



Bundesamt für Infrastruktur,
Umweltschutz und Dienstleistungen
der Bundeswehr



Bundesanstalt für
Immobilienaufgaben



PFC-Leitfaden für Liegenschaften des Bundes

Anhang A-8.2 der Baufachlichen Richtlinien Boden- und Grundwasserschutz

4. Auflage Oktober 2021

PFC-Leitfaden für Liegenschaften des Bundes

Anhang A-8.2 der Beruflichen Richtlinien Boden- und Grundwasserschutz

4. Auflage Oktober 2021

Inhalt

Abkürzungsverzeichnis	1
1 Veranlassung.....	3
2 Einleitung	5
3 Grundlagen.....	6
3.1 Eigenschaften	6
3.2 Umweltrelevanz und Toxizität	8
3.3 Haupteintragswege in die Umwelt.....	10
3.4 Beurteilungsgrundlagen.....	11
4 Wirkungspfade	15
4.1 Wirkungspfad Boden-Grundwasser.....	15
4.2 Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze	16
4.3 Wirkungspfad Boden-Mensch.....	16

5	Phase I – Erfassung und Erstbewertung KVF.....	17
5.1	Feuerwehr/Brandbekämpfung.....	18
5.2	Galvanikanlagen.....	22
5.3	Wäschereien.....	22
5.4	Entwässerungsanlagen.....	23
6	Phase II – Untersuchungen und Gefährdungsabschätzung	24
6.1	Untersuchungsstrategie.....	25
6.2	Probengewinnung	26
6.3	Probenaufbereitung und Analytik	28
6.4	Phase IIa – Orientierende Untersuchung.....	32
6.5	Phase IIb – Detailuntersuchung	34
6.6	Abschließende Gefährdungsabschätzung	35
7	Phase III – Sanierung	36
8	Umgang mit PFC-haltigem Boden- und Pflanzenmaterial	39
9	Literatur.....	43
	Anlagen.....	47

Abkürzungsverzeichnis

6: 2 di-PAP	6:2 Fluortelomerphosphatdiester	GFS	Geringfügigkeitsschwelle
6:2 FTS (H4PFOS)	1H,1H,2H,2H-Perfluorooctansulfonsäure	GOW	Gesundheitlicher Orientierungswert
AFFF	Aqueous Film Forming Foams = A3F - Wasserfilmbildende Schaumlöschmittel	HBM	Human-Biomonitoring
AFFF-AR	Aqueous Film Forming Foams Alcohol-Resistant - Alkoholresistente wasserfilmbildende Schaumlöschmittel	HPLC-MS/MS	Siehe Hochleistungs-Flüssigkeitschromatographie und massenspektrometrischer Detektion
ALARA	as low as reasonably achievable - so niedrig wie vernünftigerweise erreichbar	KF	Kontaminierte Fläche
AOF	Adsorbierbares organisch gebundenes Fluor	KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
BAIUDBw	Bundesamt für Infrastruktur, Umweltschutz und Dienstleistungen der Bundeswehr	KVF	Kontaminationsverdächtige Fläche
BAIUDBw KompZ	Kompetenzzentrum des Bundesamtes für Infrastruktur, Umweltschutz und Dienstleistungen der Bundeswehr	LABO	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz
BBodSchG	Bundes-Bodenschutzgesetz	LAK	Liegenschaftsbezogene Abwasserentsorgungskonzepte
BBodSchV	Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung	LAWA	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser
BFR BoGwS	Baufachliche Richtlinie Boden- und Grundwasserschutz	LFA	Leichtflüssigkeitsabscheider
BImA	Bundesanstalt für Immobilienaufgaben	NLBL	Niedersächsisches Landesamt für Bau und Liegenschaften
BMVg	Bundesministerium der Verteidigung	OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development - Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung
Bw	Bundeswehr	PAP	Polyfluorierte Alkylphosphate
DP	Direct-Push	PFAS	Per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen
EFSA	European Food Safety Authority - europäische Behörde für Lebensmittelsicherheit	PFBA	Perfluorbutansäure
EOF	Extrahierbares organisch gebundenes Fluor	PFBS	Perfluorbutansulfonsäure
FTOH	Fluortelomeralkohole	PFC	Per- und polyfluorierte Chemikalien
FTS	Fluortelomersulfonsäure	PFCA	Perfluorierte Carbonsäuren
FÜB	Feuerlöschübungsbecken	PFDA	Perfluordekansäure
		PFDODA	Perfluordodekansäure
		PFDODS	Perfluordodecansulfonsäure
		PFDS	Perfluordecansulfonsäure

PFHpA	Perfluorheptansäure	POP	persistant organic pollutant - persistenter organischer Schadstoff
PFHpS	Perfluorheptansulfonsäure, Perfluorheptansulfonsäure	QS	Quotientensumme
PFHxA	Perfluorhexansäure	REACH- Verordnung	Europäische Chemikalienverordnung zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe
PFHxS	Perfluorhexansulfonsäure	RRB	Regenrückhaltebecken
PFNA	Perfluornonansäure	SLB	Start-/Landebahnen
PFNS	Perfluornonansulfonsäure	TOP	total oxidizable precursor - gesamte oxidierbare Vorstufe
PFOA	Perfluorooctansäure, Perfluorooctansäure	TRGS	Technische Regeln für Gefahrstoffe
PFOS	Perfluorooctansulfonsäure	TWI	tolerable weekly intake - duldbare wöchentliche Aufnahmemenge
PFOSA	Perfluorooctansulfonamid	TWLW	Trinkwasser-Leitwerte
PFPeA	Perfluorpentansäure	UBA	Umweltbundesamt
PFPeS	Perfluorpentansulfonsäure	UMK	Umweltministerkonferenz
PFSA	Perfluorierte Sulfonsäuren	UQN	Umweltqualitätsnorm
PFT	Perfluorierte Tenside	WHG	Wasserhaushaltsgesetz
PFTTrDA	Perfluortridecansäure		
PFTTrDS	Perfluortridecansulfonsäure		
PFUnDA	Perfluorundecansäure		
PFUnDS	Perfluorundecansulfonsäure		
PNEC	predicted no effect concentration - vorhergesagte Konzentration ohne Wirkung		

1 Veranlassung

Zahlreiche, zum Teil sehr große PFC-Schadensfälle in Deutschland haben zu einer verstärkten öffentlichen Wahrnehmung dieser Stoffgruppe geführt. Auch auf den Bundesliegenschaften der Bundesanstalt für Immobilienaufgaben (BImA), einschließlich der von der Bundeswehr (Bw) genutzten Flächen – im Folgenden Bundesliegenschaften genannt – ist die Gruppe der per- und polyfluorierten Chemikalien (PFC) bei der Bearbeitung von Boden- und Gewässerkontaminationen im Rahmen der Kontaminationsbearbeitung von Bw und BImA in den Fokus gerückt.

Für die Stoffgruppe der PFC liegen nach wie vor wenige einheitliche Bewertungsgrundlagen vor. Einen ersten Vorschlag bundeseinheitlicher Bewertungsgrundlagen gibt es inzwischen mit dem „Leitfaden zur PFC-Bewertung – Empfehlungen für die bundeseinheitliche Bewertung von Boden- und Gewässerverunreinigungen sowie für die Entsorgung PFC-haltigen Bodenmaterials“ der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaften Bodenschutz und Wasser im Entwurf mit letztem Stand vom 27.04.2021 (LABO/LAWA, 2021).¹

Eine Bewertung dieser Stoffgruppe im Rahmen des Bundes-Bodenschutzgesetzes (BBodSchG) bzw. anderer Rechtsnormen aus dem Umweltrecht (Wasserhaushaltsgesetz (WHG), Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG)) stellt nach wie vor eine fachliche und insbesondere rechtliche Herausforderung im nachsorgenden Bodenschutz dar.

Das Bundesamt für Infrastruktur, Umweltschutz und Dienstleistungen der Bundeswehr (BAIUDBw) hatte die lange Zeit gänzlich fehlenden Bewertungsgrundlagen und die damit einhergehenden Herausforderungen zum Anlass genommen, einen PFC-Leitfaden zu entwickeln. Den für die Kontaminationsbearbeitung in der Bundeswehr zuständigen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern wurde damit eine erste Hilfestellung gegeben und die Vorgehensweise bei der Bearbeitung von PFC-Schadensfällen vereinheitlicht.

Die 1. Auflage des PFC-Leitfadens wurde vom Bundesamt für Infrastruktur, Umweltschutz und Dienstleistungen (BAIUDBw) im Mai 2015 herausgegeben. Im September 2016 erschien nach redaktioneller Überarbeitung die 2. Auflage.

¹ Auftraggeberin ist die Umweltministerkonferenz (UMK). Der Entwurf des Leitfadens wurde der UMK im Umlaufverfahren Nr. 25/2021 im Frühjahr 2021 vorgelegt, jedoch aufgrund von Einwänden der LAGA zu Kapitel 6 „Umgang mit PFC-haltigem Bodenmaterial“ ausgesetzt. Wann der Leitfaden der UMK zur Zustimmung und Empfehlung bundesweiter Anwendung erneut vorgelegt wird, ist nicht bekannt (Stand: August 2021).

Mit der 3. Auflage wurde ein vom BAIUDBw und der BImA als Grundeigentümerin der Bundesliegenschaften gemeinsam erarbeiteter Leitfadens veröffentlicht.

Die vorliegende 4. Auflage wurde vor allem notwendig, um aktuelle Veröffentlichungen und Beurteilungsgrundlagen zu berücksichtigen, Vorgaben bei den Untersuchungen zu konkretisieren und Erfahrungen aus der Bearbeitung von Liegenschaften aufzugreifen. Gegenüber der 3. Auflage vom Juni 2018 erfolgte eine umfangreiche Umstrukturierung der Inhalte.

Diese Auflage sowie künftige Fortschreibungen dienen der einheitlichen Bearbeitung von PFC-Kontaminationen auf Bundesliegenschaften.

Der Leitfaden wird in seiner jeweils aktuellen Form den Bundesländern zur Ergänzung eigener Regelwerke bzw. zur Anwendung empfohlen. Für Liegenschaften der Gaststreitkräfte gilt der PFC-Leitfaden nur, soweit die Anwendbarkeit mit den Gaststreitkräften ausdrücklich vereinbart wurde.

Als Anhang 8.2 der Baufachlichen Richtlinien Boden- und Grundwasserschutz (BFR BoGwS) werden Aktualisierungen dieses Leitfadens (auch kapitelweise), beginnend mit der 4. Auflage, ausschließlich online über die Leitstelle des Bundes zur Verfügung gestellt (<https://www.leitstelle-des-bundes.de> bzw. <https://www.bfr-bogws.de>).

2 Einleitung

Per- und polyfluorierte Chemikalien, kurz PFC, sind künstliche chemische Verbindungen, die mittlerweile ubiquitär vorhanden sind. Neben PFC sind auch die Bezeichnungen PFT (perfluorierte Tenside) und PFAS (per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen, engl.: per- and polyfluoroalkyl substances) gebräuchlich. Dabei ist zu berücksichtigen, dass trotz teils synonyme Verwendung der Bezeichnungen nicht grundsätzlich die gleiche Schadstoffgruppe gemeint ist. Im vorliegenden Leitfaden wird für die Gruppe der per- und polyfluorierten Chemikalien die Abkürzung PFC verwendet.

Nach derzeitigem Kenntnisstand gilt für alle PFC, dass sie in perfluorierter Form biotisch und abiotisch nicht oder nur sehr schlecht abbaubar sind und sich somit in den Umweltmedien anreichern können. Vom Menschen z.B. über das Trinkwasser oder belastete Lebensmittel aufgenommene PFC-Verbindungen stellen aufgrund ihrer gesundheitsschädigenden Wirkung somit eine Gefahr dar.

Neben zahlreichen Anwendungsmöglichkeiten sind bzw. waren PFC in bestimmten Schaumlöschmitteln enthalten. Daher können insbesondere auf militärisch genutzten bzw. vorgeutzten Liegenschaften mit eigenen Feuerwehren (z.B. Flugplätze und Übungsplätze) sowie auf Liegenschaften, auf denen externe Feuerwehren üben, geübt haben und/oder es zu Löscheinsätzen kam, PFC-Kontaminationen des Untergrunds nicht ausgeschlossen werden.

Weitere Eintragsquellen speziell auf aktuell oder ehemals militärisch von der Bw bzw. den Gaststreitkräften genutzten Liegenschaften sind ebenfalls nicht gänzlich auszuschließen. Zu nennen sind z.B. Wäschereien oder galvanische Anlagen. PFC-Bodenkontaminationen ohne direkten

räumlichen Bezug zu einer typischen Eintragsquelle können zudem infolge von liegenschafts-internen Bodenumlagerungen z.B. im Zuge von Baumaßnahmen verursacht worden sein.

Unabhängig davon, ob Liegenschaften aktiv von der Bw oder den Gaststreitkräften genutzt werden oder die Nutzung bereits aufgegeben wurde, werden sie im Folgenden als militärisch genutzte Liegenschaften bezeichnet.

Der Leitfaden liefert eine Einführung in die Stoffgruppe der PFC und enthält Vorgaben für eine einheitliche Untersuchungsstrategie von PFC-spezifischen kontaminationsverdächtigen Flächen bzw. kontaminierten Flächen auf Bundesliegenschaften. Unter Beachtung der länderspezifischen Handlungsanweisungen und Bewertungsmaßstäbe wurde ein strukturierter, auf allen Liegenschaften praktikabler und einheitlicher Untersuchungsansatz abgeleitet.

Im Hinblick auf aktuelle Veröffentlichungen, die bei der vorliegenden 4. Auflage zu berücksichtigen waren, sind insbesondere die UBA-Veröffentlichung zum Sanierungsmanagement („Sanierungsmanagement für lokale und flächenhafte PFAS-Kontaminationen – Abschlussbericht“, UBA 2020b) und der Entwurf vom 27.04.2021 zu bundeseinheitlichen Leitlinien („Leitfaden zur PFC-Bewertung – Empfehlung für die bundeseinheitliche Bewertung von Boden- und Gewässerunreinigungen sowie für die Entsorgung PFC-haltigen Bodenmaterials“ LABO/LAWA – Bund/Länder Arbeitsgruppe PFC, 2021) zu nennen.

Der vorliegende Leitfaden ist als Anhang A-8.2 Bestandteil der Beruflichen Richtlinien Boden- und Grundwasserschutz (BFR BoGwS) und stellt den Wissensstand von Oktober 2021 dar.

3 Grundlagen

Per- und polyfluorierte Chemikalien sind synthetische Stoffe, die nicht natürlich vorkommen. Seit den späten 1940er/frühen 1950er Jahren (Richter et al., 2018) hat sich die Fluorchemie in einer Vielzahl von Anwendungsgebieten etabliert. Seit den 1970er Jahren werden Fluorverbindungen auch verbreitet in Schaumlöschmitteln eingesetzt. Inzwischen umfasst die Stoffgruppe PFC mehrere tausend Einzelsubstanzen (OECD, 2020).

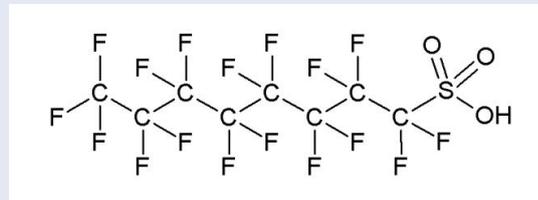
3.1 Eigenschaften

PFC-Verbindungen bestehen aus einer unpolaren, also hydrophoben bzw. wasserabstoßenden Kohlenstoffkette und einer polaren, also hydrophilen bzw. wasseranziehenden funktionellen Gruppe. Bei einer vollständigen Substitution der Wasserstoffatome durch Fluoratome spricht man von perfluorierten Verbindungen. Bei einem nur

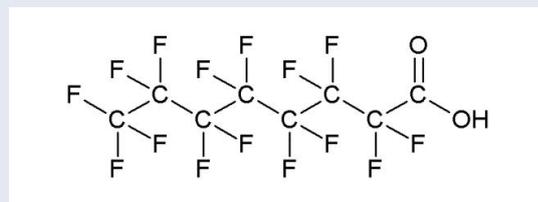
teilweisen Ersatz der Wasserstoffatome durch Fluoratome handelt es sich um polyfluorierte PFC-Verbindungen.

Die PFC werden im Wesentlichen in drei Untergruppen gegliedert (siehe Abbildung 1):

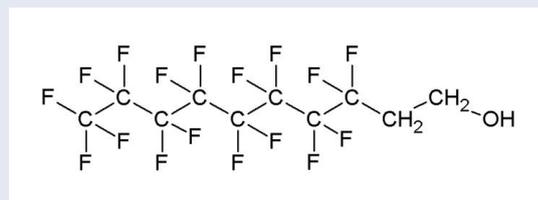
- 1 **Perfluorierte Sulfonsäuren (PFSA)** mit einer Sulfonsäure als funktioneller Gruppe. PFC mit einer Sulfonsäure sind durch die Endung „S“ gekennzeichnet, bekanntester Vertreter ist Perfluoroctansulfonsäure (PFOS).
- 2 **Perfluorierte Carbonsäuren (PFCA)** mit einer Carbonsäure als funktioneller Gruppe. PFC mit einer Carbonsäure sind durch die Endung „A“ gekennzeichnet, bekanntester Vertreter ist Perfluoroctansäure (PFOA).
- 3 **Fluortelomeralkohole (FTOH)** mit einer Alkylgruppe aus fluorierten und nicht fluorierten Kohlenstoffatomen, bekanntester Vertreter ist 8:2 FTOH.



Beispiel: Strukturformel von PFOS



Beispiel: Strukturformel von PFOA



Beispiel: Strukturformel von 8:2-Fluortelomeralkohol (8:2 FTOH)

Abbildung 1: Untergruppen per- und polyfluorierter Verbindungen und Beispiele für Strukturformeln

Neben den drei in Abbildung 1 aufgeführten Untergruppen gibt es, insbesondere bei den polyfluorierten Verbindungen, weitere PFC-Untergruppen (vgl. UBA, 2020b). Dies sind unter anderem die polyfluorierten Sulfonsäuren bzw. Fluortelomersulfonsäuren (z.B. 6:2 FTS bzw. H4PFOS), polyfluorierete Verbindungen wie die Polyfluoralkylbetaine (z.B. Capstone A) und polyfluorierte Alkylphosphate (PAP z.B. 6:2 di-PAP). Polyfluorierte Sulfonsäuren und Polyfluoralkylbetaine werden als PFOS-Ersatzstoffe in Schaumlöschmitteln verwendet. Polyfluorierte Alkylphosphate sind primär im Zusammenhang mit Einträgen aus der Papierindustrie bekannt.

Die Unterscheidung der PFC-Gruppen erfolgt anhand der nicht fluorierten funktionellen Gruppe. Bei perfluorierten Sulfonsäuren (PFSA) und perfluorierten Carbonsäuren (PFCA) ist diese als Säure ausgebildet. Bei den Fluortelomeralkoholen (FTOH) handelt es sich um polyfluorierte Verbindungen mit einem Alkohol als funktionelle Gruppe.

Die Fluortelomeralkohole bilden mit einer Vielzahl weiterer polyfluorierter Verbindungen die Gruppe der sogenannten Precursor (Vorläuferverbindungen). Bei den Precursor handelt es sich um solche PFC-Verbindungen, die unter bestimmten Rahmenbedingungen zu perfluorierten Verbindungen transformiert werden können. Die so entstehenden perfluorierten Verbindungen bilden

dann stabile Endprodukte des Umwandlungsprozesses.

Aufgrund unterschiedlicher chemischer Eigenschaften wird zwischen kurzkettigen und langkettigen PFC-Verbindungen unterschieden (vgl. Tabelle 1). Die kurzkettigen PFC-Verbindungen gelten als besonders hydrophil und weniger adsorptiv im Vergleich zu langkettigen PFC-Verbindungen. Langkettige PFC-Verbindungen werden dagegen etwas besser am Feststoff gebunden und sind i.d.R. immobilere als kurzkettige Verbindungen. Weiterhin gelten Perfluorcarbonsäuren gegenüber Perfluorsulfonsäuren als relativ mobiler (bei gleicher Anzahl an Kohlenstoffatomen).

