap. 4.1) aufgeführten Stoffe. Die analytische Bestimmungsgrenze der PFAS im Eluat soll ≤ 10 ng/l betragen. In der Praxis liegen die von den Untersuchungsstellen/Laboren angegebenen Bestimmungsgrenzen in Bodeneluaten aktuell meist bei 5 bis 10 ng/l für Einzelverbindungen. Mit optimierten Verfahrensabläufen sind Bestimmungsgrenzen von 1 ng/l erreichbar.

5 Beurteilungskriterien und Anwendungshinweise

5.1 Wasser

5.1.1 Grundwasser

Die gemeinsame Kleingruppe der LAWA und der LABO hat anhand von Informationen zum Vorkommen und zur Verbreitung sowie aus Einzelfallberichten 13 PFAS als für das Grundwasser prioritär benannt¹⁴. Für sieben dieser Verbindungen konnte sie GFS-Werte auf der Grundlage humantoxikologischer Daten ableiten. Bei ihrer Überschreitung liegt gemäß der Anwendungsgrundsätze im LAWA-GFS-Bericht¹⁵ eine schädliche Veränderung der Grundwasserbeschaffenheit vor.

Die Trinkwasserkommission beim Umweltbundesamt hat die Datenlage als ausreichend bewertet, um die sieben abgeleiteten GFS-Werte auch als Leitwerte nach der Trinkwasserverordnung zu etablieren. Für weitere sechs PFAS hat die LAWA-LABO-Kleingruppe aufgrund der eingeschränkten Datenlage Gesundheitliche Orientierungswerte (GOW) angegeben (s. Tabelle 2).

Für nicht bewertete PFAS wird empfohlen, hilfsweise einen Wert von 0,1 µg/l je Einzelsubstanz - orientierend am ALARA-Prinzip (As Low As Reasonably Achievable) - zu verwenden.

Wenn im Grundwasser gleichzeitig mehrere PFAS auftreten, für die GFS-Werte festgelegt wurden, kann analog der Additionsregel der Technischen Regeln für Gefahrstoffe (TRGS 402) für die Risikobewertung solcher Stoffgemische zusätzlich die Quotientensumme (QS) herangezogen werden. Es bleibt den Ländern überlassen, diese anzuwenden. Bei Anwendung der QS wird die Konzentration einer Einzelverbindung durch den GFS-Wert geteilt und die Quotienten aufsummiert. Damit werden ähnliche Wirkungsmechanismen und mögliche additive Effekte auf die menschliche Gesundheit berücksichtigt.

$$\text{Quotientensumme} = \frac{PFC_1}{GFS_1} + \frac{PFC_2}{GFS_2} + \dots + \frac{PFC_n}{GFS_n}$$

Nicht zur Bildung der Quotientensumme herangezogen werden PFAS, für die Datenlage noch unzureichend ist und daher nur GOW-Werte vorliegen. Ebenfalls unberücksichtigt bleiben Analysenergebnisse unterhalb der Bestimmungsgrenze.

Wenn die Quotientensumme bei der Bewertung der Grundwasserbeschaffenheit den Wert 1 überschreitet, ist eine schädliche Grundwasserveränderung zu vermuten. Ob sich aus einer Überschreitung ein Handlungsbedarf (z.B. Sanierung) ergibt, hängt von den einzelfallspezifischen Umständen ab (z.B. Nutzung für Trinkwasserzwecke, Beregnungszwecke in der Landwirtschaft). Im Unterschied zu GFS-Werten haben GOW-Werte orientierenden Charakter, d.h. eine Überschreitung dieser für die Trinkwasserbewertung geltenden Werte deutet auf nachteilige Veränderung der Beschaffenheit des Grundwassers hin¹⁶. Diese Vorgehensweise gilt auch für PFAS, die nach dem ALARA-Prinzip bewertet werden.

¹⁴ LAWA (2017): Ableitung von Geringfügigkeitsschwellenwerten für das Grundwasser – PFAS. https://www.lawa.de/documents/03_anlage_3_bericht_gfs_fuer_PFAS_endfassung_22_11_2017_2_1552302208.pdf

PFAS-Datenblätter: https://www.lawa.de/documents/02_anlage_2_bericht_gfs_datenblaetter_2_1552302232.zip

¹⁵ LAWA (2016): Ableitung von Geringfügigkeitsschwellenwerten für das Grundwasser – Aktualisierte und überarbeitete Fassung 2016. https://www.lawa.de/documents/geringfuegigkeits_bericht_seite_001-028_1552302313.pdf

¹⁶ Bei Überschreitungen der GOW sind die Trinkwasserversorger gehalten, mittelfristig für eine Einhaltung dieser Werte zu sorgen.

Tabelle 2: GFS-Werte und GOW für PFAS im Grundwasser

Stoff	GFS-Werte* [µg/l]	GOW [µg/l]
Perfluorbutansäure, PFBA	10,0	
Perfluorpentansäure, PFPeA		3,0
Perfluorhexansäure, PFHxA	6,0	
Perfluorheptansäure, PFHpA		0,3
Perfluoroctansäure, PFOA	0,1	
Perfluornonansäure, PFNA	0,06	
Perfluordecansäure, PFDA		0,1
Perfluorbutansulfonsäure, PFBS	6,0	
Perfluorhexansulfonsäure, PFHxS	0,1	
Perfluorheptansulfonsäure, PFHpS		0,3
Perfluoroctansulfonsäure, PFOS	0,1	
6:2-Fluortelomersulfonsäure, 6:2 FTSA (H4PFOS)		0,1
Perfluoroctansulfonamid, PFOSA		0,1
Weitere PFAS mit R1-(CF2) <i>n</i> -R2, mit <i>n</i> >3		0,1

* Gelten gleichzeitig als Trinkwasserleitwerte nach Trinkwasserverordnung

5.1.2 Oberflächengewässer

Bei der Beurteilung von Oberflächengewässern und den Anforderungen an Einleitungen sind grundsätzlich zwei Betrachtungsebenen zu unterscheiden:

- a. Die Wasserkörperebene im Sinne des § 27 WHG (Bewirtschaftungsziele im Rahmen der Einleitungserlaubnis, bezogen auf die repräsentative Messstelle) und
- b. die lokale Ebene im Umfeld der Einleitungsstelle.

Zu a.) Wasserkörperebene

Nach § 27 Abs. 1 des Wasserhaushaltsgesetzes (WHG) sind oberirdische Gewässer so zu bewirtschaften, dass eine Verschlechterung ihres ökologischen und chemischen Zustands vermieden und ein guter ökologischer und chemischer Zustand erhalten oder erreicht wird. Für verschiedene Stoffe wurden zu diesem Zweck Umweltqualitätsnormen (UQN) festgelegt. PFOS wurde 2013 als bislang einziger Vertreter

der Schadstoffgruppe mit der UQN-Richtlinie 2013/39/EU in die EU-weite Liste der prioritären Stoffe aufgenommen. Insofern ist allein für PFOS die Betrachtung des gesamten Wasserkörpers bisher rechtlich vorgesehen. Bei der Wasserkörperebene steht die Bewertung des chemischen und ökologischen Zustands nach den Vorgaben der Oberflächengewässerverordnung (OGewV) im Vordergrund. Für PFOS ist die Einhaltung der UQN mit Bezug auf den Oberflächenwasserkörper (OWK) von Bedeutung. Ein OWK ist ein einheitlicher und bedeutender Abschnitt eines oberirdischen Gewässers (§ 3 Nummer 6 WHG). Zu den Bewirtschaftungszielen gehören das Verschlechterungsverbot und das Zielerreichungsgebot (§ 27 WHG). Maßgeblich ist die Bewertung an der für den jeweiligen OWK repräsentativen Messstelle.

Die UQN beträgt für Oberflächengewässer 9,1 µg/kg. Sie darf in Fischen (Biota) nicht überschritten werden. Dieser Wert wurde für das Schutzgut menschliche Gesundheit über den Fischkonsum abgeleitet. Der korrespondierende Wert für die Wasserphase beträgt 0,65 ng/l als Jahresdurchschnittswert (JD-UQN). Als zulässige Höchstkonzentration (ZHK-UQN) sind 36 µg/l (ZHK-UQN) festgelegt, abgeleitet aus einem Algentest. Die Einhaltung der UQN ist über ein Biota-Monitoring nachzuweisen. Nur wenn dies nicht möglich ist, kann alternativ die JD-UQN in der Wasserphase verwendet werden. Gleichzeitig ist die ZHK-UQN einzuhalten.

Diese Werte wurden in der Oberflächengewässerverordnung vom 20. Juni 2016 in deutsches Recht umgesetzt. Wird eine UQN in einem OWK überschritten, müssen geeignete Maßnahmen festgesetzt werden, um ihre Einhaltung bis zum 22. Dezember 2027 zu erreichen. Für PFOS wurde gemäß OGewV zum 22. Dezember 2018 ein Überwachungsprogramm sowie ein vorläufiges Maßnahmenprogramm aufgestellt.

Als prioritärer Schadstoff mit ubiquitärer Verbreitung sind für PFOS bei der Zulassung von Abwassereinleitungen oder der Wiedereinleitung von (gereinigtem) Grundwasser in ein Oberflächengewässer die Auswirkungen auf den Wasserkörper unter Berücksichtigung des Verschlechterungsverbots und des Zielerreichungsgebots zu prüfen.

Verschlechterungsverbot

Eine Verschlechterung des chemischen Zustands eines OWK tritt grundsätzlich dann ein, wenn infolge eines Vorhabens die UQN für einen Stoff nach Anlage 8 zur OGewV überschritten wird. Liegt in dem betroffenen OWK bereits vor diesem Vorhaben eine Überschreitung der UQN vor, liegt bei jeder weiteren Einleitung (des jeweiligen Stoffes) eine Verschlechterung vor, wenn diese zu einer Erhöhung¹⁷ der Konzentration an der repräsentativen Messstelle führt. Wenn eine Verschlechterung festzustellen oder zu prognostizieren ist, kann ein Vorhaben dennoch zugelassen werden, wenn die Voraussetzungen für eine Ausnahme gem. § 31 Absatz 2 WHG gegeben sind¹⁸.

Kurzzeitige Verschlechterungen können aus Gründen der Verhältnismäßigkeit außer Betracht bleiben, wenn mit Sicherheit davon auszugehen ist, dass sich der bisherige Zustand nach Ende der Einleitung kurzfristig wiederinstellt. Dies kann beispielsweise bei zeitlich befristeten, kurzzeitigen Einleitungen im Rahmen einer Baumaßnahme gegeben sein.

Zielerreichungsgebot

Ebenfalls nur für PFOS ist darüber hinaus im Falle einer bestehenden Überschreitung der UQN im OWK gemäß § 27 Abs.1 Nr. 2 WHG auch das Zielerreichungsgebot zu beachten. Für die einzelne Einleitung bedeutet dies, dass im Rahmen des Erlaubnisverfahrens zu prüfen ist, ob im Falle einer bestehenden

¹⁷ Konzentrationserhöhungen, die rechnerisch, aber nicht messtechnisch erfassbar sind, gelten nicht als Verschlechterung

¹⁸ LAWA-AR Handlungsempfehlung Verschlechterungsverbot (Beschluss 153. LAWA-VV 16./17. 03 2017; unveröffentlicht)

Überschreitung der UQN eine Frachtverringerung möglich ist. Bei der Frage, ob das Zielerreichungsgebot eingehalten wird, ist auch zu berücksichtigen, ob im Bewirtschaftungsplan für den betreffenden OWK Fristverlängerung, abweichende Bewirtschaftungsziele oder Ausnahmen (§§ 29, 30 und 31 WHG) festgelegt worden sind. Bei der Zulassung des einzelnen Vorhabens ist darauf zu achten, dass die Zielerreichung insgesamt für den Wasserkörper nicht unmöglich wird (weitere Erläuterungen s. Anhang II.3.2).

Zu b.) lokale Ebene

Bei der lokalen Ebene im Sinne des § 57 Absatz 1 Nummer 2 WHG geht es um die Eigenschaften bestimmter Gewässerabschnitte im Bereich der Einleitungsstelle (nach Vermischung). Auf dieser Ebene sind auch die Auswirkungen anderer PFAS im Gewässer zu berücksichtigen. Die Betrachtung der lokalen Ebene ist im Abschnitt 5.1.3.2 „Weitergehende immissionsseitige Anforderungen“ beschrieben.

5.1.3 Abwasser

5.1.3.1 Emissionsbezogene Anforderungen

§ 57 Absatz 1 Nummer 1 WHG fordert, bei Abwassereinleitungen die eingeleitete Schadstofffracht nach dem Stand der Technik (§ 3 Nummer 11 WHG) zu minimieren. PFAS werden i.d.R. nicht spezifisch im Abwasser direkteinleitender Betriebe oder kommunaler Kläranlagen erfasst.

Die Summenparameter CSB und TOC sind für PFAS nicht aussagekräftig, da nur abbaubare organische Fluorverbindungen erfasst werden. Diese treten nur in vergleichsweise geringen Konzentrationen auf. Bislang wurde noch kein branchenbezogener Grenzwert für PFAS als Stand der Technik festgelegt. Stoffspezifische Regelungen sind in den allgemeinen Anforderungen des Teils B der AbwV aufgeführt (z.B. Verzicht auf oder Minimierung von bestimmte/n Einsatzstoffe/n).

In den seit 2016 novellierten branchenspezifischen Anhängen der AbwV wird die PFAS-Problematik angegangen. So werden z. B. im Anhang 28 *Herstellung Papier und Pappe Teil B Allgemeine Anforderungen* Verichts- und Minimierungsanforderungen gestellt. Dies ist ein erster Schritt, um auch europaweit zu einer Lösung zu kommen.

Diese Minimierungsanforderungen gelten auch für Indirekteinleiter, allerdings nur dann, wenn im Anhang Anforderungen für den Ort des Anfalls (Teil E) oder vor Vermischung (Teil D) gestellt werden. Das Verfahren (DIN 38407-42, Ausgabe März 2011) zur Bestimmung von PFAS bei Abwasseruntersuchungen ist in der Anlage 1 zu § 4 AbwV (Analysen- und Messverfahren) aufgeführt (siehe auch Kapitel 4.2).

5.1.3.2 Weitergehende immissionsseitige Anforderungen

§ 57 Absatz 1 Nummer 2 WHG fordert bei Erteilung einer Erlaubnis zur Abwassereinleitung die Berücksichtigung der Anforderungen an die Gewässereigenschaften, also eine Prognose und Beurteilung der Auswirkungen auf das Gewässer infolge der Einleitung. Deshalb sind PFAS-Einträge, wenn sie sich nicht gänzlich vermeiden lassen, soweit zu begrenzen, dass die prognostizierten PFAS-Konzentrationen im Gewässer nach Durchmischung mit dem Abwasser über die bereits geprüften Anforderungen nach § 27 WHG hinaus keine schädlichen Gewässerveränderungen an der Einleitungsstelle hervorrufen.

Dabei ist nicht nur die Einleitung, sondern auch eine ggf. vorhandene PFAS-Vorbelastung des Gewässers zu betrachten. Ferner sind mögliche Beeinträchtigungen des Grundwassers (z. B. bei erheblicher Infiltration von Oberflächenwasser ins Grundwasser) oder Auswirkungen auf die Trinkwassernutzung (z. B. bei Verwendung von Uferfiltrat) bei der Begrenzung der Einträge in Oberflächengewässer zu berücksichtigen.

