

Nakládání s půdami a výkopovými zeminami znečištěnými PFC – vznik, kritéria přijatelnosti, problematika průsakových vod

Umgang mit PFC-verunreinigtem Erdaushub – Herkunft, Annahmekriterien, Sickerwasserproblematik

Thomas Egloffstein, Gerd Burkhardt, Katrin Schumacher¹

Abstrakt

Plošné zátěže půd a podzemní vody zcela fluorovanými „chemikáliemi“ (PFC) nebo tensidy (PFT) nebo „alkylovými substancemi“ (PFAS) jsou v Německu známé zhruba od roku 2006 v podobě průmyslově znečištěných bioodpadů, příměsí v papírových suspenzích, v kompostu nebo i čistírenských kalech, vyvážených na pole. Druhým způsobem šíření jejich emisí jsou pěnové hasicí prostředky.

PFT odpuzují vodu, znečištění a mastnotu a jsou proto ve velkých množstvích používány jako impregnační prostředky například pro outdoorové či pracovní oděvy, textil, koberce, ale i pro papírové kelímky, krabice na pizzu, fotografický papír a papír s vysokým leskem atd.

PFC jsou substráty, vyrobené výlučně lidmi, v přírodě se nevyskytují a nejsou v podmínkách životního prostředí téměř odbouratelné (perzistentní). Jejich nejznámějším zástupcem je PFOS Perfluoroktansulfonan, který je od roku 2010 veden na seznamu zakázaných látek v nařízení (ES) 850/2004 a zakázán. Výskyt těchto látek lze celosvětově doložit v tukových tkáních a v krvi ryb, savců a lidí.

Při sanaci podzemních vod v rámci řešení havárií PFC se v současné době používá převážně aktivní uhlí, přičemž adsorpce PFC aktivním uhlím není příliš efektivní.

S ohledem na neuspokojivou adsorbovatelnost především PFC s krátkodobým řetězcem z průsaku by bylo nejlepším, i když velmi nákladným řešením, skládkování v zastřešených monooblastech za účelem zamezení vytváření průsaku s následujícím zapouzdrněním. Problematika PFC, počínaje sanací půd až po skládkování, se dosud stále nachází relativně na začátku.

Kurzfassung

Großflächige Boden- und Grundwasserbelastungen mit per- und polyfluorierten „Chemikalien“ (PFC) oder „Tensiden“ (PFT) oder „Alkylsubstanzen“ (PFAS) sind in Deutschland seit ca. 2006 durch industriell verunreinigte Bioabfälle, Beimengungen von Papierschlamm in Kompost und durch Klärschlämme, die in der Landwirtschaft auf Felder aufgebracht wurden, bekannt. Ein zweiter Emissionspfad sind Schaumlöschmittel zur Brandbekämpfung.

PFT sind wasser-, schmutz- und fettabweisend und werden daher als Imprägniermittel z. B. für Outdoor- und Arbeitskleidung, Textilien, Teppiche, aber auch für Pappbecher und Pizzakartons, Foto- und Hochglanzpapier etc. in großen Mengen eingesetzt.

PFC sind ausschließlich von Menschen erzeugte Substanzen, sie kommen in der Natur nicht vor und sind unter Umweltbedingungen kaum abbaubar (Persistent). Der wohl bekannteste Vertreter ist PFOS Perfluoroktansulfonsäure der seit 2010 auf die Liste der verbotenen Substanzen der europäischen POP-Verordnung (persistent organic pollutants) gesetzt und verboten wurde. Diese Stoffe sind weltweit im Fettgewebe und Blut von Fischen, Säugetieren und Menschen nachweisbar.

Bei der Grundwassersanierung von PFC-Schadensfällen wird derzeit überwiegend Aktivkohle eingesetzt, wobei die Adsorption der PFC an Aktivkohle nicht sehr effizient ist.

Aufgrund der nur unbefriedigenden Entfernbarkeit (Adsorbierbarkeit) von vor allem kurzkettigen PFC aus dem Sickerwasser wäre die Deponierung in überdachten Monobereichen zur Verhinderung der Sickerwasserneubildung mit anschließender Einkapselung die beste, wenn auch eine sehr aufwändige Lösung. Immer noch steht die PFC-Problematik von der Bodensanierung bis zur Deponierung relativ am Anfang der Entwicklung.

¹ICP Ingenieurgesellschaft Prof. Czurda und Partner mbH, Auf der Breit 11, 76227 Karlsruhe, Tel.: 0721 94477-0, icp@icp-ing.de

1 Veranlassung

Aufgrund von großflächigen Bodenbelastungen von mit per- und polyfluorierten „Chemikalien“ (PFC) oder „Tensiden“ (PFT) oder „Alkylsubstanzen“ (PFAS), in Nordrhein-Westfalen und in Baden-Württemberg, sowie meist durch Schaumlöschmitteleinsätze verursachte Schäden bundesweit, steht diese Schadstoffgruppe im verstärkten Blickpunkt der Bearbeitung von schädlichen Bodenveränderungen und Altlasten. Bei schädlichen Bodenveränderungen und Altlasten ist das Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG) einschlägig. Ist das Grundwasser betroffen, sind die materiellen Anforderungen des Wasserhaushaltsgesetzes (WHG) maßgeblich [1]. Sollen oder müssen PFC-belastete Böden verwertet oder entsorgt werden, unterliegen Sie dem Abfallrecht. Eine Obergrenze von 50 mg/kg für die oberirdische Deponierung legt die POP-Verordnung [2] für PFOS (Perfluoroktansulfonsäure) fest. In der Deponieverordnung (DepV) wie auch bei der LAGA M20 [3] oder vergleichbaren Verwaltungsvorschriften finden sich keine Zuordnungswerte für PFC. Nach Kenntnis der Autoren haben lediglich Bayern und Baden-Württemberg sowie Rheinland-Pfalz diesbezüglich umfassende, z.T. auf Orientierungswerten basierende Festlegungen getroffen, NRW und Hessen haben keine generellen sondern eher punktuelle Festlegungen getroffen, die sehr stark auf den Einzelfall abheben (s. Kap. 5). Das Thema Deponierung ist aktuell und akut, z. B. für PFC-belastetem Baugrubenaushub. Die zeitweilige Lagerung von PFC-belasteten Böden z. B. von auf Mieten aufgehaldeten Böden als Abraum von Kiesgruben fällt unter den Anwendungsbereich des Bundes-Immissionschutzgesetzes. Diese Mieten müssen z. T. entsorgt werden (s. a. Pkt. 5.1.3). Deponieraum mit entsprechender Sickerwasserreinigung für PFC-belasteten Böden steht im Nahbereich der großflächigen PFC-Bodenverunreinigung im Raum Baden-Baden/Rastatt derzeit nicht zur Verfügung.

2 Grundlagen – Eigenschaften – Vorkommen

2.1 Was sind PFC?

PFC ist eine Abkürzung für per- oder polyfluorierte Chemikalien – auch bekannt als PFAS (per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen) oder PFT (perfluorierte Tenside). Diese Stoffgruppe umfasst mehr als 3000 verschiedene Stoffe [4]. Zur Bewertung herangezogen werden meist die 14 Einzelverbindungen der DIN 38414-14. PFC kommen nicht natürlich vor. Chemisch gesehen bestehen die organischen Verbindungen aus Kohlenstoffketten verschiedener Längen, bei denen die Wasserstoffatome vollständig (perfluoriert) oder teilweise (polyfluoriert) durch Fluoratomer ersetzt sind. Am häufigsten werden perfluorierte Carbon- und Sulfonsäuren sowie deren Vorläuferverbindungen verwendet. Leitsubstanzen sind Perfluoroktansulfonsäure (PFOS) und Perfluoroktansäure (PFOA). Sie werden am häufigsten in Umweltproben nachgewiesen und sind toxikologisch am besten beschrieben. PFOS und PFOA wirken akut nur mäßig toxisch. Untersuchungen auf chronische Toxizität ergeben jedoch kanzerogene, reproduktionstoxische, immuntoxische, lebertoxische und möglicherweise endokrine Wirkungen [4]. Als Vorläuferverbindungen (Precursor) werden Stoffe bezeichnet, die zu diesen persistenten perfluorierten Stoffen abgebaut werden können [5].

PFC werden in langkettige und kurzkettige PFC unterteilt. Als kurzkettige PFC gelten beispielsweise perfluorierte Carbon- und Sulfonsäuren (sowie entsprechende Vorläuferverbindungen) mit weniger als acht Kohlenstoffatomen bei den Perfluorcarbonsäuren und weniger als sechs Kohlenstoffatomen bei den Perfluorsulfonsäuren. PFC besitzen eine sehr stabile Bindung zwischen Kohlenstoff und Fluor die sich nur unter sehr hohem Energieaufwand lösen lässt (im Extremfall nur durch Hochtemperaturverbrennung, Literaturangaben: 1.100 bis 1.300 °C, [6]). Unter Umweltbedingungen werden sie so gut wie nicht abgebaut und verbleiben somit sehr lange in der Umwelt. Längerkettige PFC reichern sich in Organismen entlang der Nahrungskette an, kurzkettige sind sehr mobil, werden im Boden kaum zurückgehalten und erreichen schnell das Grundwasser. Aufgrund ihres geringen Adsorptionspotentials können sie zudem

nur schwer wieder aus dem Wasser entfernt werden. Die besorgniserregenden Eigenschaften der PFC sind bei den langkettigen PFC die (sehr) persistenten, (sehr) bioakkumulierenden sowie die weniger akut als chronisch toxischen Eigenschaften und bei den kurzkettigen PFC die extreme Persistenz und hohe Mobilität [6].

PFC finden wegen ihrer besonderen Eigenschaften – wasser-, fett- und schmutzabweisend sowie chemisch und thermisch stabil – in vielen Verbraucherprodukten wie Kochgeschirr, Textilien und Papier Anwendung.

So werden PFC gern in Outdoor-Kleidung und Arbeitskleidung eingesetzt und die PFC-haltigen Imprägniermittel helfen, dass auch nach mehrmaligem Waschen diese Eigenschaften in den Textilien bestehen bleiben.

Die gleichzeitig fett- und wasserabweisenden Eigenschaften werden außerdem in der Lebensmittelverpackungsindustrie geschätzt und somit kommen PFC beispielsweise in Pappbechern oder Pizzakartons zum Einsatz.

Die perfluorierten Chemikalien können in Kläranlagen nicht abgebaut werden. Wasserlösliche PFC werden über Flüsse und Meere global verteilt. Andere PFC reichern sich im Klärschlamm an. Wird dieser Klärschlamm als Bodenverbesserer in der Landwirtschaft eingesetzt, versickern die Chemikalien über die Zeit ins Grundwasser ([7], $\leq 100 \mu\text{g}/\text{kg}$ TS PFOA+PFOS). Zudem können Pflanzen im Weiteren kurzkettige PFC aus dem verunreinigten Boden aufnehmen.