Bis auf die Gruppe der Fluortelomeralkohole weisen PFC einen eher geringen Dampfdruck auf und sind somit als gering flüchtig einzustufen (LANUV NRW, 2011; LABO, 2015). In Ausnahmefällen, z.B. bei der Produktion von PFOA, liegt die Substanz in nicht-dissoziierter Form vor. In dieser Form weist die an sich gering flüchtige Substanz eine erhöhte Flüchtigkeit auf (UBA, 2020b, Anhang A).

Der spezielle Aufbau und die fluorierte Kohlenstoffkette bedingen die wasser-, öl-, fett- und schmutzabweisenden Eigenschaften der PFC. Durch die geringe Oberflächenspannung der PFC können diese viele Oberflächen sehr gut benetzen. Gleichzeitig sind Vertreter der PFC hitzebeständig und chemisch stabil. Gerade diese Eigenschaften

Tabelle 1: Differenzierung zwischen PFSA und PFCA bei kurz- und langkettigen Verbindungen (Quelle: UBA 2017b)

PFSA/PFCA	Verbindung	Anzahl an vollfluorierten C-Atomen	Beispiel
PFSA	langkettig	≥ 6	Perfluoroctansulfonsäure (PFOS)
	kurzkettig	< 6	Perfluorbutansulfonsäure (PFBS)
PFCA	langkettig	≥ 7	Perfluoroctansäure (PFOA)
	kurzkettig	< 7	Perfluorbutansäure (PFBA)

3.2 Umweltrelevanz und Toxizität

machen sie zu gerne und vielfältig eingesetzten Substanzen. Vielfältige Anwendungsgebiete sind in der Metall-, Papier-, Glas- und Erdölindustrie zu finden. PFC-Verbindungen sind in Alltagsgegenständen wie Einweg-Kaffeetassen, Pizzakartons, Outdoorbekleidung und Teflonpfannen enthalten (Eurofluor, 2018). Bei der Brandbekämpfung werden PFC aufgrund ihrer Eigenschaften in Schaumlöschmitteln eingesetzt. Ein Eintrag von PFC in die Umwelt kann bei der Herstellung, der Verwendung und der Entsorgung solcher Produkte erfolgen (siehe hierzu Kapitel 3.3).

Eine sehr umfangreiche Beschreibung der Stoffeigenschaften von PFC findet sich in Anhang A des Abschlussberichts des UBA zum „Sanierungsmanagement für lokale und flächenhafte PFAS-Kontaminationen“ (137/2020).

Die in Kapitel 3.1 erläuterten Eigenschaften machen PFC zu besonders kritischen Umweltschadstoffen. Insbesondere die perfluorierten Verbindungen sind biotisch durch Mikroorganismen und abiotisch durch chemische Umwandlungsprozesse nahezu nicht abbaubar bzw. mineralisierbar. Dadurch kommt es zu Anreicherungen dieser Verbindungen in Böden, Wasser, Mensch und Tier, also in der Umwelt.

PFC-Verbindungen können ab einer Temperatur von ca. 600°C in die Gasphase übergehen, eine vollständige Mineralisation findet erst ab einem Temperaturniveau > 1.100°C statt (Schultz et al., 2003).

Seit dem 27.12.2006 gilt auf Grundlage der EU-Richtlinie 2006/122/EG ein EU-weites Stoffverbot für Perfluorooctansulfonsäure (PFOS), das jedoch Ausnahmen zulässt. In nationales Recht wurde es in Deutschland in der Chemikalienverbotsverordnung und der Gefahrstoffverordnung umgesetzt (siehe dazu: BGBl Nr. 52 25/10/2007 Nr. 2382).

Gemäß der Verordnung der europäischen Kommission von Juni 2017 (2017/1000) unterliegen auch die Herstellung, das Inverkehrbringen, die Verwendung und der Import von Perfluorooctansäure (PFOA), ihrer Salze und Vorläuferbindungen (Precursor) nach REACH ab 2020 entsprechenden Beschränkungen (EU, 2017). Demnach darf PFOA nach dem 04. Juli 2020 EU-weit weder hergestellt noch in Verkehr gebracht werden.

Für PFOS (EU-Verordnung 2019/1021 (EU, 2019)) als auch für PFOA (EU-Verordnung 2017/1000 (EU, 2017)) wurden Ausnahmeregelungen in Form von (Konzentrations-) Beschränkungen erlassen.

PFOA (seit 2010) und PFOS (seit 2017) sind bereits seit einigen Jahren gemäß Stockholm-Konvention (POP, 2017) als langlebige organische Schadstoffe (persistent organic pollutant, POP) eingestuft. Als weitere PFC-Verbindungen stehen PFHxS und PFBS auf der Kandidatenliste.

Trotz ihrer vielfachen Anwendung in verschiedensten Produkten ist ein Großteil der PFC-Einstoffe und ihre jeweiligen Auswirkungen auf den Menschen und die Umwelt bis heute noch vergleichsweise wenig erforscht. Seit einigen Jahren wird daher weltweit versucht, die Wissenslücken bezüglich PFC durch Studien und Forschungsvorhaben zu schließen.

Für die Beurteilung der Ökotoxikologie wird der aus Toxizitätsuntersuchungen abgeleitete PNEC-Wert (predicted no effect concentration; vorhergesagte Konzentration ohne Wirkung) verwendet. Von der LAWA-LABO-Kleingruppe wurden für weitere acht Substanzen Werte abgeleitet, ergänzend zu den offiziell von der europäischen bzw. internationalen Chemikalienbewertung veröffentlichten PNEC-Werten für PFOS und PFOA (LAWA, 2017b, S. 12).

Die Datenlage zur Beurteilung der humantoxikologischen Wirkung von PFC ist für andere Verbindungen als PFOS und PFOA nach wie vor recht gering (EFSA, 2020; UBA, 2020b). Vom UBA wurde im Januar 2020 ein Vorschlag zur Ableitung von HBM-Werten (Human Biomonitoring), toxikologisch begründete Beurteilungswerte für PFOA und PFOS, vorgelegt (UBA, 2020a). Kritisch bewertet wird hier insbesondere das Anreicherungs-potential von PFC im menschlichen Körper (UBA, 2020a). In einer aktuellen Veröffentlichung der europäischen Behörde für Lebensmittelsicherheit (EFSA, 2020) wurde der betrachtete Parameterumfang von PFOS und PFOA um die Parameter PFNA und PFHxS auf vier erweitert. Basierend auf dieser Parametergruppe leitete die EFSA eine aktuelle TWI (tolerable weekly intake; duldbare wöchentliche Aufnahmemenge) für die Summe dieser vier Substanzen von 4,4 ng/kg Körpergewicht pro Woche ab.

Im Ergebnis verschiedenster Studien liegen Hinweise auf folgende gesundheitliche Auswirkungen von PFC auf die menschliche Gesundheit vor (UBA, 2020b):

- Verminderte Immunantwort auf Impfungen
- Erhöhter Cholesterinspiegel
- Erhöhter Harnsäurespiegel
- Reduzierte Nierenfunktion
- Beeinflussung der Schilddrüsenhormone und Sexualhormone
- Verringerung der Fruchtbarkeit bei Frauen
- Späteres Alter für den Beginn der Menstruation bei Mädchen, frühere Menopause
- Geringeres Geburtsgewicht von Säuglingen
- PFOA gilt als potentiell kanzerogen

3.3 Haupteintragswege in die Umwelt

Der Eintrag von PFC in gelöster Form z.B. in Löschschäumen sowie über „Auswaschungen“ aus PFC-haltigen Produkten stellt den Haupteintragsweg der PFC in die Umwelt dar. Dabei ist der Einsatz von PFC in Löschschäumen die Hauptursache für PFC-Kontaminationen auf Bundesliegenschaften.

Darüber hinaus können PFC auch in erheblichen Mengen über das Abwasser in Klärschlämme verfrachtet werden. Findet PFC-haltiger Klärschlamm dann Anwendung als Dünger können großflächig landwirtschaftliche Flächen durch PFC kontaminiert werden.

Zwei bundesweit bekannte großflächigere Schäden resultieren aus dem Aufbringen von vermeintlichen Bodenverbessern auf landwirtschaftliche Nutzflächen. Es stellte sich heraus, dass das Material PFC-kontaminierte Industrieabfälle bzw. Papierschlämme enthielt (Brilon-Scharfenberg, Rastatt/Baden-Baden).

Eine atmosphärische Deposition von PFC ist trotz der eher geringen Flüchtigkeit der meisten Substanzen grundsätzlich nicht auszuschließen (UBA, 2020c). Einträge über atmosphärische Deposition z.B. im Umfeld von PFOA produzierendem Gewerbe können zu großflächigen PFC-Kontaminationen führen (Beispiel Gendorf). Auch neigen PFC dazu, sich an Partikel wie z.B. Stäube/Feinstäube zu binden, wodurch es zu einem Nachweis von PFC z.B. in Waldböden auch in großer Entfernung von Industrieanlagen kommen kann.

3.4 Beurteilungsgrundlagen

Lange Zeit gab es keine bundeseinheitlichen Maßstäbe zur PFC-Bewertung. Mit Stand vom 27. April 2021 wurden mit der Entwurfsfassung des Leitfadens zur PFC-Bewertung erste Empfehlungen für die bundeseinheitliche Bewertung von Boden- und Gewässerverunreinigungen (LABO/LAWA, 2021) auf der Internetseite des Umweltbundesamts veröffentlicht. Damit gibt es zwar noch keine rechtlich verbindlichen Prüf- oder Maßnahmenwerte gemäß BBodSchG oder BBodSchV, jedoch ist ein erster Grundstein für eine Vereinheitlichung der Bearbeitung von PFC-Schadensfällen gelegt.

Offen ist, wie die einzelnen Länder die Empfehlungen der LABO/LAWA 2021 nach dem noch ausstehenden Beschluss der UMK umsetzen werden. Die Bundesländer Baden-Württemberg, Bayern, Nordrhein-Westfalen und Rheinland-Pfalz hatten zuvor schon eigene Bewertungsmaßstäbe in unterschiedlicher Form (Leitfäden, Erlasse, Online-Veröffentlichungen) herausgegeben. In Thüringen wurden fachliche Hinweise zum Umgang mit PFC-Kontaminationen veröffentlicht.

Solange keine gesetzlichen Regelungen vorliegen, sind grundsätzlich die landesspezifischen Regelungen als Vorgaben der Behörden bei der Bearbeitung zu beachten.

In Anlage 1 werden die wesentlichen Beurteilungswerte aus Richtlinien, Verordnungen und Regelungen der EU, aus Bundes- und Landesbehörden sowie Fachorganisationen tabellarisch zur Orientierung zusammengefasst. Diese stellen eine momentane Bestandsaufnahme dar. Die Aufstellung hat keinen Anspruch auf Vollständigkeit und muss hinsichtlich ihrer Aktualität und Anwendbarkeit stets überprüft werden.

Grundwasser

Von der LAWA-LABO-Kleingruppe PFC wurden 13 PFC-Verbindungen als prioritär eingestuft. Davon konnten für sieben PFC-Einzelstoffe Geringfügigkeitsschwellenwerte für das Grundwasser abgeleitet werden (LAWA, 2017b). Die abgeleiteten Werte sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Die Geringfügigkeitsschwelle (GFS) ist u.a. definiert als die Konzentration eines anthropogen eingetragenen Stoffs, bis zu der eine räumlich begrenzte Änderung der chemischen Beschaffenheit des Grundwassers als geringfügig einzustufen ist (LAWA, 2017a). Die Festlegung von GFS-Werten beruht grundsätzlich auf humantoxikologischen (Qualitätsanforderungen für das Trinkwasser) und ökotoxikologischen Bewertungen. Es wird jeweils der niedrigere Wert als GFS-Wert übernommen.

Bei der Ableitung der GFS-Werte zeigte sich, dass das Schutzgut Trinkwasser (humantoxikologische Ableitung) - zumeist deutlich - empfindlicher zu beurteilen ist als das Schutzgut der aquatischen Lebensgemeinschaften (ökotoxikologische Ableitung) (LAWA, 2017b).

Für die sechs anderen prioritären PFC-Einzelverbindungen ist die Datenlage zur Ableitung von GFS-Werten nicht ausreichend, weshalb bisher nur gesundheitliche Orientierungswerte (GOW) angegeben werden können.

Ein GOW wird festgelegt, wenn die Datenbasis für die Bewertung eines Stoffs oder einer Stoffsumme noch zu gering ist. Er ist wissenschaftlich unverbindlicher als ein Leitwert. Je geringer die Kenntnisse zu den toxischen Wirkungen eines Stoffs sind, desto niedriger fällt der GOW aus (UBA, 2011).

Tabelle 2: Anlassbezogen zusätzlich nach LAWA-LABO-Kleingruppe PFC unter anderem zu untersuchende PFC

	Stoffname	Abkürzung	GFS / TWLW [µg/L]	GOW [µg/L]	EU-TW* (2020)	
13 prioritäre Parameter	Perfluorbutansäure a)	PFBA	10		+	
	Perfluorpentansäure	PFPeA		3,0	+	
	Perfluorhexansäure a)	PFHxA	6		+	
	Perfluorheptansäure	PFHpA		0,3	+	
	Perfluoroctansäure a)	PFOA	0,1		+	
	Perfluornonansäure a)	PFNA	0,06		+	
	Perfluordekansäure	PFDA		0,1	+	
	Perfluorbutansulfonsäure a)	PFBS	6		+	
	Perfluorhexansulfonsäure a)	PFHxS	0,1		+	
	Perfluorheptansulfonsäure	PFHpS		0,3	+	
	Perfluoroctansulfonsäure a)	PFOS	0,1		+	
	1H,1H,2H,2H-Perfluoroctansulfonsäure	6:2 FTS (H4PFOS)			0,1	
	Perfluoroctansulfonamid	PFOSA			0,1	

	Stoffname	Abkürzung	GFS / TWLW [µg/L]	GOW [µg/L]	EU-TW* (2020)
Weitere PFC-Parameter	Perfluorundecansäure c)	PFU _n A			+
	Perfluordodecansäure c)	PFD _o A			+
	Perfluortridecansäure c)	PFT _r A			+
	Perfluortetradecansäure c)	PFT _e A			
	Perfluorpentansulfonsäure	PFP _e S		1,0 d)	+
	Perfluornonansulfonsäure	PFNS			+
	Perfluordecansulfonsäure c)	PFDS			+
	Perfluorundecansulfonsäure	PFU _n S			+
	Perfluordodecansulfonsäure	PFD _o S			+
	Perfluortridecansulfonsäure	PFT _r S			+
	2H,2H,3H,3H-Perfluorundecansäure c)	H4PFU _n A			
	7H-Perfluorheptansäure c)	HPFH _p A			
	2H,2H-Perfluordecansäure c)	8:2 FTA (H2PFDA)			
	1H,1H,2H,2H-Polyfluorhexansulfonsäure c)	4:2 FTSA (H4PFH _x S)			
	1H,1H,2H,2H-Polyfluordecansulfonsäure c)	8:2 FTSA (H4PFDS)			
	weitere, anlassbezogen untersuchte PFC mit R1-(CF₂)_n-R2, n>3²			0,1 b)	

* zur Berechnung „Summe der PFAS“ gem. EU Trinkwasserrichtlinie 2020 (EU, 2020)

a) Eingang Quotientensumme

b) Ableitung hilfsweise gem. ALARA-Prinzip³ nach LABO/LAWA 2021

c) Anlassbezogen nach LAWA-LABO-Kleingruppe PFC (2017)

d) aus Liste „listegowstoffeohnepsm-20200728-homepage_kopie auf datiert mit Stand: Juli 2020“ auf www.umweltbundesamt.de (Abruf am 15.07.2021)

Die von der LABO-LAWA-Kleingruppe erarbeiteten GFS-Werte und die GOW wurden auch von verschiedenen Bundesländern aufgenommen und in Länderpapieren umgesetzt.

Bei der Bewertung der Grundwasserbeschaffenheit gilt, dass aufgrund der humantoxikologischen Ableitung der GFS-Werte für die sieben

PFC-Einzelverbindungen bei ihrer Überschreitung eine schädliche Veränderung der Grundwasserbeschaffenheit vorliegt. Wird eine Überschreitung des GOW festgestellt, ist aufgrund des orientierenden Charakters dieses Wertes eine nachteilige Veränderung der Grundwasserbeschaffenheit anzunehmen (LABO/LAWA, 2021). Neben der Einzelstoffbeurteilung unter Zuhilfe-

2 R1 und R2 kennzeichnen den nicht fluorierten Teil der Verbindung, n ist die Anzahl vollfluorierter Kohlenstoffverbindungen

3 As Low As Reasonably Achievable – so niedrig wie vernünftigerweise erreichbar; Prinzip aus dem Strahlenschutz übertragen auf schädliche Einflüsse der PFC

nahme der GFS-Werte wird auch die Summenbetrachtung als Quotientensumme⁴ (QS) als Bewertungsindex im Grundwasser diskutiert. Die Quotientensumme gilt als ein Mittel der Risikobewertung bei Mehrstoffbelastungen entsprechend der TRGS 402. Bei der Berechnung der Quotientensumme werden die Konzentrationen der Einzelstoffe, für die ein GFS-Wert vorliegt, auf diesen relativiert und die einzelnen Quotienten addiert.

Eine generelle Empfehlung zur Verwendung der QS gibt es nicht (vgl. LABO/LAWA, 2021), jedoch findet diese als Bewertungsindex in Rheinland-Pfalz (LfU RP, 2017) Anwendung. In Bayern wurde die QS zwar zunächst eingeführt (LFU BY, 2017), jedoch 2018 nicht mehr vollumfänglich als Bewertungskriterium empfohlen (LFU BY, 2018)⁵.

Die Berechnung der QS als Beurteilungsgrundlage der Grundwasserbeschaffenheit ist höchstens dann sinnvoll, wenn mehrere PFC-Verbindungen (Mehrstoffbelastung) im Grundwasser nachgewiesen wurden (anderenfalls reicht der GFS-Wert-Abgleich) und keine GFS-Wert-Überschreitungen festgestellt werden (da sonst zwangsläufig $QS > 1$).

Überschreitet die QS den Wert von 1, ist eine schädliche Grundwasseränderung zu vermuten. Inwiefern sich aus einer Überschreitung weiterer Handlungsbedarf ergibt, ist anhand der einzelfallspezifischen Bedingungen zu beurteilen (LABO/LAWA, 2021).

Boden

Für die Beurteilung von PFC-Konzentrationen im Boden sind in Ermangelung spezifischer Werte die für das Grundwasser abgeleiteten GFS-Werte als Prüfwerte für das Sickerwasser am Ort der Beurteilung zur Bewertung heranzuziehen (LABO/LAWA, 2021). In der geplanten Neufassung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung sind die GFS-Werte als Prüfwerte für den Wirkungspfad Boden-Grundwasser vorgesehen (Deutscher Bundestag, 2020). Dabei sind die aus dem 2:1-Eluat (vgl. Kapitel 6.3) ermittelten PFC-Konzentrationen zugrunde zu legen. Die GFS-Werte finden dann als Prüfkriterien für den Ort der Probenahme Anwendung. Die Werte am Ort der Probenahme sind mittels Sickerwasserprognose an den Ort der Beurteilung zu übertragen.

Bei einer Überschreitung des GFS-Wertes im Boden-Eluat am Ort der Beurteilung liegt ein Verdacht auf eine schädliche Bodenveränderung oder Altlast nach BBodSchG vor und es sind weitere Untersuchungen/Erkundungen durchzuführen (LABO/LAWA, 2021). Bei der Beurteilung des Wirkungspfades Boden-Grundwasser ist die QS nicht anzuwenden, da sie einen Vorsorgewert bei der Risikobewertung der Trinkwasserbeschaffenheit darstellt (LABO/LAWA, 2021).

Bei einer Unterschreitung des GFS-Wertes im 2:1-Eluat am Ort der Beurteilung ist ein Gefahrenverdacht, zumindest für den jeweiligen Einzelstoff, ausgeräumt (LABO/LAWA, 2021).