Für eine auf den Schutz der aquatischen Lebensgemeinschaft bezogene ökotoxikologische Bewertung (auf lokaler Ebene) können im Rahmen einer Einleiterlaubnis für PFAS die Konzentrationswerte der JD-UQN in der Wasserphase (liegt aktuell nur für PFOS vor) oder PNEC (Predicted No Effect Concentration)-Werte orientierend herangezogen werden. Letztere werden im Allgemeinen ausschließlich bezogen auf den Schutz der aquatischen Lebensgemeinschaft anhand ökotoxikologischer Daten abgeleitet (PNEC_{aquat}). Von den zu prüfenden Parametern nach diesem Leitfaden stehen aktuell nur PNEC_{aquat}-Werte für vier kurzkettige PFAS zur Verfügung.

Die Prüfung wird aufgrund der relativ hohen PNEC-Werte im Regelfall ergeben, dass die aquatische Lebensgemeinschaft hinreichend geschützt ist. Jedoch berücksichtigen die PNEC-Werte im Gegensatz zu den UQN für PFOS weder den Schutz fischfressender Tiere („secondary poisoning“) noch den menschlichen Fischverzehr oder die mögliche Beeinflussung des Grundwassers als Trinkwasserressource. Weitere Erläuterungen dazu s. Anhang II.1 und II.3.

Aus Vorsorgegründen können daher bei Abwassereinleitungen wegen der hohen Persistenz und Mobilität der PFAS andere als ökotoxikologische Beurteilungskriterien (z.B. secondary poisoning, Humantoxikologie) vorrangig sein und weitergehende Minimierungsmaßnahmen erfordern.

Außerdem sind nach REACH bereits mehrere PFAS als besonders besorgniserregende Stoffe (sog. SVHC) eingestuft, für die keine PNEC-Werte festgelegt werden können (siehe Anhang II.1)¹⁹. Für derartige Verbindungen sollen im Geltungsbereich von REACH grundsätzlich Minimierungsmaßnahmen angestrebt werden.

Im Einzelfall ist bei Einleitungen zu beachten, dass Menge und Schädlichkeit des Abwassers so geringgehalten werden, wie dies bei Einhaltung der jeweils in Betracht kommenden Verfahren nach dem Stand der Technik möglich ist. Wesentliche Kriterien bei zusätzlichen Anforderungen sind nicht allein die Höhe der Konzentration im Abwasser, sondern auch die erreichbare Frachtreduzierung, der erforderliche Aufwand und die örtlichen Rahmenbedingungen. Bei der Priorisierung von ggf. erforderlichen Maßnahmen wird empfohlen, nach der Höhe der Summe der im gereinigten Abwasser nachgewiesenen PFAS vorzugehen. Auf die Beispiele im Anhang IV.2 und IV.3 und die dort verwendeten Orientierungswerte wird hingewiesen.

Für PFOS gelten zusätzlich die Ausführungen unter 5.1.2. Dabei ist zu beachten, dass die UQN nicht an der Einleitungsstelle, sondern an der für den jeweiligen OWK repräsentativen Messstelle einzuhalten ist.

Die Entscheidung über eine Einleitungserlaubnis ist im Falle von nicht rechtsverbindlich festgelegten Immissionswerten auf der Grundlage von § 12 WHG im pflichtgemäßen Ermessen zu treffen.

Auch die Überschreitung nicht rechtsverbindlich festgelegter Immissionswerte (z. B. PNEC) kann im Einzelfall nach entsprechender Prüfung und Begründung eventuell sogar eine schädliche Gewässerveränderung bedeuten. In diesem Fall muss die Erlaubnis versagt werden. Das fällt nicht unter das Bewirtschaftungsermessen.

¹⁹ Als SVHC (Substances of very high concern) werden z.B. Stoffe eingestuft, die gleichzeitig persistent, bioakkumulierend und toxisch (PBT) oder sehr persistent und sehr hoch bioakkumulierend (vPvB) sind, Aufgrund dieser Kombination von Eigenschaften lassen sich keine langfristig „sicheren“ Konzentrationen in der Umwelt ableiten.

5.1.3.3 Abschätzung der Gewässerbelastung durch rechnerische Ermittlung

Um die zusätzliche Belastung für das Gewässer abzuschätzen, wird empfohlen für die Abschätzung der prognostizierten PFAS-Konzentrationen im Gewässer in der Regel den mittleren Niedrigwasserabfluss (MNQ) des betroffenen Gewässers anzusetzen.

Für die rechnerische Ermittlung der durch eine punktuelle Einleitung verursachten Immissionskonzentration C_{im} im Gewässer gilt folgende Gleichung:

$$C_{im} = \frac{MNQ \times C_{HG} + A_{Abw} \times C_{Abw}}{MNQ + A_{Abw}}$$

mit:

C_{im} = Immissionskonzentration

MNQ = Mittlerer Niedrigwasserabfluss oberhalb der Einleitungsstelle (Volumen/Zeit)

C_{HG} = Hintergrundkonzentration (Masse/Volumen)

A_{Abw} = Abwasserfluss (Volumen/Zeit)

C_{Abw} = Stoffkonzentration im Abwasser (Masse/Volumen)

Siehe dazu Beispiele in Anhang IV.2 und IV.3.

5.2 Klärschlamm / Düngemittel

In der Klärschlammverordnung vom September 2017 (zuletzt geändert Juni 2020) ist mittelbar ein Grenzwert für PFAS für die bodenbezogene Verwertung von Klärschlamm durch Querverweis auf die Düngemittelverordnung vom Dezember 2012 (zuletzt geändert Oktober 2019) festgelegt. Diese legt generell sowohl für Ausgangsstoffe von Düngemitteln als auch für das Düngemittel selbst einen Grenzwert von 100 µg/kg für die Summe aus PFOS und PFOA fest; ab 50 µg/kg besteht eine Kennzeichnungspflicht.

Der 2008 eingeführte Grenzwert ist so hoch bemessen, dass selbst bei dessen Einhaltung eine Ausbringung u.U. zu einer Überschreitung der GFS-Werte im Grundwasser (s. Tabelle 2) führen kann. Erschwerend kommt hinzu, dass die im Klärschlamm vorhandenen Vorläuferverbindungen außer Acht bleiben. Aus Vorsorgegründen wäre es daher angebracht, den Wert im Zuge einer Novellierung der DüMV baldmöglichst nach unten anzupassen. Dafür spricht auch die deutliche Absenkung der bisher von der EFSA empfohlenen maximalen Aufnahmemengen über Lebensmittel. Darüber hinaus sollte ein PFAS-Summengrenzwert nicht auf die zwei Substanzen beschränkt sein, sondern zumindest die in Tabelle 2 aufgeführten Vertreter oder aber die gesamte Stoffgruppe berücksichtigen.

5.3 Boden - Wirkungspfadbezogene Gefahrenbeurteilung

5.3.1 Wirkungspfad Boden-Grundwasser

Bei der Bewertung von PFAS im Rahmen der Gefahrenabwehr (Nachsorge) hat sich der Wirkungspfad Boden-Grundwasser als der vorrangig relevante Wirkungspfad erwiesen (unbeschadet der Einzelfallbetrachtung). Ungeachtet der noch bestehenden Unsicherheiten hinsichtlich ihres Umweltverhaltens insbesondere in der Bodenmatrix, wird die Konzentration der Stoffe im Sickerwasser am Ort der Beurteilung auf Grundlage der Untersuchung von Bodeneluat abgeschätzt (Sickerwasserprognose, bestehend aus Materialuntersuchungen und Transportprognose).

Es wird empfohlen, diese Materialuntersuchungen mittels repräsentativer Proben²⁰ aus der ungesättigten Bodenzone (Ort der Probenahme) über Elutions- oder Perkolationsversuche mit einem W/F-Verhältnis von 2:1 durchzuführen. Zur Beurteilung des Schadstoffpotenzials sollten – soweit analytisch möglich – Ergebnisse von Feststoffanalysen hinzugezogen werden.

Verschiedene Schadensfälle haben gezeigt, dass auch Vorläuferverbindungen vorhanden sein können. Deren Transformationspotenzial ist häufig nur schwer einschätzbar. Dennoch sind solche PFAS-Verbindungen bei der Gefährdungsabschätzung zu berücksichtigen. Hierzu können die in Kapitel 4 beschriebenen Summenparameter Hinweise geben.

Solange rechtlich verbindliche Prüfwerte für PFAS nicht in Kraft sind, gelten die GFS-Werte für PFAS (Tabelle 2) als Prüfwertvorschläge für Sickerwasser am Ort der Beurteilung²¹. Die Quotientensumme wird zur Beurteilung des Wirkungspfades Boden-Grundwasser nicht zusätzlich herangezogen, da sie eine vorsorgende Risikobewertung von Stoffgemischen bei Beurteilung der Trinkwasserbeschaffenheit darstellt. Für bisher nicht bewertete PFAS soll – orientierend am ALARA-Prinzip – hilfsweise der Wert 0,1 µg/l je Einzelsubstanz als Prüfwertvorschlag verwendet werden. Dieser Wert kann wie die GOW zunächst orientierend zur Bewertung herangezogen werden. Eine Überschreitung des Prüfwertvorschlags führt nicht zur unmittelbaren Gefahrenfeststellung, sondern bewirkt eine weitere Prüfung. Bei dieser Prüfung werden dann sowohl Konzentrationen und Frachten als auch mögliche Metaboliten und persistente Abbauprodukte berücksichtigt.

Bei Überschreitung einer dieser Prüfwertvorschläge im Eluat bereits am Ort der Probenahme, soll durch eine Transportprognose (verbalargumentativ oder ggf. mit Unterstützung durch Softwaretools z.B. SIWA-SP oder ALTEX-1D) abgeschätzt werden, ob dies auch für die Konzentration der PFAS im Sickerwasser am Ort der Beurteilung (Übergang von der ungesättigten in die gesättigte Bodenzone) zu erwarten ist. Hierfür werden neben Eluatuntersuchungen ggf. auch Feststoffuntersuchungen benötigt.

Bei der Transportprognose ist zu beachten, dass der Rückhalt von kurzkettingen PFAS in der ungesättigten Bodenzone im Vergleich zu langkettingen PFAS geringer ist. Zudem sind dabei die einzelfallbezogenen Standortbedingungen wie z.B. Art (Geologie) und Mächtigkeit der Sickerstrecke sowie das Gefährdungspotenzial von Vorläuferverbindungen zu berücksichtigen.

Bei den langkettingen und damit weniger mobilen PFAS (z.B. PFNA, PFDA oder PFOS) und bei den Vorläuferverbindungen ist - soweit möglich - im Rahmen einer Transportprognose die Rückhaltewirkung bzw.

²⁰ Siehe Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung in der geltenden Fassung, Anhang 1, Anforderungen an die Probenahme

²¹ In der geplanten Neufassung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung sind die GFS-Werte der sieben PFAS der Tabelle 2 (Kap. 5.1.1) als Prüfwerte vorgesehen - <http://dip21.bundestag.de/dip21/btd/18/122/1812213.pdf>

bei den Vorläuferverbindungen die Abbaukinetik im Bereich der Quelle und auf der Sickerstrecke zu berücksichtigen.

Unterschreitet die prognostizierte Konzentration am Ort der Beurteilung den Prüfwertvorschlag, ist der Gefahrenverdacht in Bezug auf die erfassten Stoffe ausgeräumt.

Überschreitet die prognostizierte Konzentration am Ort der Beurteilung die Prüfwertvorschläge, sind nach § 9 Absatz 2 BBodSchG wegen des hinreichenden Verdachts auf eine schädliche Bodenveränderung oder Altlast weitere Sachverhaltsermittlungen durchzuführen. Für eine Bewertung kann bei geeigneten hydrogeologischen Randbedingungen ergänzend die Einmischung des Sickerwassers in ein begrenztes Grundwasservolumen berücksichtigt werden. Die Beurteilung des Grundwassers nach der Einmischung ist gemäß Kapitel 5.1.1 durchzuführen.

5.3.2 Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze

Pflanzen können PFAS aus dem Boden oder aus dem Beregnungswasser aufnehmen und in verschiedene Pflanzenteile (Blätter, Korn) transportieren²². Grundsätzlich werden kurzkettige Verbindungen (z.B. PFBA, PFPeA oder PFHxA) eher aufgenommen als langkettige (z.B. PFOA, PFOS). Es gibt jedoch auch Hinweise, dass bei Abwesenheit kurzkettiger PFAS auch eine Aufnahme langkettiger PFAS, insbesondere PFOA, in die Pflanze, und teilweise auch ins Korn, erfolgt. Darüber hinaus unterscheiden sich Aufnahmekapazität und Verlagerungsverhalten in die Pflanzenorgane in Abhängigkeit von der Pflanzenart:

- Vor allem in die grünen Pflanzenteile und in Pflanzen mit einem hohen Wasserbedarf (z.B. Gemüse, Sojabohnen und Weizen) werden insbesondere kurzkettige PFAS eingelagert. Langkettige PFAS reichern sich dagegen eher in den Wurzeln an²³.
- Während bei Körnermais, Winterraps und Sommergerste nur vereinzelt ein Übergang ins Ernteprodukt Korn festgestellt wurde, erfolgt bei Sojabohne und Winterweizen ein erhöhter Transfer.

Die Aufnahme von PFAS in Pflanzen hängt sowohl von den Gehalten im Boden oder dem Beregnungswasser als auch von den Eigenschaften der jeweiligen Verbindungen (u.a. Kettenlänge, Verzweigungsgrad, funktionelle Gruppen) sowie von der Pflanzenart ab. Darüber hinaus ist davon auszugehen, dass die Aufnahme insbesondere von der Bodenart, der organischen Substanz im Boden und dem pH-Wert des Bodens beeinflusst wird.

Der Bedarf für Prüfwerte für den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze ist gegeben, die Datengrundlage zur Berechnung von Transferfaktoren ist aber noch nicht ausreichend, so dass noch keine Prüfwertvorschläge abgeleitet werden können.

Auf PFAS-verunreinigten, landwirtschaftlich genutzten Flächen empfiehlt sich deshalb ein Vor-Ernte-Monitoring²⁴ aus Gründen des vorsorgenden Verbraucherschutzes, sofern der Verbraucherschutz nicht eindeutig geklärt ist (siehe Anhang IV.1). Darüber hinaus sollte in Verdachtsfällen das ggf. zur Bewässerung genutzte Wasser untersucht werden, um PFAS-Einträge zu vermeiden.

²² Stahl, T., Heyn, J., Thiele, H., Hüther, J., Failing, K., Georgii, S., Brunn, H. (2009): Carryover of perfluorooctanoic acid (PFOA) and perfluorooctane sulfonate (PFOS) from soil to plants. Arch. Environ. Contam. Toxicol. 57, 289–298

²³ Felizeter, S., McLachlan, M.S., De Voogt, P. (2014): Root uptake and translocation of perfluorinated alkyl acids by three hydroponically grown crops. J. Agric. Food Chem. 62, 3334–3342

²⁴ Zum Vor-Ernte-Monitoring siehe Homepage der Stabsstelle PFAS beim Regierungspräsidium Karlsruhe: <https://rp.baden-wuerttemberg.de/rpk/Abt5/Ref541/PFAS/Seiten/Landwirtschaft.aspx>

Auch Wildpflanzen können PFAS aus dem Boden aufnehmen und in essbaren Pflanzenteilen oder Nektar anreichern. Dadurch kann z.B. Honig stark belastet sein. Gerade bei einer spezifischen und großflächigen Verunreinigung von Bodenmaterial mit kurzkettigen PFAS wird empfohlen, diesen Aspekt zu berücksichtigen.

5.3.3 Wirkungspfad Boden-Mensch (direkter Kontakt)

Die Bewertung von Bodenverunreinigungen hinsichtlich des Wirkungspfad Boden-Mensch (direkter Kontakt) erfolgt vor allem anhand von Prüfwerten nach Anhang 2 BBodSchV. Entsprechende Werte für PFAS sind in der Neufassung der BBodSchV allerdings nicht enthalten, sondern nur Prüfwerte für den Pfad Boden-Grundwasser.