PFC werden seit ca. Mitte der 1960-er Jahre eingesetzt, in breiter Front verstärkt seit den 1970-er Jahren, z. B. in [6, 4]:

- Textilindustrie (Outdoorkleidung, Imprägniermittel, Teppiche)
- Lebensmittelverpackungsindustrie (z.B. Pappbecher, Pizzakarton)
- Fotoindustrie
- Galvanikindustrie (Hartverchromung)
- Feuerlöschschäume (AFFF / FFFP wasserfilmbildende Feuerlöschschäume)
- Hilfsmittel bei der Herstellung von Teflon

3 Historie der Problemstellung

Mit den im Frühjahr 2006 bekannt gewordenen Skandalen im Hochsauerlandkreis (Möhnetalsperre, Trinkwasserversorgung Arnsberg, NRW) sind perfluorierte Chemikalien (PFC) aufgrund der PFC-belasteten Oberflächenwässer der Möhne und der Ruhr sowie des Grund- und Trinkwassers im Hochsauerlandkreis ins allgemeine Bewusstsein geraten. Die Kontamination der Oberflächengewässer war auf die Abschwemmung der PFC von landwirtschaftlich genutzten Flächen zurückzuführen, die mit einer Mischung von Bioabfall und PFC-haltigem Industrieabfall behandelt wurden. Dieser Skandal veranlasste eine Vielzahl von Bundesländern in Deutschland sich mit diesem Thema kritisch auseinander zu setzen. In verschiedenen Medien (Abwasser, Klärschlamm, Trinkwasser, Grundwasser) wurden PFC-Untersuchungen durchgeführt [8].

PFC-Belastungen im Grundwasser wurden 2012/2013 im Raum Baden-Baden/ Rastatt im Rahmen von Schutzgebietsuntersuchungen im Wasserwerk Raental und bei Baden-Sandweier entdeckt [9]. Weitere Nachforschungen ergaben im Landkreis Rastatt und im Stadtkreis Baden-Baden ca. 560 ha verunreinigte landwirtschaftliche Flächen [10] sowie Verunreinigungen des Grund- und Trinkwassers. Potentielle Vorläufersubstanzen (Precursor) könnten zwei polyfluorierte Alkylphosphate (RAP) in Papierschlämmen gewesen sein, die gemeinsam mit

oder z. T. wohl auch ohne Kompost auf die Felder ausgebracht wurden. Obwohl viele Indizien ziemlich eindeutig darauf hinweisen, ist dies noch strittig, da PFC auch in Klärschlämmen vorkommen, die ebenfalls auf die Felder ausgebracht worden sein könnten.

2015 wurden im Raum Mannheim ca. 244 ha [11] PFC-belasteter Felder mit Boden- und Grundwasserkontaminationen entdeckt. Das Trinkwasser ist dort nicht betroffen. Es handelt sich gegenwärtig um den flächenmäßig größten Umweltschadensfall Deutschlands [4]. Die Entdeckung weiterer ähnlich gelagerter Fälle ist in Zukunft noch zu erwarten.

Aufgrund der seit Mitte der 1970er Jahren eingesetzten wasserfilmbildenden AFFF (Aqueous Film Forming Foam; deutsch: etwa wasserfilmbildendes Schaummittel) und FFFP¹ (filmbildender Fluor-Protein-Schaum) sowie anderen fluorhaltenen Schaumlöschmitteln (FP = Fluorproteinschaummittel) für hochbrennbare Flüssigkeiten wie Treibstoffe und andere unpolare Flüssigkeiten gibt es neben den vergleichsweise wenigen Brandschadensfällen hunderte bis tausende Brandübungsplätze mit Feuerlöschübungsbecken auf Zivil- und Militärflughäfen, in Tank- und Industrieanlagen, die zu Boden- und Grundwasserkontaminationen führten und noch führen. Diese sind jedoch nicht auf die oben genannten Standorte beschränkt, sondern es muss überall dort, wo mit Schaumlöschmitteln hantiert und geübt wurde, mit PFOS (Perfluorooctansulfonaten) in Boden und Grundwasser gerechnet werden.

Perfluorooctansulfonate (PFOS) sind seit 2008 durch die Gefahrstoffverordnung (GefStoffV) verboten, durften aber in Feuerlöschschäumen noch bis 2011 verwendet werden.

4 Grenz-, Leit-, Orientierungs-, Maßnahmenwerte, GFS-Werte

Zur Orientierung werden für die Bewertung von Sickerwässern, von Eluatwerten oder von Ablaufwerten aus Sickerwasserreinigungsanlagen in Ermanglung von festgelegten Prüfwerten oftmals die Leitwerte der Trinkwasserkommission [12] des Bundesministeriums für Gesundheit oder die Geringfügigkeitsschwellenwerte der LAWA herangezogen.

Die Trinkwasserverordnung enthält für die Gruppe der perfluorierten Tenside (PFOA, PFOS u. a.) keine spezifischen Grenzwerte. Auch international sind keine Grenzwerte zu PFC verfügbar. Das Umweltbundesamt empfahl 2006 folgende Höchstwerte.

Tabelle 1: Empfehlungen zu PFC im Trinkwasser der Trinkwasserkommission des Bundesministeriums für Gesundheit (BMG) beim Umweltbundesamt (UBA), Stand 13.7.2006 [13].

Art des Höchstwertes	Abkürzung	Zahlenwert	Begründung
Zielwert (Langfristiges Mindestqualitätsziel bzw. Vorsorgewert für PFOA, PFOS und evtl. weitere PFT)	GOW (Gesundheitlicher Orientierungswert) des UBA	≤0,1 µg/l	Lebenslange gesundheitliche Vorsorge, z.B. gegen die Anwesenheit weiterer PFT
Lebenslang gesundheitlich duldbarer Leitwert für alle Bevölkerungsgruppen	LW des UBA	≤0,3 µg/l	Bis zu dieser Konzentration sind Summen aus PFOA und PFOS lebenslang gesundheitlich duldbar
Vorsorglicher Maßnahmewert für Säuglinge	VMW_S	0,5 µg/l	Vorsorglicher Schutz von Säuglingen, z.B. gegen die Anwesenheit weiterer PFT
Maßnahmewert für Erwachsene	MW = VMW₀	5,0 µg/l	(VMW ₀) und 3 (MW) in Verbindung mit der MW- Empfehlung: Trinkwasser für Lebensmittelzwecke nicht mehr verwendbar

¹AFFF = Aqueous Film Forming Foam (deutsch etwa wasserfilmbildendes Schaummittel)
FFFP = filmbildender Fluor-Protein-Schaum, FP = Fluorproteinschaummittel

Für das Grundwasser und den Wirkungspfad Boden-Grundwasser von Bedeutung sind die Geringfügigkeitsschwellenwerte der LAWA [14].

Tabelle 2: Geringfügigkeitsschwellenwerte nach LAWA [14].

Lfd. Nr.	Name, Abkürzung (CAS-Nr.)	GFS [µg/L]	Basis [µg/L]	
			Humantox.	Ökotox.
1	Perfluorbutansäure, PFBA (375-22-4)	10	10	1.260
2	Perfluorpentansäure, PFPeA (2706-90-3)	-	- (GOW: 3,0)	320
3	Perfluorhexansäure, PFHxA (307-24-4)	6	6	1.000
4	Perfluorheptansäure, PFHpA (375-85-9)	-	- (GOW: 0,3)	-
5	Perfluoroktansäure, PFOA (335-67-1)	0,1	0,1	570
6	Perfluornonansäure, PFNA (375-95-1)	0,06	0,06	8
7	Perfluordecansäure, PFDA (335-76-2)	-	- (GOW: 0,1)	10
8	Perfluorbutansulfonsäure, PFBS (375-73-5)	6	6	3.700
9	Perfluorhexansulfonsäure, PFHxS (355-46-4)	0,1	0,1	250
10	Perfluorheptansulfonsäure, PFHpS (375-92-8)	-	- (GOW: 0,3)	-
11	Perfluoroktansulfonsäure, PFOS (1763-23-1)	0,1	0,1	0,23
12	H4-Polyfluoroktansulfonsäure, H4PFOS (27619-97-2)	-	- (GOW: 0,1)	870
13	Perfluoroktansulfonamid, PFOSA (754-91-6)	-	- (GOW: 0,1)	-

Die Geringfügigkeitsschwellenwerte dienen als Beurteilungskriterien von PFC-Kontaminationen des Grund- und Sickerwassers. Zur Bewertung des gemeinsamen Auftretens mehrerer PFC ist die Quotientensumme analog der Additionsregel der Technischen Regeln für Gefahrstoffe (TRGS 402) für die GFS-Werte heranzuziehen (Erläuterung unter Kap. 5.2 bzw. [15]). In NRW gilt für Abwassereinleitungen in Oberflächengewässer für die Summe PFOA+PFOS:

- Der Wert $\leq 0,3 \mu\text{g/l}$ als Orientierungswert und
- für die Summe aller gemessenen PFC der Wert $\leq 1,0 \mu\text{g/l}$.
- Bei Überschreitung erfolgt eine Ursachenermittlung und es werden Gegenmaßnahmen eingeleitet.
- Entsprechendes gilt auch, wenn bei signifikant erhöhten Konzentrationen (über dem jeweiligen Referenzwert) die festgestellte PFC-Fracht für die Summe PFOA+PFOS über 10 g/Tag bzw. für die Summe aller gemessenen PFC den Wert 35 g/Tag überschreitet [16].

5 Bundesländerspezifische Regeln für die Verwertung / Beseitigung

5.1 Baden-Württemberg: Belastete Böden - Rechtliche Rahmenbedingungen der Verwertung und Entsorgung von belasteten Böden [17]

Die Frage der Verwertung, Entsorgung oder Lagerung PFC-belasteten Bodens stellt sich immer dann, wenn bei Bauprojekten (und bei der Rohstoffgewinnung) Bodenaushub anfällt. Die nachstehend beschriebenen Regelungen zum Umgang mit betroffenen Böden dienen der Vermeidung einer weiteren Ausbreitung der PFCs.

5.1.1 Verwertung

Abfälle sind vorrangig zu verwerten. Bodenaushub mit einer PFC-Belastung bis Z2 kann nach den Maßgaben der Verwaltungsvorschrift „Boden“ vom 14.03.2007 in Verbindung mit dem Erlass des Umweltministeriums vom 29.01.2016 [15] verwertet werden. Der Erlass soll nach Vorlage neuer Bewertungserkenntnisse (Bekanntmachungen des Umweltbundesamtes) fortgeschrieben werden. Die Z2-Werte für einzelne PFCs können dem Erlass des Umweltministeriums vom 29.01.2016 entnommen werden.