4 Bei der Quotientensumme handelt es sich um eine Summe, bei der die jeweiligen Konzentrationen der Einzelsubstanzen mit Gewichtung auf Grundlage der GFS-Werte addiert sind, es gilt $QS = \sum_{i=1}^n \frac{cPFC_i}{GFS_i}$ mit $cPFC_i$ = Konzentration des PFC-Einzelstoffs i , GFS_i = GFS-Wert des PFC-Einzelstoffs i

GOW werden nicht berücksichtigt; nur zur Anwendung im Grundwasserbereich;

$QS > 1$ GW-Verunreinigung ist zu vermuten (LABO/LAWA 2021); bei $cPFC > GFS$ -Wert $QS > 1$

5 LfU BY, 2018: „Aufgrund derzeit laufender Fachdiskussionen sind die dort angeführten Regelungen [(LfU BY, 2017)] für die Quotientensummen bis auf Weiteres nicht als zusätzliches Kriterium für die Einhaltung von Geringfügigkeitsschwellen (GFS) und auch nicht als Entscheidungskriterium für Sanierungsmaßnahmen anzuwenden. Sie sollen lediglich als zusätzliche Bewertungshilfe für den Einzelfall dienen.“

Exkurs Bewertungsmaßstäbe Trinkwasser

Für die sieben PFC-Verbindungen, für die GFS-Werte abgeleitet sind, wurde die Datenlage von der Trinkwasserkommission (UBA) als ausreichend anerkannt, um die GFS-Werte auch als Trinkwasser-Leitwerte (TW_{LW}) nach den Kriterien der Trinkwasserverordnung heranzuziehen.

TW_{LW} bezeichnen lebenslang duldbare Konzentrationen eines Stoffs oder einer Stoffgruppe. Diese können bei einer vollständigen Bewertbarkeit des toxischen Potenzials festgelegt werden.

Seit Dezember 2020 liegen mit der Neufassung der EU-Trinkwasserrichtlinie – Richtlinie (EU) 2020/2184 (EU, 2020) noch in nationales Recht umzusetzende Bewertungsgrößen für Trinkwasser für die Parameter „PFAS gesamt“⁶ von 0,5 µg/L und „Summe der PFAS“⁷ von 0,1 µg/L vor (vgl. EU, 2020, Anhang I, Teil B). Die in dieser Richtlinie genannten Werte beziehen sich auf die Beurteilung von Trinkwasser und wurden zur Einordnung gegenüber der Beurteilung von Grundwasser informativ in der Tabelle 2 mit aufgenommen. Inwiefern diese strengeren Werte zukünftig im nachsorgenden Boden- und Grundwasserschutz bewertungsrelevant werden, bleibt abzuwarten.

6 PFAS gesamt – Gesamtheit der per- und polyfluorierten Alkylsubstanzen – bisher fehlen technische Leitlinien zur Ermittlung dieses Parameters (gem. EU, 2020, Anhang I, Teil B); Parameterwert „PFAS gesamt“ 0,50 µg/L

7 Summe der PFAS bezeichnet Summe von 20 PFC Verbindungen (C4-C13 PFCA und C4-C13 PFSA) gem. EU 2020, Anhang III, Teil B, Nr. 3 vgl. Tabelle 2; Parameterwert „Summe der PFAS“ 0,10 µg/L

4 Wirkungspfade

Bei Verdacht auf PFC-Kontaminationen ist i.d.R. der Wirkungspfad Boden-Grundwasser von zentralem Interesse. Die Wirkungspfade Boden-Nutzpflanze und Boden-Mensch spielen im Rahmen der Bearbeitung von Liegenschaften des Bundes häufig nur eine untergeordnete Rolle.

4.1 Wirkungspfad Boden-Grundwasser

PFC können sich im Laufe der Zeit aus kontaminierten Böden über das Sickerwasser in tiefere Bodenschichten und ins Grundwasser verlagern und aufgrund ihrer Persistenz und geringen Retardation zu ausgedehnten Verunreinigungen führen. Da die Sorption von PFC an Feststoffe je nach Einzelsubstanz stark unterschiedlich ist (siehe Kapitel 3.1; kurzkettige PFC sind mobiler und adsorbieren weniger stark an Bodenpartikel als langkettige), können sich im Grundwasser andere PFC-Verteilungsmuster als im Boden zeigen.

Insbesondere bei jüngeren Schadensfällen ist zu berücksichtigen, dass polyfluorierte Verbindungen, die als Einzelstoffe häufig (noch) nicht nachweisbar sind, in perfluorierte Verbindungen transformiert werden können. Es können vermeintlich niedrige Gehalte im Boden, bezogen auf die 13 prioritären Einzelsubstanzen (Tabelle 2), zu relevanten Verunreinigungen des Grundwassers führen.

Exkurs Sekundärverunreinigungen

Wird mit PFC verunreinigtes Grundwasser zu Bewässerungszwecken (z.B. in der Landwirtschaft) genutzt, werden bis dahin PFC unbelastete Flächen mit PFC beaufschlagt. Dies kann zu sogenannten sekundären Bodenverunreinigungen führen (UBA, 2020b).

4.2 Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze

Das Aufnahmevermögen und -verhalten von in Deutschland heimischen Grünlandpflanzen bezüglich PFC weist große Unterschiede auf und ist von vielen Faktoren (Art der Pflanze, Alter der Pflanze, Bodenart, Niederschlag, Jahreszeit etc.) abhängig. Zudem unterscheidet sich die potentielle Anreicherung von PFC in den einzelnen Pflanzenteilen (Wurzeln, Blätter, Früchte etc.) zum Teil erheblich. Bisher liegen wenige Erkenntnisse zum Transferverhalten von PFC in Pflanzen vor. Hierzu laufen derzeit zahlreiche Studien und Forschungsvorhaben (z.B. des UBA⁸ und begleitend zur Bearbeitung im Raum Rastatt und Baden-Baden⁹).

Die Ermittlung und Beurteilung einer Kontamination des Bodens anhand der PFC-Kontamination aufwachsender Pflanzen ist (derzeit) nicht möglich. Einzelfälle aus der Praxis zeigen, dass Bodenuntersuchungen PFC-Gehalte unterhalb der Bestimmungsgrenze aufweisen können und bei den zugehörigen Pflanzenproben dagegen PFC detektiert wurden. Ebenso zieht umgekehrt ein Nachweis von PFC im Boden nicht zwangsläufig einen Nachweis von PFC in der aufwachsenden Pflanze nach sich.

Die Untersuchung des Pfades Boden-Nutzpflanze erfolgt nutzungsorientiert entsprechend der BBodSchV (insb. Anhang 1, Tabelle 1 und Kapitel 2.1.2) anhand von Bodenproben. Aus Vorsorgegründen sollten die Nutzungen Ackerbau, Nutzgarten und Grünland auf PFC-Verdachtsflächen bis zum Vorliegen einer Gefährdungsbeurteilung ausgeschlossen werden. Zum Umgang mit auf Flächen anfallendem, potentiell PFC-kontaminiertem Pflanzenmaterial siehe Kapitel 8 Umgang mit PFC-haltigen Boden- und Pflanzenmaterial.

8 <https://www.umweltbundesamt.de/aufnahme-von-pfc-in-pflanzen> (Stand: 21.01.2021)

9 https://rp.baden-wuerttemberg.de/rpk/Abt5/Ref541/PFC/Seiten/Forschungsvorhaben_Untersuchungen.aspx (Stand: 21.01.2021)

4.3 Wirkungspfad Boden-Mensch

Generell erfolgt die Bewertung von Schadstoffgehalten im Boden im Hinblick auf den Direktpfad Boden-Mensch, also einer möglichen oralen oder dermalen sowie einer inhalativen Aufnahme (z.B. durch Einatmen PFC-belasteter Stäube), vor allem anhand der Prüfwerte in Anhang 2 der BBodSchV. Entsprechende Werte für PFC gibt es dort bisher nicht. Gemäß der Systematik zur Ableitung der Prüfwerte müssten die PFC-Gehalte im Boden allerdings sehr hoch sein, um relevant zu sein. Der Wirkungspfad Boden-Mensch (direkter Kontakt) ist daher i.d.R. vernachlässigbar.

Der Wirkungspfad Boden-Mensch als Direktpfad über die Gasphase ist aufgrund der eher geringen Flüchtigkeit der PFC (vgl. Kapitel 3.1) von vernachlässigbarer Relevanz.

Inwieweit der Wirkungspfad Boden-Mensch relevant sein kann, ist einzelfallbezogen je nach Nutzung und Expositionsdauer zu beurteilen.

5 Phase I – Erfassung und Erstbewertung KVF

Bei der Erfassung und Erstbewertung (Phase I) von kontaminationsverdächtigen Flächen (KVF) ist der Aspekt der feuerwehrtypischen Nutzungen sowie weiterer möglicher Einsatzbereiche von PFC – soweit nicht schon geschehen – zu ergänzen und damit nachzuerfassen.

Zur Nacherfassung gehört die Lokalisierung und Beschreibung der nachfolgend beschriebenen PFC-typischen Nutzungen bzw. Tätigkeiten. In Zusammenhang mit den Standortbedingungen ist eine Erstbewertung des Kontaminationsverdachts vorzunehmen und eine Kontaminationshypothese aufzustellen. Die Anforderungen an die Dokumentation sind Anlage 1.2 BFR BoGwS zu entnehmen.

Potentiell von PFC-Verunreinigungen betroffen sind vor allem Liegenschaften, auf denen Feuerwehren stationiert sind oder waren, bzw. auf denen PFC-haltige Löschschäume eingesetzt wurden. Als Primärquellen für PFC-Kontaminationen auf Liegenschaften des Bundes sind feuerwehrspezifische Anwendungen nach derzeitigem Kenntnisstand in mindestens der Hälfte der Fälle ursächlich. Werden neben eindeutig feuerwehrspezifischen Nutzungen (Feuerwachen, Löschübungsbereiche, Brandschäden etc.) auch infrastrukturelle Einrichtungen mit potentiell Löschschaumkontakt (Entwässerung, Waschplätze etc.) berücksichtigt, sind auf diese Nutzungen und Einrichtungen ca. 90 % der PFC-Einträge auf Bundesliegenschaften zurückzuführen.

Bei der Erstbewertung eines Kontaminationsverdachts aufgrund von PFC-haltigen Schaum-

löschmitteln sind daher neben den üblichen Informationsquellen wie Luftbildauswertungen, Zeitzeugenbefragungen etc. insbesondere möglichst auch Einkaufslisten und Einsatzprotokolle der Feuerwehr auszuwerten.

Sonstige PFC-Einträge z.B. aus Galvanikbetrieben, Wäschereien oder über Klärschlammaufbringungen sind auf Bundesliegenschaften zwar selten, treten aber dennoch auf und sind bei der Nacherfassung zu berücksichtigen.

Neben Flächen, auf denen nachweislich mit PFC-haltigen Stoffen umgegangen wurde, sind solche Flächen in Phase I zu erfassen, auf denen potentiell PFC-haltiges Bodenmaterial z.B. nach Baumaßnahmen liegenschaftsintern umgelagert bzw. aufgebracht wurde.

Nachfolgend (Kapitel 5.1 bis 5.4) wird insbesondere auf diejenigen Verdachtsflächen eingegangen, die für die Untersuchung von Liegenschaften des Bundes von besonderer Relevanz sind. Darüberhinausgehende Erläuterungen zu einer größeren Anzahl an PFC-Verdachtsflächen können der „Arbeitshilfe zur flächendeckenden Erfassung, standortbezogenen historischen Erkundung und zur Orientierenden Untersuchung“ der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO, 2015) entnommen werden.

5.1 Feuerwehr/Brandbekämpfung

Der Umgang mit fluorhaltigen Löschschäumen oder Löschmittel-Konzentraten, sei es im Rahmen von Übungen oder zur Brandbekämpfung, kann zu PFC-Kontaminationen im Boden führen. Das Kontaminationsbild ergibt sich dabei i.d.R. individuell je nach spezifischem Einsatztyp. Bei einmaligen Löscheinsätzen z.B. bei Flugzeug-Havarien oder (kleinen) Bränden ergeben sich häufig eher kleinräumige Verunreinigungen des Bodens. Oft ist mit hohen Gehalten auf flächennutzungsspezifisch gut abgrenzbaren Bereichen wie z.B. Übungsbereichen mit regelmäßiger Löschschaumanwendung zu rechnen. Großflächige Einträge mit gegenüber langjährig genutzten Übungsbereichen eher moderaten PFC-Konzentrationen können beispielsweise aus den Beschäumungen von Start- und Landebahnen resultieren.

Bei der Bearbeitung ist zu berücksichtigen, dass sich die Zusammensetzung von Löschmittel-Konzentraten über die Jahre stark verändert hat (s.u. **Exkurs Schaumlöschmittel**). Jüngere Schadensfälle zeichnen sich beispielsweise durch das Auftreten polyfluorierter Verbindungen wie H4PFOS aus (Ersatzstoff von PFOS). Der Eintragszeitpunkt oder die Nutzungszeiträume können daher wichtige Hinweise auf die Schadstoffzusammensetzung geben.

Nachfolgend sind unterschiedliche feuerwehrspezifische Einsatzbereiche und jeweils resultierende typische Kontaminationsbilder erläutert. Die Ausführung hat dabei keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Feuerwache - Reinigung von Feuerwehr-Kfz und Material, zentrale Lagerung PFC-haltiger Stoffe

An den Feuerwachen werden i.d.R. Löschmittel-Konzentrate gelagert sowie Feuerlöschfahrzeuge mit Löschmittel-Konzentrat ausgestattet und

abgestellt. Außerdem erfolgen hier Reinigungs-, Überprüfungs- und ggf. Wartungsarbeiten am eingesetzten technischen Gerät (Pumpen, Schläuche, Kleidung etc.).

Mögliche Kontaminationsursachen im Bereich von Feuerwachen sind in erster Linie Handhabungs- und Umfüllverluste, Leckagen sowie die Gerätereinigung.

Potentielle Eintragsorte im unmittelbaren Umfeld von Feuerwachen sind besonders die angrenzenden unbefestigten Freiflächen (meist Grasflächen). Bei der Bearbeitung sind insbesondere Geländetiefpunkte, in denen sich die z.B. bei Reinigungsarbeiten anfallendes, potentiell PFC-haltiges Wasser bevorzugt sammeln und versickern konnte, zu beachten (→ Ortsbegehung).

Der potentielle Eintrag in den Untergrund auf den versiegelten Flächen ist von der Art (Verbundpflaster, Asphalt etc.) und dem Zustand der Oberflächenbefestigung und den damit verbundenen unterschiedlichen Durchsickerungsgraden abhängig.

Neben Oberflächeneinträgen ist der Eintrag über die Kanalisation/Entwässerung des Feuerwachen-geländes zu beurteilen (vgl. Kapitel 5.4).

Bei den beschriebenen Einträgen im Bereich von Feuerwachen handelt es sich zumeist um kleinräumig-diffuse Einträge aus dauerhafter Beaufschlagung.

Exkurs Schaumlöschmittel

Schaumlöschmittel können als Hauptkomponente PFOS enthalten, das für das Löschen von Bränden der Brandklasse B (Brände von flüssigen oder flüssig werdenden Stoffen) benötigt wird. Weit verbreitete Vertreter der fluorhaltigen Schaumlöschmittel sind die seit den 1970er Jahren existierenden Aqueous Film Forming Foams (AFFF, auch A3F genannt).

Die Besonderheit der AFFF liegt in der Ausbildung dampfdichter, wässriger Flüssigkeitsfilme zwischen aufgesprühter Schaumschicht und brennender Oberfläche durch die Reduktion der Oberflächenspannung. Der Flüssigkeitsfilm unterdrückt die Emulsion von Brennstoff in den Schaum. Dadurch steigert sich die Löschwirkung und es wird die Rückzündung der brennbaren Flüssigkeit verhindert. AFFF haben hervorragende Löscheigenschaften (StMUV, 2018) und wurden daher in der Vergangenheit als primäres Schaumlöschmittel auf Bundeswehrliegenschaften eingesetzt.

Infolge der Regulierung von PFOS und PFOA (inkl. deren Salze, Derivate und Vorläuferstufen, vgl. Kapitel 3.2) drängen vielzählige polyfluorierte Ersatzstoffe auf den Markt. Beispiele sind „Capstone A“ und „Capstone B“ (DuPont) sowie „DX 3001A“ und „DX 3001B“ (Dynax).

Schaumlöschmittel – Löschmittel– Löschschaum

Schaumlöschmittel sind eine spezielle Art von Löschmitteln, bei denen die Löschwirkung durch Schaum erzielt wird. Andere Beispiele für Löschmittel sind Wasser oder Pulver.

Löschmittel-Konzentrate oder **Schaummittel-Konzentrate** sind die als Roh-Flüssigkeit in geeigneten Behältnissen gelagerten Substanzen, die zur Anmischung von Schaumlöschmittel genutzt werden.

Löschschaum ist das verschäumte, aus einem Schaumrohr ausgebrachte Luft-Wasser-Konzentrat-Gemisch, das die Löschwirkung entfaltet. Nicht alle Löschmittel-Konzentrate und damit nicht alle Löschsäume sind zwangsläufig fluorhaltig (z.B. Mehrbereichlöschschaum). Im vorliegenden Leitfaden sind jedoch wann immer Schaumlöschmittel, Löschsäume oder Löschmittel-Konzentrate thematisiert sind, die fluorhaltigen Varianten gemeint.

Feuerlöschübungsbecken

Feuerlöschübungsbecken (FÜB) dürfen (mit wenigen Ausnahmen) aktuell nicht mehr genutzt werden, sind jedoch noch vorhanden bzw. teilweise zurückgebaut oder verfüllt.

Nutzungsbedingt sind PFC-Einträge im Bereich von FÜB mit hoher Wahrscheinlichkeit zu erwarten. Betroffen können dabei sowohl der Untergrund des eigentlichen Feuerlöschübungsbeckens als auch die weitere Umgebung des Beckens sein. Darüber hinaus ist von einer PFC-Kontamination der Bausubstanz des Feuerlöschübungsbeckens auszugehen und dies bei Baumaßnahmen zu berücksichtigen. Des Weiteren sind die vorhandenen Entwässerungsanlagen inkl. des Abscheidersystems bei der Untersuchung von FÜB unbedingt zu berücksichtigen.

Bei FÜB handelt es sich um eher punktuelle, nutzungsspezifisch abgrenzbare Kontaminationen aus wiederkehrenden Einträgen. Je nach Alter des FÜB wurden Löschschäume unterschiedlicher Generation eingesetzt. Bei FÜB zeigt sich zumeist ein radiales Kontaminationsbild mit vom Zentrum (Brenngrube o.ä.) nach außen abnehmenden PFC-Konzentrationen. Infolge von Winddrift ist nicht von einem ideal-ringförmigen Kontaminationsbild auszugehen.

Sonstige Brandübungsflächen und -anlagen bzw. Flächen für Funktionstests

Nicht nur an Feuerlöschübungsbecken, auch in Brandübungshäusern und anderen zu Übungszwecken ausgewiesenen Flächen wurde das Löschen von Bränden geübt. Darüber hinaus können nicht nur in explizit zu Brandübungszwecken ausgewiesenen Bereichen, sondern auch auf anderen, beliebigen freien Flächen einer Liegenschaft Löschübungen und/oder Funktionstests durchgeführt worden sein. Hinweise auf derartige Flächen ergeben sich zumeist aus Zeitzeugenbe-

fragungen und/oder Luftbildauswertungen (Fallbeispiel ehem. Javelin Barracks in Elmpt).

Auch sind die Nutzungsdauer und -häufigkeit oftmals nicht bekannt und meist nicht so gut dokumentiert wie bei definierten Einrichtungen wie Feuerlöschübungsbecken. Hinweise dazu können manchmal Einsatzbücher geben.

In Einzelfällen wurden Flächen des Bundes auch örtlichen Feuerwehren für Übungszwecke zur Verfügung gestellt, deshalb ist ggf. eine Abfrage bei den örtlichen Feuerwehren durchzuführen.