Die Systematik zur Ableitung von Prüfwerten wurde im Bundesanzeiger 51, Nummer 161a, vom 28.08.1999 veröffentlicht²⁵. Würde man Werte nach dieser Systematik für PFAS ableiten, ergäben sich Werte in einer Größenordnung, die bislang in der Realität kaum nachgewiesen werden. Der Pfad Boden-Mensch (direkter Kontakt) ist somit i.d.R. in der Nachsorge im Gegensatz zum Pfad Boden-Grundwasser weniger relevant²⁶. Letzterer ist - bezogen auf PFAS - im Allgemeinen (unbeschadet der Einzelfallbetrachtung) der sensiblere Wirkungspfad. Im Rahmen der abschließenden Gefährdungsabschätzung sind lediglich die relevanten Wirkungspfade zu betrachten.

²⁵ https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/iab/dateien/ableitung_der_pr_f- und_ma_nahmenwerte.pdf

²⁶ Mit der neuen EFSA-Bewertung (vgl. Kap. 3) hat die Bedeutung des Pfades Boden-Mensch zugenommen.

6 Umgang mit PFAS-haltigem Bodenmaterial

6.1 Allgemeines

Bei Bau- oder Sanierungsmaßnahmen kann PFAS-verunreinigtes Bodenmaterial anfallen, insbesondere aus dem Bereich von Verdachtsflächen, schädlichen Bodenveränderungen oder Altlasten, aber auch aufgrund einer diffusen Hintergrundbelastung. Wenn das ausgehobene Material überschüssig ist (Entledigungswille) oder auf Grund der Verunreinigung mit PFAS (inkl. möglicher Vorläuferverbindungen) am Ort der Entstehung nicht wiederverwendet werden darf (Entledigungspflicht), handelt es sich um Abfall, der ordnungsgemäß und schadlos zu verwerten oder zu beseitigen ist. Bei der Verwertung darf es zu keiner Schadstoffanreicherung im Stoffkreislauf kommen.

Das Vermeiden von als Abfall anfallendem Bodenmaterial hat Vorrang vor der Verwertung und Beseitigung. Durch verbindliche Vorgaben z. B. im Zuge der Bauleitplanung (Flächennutzungs- und Bebauungsplan) lässt sich überschüssiges Bodenmaterial oft vermeiden oder wenigstens minimieren. Die notwendigen Schritte für die Wiederverwendung oder Entsorgung können so bereits im Vorfeld einheitlich geregelt werden.

Sofern im Einzelfall das Bodenmaterial Korngrößenabhängig unterschiedlich belastet ist, empfiehlt es sich, die hochbelasteten von nicht bzw. wenig belasteten PFAS-haltigen Fraktionen zu trennen, um damit das zur Beseitigung anstehende Bodenvolumen zu reduzieren. Voraussetzung dafür ist die Entwicklung praktikabler technischer Verfahren zur Vorbehandlung von PFAS-verunreinigtem Bodenmaterial.

Bei der Verwertung von Bodenmaterial ist eine Unterschreitung der Gefahrenschwelle erforderlich. Die Gefahrenschwelle für den Wirkungspfad Boden-Grundwasser entspricht den GFS-Werten im Sickerwasser beim Eintritt in das Grundwasser (Ort der Beurteilung). Die GOW-Werte werden aufgrund der fehlenden humantoxikologischen Kenntnislage orientierend herangezogen. Eine sichere Unterschreitung der Gefahrenschwelle (GFS am Ort der Beurteilung) ist dann gewährleistet, wenn das Eluat im Bodenmaterial die GFS- und die GOW-Werte einhält (Tabellen 3 a/b).

Generelle Anforderungen an die Schadlosigkeit der Verwertung von Bodenmaterial werden für verschiedene Einbauklassen z. B. im Allgemeinen Teil (Teil I) der LAGA-Mitteilung 20 „Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Abfällen - Technische Regeln - Allgemeiner Teil“ dargestellt. Diese Einbauklassen berücksichtigen Zuordnungswerte sowohl im Feststoff als auch im Eluat.

Bodenmaterial aus Gebieten ohne Hinweise und/oder Anhaltspunkte auf PFAS-Verunreinigungen kann in der Regel mit Blick auf die Schadstoffgruppe PFAS uneingeschränkt verwertet werden, sofern nicht anderweitige Verunreinigungen dagegensprechen. Bei Bodenmaterial aus Gebieten mit Hinweisen und/oder Anhaltspunkten auf PFAS-Verunreinigungen ist in der Regel eine analytische Untersuchung durchzuführen. Eintragswege für PFAS, durch die sich ein PFAS-Verdacht ergibt, sind im Anhang I aufgeführt.

Bisher liegen keine Zuordnungswerte für PFAS vor, so dass bei der Verwertung PFAS-haltigen Bodenmaterials die Einteilung über die Eluatwerte in drei Verwertungskategorien (VK) erfolgt.

- VK 1 = Uneingeschränkter offener Einbau
- VK 2 = Eingeschränkter offener Einbau in Gebieten mit erhöhten PFAS-Gehalten
- VK 3 = Eingeschränkter Einbau in technischen Bauwerken mit definierten Sicherungsmaßnahmen

Bodenmaterial der VK 1 kann uneingeschränkt - im offenen Einbau außerhalb und innerhalb von technischen Bauwerken - verwertet werden (s. Kapitel 6.2).

Bodenmaterial der VK 2 kann nur innerhalb von Gebieten mit erhöhten PFAS-Gehalten unter Beachtung bestimmter Randbedingungen auf/in einer durchwurzelbaren Bodenschicht, in bodenähnlichen Anwendungen sowie in diesen Gebieten auch in technischen Bauwerken verwertet werden.

Bodenmaterial der VK 3 kann ausschließlich in technischen Bauwerken mit Sicherungsmaßnahmen verwertet werden.

Beim Einbau von Bodenmaterial der VK 2 oder VK 3 muss der Abstand zum höchsten zu erwartenden Grundwasserstand mindestens 1,0 m zuzüglich eines Sicherheitsabstandes von 0,5 m betragen.

PFAS-verunreinigtes Bodenmaterial der VK 1 und VK 2 soll grundsätzlich entsprechend seiner Einstufung nur auf Flächen umgelagert und verwertet werden, die die gleiche oder eine höhere Einstufung (siehe Tabellen 3 a/b) aufweisen. Eine Gefahr für das Grundwasser bzw. andere Gefährdungen dürfen nicht zu besorgen sein. Wenn eine Behandlung von PFAS-verunreinigten Bodenmaterial erforderlich ist, sollte diese in dafür ausgelegten Anlagen erfolgen. Damit soll eine Verschleppung der PFAS-Verunreinigungen vermieden werden. Unabhängig davon besteht die Möglichkeit der Verwertung von PFAS-haltigem Bodenmaterial in technischen Bauwerken (s. Kapitel 6.3).

In den nachstehenden Gebieten soll kein Bodenmaterial verwertet werden, welches die Zuordnungswerte der VK 1 überschreitet:

- Festgesetzte, vorläufig sichergestellte oder fachbehördlich geplante Wasserschutzgebiete (Zone I bis III B);
- Heilquellenschutzgebiete;
- Wasservorranggebiete, die im Interesse der Sicherung der künftigen Wasserversorgung raumordnerisch ausgewiesen worden sind;
- Gebiete mit häufigen Überschwemmungen, z. B. Hochwasserrückhaltebecken, Flussaue und Außendeichflächen.

Weitere wasserwirtschaftliche Kriterien (zum Beispiel die Lage zu Trinkwasserschutzgebieten und Oberflächengewässern) und hydrogeologischen Standortbedingungen sind insbesondere im Hinblick auf die Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung zu berücksichtigen.

Tabelle 3 a: Vorläufige maximal zulässige Konzentrationen im W/F 2:1-Eluat in µg/l für die entsprechenden Verwertungskategorien (GFS-basierte Werte)

	VK 1 Uneingeschränkter offener Einbau	VK 2 Eingeschränkter offener Einbau in Gebieten mit erhöhten PFAS-Gehalten (* siehe Erläuterungen)	VK 3 Eingeschränkter Einbau in technischen Bauwerken mit definierten Sicherungsmaßnahmen
Perfluorbutansäure, PFBA	≤ 10,0	≤ 20,0	≤ 50
Perfluorhexansäure, PFHxA	≤ 6,0	≤ 12,0	≤ 30
Perfluoroktansäure, PFOA	≤ 0,1	≤ 0,2	≤ 1
Perfluormonansäure, PFNA	≤ 0,06	≤ 0,12	≤ 0,6
Perfluorbutansulfonsäure, PFBS	≤ 6,0	≤ 12,0	≤ 30
Perfluorhexansulfonsäure, PFHxS	≤ 0,1	≤ 0,2	≤ 1
Perfluoroktansulfonsäure, PFOS	≤ 0,1	≤ 0,2	≤ 1

Erläuterungen zu Tabelle 3 a:

Angesichts der unzureichenden Datenlage zur Ableitung von Feststoffwerten wird empfohlen, vorerst für die Beurteilung einer Verwertbarkeit von Bodenmaterial die Werte der Tabelle 3 a zu verwenden. Abweichungen sind als länderspezifische Regelungen möglich. Dies gilt auch für die Anwendung der Quotientensumme (vgl. Kapitel 5.1.1). Sobald Hintergrundwerte auf Basis von Feststoffgehalten (FG) vorliegen und die Analytik es zulässt, sind die hilfsweisen, vorläufigen Anforderungen in Form von Eluatwerten durch FG in Kombination mit Eluatwerten abzulösen.

- VK 1:** Bei der uneingeschränkten offenen Verwertung von Bodenmaterial darf das Entstehen einer schädlichen Bodenveränderung nicht zu besorgen sein. Bodenmaterial kann auf oder in die durchwurzelbare Bodenschicht auf- oder eingebracht oder in bodenähnliche Anwendungen bzw. in technische Bauwerke eingebracht werden, wenn die verwendeten Eluatgehalte in Höhe der in der Tabelle 3 a angegebenen GFS-Werte nicht überschritten werden. Diese Werte orientieren sich an den Werten, die das Grundwasser ausreichend schützen.
- VK 2:** Eine eingeschränkte offene Verwertung ist unter bestimmten Bedingungen möglich (*):
In Gebieten mit erhöhten PFAS-Gehalten (nach §12 Absatz 10 BBodSchV bzw. nach § 6 Abs. 4 der neu gefassten BBodSchV) kann anfallendes Bodenmaterial der VK 2 bis zu den doppelten GFS-Werten im Eluat innerhalb dieser Gebiete im eingeschränkten offenen Einbau verwertet werden, wenn einzelfallspezifisch nachgewiesen ist, dass eine ordnungsgemäße und schadlose Verwertung erfolgt. Dabei sind die Standortverhältnisse, insbesondere die geologischen und hydrogeologischen Bedingungen, die natürlichen Bodenfunktionen des Untergrundes und der Umgebung sowie etwa bereits vorhandene PFAS-Gehalte zu berücksichtigen. Die Situation am Ort der Verwertung darf nicht verschlechtert werden. Der Abstand zum höchsten zu erwartenden Grundwasserstand muss mindestens 1,0 m zuzüglich eines Sicherheitsabstandes von 0,5 m betragen.
Unter diesen Bedingungen kann die für die Zulassung des Auf- und Einbringens von Bodenmaterial zuständige Behörde im Einvernehmen mit der für den Bodenschutz zuständigen Behörde das Auf- oder Einbringen von PFAS-haltigem Bodenmaterial gestatten. Es wird empfohlen, die zuständige Wasserbehörde zu beteiligen. Diese Regelungen sind nicht möglich in Wasserschutzgebieten (Zone I bis III B), Heilquellenschutzgebieten, Wasservorranggebieten und Gebieten mit häufigen Überschwemmungen.
- VK 3:** Bei der Ableitung der Werte für die Verwertung in technischen Bauwerken mit definierten Sicherungsmaßnahmen der VK 3 wurde die Mobilität kurzketziger Verbindungen (Anwendung des Faktors fünf) bzw. die erhöhte Retardation langketziger Verbindungen im Boden (Anwendung des Faktors zehn) berücksichtigt. Der Abstand zum höchsten zu erwartenden Grundwasserstand muss mindestens 1,0 m zuzüglich eines Sicherheitsabstandes von 0,5 m betragen.

Tabelle 3 b: Vorläufige maximal zulässige Konzentrationen für Orientierungswerte im W/F 2:1-Eluat in µg/l für die entsprechenden Verwertungskategorien (GOW-basierte Werte)

	VK 1 Uneingeschränkter offener Einbau	VK 2 Eingeschränkter offener Einbau in Gebieten mit erhöhten PFAS-Gehalten (* siehe Erläuterungen)	VK 3 Eingeschränkter Einbau in technischen Bauwerken mit definierten Sicherungsmaßnahmen
Perfluorpentansäure, PFPeA	≤ 3,0	≤ 6,0	≤ 15
Perfluorheptansäure, PFHpA	≤ 0,3	≤ 0,6	≤ 3
Perfluordecansäure, PFDA	≤ 0,1	≤ 0,2	≤ 1
Perfluorheptansulfonsäure, PFHpS	≤ 0,3	≤ 0,6	≤ 3
6:2-Fluortelomersulfonsäure, 6:2 FTSA (H4PFOS)	≤ 0,1	≤ 0,2	≤ 1
Perfluoroctansulfonamid, PFOSA	≤ 0,1	≤ 0,2	≤ 1
Weitere PFAS	≤ 0,1	≤ 0,2	≤ 1

Erläuterungen zu Tabelle 3 b:

Angesichts der unzureichenden Datenlage zur Ableitung von Feststoffwerten wird empfohlen, vorerst für die Beurteilung einer Verwertbarkeit von Bodenmaterial die Werte der Tabelle 3 b zu verwenden. Abweichungen sind als länderspezifische Regelungen möglich. Sobald Hintergrundwerte auf Basis von Feststoffgehalten (FG) vorliegen und die Analytik es zulässt, sind die hilfswweisen, vorläufigen Anforderungen in Form von Eluatwerten durch FG in Kombination mit Eluatwerten abzulösen.

- **VK 1:** Bei der uneingeschränkten offenen Verwertung von Bodenmaterial darf das Entstehen einer schädlichen Bodenveränderung nicht zu besorgen sein. Bodenmaterial kann auf oder in die durchwurzelbare Bodenschicht auf- oder eingebracht oder in bodenähnliche Anwendungen bzw. in technische Bauwerke eingebracht werden, wenn die verwendeten Eluatgehalte in Höhe der in der Tabelle 3 b angegebenen GOW-Werte nicht überschritten werden. Diese Werte bieten eine Orientierung, solange für diese Einzelstoffe noch keine GFS-Werte vorliegen.
- **VK 2:** Eine eingeschränkte offene Verwertung ist unter bestimmten Bedingungen möglich (*):
In Gebieten mit erhöhten PFAS-Gehalten (nach §12 Absatz 10 BBodSchV bzw. nach § 6 Abs. 4 der neu gefassten BBodSchV) kann anfallendes Bodenmaterial der VK 2 bis zum doppelten GOW im Eluat innerhalb dieser Gebiete im eingeschränkten offenen Einbau verwertet werden, wenn einzelfallspezifisch nachgewiesen ist, dass eine ordnungsgemäße und schadlose Verwertung erfolgt. Dabei sind die Standortverhältnisse, insbesondere die geologischen und hydrogeologischen Bedingungen, die natürlichen Bodenfunktionen des Untergrundes und der Umgebung sowie etwa bereits vorhandene PFAS-Gehalte zu berücksichtigen. Die Situation am Ort der Verwertung darf nicht verschlechtert werden. Der Abstand zum höchsten zu erwartenden Grundwasserstand muss mindestens 1,0 m zuzüglich eines Sicherheitsabstandes von 0,5 m betragen.
Unter diesen Bedingungen kann die für die Zulassung des Auf- und Einbringens von Bodenmaterial zuständige Behörde im Einvernehmen mit der für den Bodenschutz zuständigen Behörde das Auf- oder Einbringen von PFAS-haltigem Bodenmaterial gestatten. Es wird empfohlen, die zuständige Wasserbehörde zu beteiligen.
Diese Regelungen sind nicht möglich in Wasserschutzgebieten (Zone I bis III B), Heilquellenschutzgebieten, Wasservorranggebieten und Gebieten mit häufigen Überschwemmungen.
- **VK 3:** Bei der Ableitung der Werte für die Verwertung in technischen Bauwerken mit definierten technischen Sicherungsmaßnahmen der VK 3 wurde die Mobilität kurzkettiger Verbindungen (Anwendung des Faktors fünf) bzw. die erhöhte Retardation langkettiger Verbindungen im Boden (Anwendung des Faktors zehn) berücksichtigt. Der Abstand zum höchsten zu erwartenden Grundwasserstand muss mindestens 1,0 m zuzüglich eines Sicherheitsabstandes von 0,5 m betragen.