5.1.2 Entsorgung

Besteht keine Möglichkeit zur Verwertung kann eine Deponierung entsprechend des Erlasses des Umweltministeriums vom 29.01.2016 auf allen Deponien der Klasse DK I oder höher erfolgen. Für die Entsorgung auf Deponien gelten darüber hinaus die Vorgaben der Deponieverordnung (DepV).

Die Ablagerung von Material, das nicht mehr als Z2-Material einzustufen ist, kann auf Deponien der Klasse DK II erfolgen. Aktuell ist davon ausgehen, dass die Gesamtbelastung den Wert von 20.000 µg/kg nicht übersteigt (im Raum Baden-Baden/Rastatt und Mannheim), daher dürfte die Ablagerung auf DK III nicht erforderlich werden.

Die Deponiefähigkeit von PFC-belastetem Bodenaushubmaterial ist zudem an bestimmte Randbedingungen geknüpft, z.B. der Eignung der Sickerwasserreinigungsanlage bzw. der nachgeschalteten kommunalen Kläranlage. Durch die Sickerwasserreinigung soll verhindert werden, dass PFCs aus der Deponie in das Grundwasser gelangen können. Die Deponien im Raum Baden-Baden/Rastatt erfüllen diese Randbedingung derzeit nicht. Bis die Bedingungen erfüllt sind, findet eine Deponierung belasteten Bodenaushubs im Raum Baden-Baden/Rastatt daher nicht statt.

5.1.3 Zeitweilige Lagerung

Die zeitweilige Lagerung von belastetem Bodenmaterial fällt je nach Belastung ab 30 t unter den Anwendungsbereich des Bundes-Immissionsschutzrechts. Die genehmigungsbedürftigen Anlagen sind so zu errichten und betreiben, dass schädliche Umwelteinwirkungen nicht hervorgerufen werden können. Hier bietet sich die Lagerung unter Dach oder eine offene Lagerung auf flüssigkeitsdichten Flächen mit Abdeckung/ Sickerwassererfassung an. Auf die vorgenannten Randbedingungen wird verwiesen.

5.1.4 Entsorgung von Bodenmaterial aus PFC (PFAS)-belasteten Flächen (Erlass [15])

Fällt PFC (PFAS)-belastetes Bodenmaterial (Aushub) zur Entsorgung an, ist vorläufig wie in den nachfolgenden Unterkapiteln festgelegt zu verfahren. Die Vorgaben gelten insbesondere unbeschadet der und in Ergänzung zur:

- Verwaltungsvorschrift des Umweltministeriums für die Verwertung von als Abfall eingestuftem Bodenmaterial vom 14. März 2007 (2018) und
- Deponieverordnung.

5.1.5 Verwertung von PFAS-belasteten Bodenmaterial in Baden-Württemberg

Für die Verwertung gilt das Sickerwasserkriterium ($W:F = 2:1$ Schüttel- oder Säuleneluatwerte). Für die Verfüllung von Abgrabungen und für technische Bauwerke gilt ein Mindestabstand zum Grundwasserspiegel von 1 m. Verfüllungen sind mit einer 2 Meter starken unbelasteten Abdeckschicht zu versehen. Die der Einbauweise entsprechenden Materialwerte aus der Tabelle 3 sind einzuhalten. Darüber hinaus ist das gemeinsame Auftreten mehrerer PFC (PFAS)-Kongenerie wie folgt zu bewerten: in Anlehnung an die Technischen Regeln für Gefahrstoffe

(TRGS 402) wird für jeden gefundenen Konzentrations-Wert der Quotient aus diesem Wert und dem jeweiligen Materialwert gebildet. Die jeweils errechneten dimensionslosen Quotienten werden aufsummiert. Wenn jeder einzelne Zuordnungswert eingehalten ist und die Summe aller Quotienten kleiner oder gleich 1 ist, gelten die Anforderungen als eingehalten.

Tabelle 3: Materialwerte für PFAS und Einbauweisen ([15], W:F = 1:2).

Kongenerbezeichnung	Abkürzung	Verwertung durch Verfüllung von Abgrabungen oder in Technischen Bauwerken Z0/Z1	Verwertung in Technischen Bauwerken Z2
		µg/Liter im Perkolat/Filtrat W/F 2:1 aus Schüttelverfahren nach DIN19527 oder Säulenkurztest nach DIN19528	
1	2	3	4
Perfluoroktansulfonsäure*	PFOS*	0,23	-
Perfluoroktansulfonsäure	PFOS	0,3	1,0
Perfluoroktansäure	PFOA	0,3	1,0
6:2 Fluortelomersulfonsäure	H4PFOS	0,3	1,0
Perfluomonansäure	PFNoA	0,3	1,0
Perfluordekansäure	PFDeA	0,3	1,0
Perfluorheptansulfonsäure	PFHpS	0,3	1,0
Perfluorheptansäure	PFHpA	0,3	1,0
Perfluorhexansulfonsäure	PFHxS	0,3	1,0
Perfluorhexansäure	PFHxA	1,0	4,0
Perfluorpentansulfonsäure	PFPeS	1,0	4,0
Perfluorpentansäure	PFPeA	3,0	12,0
Perfluorbutansulfonsäure	PFBS	3,0	12,0
Perfluorbutansäure	PFBA	7,0	28,0
weitere per- und polyfluorierte Substanzen*	---*	jeweils 1,0	Jeweils 3,0
Quotient		1	entfällt

* Einzelwert, nicht in Additionsregel einbeziehen

Die Werte in Spalte 3 werden künftig bei Abweichungen an Beschlüsse oder Empfehlungen des Umweltbundesamtes und/oder der Trinkwasserkommission des Bundesministeriums für Gesundheit (TKW) oder den Empfehlungen der LAWA angepasst.

5.1.6 Deponierung von PFAS-belasteten Bodenmaterial in Baden-Württemberg

Bei der Deponierung ist Bodenmaterial hinsichtlich der PFC-Werte wie folgt einzustufen: Die Beschränkung der POP-Verordnung für die oberirdische Ablagerung für PFOS (Perfluoroktan-

sulfonsäure) von 50 mg/kg wird auf der sicheren Seite liegend vereinfachend auf die Summe der o.g. PFAS angewandt, und nicht nur auf PFOS.

Bodenmaterial, das die Materialwerte bis Z2 einhält, kann auf Deponien der Klasse 0 oder I ohne weitere Analytik wie folgt abgelagert werden:

- Materialwerte bis Z0/Z1 eingehalten: Deponieklasse DK 0
- Materialwerte bis Z2 eingehalten: Deponieklasse DK I

Wird Z2 nicht eingehalten, sind die Feststoffgehalte zu analysieren und eine Zuordnung ist wie folgt vorzunehmen:

- Summe PFAS im Feststoff < 20 mg/kg: Deponieklasse DK II
- Summe PFAS im Feststoff > 20 mg/kg bis < 50 mg/kg: Deponieklasse DK III
- Summe PFAS im Feststoff > 50 mg/kg: Oberirdische Ablagerung unzulässig.

Anmerkung: Das Bayerische Landesamt für Umwelt [18] schreibt in seinen Leitlinien zur vorläufigen Bewertung von PFC-Verunreinigungen in Wasser und Boden unter Punkt 4.2.1: Bisherige Untersuchungen haben gezeigt, dass die Bestimmung von Feststoffgehalten aufgrund der Mobilität der PFC nicht aussagekräftig ist. Für die Gefährdungsabschätzung für den Pfad Boden - Grundwasser sind deshalb Eluatwerte heranzuziehen. Auch wenn diese Aussage unter dem Kapitel „Schädliche Bodenveränderungen und Altlasten“ steht und auf eine Gefährdungsabschätzung abhebt, wäre die Festlegung von Materialwerten im Eluat auch für die Beseitigung analog der Tabelle 3 „Verwertung“ bzw. analog zu Bayern und Rheinland-Pfalz wünschenswert.

5.1.7 Deponiesickerwasser in Baden-Württemberg

Ist die Ablagerung auf Deponien der Klassen DK II und DK III vorzunehmen, ist sicherzustellen, dass entweder eine Sickerwasserbehandlung in einer kommunalen Kläranlage mit vierter Reinigungsstufe und mit thermischer Klärschlammbehandlung oder einer Sickerwasserbehandlung auf der Deponie erfolgt, mit der die PFC (PFAS) aus dem Stoffkreislauf nachhaltig ausgeschleust werden.

5.1.8 Entsorgungspflicht/Andienungspflicht in Baden-Württemberg

Für nicht verwertbares und auf Deponien der Klasse DK II als Abfall zu beseitigendes Bodenmaterial ist der belegene Stadt- oder Landkreis für die Entsorgung zuständig (§ 20 Abs. 1 Satz 1 Var. 2 KrWG i.V.m. § 6 Abs. 1 LAbfG), da dies Abfälle zur Beseitigung sind und die Abfälle der Überlassungspflicht unterliegen (§ 17 Abs. 1 Satz 2 i.V.m. Satz 1 KrWG). Ist das Bodenmaterial darüber hinaus kontaminiert und Deponien der Klasse DK III zuzuweisen, ist es der Sonderabfallagentur Baden-Württemberg anzudienen.

5.2 Bayern: Leitlinien zur vorläufigen Bewertung von PFC-Verunreinigungen in Wasser und Boden [18]

5.2.1 Verwertung von PFC-belasteten Bodenmaterial außerhalb von Deponien in Bayern

Zur Verfüllung von Gruben und Brüchen sowie Tagebauen nach Bay. Merkblatt [19] darf in Gruben der Kategorie N(ass) und A ausschließlich unbedenkliches Material bzw. bei Verdacht analytisch nachgewiesenes Z0-Material eingebaut werden. Ab Kategorie B sind PFC-Gehalte bis max. Z 1.1 möglich. Technische Sorptionsschichten dürfen nicht angerechnet werden. Es ist ein Überwachungsprogramm (Eigen-, Fremd- und Grundwasserüberwachung) durchzuführen.

Für die Beurteilung des Grundwassers gilt ein Vorsorgewert von 0,75 des vorläufigen Schwellenwertes für PFC im Grundwasser.

Für die Verwertung in technischen Bauwerken ist im uneingeschränkten Einbau Z0 einzuhalten, für den eingeschränkten offen Einbau ist max. Z 1.1 zulässig (nach [3]). Z 1.2 ist nicht vorgesehen sondern fällt bei Überschreitung von Z 1.1 in die Kategorie Z2 mit technischen Sicherungsmaßnahmen (s. Tabelle 2). Es gilt die Quotientenregel wie bereits oben unter 5.2.1 beschrieben.

5.2.2 Entsorgung von PFC-belasteten Bodenmaterial auf Deponien in Bayern

Die POP-Verordnung mit max. 50 mg/kg gilt nur für PFOS. Für weitere PFC existieren im Abfallrecht aktuell noch keine Regelungen. Auf DK 0 Deponien (zumeist ohne Sickerwasserfassung) kann i.d.R. Z 1.1 Material abgelagert werden, es ist aber eine Einzelfallentscheidung bzgl. der Standortkriterien erforderlich.