Bei Einträgen an speziell zu Übungszwecken ausgewiesenen Bereichen handelt es sich zumeist um eher punktuelle Kontaminationen, die oft über einen längeren Zeitraum eingetragen wurden. Bei unspezifisch genutzten Freiflächen kann häufig kein konkreter Haupteintragsort ausgemacht werden.

Dezentrale Lagerung von Löschmittel-Konzentrat (z.B. an Sheltern)

Zusätzlich zur zentralen Lagerung im Bereich der Feuerwache werden auf größeren Liegenschaften, insbesondere Flugplätzen, Löschmittel-Konzentrate dezentral in kleineren Gebinden gelagert. Diese befinden sich i.d.R. in der Nähe des Flugfeldes und gewährleisten bei größeren Bränden eine zügige Wiederbefüllung der Löschfahrzeuge.

Infolge von Havarien kann es hier zu punktuellen, kleinräumigen Kontaminationen kommen bzw. gekommen sein.

Löschfahrzeuge mit Löschmittel-Konzentrat / Herstellung Einsatzbereitschaft am Einsatzort

Die eingesetzten Feuerlösch-Kfz besitzen i.d.R. zwei Löschmittelbehälter, von denen einer Wasser und der zweite Löschmittel-Konzentrat aufnimmt. Der zur Brandbekämpfung benötigte Löschschaum (Wasser-Löschmittel-Konzentrat-Gemisch) wird erst durch Freischaltung des Löschmittel-Konzentrates hergestellt.

Beim bzw. nach einem Einsatz kann es durch Handhabungsverluste am Löschfahrzeug oder bei Reinigungsarbeiten zu einem Eintrag von PFC-haltigem Material in den – eventuell unbefestigten – Untergrund und ggf. in das angeschlossene Entwässerungssystem gekommen sein.

Orte, an denen die Fahrzeuge einsatzbereit gemacht werden bzw. nach einem Einsatz gereinigt werden, stellen einen potentiellen relevanten Eintragsort dar. Heute werden die Fahrzeuge i.d.R. (wenn möglich) am Ort des Einsatzes, also am Ort des Schaumeintrags, gereinigt. Häufig erfolgte die Fahrzeugreinigung auch am Vorplatz der Feuerwache oder an einem beliebigen für den Reinigungszweck festgelegten Ort innerhalb der Liegenschaft.

Start-/ Landebahnen (SLB)

Der verantwortliche Flugzeugführer konnte in Notlagen die Auslegung eines Schaumteppichs auf der Landebahn fordern. Diese Schaumteppiche hatten üblicherweise eine Mächtigkeit von bis zu einem Meter. Nach Beendigung des Einsatzes wurden die betreffenden Bereiche der Landebahn mittels Wasser vom Schaum befreit. Das Auslegen von Schaumteppichen wird heute aus mehreren Gründen i.d.R. nicht mehr praktiziert.

Durch das Auslegen von Schaumteppichen sind PFC-Kontaminationen im Bereich der freien Flächen entlang der Start-/Landebahnen möglich.

Das Kontaminationsbild stellt sich zumeist als lineare Kontaminationen rechts und links entlang der Start-/Landebahn dar, wobei die PFC-Konzentrationen mit zunehmender Entfernung von der SLB tendenziell abnehmen.

Brandschadensereignisse mit Löschschaumeinsatz

Bei verschiedensten Brandereignissen kamen und kommen Löschschaume zum Einsatz. AFFF-Löschschaume wurden für jede Art von Bränden verwendet, bei denen der Einsatz von Löschschaum geboten war.

Sofern auf einem Standort Brandschadensereignisse bekannt sind, ist deren Lage möglichst exakt zu dokumentieren und der Einsatz von Löschschaumen zu recherchieren. Falls Löschschaume eingesetzt wurden, ist zur Bestimmung des Schadstoffpotentials der Verbrauch von Löschmittel-Konzentrat zu ermitteln – sofern möglich. Bei der Recherche von Brandschadensereignissen sind insbesondere Zeitzeugen und die jeweiligen Standortfeuerwehren zu befragen. Darüber hinaus wurden auch zivile Feuerwehren aus der Umgebung zur Brandbekämpfung herangezogen. Daher sind neben Unterlagen der Standortfeuerwehr auch Einsatzberichte ziviler Feuerwehren aus der jeweiligen Umgebung bei der Erfassung zu berücksichtigen.

Zu Nachforschungszwecken stehen die Archive der Standort- bzw. Bundeswehr-Feuerwehren und der zivilen Feuerwehren zur Verfügung.

Im Verantwortungsbereich der Bundeswehr sind seit 2016 die Einsatzberichte, bei denen Schaummittel verwendet wurden, über einen Zeitraum von 30 Jahren zu archivieren.

5.2 Galvanikanlagen

PFC-haltige Substanzen wurden und werden (Ausnahmeregelung für den Einsatz von PFOS im Bereich des „nicht dekorativen Hartverchromens im geschlossenen Kreislaufsystem“ EU 2019/1021) bei verschiedenen galvanischen Prozessen u.a. zur Sprühnebelreduzierung eingesetzt. Da auch auf Liegenschaften des Bundes galvanische Verfahren angewendet werden und wurden, sind Galvanikanlagen einschließlich der dort durchgeführten galvanischen Verfahren in der Phase I zu erfassen und zu bewerten. Für die Recherche zu PFC-haltigen Substanzen und Zusätzen kann ggf. auf Einkaufslisten o.Ä. zurückgegriffen werden.

5.3 Wäschereien

PFC werden aufgrund ihrer fett-, schmutz- und wasserabweisenden Wirkung auch in der Fertigung und Imprägnierung von Funktionstextilien verwendet, z.B. für die Schutzbekleidung bei Militär und Feuerwehr. Durch den Waschvorgang können PFC ins Abwasser gelangen.

Bereiche ehemaliger und aktiver Wäschereien und Reinigungen sind in Phase I zu erfassen. Haupteintragsquellen/-orte von PFC sind hier Leckagen in der Kanalisation oder Havarien.

5.4 Entwässerungsanlagen

Eine zentrale Rolle bei der Verbreitung von PFC innerhalb der Liegenschaft ausgehend vom jeweiligen Eintragsort kommt dem Entwässerungssystem zu. Über defekte Kanalabschnitte oder über Versickerungsgruben/-schächte besteht ein großes Verlagerungspotential von PFC in den Untergrund und ins Grundwasser. Ebenso können PFC über die Niederschlagsentwässerungsanlagen wie Regenrückhaltebecken (RRB) auch über Liegenschaftsgrenzen hinaus verbreitet werden.

Oberflächenentwässerung/Niederschlagsentwässerung

Über die Oberflächenentwässerung wird das Niederschlagswasser von versiegelten Verkehrsflächen und Dachflächen abgeleitet. Hierbei kann es zur Ableitung in Entwässerungsgräben, direkt in Regenrückhaltebecken oder die öffentliche Regenwasserkanalisation kommen.

Niederschlagsentwässerungsanlagen in offener Bauweise ohne Untergrundabdichtung, in die PFC-haltige Wässer eingeleitet oder weitergeleitet worden sind, z.B. an Feuerlöschübungsbecken, müssen lokalisiert und untersucht werden. Abhängig von den Ergebnissen der Bestandsaufnahme und Inspektion sind Abwasseranlagen in offener Bauweise mit Untergrundabdichtung oder in geschlossener Bauweise bei nachgewiesenen Undichtigkeiten mit in die Betrachtung einzubeziehen.

Für zahlreiche Liegenschaften des Bundes existieren liegenschaftsbezogene Abwasserentsorgungskonzepte (LAK) nach den Baufachlichen Richtlinien Abwasser des BMI und BMVg. Für eine Beurteilung der Entwässerungsanlagen hinsichtlich des Kontaminationsverdachtes auf PFC sind die LAK und sonstige Bestandsunterlagen zu berücksichtigen.

Regenrückhaltebecken

Eine PFC-Kontamination des zulaufenden Niederschlagswassers kann in den Rückhaltebecken bzw. dem jeweiligen Untergrund zu Kontaminationen führen. Bei Regenrückhaltebecken ist des Weiteren zu berücksichtigen, dass diese nicht grundsätzlich mit Untergrundabdichtungen gebaut sind und darüber hinaus auch als Versickerungsanlagen konzipiert sein können.

Schmutzwasserkanalisation

Die Schmutzwasserentwässerung ist insbesondere dort relevant, wo Abwässer aus betrieblichen Einrichtungen wie Galvanikanlagen, Wäschereien u. ä. anfallen, da diese potentiell PFC-haltig sind. Bei Kanaldefekten können über die Schmutzwasserkanalisation PFC in den Untergrund gelangen.

Abscheidersysteme

Vorhandene Abscheidersysteme sind beispielsweise als Leichtflüssigkeitsabscheider (LFA) und/oder als Koaleszenzabscheider konzipiert und damit auf die Rückhaltung von aliphatischen Kohlenwasserstoffen ausgelegt. PFC konnten und können hiervon nicht zurückgehalten werden.

Das an FÜB angefallene Löschschaum-Brandmittel-Gemisch wurde beispielsweise über Sandfilter und Abscheider geführt und das Abwasser in Vorfluter oder über Versickerungsanlagen abgeschlagen. Dadurch gelangten erhebliche Mengen PFC über den Ablauf in die Oberflächengewässer bzw. in den Untergrund.

Die Reinigungsstufen und deren nachgelagerte Bereiche sind somit potentielle PFC-Eintragsorte. Auch lange nach Stilllegung solcher Anlagen können aus Ablagerungen PFC verfrachtet werden.

6 Phase II – Untersuchungen und Gefährdungsabschätzung

Die Untersuchung von Flächen, auf denen ein Eintrag von PFC zu vermuten ist bzw. nachweislich stattgefunden hat, unterscheidet sich prinzipiell nicht von der Untersuchung von Flächen mit dem Verdacht auf Kontaminationen mit anderen Schadstoffen gemäß den Programmen zur Kontaminationsbearbeitung der Bw und BImA. Die in der Phase II vorgesehenen Untersuchungen (orientierende Untersuchung, Detailuntersuchung) sind gemäß der Bereichsdienstvorschrift C-2035/3 und der BFR BoGwS durchzuführen, wobei die nachfolgend beschriebenen Besonderheiten hinsichtlich PFC aufgrund ihrer besonderen Eigenschaften und der vielfältigen Einsatzbereiche zu berücksichtigen sind.

Dabei sollte zu Beginn jeder Phase II das „Entwickeln einer Untersuchungsstrategie auf der Grundlage der in Phase I zusammengestellten Informationen und Kontaminationshypothesen sowie Planung der durchzuführenden Untersuchungen“ (BFR BoGwS) stehen. Dies kann als Defizitanalyse der aus der Phase I vorliegenden Grundlagen erfolgen, zumal in der Zeit zwischen

Abschluss der Phase I und Beginn einer Phase II bereits weitere zu berücksichtigende Erkenntnisse vorliegen können. Dies gilt ebenso zwischen den Phasen IIa und IIb. Eine kritische Überprüfung der Datengrundlage zwischen den einzelnen Phasen ist daher zwingend durchzuführen.

Da die Bearbeitung von PFC-Schadensfällen neue Herausforderungen (z.B. Gefahr von Verschleppungen bei der Probenahme, hohe Relevanz schon bei geringen Konzentrationen, ubiquitäre Hintergrundbelastung etc.) an die Beteiligten stellt, sind im Rahmen von Ausschreibungen Qualitätsanforderungen im Umgang mit PFC zu formulieren.

6.1 Untersuchungsstrategie

Grundsätzlich gilt, dass der Wirkungspfad Boden-Grundwasser bei der Bearbeitung von PFC-Verdachtsflächen im Fokus steht. Zu beachten ist, dass aufgrund der Schadstoffeigenschaften großflächige Verunreinigungen im Grundwasser entstehen können. Ausgehend von verschiedenen KF kann sich eine zusammenhängende Grund-

wasserverunreinigung bilden. In solchen Fällen ist ein integraler Untersuchungsansatz zu erwägen, z.B. kann zunächst für eine Gruppe (Cluster) von KVF/KF eine zusammenfassende Abstrombetrachtung an Stelle individueller Untersuchungen für jede einzelne KVF/KF sinnvoll sein.

Tabelle 3: Aufschlussverfahren zur Gewinnung von Boden- bzw. Sedimentproben

	Einzelprobe	Mischprobe	Mittlere Erkundungstiefe (*)	Verschleppungspotential	Technischer Aufwand	Zeitlicher Aufwand	empfohlene Untersuchungsphase
Baggerschurf	+	+	bis 1,25m (unverbaut) ¹⁰	mittel	niedrig	niedrig	IIa und IIb
Rammkernsondierung	+	+	10,0-15,0 m	hoch	niedrig	hoch	IIa
Linerbohrung	+	o	>10 m	niedrig	sehr hoch	sehr hoch	IIb
Handschurf	+	+	0,5 m	mittel	sehr niedrig	sehr niedrig	IIa und IIb
Bohrstock	-	+	1,0 m	hoch	sehr niedrig	niedrig	IIa
Baggerschurf	Sicherstellung Gewinnung ausreichender Mengen Probenmaterial, rel. geringer Zeitbedarf						
Rammkernsondierung	relativ große Tiefe bei geringem Aufwand						
Linerbohrung	hoher Aufwand, geringstes Verschleppungspotential, Ausbau zur Grundwassermessstelle möglich						
Handschurf	Gewinnung von Sedimentproben aus Rinnen, Gewässern, Regenrückhaltebecken u.ä.						
Bohrstock	schnelle Gewinnung von Mischproben schlecht zugänglicher Flächen						

+ Ja bzw. geeignet
 - Nein bzw. ungeeignet
 o bedingt geeignet
 (* untergrundabhängig)

10 DIN 4124 ist zu beachten

6.2 Probengewinnung

Bisher liegen kaum PFC-spezifische bundeseinheitliche Vorgaben und Regelungen zur Probengewinnung vor. Grundsätzlich gelten auch bei der Beprobung auf PFC-Verdachtsflächen die Vorgaben aus Anhang 2 der BFR BoGWS bzw. gem. BBodSchV (Anhang 1 Kapitel 2). Konkretisierende bzw. PFC-spezifische Anforderungen an die Probenahme und Probenvorbehandlung, die zum Teil von den allgemeinen Anforderungen abweichen können, sind nachfolgend und in Kapitel 6.4 und Kapitel 6.5 erläutert.

In Abhängigkeit von der Untersuchungsphase kann der Einsatz unterschiedlicher Probenahmetechniken sinnvoll sein. Es stehen zur Gewinnung von Boden- bzw. Sedimentproben verschiedene Aufschlussverfahren zur Verfügung (Tabelle 3).

Bei der Gewinnung von Proben zur PFC-Analytik sind darüber hinaus folgende allgemeine Hinweise zu berücksichtigen:

Probenahme Boden

Gewinnung ausreichender Mengen an Probenmaterial, da PFC i.d.R. aus dem Eluat analysiert werden, ein gewisser Anteil an Doppelbestimmungen durchzuführen ist und ggf. parallel Feststoffanalytik durchgeführt werden soll.

Probenahme Grundwasser

Das im Rahmen einer Grundwasserbeprobung anfallende Vorlaufwasser/Förderwasser ist in Abhängigkeit von den erwarteten Schadstofffrachten nach Abstimmung mit der zuständigen Behörde ggf. vor der Ableitung über geeignete

Aktivkohle zu reinigen. Das Abschlagen von im Rahmen der Grundwasserprobengewinnung gefördertem und über Aktivkohle weitgehend gereinigtem Wasser ist mit den jeweils zuständigen Behörden bzw. Entwässerungsbetrieben im Einzelfall zu klären.

Bei der Gewinnung von Boden- und Wasserproben ist ein Verschleppen von Schadstoffen von einer Probe zur anderen zu vermeiden bzw. möglichst zu reduzieren. Dies gilt insbesondere bei PFC, da hier sehr geringe Stoffkonzentrationen im Nanogrammbereich betrachtet werden.

Für die Probegewinnung im Allgemeinen bedeutet dies:

- Beprobungsreihenfolge von niedrig zu hoch belastet
- Parallelbeprobung bei Mehrfachmessstellen
- Einsatz geeigneter Probenahmegeräte/-gefäße (unbeschichtete Geräte und Probenahmegeräte bzw. solche, an denen möglichst keine/wenig PFC anhaften (vgl. Tabelle 4))
- Einsatz geeigneter Aufschlussverfahren (insb. ab Phase IIb)

Für den Probenehmer gilt:

- Tragen geeigneter PFC-freier Garderobe (z.B. PFC-freie Outdoor-Jacken und Schuhe, kein Einsatz von PFC-haltigen Imprägniermitteln)

Eine Übersicht zulässiger und nicht zulässiger Gegenstände bei der PFC-Probenahme hat das UBA (2020b, Anlage A, S. 20) veröffentlicht (vgl. Tabelle 4).

Tabelle 4: Übersicht Vorgaben bei der PFC-Probenahme (UBA, 2020b, Anhang A, S. 20)

Nicht zulässige Gegenstände	Zulässige Gegenstände
Ausrüstung, Feldarbeiten	
Teflon®-haltige Materialien (Rohre, Schöpfer, Klebebänder, Sanitärkleber)	Materialien aus Polyethylen (HDPE) oder Silikon (auch fluoridfrei, geeignet für AOF-Analytik)
Lagerung der Proben in LDPE-Behältern	Azetat-Liner (Direct-Push-Verfahren), Silikon-Verrohrungen
Wasserfeste Notizblöcke	Lose Papierblätter
Klemmbretter aus Plastik, Ordner, feste Spiralblöcke	Holzfasern- oder Aluminium-Klemmbretter
Eddings® und Filzstifte	Kugelschreiber
Post-It-Haftzettel	Lose Papierblätter
Chemische (blaue) Kühlakkus	„Reguläres“ Eis
Bekleidung und persönliche Schutzausrüstung	
Bekleidung oder wasserabweisende, wasserfeste oder mit Fleckenschutz behandelte Gore-Tex™-haltige Bekleidung	Mehrfach gewaschene Bekleidung aus synthetischen und natürlichen Fasern (bevorzugt Baumwolle)
Mit Weichspüler behandelte Kleidung	Kleidung ohne Einsatz von Weichspüler
Gore-Tex™-Schuhe oder Jacken	Schuhe mit Polyurethan und Polyvinylchlorid (PVC)
Tyvek®-Overalls	Baumwollkleidung
Kosmetika, Feuchtigkeitscremes, Handcremes oder ähnliche Produkte am Morgen der Probenahme bei der Körperpflege/ beim Duschen	Sonnencremes und Insektensprays, in denen nachweislich keine PFAS enthalten sind.
Probenahmebehälter	
Behälter aus LDPE oder Glas	Behälter aus HDPE oder Polypropylen
Verschlusskappen mit Teflon®	Unbeschichtete Polypropylen-Verschlusskappen
Regenfälle	
Wasserfeste oder wasserabweisende Regenbekleidung	Regenbekleidung aus PU und gewachsenen Materialien. PFAS-freier Pavillon, der nur vor oder nach der Probenahme berührt oder umgesetzt wird
Dekontamination der Ausrüstung	
Decon 90	Alconox® und/oder Liquinox®
Wasser aus einem Brunnen im Untersuchungsbereich	Trinkwasser vom örtlichen Versorger
Lebensmittel	
Sämtliche Lebensmittel und Getränke (Ausnahmen sind in der rechten Spalte aufgeführt)	Wasser in Flaschen und isotonische Getränke dürfen nur in den Aufenthaltsbereich mitgenommen und auch nur dort konsumiert werden

6.3 Probenaufbereitung und Analytik

Die Analytik ausgewählter PFC-Verbindungen hat nach einheitlichen Standards entsprechend nationaler und internationaler Normen zu erfolgen. PFC in Wässern werden entsprechend nach DIN 38407-42 „Bestimmung ausgewählter polyfluorierter Verbindungen (PFC) in Wasser – Verfahren mittels Hochleistungs-Flüssigkeitschromatographie und massenspektrometrischer Detektion (HPLC-MS/MS) nach Fest-Flüssig-Extraktion“ bestimmt. Die Bestimmungsgrenzen oder unteren Anwendungsgrenzen für die einzelnen Substanzen betragen zurzeit bei der Untersuchung von Wasser bzw. wässrigen Lösungen 0,01 bis 0,001 µg/L. Für die Bestimmung der eluierbaren PFC-Konzentration in Bodenproben, Pflanzenmaterial, Schlamm und Kompost sind diese aus dem nach DIN 19529 erstellten 2:1-Eluat zu untersuchen. Als übliche untere Bestimmungsgrenze ist 0,01 µg/L je Einzelstoff ausreichend und eine tiefere Bestimmungsgrenze nur in begründeten Ausnahmefällen anzustreben.