6.2 Verwertung von Bodenmaterial auf, in oder unter/außerhalb einer durchwurzelbaren Bodenschicht

Die nachfolgenden Anforderungen an die Verwertung beruhen auf folgenden Leitgedanken:

- Die Maßnahme muss einen sinnvollen Zweck erfüllen (§ 3 Abs. 23 Kreislaufwirtschaftsgesetz, KrWG). Sie darf entsprechend § 12 Abs. 2 BBodSchV nicht die Besorgnis des Entstehens schädlicher Bodenveränderungen hervorrufen und es muss mindestens eine der in § 2 Abs. 2 Nr. 1 und 3 Buchstabe b und c BBodSchG genannten Bodenfunktionen nachhaltig gesichert oder wiederhergestellt werden.
- Eine Verwertung von Abfällen hat ordnungsgemäß und schadlos zu erfolgen und darf mit Blick auf das Kriterium der Schadlosigkeit insbesondere zu keiner Schadstoffanreicherung im Wertstoffkreislauf führen.
- Die Situation am Ort der Verwertung darf nicht verschlechtert werden.
- Es darf keine schädliche Veränderung des Grundwassers zu besorgen sein.

Die bodenschutzrechtlichen, schadstoffbezogenen Anforderungen an die Verwertung von Bodenmaterial basieren in der Regel auf dem Besorgnisgrundsatz des § 9 BBodSchV und den Vorsorgeanforderungen des § 10 BBodSchV (in der Neufassung der BBodSchV werden hierzu die Ausführungen des § 3 gelten). Vorsorgewerte sind in der BBodSchV in der Regel als Feststoffwerte festgelegt. Für PFAS konnten bislang keine vorsorgeorientierten Feststoffwerte hergeleitet werden. Daher werden für PFAS vorsorgeorientierte Anforderungen hilfsweise und vorläufig in Form von Eluatgehalten formuliert. Mit der Einhaltung der GFS-Werte im Eluat eines Bodenmaterials ist das Grundwasser am Ort des Aufbringens ausreichend geschützt, insbesondere unter Berücksichtigung der Verdünnung bei der Einmischung in das Grundwasser.

Bodenmaterial, das die Anforderungen der Tabellen 3 a/b, Spalte VK 1 einhält, kann demnach in der Regel auch ohne Untersuchung des Verwertungsortes uneingeschränkt verwertet werden, soweit nicht aus anderen Gründen Beschränkungen bestehen. Dabei sind insbesondere die Erläuterungen zu den Tabellen 3 a/b zu beachten.

Die Umlagerung von Bodenmaterial auf Grundstücken im Rahmen der Errichtung oder des Umbaus von baulichen Anlagen unterliegt gemäß § 12 Absatz 2 Satz 2 BBodSchV nicht den Anforderungen an das Auf- und Einbringen von Materialien auf oder in den Boden nach § 12 BBodSchV, wenn das Bodenmaterial am Herkunftsort wiederverwendet wird. Voraussetzung dafür ist, dass keine Gefahr oder kein Gefahrenverdacht vorliegt. Demnach kann Bodenmaterial im Rahmen der Errichtung und des Umbaus von baulichen und betrieblichen Anlagen am Herkunftsort umgelagert werden, wenn eine Altlast oder sonstige schädliche Bodenveränderungen aufgrund von PFAS-Gehalten (sowie sonstiger Schadstoffe) auszuschließen sind. (In der Neufassung der BBodSchV wird dieser Sachverhalt in § 6 Abs. 3 geregelt sein.)

Gibt es Hinweise und/oder Anhaltspunkte auf einen Gefahrenverdacht, sind Untersuchungen und eine Gefährdungsabschätzung (Kapitel 5.3) erforderlich.

6.2.1 Verwertung von Bodenmaterial auf/in einer durchwurzelbaren Bodenschicht

Für das Auf- und Einbringen von Bodenmaterial gelten die Anforderungen der BBodSchV. Insbesondere sind die Voraussetzungen des § 12 BBodSchV (einschließlich der Vollzugshilfe²⁷), z.B. der Ausschluss des Aufbringens in besonders schützenswerten Gebieten gemäß § 12 Absatz 8 BBodSchV, zu beachten. (Mit Blick auf die Neufassung der BBodSchV sind die künftigen Regelungen der §§ 6, 7 zu beachten.) Der uneingeschränkte offene Einbau wird durch die VK 1 beschrieben (Tabellen 3 a/b).

Bodenmaterial, welches die anstelle von Vorsorgewerten verwendeten der GFS-Werte im Eluat nicht überschreitet, darf auf oder in eine durchwurzelbare Bodenschicht eingebracht werden. Mit Einhaltung der GFS-Werte (W/F Verhältnis 2:1) kann die Besorgnis einer schädlichen Veränderung des Grundwassers oder des Entstehens einer schädlichen Bodenveränderung ausgeschlossen werden. Für Einzelstoffe ohne bekannte GFS-Werte können die in Tabelle 3b genannten vorläufigen Werte der VK 1 als Orientierung dienen.

In Gebieten mit erhöhten PFAS-Gehalten (nach §12 Absatz 10 BBodSchV bzw. nach § 6 Abs. 4 der neuen BBodSchV oder allgemein festgelegt) sind einzelfallspezifisch Einbauwerte bis zum doppelten GFS/GOW-Wert im Eluat unter bestimmten Bedingungen möglich (VK 2 mit Erläuterungen gemäß Tabellen 3 a/b).

Beim Auf- und Einbringen auf bzw. in die durchwurzelbare Bodenschicht ist ggf. auch der Wirkungspfad Boden-Pflanze (insbesondere bei kurzkettigen PFAS) zu berücksichtigen (vgl. Kapitel 5.3.2).

6.2.2 Auf- und Einbringen von Bodenmaterial unter- /außerhalb einer durchwurzelbaren Bodenschicht

Eine Verwertung von Bodenmaterial in bodenähnlichen Anwendungen (Verfüllung von Gruben, Brüchen und Abgrabungen, Maßnahmen der Landschaftsgestaltung, des Landschaftsbbaus, der Rekultivierung oder Wiedernutzbarmachung von Flächen) ist wie bei der Verwertung auf oder in der durchwurzelbaren Bodenschicht möglich, wenn das Entstehen schädlicher Bodenveränderungen oder einer schädlichen Veränderung des Grundwassers nicht zu besorgen ist. Dies ist dann gegeben, wenn das zu verwertende Bodenmaterial im Eluat (W/F Verhältnis 2:1) die vorläufigen Werte der VK 1 der Tabelle 3 a nicht überschreitet. Weiterhin können die in Tabelle 3 b genannten, vorläufigen Werte der VK 1 als Orientierung dienen.

In Gebieten mit erhöhten PFAS-Gehalten (nach §12 Absatz 10 BBodSchV bzw. nach § 6 Abs. 4 der neuen BBodSchV oder allgemein festgelegt) sind einzelfallspezifisch Einbauwerte bis zum doppelten GFS/GOW im Eluat unter bestimmten Bedingungen möglich (VK 2 mit Erläuterungen gemäß Tabellen 3 a/b).

²⁷ https://www.labo-deutschland.de/documents/12-Vollzugshilfe_110902_9be.pdf

6.3 Verwertung von Bodenmaterial in technischen Bauwerken

Bodenmaterial der VK 1 kann im offenen Einbau in technischen Bauwerken verwertet werden. Bodenmaterial der VK 2 kann nur in Gebieten mit erhöhten PFAS-Gehalten unter Beachtung bestimmter Randbedingungen in technischen Bauwerken verwertet werden.

Bodenmaterial der VK 3 kann dagegen ausschließlich in technischen Bauwerken mit definierten technischen Sicherungsmaßnahmen verwertet werden (siehe Erläuterungen gemäß Tabellen 3 a/b).

Der Abstand zum höchsten zu erwartenden Grundwasserstand muss beim Einbau von Bodenmaterial in technischen Bauwerken der VK 2 oder VK 3 mindestens 1,0 m zuzüglich eines Sicherheitsabstandes von 0,5 m betragen.

Die Anforderungen und Vorgaben der LAGA M 20 zu den definierten technischen Sicherungsmaßnahmen sollten für den Einbau von PFAS-verunreinigtem Bodenmaterial herangezogen werden. Aber auch andere, länderspezifische Vorgehensweisen sind gerechtfertigt, wenn fachlichen Anforderungen vollumfänglich entsprochen werden kann und somit weder eine schädliche Veränderung des Grundwassers noch das Entstehen einer schädlichen Bodenveränderung zu besorgen ist²⁸.

Es wird empfohlen, in einer ggf. notwendigen Zulassung oder aufgrund einer Anzeige zu regeln, dass die zuständige Behörde über den tatsächlichen Einbau in Kenntnis gesetzt wird.

6.4 Umlagerung von Bodenmaterial im Rahmen der Sanierung

Bei der Sanierung von Altlasten und schädlichen Bodenveränderungen gelten die Anforderungen der BBodSchV zur Gefahrenabwehr. Nach § 5 Absatz 6 BBodSchV kann Bodenmaterial im Rahmen der Sanierung im Bereich derselben schädlichen Bodenveränderung oder Altlast oder innerhalb des Gebietes eines für verbindlich erklärten Sanierungsplans auf- oder eingebracht oder umgelagert werden, wenn dauerhaft keine Gefahren, erheblichen Nachteile oder erhebliche Belästigungen für den Einzelnen und die Allgemeinheit entstehen.

Die Anforderungen an Sanierungsuntersuchungen und Sanierungsplanungen des § 13 BBodSchG i. V. m. Anhang 3 BBodSchV sind zu beachten.

Grundsätzlich ist eine Rückverfüllung oder Umlagerung von PFAS-haltigem Bodenmaterial in Abstimmung mit der zuständigen Behörde möglich, wenn dauerhaft keine Gefahren, erhebliche Nachteile oder erhebliche Belästigungen für den einzelnen oder die Allgemeinheit zu erwarten sind. Dies kann nach einzelfallbezogener Prüfung und Beurteilung durch geeignete Sanierungs- oder Schutz- und Beschränkungsmaßnahmen erreicht werden.

²⁸ Für die VK 3 kann alternativ zu einem Einbau mit Abdeckung auch ein Einbau mit wasserundurchlässiger Basisabdichtung (in Anlehnung an die Vorgaben der DepV für eine DK I Deponie) und einer spezifisch auf PFAS ausgerichteten Sickerwasserbehandlungsanlage in Betracht kommen (s. Kap. 6.5).

6.5 Verwertung und Beseitigung auf Deponien

Grundsätzlich gilt es, die Menge (Masse, Volumen) des zu beseitigenden, mit PFAS-verunreinigten Bodenmaterials durch geeignete Vorbehandlungsmaßnahmen (z.B. Klassierung) soweit wie möglich zu reduzieren und verwertbares Material einer Verwertung zuzuführen (vgl. Hinweis in Kap.6.1).

Eine Ablagerung von PFAS-verunreinigtem Bodenmaterial auf Deponien der Deponieklasse (DK) 0 ist gemäß dem KrWG und der Deponieverordnung (DepV) lediglich für Inertabfälle zulässig. Die oberirdische Deponierung von PFAS-verunreinigtem Bodenmaterial, das keinen Inertabfall darstellt, kann nur auf Deponien der DK I, II und III erfolgen, wenn die untenstehenden Voraussetzungen erfüllt sind. Zur Überprüfung kann eine Einzelfallprüfung vorgesehen werden.

Für die Abgrenzung als Inertabfall können die Werte der VK 1 in Tabellen 3 a/b (uneingeschränkte offene Verwertung) herangezogen werden. Werden diese Werte im Eluat eingehalten, ist kein Grundwasserschaden durch eine Ablagerung auf einer DK 0 zu besorgen.

Bodenmaterial, welches im Eluat bei einem W/F Verhältnis 10:1 einen Orientierungswert von $\text{PFAS}_{\text{gesamt}} < 100 \mu\text{g/l}$ (bei W/F-Verhältnis 2:1 $\text{PFAS}_{\text{gesamt}} < 500 \mu\text{g/l}$, s. Kapitel 4.3) aufweist, kann bei Einhaltung der Zuordnungswerte der DepV auf Deponien der Klasse I abgelagert werden. Als $\text{PFAS}_{\text{gesamt}}$ ist hier die Summe der in Tabelle 1 aufgeführten Verbindungen zu bestimmen.

Folgende Anforderungen sind für die Ablagerung auf Deponien der Klassen I bis III zu beachten, damit diese Deponien ihre Funktion als Schadstoffsенke für PFAS erfüllen können:

- Es ist sicherzustellen, dass eine geeignete Sickerwasserbehandlung erfolgt, mit der die vorgegebenen Einleitungsbedingungen eingehalten und die PFAS nachhaltig aus dem Stoffkreislauf ausgeschleust werden können. Dies kann unmittelbar durch eine Sickerwasserreinigungsanlage vor Ort, durch Reinigung in einer geeigneten, externen Abwasserreinigungsanlage oder durch eine Kombination beider Möglichkeiten erfolgen. Die PFAS sind danach zu zerstören.
- Bis zu einer Aufnahme der PFAS in die LAGA M 28 (Technische Regeln für die Überwachung von Grund-, Sicker- und Oberflächenwasser sowie oberirdischer Gewässer bei Deponien) ist das Untersuchungsprogramm für Sicker- und Grundwasser um die relevanten PFAS sowie einen PFAS-Summenparameter zu erweitern. Von der zuständigen Behörde können im Bedarfsfall (z.B. bei der Ablagerung der PFAS verunreinigten Böden in einem Monobereich) entsprechende Auslöseschwellen gemäß Deponieverordnung für das Grundwasser festgelegt werden. Daher wird der zuständigen Abfallbehörde bei einer Deponierung von PFAS-belastetem Bodenmaterial empfohlen zu regeln, dass sie über den tatsächlichen Einbau in Kenntnis gesetzt wird.

Zur Minimierung der Entstehung sowie zur effektiven Behandlung von PFAS-haltigem Sickerwasser aus der Ablagerung PFAS-verunreinigter Abfälle kann in Betracht gezogen werden, das Bodenmaterial in einem Monobereich mit getrennter Sickerwassererfassung und -ableitung einzubauen. Der Einbaubereich sollte klein gehalten und jeweils zeitnah nach Einbau mit möglichst wasserdichtem Material abgedeckt werden, um das nicht verunreinigte Wasser den Randgräben zuzuleiten. Die Monoablagerung von PFAS-verunreinigten Böden erlaubt eine wesentlich effektivere Reinigung der dann in der Regel nur PFAS-belasteten Sickerwässer. Die Ablagerung auf Monobereichen ermöglicht zudem eine spätere Rückholung der Böden zur Verwertung, wenn dann geeignete Behandlungsverfahren zur Verfügung stehen.

