

Thomas Egloffstein

icp@icp-ing.de
www.icp-ing.de

Entsorgung von PFAS-haltigen Abfällen

Since 1991

Engineering for a Better Tomorrow

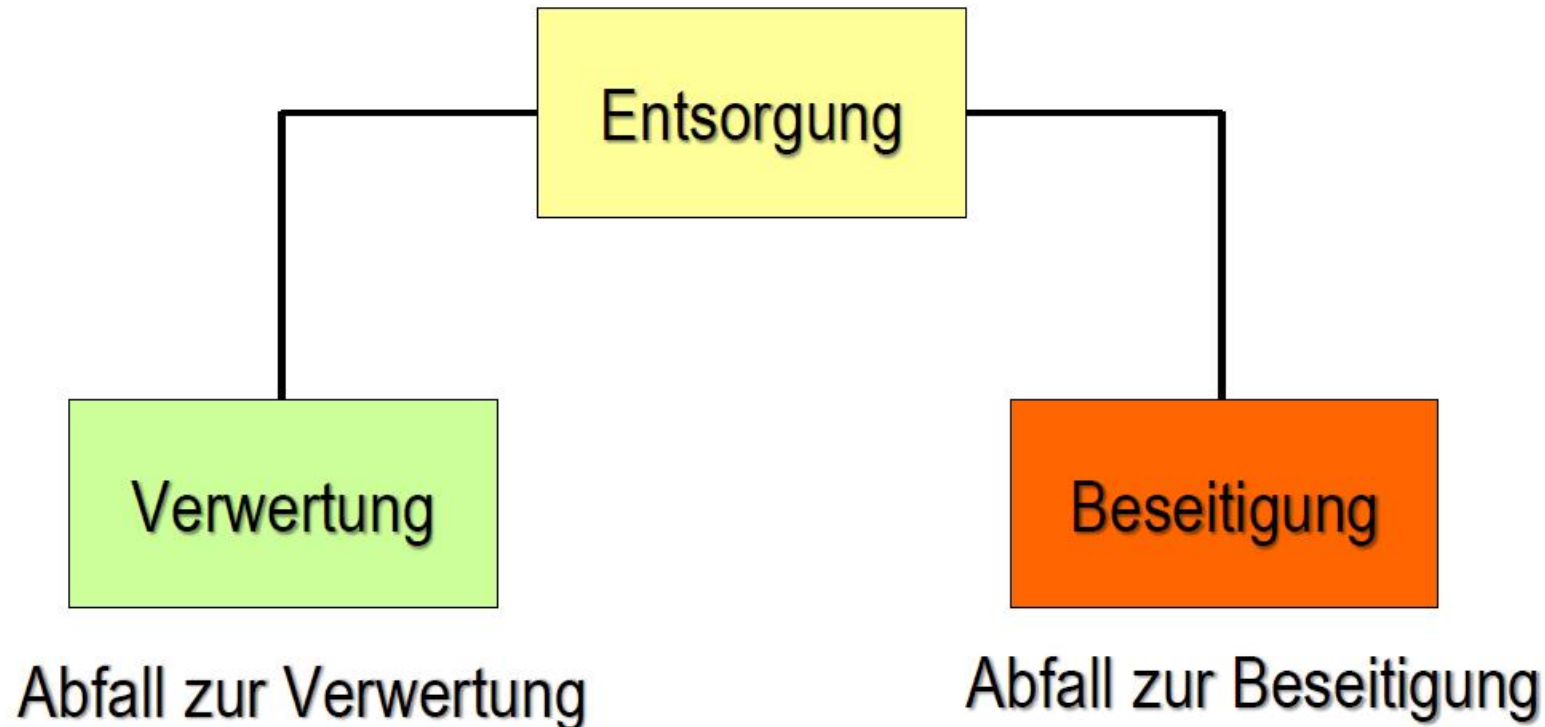
3. PFAS-PerFluSan-Workshop
24. Juni 2025
IHK Karlsruhe, Saal Baden

Entsorgung = Verwertung und Beseitigung

Abfallbegriff: Was ist Abfall?