Die Bestimmung der im Feststoff (Böden, Pflanzen etc.) enthaltenen PFC-Konzentration erfolgt nach DIN 38414 14 „Bestimmung ausgewählter polyfluorierter Verbindungen (PFC) in Schlamm, Kompost und Boden – Verfahren mittels Hochleistungs-Flüssigkeitschromatographie und massenspektrometrischer Detektion (HPLC-MS/MS)“. Die untere Anwendungsgrenze beträgt hier 10 µg/kg Trockenmasse. Mittlerweile werden von vielen Laboren 2-3 µg/kg als übliche Bestimmungsgrenzen für den Nachweis von PFC im Feststoff erreicht.

Sowohl für die Eluatanalytik als auch für die Feststoffanalytik sind sogenannte „Premiumbestimmungsgrenzen“, die z.T. deutlich niedriger als die in den DIN-Normen formulierten sind, erhältlich. Hierbei ist unbedingt zu bedenken, dass durch diese niedrigeren Bestimmungsgrenzen bei den

derzeit vorliegenden Bewertungsgrundlagen die Beurteilung der Analyseergebnisse nicht anders ausfällt als es bei den derzeit üblichen „Standardbestimmungsgrenzen“ der Fall ist.

Bei der Untersuchung von Feststoffen ist die im Vergleich zur Wasseranalytik relativ höhere Bestimmungsgrenze zu beachten. Auch bei Gehalten im Feststoff unterhalb der Bestimmungsgrenze können beurteilungsrelevante Konzentrationen im Eluat vorliegen.

Die Auswahl des Analyseverfahrens ist immer unter Berücksichtigung des zu betrachtenden Wirkungspfades auszuwählen. Bei der Beurteilung des Wirkungspfades Boden-Grundwasser sind Eluatanalysen durchzuführen. Eine Analytik der PFC-Konzentration im Feststoff ist hier lediglich zur Abschätzung des vorhandenen Potentials sinnvoll. Bei Fragen der Entsorgung ist dagegen i.d.R. die Konzentration im Feststoff relevant, weniger die PFC-Konzentration im Eluat.

Im Mindestuntersuchungsprogramm sind derzeit 13 verschiedene PFC Verbindungen gelistet (LAWA-LABO (2017), UBA (2017), siehe Tabelle 5). Anlassbezogen kann es erforderlich werden, zusätzliche PFC zu analysieren (Tabelle 6). Ob Anlass dazu besteht, ergibt sich maßgeblich aus der Historie der (vermutlich) eingebrachten PFC auf der jeweiligen Fläche und dem zu betrachtenden Wirkungspfad. Für eine Großzahl der bislang bekannten PFC existieren bisher keine Analysenstandards, weshalb diese derzeit auch analytisch nicht sicher erfasst werden können.

Sofern keine landesspezifischen Vorgaben vorliegen, sind mindestens die Einzelsubstanzen gemäß Tabelle 5 zu analysieren. Sollte die Erfassung und Erstbewertung (Phase I) Hinweise auf einen Eintrag spezieller PFC-Verbindungen ergeben, sind

Tabelle 5: Mindestuntersuchungsprogramm zur Analytik ausgewählter PFC nach den Verfahren DIN 38407-42 (Wasser) und DIN 38414-14 (Feststoff) und nach LAWA-LABO-Kleingruppe PFC

Stoffname	Abkürzung	Summenformel	Rel. molare Masse [g/mol]	CAS-Nr.
Perfluorbutansäure	PFBA	C ₄ F ₇ HO ₂	214,04	375-22-4
Perfluorpentansäure	PFPeA	C ₅ F ₉ HO ₂	264,05	2706-90-3
Perfluorhexansäure	PFHxA	C ₆ F ₁₁ HO ₂	314,05	307-24-4
Perfluorheptansäure	PFHpA	C ₇ F ₁₃ HO ₂	364,06	375-85-9
Perfluoroctansäure	PFOA	C ₈ F ₁₅ HO ₂	414,07	335-67-1
Perfluornonansäure	PFNA	C ₉ F ₁₇ HO ₂	464,08	375-95-1
Perfluordecansäure	PFDA	C ₁₀ F ₁₉ HO ₂	514,08	335-76-2
Perfluorbutansulfonsäure	PFBS	C ₄ F ₉ HO ₃ S	300,10	375-73-5
Perfluorhexansulfonsäure	PFHxS	C ₆ F ₁₃ HO ₃ S	400,11	355-46-4
Perfluorheptansulfonsäure	PFHpS	C ₇ F ₁₅ HO ₃ S	450,11	375-92-8
Perfluoroctansulfonsäure	PFOS	C ₈ F ₁₇ HO ₃ S	500,13	1763-23-1
1H,1H,2H,2H-Perfluoroctansulfonsäure	6:2 FTS (H4PFOS)	C ₈ F ₁₃ H ₅ O ₃ S	428,16	27619-97-2
Perfluoroctansulfonamid	PFOSA	C ₈ F ₁₇ SO ₂ NH ₂	499,14	754-91-6

diese zusätzlich zu untersuchen. Ist zum Beispiel der Einsatz spezieller Schaummittel bzw. Löschmittel-Konzentrate der Firma DuPont (früher Forafac) bekannt, kann eine zusätzliche Analytik, z.B. auf Capstone Produkt A oder Capstone Produkt B, sinnvoll sein (in Rheinland-Pfalz ist die Capstone A und B Analytik obligatorisch).

Der Analyseumfang gemäß Tabelle 5 ist vor allem im Rahmen der Orientierenden Untersuchung (Phase IIa) für eine erste Einschätzung der Kontaminationssituation hinreichend. Aus den bisherigen Untersuchungen auf Bundesliegenschaften mit einem erweiterten Analytikumfang über die 13 prioritären Stoffe hinaus ist kein Fall bekannt, bei dem nicht mindestens eine dieser 13 Substanzen die Hauptkontaminante war. Für eine abschließende Abgrenzung der Kontamination im Zuge der Detailuntersuchung (Phase IIb) kann ein

angepasstes, umfangreicheres Untersuchungsprogramm notwendig werden, welches zur Ergänzung z.B. ausgewählte Precursor-Verbindungen mit enthält.

Der „Leitfaden zur PFC-Bewertung“ (LABO/LAWA, 2021) schlägt vor, dort, wo Kenntnisse über das maximale PFC-Potential erforderlich sind, unter Umständen auch Summenparameter (s.u.) zu erfassen. Da die Ergebnisse dieser Parameter nach derzeitigem Stand schwierig in der Beurteilung sind, ist von einer umfangreichen Analytik auf diese Parameter abzusehen.

Bewertungsrelevant ist insbesondere der Wirkungspfad Boden-Grundwasser. Dementsprechend ist die Mobilität der eingetragenen Stoffe von Bedeutung und durch Eluatuntersuchungen zu bestimmen.

Tabelle 6: Anlassbezogen zu untersuchende PFC

Stoffname	Abkürzung	Summenformel	Rel. molare Masse [g/mol]	CAS-Nr.
Perfluorundecansäure	PFU _n A	C ₁₁ F ₂₁ HO ₂	564,09	2058-94-8
Perfluordodekansäure	PFD _o A	C ₁₂ F ₂₃ HO ₂	614,10	307-55-1
Perfluortridekansäure	PFT _r A	C ₁₃ F ₂₅ HO ₂	664,11	72629-94-8
Perfluortetradecansäure	PFT _e A	C ₁₄ F ₂₇ HO ₂	714,12	376-06-7
Perfluorpentansulfonsäure	PFP _e S	C ₅ F ₁₁ HO ₃ S	372,09	630402-22-1
Perfluornonansulfonsäure	PFNS	C ₉ F ₁₉ HO ₃ S	572,12	98789-57-2
Perfluordecansulfonsäure	PFDS	C ₁₀ F ₂₁ HO ₃ S	600,14	335-77-3
Perfluorundecansulfonsäure	PFU _n S	C ₁₁ F ₂₃ HO ₃ S	618,16	
Perfluordodecansulfonsäure	PFD _o S	C ₁₂ F ₂₅ HO ₃ S	700,16	79780-39-5
Perfluortridecansulfonsäure	PFT _r S	C ₁₃ F ₂₇ HO ₃ S	712,25	
2H,2H,3H,3H-Perfluorundecansäure	H ₄ PFU _n A	C ₁₁ H ₅ O ₂ F ₁₇	492,13	34598-33-9
7H-Perfluorheptansäure	HPFH _p A	C ₇ H ₂ O ₂ F ₁₂	346,07	1546-95-8
2H,2H-Perfluordecansäure	8:2 FTA (H ₂ PFDA)	C ₁₀ H ₃ O ₂ F ₁₇	478,10	27854-31-5
1H,1H,2H,2H-Polyfluorhexansulfonsäure	4:2 FTSA (H ₄ PFH _x S)	F(CF ₂) ₄ CH ₂ CH ₂ SO ₃ H	328,15	757124-72-4
1H,1H,2H,2H-Polyfluordecansulfonsäure	8:2 FTSA (H ₄ PFDS)	F(CF ₂) ₁₀ CH ₂ CH ₂ SO ₃ H	528,18	39108-34-4
Capstone A	--	C ₁₃ F ₁₃ H ₁₇ N ₂ O ₃ S	528,33	80475-32-7
Capstone B	--	C ₁₅ F ₁₃ H ₁₉ N ₂ O ₄ S	570,40	34455-29-3

Generell ist auf Bundesliegenschaften das Eluat im Wasser/Feststoff-Verhältnis 2:1 (DIN 19529) herzustellen. Nunmehr ist zudem in allen Bundesländern das 2:1-Eluat quasi eingeführt. Bisher gab es die bayerische Vorgabe zur Verwendung des 10:1-Eluats (LfU BY, 2017). Im Vorgriff auf „den Leitfaden zur PFC-Bewertung“ (LABO/LAWA, 2021) wird jetzt auch in Bayern empfohlen,

zur besseren Vergleichbarkeit die dort „genannten Grundsätze zur Analytik und die anzuwendenden Verfahren bereits jetzt anzuwenden“ und damit das 2:1-Eluat (LfU BY, 2020). Darüber hinaus gelten die Vorgaben zur PFC-Bestimmung der DIN 38407-42 (Wasser) bzw. DIN 38414-14 (Schlamm, Kompost und Boden).

Die relevante DIN-Norm 19529 gibt bei der Probenaufbereitung einen gewissen Spielraum. Um die Ergebnisse von PFC-Analysen auf Bundesliegenschaften besser vergleichbar zu machen, sind die Aufbereitungsschritte zu dokumentieren und den Analyseergebnissen beizufügen. Hierzu zählen insbesondere Angaben zur Fraktion, Trocknung und Filtration.

Im Analysenbericht ist die Messunsicherheit der durchgeführten PFC-Analytik anzugeben. Falls durch das Labor ein über die 13 Einzelstoffe (Tabelle 5) hinausgehender Parameterumfang analysiert wurde, sind die zusätzlichen Einzelstoffe im Prüfbericht gesondert zu kennzeichnen und dürfen bei der Summenbildung nicht berücksichtigt werden. Entsprechend der Vorgabe der BFR BoGwS sind als qualitätssichernde Maßnahme, insbesondere im Zuge der Phase IIa, Doppelbestimmungen durchzuführen und die Ergebnisse zu bewerten.

Bei erhöhter Anzahl von Analysen, was i.d.R. im Zuge der Untersuchungen der Phase IIb der Fall ist, sind Blindproben (nachweislich PFC-freie Proben) in das Untersuchungsprogramm zu integrieren. Dies ist erforderlich, um Hinweise auf mögliche Querkontaminationen zu erhalten. Da die Einzelstoffanalytik absehbar nicht die Gesamtheit der existierenden PFC-Verbindungen nachweisen kann, werden neben der Einzelstoffanalytik nachfolgend dargestellte Verfahren zur Abschätzung des Gesamt-PFC-Gehalts bzw. Gesamt-Fluorgehalt (org.) in Feststoff und Wasser über Summenparameter entwickelt.

→ **AOF**: Adsorbierbares organisch gebundenes Fluor für wässrige Proben, Bestimmung des Fluoridgehaltes, Bestimmungsgrenze aktuell um 2 µg/L AOF; Analytik analog zum AOX (adsorbierbare organisch gebundene Halogene), Bestimmung nach Normentwurf DIN 38409-59:2020-11.

→ **EOF**: Extrahierbares organisch gebundenes Fluor für Bodenproben und Pflanzenmaterialien, Bestimmung des Fluoridgehaltes, Bestimmungsgrenze 10 µg/kg; Bestimmung in Anlehnung an Normentwurf DIN 38409-59:2020-11.

→ **TOP**: Oxidierbare Vorläuferverbindungen (TOP – total oxidizable precursor) für Bodeneluate und wässrige Proben; definierte Oxidation der unbekanntenen Vorläuferverbindungen zu perfluorierten Verbindungen, die über eine Einzelstoffanalytik erfassbar sind; Bestimmung der Gehalte der Einzelstoffe in der oxidierten und in der unbehandelten Probe; die Differenz zeigt die Menge der Vorläuferverbindungen an; Bestimmungsgrenze entsprechend der jeweiligen Bestimmungsgrenze des Einzelparameters 0,01 µg/L bis 0,001 µg/L; Bestimmung nach DIN 38407-42.

Die Ergebnisse von AOF und EOF erfassen die Fluorid-Konzentration und sind somit nicht unmittelbar mit den Konzentrationen aus der Einzelstoffanalytik vergleichbar. Zum Vergleich mit der Einzelstoffanalytik ist zusätzlich der jeweilige Fluoridgehalt je nachgewiesener Einzelsubstanz zu berechnen.

Die Aussagekraft von Summenparametern ist derzeit nicht ausreichend geklärt und damit sind die Ergebnisse der Analyse des Gesamt-PFC-Gehaltes gegenwärtig schwierig zu bewerten. Sofern Unsicherheiten über die projektspezifische Relevanz der möglichen zusätzlichen Einbeziehung von Summenparametern bestehen, stehen das zentrale Kontaminationsmanagement der Bundesanstalt für Immobilienaufgaben (BImA ZEPM 4), die Koordinationsstelle der Kontaminationsbearbeitung der Bw im BAIUDBw, Referat GS II 5 ebenso wie die Leitstelle des Bundes für Boden- und Grundwasserschutz im Niedersächsischen Landesamt für Bau und Liegenschaften (NLBL) beratend zur Verfügung.

6.4 Phase IIa – Orientierende Untersuchung

Im Rahmen einer orientierenden Untersuchung geht es im ersten Schritt im Wesentlichen um den Nachweis bzw. den Ausschluss von PFC im betrachteten Kompartiment (i.d.R. im Boden). Eine Abgrenzung einer PFC-Kontamination ist in dieser Untersuchungsphase nicht das vorrangige Ziel. Diese Abgrenzung folgt, bei Bestätigung des Kontaminationsverdachts, in der nachgeschalteten „Detailuntersuchung“ Phase IIb. Aufgrund der sich unterscheidenden Zielsetzung der beiden Untersuchungsphasen können die Untersuchungsstrategien u.a. im Hinblick auf Aufschlussart und Umfang voneinander abweichen, so dass eine differenzierte Betrachtung notwendig ist.

Im Rahmen der Phase IIa muss keine endgültige Abgrenzung der Kontamination erfolgen. Daher kann eine z.B. mit dem Einsatz von Rammkernsondierungen einhergehende höhere Ergebnisunsicherheit akzeptiert werden.

In Abhängigkeit der Kontaminationshypothese bzw. des Eintragungsszenarios haben bisherige Untersuchungen die Erkenntnis gebracht, dass zwei grundsätzliche Kontaminationsbilder auftreten: 1. punktuelle Kontaminationen und 2. flächige, diffuse Kontaminationen. Diese Differenzierung wird auch vom UBA (2020b) im Rahmen eines Sanierungsmanagements empfohlen.

Für Untersuchungen im Rahmen der Phase IIa werden für unterschiedliche Eintragungsszenarien basierend auf aktuellen Erkenntnissen und unter Beachtung der Vorgaben der BBodSchV nachfolgend erläuterte Vorgehensweisen für den **Wirkungspfad Boden-Grundwasser** empfohlen.

Eintragungsszenario - eher punktueller, nutzungsbezogener Eintrag (z.B. Feuerlöschübungsbecken, Feuerwache, Übungsflächen, Brände/Havarien u.Ä.):

Bodenbeprobung im Bereich des vermuteten maximalen Eintrags

Feuerlöschübungsbecken (je nach technischer Ausgestaltung):

- in unmittelbar zur Brenngrube angrenzender unversiegelter Fläche
- Entwässerung (z.B. Sickergruben)
- Untersuchung radial um den primären Einsatzort des Löschmittels
- Berücksichtigung von Winddrift

Feuerwachen/Waschplätze/Shelter (Orte mit regelmäßigem Löschmitteleinsatz):

- Probenahme in unversiegelten Flächen direkt angrenzend an die versiegelten Flächen
- Untersuchung zumindest in Geländesenken

Eintragungsszenario - eher diffuser, flächiger Eintrag (z.B. Start-/Landebahn bei unbekanntem Einsatz von Schaumteppichen, unversiegelte Flächen an Abstellflächen, vermutete nicht explizit ausgewiesene Übungsflächen, ggf. Bewässerung mit kontaminiertem Grundwasser u. ä.)

- Einzelproben über die Fläche; Ansatzpunkte Raster, i.d.R. mindestens bis 1,0 m Tiefe
- Empfohlenes Aufschlussverfahren Schurf; Anmerkung: Bei aktiv genutzten Liegenschaften ist es aus Sicherheitsgründen ggf. nicht möglich, Schürfe mit einhergehenden Bodeneingriffen durchzuführen (→ Alternative Sondierverfahren)

oder

- Mischprobe je KVF, je nach Flächengröße der KVF in Teilflächen unterteilen; Einstiche bis 1,0 m Tiefe

Für beide Szenarien gilt:**Boden**

- Schichteinheiten bei Beprobung bis 1,0 m: Probenahmeintervalle in Abhängigkeit vom Aufbau des Untergrunds und der Schichtmächtigkeiten, z.B. 0-0,1 (Oberboden), 0,1-0,3 und 0,3-1,0 m;
- darunter Beprobung schichtweise, höchstens jedoch meterweise
- bei Hinweisen auf Einträge über die Kanalisation Proben aus dem Bereich der Kanalsohle

Sedimente aus technischen Anlagen (Versickerungsbecken, RRB etc.) und Oberflächengewässern

- Entnahme mittels Handschurf (Spaten)
- Konsistenzabhängig bzw. wassergehaltsabhängig; wenn möglich tiefenorientiert bis 0,3 m
- Überstehendes Wasser vermeiden bzw. Probe vor Ort entwässern

Sielhaut (aus Entwässerungssystemen, Versickerungsanlagen u.ä.)

(Eine sogenannte Sielhaut ist ein Biofilm oder Schlamm, der in Kanalisationssystemen nach einiger Zeit entsteht und in denen sich Schadstoffe anreichern können. I.d.R. ist die Schadstoffkonzentration in der Sielhaut umso höher, je näher die Einleitungsstelle liegt.)