Die oben genannten Vorkehrungen gelten sinngemäß auch für die Verwertung als Deponieersatzbaustoff.

Unterirdische Ablagerung

Nach der EU Verordnung Nr. 2019/1021 (EU-POP-Verordnung) sind mit persistenten organischen Stoffen (POP)-verunreinigte Abfälle grundsätzlich so zu beseitigen oder zu verwerten, dass die darin enthaltenen POP zerstört oder unumkehrbar umgewandelt werden. Bislang enthält die Verordnung in Anhang 4 lediglich für PFOS einen Grenzwert. Gemäß Artikel 7 Absatz 4 EU-POP-Verordnung und § 7 Absatz 1 Nummer 7 Deponieverordnung (DepV) ist eine oberirdische Deponierung von verunreinigtem Bodenmaterial bis zu einem Gehalt von 50 mg/kg PFOS zulässig. Es ist möglich, dass dieser Wert bei einer Überarbeitung der Verordnung nach unten angepasst wird.

Überschreitet der PFOS-Gehalt den Wert von 50 mg/kg, kann das verunreinigte Bodenmaterial gemäß Anhang V Teil 2 Fußnote 1 der EU-POP-Verordnung in permanente unterirdische Speicher für gefährliche Abfälle einschließlich Salzbergwerke entsorgt werden. Derart hohe Belastungen mit PFOS sind in Deutschland allerdings nicht bekannt - von daher hat der PFOS-Grenzwert in der Praxis keine steuernde Wirkung.

Glossar

6:2-FTS	6:2-Fluortelomersulfonsäure (H4-Polyfluorooctansulfonsäure)
AFFF	Aqueous Film Forming Foam (Schaumlöschmittel)
ALARA	As Low As Reasonably Achievable - so niedrig wie vernünftigerweise erreichbar
BBodSchV	Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (Bundesbodenschutzverordnung)
CAS	Chemical Abstracts Service
DepV	Deponieverordnung
ECHA	Europäische Chemikalienagentur
FTOH	Fluortelomeralkohol
GenX	2,3,3,3-Tetrafluoro-2-(heptafluoropropoxy)propionsäure
GFS	Geringfügigkeitsschwelle, Bewertungsgrundlage der LAWA für Stoffe im Grundwasser
GOW	Gesundheitliche Orientierungswerte (für Trinkwasser)
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
LABO	Bund-/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz
LAGA	Bund-/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall
LAWA	Bund-/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser
MNQ	Mittlerer Niedrigwasserabfluss eines Gewässers
OWK	Oberflächenwasserkörper
PBT	Persistent, bioaccumulative, toxic; (dt.: persistent, bioakkumulierend und toxisch) – Reach-Stoffkategorie
PFAS	Per- und polyfluorierte Alkylverbindungen / per- and polyfluoroalkyl substances
PFBA	Perfluorbutansäure
PFBS	Perfluorbutansulfonsäure
PFC	Per- und polyfluorierte Chemikalien
PFCA	Perfluorierte Carbonsäuren
PFDA	Perfluordecansäure
PFDoDA	Perfluordodecansäure
PFDS	Perfluordecansulfonsäure
PFHpA	Perfluorheptansäure
PFHpS	Perfluorheptansulfonsäure
PFHxA	Perfluorhexansäure
PFHxS	Perfluorhexansulfonsäure

PFNA	Perfluornonansäure
PFOA	Perfluorooctansäure
PFOS	Perfluorooctansulfonsäure
PFOSA	Perfluorooctansulfonamid
PFPeA	Perfluoropentansäure
PFSA	Perfluorierte Sulfonsäuren
PFUnDA	Perfluorundecansäure
PNEC	Predicted no effect concentration - Konzentration, bei der mit hinreichender Sicherheit keine Effekte mehr auf aquatische Lebewesen zu erwarten sind
POP	Persistent organic pollutants - persistente organische Schadstoffe
REACH	Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (Europäisches Chemikalienrecht)
SVHC	Substances of very high concern; (dt.: besonders besorgniserregende Stoffe) - Reach-Stoffkategorie
SW	Schwellenwert (Bewertungswerte für Grundwasser)
TWK	Trinkwasserkommission am Umweltbundesamt
UQN	Umweltqualitätsnorm (aus der Oberflächengewässerverordnung, OGewV, angegeben als Jahresdurchschnittskonzentration (JD-UQN) oder zulässige Höchstkonzentration (ZHK-UQN))
vPvB	Very persistent, very bioaccumulative;(dt.: sehr persistent, sehr hoch bioakkumulierend) - Reach-Stoffkategorie
WHG	Wasserhaushaltsgesetz
WRRL	Europäische Wasserrahmenrichtlinie

Anhang

I. Eintragswege in die Umwelt

PFAS-Emissionen können grundsätzlich in jeder Phase ihres Lebenszyklus entstehen, d.h. bei ihrer Herstellung, bei ihrem Einsatz und der Verwendung bis hin zu ihrer Entsorgung. Die Eintragungsszenarien können entsprechend vielfältig sein. Bekannt sind neben Einleitungen PFAS-haltiger Abwässer in Kläranlagen und in Gewässer insbesondere Kontaminationen von Wasser und Boden durch PFAS-haltige AFFF- (Aqueous Film Forming Foams) Schaumlöschmittel oder durch die Aufbringung organischer PFAS-haltiger Reststoffe auf landwirtschaftlich genutzte Flächen. Bei ubiquitären Spurenbefunden ist hingegen von PFAS-Einträgen über die Luft auszugehen. Dieser atmosphärische Transport kann sich über sehr weite Distanzen erstrecken, wie die Funde von PFAS auch in sehr abgelegenen Gegenden ohne industrielle Einflüsse zeigen.

I.1 Schaumlöschmittel der Feuerwehren

PFAS-haltige AFFF-Schaumlöschmittel wurden ab Anfang der 1970er Jahre verbreitet angewandt. Sie wurden und werden vor allem bei Werkfeuerwehren (z. B. Zivil- und Militärflughäfen, Raffinerien, chemische Industrie) verwendet, teils aber auch bei kommunalen Feuerwehren. Bis in das Jahr 2000 wurde in diesen Schaumlöschmitteln vornehmlich mit dem Verfahren der elektrochemischen Fluorierung (ECF) hergestelltes PFOS verwendet. Bei diesem Prozess entsteht ein Gemisch verschiedener PFAS (unterschiedliche Kettenlängen, verzweigt/unverzweigt). So lässt sich bei vielen Löschschaum-Kontaminationen ein charakteristisches Muster von PFAS mit unterschiedlicher Kettenlänge erkennen. Später produzierte PFAS wurden bzw. werden überwiegend nach dem Telomerverfahren produziert (Vorteil: nur geradzahlige Homologe (C₂, C₄, C₆...), weniger Nebenprodukte). PFOS-haltige Schaumlöschmittel mit einem Gehalt von mehr als 0,001 % dürfen aufgrund eines EU-weiten Verbots seit 2011 nicht mehr verwendet werden.

Neueren AFFF-Schaumlöschmitteln werden mittlerweile anstelle von PFOS häufig telomerbasierte PFAS (z. B. 6:2 Fluortelomersulfonsäure (6:2-FTS), auch als H4PFOS bezeichnet, oder andere Vorläuferverbindungen auf C₆-Basis) zugesetzt. Bei einigen durch Schaumlöschmittel aufgetretenen PFAS-Kontaminationen und insbesondere solchen aus stationären Sprinkleranlagen handelt es sich vorrangig um in der Routineanalytik teils noch nicht nachweisbare PFAS (z.B. Perfluoralkylbetaine).

Durch neue Entwicklungen stehen heutzutage aber für die überwiegende Mehrheit der Brandfälle fluorfreie Schaumlöschmittel zur Verfügung, nur in sehr seltenen Fällen sind AFFF-Mittel noch notwendig²⁹.

²⁹ Leitfaden zum umweltschonenden Einsatz von Feuerlöschschäumen s. https://www.lfu.bayern.de/analytik_stoffe/per_polyfluorierte_chemikalien/feuerloeschschaume_und_umwelt/index.htm, oder

Untersuchung fluortensidfreier Löschmittel und geeigneter Lösungsverfahren.

https://idf.sachsen-anhalt.de/fileadmin/Bibliothek/Politik_und_Verwaltung/MI/IDF/IBK/Dokumente/Forschung/Fo_Publikationen/imk_ber/bericht_187.pdf

I.2 PFAS-Eintrag über organische Reststoffe

Die regional bekannten großräumigen PFAS-Belastungen in Nordrhein-Westfalen (Arnsberg, 2006) und Baden-Württemberg (Rastatt, 2013) sind durch Einträge von PFAS-verunreinigten organischen Reststoffen auf landwirtschaftliche Nutzflächen hervorgerufen worden.

Im Schadensfall Rastatt wurden vermutlich Kompost-Papierschlamm-Gemische auf landwirtschaftlich genutzte Flächen aufgebracht. Diese Gemische enthielten polyfluorierte Chemikalien, die zur Papierveredlung verwendet werden.

I.3 Abwasser

PFAS werden in der industriellen Produktion in verschiedenen Branchen (s. Anhang III) eingesetzt, insbesondere im Bereich der Oberflächenveredelung, z. B. als Mittel zur Sprühnebelunterdrückung und Herabsetzung der Oberflächenspannung, zur wasser-, öl- und fettabweisenden Ausrüstung von Textilien (z.B. Outdoor- und Arbeitskleidung, Sitzbezüge, Teppiche) oder zur Beschichtung von Papieren für Lebensmittelverpackungen oder im Bereich der Spezialchemie, z.B. zur Herstellung fluorhaltiger Kunststoffe. Je nach Einsatzbereich können PFAS dabei während des Herstellungsprozesses in das betriebliche Abwasser gelangen. Da viele PFAS in Kläranlagen nur zu einem geringen bis mäßigen Anteil aus dem Abwasser entfernt werden und bislang in der Abwasserverordnung kein Stand der Technik für eine spezifische Vorbehandlung zur Reduktion von PFAS existiert, gelangen die Stoffe auch in die Gewässer.

Der Einsatz von PFOS wurde seit 2006 mit wenigen Ausnahmen verboten. Folgende Emissionsquellen können für PFAS aber weiterhin möglich sein (Eine detaillierte Aufstellung der Branchen, bei denen PFAS zum Einsatz kamen oder kommen, enthält Anhang III):

- Diffuse Einträge in kommunale Kanalisationen über Niederschlagswasser (atmosphärischer Transport), Grundwassereintritte o.ä.
- Abwasser aus Betrieben (z. B. Galvanik), die andere PFAS als PFOS verwenden (Umwandlung von Vorläufersubstanzen in persistente Abbauprodukte) oder auch aus der Herstellung von PFAS-Verbindungen
- Betriebe, die PFOS nicht mehr verwenden, aber früher verwendet haben, und/oder auf polyfluorierte Ersatzstoffe umgestiegen sind; der Austrag von PFOS aus solchen Anlagen ist auch noch mehrere Jahre nach Einstellung der Verwendung nachgewiesen (sogenannte „Ausbluten“ der belasteten Anlagenteile und Leitungen)
- Einleitungen aus Boden- oder Grundwassersanierungen sowie aus Grundwasserabsenkungen (z. B. Bauwasserhaltungen), Abwasser aus Wasseraufbereitungsanlagen, soweit PFAS im jeweils eingesetzten Rohwasser bereits enthalten war
- Mischwasserabschläge und ggf. Fehlan schlüsse bei der Trennkanalisation
- Schaumlöschmittel, die PFOS in Mengen < 0,001 % oder andere PFAS enthalten
- PFAS können auch über zahlreiche Konsumentenprodukte in die Umwelt eingetragen werden, z.B. durch Waschen entsprechend ausgerüsteter Textilien wie Outdoor- und Arbeitskleidung, Verwendung von PFAS-haltigen Imprägnierungsmitteln u.a.

I.4 Altlasten und schädliche Bodenveränderungen

I.4.1 Altstandorte

Eintragswege von PFAS in die Umwelt können aus betrieblicher Anwendung und in deren Folge aus Boden- und Grundwasserkontaminationen resultieren. Bei Altstandorten sind vorrangig ehemalige Betriebe mit chromhaltigen Galvanikbädern von Bedeutung bei denen PFAS vermutlich in den alten Bundesländern seit den 1960er Jahren (in den neuen Bundesländern ab den 1990er Jahren) eingesetzt wurden. Diese sind wegen der vergleichsweise großen Mengen an verwendeten PFAS (meist PFOS, daneben aber auch PFBS und PFHxS) altlastenrelevant.

Darüber hinaus kann es vor allem bei Altstandorten der Textilverarbeitung, Papierherstellung sowie der Foto- und Filmindustrie geboten sein, PFAS in die Untersuchungen einzubeziehen. Detaillierte Informationen zur PFAS-Relevanz in den einzelnen Branchen enthält die „LABO-Arbeitshilfe zur flächendeckenden Erfassung, standortbezogenen historischen Erkundung und zur orientierenden Untersuchung von Boden- und Grundwasserkontaminationen mit PFAS (siehe auch Anhang III).

I.4.2 Altablagerungen und Altdeponien

Bei Altablagerungen oder Altdeponien ist der Zeitpunkt einer Betriebs- bzw. Deponiestilllegung für die PFAS-Relevanz wesentlich. War dieser Zeitpunkt in den 1970er Jahren, so ist eine PFAS-Relevanz wenig wahrscheinlich, da eine intensive Verwendung der PFAS erst danach erfolgte. Für kleine kommunale Altablagerungen ist eine PFAS-Relevanz ebenfalls unwahrscheinlich. Ausnahmen sind unter Umständen firmeneigene Altablagerungen, sofern PFAS in relevanten Mengen betrieblich verwendet wurden und die Betriebsstilllegung später als in dem oben genannten Zeitraum erfolgte sowie die Ablagerung von Brandschutt (PFAS-haltige Löschmittel). Untersuchungen an zahlreichen Deponien in einigen Bundesländern ergaben, dass PFAS im Sickerwasser regelmäßig vorhanden waren.

I.4.3 Sonstige Hinweise

Hinsichtlich der Verwendung von Feuerlöschschäumen (vgl. I.1) sind ehemalige und betriebene zivile und militärische Flugplätze, Feuerwehrübungsplätze sowie Großbrände typische Standorte mit potenziellen PFAS-Verunreinigungen. In der Vergangenheit wurden auch auf anderen ehemals militärisch genutzten Liegenschaften Altlasten festgestellt. Die hauptsächlich vorkommenden Schadstoffverbindungen waren insbesondere aromatische und aliphatische Kohlenwasserstoffe, die sowohl im Bereich von Tankanlagen als auch im Bereich von Feuerwehrübungsplätzen angetroffen wurden. Diese Flächen sowie Flächen von Großbrandereignissen zeigen in vielen Fällen zusätzlich eine PFAS-Relevanz.

Im Falle von biologischen ex-situ Sanierungsverfahren, die on-site zur Ausführung kamen, wie auch im Falle von off-site Dekontaminationsanlagen kann es zu einer Vermischung von PFAS-haltigem und PFAS-freiem Bodenmaterial gekommen sein. Durch den Wiedereinbau des Bodenmaterials kann eine Verschleppung von PFAS nicht ausgeschlossen werden.

Im Falle PFAS-relevanter Branchen kann bei "sanierten Altlasten" im Einzelfall eine Nacherfassung mit anschließender Erkundung und Untersuchung auf PFAS erforderlich werden.