„Vorgelagerter“ Abfallbegriff bzw. „weitreichender“ Abfallbegriff
alles, was nicht Produkt oder Nebenprodukt ist, ist Abfall

**„Vorgelagerter“ Abfallbegriff schließt auch
Verwertung ein**



Alkylsubstanz = org. Verb. in dem ein oder mehrere H⁺-Atome in einem Alkan (Kohlenwasserstoffkette) durch eine andere chemische Gruppe ersetzt wurde. Bei PFAS: Fluor F⁺ alle ersetzt=„per-“, teilw. ersetzt=„poly-“

PFOS wird aufgrund der sehr hohen chemischen Stabilität (Beständigkeit) gegenüber dem sehr starken Oxidationsmittel Chrom(VI) sowie gegenüber Schwefelsäure/ Chromschwefelsäure eingesetzt. (UBA Texte 63/2016).

PFAS

per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen
vormals: PFC per- und polyfluorierte Chemikalien
auch: PFT perfluorierte Tenside

Verwendung seit den 1950-ern (verstärkt seit den 1970-80-ern) z. B. in

- **Galvanik** (z.B. PFOS als Netzmittel bei der Verchromung)
- Textilherstellung (Outdoorkleidung, Imprägniermittel, Teppiche)
- Lebensmittelverpackungsindustrie (z.B. Pappbecher, Pizzakarton)
- **Papier- und Pappeherstellung**
- Fotoindustrie
- Lack- und Farbenherstellung
- Halbleiterindustrie
- Hydraulikflüssigkeiten
- **Feuerlöschschäume**
- Hilfsmittel bei Herstellung von Teflon



- **Hohe Stabilität und Langlebigkeit (Persistenz)**
die Kohlenstoff-Fluor-Bindung hat eine sehr hohe chemische und thermische Stabilität (d. h. PFAS werden so gut wie nicht abgebaut sondern reichern sich in der Umwelt an)
- **Wasser-, Fett- und schmutzabweisend**
die perfluorierte Kohlenstoffkette ist lipophob und hydrophob (fettfeindlich und wasserfeindlich)
- **bioakkumulierbar**
vor allem langkettige PFAS reichern sich über die Nahrungskette im Körper an
- **Toxizität – Gesundheitsgefahren**
PFAS haben nur eine relativ geringe Toxizität, können zu aber zu Leberschäden, Schilddrüsenerkrankungen, Fettleibigkeit, Fruchtbarkeitsstörungen (HP10) und Krebs führen
- **hohe Mobilität - Ferntransportpotential**
vor allem kurzkettige PFAS sind sehr mobil in Wasser und Boden, einige PFAS sind flüchtig und werden über die Luft transportiert – Nachweise in den entferntesten Regionen, PFAS werden nur schlecht durch natürliche Barrieren zurückgehalten

Relevante PFAS-belastete Abfälle in den zurückliegenden Jahren:

- Löschwasser / A3F-Löschsäume aus Brandschadensfällen / Feuerlöschübungsbecken
- Produktionsabfälle: Foto-, Textil-, Galvanikindustrie, Teflon-verarbeitende Betriebe
- Schlämme (Klärschlämme, Schlämme aus der Bodenwäsche, Schlämme aus der Abwasser- und Sickerwasserreinigung, aus Öl-, Wasserabscheidern, Galvanikschlämme)
- Verbrauchte Ionenaustauscherharze aus der Abwasserreinigung von Galvanikbetrieben
- PFAS-verunreinigte Böden und Boden-Bauschuttgemische (A3F-Löschsäume oder mit industriellen Abfällen (z. B. Papierschlämmen) verunreinigte Bioabfälle / Komposte

Konzentrationen i.d.R. < Anhang IV der EU-POP-VO => kein POP-Abfall!