Tabelle 4: Zuordnungswerte für die Beurteilung des mit W:F= 10:1 hergestellten Schüttel-Eluats (in Anlehnung an die LAGA M 20 [3]).

Stoff	Z 0 in µg/l	Z 1.1 / Z 1.2 in µg/l	Z 2 in µg/l
Perfluomonansäure PFNA	0,03	0,06	0,25
Perfluoroktansulfonsäure PFOS	0,05	0,1	0,4
Perfluoroktansäure PFOA	0,05	0,1	0,4
Perfluorhexansulfonsäure PFHxS	0,05	0,1	0,4
Perfluorhexansäure PFHxA	2,0	6,0	24,0
Perfluorbutansulfonsäure PFBS	2,0	6,0	24,0
Perfluorbutansäure PFBA	3,0	10,0	40,0
Perfluordekansäure PFDA ggf. Summe mit allen PFC > C10	0,1	0,1	0,4
H4-Polyfluoroktansulfonsäure H4PFOS	0,1	0,1	0,4
Perfluoroktansulfonamid PFOSA	0,1	0,1	0,4
Perfluorheptansulfonsäure PFHpS	0,3	0,3	1,0
Perfluorheptansäure PFHpA	0,3	0,3	1,0
Perfluorpentansäure PFPeA	3,0	3,0	12,0

Für die Summe aller nach Tabelle 4 untersuchten Einzelsubstanzen PFC (Eluat W:F = 10:1) können zur Orientierung für eine mögliche Ablagerung auf abgedichteten Deponien für

- DK I $\leq 50 \mu\text{g/l}$ und für
- DK II $\leq 100 \mu\text{g/l}$

herangezogen werden. Darüber hinaus muss in jedem Einzelfall die Sickerwasserreinigung hinsichtlich der notwendigen Schadstoffrückhaltung betrachtet werden. Das in die Vorflut einzuleitende Wasser muss die Anforderungen aus den wasserrechtlichen Vorgaben erfüllen. Hier ist speziell zu prüfen, ob die Behandlung des gefassten Sickerwassers die Kriterien nach dem Kapitel „Abwasser – Einleitung von PFC-haltigem Wasser aus Abwassereinigungsanlagen in Gewässer“ der Handlungshilfe (Kap. 4.1.4) erfüllt. Wenn größere Mengen PFC-haltiger Abfälle abgelagert werden, sind Auslöseschwellen im Einzelfall durch die zuständige Behörde festzulegen. Zur Verringerung hoher PFC-Belastungen wird eine Prüfung gefordert, ob eine Vorbehandlung (z. B. thermisch oder Wäsche) oder die Ablagerung in besonders gesicherten Monobereichen (Einkapselung im eigentlichen Deponiekörper) möglich ist. Diese ist mit der Genehmigungsbehörde abzustimmen.

Sofern eine oberirdische Ablagerung nicht möglich ist, können die Abfälle ggf. im Untertageversatz oder in einer Untertagedeponie entsorgt werden. Grundsätzlich ist jedoch bei hohen organischen Belastungen eine thermische Behandlung zu empfehlen (z.B. Verbrennung in Müllverbrennungsanlagen (MVA) oder Sonderabfallverbrennungsanlagen (SAV) der Sonderabfall-Entsorgung Bayern GmbH (GSB)).

5.3 Rheinland-Pfalz: ALEX-Informationsblatt 29 „Bodenschutz Per- und polyfluorierte Chemikalien (PFC) in der Umwelt“ [20]

Für die Entsorgung auf Deponien gelten die Vorgaben der Deponieverordnung (DepV). PFC-haltige Abfälle sind in Rheinland-Pfalz grundsätzlich nicht auf DK 0- und DK I-, sondern nur auf DK II-Deponien zu entsorgen. Die wenigen DK I Deponien in Rheinland-Pfalz verfügen nicht über die notwendige Sickerwasserreinigung. Für die Summe aller nach DIN 38414-14 untersuchten 14 Einzelverbindungen PFC ist zur Orientierung für eine mögliche Ablagerung auf DK II- Deponien folgender Wert heranzuziehen (Eluat W:F = 10:1):

- DK II $\leq 50 \mu\text{g/l}$

Da bei einer Ablagerung auf Deponien das Sickerwasser für eine mögliche Verfrachtung von PFC in die Umwelt von entscheidender Bedeutung ist, kann der vorgenannte Wert nur orientierenden Charakter haben. Darüber hinaus muss in jedem Einzelfall die Sickerwasserreinigung hinsichtlich der notwendigen Schadstoffrückhaltung betrachtet werden. Das in die Vorflut einzuleitende Wasser muss die Anforderungen an die wasserrechtlichen Vorgaben erfüllen. Hier ist speziell zu prüfen, ob die Behandlung des gefassten Sickerwassers die Kriterien der Einleitung in Oberflächengewässer dieser Leitlinien erfüllt.

Auslöseschwellen sind ggf. dann festzulegen, wenn erhebliche Mengen an PFC-haltigen Abfällen abgelagert werden. Aufgrund der Löslichkeit in Wasser und der Relevanz der Stoffe ist hierbei die Nachweisgrenze des Analysenverfahrens als Auslöseschwelle festzulegen. Für Material mit hoher Schadstoffbelastung ist zu klären, ob durch eine Vorbehandlung (thermisch) eine Verringerung des Schadstoffgehaltes herbeigeführt werden kann.

Sofern eine oberirdische Ablagerung nicht möglich ist, können die Abfälle ggf. im Untertageversatz oder in einer Untertagedeponie (Salzgestein) entsorgt werden. Grundsätzlich ist jedoch bei hohen organischen Belastungen eine thermische Behandlung zu empfehlen (z.B. Verbrennung in einer Hausmüll- oder Sonderabfallverbrennungsanlage).

5.4 Hessen: Verfahrenshilfe zum Vollzug des Abfallrechts Allgemeine Hinweise zum Betrieb von Deponien [21]

Das Merkblatt verweist bezüglich PFC allgemein auf die Deponieverordnung und die POP-Verordnung. Unter 5.1.3.5. „Stoffbezogene Regelungen zur Entsorgung“, verweist die Verfahrenshilfe auf den Erlass des Hessischen Ministeriums für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und

Verbraucherschutz [22] vom 27.09.2010, die Empfehlungen der LAGA für einen einheitlichen Vollzug umzusetzen, nach denen Abfälle mit einer Belastung von bis zu 50 mg/kg PFOS (Perfluorooctansulfonsäure) oberirdisch deponiert (DK III) werden dürfen. Des Weiteren wurde mit Erlass des HMUELV vom 06.12.2010 klargestellt, dass Abfälle ab einem Gehalt von 10 mg/kg PFOS als gefährlich einzustufen sind. Die Ablagerung solcher Abfälle ist damit im Regelfall auf Deponien der DK II nicht zulässig.

In Punkto Sickerwasserreinigung wird auf Seite 20 (Prüfkriterien der Einzelfallentscheidung) angemerkt:

„Für die Einhaltung der wasserrechtlichen Vorgaben für das in die Vorflut einzuleitende Abwasser sind nach derzeitigem Kenntnisstand für PFC-Verbindungen nur mehrstufige Aktivkohle- oder Umkehrosmoseverfahren geeignet.“

5.5 Nordrhein-Westfalen: Ablagerungsempfehlungen für Abfälle mit organischen Schadstoffen – Vollzugshilfe [23]

5.5.1 Festlegungen zum Vollzug in Nordrhein-Westfalen

Gemäß der Vollzugshilfe „Ablagerung PFT - haltiger Abfälle“ handelt es sich aufgrund der vorliegenden Erkenntnisse bei Feststoffwerten unter 100 µg/kg PFT um diffuse Belastungen mit nur geringer Umweltrelevanz. Die Ablagerung von Abfällen mit PFT - Gehalten unterhalb dieses Wertes ist daher grundsätzlich möglich.

Auf der 95. LAGA -Sitzung am 07.09.2010 wurde vereinbart, als unteren Grenzwert für PFOS übergangsweise einen Wert von 50 mg/kg für die Ablagerung anzuwenden. Dieser Wert ist somit der Grenzwert für die oberirdische Ablagerung, d. h. Grenzwert für die Deponieklasse III.

Darüber hinaus ist keine generelle Festlegung differenzierter Feststoffwerte für einzelne Deponieklassen möglich, sondern es muss die Möglichkeit einer Ablagerung im Einzelfall anhand von Eluatwerten in Bezug zu dem für die Gewässerbeurteilung heranzuziehenden Trinkwasserleitwert von 0,3 µg/l, insbesondere unter Berücksichtigung von Kriterien und Schutzmaßnahmen geprüft werden:

- Deponieklasse im Zusammenhang mit den Dichtungssystemen
- Art und Umfang der Sickerwasserbehandlung
- Getrennte Ablagerung in oberen Deponiebereichen
- Sofortige Abdeckung nach der Ablagerung

Für Abfälle, die nicht auf einer oberirdischen Deponie abgelagert werden können, gelten folgende generelle Empfehlungen für alternative Entsorgungswege:

- Abfallströme, die den Orientierungswert zur Ablagerung überschreiten, können ggf. in einer Untertagedeponie für gefährliche Abfälle (Deponie der DK IV) abgelagert werden.
- Für Abfälle mit sehr hohen Belastungen an organischen Schadstoffen ist grundsätzlich eine thermische Behandlung zu empfehlen (Verbrennung in einer SAV, HMVA oder in geeigneten Kraftwerken oder Zementwerken).
- Je nach Belastungsgrad und weiteren Eigenschaften des Abfalls können auch andere geeignete Verfahren (z. B. Recycling, chemisch-physikalische Behandlung oder Bodenbehandlung) eingesetzt werden. Für diese Fälle sind die Annahmekriterien der jeweiligen Anlage einzuhalten.

5.5.2 Ergebnisbericht des Workshops am 25.09.2017

Zusätzliche Informationen liefert der Ergebnisbericht des Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen zum Workshop „PFC in Boden und Grundwasser“, der am 25.09.2017 stattgefunden hat [24].

Unter Punkt 2.2.4 „Verwertung, Deponierung“ wird als Ergebnis festgehalten:

- Böden aus der Sanierung von PFC-Verunreinigung sind für eine Verwertung nicht geeignet.
- Bautechnisch anfallendes Aushubmaterial kann in PFC-vorbelasteten Gebieten bis zu PFC-Gehalten von 300 ng/l im 2:1-Schütteleluat unter definierten Randbedingungen verwertet werden (Festlegung im Einzelfall durch die zuständige Behörde).