I.5 Atmosphärischer Eintragspfad

Systematische Untersuchungen an Bodendauerbeobachtungsflächen in Baden-Württemberg und Bayern weisen darauf hin, dass PFAS, insbesondere PFOA, PFOS und kurzkettige Carbonsäuren in Eluaten von Oberböden flächendeckend an Standorten ohne jeden Belastungsverdacht in geringen Konzentrationen nachgewiesen werden. Wahrscheinlichste Ursache für den Nachweis dieser Stoffe auch in weitestgehend unveränderten Böden, ist ein ubiquitärer atmosphärischer Transport, der zu einer globalen Verteilung der Stoffe beiträgt^{30/31}.

II. Gesetzliche Grundlagen

II.1 Europäische Regelungen

Mit Veröffentlichung der Richtlinie 2006/122/EG am 27.12.2006 wurde die Verwendung von PFOS und deren Derivate erheblich eingeschränkt. Diese Beschränkung wurde in die Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 (REACH) übernommen. Mit Verordnung (EU) Nr. 207/2011 wurden diese Einträge zu PFOS jedoch wieder gelöscht, um Doppelregulierungen zu vermeiden.

In der Stockholm Konvention werden persistente, organische Schadstoffe (persistent organic pollutants, POP) international reguliert. PFOS (seit 2006) und PFOA (seit 2019) sind im Anhang B der Stockholmer Konvention enthalten, welcher die Vertragspartner verpflichtet, die Herstellung und Verwendung dieser Substanzen in ihrem jeweiligen Hoheitsgebiet zu beschränken. Mit der Verordnung 850/2004/EG (EU-POP-Verordnung) wurden die Vorgaben aus der Stockholm-Konvention in europäisches Recht überführt, die im Juli 2019 durch die neue EU-POP-Verordnung Nr. 2019/1021 ersetzt wurde.

Herstellung, Verwendung und Inverkehrbringen als solches, in Gemischen oder als Bestandteile von Artikeln sind mit wenigen Ausnahmen und ab bestimmten Grenzwerten verboten:

PFOS-haltige Feuerlöschschäume mit einem Gehalt von mehr als 0,001 % durften nur noch bis zum 27. Juni 2011 verwendet werden.

Im Mai 2019 wurde auch PFOA als POP in die Stockholm Konvention aufgenommen. Die Aufnahme in die EU-POP-Verordnung steht noch aus. PFHxS befindet sich derzeit im Verfahren zur Aufnahme in die Anhänge A, B und/oder C des Stockholmer Übereinkommens und wird voraussichtlich ebenfalls als persistenter organischer Schadstoff international reguliert.

³⁰

https://fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/118077/LUBW_PFAS_Hgg_final_Nov_2016.pdf?command=downloadContent&filename=LUBW_PFAS_Hgg_final_Nov_2016.pdf

³¹ Vgl. auch

https://www.lfu.bayern.de/analytik_stoffe/per_polyfluorierte_chemikalien/PFAS_belastung_boeden/index.htm

Chemikalienrecht (REACH)

Stoffe mit besorgniserregenden Eigenschaften – sogenannte SVHC-Stoffe („Substances of very high concern“) können in die Kandidatenliste des Artikel 57 der REACH-Verordnung gelistet werden. Als besonders besorgniserregend gelten laut Anhang XIII der REACH-Verordnung Stoffe zum Beispiel wegen ihrer krebserzeugenden, erbgutverändernden oder fortpflanzungsgefährdenden Eigenschaften (CMR-Stoffe) oder weil sie schwer abbaubar (persistent) sind, sich in Organismen anreichern (bioakkumulierend) und/oder toxisch in der Umwelt wirken (PBT oder vPvB-Stoffe) oder ein anderes Risiko darstellen. Mit dem Eintrag in die Kandidatenliste ergeben sich für den Gebrauch dieser Chemikalien Auskunftspflichten für Lieferanten und Auskunftsrechte für Verbraucher, wenn diese Stoffe in Konzentrationen von mehr als 0,1 Massenprozent in Erzeugnissen verwendet werden.

Stoffe, die auf die Kandidatenliste aufgenommen wurden, können in der Folge in den Anhang XIV der REACH-Verordnung, der Liste der zulassungspflichtigen Stoffe aufgenommen werden. Mit dem Eintrag in Anhang XIV ist die Verwendung des Stoffes in der EU untersagt. Unternehmen können jedoch eine Zulassung für bestimmte Verwendungen beantragen, wenn z.B. keine Alternativen zur Verfügung stehen oder sozioökonomische Gründe für die weitere Verwendung der Stoffe vorliegen. In diesem Zusammenhang sind grundsätzlich Minimierungsmaßnahmen anzustreben.

Die in Tabelle A-1 aufgeführten langkettigen PFAS stehen bereits aufgrund ihrer persistenten, bioakkumulierenden und toxischen (PBT) Eigenschaften bzw. aufgrund ihrer sehr persistenten und sehr bioakkumulierenden (vPvB) Eigenschaften auf der Kandidatenliste. Die Toxizität beruht auf der Einstufung der Stoffe gemäß CLP-VO³².

Tabelle A-1: Übersicht der PFAS, die aufgrund ihrer SVHC-Eigenschaft als Kandidaten für den Anhang XIV der REACH-Verordnung eingestuft sind

Substanz	SVHC-Eigenschaft*	Einstufung in CLP-VO (Anhang VI CLP)
Perfluorooctansäure (PFOA; C8-PFASA) und das Ammoniumsalz APFO	PBT, CMR	Carc. 2 Repr. 1B Lact STOT RE 1 Acute Tox. 4 Eye dam. 1
Perfluornonansäure (PFNA; C9-PFASA) und seine Natrium- und Ammoniumsalze	PBT, CMR	Carc. 2 Repr. 1B Lact. Acute Tox. 4 STOT RE 1 Eye Dam. 1
Nonadecafluorodecansäure (syn. Perfluordecansäure PFDA; C10-PFASA) und ihre Natrium- und	PBT, CMR	Carc. 2

³² Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen

Ammonium-Salze		Repr. 1B Lact.
Henicosafuorundecansäure (syn. Perfluorundecansäure PFUnDA; C11-PFASA)	vPvB	-
Tricosafuordodecansäure (syn. Perfluorododecan, PFDoDA; C12-PFASA)	vPvB	-
Pentacosafuortridecansäure (syn. Perfluortridecansäure, PFTTrDA; C13-PFASA)	vPvB	-
Heptacosafuortetradecansäure (syn. Perfluortetradecansäuren, PFTTeDA; C14-PFASA)	vPvB	-
Perfluorobutansulfonsäure (PFBS)	vP, sehr mobil	-
Perfluorhexansulfonsäure (PFHxS) und ihre Salze	vPvB	-
2,3,3,3-Tetrafluoro-2-(heptafluoropropoxy)propionsäure (GenX, HFPO-DA)	-	-

* PBT: persistent, bioakkumulierend und toxisch; vPvB: sehr persistent, sehr bioakkumulierend, CMR: carcinogen, mutagen oder reproduktionstoxisch

Für PFOA, seine Salze und Vorläuferverbindungen ist im Jahr 2017 eine EU-weite Beschränkung in Kraft getreten (COMMISSION REGULATION (EU) 2017/1000). Ab 04.07.2020 ist die Herstellung verboten und das Inverkehrbringen der Stoffe als solches, in Gemischen und in Erzeugnissen bis auf wenige Ausnahmen untersagt. Werden PFOA, deren Salze oder Vorläuferverbindungen als Bestandteil eines anderen Stoffes, in einem Gemisch oder Erzeugnis, wie z.B. in Imprägniersprays, Textilien oder Lebensmittelverpackungen eingesetzt, gelten Grenzwerte von 25 ppb (entspricht 25 µg/l) für PFOA und deren Salze sowie 1000 ppb (1000 µg/l) für Vorläuferverbindungen. Feuerlöschschaumgemische, die vor dem 4. Juli 2020 auf dem Markt waren, dürfen fristlos aufgebraucht werden.

EU-weite Beschränkungen für die Herstellung und Verwendung der C9-C14 PFASAs sowie für PFHxS sind in Vorbereitung.

PBT- und vPvB-Stoffe verbleiben für lange Zeit in der Umwelt. Effekte durch die Anreicherung in Organismen können langfristig nicht vorhergesehen werden. Akkumulationen in Organismen sind so gut wie nicht umkehrbar und Gehalte der Stoffe in Umweltmedien sind aufgrund ihrer Persistenz durch eine Reduzierung der Emissionen kaum zu vermindern. Außerdem haben PBT- und vPvB-Stoffe das Potenzial, entlegene Gebiete fernab der Emissionsquellen zu verunreinigen.

Auch wenn Standardlabortests keine, oder nur geringe akut toxische Wirkungen zeigen, können langfristig Effekte durch eine langanhaltende Exposition mit geringer Dosis auftreten, die auch aufgrund der langen Lebenszyklen bei Organismen am Ende der Nahrungskette kaum vorhersehbar sind. Langzeiteffekte können auch deshalb nicht ausgeschlossen werden, da die Gehalte der PBT- und vPvB-Stoffe in Mensch und Umwelt über langfristige Zeiträume nicht vorhergesagt werden können.

Aktuell gilt dies für alle perfluorierten Carbonsäuren mit einer Kettenlänge von C8 – C14, PFOS und PFHxS, dementsprechend kann für diese Stoffe – laut REACH- keine PNEC festgelegt werden (siehe auch Anhang II.3. Unter Berücksichtigung technischer und wirtschaftlicher Möglichkeiten sollten die Emission dieser Stoffe soweit wie möglich minimiert werden.

II.2 Bundesweite Regelungen zur Begrenzung von PFAS in der Umwelt

Bundesweit einheitliche Regelungen für diese Stoffklasse gibt es aktuell in der Oberflächengewässerverordnung (OGewV) vom 20.06.2016, die Umweltqualitätsnormen für PFOS enthält. Werden diese Umweltqualitätsnormen derzeit in einem Oberflächengewässer überschritten, müssen geeignete Maßnahmen festgesetzt werden, um ihre Einhaltung spätestens ab 2027 zu erreichen. Seit dem 22. Dezember 2018 wird PFOS im Rahmen eines zusätzlichen Überwachungsprogrammes sowie eines vorläufigen Maßnahmenprogrammes zur Minimierung der Belastung berücksichtigt.

Eine weitere gesetzliche Regelung gibt es in der Düngemittelverordnung, die einen Grenzwert von 100 µg/kg Trockenmasse für die Summe aus Perfluorooctansulfonsäure (PFOS) und Perfluorooctansäure (PFOA) bestimmt.

Für sieben Einzel-PFAS wurden auf humantoxikologischer Basis Geringfügigkeitsschwellenwerte für das Grundwasser sowie Leitwerte für das Trinkwasser abgeleitet. Auf dieser Basis wurden für diese sieben Einzel-PFAS Prüfwerte für den Wirkungspfad Boden-Grundwasser im Entwurf der Mantelverordnung formuliert.

Weitere bundesweit einheitliche gesetzliche Grenzwerte für diese Stoffklasse liegen aktuell noch nicht vor.

II.3 Oberflächengewässer - Erläuterungen zur Ableitung von PNEC und UQN

PFHxS, PFOA, PFNA und PFDA, sowie alle Perfluorcarbonsäuren mit einer Kettenlänge von C11 - C14 sind bislang unter REACH aufgrund ihrer persistenten, bioakkumulierenden und toxischen (PBT) bzw. sehr persistenten und sehr bioakkumulierenden (vPvB) Eigenschaften als besonders besorgniserregende Stoffe (SVHC, substances of very high concern) definiert worden (vgl. II.3). PFOS, PFOA, PFDA und PFNA sind zudem als CMR-Stoffe eingestuft.

Die besondere Besorgnis, die von PBT-Stoffen ausgeht, hat ihre Ursache darin, dass sie, einmal in die Umwelt ausgebracht, dort dauerhaft verbleiben. Sie können sich über einen langen Zeitraum in den Umweltmedien oder in Organismen anreichern und dann Schäden anrichten. Dabei kann nicht genau vorhergesagt werden, wann und wo solche Effekte auftreten. Schäden, die einmal durch PBT oder vPvB-Stoffe bei Mensch und Umwelt eingetreten sind, sind häufig nicht reparabel, daher wird hier der Vorsorgegedanke in der Chemikalienverordnung verankert.

Für PBT und vPvB-Stoffe kann unter der Sichtweise von REACH aufgrund der hohen Verweildauer der Stoffe in der Umwelt und des hohen Anreicherungs potenzials in Organismen keine Konzentration in der Umwelt abgeleitet werden, für die mit Sicherheit keine Effekte in der Zukunft auftreten. PNEC-Werte (Predicted no effect concentration) können nur für einzelne Schutzgüter (z.B. PNEC_{aquatisch} für die aquatische Lebensgemeinschaft) auf Basis aktueller Erkenntnisse abgeleitet werden, bieten aber nicht die eigentlich erforderliche Sicherheit im Sinne einer Risikominimierung für alle zu betrachtenden Schutzgüter. Eine PNEC als „sichere“ Konzentration in der Umwelt ist daher mit hoher Unsicherheit behaftet und nicht für die gesamte Lebensgemeinschaft ableitbar. Es muss jedoch beachtet werden, dass aquatische Organismen wasserlösliche PFAS kaum anreichern. Effekte treten bei Fischen erst in vergleichsweise hohen Konzentrationen auf, was zu relativ hohen PNEC_{aquatisch}-Werten führt. Im Gegensatz dazu reichern terrestrische Top-prädatoren PFOA und andere langkettige PFAS in hohem Maße an. Dies konnte z.B. an

Fischottern gezeigt werden. Interessanterweise ist der Mensch bislang der sensibelste Organismus hinsichtlich der Effekte durch PFAS-Kontaminationen. Menschen nehmen PFAS hauptsächlich durch die Nahrung (z.B. Fisch), Trinkwasser, Luft und Staub auf. Deshalb ist es aus Sicht der menschlichen Gesundheit besonders wichtig, PFAS-Einleitungen in Gewässer so gering wie möglich zu halten, um eine weitere Verbreitung der Stoffe einzudämmen und die menschliche Exposition zu vermindern.

Die nach Wasserrahmenrichtlinie zur Bewertung relevanten UQN für prioritäre Stoffe wie PFOS umfassen neben den Ableitungskriterien für PNEC (Schutz der aquatischen Gemeinschaft abgebildet durch die Vertreter der Trophiestufen Alge, Daphnie und Fisch) den Schutz vor sekundärer Vergiftung fischfressender Tiere („secondary poisoning“) und den Schutz der menschlichen Gesundheit bei Fischverzehr.

III. PFAS-Verwendungen

Außer dem Einsatz in Schaumlöschmitteln (siehe Anhang I.1) liegen weitere Verwendungsgebiete von PFAS hauptsächlich im Bereich der Oberflächenveredelung von Textilien, der Papierbeschichtung und der Spezialchemie.

Detaillierte Informationen zur PFAS-Relevanz in den einzelnen Branchen enthält die „LABO-Arbeitshilfe zur flächendeckenden Erfassung, standortbezogenen historischen Erkundung und zur Orientierenden Untersuchung von Boden- und Grundwasserkontaminationen mit PFAS“³³.

Eine Auswahl von relevanten Branchen ist nachfolgend dargestellt:

Chemische Industrie

Der Bereich der chemischen Industrie umfasst eine sehr große Breite verschiedener Einsatzbereiche und eine weite Verbreitung in der Produktkette. Für die im Folgenden aufgeführten Bereiche liegen kaum Daten vor. Es gibt keinerlei Informationen zu Einsatzmengen und Einsatzzeiträumen, nicht einmal dazu, ob der jeweilige Einsatzbereich für Deutschland überhaupt relevant ist. Einsatzzeitraum: ab ca. 1970 bis heute.