Konzentrationen i.d.R. << AAV i. V. m. Anhang III der AbfRRL => kein gefährlicher Abfall

i.d.R. rel. geringe PFAS-Konzentrationen, VK1 / VK2 bis VK3 (gem. PFAS-Leitfaden)

z. T. PFAS-Konzentrationen > VK3 (gem. PFAS-Leitfaden)

Tab. 4: Einstufung von Abfällen als gefährlich oder nicht gefährlich nach AVV i. V. m. der AbfRRL – Konzentrationsgrenzen für die Gehalte von „neuen“ persistenten organischen Schadstoffen (POP) im Abfall auf Grundlage insbesondere der harmonisierten Einstufung von Stoffen/Stoffgruppen nach CLP-VO sowie Eröffnung des Anwendungsbereichs der POP-Abfall-ÜberwV –

Konzentrationsgrenzen nach Anhang IV der EU-POP-VO für bestimmte, nicht gefährliche POP-haltige Abfälle

> Zerstören / unumkehrbar umwandeln

	Für die Einstufung relevante worst case Klassifikation nach Anhang VI der CLP-VO				Konzentrationsgrenze nach Nr. 2.2.1 der Anlage zur AVV i.V.m. Anhang III der AbfRRL				Konzentrationsgrenze nach Anhang IV der EU-POP-VO [mg/kg OS]
	Relevante Stoffe (worst case)	Index-Nr.	Kodierung der Gefahrenklassen und -kategorien	Kodierung der Gefahrenhinweise	[mg/kg OS]	[%]	Gefahrenrelevante Abfalleigenschaft	Bedeutung der HP Kriterien	
Perfluorhexansulfonsäure (PFHxS) und ihre Salze	K-PFHxS		Skin Irrit. 2 Eye Irrit. 2 STOT SE 3	H315 H319 H335	200.000	20	HP 4 HP 5	Hautreizung und Augenschädigung Spez. Zielorgan-Toxizität (STOT)/ Aspirationsgefahr	1 ²⁾
PFHxS-verwandte Verbindungen	2-(N-Methylperfluorobutylsulfonamido)ethylacrylat		Skin Sens.	H317	100.000	10	HP 13	sensibilisierend	40 ³⁾
Perfluorooctansäure (PFOA) und ihre Salze	PFOA	607-704-00-2	Repr. 1B	H360D	3.000	0,3	HP 10	reproduktions-toxisch	1 ²⁾
PFOA-verwandte Verbindungen	8:2 FTI		Skin Irrit. 2 Eye Irrit. 2 STOT SE 3	H315 H319 H335	200.000	20	HP 4 HP 5	Hautreizung und Augenschädigung Spez. Zielorgan-Toxizität (STOT)/ Aspirationsgefahr	40 ³⁾
Perfluorooctansulfonsäure (PFOS) und ihre Derivate	Perfluorooctansulfonsäure (PFOS)	607-624-00-8	Repr. 1B	H360D	3.000	0,3	HP 10	reproduktions-toxisch	50

1) Überprüfung durch die Europäische Kommission bis spätestens 30.12.2027.

2) gilt für PFOA und ihre Salze bzw. PFHxS und ihre Salze; Überprüfung durch die Europäische Kommission bis spätestens 30.12.2027.

3) gilt für die Summe der PFOA-verwandten Verbindungen bzw. die Summe der PFHxS-verwandten Verbindungen; Überprüfung durch die Europäische Kommission bis spätestens 30.12.2027

Skin. Irrit. 2 = Äzwirkung auf die Haut / Hautreizung, H315 Verursacht Hautreizungen

Eye Irrit. 2 = schwere Augenschäden / Augenreizung, H319 Verursacht schwere Augenreizungen

STOT SE 3 = Spez. Zielorgan-Toxizität bei einmaliger Exposition, H335 Kann die Atemwege reizen

Skin Sens. = Sensibilisierung der Atemwege / Haut, H317 Kann allergische Hautreaktionen verursachen

Repr. 1B = Reproduktionstoxizität, H360D Kann das Kind im Mutterleib schädigen

Tab. 4: **Einstufung von Abfällen als gefährlich oder nicht gefährlich nach AVV i. V. m. der AbfRRL** – Konzentrationsgrenzen für die Gehalte von „neuen“ persistenten organischen Schadstoffen (POP) im Abfall auf Grundlage insbesondere der harmonisierten Einstufung von Stoffen/Stoffgruppen nach CLP-VO sowie Eröffnung des Anwendungsbereichs der POP-Abfall-ÜberwV – Konzentrationsgrenzen nach Anhang IV der EU-POP-VO für bestimmte, nicht gefährliche POP-haltige Abfälle