- Untersuchung der Sielhaut als integraler Ansatz – Entwässerungssystem als Repräsentant des Einzugsgebietes, ob PFC-Einträge stattgefunden haben

Grundwasser

- Bei vorhandenen Grundwassermessstellen und Hinweisen auf PFC-Eintrag im Anstrom Grundwasserbeprobung (Mehrfachbeprobung, mind. zwei Beprobungskampagnen)
- In Abhängigkeit von den Vorkenntnissen ggf. bereits Messstellenbau im Rahmen der Phase IIa (s.a. Kap. 6.5)

Ausnahme integraler Ansatz, d.h.:

- Grundwasserüberwachung für einen gesamten Standort, also für mehrere KVF zusammengefasst. So kann überprüft werden, ob bzw. inwieweit eine Grundwasserverunreinigung auf dem Standort stattfindet bzw. stattgefunden hat.

Wässer/Oberflächengewässer/Standwasser (z.B. in Entwässerungsanlagen oder FÜB)

- Schöpfprobe (Mehrfachbeprobung, mind. zwei Beprobungskampagnen)

Für die Wirkungspfade Boden-Mensch und Boden-Nutzpflanze sind die Vorgaben der BBodSchV, Anhang 1 unverändert anzuwenden.

6.5 Phase IIb – Detailuntersuchung

Ergibt sich aus der Phase IIa ein Gefahrenverdacht, erfolgt zur abschließenden Gefährdungsabschätzung die Phase IIb. Je nach Zeitspanne zwischen Phase IIa und IIb ist, wie auch zwischen den Phasen I und IIa gefordert, eine Defizitanalyse hinsichtlich der Aussagereichweite und Aktualität der Daten der jeweiligen Phase durchzuführen.

Da sich in der Phase IIb der Fokus bei PFC-Kontaminationen i.d.R. auf den Wirkungspfad Boden-Grundwasser richtet, ist eine Prüfung, ob eine Zusammenfassung/Clusterung von KF für die weitere Bearbeitung sinnvoll ist, nachdrücklich zu empfehlen. Dies betrifft insbesondere nahe beieinander liegende Flächen mit diffusen Einträgen oder Flächen, die über ein zusammenhängendes Entwässerungssystem verfügen. Inwieweit eine Clusterung zielführend ist, ist individuell für jeden Standort zu prüfen, wobei das Zusammenfassen von Flächen insbesondere bei Grundwasseruntersuchung der Einzelflächenbearbeitung vorzuziehen ist.

Die grundsätzliche Vorgehensweise bei Untersuchungen im Rahmen der Phase IIb orientiert sich, wie die Phase IIa, an den jeweiligen Eintragszenarien und an möglicherweise aus der Phase IIa ableitbaren Kontaminationsmustern.

Für die Detailuntersuchung und die abschließende Gefährdungsabschätzung ist eine vertikale und horizontale Abgrenzung der Bodenkontaminationen bis ins Detail nicht in jedem Fall geboten. Je nach Daten- bzw. Ergebnisgrundlage nach der Phase IIa ergeben sich unterschiedliche Szenarien, die zu verschiedenen Untersuchungsansätzen der Phase IIb führen können. Nachfolgend steht immer die Klärung der Abschätzung des Gefährdungspotentials für das Grundwasser im Fokus.

Nachfolgend sind zwei Beispiele vorgestellt, die mögliche Bearbeitungsschritte einer Phase IIb basierend auf den Erkenntnissen aus der Phase IIa aufzeigen. Wie die Vorgehensweise in der Phase IIb im Einzelnen aussieht, ist in jedem Fall standortspezifisch abzuleiten.

1) Im Ergebnis der Phase IIa konnte keine Abgrenzung der PFC-Bodenkontaminationen in die Tiefe und in die Fläche erfolgen, Grundwasseraufschlüsse sind nicht vorhanden bzw. wurden nicht errichtet:

- Bei großen Flurabständen oder im Festgestein, zunächst Abgrenzung der Bodenkontaminationen über Eluatanalysen, Bodenproben aus größeren Tiefen (Teufen abhängig vom Bodenaufbau) oder
- Grundwassererkundung mit Grundwassermessstellenbau, bei geringeren Flurabständen und im Lockergestein

2) Im Ergebnis der Phase IIa konnte keine Abgrenzung der PFC-Bodenkontaminationen in die Tiefe und in die Fläche erfolgen, Grundwasseraufschlüsse sind vorhanden bzw. wurden errichtet und das Grundwasser untersucht:

- Bodenuntersuchungen zur Abschätzung des Schadstoffpotentials oder
- Weitere Grundwassererkundung, ggf. Ergänzung des Grundwassermessstellennetzes

Grundsätzlich sollte bei einem Messstellenbau in PFC-Eintragsbereichen eine durchgehende Bodenbeprobung mindestens im Bereich der ungesättigten Bodenzone durchgeführt werden. Dies dient dazu, Hinweise auf das Schadstofftransportverhalten zu erhalten und das Risiko für den Wirkungspfad Boden-Grundwasser besser abschätzen zu können. In jedem Fall ist für die Durchführung einer verbal-argumentativen Sickerwasserprognose, in Anbetracht der unterschiedlichen Mobili-

tät der PFC-Einzelstoffe, eine genaue Beschreibung des Bohrgutes notwendig.

Bei der Errichtung von Grundwassermessstellen ist grundsätzlich gemäß den einschlägigen fachlichen Vorgaben zu verfahren. Derzeit gibt es keine Hinweise darauf, dass bei der Untersuchung von PFC im Grundwasser vom Üblichen abweichende Anforderungen an den Ausbau (z.B. Lage der Filterstrecke, Durchmesser der Messstelle, Ausbaumaterial) zu stellen sind.

Ist mit einer großflächigen Beeinträchtigung der Grundwasserqualität zu rechnen, kann eine Untersuchung der gesättigten Bodenzone mittels Direct-Push-Verfahren (DP) vorgeschaltet werden, um die Lage und den Ausbau von Grundwassermessstellen gezielt festlegen und mit optimaler Positionierung die Anzahl von Grundwassermessstellen reduzieren zu können. Damit können der Bohraufwand und die Masse des zu entsorgenden, potentiell PFC-kontaminierten Bohrgutes so gering wie möglich gehalten werden.

6.6 Abschließende Gefährdungsabschätzung

Grundlage für die behördliche Bewertung und die gegebenenfalls erforderliche Einleitung der Phase III ist eine abschließende Gefährdungsabschätzung. Für eine solche abschließende Gefährdungsabschätzung müssen gem. BFR BoGWS (Anlage 2.1.1 Phase IIb (Detailuntersuchung)) „die Schutzgüter, Schadstoffquellen und Wirkungspfade (Transferpfade, Stoffausbreitungspfade) quantitativ beschrieben werden. Hierfür sind i.d.R. genauere Kenntnisse des Untergrundaufbaus, der hydrogeologischen Standortverhältnisse, der horizontalen und vertikalen Schadstoffverteilung sowie deren zeitlichen Veränderungen, der möglichen Emissionspfade sowie der toxikologischen Relevanz der Schadstoffe notwendig.“

Das bedeutet, dass für eine abschließende Gefährdungsabschätzung die Erkundungsmaßnahmen soweit abgeschlossen sein müssen, dass basierend auf den Ergebnissen eine Gefahrenbeurteilung möglich ist. Des Weiteren müssen die Verunreinigungen soweit abgegrenzt sein, dass eine ggf. notwendige Sanierungsuntersuchung darauf aufbauend erfolgen kann.

Sofern noch relevante Kenntnisdefizite bestehen, sind ergänzende Untersuchungen in Form „einer Verdichtung der Untersuchungspunkte“ im Rahmen der Phase IIb oder auch bis dahin nicht berücksichtigte Medien im Rahmen einer ergänzenden Phase IIa zu erkunden und zu beurteilen. Dabei können die Untersuchungsphasen in Abhängigkeit der Ergebnisse ggf. auch mehrstufig gestaltet sein.

7 Phase III - Sanierung

Sofern in der Gefährdungsabschätzung schädliche Bodenveränderungen oder schädliche Grundwasserverunreinigungen ermittelt wurden und die zuständige Behörde in ihrer Ermessensentscheidung feststellt, dass Maßnahmen zur Gefahrenabwehr erforderlich sind, ist die Phase III einzuleiten.

Zu beachten ist, dass alle Maßnahmen der Phase III entweder mit den zuständigen Kompetenzzentren des Bundesamtes für Infrastruktur, Umweltschutz und Dienstleistungen der Bundeswehr (BAIUDBw KompZ BauMgmt), mit BAIUDBw GS II 5 oder mit dem Zentralen Kontaminationsmanagement der BImA in der Abteilung ZEPM 4, der regionalen Fachplanung der BImA sowie der Leitstelle des Bundes im NLBL abzustimmen sind.

Insbesondere bei Verunreinigungen mit PFC aufgrund der noch bestehenden generellen Kenntnisdefizite z. B. zur Relevanz und Bestimmung von Precursor ist es wichtig, dass das Sanierungsziel in Abstimmung mit der zuständigen Behörde entsprechend des Sanierungsverlaufs und des Kenntniszuwachses angepasst werden kann (vertragliche Regelung).

Bereits zu Beginn der Phase III ist ein vorläufiges Sanierungsziel festzulegen. Eine Sanierungsuntersuchung mit einer Variantenstudie möglicher Sanierungsverfahren ist die Grundlage für die Prüfung der zuständigen Behörde, welche Sanierungsmaßnahme verhältnismäßig ist. In diesem Zusammenhang ist das Sanierungsziel ggf. iterativ anzupassen.

Aufgrund der noch bestehenden Kenntnisdefizite beim Umgang mit PFC-Verunreinigungen ist die in §4Abs.3BBodSchG festgelegte Gleichrangigkeit von Dekontaminations- und Sicherungsmaßnahmen zu betonen.

Bisher stehen zur Sanierung von PFC-Kontaminationen nur wenige geeignete Verfahren zur Verfügung. Für das Grundwasser werden pump-and-treat Maßnahmen erfolgreich durchgeführt. Für die Quellenbeseitigung im Boden ist ein Bodenaustausch als in der Praxis umgesetztes Verfahren verfügbar. Zur temporären Sicherung von Bodenkontaminationen ist auch eine Abdeckung machbar. Daneben gibt es eine Vielzahl unterschiedlichster Verfahrensideen, die in ihrer Entwicklungsstufe vom theoretisch Machbaren bis hin zur Umsetzung im Feldmaßstab reichen. Vom UBA (2020b, Anhang C) wurde eine umfangreiche Auflistung einer Vielzahl von Verfahren vorgelegt. Bei der Nutzung dieser umfangreichen Liste sei darauf hingewiesen, dass die meisten der dort aufgeführten „Verfahren noch im Entwurfs- oder Entwicklungsstadium sind“ (UBA, 2020b, Anhang C, S. 6). Die Auflistung kann daher nicht ohne ausführliche Vorprüfung als Auswahlliste möglicher umsetzbarer Verfahren dienen.

Bei der Auswahl eines Sanierungsverfahrens ist frühzeitig die potentielle Genehmigungsfähigkeit mit den zuständigen Behörden abzustimmen. Dies gilt insbesondere bei innovativen Verfahren wie beispielsweise dem Einbringen von Substrat in den Boden zur Immobilisierung von PFC.

Für die Verfahrensprüfung sei darauf hingewiesen, dass bei großräumigen Kontaminationen zum aktuellen Stand meist Verfahren zur Sicherung der Kontamination eingesetzt werden. Für große Kontaminationsflächen sind ökonomisch und ökologisch sinnvoll umsetzbare Dekontaminationsmaßnahmen aktuell (noch) nicht verfügbar. Für kleinräumige, punktuelle Kontaminationen steht ein Bodenaushub mit anschließender Hochtemperaturverbrennung als einzig verfügbares Verfahren zur Dekontamination zur Verfügung.

Boden

Bei Eingriffen in den Boden innerhalb eines von der Behörde für verbindlich erklärten Sanierungsplangebietes ist §13 Abs. 5 BBodSchG zu berücksichtigen. Dabei kann kontaminierter Boden abweichend vom Abfallrecht unter bestimmten Bedingungen am Standort umgelagert und in technischen Bauwerken gesichert wieder eingebaut werden. Im Vordergrund steht dann die Gefahrenabwehrmaßnahme. Dabei handelt es sich bei jedem Vorhaben um einen Einzelfall, der mit den zuständigen Behörden abzuklären und von diesen zu genehmigen ist.

Nachfolgend sind etablierte Methoden und im Fokus der fachlichen Diskussion stehende Methoden stichwortartig kurzzusammengefasst. Für eine umfangreiche Beschreibung und Bewertung auch anderer Verfahren sei auf den Anhang C, UBA 2020b verwiesen.

Sicherung/Abdeckung

Diese Methode ist standortspezifisch anpassbar und generell genehmigungsfähig. Sie bietet sich zudem als temporäre Lösung als Sofortmaßnahme an, um einen weiteren Austrag von PFC ins Grundwasser zu verhindern.

Bodenaustausch

Der Bodenaustausch ist für kleinräumige, punktuelle Kontaminationen geeignet.

Mit dem anfallenden Bodenaushub kann wie folgt umgegangen werden:

- Deponierung – Achtung, für PFC-kontaminierte Stoffe kaum Deponieraum vorhanden! Im Rahmen der Planung sind die möglichen Entsorgungswege genauestens zu prüfen und abzustimmen.
- Hochtemperaturverbrennung – aufgrund der hohen Kosten und unter ökologischen Gesichtspunkten (völlige Zerstörung von Bodenfunktionen, hoher Energieaufwand) nur für sehr kleine Bodenmengen geeignet.
- Sicherung durch Umlagerung innerhalb des Sanierungsplangebietes – immer mit Einbau im technischen Bauwerk und Überwachung des Grundwassers.

Dabei werden z.B. PFC-verunreinigte Böden aus mehreren Bereichen auf der betroffenen Liegenschaft zusammengeführt in einem modular aufgebauten Sanierungsbauwerk aus technischen Dichtungs- und Sicherungsbauwerken. Die Zielfläche sollte dabei unter Beachtung des Verschlechterungsverbots auf einer schon verunreinigten Fläche errichtet werden. Derzeit sind entsprechende Maßnahmen auf Bundesliegenschaften in Vorbereitung.

Neben der Unterbindung der weiteren Exposition der PFC hat die beschriebene Zentralisierung der Verunreinigungen den Vorteil, dass Dekontaminationsmaßnahmen unter gesicherten Bedingungen durchgeführt werden können, sofern zukünftig entsprechende Techniken zur Dekontamination verfügbar sind.

Bodenwäsche (Klassierung von Korngrößen)

Die Grundannahme zur Verfahrenswirkung besteht darin, dass sich PFC bevorzugt an das Feinkorn binden und durch eine Bodenwäsche (Klassierung) die Menge PFC-kontaminierten Bodens auf die Feinfraktion reduziert wird. Anschließend folgt zwangsläufig eine Deponierung oder Hochtemperaturverbrennung des feinkörnigen Bodens.

Diese Methode ist nicht bei allen Korngrößenverteilungen anwendbar, da bei einem zu hohen Feinkornanteil das Reduzierungspotential der Bodenmasse nicht im Verhältnis zum Aufwand steht. Es ist immer eine Abwasserbehandlungsanlage (z.B. Adsorption auf Aktivkohle) nachzuschalten.

Grundwasser

Auch wenn zunehmend mehr Methoden, auch in-situ Sanierungsverfahren, zur PFC-Grundwassersanierung vorgestellt werden (vgl. UBA, 2020b, Anhang C), steht bisher als einziges etabliertes Verfahren das pump-and-treat-Verfahren (Grundwasserförderung mit on site-Behandlung des Grundwassers) zur Verfügung. Dabei wird dies im Rahmen von PFC-Grundwasserschäden häufig nicht als Dekontaminationsmaßnahme im engeren Sinne eingesetzt, sondern vielmehr zur Abschirmung und Sicherung des weiteren Abstroms.

Varianten des pump-and-treat-Verfahrens stehen insbesondere bei der Behandlung (treat) des geförderten Grundwassers zur Verfügung (z.B. Fällung, Adsorption). Bei der Auswahl geeigneter Behandlungsverfahren sind unbedingt Vorversuche durchzuführen, da sich die Leistungsfähigkeit verschiedener Vorbehandlungsstufen und Adsorbentien abhängig von der PFC-Konzentration und Zusammensetzung im Wasser stark unterscheiden kann. Darüber hinaus haben der spezifische Wasserchemismus (pH-Wert, Fe-Gehalt etc.) und möglicherweise vorhandene Störstoffe, die die Aktivkohle belegen können, einen erheblichen Einfluss auf den Wirkungsgrad der Abreinigung.

Bei der Grundwasserbehandlung ist immer zu berücksichtigen, dass hierbei die PFC lediglich aus dem Wasser ausgeschleust werden. Am Ende steht immer eine Zerstörung der PFC durch eine Hochtemperaturverbrennung. Diese kann durch Hochtemperaturverbrennung des Adsorbens oder durch Lösen der PFC vom Adsorbens und Überführen in die Gasphase mit anschließender Hochtemperaturnachverbrennung der Abgase erfolgen.

8 Umgang mit PFC-haltigem Boden- und Pflanzenmaterial

Auf Bundesliegenschaften fällt nicht nur bei bodenschutzrechtlich erforderlichen Sanierungsmaßnahmen (s. Kap. 7), sondern z.B. bei infrastrukturellen Instandhaltungsmaßnahmen regelmäßig Material wie Bodenaushub oder auch Grasschnitt an, das aus mit PFC-kontaminierten Bereichen stammt.

Der ordnungsgemäße Umgang mit PFC-haltigen Materialien ist frühzeitig zu klären, insbesondere vor dem Hintergrund, dass die Entsorgung von mit PFC kontaminierten Materialien weiterhin erschwert ist. Aufgrund unklarer rechtlicher oder genehmigungstechnischer Rahmenbedingungen nehmen viele Deponien keine entsprechenden Materialien an. Zudem ist generell der Deponieraum knapp.

Besonders relevant ist daher der allgemeine Grundsatz, Abfälle möglichst zu vermeiden oder zu minimieren. Bei nicht vermeidbaren Abfällen ist, sofern im Einzelfall möglich und sinnvoll, geringer belastetes Material von höher belastetem Material zu trennen und getrennt zu entsorgen (Vorrang Verwertung vor Beseitigung).

Nachdem es bisher keine einheitlichen Grundlagen gab, enthält nunmehr der Entwurf des „Leitfadens zur PFC-Bewertung“ von LABO/LAWA (2021) umfangreiche Vorschläge im Hinblick auf den Umgang mit PFC-haltigem Bodenmaterial. Hierzu stehen allerdings noch letzte Abstimmungen mit der LAGA aus (Stand: August 2021). Das Vorgehen auf Bundesliegenschaften sollte den Empfehlungen grundsätzlich folgen.

Bodenmaterial aus Baumaßnahmen

Unter Beachtung der Maßgabe zur Abfallvermeidung ist zunächst zu prüfen, inwiefern bei Baumaßnahmen ausgehobenes, kontaminiertes Bodenmaterial wieder am Ort der Entstehung eingebaut werden darf (allgemeingültig, nicht nur bzgl. PFC). Diesbezüglich gibt es keine allgemeingültigen bundesweiten Regelungen und klaren Vorgaben. Ebenso ist der Ort der Entstehung nicht klar definiert: Gemeint sein kann z.B. die einzelne Baugrube, die Baustelle oder das Grundstück. Grundsätzlich gilt, dass es keine Verschlechterung geben darf (Verschlechterungsverbot) und dass keine schädliche Bodenveränderung oder das Entstehen einer schädlichen Veränderung des Grundwassers zu besorgen sein darf. Ein Wiedereinbau kontaminierten Bodenaushubs vor Ort ist daher einzelfallspezifisch abzuklären. Die Rahmenbedingungen inklusive des räumlichen Geltungsbereichs sind im Vorfeld möglichst klar zu definieren.

Sofern der Bodenaushub definitionsgemäß als Abfall einzustufen ist, d.h. überschüssig ist (Entledigungswille) oder aufgrund der Verunreinigung (hier mit PFC) am Ort der Entstehung nicht wiederverwendet werden darf (Entledigungspflicht), ist er ordnungsgemäß zu entsorgen (Verwertung oder Beseitigung) (LABO/LAWA 2021).