PFAS-Stoffe/Stoffgruppen: Die eingesetzten Chemikalien können die gesamte PFAS-Produktpalette umfassen.

Branchen:

- Produktion der PFAS und deren Polymere,
- Herstellung von Formulierungen,
- Verwendung von PFAS (als Prozesschemikalien bzw. als Hilfsmittel bei Synthesen) in der Herstellung von Produkten, die letztlich keine PFAS mehr enthalten,
- Verwendung von PFAS zur Herstellung PFAS-haltiger Produkte.

Galvanik

Im Rahmen der Oberflächenbehandlung wurden PFAS bei der Hartverchromung, Glanzverchromung und Kunststoffgalvanisierung mit Chrom eingesetzt. Es gilt der Anhang 40 der AbwV (keine PFAS-Grenzwerte). Seit 2015 ist nach der EU-POP-VO nur noch der Einsatz als Mittel zur Sprühnebelunterdrückung für nicht dekoratives Hartverchromen (Chrom VI) in geschlossenen Kreislaufsystemen zulässig.

Einsatzzeitraum: ab ca. 1960 bis heute (Ausnahmegenehmigung für PFOS)

PFAS-Stoffe/Stoffgruppen: PFOS, 6:2 FTSA, PFBS, PFHxS

Branchen: Oberflächenveredelung/Oberflächentechnik mit folgenden Verfahren:

1. Priorität: Hartverchromung, Glanzverchromung, Kunststoffgalvanisierung
2. Priorität: Zinkverchromung, Verkupferung, Vernickelung, Vergoldung, Galvanisieren, Edelmetalle, Anodisierverfahren

³³ Länderfinanzierungsprogramm Wasser, Boden und Abfall, Teil Boden (2016): Boden- und Grundwasserkontaminationen mit PFAS bei altlastverdächtigen Flächen und nach Löschmitteleinsätzen - Kriterien für die Erfassung und historische Erkundung von Boden- und Grundwasserkontaminationen mit PFAS – Länderübergreifende ALA-Arbeitshilfe (Projektstufe 1). LFP-Projekt B 4.14
(<http://www.laenderfinanzierungsprogramm.de/projektberichte/labo/>), dort Projekt B 4.14)

Textilindustrie

Altlast- und abwasserrelevant sind Textilbetriebe mit Nassausrüstung zum Auftrag von Imprägnier- und Fleckenschutz und für membranherstellende Betriebe. Es gilt Anhang 38 der AbwV (keine PFAS-Grenzwerte).

Einsatzzeitraum: ab ca. 1960 bis heute (mit Ausnahme PFOS: Ende 2006)

PFAS-Stoffe/Stoffgruppen: Fluorcarbonharze, Fluorpolymere, PFOS, PFOA, 6:2 FTOH, Fluortelomeracrylate, seitenkettenfluorierte Polymere auf C6-Basis

Branchen: Textilherstellung, Herstellung techn. Textilien, Herstellung Teppiche, Membranherstellung (z.B. GoreTex)

Papierindustrie

Eine mögliche Umweltgefährdung beschränkt sich auf die Papier-, Karton- und Pappeherstellung. Es gilt der Anhang 28 der AbwV.

Einsatzzeitraum: ab ca. 1960 bis heute

PFAS-Stoffe/Stoffgruppen: seitenkettenfluorierte Polymere aller Kettenlängen, Phosphatester von N-EtFOSE, Fluorcarbonharze, Perfluorpolyether(PEPE), PAP, polyfluorierte Phosphonsäuren (PFOS, PFOA und Vorläuferverbindungen als sekundäre, relevante Verunreinigungen), diPAP, SAmPAP

Branchen: Papier- und Pappeherstellung

Lack- und Farbenherstellung

Aussagen zur Altlastenrelevanz sind schwierig. Altlastenrelevanz besteht dann, wenn bei der Produktion von Farben/Lacken PFAS-Additive zugesetzt wurden.

Einsatzzeitraum: ab ca. 1960 bis heute (Ausnahme PFOS: Ende 2006)

PFAS-Stoffe/Stoffgruppen: PFOS und PFOS-verwandte Substanzen, PFBS, fluorierte Polyether, Fluorpolymere – PVDF (Polyvinylidenfluorid – Polymer aus C₂H₂F₂).

Branchen: Lack-, Farbenherstellung – Farben/Lacke mit wasser-, schmutz-, ölabweisenden Eigenschaften, Druckfarbenherstellung (Lackierereien und Industriebetriebe mit Lackieranlagen)

Feuerlöschschäume (Siehe auch Anhang I.1)

Einsatzzeitraum; ab 1970 bis heute

PFAS-Stoffgruppe: Fluorhaltige Feuerlöschschäume, sogenannte AFFF (Aqueous Film Forming Foam) enthielten bis ca. 2010 PFOS und PFHxS. Neuere Schäume basieren hauptsächlich auf C6-Chemie, d.h. enthalten Vorläufersubstanzen. Typisch für aktuell verwendete Löschschäume sind Fluortelomerbetaine und Perfluorbetaine.

Branchen: Werkfeuerwehren, Berufsfeuerwehren, Flughafenfeuerwehren, freiwillige Feuerwehren

Halbleiterindustrie

Aufgrund des Prozesses ist eine besondere Umweltgefährdung für Boden und Grundwasser nicht zu erwarten. Es gilt Anhang 54 der AbwV (keine PFAS-Grenzwerte)

Einsatzzeitraum: ab ca. 1995 bis heute (Ausnahme PFOS, Ende 2006)

PFAS-Stoffe/Stoffgruppen: PFOS, Vorläuferverbindungen basierend auf C8-, C6- und C4-Chemie

Branchen: Halbleiterherstellung

Fotoindustrie

Ähnlich wie für die Halbleiterindustrie ist nicht mit einer relevanten Umweltgefährdung zu rechnen.

Einsatzzeitraum: ab ca. 1995 bis heute, Schwerpunkt bis 2000

PFAS-Stoffe/Stoffgruppen: PFOS, Vorläuferverbindungen basierend auf C8-, C6- und C4-Chemie

Branchen: Printmedienherstellung, Entwicklungslabors, Betriebe zur Aufarbeitung von Entwicklerlösungen

Hydraulikflüssigkeiten

Es ist keine Umweltgefährdung der Medien Boden und Grundwasser beim Umgang mit Hydraulikflüssigkeiten in der Luftfahrt und Luftfahrtindustrie zu erwarten. Die Einsatzmengen an PFOS sind gering.

Einsatzzeitraum: untere Abschneidegrenze: bisher nicht klar definierbar, obere Abschneidegrenze: bis heute

PFAS-Stoffe/Stoffgruppen: PFOS, Perfluor-Ethyl-Cyclohexyl-Sulfonat (FC-98)

Branchen: Flugzeugbau, Flugzeugwartung (Flughäfen)

IV. Übersicht über die nach ISO 21675:2019-10 analysierbaren Verbindungen

In Tabelle A-2 sind die Verbindungen aufgeführt, die mit der Methode der ISO 21675:2019 analysierbar sind. Die Methode enthält neben den 13 nach DIN 38407-42 (F42) analysierbaren PFAS weitere PFAS-Verbindungen wie bspw. die PFOA-Ersatzstoffe GenX und DONA sowie den Hauptbestandteil von F-53B 9CI-PF3ONS.

Tabelle A-2: Übersicht über die in ISO 21675:2019 aufgelisteten Verbindungen.

Substanz	Abkürzung	Formel	CAS
Perfluorbutansäure	PFBS	C ₄ HF ₉ O ₃ S	375-73-5
Perfluorhexansulfonsäure	PFHxS	C ₆ HF ₁₃ O ₃ S	355-46-4
Perfluorheptansulfonsäure	PFHpS	C ₇ HF ₁₅ O ₃ S	375-92-8
Perfluoroctansulfonsäure	PFOS	C ₈ HF ₁₇ O ₃ S	1763-23-1
Perfluorundecansulfonsäure	PFDS	C ₁₀ HF ₂₁ O ₃ S	335-77-3
Perfluoroctansulfonamid	PFOSA	C ₈ H ₂ F ₁₇ NO ₂ S	754-91-6

N-Methyl-Perfluorooctansulfonamid	N-MeFOSA	C ₉ H ₄ F ₁₇ NO ₂ S	31506-32-8
N-Ethyl-Perfluorooctansulfonamid	N-EtFOSA	C ₁₀ H ₆ F ₁₇ NO ₂ S	4151-50-2
N-Methyl-Perfluorooctansulfonamidoessigsäure	N-MeFOSAA	C ₁₁ H ₆ F ₁₇ NO ₄ S	2355-31-9
N-Ethyl-Perfluorooctansulfonamidoessigsäure	N-EtFOSAA	C ₁₂ H ₈ F ₁₇ NO ₄ S	2991-50-6
6:2 Fluortelomersulfonsäure	6:2 FTSA (H4PFOS)	C ₈ H ₅ F ₁₃ O ₃ S	27619-97-2
8:2 Fluortelomersulfonsäure	8:2 FTSA	C ₁₀ H ₅ F ₁₇ O ₃ S	39108-34-4
9-Chlorohexade-cafluoro-3-oxanonane-1-sulfonic acid	9Cl-PF3ONS	C ₈ HCIF ₁₆ O ₄ S	756426-58-1
Perfluorbutansäure	PFBA	C ₄ HF ₇ O ₂	375-22-4
Perfluorpentansäure	PFPeA	C ₅ HF ₉ O ₂	2706-90-3
Perfluorhexansäure	PFHxA	C ₆ HF ₁₁ O ₂	307-24-4
Perfluorheptansäure	PFHpA	C ₇ HF ₁₃ O ₂	375-85-9
Perfluorooctansäure	PFOA	C ₈ HF ₁₅ O ₂	335-67-1
Perfluornonansäure	PFNA	C ₉ HF ₁₇ O ₂	375-95-1
Perfluordecansäure	PFDA	C ₁₀ HF ₁₉ O ₂	335-76-2
Perfluorundecansäure	PFUnDA	C ₁₁ HF ₂₁ O ₂	2058-94-8
Perfluordodecansäure	PFDoDA	C ₁₂ HF ₂₃ O ₂	307-55-1
Perfluortridecansäure	PFTTrDA	C ₁₃ HF ₂₅ O ₂	72629-94-8
Perfluortetradecansäure	PFTeDA	C ₁₄ HF ₂₇ O ₂	376-06-7
Perfluorhexadecansäure	PFHxDA	C ₁₆ HF ₃₁ O ₂	67905-19-5
Perfluorooctadecansäure	PFOcDA	C ₁₈ HF ₃₅ O ₂	16517-11-6
8:2 Ungesättigte Fluortelomersäure	8:2 FTUCA	C ₁₀ H ₂ F ₁₆ O ₂	70887-84-2
8:2 Polyfluoralkylphosphorsäurediester	8:2 diPAP	C ₂₀ H ₉ F ₃₄ O ₄ P	678-41-1
Hexafluorpropylenoxiddimersäure	HFPO-DA / FRD-903 / GenX	C ₆ HF ₁₁ O ₃	13252-13-6
Perfluor-4,8-dioxa-3H-nonansäure	DONA	C ₇ H ₂ F ₁₂ O ₄	919005-14-4

V. Fallbeispiele aus den Ländern

V.1 Baden-Württemberg

Vorgehensweise zur Beurteilung von Lebensmitteln

Grundsätzlich können Pflanzen PFAS aus dem Boden oder über Beregnungswasser aufnehmen. Untersuchungen haben gezeigt, dass vor allem kurzkettige PFAS (PFBA, PFPeA, PFHxA) aufgenommen werden. Darüber hinaus wurde festgestellt, dass unterschiedliche Pflanzenarten unterschiedliche Aufnahmekapazitäten zeigen: Sojabohnen, Gemüse und Weizen nehmen PFAS sehr gut auf, während bei Mais und Raps kein Übergang ins Korn beobachtet wurde.

Es wird der Bedarf von Prüfwerten für den Wirkungspfad Boden-Pflanze gesehen. Hier fehlen aber Bewertungsgrundlagen (derzeit z. T. Vor-Ernte-Monitoring, z. B. im Raum Rastatt/Baden-Baden). Es liegen noch zu wenige Daten zum PFAS-Transfer Boden-Pflanze vor, um Transferfaktoren berechnen zu können. Dabei ist zu beachten, dass der Transfer von unterschiedlichen Einflussfaktoren abhängt, u. a. von der PFAS-Kettenlänge. Es werden systematische Untersuchungen zum Transfer Boden-Pflanze unter Feldbedingungen als erforderlich angesehen.

Hinsichtlich der Bewertung von PFAS-Rückständen in tierischen und pflanzlichen Lebensmitteln gibt es als verbindlich anwendbare Entscheidungsgrundlage bisher nur durch die Europäische Behörde für Lebensmittelsicherheit (EFSA) festgelegte, lebenslänglich tolerierbare tägliche Aufnahmemengen (sogenannte TDIs) für die langkettigen PFAS-Verbindungen PFOS und PFOA. Weitere TDIs oder rechtlich verbindliche Grenzwerte für kurzkettige PFAS-Verbindungen existieren bis dato nicht.

Aufgrund eines größeren PFAS-Kontaminationsfalles auf verschiedenen landwirtschaftlich genutzten Flächen sowie in Grund-, Oberflächen- und Trinkwasser in drei baden-württembergischen Landkreisen und dem bereits oben angeführten Fehlen rechtlich verbindlicher Grenzwerte hat das Ministerium für Ländlichen Raum und Verbraucherschutz (MLR) Baden-Württemberg eigene Beurteilungswerte für kurzkettige PFAS in pflanzlichen und tierischen Lebensmitteln berechnet und festgelegt. Diese für Lebensmittel duldbaren Werte dienen als Werkzeug für die amtliche Lebensmittelüberwachung und sollen in Kombination mit einem vorgeschalteten Vor-Ernte-Monitoring verhindern, dass mit PFAS belastete Lebensmittel in den Verkehr gelangen. Abgeleitet wurden diese baden-württembergischen Beurteilungswerte unter Berücksichtigung des Vorsorge- und Minimierungsgrundsatzes aus den durch das Umweltbundesamt (UBA) veröffentlichten und später fortgeschriebenen Leitwerten und Gesundheitlichen Orientierungswerten für PFAS in Trinkwasser. Sie berücksichtigen auch Faktoren wie die durchschnittliche Aufnahmemenge von Lebensmittel aus der Nationalen Verzehrstudie.

Die Faktoren, die die PFAS Aufnahme der unterschiedlichen Pflanzkulturen beeinflussen, sind sehr vielfältig und zum großen Teil weder ausreichend wissenschaftlich erforscht noch beeinflussbar. Exakte Vorhersagen zur PFAS-Aufnahme von Pflanzen bei bekannten Werten im Boden sind daher aktuell noch nicht möglich. Dennoch konnten auf der Basis der Daten des Vor-Ernte-Monitorings und der vorliegenden Versuchsergebnisse Anbauempfehlungen für die wichtigsten Pflanzkulturen abgeleitet werden.

Hinsichtlich weiterer Informationen und Darstellungen wird auf die Internetseite des Regierungspräsidiums Karlsruhe verwiesen: <https://rp.baden-wuerttemberg.de/rpk/Abt5/Ref541/PFAS/Seiten/default.aspx>

V.2 Bayern

Einleitung in Oberflächengewässer

Vor der Einleitung von PFAS-verunreinigtem Wasser in ein Oberflächengewässer ist ggf. eine Aufbereitung nach dem Stand der Technik durchzuführen. Bei der Einleitung von zur Sanierung gefördertem Grundwasser wird dieses im u. g. Beispiel als erfüllt angesehen, wenn der Reinigungsgrad für PFAS mindestens 90 % beträgt. Dabei sollte zusätzlich ein Wert von 200 ng/l für die Summe aller 13 nach DIN untersuchbaren PFAS, sowie zusätzlich ein Wert von 20 ng/l für PFOS als Einzelstoff im aufbereiteten Wasser eingehalten werden. Analog wurde dieses Vorgehen auch bei der Einleitung von PFAS-verunreinigtem Löschwasser eingesetzt.