HP = Hazard Property Code

	Für die Einstufung relevante worst case Klassifikation nach Anhang VI der CLP-VO				Konzentrationsgrenze nach Nr. 2.2.1 der Anlage zur AVV i.V.m. Anhang III der AbfRRL				Konzentrationsgrenze nach Anhang IV der EU-POP-VO
	Relevante Stoffe (worst case)	Index-Nr.	Kodierung der Gefahrenklassen und -kategorien	Kodierung der Gefahrenhinweise	[mg/kg OS]	[%]	Gefahrenrelevante Abfalleigenschaft	Bedeutung der HP Kriterien	[mg/kg OS]
Perfluorhexansulfonsäure (PFHxS) und ihre Salze	K-PFHxS		Skin Irrit. 2 Eye Irrit. 2 STOT SE 3	H315 H319 H335	200.000	20	HP 4 HP 5	Hautreizung und Augenschädigung Spez. Zielorgan-Toxizität (STOT)/ Aspirationsgefahr	1 ²⁾
PFHxS-verwandte Verbindungen	2-(N-Methylperfluorobutylsulfonamido)ethylacrylat		Skin Sens.	H317	100.000	10	HP 13	sensibilisierend	40 ³⁾
Perfluorooctansäure (PFOA) und ihre Salze	PFOA	607-704-00-2	Repr. 1B	H360D	3.000	0,3	HP 10	reproduktions-toxisch	1 ²⁾
PFOA-verwandte Verbindungen	8:2 FTI		Skin Irrit. 2 Eye Irrit. 2 STOT SE 3	H315 H319 H335	200.000	20	HP 4 HP 5	Hautreizung und Augenschädigung Spez. Zielorgan-Toxizität (STOT)/ Aspirationsgefahr	40 ³⁾
Perfluorooctansulfonsäure (PFOS) und ihre Derivate	Perfluorooctansulfonsäure (PFOS)	607-624-00-8	Repr. 1B	H360D	3.000	0,3	HP 10	reproduktions-toxisch	50

1) Überprüfung durch die Europäische Kommission bis spätestens 30.12.2027.

2) gilt für PFOA und ihre Salze bzw. PFHxS und ihre Salze; Überprüfung durch die Europäische Kommission bis spätestens 30.12.2027.

3) gilt für die Summe der PFOA-verwandten Verbindungen bzw. die Summe der PFHxS-verwandten Verbindungen; Überprüfung durch die Europäische Kommission bis spätestens 30.12.2027

Skin. Irrit. 2 = Äzwirkung auf die Haut / Hautreizung, H315 Verursacht Hautreizungen

Eye Irrit. 2 = schwere Augenschäden / Augenreizung, H319 Verursacht schwere Augenreizungen

STOT SE 3 = Spez. Zielorgan-Toxizität bei einmaliger Exposition, H335 Kann die Atemwege reizen

Skin Sens. = Sensibilisierung der Atemwege / Haut, H317 Kann allergische Hautreaktionen verursachen

Repr. 1B = Reproduktionstoxizität, H360D Kann das Kind im Mutterleib schädigen

Tab. 4: **Einstufung von Abfällen als gefährlich oder nicht gefährlich nach AVV i. V. m. der AbfRRL** – Konzentrationsgrenzen für die Gehalte von „neuen“ persistenten organischen Schadstoffen (POP) im Abfall auf Grundlage insbesondere der harmonisierten Einstufung von Stoffen/Stoffgruppen nach CLP-VO sowie Eröffnung des Anwendungsbereichs der POP-Abfall-ÜberwV – Konzentrationsgrenzen nach Anhang IV der EU-POP-VO für bestimmte, nicht gefährliche POP-haltige Abfälle