Bisher liegen landesweit nur wenige Erfahrungen mit der Verwertung PFC-belasteter Böden vor. Der Umgang bzw. die Anforderungen an bautechnisch bedingt anfallendes Aushubmaterial ist weitgehend unklar.

Die mitgeteilten Standpunkte im Rahmen des Workshops zeigen die große Spannweite in der der Ermessensspielraum genutzt wird:

- Immer Einzelfallentscheidung.
- Bis 500 m³ können ohne nähere Betrachtung vor Ort wiedereingebaut werden, ohne von einer wesentlichen Verschlechterung der Beschaffenheit der Fläche ausgehen zu müssen.
- Nach dem Grundsatz ‚Gleiches zu Gleichem‘ werden gebietsbezogene Regelungen der Verwertung zugrunde gelegt.

Bezüglich einer Deponierung wird in den NRW-Ablagerungsempfehlungen für Abfälle mit organischen Schadstoffen (Vollzugshilfe des MULNV NRW vom 06.12.2011) ein Grenzwert für die oberirdische Ablagerung von 50 mg/kg (PFOS, Deponieklasse III) auf Grundlage der EU-POP-Verordnung genannt. Darüber hinaus werden keine generellen Festlegungen differenzierter Feststoffwerte für einzelne Deponieklassen getroffen.

Offene Fragen/Regelungsbedarf, Empfehlungen des Workshops:

- Geeignete Entsorgungseinrichtungen für PFC-belastete Böden müssen in ausreichendem Umfang sichergestellt werden.
- Es sind transparente Anforderungen für die Deponierung PFC-belasteter Böden notwendig (Deponieklasseneinstufung bzw. übersichtliche Zusammenstellung der Annahmekriterien).
- Sind Regelungen zur Verwertung PFC-belasteter Böden im Rahmen von Sanierungsplänen bei großflächigen Bodenverunreinigungen zielführend und zulässig?
- Es sind einheitliche Anforderungen an Sicherungsmaßnahmen für belastete Böden / Flächen zu ermitteln und festzulegen. (Stichworte: Asphaltdecke als Sicherung ausreichend?)
- Aufgrund der begrenzten Deponiekapazitäten und der zu bewältigenden Bodenmassen, die auf PFC-belasteten Flächen voraussichtlich in den nächsten Jahren anfallen werden, sind einheitliche Regelungen oder Leitlinien für den Umgang mit PFC-belasteten Böden dringend erforderlich.

6 Derzeitige Annahmesituation für PFC-verunreinigte Böden auf Deponien

6.1 Annahmesituation aus Sicht von Süddeutschland

In Raum Rastatt / Baden-Baden gibt es derzeit keine Deponien mit einer entsprechenden zur PFC-Rückhaltung geeigneten Sickerwasserreinigungsanlage (Umkehrosmose bzw. mehrstufige Aktivkohleverfahren) bzw. Indirekteinleitung in eine kommunale Kläranlage mit vierter Reinigungsstufe und thermischer Klärschlamm Entsorgung oder Ablagerung in eingekapselten bzw. abgedeckten Monobereichen (möglichst ohne Sickerwasserentstehung). Zu entsorgender Erdaushub aus Baugruben bzw. zwischengelagertes, belastetes Bodenmaterial als Abraum von Kiesgruben muss deshalb weit gefahren werden. Bezüglich der letztendlich willkürlich ausgewählten Annahmestellen sind den Autoren aufgrund von Anfragen per Telefon oder E-Mail bzw. über ihr Netzwerk nachfolgende Annahmekriterien genannt worden. Es ist ein Ausschnitt, ohne Gewähr für Vollständigkeit und Richtigkeit.

6.1.1 Zwei DK II Deponien, Baden-Württemberg

Preise zwischen ca. 40 – 60 €/t (netto) je nach Deponieklasse (DK I oder II) bzw. Anlieferungsmenge. Für DK I-Material Begrenzung für PAK ≤ 200 mg/kg. SiWa-Aufbereitung durch Membranfiltration (Ultra-/Nanofiltration, 3-stufige Aktivkohlefilter bzw. Konzentrat wird per Tankwagen abgefahren und in einer speziellen Wasseraufbereitung weiterbehandelt).

6.1.2 DK II Deponie, Baden-Württemberg

Annahme von PFC-belasteten Bodenmaterial nur aus dem Gebiet der eigenen Gebietskörperschaft (überlassungspflichtige Abfälle) bis DK II nach Erlass UM Baden-Württemberg [15]. Das Sickerwasser wird über eine Kläranlage mit 4. Reinigungsstufe gereinigt. Annahmepreis nach Preisliste (45 €/t für Erdaushub, Bauschutt etc., wenn keine Erschwernisse beim Einbau auftreten (z. B. bei Schlämmen).

6.1.3 DK II Deponie, Rheinland-Pfalz

Gemäß der Orientierungswerte für Rheinland-Pfalz beträgt die max. zulässige Eluatbelastung für DK II ≤ 50 µg/l. Zusätzlich darf der Feststoffgehalt 1000µg/kg nicht übersteigen. Die Preise betragen ca. 50 – 60 €/t (netto) bei Anlieferung (2016/17). SiWa-Aufbereitung Biologie (Nitritifikation / Denitrifikation u. Aktivkohlefiltrationsstufe. Aktuelle Auskunft: Die DK II Deponie nimmt derzeit keine PFC-belasteten Böden an. Der Hintergrund ist, dass genügend andere „unproblematischere“ Abfälle angedient werden.

6.1.4 Zwei SAD, DK III, Nordrhein-Westfalen

Annahme bis 100 µg/kg bzw. 10 µg/l im Eluat.

6.1.5 SAD, DK III Nordrhein-Westfalen

Nur Begrenzung 50 mg/kg für PFOS, ansonsten keine Begrenzung im Eluat, ca. 45 €/t (netto). 3-stufige Sickerwassereinigung über Aktivkohle.

6.1.6 SAD, DK III, Nordrhein-Westfalen

Die Deponie verfügt über eine Sickerwasserreinigung mit Aktivkohle. Es sind deshalb höhere PFC-Gehalte zulässig. Die Höhe der PFC-Gehalte entscheidet darüber ob als lose Schüttung

eingebaut werden kann oder ob in ein Sicherungsbauwerk eingebaut werden muss. Erforderliche Einzelfallzustimmungen durch die zuständige Behörde werden aufgrund der großen angehenden Abfallmengen i.d.R. nicht eingeholt. Die Annahmegebühren liegen i.d.R. bei über 100 €/t.

Die Übernahme von PFT (PFC)-verunreinigtem Boden auf die DK III Deponie kann ohne besondere Sicherungsmaßnahme/Abstimmung mit der zuständigen Bezirksregierung unter speziellen Bedingungen erfolgen. Bestimmte Parameter dürfen jeweils einen Wert von 100 ng/l nicht überschreiten, sonst müssen besondere Sicherungsmaßnahmen (Mono – Ablagerung in einem mit HDPE - Folie gesicherten Bereich) angewendet werden. Da die DK III Deponie zur Zeit (Anfang September 2018) nicht über ausreichende Kapazitäten im DK III Ablagerungsbereich verfügt, können derzeit keine Materialien in besondere Sicherungsmaßnahmen übernommen werden.

6.1.7 SAD, DK III, neue Bundesländer

PFC-belasteter Boden kann bis zu einem Feststoffgehalt von 50 mg/kg angenommen werden (DK III Deponie). Grundlagen sind die POP-Verordnung und die DepV. Es erfolgt eine Rücksprache mit der zuständigen Behörde. Es können zusätzlich Eluatwerte erforderlich werden. Der Preis beträgt ca. 70 €/t (netto) bei Anlieferung. Die Sickerwasserreinigung erfolgt mittels Umkehrosmose. Die dreistufige, vollautomatische Membrananlage führt zur physikalischen Trennung von Deponiesickerwasser in direkt einleitfähiges schadstofffreies Permeat und ein schadstoffbelastetes Konzentrat.

6.2 Zusammenfassende Übersicht für oberirdische Deponien

6.2.1 Grundsätzliches

- Für PFC bis 100 µg/kg (Feststoff) oder 10 µg/l (Eluat) in NRW (NW) auf DK0?, DK I, DK II, DK III
- In Rheinland-Pfalz (RP) nur auf DK II Deponien
- Beurteilung der Ablagerbarkeit in BW, HE nach Feststoffgehalten, in BY und RP nach Eluatwerten, in NW sowohl als auch
- bei PFC-geeigneter Sickerwasserreinigung (Umkehrosmose, Nanofiltration, mehrstufige Aktivkohle, Kläranlage mit 4. Reinigungsstufe) bis zu den in BW, BY, HE, NW, RP festgelegten Zuordnungswerten bzw. bei SAD DK III bis 50 mg/kg PFOS, UTD DK IV > 50 mg/kg PFOS

6.2.2 Deponiespezifische Einzelfallregelungen (zusätzliche Anforderungen / Einschränkungen)

- DK II und DK III Deponien nehmen z.T. grundsätzlich kein PFC-verunreinigtes Material an (z.T. trotz vorhandener, grundsätzlich geeigneter Sickerwasserreinigungsanlagen).
- PFC-belastete Abfälle gelten als problematische Abfälle, ggf. erforderliche Abklärungen im Einzelfall mit der zuständigen Behörde werden oft als zu aufwändig empfunden und das Material wird abgelehnt.
- Einzelne DK II Deponien nehmen nur PFC-belastete überlassungspflichtige Abfälle an.
- Bei Annahme aufgrund von Feststoffwerten (z.B. DK III max. 50 mg/kg PFOS) können zusätzlich Eluatwerte verlangt werden.

- Bei einer SAD DK III in NW wird je nach der Höhe der PFC-Gehalte zwischen der Ablagerung in loser Schüttung oder in Bereichen mit besonderen Sicherungsmaßnahmen unterschieden (DK III-Monobereich mit HD-PE Folie gesichert). Es gibt Zuordnungswerte für Einzelwerte und Summenparameter mehrerer PFC im Eluat, die spezifisch von Bezirksregierungen festgelegt werden.
- Die Ablagerungsgebühren (netto) bewegen sich zwischen 40 – 60 €/t für DK I – DK II, z.T. ca. 50 – 70 €/t für DK III, aber auch > 100 €/t für DK III, bis 260 €/t für DK IV.

6.3 Bemerkungen über Untertage-Deponien

Die Angaben sind anonymisiert. PFC-haltige Abfälle haben offensichtlich für diese Deponien bisher keine besondere Relevanz oder sie wurden bisher ohne spezielle Beachtung abgelagert.