Praxisbeispiel:

- Die PFOS-Konzentration eines betroffenen Gewässers liegt in der Größenordnung von ca. 6 ng/l, das entspricht bei MNQ von 131 m³/s einer Fracht von 786 µg/s
- Volumen des bei einem Schadensfall zutage gefördert und zu reinigenden Grundwassers: 50 m³/h = 14 Liter/s
- Reinigung z.B. über A-Kohle, Reinigungszielwerte: 200 ng/l PFAS gesamt, 20 ng/l PFOS
- Eine zusätzliche Fracht von 14 l/s x 20 ng/l = 280 ng/s = 0,28 µg/s für PFOS erhöht die Gesamtfracht im Gewässer von 786 µg/s auf 786,28 µg/s und führt rein rechnerisch zu einer Konzentrationserhöhung um ca. 0,002 ng/l. Dies liegt im Bereich der messtechnischen Schwankungsbreite und ist analytisch nicht nachweisbar.

Bauwasserhaltungen

Hinsichtlich einer Einleitung des gefördert Grundwassers in ein Oberflächengewässer gelten die immissionsbezogenen Anforderungen nach Kap.5.1.3 dieses Leitfadens. Vorgaben zur Beurteilung einer Verschlechterung macht die OGewV mit der Umweltqualitätsnorm für PFOS von 0,65 ng/l. Kurzzeitige Verschlechterungen eines Wasserkörpers können dann außer Betracht bleiben, wenn auf Grund einer Einzelfallprüfung davon auszugehen ist, dass sich der bisherige Zustand des Wasserkörpers kurzfristig wiederinstellt und die Annahme einer Verschlechterung unverhältnismäßig wäre. Danach sind bei jeder Bauwasserhaltung Dauer und Umfang (Wassermenge, PFAS-Konzentration bzw. -fracht) der Grundwasserableitung zu prüfen. Kleine Bauwasserhaltungen wie z. B. für einzelne Wohngebäude können daher ggf. anders bewertet werden als Wassereinleitungen aus langlaufenden Grundwassersanierungen oder längerfristigen Bauwasserhaltungen.

Falls Maßnahmen zur Sanierung des Grundwassers bereits unternommen oder in absehbarer Zeit in Angriff genommen werden (z. B. im Rahmen des bodenschutzrechtlichen Vollzugs) und dabei eine wesentlich effizientere Verminderung der Schadstofffracht im Vergleich zum Minderungseffekt durch Wasserentnahme und Reinigung bei einer zeitlich eng begrenzten einzelnen Bauwasserhaltung zu erwarten ist, so kann bei solchen Einzelprojekten auf eine Abreinigung vor einer Versickerung (Wiedereinleitung in das belastete Grundwasser) verzichtet werden.

V.3 Nordrhein-Westfalen

Einleitung von aufbereitetem Grundwasser in ein Oberflächengewässer

Nach einem ersten Hinweis der Wasserwerke Duisburg auf erhöhte PFAS-Konzentrationen in einer Vorfeldmessstelle einer Wassergewinnungsanlage wurden von der Stadt Düsseldorf seit 2007 systematisch risikoorientierte Grundwasseruntersuchungen auf PFAS im Düsseldorfer Norden durchgeführt. Der Untersuchungsumfang wurde kontinuierlich erweitert. Es konnten 4 Eintragsstellen auf dem Gelände am Düsseldorfer Flughafen identifiziert werden. Von diesen gehen Schadstoffbahnen im Grundwasser in Fließrichtung zum Rhein aus.

Im Rahmen von Beprobungen wurden in mehreren Messstellen Konzentrationen deutlich oberhalb des allgemeinen Vorsorgewertes von 100 ng/l PFAS, vereinzelt mit Werten bis zu 57.000 ng/l PFAS, nachgewiesen. Ein ähnliches Bild bietet sich bei den durch Abgrabungen entstandenen künstlichen Seen im Düsseldorfer Norden. Die vorhandenen Grundwasserverunreinigungen haben damit unmittelbaren Einfluss auf die Wasserqualität der Seen. In einem See wurden PFAS-Konzentrationen von bis zu maximal 5.000 ng/l gemessen.

Im Rahmen der PFAS-Grundwassersanierung am Flughafen Düsseldorf wird mit PFAS verunreinigtes Grundwasser über Ionenaustauscher und Aktivkohlefilter gereinigt. Anlagen zur hydraulischen Abschirmung der Eintragsquellen gingen zwischen November 2015 und Juni 2016 in Betrieb. Die notwendigen Entnahmemengen zur hydraulischen Fassung der Verunreinigungen im Bereich der Eintragsstellen wurden auf der Grundlage des Grundwassermodells der Stadt Düsseldorf ermittelt:

- Ehemaliges Feuerlöschübungsbecken: Entnahme von 14 m³/h aus 3 Förderbrunnen
- Feuerwache Nord: Entnahme von 18 m³/h aus 5 Förderbrunnen
- Unfallstelle Atlas Air: Entnahme von 22 m³/h aus 2 Förderbrunnen

Die stationären Anlagen sind wie folgt aufgebaut:

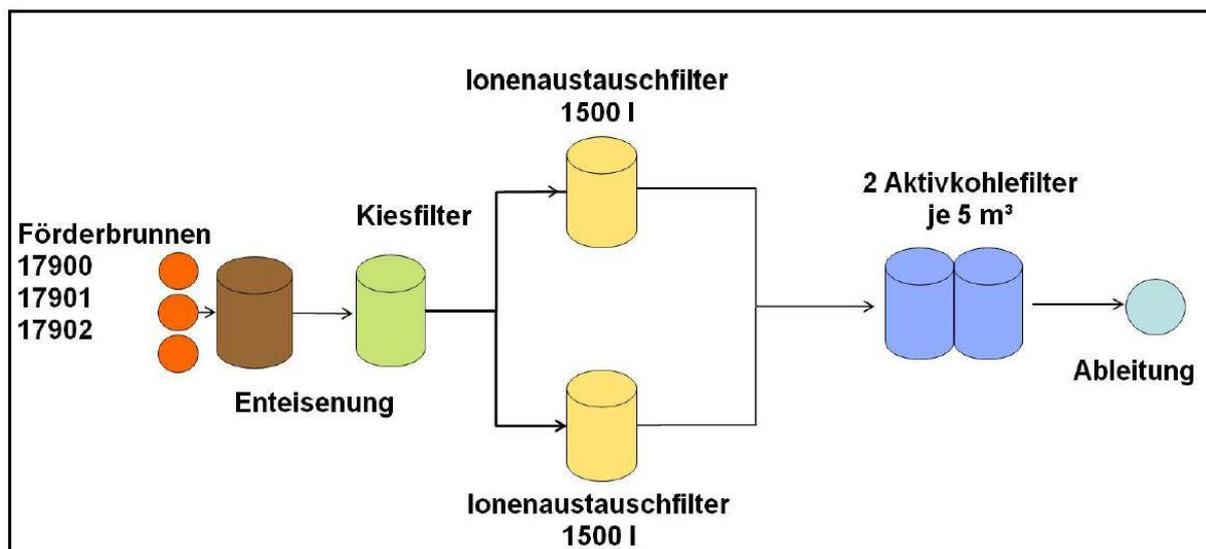


Abbildung A-3: Prinzip der Reinigungsanlage im Endausbau am ehemaligen Löschbecken

Das gereinigte Wasser der drei Sanierungsanlagen wird in ein Oberflächengewässer eingeleitet. Als Grundlage für die wasserrechtlichen Erlaubnisse wurden die folgenden wasserrechtlichen Anforderungen formuliert: Zur Sanierung ist das verunreinigte Grundwasser zu fördern, aufzubereiten und entweder direkt oder indirekt in ein Gewässer einzuleiten. Im vorliegenden Fall wird das Grundwasser nach Aufbereitung in ein oberirdisches Gewässer eingeleitet. Die Einleitung aufbereiteten Grundwassers in eine öffentliche oder private Kanalisation wird nicht präferiert, da in Kläranlagen ohne schadstoffspezifische Verfahrenstechnik keine gezielte PFAS-Reduzierung erfolgt, sondern durch die zusätzliche Wassermenge lediglich die hydraulische Belastung der Kläranlage mit allen damit verbundenen Folgeproblemen erhöht wird.

Auch eine Wiederversickerung aufbereiteten Grundwassers kommt im vorliegenden Fall nicht in Betracht. Nach § 48 Absatz 1 WHG darf eine Erlaubnis für das Einbringen und Einleiten von Stoffen in das Grundwasser nur erteilt werden, wenn eine nachteilige Veränderung der Wasserbeschaffenheit nicht zu besorgen ist. Da die Durchlässigkeit selbst in einem quartären Aquifer sehr unterschiedlich sein kann, lässt sich die zu erwartende Ausbreitung wiederversickernden Grundwassers im Untergrund sowohl in der ungesättigten als auch in der gesättigten Bodenzone nur begrenzt vorherbestimmen. Auch ist die Ausbreitung des wiederversickerten Grundwassers im Untergrund nicht steuerbar. Daher wird das Risiko gesehen, durch Wiederversickerung eine weitere Ausbreitung der Verunreinigung oder einen neuen Langzeitschaden zu verursachen.

Bei verunreinigtem Grundwasser handelt es sich nicht um Abwasser im engeren Sinne der wasserrechtlichen Regelungen nach § 54 WHG und 51 LWG NRW. Die für Abwassereinleitungen definierten Emissionsanforderungen könnten zwar als Erkenntnisquelle herangezogen werden. Da aber in der Abwasserverordnung keine konkreten Regelungen für PFAS enthalten sind, wird auf die per Erlass in NRW festgelegten Anforderungen für Direkt- und Indirekteinleiter sowie auf die allgemeinen Anforderungen Bezug genommen³⁴. Nach dem Erlass gelten für Abwasser als Orientierungswerte 300 ng/l für die Summe PFOS und PFOA sowie 1.000 ng/l für die Summe PFAS. Es ist zu beachten, dass die Immissionsanforderungen nach OGewV eingehalten werden und das Verschlechterungsverbot beachtet wird.

Nach der behördlichen Überwachung der Wasserbeschaffenheit des Kittelbachs oberhalb der vorgesehenen Einleitungsstelle liegen die Konzentrationen für PFAS (ab 2014 incl. 6:2 FTS) mehrheitlich unterhalb der Bestimmungsgrenze. Zu einzelnen Untersuchungszeitpunkten wurden Konzentrationen oberhalb der Bestimmungsgrenze festgestellt.

Der höchste bisher ermittelte Wert für PFAS betrug rund 200 ng/l.

Auf der Grundlage der Daten eines Pegels beträgt der mittlere Niedrigwasserabfluss MNQ 0,36 m³/s (1296 m³/h) und der Mittelwasserabfluss MQ 0,74 m³/s.

Berechnung der zulässigen Einleitkonzentrationen: $A_{Abw} \cdot C_{Abw} = MNQ \cdot C_{HG}$

MNQ = Mittlerer Niedrigwasserabfluss (Volumen/Zeit)

C_{HG} = Hintergrundkonzentration (Masse/Volumen)

A_{Abw} = Abwasserfluss (Volumen/Zeit) bzw. Volumenstrom Grundwasserbehandlungsanlagen

C_{Abw} = Stoffkonzentration im Abwasser (Masse/Volumen) bzw. Konzentration Abfluss aus Grundwasserbehandlung

³⁴ Erlass des Ministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen vom 16.06.2014, Az.: IV-7 096 004 0052

Berechnung der maximal zulässigen Summenkonzentration aller gemessenen PFAS im Abfluss aus der Grundwasserbehandlung (= Einleitung) unter der Voraussetzung, dass keine nennenswerte Erhöhung der Gehalte im Gewässer verursacht wird (Maßstab: Bestimmungsgrenze des Analysenverfahrens von 10 ng/l):

$$C_{Abw} = MNQ / A_{Abw} \cdot C_{HG} = 1296 \text{ m}^3/\text{h} / 54 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 10 \text{ ng/l}$$

$$C_{Abw.} = 240 \text{ ng/l (Summe aller gemessenen PFAS)}$$

gewählt: $C_{Abw.} = 200 \text{ ng/l}$

Berechnung der maximal zulässige PFOS-Konzentration im Abfluss aus der Grundwasserbehandlung (= Einleitung) unter der Voraussetzung, dass keine nennenswerte Erhöhung der Konzentrationen im Gewässer verursacht werden (Maßstab: UQN = 0,65 ng/l):

$$C_{Abw} = MNQ / A_{Abw} \cdot C_{HG} = 1296 \text{ m}^3/\text{h} / 54 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 0,65 \text{ ng/l}$$

$$C_{Abw} = 15,6 \text{ ng/l (PFOS)}$$

gewählt: doppelte Nachweisgrenze des Analysenverfahrens: $C_{Abw} = 20 \text{ ng/l}$

Unter der Annahme, dass aus den Sanierungsmaßnahmen des Flughafens insgesamt zunächst 54 m³/h aufbereitetes Grundwasser in die Gewässer eingeleitet werden sollen, würde bei Einhaltung einer Maximalkonzentration für die Summe PFAS von 200 ng/l eine Fracht von ca. 10.000 µg/h in das Gewässer eingeleitet. Daraus würde bei MNQ eine mittlere Konzentrationserhöhung von 10 ng/l resultieren. Diese Erhöhung würde somit im Bereich der Messgenauigkeit liegen. Durch die Einleitung würde daher keine nennenswerte Erhöhung der PFAS-Konzentrationen im Gewässer verursacht. Dem Verschlechterungsverbot könnte somit Rechnung getragen werden, wenn die o.g. Werte eingehalten werden.

Im gereinigten Grundwasser einzuhaltende PFAS-Werte bei Einleitung in ein oberirdisches Gewässer im konkreten Einzelfall:

Im konkreten Fall ist unter Bezug auf die Immissionsbetrachtung eine Aufbereitung des zur Sanierung geförderten Grundwassers vor Einleitung in ein oberirdisches Gewässer durchzuführen. Diese Anforderung wurde im vorliegenden Fall als erfüllt angesehen, wenn

- der Reinigungsgrad für PFAS > 90 % beträgt.

Um sicherzustellen, dass auch bei sehr hohen PFAS-Konzentrationen im geförderten Grundwasser, durch die Einleitung aus der Grundwassersanierung dem Verschlechterungsverbot Rechnung getragen wird, sind für die

- Summe der PFAS < 200 ng/l

im einzuleitenden Grundwasser nach Aufbereitung einzuhalten. Zusätzlich ist für PFOS die Umweltqualitätsnorm einzuhalten. Unter Berücksichtigung der derzeitigen analytischen Möglichkeiten wurde festgelegt, dass diese Anforderungen als eingehalten gelten, wenn

-
- für PFOS < 20 ng/l³⁵

im einzuleitenden Grundwasser eingehalten wird. Das Monitoring der Anlage sollte so konzipiert werden, dass Durchbrüche unter Einbeziehung des Zeitraums der Analytik rechtzeitig erkannt werden. Die Einhaltung des Verschlechterungsverbotes ist durch ein entsprechendes Monitoring zu überwachen. Darüber hinaus ist ein operatives Monitoring zur Erfassung der Schadstofffahne festzulegen.

³⁵ Entspricht der doppelten Nachweisgrenze von 10 ng/l, die standardmäßig erreicht werden kann.