	Für die Einstufung relevante worst case Klassifikation nach Anhang VI der CLP-VO				Konzentrationsgrenze nach Nr. 2.2.1 der Anlage zur AVV i.V.m. Anhang III der AbfRRL				Konzentrationsgrenze nach Anhang IV der EU-POP-VO
	Relevante Stoffe (worst case)	Index-Nr.	Kodierung der Gefahrenklassen und -kategorien	Kodierung der Gefahrenhinweise	[mg/kg OS]	[%]	Gefahrenrelevante Abfalleigenschaft	Bedeutung der HP Kriterien	[mg/kg OS]
Perfluorhexansulfonsäure (PFHxS) und ihre Salze	K-PFHxS		Skin Irrit. 2 Eye Irrit. 2 STOT SE 3	H315 H319 H335	200.000	20	HP 4 HP 5	Hautreizung und Augenschädigung Spez. Zielorgan-Toxizität (STOT)/ Aspirationsgefahr	1 ²⁾
PFHxS-verwandte Verbindungen	2-(N-Methylperfluorobutylsulfonamido)ethylacrylat		Skin Sens.	H317	100.000	10	HP 13	sensibilisierend	40 ³⁾
Perfluorooctansäure (PFOA) und ihre Salze	PFOA	607-704-00-2	Repr. 1B	H360D	3.000	0,3	HP 10	reproduktions-toxisch	1 ²⁾
PFOA-verwandte Verbindungen	8:2 FTI		Skin Irrit. 2 Eye Irrit. 2 STOT SE 3	H315 H319 H335	200.000	20	HP 4 HP 5	Hautreizung und Augenschädigung Spez. Zielorgan-Toxizität (STOT)/ Aspirationsgefahr	40 ³⁾
Perfluorooctansulfonsäure (PFOS) und ihre Derivate	Perfluorooctansulfonsäure (PFOS)	607-624-00-8	Repr. 1B	H360D	3.000	0,3	HP 10	reproduktions-toxisch	50

1) Überprüfung durch die Europäische Kommission bis spätestens 30.12.2027.

2) gilt für PFOA und ihre Salze bzw. PFHxS und ihre Salze; Überprüfung durch die Europäische Kommission bis spätestens 30.12.2027.

3) gilt für die Summe der PFOA-verwandten Verbindungen bzw. die Summe der PFHxS-verwandten Verbindungen; Überprüfung durch die Europäische Kommission bis spätestens 30.12.2027

Skin. Irrit. 2 = Äzwirkung auf die Haut / Hautreizung, H315 Verursacht Hautreizungen
 Eye Irrit. 2 = schwere Augenschäden / Augenreizung, H319 Verursacht schwere Augenreizungen
 STOT SE 3 = Spez. Zielorgan-Toxizität bei einmaliger Exposition, H335 Kann die Atemwege reizen

Skin Sens. = Sensibilisierung der Atemwege / Haut, H317 Kann allergische Hautreaktionen verursachen
 Repr. 1B = Reproduktionstoxizität, H360D Kann das Kind im Mutterleib schädigen

Tab. 4: Einstufung von Abfällen als gefährlich oder nicht gefährlich nach AVV i. V. m. der AbfRRL – Konzentrationsgrenzen für die Gehalte von „neuen“ persistenten organischen Schadstoffen (POP) im Abfall auf Grundlage insbesondere der **harmonisierten Einstufung von Stoffen/Stoffgruppen nach CLP-VO** sowie Eröffnung des Anwendungsbereichs der POP-Abfall-ÜberwV – Konzentrationsgrenzen nach Anhang IV der EU-POP-VO für bestimmte, nicht gefährliche POP-haltige Abfälle

Regulation on **C**lassification, **L**abelling and **P**ackaging of substances and mixtures / Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von chemischen Stoffen und Gemischen