6.3.1 Eine Untertagedeponie in den alten Bundesländern

Die Untertagedeponie hat bisher keine PFC-haltigen Abfälle entsorgt. Aus diesem Grund könnten keine etwaigen Entsorgungskosten genannt werden, da der Betreiber im Vorfeld nicht genau weiß, in welcher Anlage und mit welchem Aufwand er den Abfall entsorgen muss. Die Zuordnungswerte (Grenzwerte) spielen dabei eher eine Rolle bei der Unterscheidung zwischen untätiger Beseitigung und Verwertung. Die UTD ist grundsätzlich bereit PFC-Abfälle zu entsorgen. Bei einer konkreten Anfrage würde sich die UEV gerne dieser Aufgabe annehmen.

6.3.2 Untertagedeponien eines Unternehmens in alten und neuen Bundesländern

Die Untertagedeponie/n hat/haben bisher keine PFC-haltigen Abfälle entsorgt. Die Deponie (alte Bundesländer) hat für die Einlagerung von Abfällen keine Grenzwerte, nur eigene Annahmbedingungen bzw. Ausschlusskriterien. Für eine genaue Einschätzung des abzulagernden Abfalles benötigt die UTD eine repräsentative Probe von 1 Kg, welche sie in Ihrem Labor kostenlos analysiert. Die Probe ist mit Probenbegleitschein und Probennahmeprotokoll an das Labor der UTD zu übersenden. Der Preis richtet sich nach der zu entsorgenden Menge. Je höher die Menge, desto geringer wird der Preis. Unser regulärer Entsorgungspreis für kleine Projekte beträgt 260 €/ Tonne (netto).

7 Sickerwasserreinigung versus Vermeidung der Sickerwasser-entstehung

Nahezu alle oben unter Punkt 5 zitierten Länderregelungen verweisen auf die wasserrechtlichen Vorgaben der Direkt- und Indirekteinleitung von Deponiesickerwasser in den Vorfluter oder eine kommunale Kläranlage. Die Sickerwasserreinigung sollte in jedem Einzelfall hinsichtlich der notwendigen Schadstoffrückhaltung betrachtet werden. Das in die Vorflut einzuleitende Wasser muss die Anforderungen aus den wasserrechtlichen Vorgaben erfüllen. Hier ist speziell zu prüfen, ob die Behandlung des gefassten Sickerwassers die Kriterien der Einleitung in Oberflächengewässer erfüllt [20]

Ist die Ablagerung auf Deponien vorzunehmen, ist sicherzustellen, dass entweder eine Sickerwasserbehandlung in einer kommunalen Kläranlage mit vierter Reinigungsstufe und mit thermischer Klärschlammbehandlung oder einer Sickerwasserbehandlung auf der Deponie erfolgt, mit der die PFC (PFAS) aus dem Stoffkreislauf nachhaltig ausgeschleust werden [15].

Für die Einhaltung der wasserrechtlichen Vorgaben für das in die Vorflut einzuleitende Abwasser sind nach derzeitigem Kenntnisstand für PFC-Verbindungen nur mehrstufige Aktivkohle- oder Umkehrosmoseverfahren geeignet [21]. Als Alternative zur Sickerwasserreinigung nennt das Ministerium für Umwelt NRW in seinen Ablagerungsempfehlungen für Abfälle mit organischen Schadstoffen – Vollzugshilfe [23] die sofortige Abdeckung zur Vermeidung der Sickerwasserentstehung. Das Bayerische Landesamt für Umwelt [18] fordert eine Prüfung ob die

Ablagerung in besonders gesicherten Monobereichen (Einkapselung im eigentlichen Deponiekörper) möglich ist. Letztendlich ist die Vermeidung der Sickerwasserentstehung die grundsätzlich bessere Alternative zur Sickerwasserreinigung. 100 %-ig wirksam ist dies in der Praxis nach Ansicht der Autoren jedoch nur bei Ablagerung unter einer Überdachung, eine i.d.R. aufwändige und teure Lösung.

Dass eine nahezu 100 %-ige Reinigung am Auslauf einer Sickerwasserreinigungsanlage mit Nanofiltration möglich ist (für das Permeat) zeigt ein schon mehrere Jahre zurückliegender Versuch auf der Deponie Burghof der Abfallverwertung des Landkreises Ludwigsburg (AVL) ([25]). Anlass war die Übernahme einer größeren Charge PFT-belasteten Bodens aus einem Brandschadensfall. Die Deponie Burghof des AVL verfügt über eine Sickerwasserreinigungsanlage mit Membranstufen (Ultrafiltration, Nanofiltration) und eine 3-stufige Aktivkohlereinigung. Diesbezüglich sollte das Austragsverhalten der PFT in zwei Lysimetern und die Wirksamkeit der Sickerwasserreinigung untersucht werden. Dabei stellt lediglich die Nanofiltration sicher (die Ultrafiltration allein reichte nicht aus), dass keine PFT-Verbindungen über das Sickerwasser in die Umwelt gelangen. Als Problematisch erwies sich jedoch das übrig bleibende Konzentrat (Retentat), lediglich ca. 10 % des abgereinigten Sickerwassers. Dies wurde über die 3-stufige Aktivkohlefilterreinigung (AKF) geleitet und erbrachte zu Beginn, nach Austausch des ersten am meisten beladenen AKF der Kette und stufenweise nach vorne schalten der nachfolgenden AKFs sowie Einbau des neuen bzw. reaktivierten Filter an dritter Stelle, zunächst eine Reinigungsleistung von nahezu 100 %. Nach 12 Tagen jedoch, dem üblichen Turnus für den Filterwechsel waren es nur noch ca. 60 % der Reinigungsleistung. Im Mittel ergaben sich ca. 80 % Reinigungsleistung für PFC. Obwohl dies insbesondere für relativ schwer adsorbierbare kurzkettige PFC ein gutes Ergebnis ist, so ist es doch insgesamt, nach Meinung der Autoren, unbefriedigend. I. W. aufgrund der insgesamt unbefriedigenden Adsorbierbarkeit der mobilen kurzkettigen PFC an Aktivkohle, insbesondere bei zusätzlich vorhandener Konkurrenz verschiedenster Schadstoffe um die Adsorptionsplätze, ist und bleibt die Sickerwasserreinigung für PFC-belastete Sickerwässern aufwändig und schwierig. Die grundsätzliche Machbarkeit wird jedoch nicht bestritten.

8 Bedarf an Deponieraum in Monodeponien – sind Monodeponien ein nachhaltiges Konzept für PFC?

Aufgrund der bereits festgestellten bzw. zukünftig noch zu erwartenden großflächigen Bodenbelastungen, sei es durch die Ausbringung mit PFC-haltigen Industrieabfällen vermischten Bioabfalls auf die Felder oder durch Brandschadensfälle bzw. Feuerlöschübungsbecken sonstige Altlasten (z.B. Galvanikbetriebe, Wäschereien) besteht der Bedarf an Deponieraum für derart verunreinigte Böden. Im Ergebnisbericht des LANUV Workshops am 25.09.2017 „PFC in Boden und Grundwasser“ wird festgehalten: „Aufgrund der begrenzten Deponiekapazitäten und der zu bewältigenden Bodenmassen, die auf PFC-belasteten Flächen voraussichtlich in den nächsten Jahren anfallen werden, sind einheitliche Regelungen oder Leitlinien für den Umgang mit PFC-belasteten Böden dringend erforderlich“. Nach Einschätzung der Autoren steht der Bedarf an Deponieraum für PFC-verunreinigte Bodenmassen derzeit noch am Anfang und wird in den nächsten Jahren stark ansteigen. Deponien mit (wirklich) gut geeigneten Sickerwasserreinigungsanlagen sind nicht sehr häufig und die Bereitschaft der Deponiebetreiber derartige Abfälle anzunehmen ist gelinde gesagt zurückhaltend. Sie beschränkt sich nicht selten auf Andienungspflichten aus der eigenen Gebietskörperschaft. Da PFC nur gering akut toxisch wirken geht es im Wesentlichen darum den Austrag über das Sickerwasser in die Umwelt (den Vorfluter bzw. das Grundwasser) zu verhindern. Dies über eine Sickerwasserreinigungsanlage sicher zu gewährleisten ist technisch aufwändig, (s. a. Kap. 7) teuer, und letztendlich auch wenig sinnvoll, die PFC aus dem Boden auswaschen zu lassen und dann aufwändig wieder aus dem Sickerwasser herauszufiltern. Eine letztendlich sichere Zerstörung der PFC kann nur eine

Hochtemperaturverbrennung gewährleisten.

Eine theoretische Alternative wäre die trockene Ablagerung, d. h. die Verhinderung der Sickerwasserentstehung. Ob sich PFC unter Ablagerungsbedingungen in einer eingekapselten Monodeponie für PFC-verunreinigten Bodenaushub überhaupt jemals abbauen ist ungewiss. Deswegen sind Überlegungen zur Nachhaltigkeit dieses Konzepts der langfristigen Verhinderung der Sickerwasserentstehung angebracht. Reine Oberflächenabdichtungskonzepte z. B. konvektionsdicht mit Kunststoffdichtungsbahnen greifen hier, auch bei den zu erwartenden hohen Langzeitbeständigkeiten (> 400 Jahre?), zu kurz und verschieben das Problem nur in eine ferne Zukunft. Hinzukommen müssen u. E. Überlegungen den Deponiekörper selbst als möglichst undurchlässigen, kompakten monolithischen Körper auszubilden um eine Auslaugung auch in ferner Zukunft zumindest sehr stark zu verlangsamen. Hierzu gehören eine optimierte Geometrie (kompakt, nicht flächig ausgebreitet, ausreichende Neigungen und Gefälle zu schnellen Ableitung von Niederschlagswasser) und ein definierter lagenweiser verdichtete Einbau zur Minimierung des Porenvolumens und damit der Wasserdurchlässigkeit sowie eine PFC-freie Abschlusschicht von mindestens einem halben Meter bindigen Bodens vor dem Aufbringen der Oberflächenabdichtung und der Rekultivierungsschicht. Unser ausführungstechnischer Vorschlag wäre unter Berücksichtigung des oben gesagten eine DK I Monodeponie für PFC-belastete Böden aus Gründen der Konvention (DK I) mit Basisabdichtung (Asphalt oder KDB, s. u.), Sickerwasserfassung, Sickerwasserspeichermöglichkeit und erforderlichenfalls externe Behandlung. Das Grundkonzept ist durch regelmäßiges Abdecken der kleinräumigen Einbaubereiche möglichst kein Sickerwasser entstehen zu lassen (idealer Weise durch Überdachung des Einlagerungsbereiches). Unter Bezug auf die Sonderregelung für Monodeponien in Satz 4 des Anhang 3, Punkt 2. „Zuordnungswerte für Deponien der Klasse 0, I, II, oder III“ der Deponieverordnung für spezifische Massenabfälle, die auf einer Monodeponie oder einem Monoabschnitt der Klasse I beseitigt werden, wonach Überschreitungen des jeweiligen Zuordnungswertes im Einzelfall und mit Zustimmung der zuständigen Behörde maximal das Dreifache des Zuordnungswertes für die Deponieklasse II (Tab. 2, Spalte 7) betragen dürfen (sofern das Wohl der Allgemeinheit nicht beeinträchtigt wird), wäre eine solche Monodeponie sinngemäß für PFC-verunreinigten Erdaushub/Abfälle bis zu Zuordnungswerten der DK II, u. E. auch über den Einzelfall hinaus, genehmigungsfähig.