Grundsätzlich gilt, dass bei einer Verwertung die Unterschreitung der Gefahrenschwelle erforderlich ist. Da es bisher keine entsprechenden Richtwerte respektive Vorsorgewerte gem. BBodSchV oder Zuordnungswerte gibt, empfiehlt LABO/LAWA (2021), sich an den GFS-Werten (Eluat-Werte) für das Grundwasser zu orientieren. Die bisher für sieben PFC-Einzelstoffe vorliegenden GFS-Werte werden dort als Obergrenze sowohl für die Verwertungskategorie 1 als auch für die Verwertungskategorie 2 angesetzt, die GOW-Werte für die weiteren sechs prioritären PFC-Einzelstoffe dienen jeweils als Orientierungswerte. Verwertungskategorie 1 bezeichnet die „uneingeschränkte offene Verwertung“ des Bodenmaterials, Verwertungskategorie 2¹¹ den „eingeschränkten offenen Einbau in technischen Bauwerken“.

Für die Verwertungskategorie 3, die den eingeschränkten Einbau in technische Bauwerke mit definierten Sicherungsmaßnahmen wie z.B. eine wasserundurchlässige Abdeckung beschreibt, schlägt LABO/LAWA (2021) das 5- bzw. 10-fache der GFS-Werte vor.

Die Tabellen 7 und 8 mit den jeweiligen Werten der Verwertungskategorien sowie den dazugehörigen Erläuterungen wurden aus LABO/LAWA (2021) übernommen. Dort sind weitere allgemeine Grundsätze sowie detaillierte Angaben zu den einzelnen Verwertungskategorien enthalten.

Es empfiehlt sich, die Verwertung von Bodenmaterial im Einzelfall abzuklären. Erhöhte Hintergrundgehalte oder günstige (hydro-)geologische Eigenschaften, die einer Gefährdung des Grundwassers entgegenstehen, lassen ggf. eine Verwertung von Bodenmaterial auch mit höheren PFC-Konzentrationen zu.

Im Hinblick auf die Verwertung oder Beseitigung auf Deponien bezieht sich LABO/LAWA (2021) auf Artikel 7 Absatz 4 EU-POP-Verordnung und § 7 Absatz 1 Nummer 7 Deponieverordnung (DepV), gemäß derer eine oberirdische Deponierung von Bodenmaterial bis zu einem Gehalt von 50 mg/kg für den Einzelstoff PFOS zulässig ist. Bei einer Überschreitung dieses Werts kann eine Entsorgung in permanente unterirdische Speicher für gefährliche Abfälle erfolgen. LABO/LAWA (2021) empfiehlt, den für PFOS geltenden Grenzwert von 50mg/kg für die oberirdische Deponierung auf die Summe der ermittelten PFC anzuwenden.

11 Bzgl. der Verwertungskategorie 2 gibt es noch Einwände der LAGA, so dass das UMK-Umlaufverfahren noch nicht abgeschlossen werden konnte (vgl. Fußnote 1) (Stand: August 2021).

Tabelle 7: Verwertungskategorien, vorläufige zulässige Konzentrationen im W/F 2:1-Eluat in µg/L (LABO/LAWA 2021)

Stoffname	Abkürzung	Verwertungs- kategorie 1 (uneingeschränkte offene Verwertung)	Verwertungs- kategorie 2 (Eingeschränkter offener Einbau in technischen Bauwerken)	Verwertungs- kategorie 3 (Eingeschränkter Einbau mit definierten technischen Sicherungs- maßnahmen)
Perfluorbutansäure	PFBA	10	10	50
Perfluorhexansäure	PFHxA	6	6	30
Perfluoroctansäure	PFOA	0,1	0,1	1
Perfluornonansäure	PFNA	0,06	0,06	0,6
Perfluorbutansulfonsäure	PFBS	6,0	6,0	30
Perfluorhexansulfonsäure	PFHxS	0,1	0,1	1
Perfluoroctansulfonsäure	PFOS	0,1	0,1	1

Tabelle 8: Verwertungskategorien, vorläufige zusätzliche Orientierungswerte für zulässige Konzentrationen im W/F 2:1-Eluat in µg/L (LABO/LAWA 2021)

Stoffname	Abkürzung	Verwertungs- kategorie 1 (uneingeschränkte offene Verwertung)	Verwertungs- kategorie 2 (Eingeschränkter offener Einbau in technischen Bauwerken)	Verwertungs- kategorie 3 (Eingeschränkter Einbau mit definierten technischen Sicherungs- maßnahmen)
Perfluorpentansäure	PFPeA	3,0	3,0	15
Perfluorheptansäure	PFHpA	0,3	0,3	3
Perfluordekansäure	PFDA	0,1	0,1	1
Perfluorheptansulfonsäure	PFHpS	0,3	0,3	3
1H,1H,2H,2H-	PFBS	6,0	6,0	30
Perfluoroctansulfonsäure	6:2 FTS (H4PFOS)	0,1	0,1	1
Perfluoroctansulfonamid	PFOSA	0,1	0,1	1
Weitere PFC	--	0,1	0,1	1

Erläuterungen zur Tabelle:

1. Bei der vorsorgeorientierten Verwertung von Bodenmaterial darf das Entstehen einer schädlichen Bodenveränderung nicht zu besorgen sein. Bodenmaterial darf daher auf oder in die durchwurzelbare Bodenschicht auf- oder eingebracht oder in bodenähnliche Anwendungen eingebracht werden, wenn die anstelle von Vorsorgewerten verwendeten Eluatgehalte in Höhe der GFS-Werte im Bodeneluat nicht überschritten werden. Diese Werte orientieren sich an den Werten, die das Grundwasser ausreichend schützen. Die Gesundheitlichen Orientierungswerte (GOW) bieten eine Orientierung für weitere Einzelstoffe, solange für diese noch keine GFS-Werte vorliegen.
2. Angesichts der unzureichenden Datenlage zur Ableitung von Feststoffwerten wird empfohlen, vorerst für die Beurteilung einer Verwertbarkeit von Bodenmaterial die Werte der Tabelle 3 a/b zu verwenden. Sobald Hintergrundwerte auf Basis von Feststoffgehalten vorliegen und die Bestimmungsgrenze standardmäßig bei 0,1 µg/kg angewendet werden kann, sind die hilfsweisen und vorläufigen Anforderungen in Form von Eluatwerten durch Feststoffgehalte in Kombination mit Eluatwerten abzulösen. Aufgrund dieser vorläufigen Abweichung von der Wertesystematik des Bodenschutzrechts können für die Verwertungskategorien 1 und 2 identische Zuordnungswerte verwendet werden. Abweichungen davon sind als länderspezifische Regelungen möglich. Dies gilt auch für eine Anwendung der Quotientensumme (QS = 1).
3. Bei der Ableitung der Werte der Verwertungskategorie 3 wurde die Mobilität kurzkettiger Verbindungen (Anwendung des Faktors fünf) bzw. die erhöhte Retardation langkettiger Verbindungen im Boden (Anwendung des Faktors Zehn) berücksichtigt.

Pflanzenmaterial

Auf Flächen mit Kontaminationsverdacht sollte aus Vorsorgegründen die landwirtschaftliche Nutzung eingestellt werden. Dies umfasst die Landnutzung zur Heu- und/oder Silagegewinnung sowie die Nutzung als Weide- und Ackerflächen. Anfallende Mahd ist, falls kein geeigneter Entsorgungsweg gefunden werden kann, auf der Entstehungsfläche als Mulch zu belassen. Dadurch werden mögliche Verschleppungen minimiert.

An Dritte verpachtete/vermietete Flächen, die sich mit Flächen mit PFC-Kontaminationsverdacht überschneiden, sind bis auf Widerruf aus der landwirtschaftlichen Nutzung zu nehmen, um so den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze und das Risiko einer Schadstoffaufnahme durch den Menschen durch den Verzehr möglicherweise belasteter Tiere zu unterbrechen. Zudem muss die

Kompostierung des Aufwuchses solcher Flächen unterbleiben, um eine Rückführung von PFC in den Boden beim Aufbringen des Kompostes auf anderen (unbelasteten) Flächen zu verhindern.

Über ein Vor-Ernte-Monitoring kann das Nutzungsverbot ggf. aufgehoben werden. Damit kann sichergestellt werden, dass eine mögliche PFC-Kontamination des Ernteguts entdeckt und die Verwendung bzw. das Inverkehrbringen unterbunden wird. Dies trifft auch auf Pflanzenmaterial zu, welches der Kompostgewinnung zugeführt werden soll. In jedem Fall ist das Vorgehen mit den zuständigen Behörden abzustimmen.

Bestätigt sich nach einer Untersuchung der Phase IIa der Kontaminationsverdacht auf einer Fläche nicht, kann diese der landwirtschaftlichen Nutzung wieder uneingeschränkt zugeführt werden.

9 Literatur

ALBERS, M. (2011): Analytik und Elimination von perfluorierten Tensiden aus Prozesswässern der Galvanik. Dissertation an der Bergischen Universität Wuppertal. Veröffentlicht im September 2011.

BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ (StMUV, 2018): Bericht – Umweltschonender Einsatz von Feuerlöschschäumen, 1. Auflage. Stand: Februar 2018.

BMI/BMVg (2018): Berufliche Richtlinien Boden- und Grundwasserschutz (BFR BoGWS); Berlin/Bonn. Fortlaufende Aktualisierung unter www.bfr-bogws.de.

BUNDESANSTALT FÜR IMMOBILIENAUFGABEN (BImA, 2016): Vorläufige Nutzungsbeschränkungen auf Flächen mit PFC-Belastungen bzw. PFC-Verdacht vom 31.10.2016 (AZ, ZEPM.VV 2639 – 05/15.4002).

BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ, BAU UND REAKTORSICHERHEIT (BMUB, 2017): Schriftlicher Bericht – Bericht zu perfluorierten Verbindungen; Reduzierung/Vermeidung, Regulierung und Grenzwerte, einheitliche Analyse- und Messverfahren für fluororganische Verbindungen; Bonn, 30.09.2017.

BUNDESWEHR (2016): Verfügungen BAIUDBw GS II/II 5 Az GS II 5 – 63-25-42/00-01 vom 3. Februar 2016 und BAIUDBw GS II/ II 5/ II 6 vom 22. August 2016.

Chemikalien-Verbotsverordnung (ChemVerbotsV, 2012): Verordnung über Verbote und Beschränkungen des Inverkehrbringens gefährlicher Stoffe, Zubereitungen und Erzeugnisse nach dem Chemikaliengesetz vom 13.06.2003, zuletzt geändert am 24.02.2012.

Deutscher Bundestag (2020): Lesefassung – Verordnung der Bundesregierung - Verordnung zur Einführung einer Ersatzbaustoffverordnung, zur Neufassung der Bundesbodenschutz- und Altlastenverordnung und zur Änderung der Deponieverordnung und der Gewerbeabfallverordnung (über <https://www.bmu.de/gesetz/verordnung-zur-einfuehrung-einer-ersatzbaustoffverordnung-zur-neufassung-der-bundes-bodenschutz-und-1/> oder direkt

https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Glaeserne_Gesetze/19._Lp/mantelvo/Entwurf/mantelvo_lesefassung_bf.pdf)

DIN 4124-01 (2012): Baugruben und Gräben – Böschungen, Verbau, Arbeitsraumbreiten. Norm vom 01.01.2012.

DIN 19529 (2015): Elution von Feststoffen – Schüttelverfahren zur Untersuchung des Elutionsverhaltens von anorganischen und organischen Stoffen mit einem Wasser/Feststoff-Verhältnis von 2 l/kg. Norm vom 01.12.2015.

DIN 38402-13 (2020): Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung – Allgemeine Angaben (Gruppe A) – Teil 13: Planung und Durchführung der Probenahme von Grundwasser (A 13). Norm-Entwurf vom 10.04.2020.

DIN 38407-42 (2011): Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung – Gemeinsam erfassbare Stoffgruppen (Gruppe F) – Teil 42: Bestimmung ausgewählter polyfluorierter Verbindungen (PFC) in Wasser – Verfahren mittels Hochleistungs-Flüssigkeitschromatographie und massenspektrometrischer Detektion (HPLC-MS/MS) nach Fest-Flüssig-Extraktion (F 42). Norm-Entwurf vom 01.03.2011.

DIN 38409-59 (2020): Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung – Summarische Wirkungs- und Stoffkenngrößen (Gruppe H) – Teil 59: Bestimmung von adsorbierbarem organisch gebundenem Fluor, Chlor, Brom und Iod (AOF, AOCl, AOBr, AOI) mittels Verbrennung und nachfolgender ionenchromatographischer Messung. Norm-Entwurf vom 02.10.2020.

DIN 38414-14 (2011): Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung und Sedimente (Gruppe S) – Teil 14: Bestimmung ausgewählter polyfluorierter Verbindungen (PFC) in Schlamm, Kompost und Boden – Verfahren mittels Hochleistungs-Flüssigkeitschromatographie und massenspektrometrischer Detektion (HPLC-MS/MS) (S 14). Norm vom 01.08.2011.

Düngemittelverordnung (DüMV, 2017): – Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln vom 05.12.2012, zuletzt geändert am 26.05.2017.

EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (EFSA, 2020): – Risk to human health relate to the presence of perfluoralkyl substances in food. EFSA Journal 18(9). Veröffentlicht am 17.09.2020.

EUROPEAN TECHNICAL COMMITTEE FOR FLUORINE (Eurofluor, 2018): Berichtsheft – Ein Überblick über die Fluorchemie, 3. Auflage, Stand März 2015.

EUROPÄISCHE UNION (EU, 2006a): Richtlinie 2006/122/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 12. Dezember 2006 zur dreißigsten Änderung der Richtlinie 76/769/EWG des Rates zur Angleichung der Rechts- und Verwaltungsvorschriften der Mitgliedstaaten für Beschränkungen des Inverkehrbringens und der Verwendung gewisser gefährlicher Stoffe und Zubereitungen (Perfluorooctansulfonate).

EUROPÄISCHE UNION (EU, 2006b): Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Dezember 2006 zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH), zur Schaffung einer Europäischen Agentur für chemische Stoffe, zur Änderung der Richtlinie 1999/9445/EG und zur Aufhebung der Verordnung (EWG) Nr. 793/93 des Rates, der Verordnung (EG) Nr. 1788/94 der Kommission, der Richtlinie 76/769/EWG des Rates sowie der Richtlinien 91/115/EWG, 93/105/EG und 2000/21/EG der Kommission.

EUROPÄISCHE UNION (EU, 2010): Verordnung (EU) Nr. 757/2010 vom 24. August 2010 zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 850/2004 des Europäischen Parlaments und des Rates über persistente organische Schadstoffe hinsichtlich der Anhänge I und III.

EUROPÄISCHE UNION (EU, 2013): Richtlinie 2013/39/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 12. August 2013 zur Änderung der Richtlinien 2000/60/EG und 2008/105/EG in Bezug auf prioritäre Stoffe im Bereich der Wasserpolitik.

EUROPÄISCHE UNION (EU, 2017): Verordnung (EU) 2017/1000 der Kommission vom 13. Juni 2017 zur Änderung von Anhang XVII der Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH) betreffend Perfluorooctansäure (PFOA), ihre Salze und PFOA-Vorläuferverbindungen.

EUROPÄISCHE UNION (EU, 2019): Verordnung (EU) Nr. 2019/1021 vom 20. Juni 2019 über persistente organische Schadstoffe (Neufassung).

EUROPÄISCHE UNION (EU, 2020): Richtlinie (EU) Nr. 2020/2184 vom 16.12.2020 über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (Neufassung).

Gefahrstoffverordnung (GefStoffV, 2015): Verordnung zum Schutz vor Gefahrstoffen vom 26.11.2010, zuletzt geändert am 03.02.2015.

LABO – BUND/LÄNDER-ARBEITSGEMEINSCHAFT BODENSCHUTZ (LABO, 2015): Boden- und Grundwasserkontaminationen mit PFC bei altlastenverdächtigen Flächen mit Löschmitteleinsätzen – Arbeitshilfe zur flächendeckenden Erfassung, standortbezogenen historischen Erkundung und zur orientierenden Untersuchung (Projektstufe 1), Projekt-Nr. B 4.14 (Stand: Oktober 2015).

LABO – BUND/LÄNDER-ARBEITSGEMEINSCHAFT BODENSCHUTZ (LABO, 2017): Boden- und Grundwasserkontaminationen mit PFC bei altlastenverdächtigen Flächen und nach Löschmitteleinsätzen – Durchführung und Ergebnisse zu exemplarischen flächendeckenden und systematischen Erfassungen und standortbezogenen Erhebungen (Projektstufe 2), Projekt-Nr. B 4.15 (Stand: September 2017).

LABO/LAWA – Bund/Länder Arbeitsgruppe PFC (LABO/LAWA, 2021): Leitfaden zur PFC-Bewertung – Empfehlung für die bundeseinheitliche Bewertung von Boden- und Gewässerunreinigungen sowie für die Entsorgung PFC-haltigen Bodenmaterials; Entwurf vom 27.04.2021.

LAGA – BUND/LÄNDER-ARBEITSGEMEINSCHAFT ABFALL (LAGA, 2010): Jahresbericht der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 2010.

LAGA PN 98 – LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT ABFALL (LAGA PN 98, 2001): Mitteilungen der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 32 – LAGA PN 98 – Richtlinie für das Vorgehen bei physikalischen, chemischen und biologischen Untersuchungen im Zusammenhang mit der Verwertung/ Beseitigung von Abfällen, Dezember 2001.

LAHL, U., FRICKE, M. (2005): Risikobewertung von Perfluortensiden als Beitrag zur aktuellen Diskussion zum REACH-Dossier der EU-Kommission. Erschienen in: Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung 17 (1), S. 36-49, Springer Verlag.

LANDESAMT FÜR NATUR, UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ NORDRHEIN-WESTFALEN (LANUV NRW, 2011): Verbreitung von PFT in der Umwelt, Ursachen – Untersuchungsstrategie – Ergebnisse – Maßnahmen. LANUV-Fachbericht 34 vom August 2011.

LANDESAMT FÜR NATUR, UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ NORDRHEIN-WESTFALEN (LANUV NRW, 2021): Bewertungsmaßstäbe für PFC-Konzentrationen für NRW. Online verfügbar unter: <https://www.lanuv.nrw.de/umwelt/gefahrstoffe/pfc/bewertungsmassstaebe#c6523> (Datum des Abrufs: 04.01.2021).

LANDESAMT FÜR UMWELTSCHUTZ, BAYERN (LfU BY, 2017): Leitlinien zur vorläufigen Bewertung von PFC-Verunreinigungen in Wasser und Boden. Veröffentlicht im April 2017.

LANDESAMT FÜR UMWELTSCHUTZ, BAYERN (LfU BY, 2020): Bewertungsleitlinien PFC, Bewertungsgrundsätze des Bundes. Versand per Mail am 11.12.2020.

LANDESAMT FÜR UMWELTSCHUTZ, BAYERN (LfU BY, 2018): Hinweise für Sachverständige und Untersuchungsstellen Boden/Wasser. Newsletter vom 26.06.2018.

LANDESAMT FÜR UMWELT RHEINLAND-PFALZ (LfU RP, 2017): Per- und polyfluorierte Chemikalien (PFC) in der Umwelt, ALEX-Informationsblatt 29 vom Mai 2017.

LANDESFEUERWEHRSCHULE BADEN-WÜRTTEMBERG (LFS-BW, 2010): Fluorhaltige Schaumlöschmittel – Richtige Auswahl und umweltverträglicher Einsatz. Veröffentlicht am 05.07.2010.

LAWA – LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT WASSER (LAWA, 2004): Ableitung von Geringfügigkeitsschwellenwerten für das Grundwasser. Veröffentlicht im Dezember 2004.

LAWA – LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT WASSER (LAWA, 2010): Stoffdatenblatt PFOS CAS 1763-23-1.

LAWA – BUND/LÄNDER-ARBEITSGEMEINSCHAFT WASSER (LAWA, 2017a): Ableitung von Geringfügigkeitsschwellenwerten für das Grundwasser – Aktualisierte und überarbeitete Fassung 2016. Veröffentlicht im Januar 2017.