Voraussetzung wäre u. E. eine konvektionsdichte Oberflächenabdichtung (vorzugsweise mit Kunststoffdichtungsbahn (KDB)) und aufgrund des Chemismus der PFC (schlecht adsorbierbar und u. a. lipophob) eine konvektionsdichte Basisabdichtung aus Deponieasphalt oder KDB (aufgrund ihres lipophoben Charakters dringen die PFC kaum in HD-PE bzw. Bitumen ein)

9 Bodenbehandlungen als Alternativen zur Beseitigung?

9.1 Thermische Behandlung

Die thermische Behandlung (in Sonderabfallverbrennungs-, Hausmüllverbrennungsanlagen, geeigneten Kraft- und Zementwerken) von PFC-verunreinigten Abfällen (i. W. Böden und Klärschlämme) wird in mehreren Merkblättern, Vollzugshilfen und Erlassen der Bundesländer empfohlen bzw. für Klärschlämme von Kläranlagen mit vierter Reinigungsstufe gefordert [20, 23, 15]. Für große Brandschadensfälle gibt es zumindest ein den Autoren bekanntes Beispiel, dass größere Mengen durch Feuerlöschschäume verunreinigte Böden in einer Sonderabfallverbrennungsanlage behandelt wurden. PFC besitzen eine hohe thermische Stabilität. Nach Literaturangaben sind Verbrennungs- bzw. Nachverbrennungstemperaturen der Gasphase von je nach Quelle > 1.100 bis über 1.200 bis über 1.300 °C (1.200 °C s. LANUV [26], 1.300 °C s. UBA [6]) für die Zerstörung der PFC erforderlich. Hausmüllverbrennungsanlagen mit Rostfeuerung erfüllen diese Anforderungen nach Ansicht der Autoren in der Regel eher nicht (Herstellerangaben zwischen 800 und 1150 °C). Die 17. BImSchV [27] schreibt für Hausmüllverbrennungsanlagen eine Verbrennungstemperatur von mindestens 850 °C für mindestens zwei Sekunden

nach der letzten Verbrennungsluftzufuhr vor. Für besonders überwachungsbedürftige (gefährliche) Abfälle mit einem Halogengehalt aus halogenorganischen Stoffen von mehr als 1 M.-%, berechnet als Chlor, muss eine Mindesttemperatur von 1.100 °C für eine Verweilzeit von 2 Sekunden eingehalten werden [27]. Das Umweltbundesamt [28] gibt für etwa 20 Mono-klärschlammverbrennungsanlagen in Deutschland Verbrennungstemperaturen von 850 – 950 °C an. In Sonderabfallverbrennungsanlagen werden i.d.R. Drehrohröfen eingesetzt die Temperaturen von 1.000 – 1.300 °C erreichen. Es gibt aber auch Sonderabfallverbrennungsanlagen die Verbrennungstemperaturen von „lediglich“ > 860 °C angeben. Ob solchermaßen thermisch behandelte Böden bzw. Abfälle noch einer sinnvollen Verwertung zugeführt werden können oder nicht abschließend beseitigt werden müssen ist fraglich. Für die thermische Behandlung in einer Sonderabfallverbrennungsanlage werden stark marktabhängige Preise von ca. 100 – 400 €/t genannt (Kernbereich ca. 150 – 200 €/t). Für das Brennen von Zementklinker für die Zementherstellung werden Temperaturen von ca. 1.450 °C eingesetzt. Der PFC-belastete Boden müsste als Rohstoffbeigabe dem Kalkstein und Ton vor dem Brennvorgang beigegeben werden. Ein Beispiel hierfür gibt die Sonderabfalldeponie Kölliken für den verunreinigten Boden unterhalb der ausgegrabenen Deponie auf ihrer Homepage an (www.smdk.ch: Behandlung – Aufbereitung – Entsorgung, Zementwerk). Die Mitverbrennung von Klärschlamm als Sekundärbrennstoff, die zweitstärkste Fraktion der Sekundärbrennstoffe in Zementwerken, kann hier als positiver Nebeneffekt zur Eliminierung von PFC in Klärschlämmen beitragen.

9.2 Bodenwäsche

Nachdem die Bodenwäsche aufgrund der aufwändigen und schwierigen Reinigung des Waschwassers bisher keinen Durchbruch erzielen konnte gibt es seit diesem Jahr ein interdisziplinäres Großprojekt der Strabag Umwelttechnik GmbH gemeinsam mit der ZÜBLIN Umwelttechnik GmbH und der GEIGER Umweltdienste GmbH, eine On-site Bodenbehandlungsanlage auf einem ehemaligen Raffineriegelände bei Ingolstadt [29, 30]. Hier werden im Zuge der Revitalisierung eines 76 Hektar großen ehemaligen Raffineriegeländes aus einer Bodensanierung u. a. 60.000 t PFC-verunreinigter Aushub gewaschen und wieder eingebaut.

Das wesentliche Merkmal dieses Reinigungsverfahrens ist die Kombination aus dem Herausspülen der Kontamination und der nachgeschalteten Schlammbehandlung mit nachfolgender Wasseraufbereitung.

Die hochbelasteten Reststoffe werden im Wesentlichen über die Schlammbehandlung und die Wasseraufbereitung ausgetragen und beseitigt.

In der Schlammbehandlung wird der herausgespülte Prozessschlamm sedimentiert und klassiert, der Dickschlamm wird entwässert und als hochbelasteter Filterkuchen auf zugelassenen Deponien beseitigt.

Die belastete Klarwasserphase wird in einer nachgeschalteten Wasseraufbereitung mittels Adsorption an Aktivkohlefilterkolonnen weiter von den eluierten Schadstoffen befreit und wird als Spülwasser dem Waschprozess im Kreislauf wieder zurückgeführt.

Umfassende Vorerkundungen und Laborversuche sowie Waschversuche in einer stationären Behandlungsanlage waren erforderlich um die technische Konzeption für die Pilotanlage zu erarbeiten.

Nach nur 6 Monaten Planungs- und Ausführungsphase sowie Probetrieb läuft die Anlage inzwischen im Regelbetrieb. Die erzielten Reinigungserfolge sind durchweg positiv und wurden gegenüber den Vorausplanungen z.T. sogar übertroffen [29].

In diesem nachhaltigen Projekt können somit 90% der Massen am Standort wiederverwendet und wertvolle Ressourcen geschont werden.

Der Erfolg dieses Verfahrens signalisiert die Möglichkeiten PFC-belastete Böden behandeln und aufbereiten zu können und somit den zu beseitigenden Anteil deutlich zu reduzieren um wertvollen Deponieraum im Sinne einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft einzusparen.

Chemisch-physikalische Behandlungsverfahren sind aber stark von den geologischen bzw. geophysikalischen Gegebenheiten des Aushubs abhängig – stark bindige Böden sind für eine Bodenwäsche ungeeignet [29].

9.3 Immobilisierung von PFC-verunreinigten Böden?

Für die Immobilisierung von organischen Verunreinigungen wie PCBs, PAKs, TPH, PCP, PFOS und PFAS gibt es z. B. vom Australischen Hersteller Ziltek das Adsorptionsmittel RemBind™ aus Aktivkohle, amorphem Aluminiumhydroxid, Kaolin (Ton) und weiteren, geheim gehaltenen Bestandteilen. RemBind™ wird in Zugabemengen von 2 – 10 % bezogen auf jeweilige Feuchtmasse untergemischt und soll PFOS und PFOA um > 99 % bzw. auf < 0,02 µg/l im Eluat reduzieren. Allerdings werden Preise von mehreren tausend € pro Tonne genannt, womit eine Anwendung bereits unabhängig von der Prüfung der Wirksamkeit der Immobilisierung eher unrealistisch erscheint. Laut Reinhardt [31] soll RemBind™ von amerikanischen Deponiebetreibern akzeptiert werden.

Auch in Deutschland gibt es ähnliche Bestrebungen großflächig PFC-verunreinigte Böden im Raum Baden-Baden/Rastatt unter Zugabe von hydraulischen Bindemitteln und Adsorbentien in mobilen Mischanlagen zu immobilisieren und zur Verwertung z. B. als Tragschichten oder in technische Bauwerke einzubauen. Die diesbezüglich laufenden Untersuchungen sind sehr vielversprechend. Laut Hradetzky [32] sollen im Eluat nach dem Trogverfahren gemäß DIN EN 1744-3 für in Baden-Baden/Rastatt üblichen PFC-Bodenbelastungen durchaus Materialwerte erreicht werden, die eine Verwertung als Z0/Z1-Material nach Erlass des Umweltministeriums BW „Entsorgung von Bodenmaterial aus PFC (PFAS)-belasteten Flächen“ zulassen würden. Allerdings sind die Untersuchungen noch nicht vollständig abgeschlossen, so dass eine Veröffentlichung konkreter Ergebnisse noch etwas Zeit in Anspruch nimmt.

10 Zusammenfassung

Großflächige Boden- und Grundwasserbelastungen mit per- und polyfluorierten „Chemikalien“ (PFC) oder „Tensiden“ (PFT) oder „Alkylsubstanzen“ (PFAS) sind in Deutschland seit ca. 2006 durch industriell verunreinigte Bioabfälle, Beimengungen von Papierschlämmen in Kompost und durch Klärschlämme, die in der Landwirtschaft auf Felder aufgebracht wurden, bekannt. Ein zweiter wichtiger Emissionspfad sind Schaumlöschmittel die von Feuerwehren vor allem für die Bekämpfung von leicht entflammaren Treibstoffen und anderen brennbaren Kohlenwasserstoffen eingesetzt werden. Viel mehr noch als durch tatsächliche Brände kommen Boden- und Grundwasserverunreinigung durch zahlreiche Feuerlöschübungsbecken auf zivilen und militärischen Flughäfen, Raffinerien, Tanklagern und Industrieanlagen vor. PFC sind wasser-, schmutz- und fettabweisend und werden daher als Imprägniermittel z. B. für Outdoor- und Arbeitskleidung, Textilien und schmutzabweisende Teppiche, aber auch für Pappbecher und Pizzakartons, Foto- und Hochglanzpapier etc. in großen Mengen eingesetzt. PFC sind ausschließlich von Menschen erzeugte Substanzen, sie kommen in der Natur nicht vor und sind unter Umweltbedingungen kaum abbaubar (persistent). Der wohl bekannteste Vertreter ist PFOS Perfluoroktansulfonsäure, die seit 2010 auf die Liste der verbotenen Substanzen der europäischen POP-Verordnung (persistent organic pollutants) gesetzt und verboten wurde. Obwohl PFC akut nur mäßig toxisch sind, werden ihnen chronisch toxische Eigenschaften nachgesagt. Sie sind weltweit im Fettgewebe und Blut von Fischen, Säugetieren und Menschen nachweisbar.

Bei der Grundwassersanierung von PFC-Schadensfällen wird derzeit überwiegend Aktivkohle eingesetzt, wobei die Adsorption der PFC an Aktivkohle nicht sehr effizient ist. Als Bodenreinigung wird derzeit in stärker verunreinigten Fällen die thermische Bodenbehandlung (Zerstörung der PFC bei > 1.100 – 1.300 °C, Hochtemperaturverbrennung) durchgeführt. In

geringer belasteten Fällen ist die Bodenwäsche mit anschließender Aktivkohlereinigung des Waschwassers und Deponierung der entwässerten Prozessschlämme auf zugelassene Deponien, die bisher aussichtsreichste Sanierungsvariante.

Für eine Deponierung PFC-verunreinigter Böden müssen Sickerwasserreinigungsanlagen mit mehrstufiger Aktivkohle- oder Umkehrosmose- bzw. Membranverfahren mit Nanofiltration vorhanden sein oder nachgeschaltete Kläranlagen mit 4. Reinigungsstufe und Klärschlammverbrennung bei entsprechend hohen Temperaturen.

Aufgrund der nur unbefriedigenden Entfernbarkeit (Adsorbierbarkeit) von vor allem kurz-kettigen PFC aus dem Sickerwasser wären bei einer Deponierung überdachte Monobereiche zur Verhinderung der Sickerwasserneubildung mit anschließender dauerhafter Einkapselung die beste, wenn auch eine sehr aufwändige Lösung (wobei der Deponiekörper selbst als eine möglichst undurchlässige Barriere wirken sollte). Die bisher einzig bekannte nachhaltige Entfernung von PFC aus der Umwelt ist die Hochtemperaturverbrennung. Noch sind viele PFC-Quellen (Produktion, Verwendung) weltweit nicht versiegt. Immer noch steht die PFC-Problematik von der Bodensanierung bis zur Deponierung relativ am Anfang der Entwicklung. Der Umgang mit großflächigen PFC-Bodenverunreinigungen ist noch nicht befriedigend gelöst. Die PFC-Problematik wird uns noch über Jahrzehnte hinaus beschäftigen.

Literaturverzeichnis

- [1] UM BW – MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT BADEN-WÜRTTEMBERG: *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*. 2018. – Entwurf vom 22.06.2018
- [2] EU Verordnung (EG) Nr. 850/2004 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 29. April 2004 über persistente organische Schadstoffe und zur Änderung der Richtlinie 79/117/EWG (ABl. Nr. L 158 S. 7, ber. Nr. L 229 S. 5) Celex-Nr. 3 2004 R 0850 Zuletzt geändert durch Art. 1 ÄndVO (EU) 2016/460 vom 30.3.2016 (ABl. Nr. L 80 S. 17)
- [3] LAGA MITTEILUNGEN DER LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT 20: *Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen*. 1997. – Technische Regeln - Stand: 6. November 1997
- [4] OSTERAUER, R.: *PFC – Toxikologie und Ökotoxikologie*. 2017. – In Egloffstein/Burkhardt (Hrsg.) *Altlasten 2017*. ICP Eigenverlag Bauen und Umwelt, Band 31, Karlsruhe
- [5] UBA – UMWELTBUNDESAMT: *Per- und polyfluorierte Chemikalien (PFC). Einträge vermeiden - Umwelt schützen*. 2009. – Dessau-Roßlau
- [6] UBA – UMWELTBUNDESAMT: *Per- und polyfluorierte Chemikalien (PFC)*. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/chemikalien/chemikalien-reach/stoffgruppen/per-polyfluorierte-chemikalien-pfc#textpart-1>. Version:2018
- [7] *Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln (Düngemittelverordnung - DüMV)*. 2012. – vom 05.12.2012 (BGBl I S. 2482)
- [8] STUPP, H.-D.: *PFT? Eine neue Stoffgruppe und deren Bedeutung für die Umwelt – Auftreten, Verbreitung, Herausforderungen für die Sanierung als neue Umweltschadstoffe*. 2011. – In: Egloffstein/Burkhardt (Hrsg.) *Altlasten 2011*. ICP Eigenverlag Bauen und Umwelt, Band 20, Karlsruhe
- [9] TEICHMAN, R.-K.: *PFC-Belastungen im Boden und Grundwasser im Raum Baden-Baden/Rastatt – Ursachen, Umgang, Möglichkeiten*. 2016. – Vortrag 16. Karlsruher Altlastenseminar 2016 am 04.05.2016, IHK Karlsruhe
- [10] KRAKAU, C.: *Erfahrungen aus der PFC-Fallbearbeitung Raum Rastatt/Baden-Baden*. 2018. – In: Egloffstein/Burkhardt (Hrsg.) *Altlasten 2018*. ICP Eigenverlag Bauen und Umwelt, Band 33, Karlsruhe
- [11] *Stadt überwacht PFC-Werte im Mannheimer Norden*. www.mannheim.de/de/service-bieten/umwelt/bodenschutz/pfc. Version:2018. – Mannheim

- [12] UBA – UMWELTBUNDESAMT: *Vorläufige Bewertung von Perfluorierten Tensiden (PFT) im Trinkwasser am Beispiel ihrer Leitsubstanzen Perfluorooctansäure (PFOA) und Perfluorooctansulfonsäure (PFOS)*. 2006. – Stellungnahme der Trinkwasserkommission des Bundesministeriums für Gesundheit (BMG) beim Umweltbundesamt vom 21.06.06 überarbeitet am 13.7.06
- [13] HLUG – HESSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE: *Perfluorierte Chemikalien (PFC) in Hessen Untersuchungsprogramm des HLUG*. 2010. – Wiesbaden
- [14] LAWA – BUND/LÄNDER-ARBEITSGEMEINSCHAFT WASSER: *ABLEITUNG VON GERINGFÜGIGKEITSSCHWELLENWERTEN FÜR DAS GRUNDWASSER: Per- und polyfluorierte Chemikalien (PFC)*. 2017
- [15] UM BW – MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT BADEN-WÜRTTEMBERG: *Entsorgung von Bodenmaterial aus PFC (PFAS)-belasteten Flächen*. 2016. – Erlass vom 22.12.2014, Stuttgart
- [16] LANUV: *Bewertungsmaßstäbe für PFC-Konzentrationen für NRW*. <https://www.lanuv.nrw.de/umwelt/gefährstoffe/pfc/bewertungsmaassstaebe/>. Version: 2018
- [17] RPK – REGIERUNGSPRÄSIDIUM KARLSRUHE, STABSTELLE PFC: *erwertung, Entsorgung und Lagerung von PFC, Belastete Böden - Rechtliche Rahmenbedingungen der Verwertung und Entsorgung*. https://rp.baden-wuerttemberg.de/rpk/Abt5/Ref541/PFC/Seiten/Verwertung_Entsorgung_Lagerung_PFC.aspx. Version: 2018
- [18] LFU BAY. – BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT: *Leitlinien zur vorläufigen Bewertung von PFC-Verunreinigungen in Wasser und Boden*. 2017. – Stand: April 2017, Augsburg
- [19] STMUGV – BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT, GESUNDHEIT UND VERBRAUCHERSCHUTZ: *Anforderungen an die Verfüllung von Gruben und Brüchen sowie Tagebauen. Eckpunktepapier und Leitfaden zu den Eckpunkten*. 2005
- [20] LFU RHL.-PF. – LANDESAMT FÜR UMWELT RHEINLAND PFALZ: *ALEX-Informationsblatt 29 Per- und polyfluorierte Chemikalien (PFC) in der Umwelt*. 03 2017. – Mainz
- [21] MUKLV – HESSISCHES MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMASCHUTZ, LANDWIRTSCHAFT UND VERBRAUCHERSCHUTZ: *Verfahrenshilfe zum Vollzug des Abfallrechts Allgemeine Hinweise zum Betrieb von Deponien*. 2017
- [22] HMUELV Ministeriums für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz: Erlass vom 06.12.2010, Az. II 3-100a 12.15.06
- [23] MKULNV – MINISTERIUM FÜR KLIMASCHUTZ, UMWELT, LANDWIRTSCHAFT, NATUR-UND VERBRAUCHERSCHUTZ DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN: *Ablagerungsempfehlungen für Abfälle mit organischen Schadstoffen*. 2011. – Vollzugshilfe – 06. Dezember 2011, korrigierte Fassung
- [24] LANUV – LANDESAMT FÜR NATUR, UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ NORDRHEIN-WESTFALEN: *PFC in Boden und Grundwasser*. 2017. – Ergebnisbericht des Workshops am 25.09.2017. Dezember 2017
- [25] JEDELE AND PARTNER: *Untersuchungen zum Verbleib von PFT-Verbindungen in abgelagerten Bodenmaterial und im Sickerwasser der Deponie Burghof im Landkreis Ludwigsburg*. https://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/documents/10184/153337/projekt26_bericht.pdf. Version: 2013

- [26] LANUV – LANDESAMT FÜR NATUR, UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ NORDRHEIN-WESTFALEN: *Fachbericht 34: Verbreitung von PFT in der Umwelt. Ursachen - Untersuchungsstrategie - Ergebnisse - Maßnahmen.* 2011
- [27] *Siebzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über die Verbrennung und die Mitverbrennung von Abfällen - 17. BImSchV).* 1990
- [28] UBA – UMWELTBUNDESAMT: *Klärschlamm Entsorgung in der Bundesrepublik Deutschland.* 2013
- [29] KLEINEGRÄBER, K.: *Freundliche schriftliche Mitteilung.* 2018. – Strabag Umwelttechnik GmbH
- [30] EDEL, H.-G. ; KLOPP, D. ; KELLNER, C.: *PFC-Grundwassersanierungen: Stand der Technik und Kostenvergleich.* 2018. – In: Egloffstein/Burkhardt (Hrsg.) *Altlasten 2018.* ICP Eigenverlag Bauen und Umwelt, Band 33, Karlsruhe
- [31] REINHARDT, M. ; SÖHLMANN, R. ; TEICHMANN, R.-K.: *Sanierungsbetrachtungen zu großflächigen PFC-Verunreinigungen in Boden und Grundwasser.* 2017. – *Altlasten 2017.* ICP Eigenverlag Bauen und Umwelt, Band 31, Karlsruhe
- [32] HRADEZKY, H.: *Freundliche mündliche Mitteilung.* 2018. – SRS Deponiebau GmbH, Karlsruhe