LAWA – BUND/LÄNDER-ARBEITSGEMEINSCHAFT WASSER (LAWA, 2017b): Ableitung von Geringfügigkeitsschwellenwerten für das Grundwasser – Per- und polyfluorierte Chemikalien (PFC), erarbeitet von der LAWA-LABO- Kleingruppe PFC. Veröffentlicht am 28.07.2017.

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT BADEN-WÜRTTEMBERG (UM, 2012): Handlungshilfe für Entscheidungen über die Ablagerbarkeit von Abfällen mit organischen Schadstoffen (Handlungshilfe organische Schadstoffe auf Deponien, PFT). Veröffentlicht im Mai 2012.

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT BADEN-WÜRTTEMBERG (UM, 2015): Vorläufige GFS-Werte für das Grundwasser und Sickerwasser aus schädlichen Bodenveränderungen und Altlasten, Az 5-8932.52/4.

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT BADEN-WÜRTTEMBERG (UM, 2016): Entsorgung von Bodenmaterialien aus PFC (PFAS)-belasteten Flächen, Az 25-8980.05/15.

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT BADEN-WÜRTTEMBERG (UM, 2018): Anwendung der Geringfügigkeitsschwellenwerte (GFS-Werte) für per- und polyfluorierte Chemikalien (PFC) zur Beurteilung nachteiliger Veränderungen der Beschaffenheit des Grund- und Sickerwassers aus schädlichen Bodenveränderungen und Altlasten; Az 5-8932.52/4.

ORGANISATION FOR ECONOMIC COOPERATION AND DEVELOPMENT (OECD, 2020): Portal on Per and Poly Fluorinated Chemicals. Online verfügbar unter: www.oecd.org/chemicalsafety/portal-perfluorinated-chemicals (Datum des Abrufs: 01.11.2020).

RICHTER, L., CORDNER, A., BROWN, P. (2018): Non-stick science: Sixty years of research and (in)action on fluorinated compounds. *Social Studies of Science*, Vol. 48(5), S. 691-714. Veröffentlicht am 20.09.2018.

SCHULTZ, M. M., Barofsky, D. F., Field J. A. (2003): Fluorinated Alkyl Surfactants, *Environmental Engineering Science*, Vol. 20, No. 5, S. 487-501. Veröffentlicht am 06.07.2004.

STOCKHOLM CONVENTION ON PERSISTENT ORGANIC POLLUTANTS (POP, 2017): The 16 New POPs -An introduction on the chemicals added to the Stockholm Convention as Persistent Organic Pollutants by the Conference of the Parties. Online verfügbar unter <http://chm.pops.int/TheConvention/ThePOPs/TheNewPOPs/tabid/2511/Default.aspx> (Datum des Abrufs: 09.09.2021).

UMWELTBUNDESAMT (UBA, 2006): Trinkwasserkommission: Vorläufige Bewertung von Perfluorierten Tensiden (PFT) im Trinkwasser am Beispiel ihrer Leitsubstanzen Perfluorooctansäure (PFOA) und Perfluorooctansulfonsäure (PFOS). Überarbeitete Stellungnahme vom 13.07.2006.

UMWELTBUNDESAMT (UBA, 2011): Grenzwerte, Leitwerte, Orientierungswerte, Maßnahmenwerte – Aktuelle Definitionen und Höchstwerte. Überarbeitete Fassung vom 16.12.2011.

UMWELTBUNDESAMT (UBA, 2013): Fluorhaltige Schaumlöschmittel – Umweltschonender Einsatz. Ratgeber Broschüre. Veröffentlicht am 01.06.2013.

UMWELTBUNDESAMT (UBA, 2014): REACH Informationsportal – Aufruf zur Übermittlung von Informationen zu PFOA und PFOA-Vorläufersubstanzen vom 07. März 2014. Online verfügbar unter: www.reach-info.de (Datum des Abrufs: 16.08.2014).

UMWELTBUNDESAMT (UBA, 2017a): Fortschreibung der vorläufigen Bewertung von per- und polyfluorierten Che-

mikalien (PFC) im Trinkwasser; Empfehlung des Umweltbundesamtes nach Anhörung der Trinkwasserkommission. In: *Bundesgesundheitsblatt – Gesundheitsforschung – Gesundheitsschutz* 3. Veröffentlicht am 02.01.2017.

UMWELTBUNDESAMT (UBA, 2017b): Regulierung von PFC: aktueller Stand, künftige Entwicklungen; Vortrag beim Workshop PFC-Kontaminationen für Wasser und Boden am 21.11.2017 in Augsburg. Online verfügbar unter: www.lfu.bayern.de (Datum des Abrufs: 01.06.2018).

UMWELTBUNDESAMT (UBA, 2018): Per- und polyfluorierte Chemikalien (PFC) – Darstellung der Stoffgruppe PFC. Online verfügbar unter: www.umweltbundesamt.de/themen/chemikalien/chemikalien-reach/stoffgruppen/per-polyfluorierte-chemikalien-pfc#textpart-1 (Datum des Abrufs: 01.06.2018).

UMWELTBUNDESAMT (UBA, 2020a) Hrsg.: Human-Bio-monitoring von perfluorierten Chemikalien – Erarbeitung eines Vorschlags zur Ableitung je eines HBM-II-Wertes für PFOA und PFOS. Online verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-03-24_uug_01-2020_hbm-ii-werte-pfoa-pfos.pdf (Datum des Abrufs: 10.08.2020).

UMWELTBUNDESAMT (UBA, 2020b) Hrsg.: Sanierungsmanagement für lokale und flächenhafte PFAS-Kontaminationen – Abschlussbericht. Online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/sanierungsmanagement-fuer-lokale-flaechenhafte-pfas> (Datum des Abrufs: 09.09.2021).

UMWELTBUNDESAMT (UBA, 2020c): PFAS Gekommen, um zu bleiben; Schwerpunkt 1/2020. Online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/schwerpunkt-1-2020-pfas-gekommen-um-zu-bleiben> (Datum des Abrufs: 09.09.2021).

UMWELTBUNDESAMT (UBA, 2020d): Empfehlung des Umweltbundesamtes – Umgang mit per- und polyfluorierten Alkylsubstanzen (PFAS) im Trinkwasser – Empfehlung des Umweltbundesamtes nach Anhörung der Trinkwasserkommission. Online verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5620/dokumente/twk_200826_empfehlung_pfas_final.pdf (Datum des Abrufs: 26.08.2020).

Anlagen

A-1.1 Binnenoberflächengewässer

Richtlinie, Verordnung, Regelung	Begriff für Beurteilungswert	Substanz	Begrenzender Wert	Anmerkung
EU: Richtlinie 2013/39/EU (EU, 2013) und/oder OGewV 2016 (Obeflächengewässerverordnung)	JD-UQN (Jahresdurchschnitt)	PFOS (und Derivate)	0,00065 µg/L (= 0,65 ng/L)	Analytisch derzeit nicht sicher nachweisbar; daher ist derzeit der Wert „Biota Fische“ (9,1 µg/kg Nassgewicht) heranzuziehen; sollte ab Ende 2027 eingehalten werden
	ZHK-UQN (zulässige Höchstkonzentration)	PFOS (und Derivate)	36 µg/L	
	Biota-UQN	PFOS (und Derivate)	9,1 µg/kg (Nassgewicht)	

A-1.2 Trinkwasser

Richtlinie, Verordnung, Regelung	Begriff für Beurteilungswert	Substanz	Begrenzender Wert	Anmerkung
UBA: „Grenzwerte, Leitwerte, Orientierungswerte“ (UBA, 2011) UBA: Fortschreibung der vorläufigen Bewertung von per- und polyfluorierten Chemikalien (PFC)...“ (UBA, 2017) UBA: „Empfehlung des Umweltbundesamtes – Umgang mit per- und polyfluorierten Alkylsubstanzen...“ (UBA, 2020d)	Allgemeiner Vorsorgewert (VWa)	PFC	0,1 µg/L	Spezifisches Stoffspektrum
	Gesundheitl. Orientierungswert (GOW)/ Warnwert (WW)	stoffabhängig	0,1 - 3,0 µg/L	LAWA-LABO-Kleingruppe (LAWA 2017b)
	Leitwert (LW)	stoffabhängig	0,06 - 10 µg/L	Ergänzung der Einzelstoffe in (UBA, 2017) auf Basis der GFS-Werte der LAWA-LABO-Kleingruppe (LAWA 2017b)
	Vorsorge-Maßnahmewert	PFOS, PFOA Σ PFOS + PFOA	SK: 0,05 µg/L E: 5,0 µg/L	SK: gilt nur für besonders empfindliche Bevölkerungsgruppen Schwangere, stillende Mütter, Säuglinge und Kleinkinder bis zu einem Alter von 24 Monaten E: Erwachsene
EU: Richtlinie 2020/2184 (EU, 2020)	Leitwert	„PFAS gesamt“ bzw. PFC gesamt „Summe der PFAS“ bzw. Summe der PFC	0,5 µg/L 0,1 µg/L	Gesamtheit der PFC, es liegen noch keine technischen Leitlinien zur Bestimmung vor, bis dahin nicht anwendbar. Summe von 20 ausgewählten PFC-Verbindungen (siehe Tabelle 2)

A-1.3 Einleitwerte Abwasser

Richtlinie, Verordnung, Regelung	Begriff für Beurteilungswert	Substanz	Begrenzender Wert	Anmerkung
PNEC _{aquatisch} (LfU, 2017) (ALEX, 2017)		stoffabhängig	250-3.700 µg/L	Prognostizierte PFC-Konzentration (z.B. über Immissionskonzentration im Gewässer) mindestens kleiner der PNEC _{aquatisch}
Bayern: „Leitlinien PFC“ (LfU BY, 2017)	JD-UQN	PFOS (und Derivate)	0,00065 µg/L	
Nordrhein-Westfalen: „Bewertungsmaßstäbe PFC“ (www.lanuv.nrw.de)	Orientierungswert (OW) PFC-Fracht	∑ PFC PFOS + PFOA PFOS + PFOA ∑ PFC	1,0 µg/L 0,3 µg/L 10 g/Tag 35 g/Tag	Länderspezifischer Summenparameter; bei Überschreitung Ursachenermittlung

A-1.4 Grundwasser

Richtlinie, Verordnung, Regelung	Begriff für Beurteilungswert	Substanz	Begrenzender Wert	Anmerkung
LAWA-LABO-Kleingruppe - GFS-Konzept (LAWA, 2017b)	Geringfügigkeitsschwellenwert (GFS)	stoffabhängig (7EP)	0,06-10 µg/L	Siehe Tabelle 2
	Gesundheitlicher Orientierungswert (GOW)	stoffabhängig (6EP)	0,1-3,0 µg/L	Siehe LAWA-LABO-Kleingruppe (LAWA 2017b)
Baden-Württemberg: Az 5-8932.52/4 (UM BW, 2018)	GFS/GOW	13 Einzelsubstanzen Substanzen ohne speziellen GFS-/GOW-Wert	0,06-10 µg/L 1,0 µg/L	Siehe Tabelle 2 Übernahme Vorschlag LAWA-LABO-Kleingruppe (LAWA 2017b)
	Quotientensumme		1	
Bayern: „Leitlinien PFC“ (LfU BY, 2017)	GFS/GOW	13 Einzelsubstanzen „GFS“-Substanzen	0,06-10 µg/L	Tabelle s.o. Übernahme Vorschlag LAWA-LABO-Kleingruppe (LAWA 2017b)
	Quotientensumme (7 EP GFS)		1	QS seit 2018 nicht mehr vollumfänglich empfohlen (LfU BY, 2018)

A-1.4 Grundwasser Fortsetzung

Richtlinie, Verordnung, Regelung	Begriff für Beurteilungswert	Substanz	Begrenzender Wert	Anmerkung
Nordrhein-Westfalen: „Bewertungsmaßstäbe PFC“ (www.lanuv.nrw.de)	GFS/GOW VW _a	13 Einzelsubstanzen	0,06-10 µg/L	Tabelle s.o.
		Substanzen ohne speziellen GFS-/GOW-Wert	0,1 µg/L	Übernahme Vorschlag LAWA-LABO-Kleingruppe (LAWA 2017b)
Rheinland-Pfalz: „ALEX-Informationsblatt 29“ (LfU RP, 2017)	GFS/GOW	13 Einzelsubstanzen	0,06-10 µg/L	Tabelle s.o.
		Substanzen ohne speziellen GFS-/GOW-Wert	1,0 µg/L	Übernahme Vorschlag LAWA-LABO-Kleingruppe (LAWA 2017b)
	Quotientensumme (7 EP GFS)		1	

A-1.5 Boden

Richtlinie, Verordnung, Regelung	Begriff für Beurteilungswert	Substanz	Begrenzender Wert	Anmerkung
Baden-Württemberg: (UM BW, 2018)	GFS/GOW - Sickerwasser am Ort der Beurteilung	13 Einzelsubstanzen	0,06-10 µg/L	
Bayern: „Leitlinien PFC“ (LfU BY, 2017)	Vorläufige Stufe 1-Werte	stoffabhängig	0,06–10,0 µg/L	Emissionsabschätzung anhand von Eluat-Werten; Die Stufe 1-Werte entsprechen den vorläufigen Schwellenwerten für das Grundwasser ; zusätzlich bei beiden Stufen Summenbedingung für 7 Einzelstoffe; Eluatherstellung: Die Vorgabe der „Leitlinien PFC“ (LfU BY, 2017) zur Verwendung des Elutionsverfahrens nach DIN 38414-S4 (W:F-Verhältnis 10:1) ist nicht mehr aktuell. Es wird nunmehr das Elutionsverfahren nach DIN 19529 (W:F-Verhältnis 2:1) empfohlen (LfU BY, 2020).
	Vorläufige Stufe 2-Werte	stoffabhängig	0,25–40 µg/L	

A-1.5 Boden Fortsetzung

Richtlinie, Verordnung, Regelung	Begriff für Beurteilungswert	Substanz	Begrenzender Wert	Anmerkung
Nordrhein-Westfalen: „Bewertungsmaßstäbe PFC“ (www.lanuv.nrw.de)	Prüfwertvorschläge für den Ort der Beurteilung	13 Einzelsubstanzen	LAWA/LABO GFS	Bewertung einzelfallbezogen; Verwendung GFS als Prüfwertvorschläge für den Wirkungspfad Boden-Grundwasser
Rheinland-Pfalz: „ALEX-Informationsblatt 29“ (LfURP, 2017)	Quotientensumme / Bewertungsindex	(7 EP GFS)	1	Einzelfallentscheidung bei Unterschreitung des Bewertungsindex von 1 bei Überschreitung GOW-Werte (LAWA-LABO-Kleingruppe)
Thüringen	Vorläufige Prüfwerte	stoffabhängig	0,23 – 7 µg/L	https://tlubn.thueringen.de/fileadmin/00_tlubn/Service/download/Geologie_Boden_Altlasten/informationen_pfc_fur_bodenschutzbehörden.pdf (abgerufen: 15.10.2021)

A-1.6 Klärschlamm

Richtlinie, Verordnung, Regelung	Begriff für Beurteilungswert	Substanz	Begrenzender Wert	Anmerkung
Bundesregierung: Düngemittelverordnung (DüMV 2012)	Grenzwert Kennzeichnungspflicht	∑ PFOS + PFOA	100 µg/kg 50 µg/kg	Bundesweit rechtsverbindlich eingeführter Grenzwert

A-1.7 Abfall

Richtlinie, Verordnung, Regelung	Begriff für Beurteilungswert	Substanz	Begrenzender Wert	Anmerkung
EU-Verordnung Nr. 1342/2014 (EU, 2014)	Grenzwert	PFOS	>50 mg/kg	Sonderabfall, keine oberirdische Lagerung ohne Vorbehandlung; thermische Verwertung

A-1.7 Abfall Fortsetzung

Richtlinie, Verordnung, Regelung	Begriff für Beurteilungswert	Substanz	Begrenzender Wert	Anmerkung
(LABO/LAWA 2021)	Verwertungskategorien	stoffabhängig	Verwertungskategorie 1: 0,06 µg/L – 10 µg/L Verwertungskategorie 2: 0,06 µg/L – 10 µg/L Verwertungskategorie 3: 0,6 µg/L – 50 µg/L	Vorläufige Werte in Anlehnung an die GFS-Werte
(LAGA, 2010)	Orientierungswert	PFOS und Derivate	50 mg /kg	DK III (auf der 95. LAGA-Sitzung vereinbart)
Baden-Württemberg: Erlass: Az 25-8980.05/15 (UM BW, 2016)	Verwertung: Z 0 / Z 1	stoffabhängig	0,23–7,0 µg/L	Additionsregel: Summe der PFC muss <1 sein.
	Verwertung: Z 2	stoffabhängig	1,0–28,0 µg/L	
	Beseitigung: DK0 bis Z0/Z1 DKI bis Z2 DKII DKIII	stoffabhängig stoffabhängig ΣPFC	0,23 - 7,0 µg/L 1,0 - 28,0 µg/L <20.000 µg/kg ≥20.000 µg/kg und < 50.000 µg/kg	Summe ≥50.000µg/kg oberirdische Ablagerung unzulässig (gem. EU-Verordnung Nr. 1342/2014)
Bayern: „Leitlinien PFC“, (LfU BY, 2017)	Verwertung: Z 0	stoffabhängig	0,03–3,0 µg/L	S4-Eluat
	Verwertung: Z 1	stoffabhängig	0,06–10,0 µg/L	S4-Eluat
	Verwertung: Z 2	stoffabhängig	0,25–40,0 µg/L	S4-Eluat
	Beseitigung OW: DK I	stoffabhängig	50 µg/L	S4-Eluat
	Beseitigung OW: DK II	stoffabhängig	100 µg/L	S4-Eluat
Rheinland-Pfalz: ALEX-Informationsblatt 29 (LfU 2017)	Verwertung	Keine Verwertung von PFC-belastetem Bodenmaterial in Gebieten, die nicht mit PFC vorbelastet sind		
	Beseitigung: DK II	stoffabhängig	50 µg/L	

A-1.8 Lebensmittel

Richtlinie, Verordnung, Regelung	Begriff für Beurteilungswert	Substanz	Begrenzender Wert	Anmerkung
EFSA: „Risk to human health relate to the presence of perfluoralkyl substances in food“ (EFSA, 2020)	TWI – duldbare wöchentliche Aufnahme-menge	∑ (PFOS, PFOA, PFNA, PFHxS)	4,4 ng/kg pro Woche	

Anmerkungen zur Tabelle:

Bei den länderspezifischen Vorgaben den länderspezifischen Parameterumfang zugrunde legen (vgl. jeweilige Quellenangaben).

Impressum

Herausgeber

Bundesamt für Infrastruktur, Umweltschutz und Dienstleistungen der Bundeswehr Referat
GS II 5 · 53123 Bonn
E-Mail: baiudbwgsii5@bundeswehr.org

Bundesanstalt für Immobilienaufgaben
Zentrales Kontaminationsmanagement
Fasanenstraße 87 · 10623 Berlin
E-Mail: kontaminationsmanagement@bundesimmobilien.de

Redaktionskreis

Bundesamt für Infrastruktur, Umweltschutz und Dienstleistungen der Bundeswehr
Referat GS II 5 · 53123 Bonn
Dr. Elisabeth Lipke
E-Mail: baiudbwgsii5@bundeswehr.org

Bundesanstalt für Immobilienaufgaben
Zentrales Kontaminationsmanagement
Fasanenstraße 87 · 10623 Berlin
Bernd Garz
E-Mail: kontaminationsmanagement@bundesimmobilien.de

Niedersächsisches Landesamt für Bau und Liegenschaften
Leitstelle des Bundes für Boden- und Grundwasserschutz
Waterloostraße 4 · 30169 Hannover
Helge Düker
E-Mail: lsb@nlbl.niedersachsen.de

Altenbockum & Partner, Geologen
Gewerbepark Brand 32 · 52078 Aachen
E-Mail: pfc-bund@altenbockum.de

Gestaltung

Altenbockum & Partner, Geologen
Gewerbepark Brand 32 · 52078 Aachen

Bildnachweis

Titelfoto: © Marcus Rott/Bundeswehr

Stand

Oktober 2021, 4. Auflage

Aktuelle Informationen

www.bfr-bogws.de