	Für die Einstufung relevante worst case Klassifikation nach Anhang VI der CLP-VO				Konzentrationsgrenze nach Nr. 2.2.1 der Anlage zur AVV i.V.m. Anhang III der AbfRRL				Konzentrationsgrenze nach Anhang IV der EU-POP-VO [mg/kg OS]
	Relevante Stoffe (worst case)	Index-Nr.	Kodierung der Gefahrenklassen und -kategorien	Kodierung der Gefahrenhinweise	[mg/kg OS]	[%]	Gefahrenrelevante Abfalleigenschaft	Bedeutung der HP Kriterien	
Perfluorhexansulfonsäure (PFHxS) und ihre Salze	K-PFHxS		Skin Irrit. 2 Eye Irrit. 2 STOT SE 3	H315 H319 H335	200.000	20	HP 4 HP 5	Hautreizung und Augenschädigung Spez. Zielorgan-Toxizität (STOT)/ Aspirationsgefahr	1 ²⁾
PFHxS-verwandte Verbindungen	2-(N-Methylperfluorobutylsulfonamido)ethylacrylat		Skin Sens.	H317	100.000	10	HP 13	sensibilisierend	40 ³⁾
Perfluorooctansäure (PFOA) und ihre Salze	PFOA	607-704-00-2	Repr. 1B	H360D	3.000	0,3	HP 10	reproduktions-toxisch	1 ²⁾
PFOA-verwandte Verbindungen	8:2 FTI		Skin Irrit. 2 Eye Irrit. 2 STOT SE 3	H315 H319 H335	200.000	20	HP 4 HP 5	Hautreizung und Augenschädigung Spez. Zielorgan-Toxizität (STOT)/ Aspirationsgefahr	40 ³⁾
Perfluorooctansulfonsäure (PFOS) und ihre Derivate	Perfluorooctansulfonsäure (PFOS)	607-624-00-8	Repr. 1B	H360D	3.000	0,3	HP 10	reproduktions-toxisch	50

1) Überprüfung durch die Europäische Kommission bis spätestens 30.12.2027.
2) gilt für PFOA und ihre Salze bzw. PFHxS und ihre Salze; Überprüfung durch die Europäische Kommission bis spätestens 30.12.2027.
3) gilt für die Summe der PFOA-verwandten Verbindungen bzw. die Summe der PFHxS-verwandten Verbindungen; Überprüfung durch die Europäische Kommission bis spätestens 30.12.2027

Skin. Irrit. 2 = Äzwirkung auf die Haut / Hautreizung, H315 Verursacht Hautreizungen
Eye Irrit. 2 = schwere Augenschäden / Augenreizung, H319 Verursacht schwere Augenreizungen
STOT SE 3 = Spez. Zielorgan-Toxizität bei einmaliger Exposition, H335 Kann die Atemwege reizen

Skin Sens. = Sensibilisierung der Atemwege / Haut, H317 Kann allergische Hautreaktionen verursachen
Repr. 1B = Reproduktionstoxizität, H360D Kann das Kind im Mutterleib schädigen

Tab. 4: Einstufung von Abfällen als gefährlich oder nicht gefährlich nach AVV i. V. m. der AbfRRL – Konzentrationsgrenzen für die Gehalte von „neuen“ persistenten organischen Schadstoffen (POP) im Abfall auf Grundlage insbesondere der **harmonisierten Einstufung von Stoffen/Stoffgruppen nach CLP-VO** sowie Eröffnung des Anwendungsbereichs der POP-Abfall-ÜberwV – Konzentrationsgrenzen nach Anhang IV der EU-POP-VO für bestimmte, nicht gefährliche POP-haltige Abfälle

H-Sätze (Hazard Statements), Teil des GHS-Systems (Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals)

	Für die Einstufung relevante worst case Klassifikation nach Anhang VI der CLP-VO				Konzentrationsgrenze nach Nr. 2.2.1 der Anlage zur AVV i.V.m. Anhang III der AbfRRL				Konzentrationsgrenze nach Anhang IV der EU-POP-VO [mg/kg OS]
	Relevante Stoffe (worst case)	Index-Nr.	Kodierung der Gefahrenklassen und -kategorien	Kodierung der Gefahrenhinweise	[mg/kg OS]	[%]	Gefahrenrelevante Abfalleigenschaft	Bedeutung der HP Kriterien	
Perfluorhexansulfonsäure (PFHxS) und ihre Salze	K-PFHxS		Skin Irrit. 2 Eye Irrit. 2 STOT SE 3	H315 H319 H335	200.000	20	HP 4 HP 5	Hautreizung und Augenschädigung Spez. Zielorgan-Toxizität (STOT)/ Aspirationsgefahr	1 ²⁾
PFHxS-verwandte Verbindungen	2-(N-Methylperfluorobutylsulfonamido)ethylacrylat		Skin Sens.	H317	100.000	10	HP 13	sensibilisierend	40 ³⁾
Perfluorooctansäure (PFOA) und ihre Salze	PFOA	607-704-00-2	Repr. 1B	H360D	3.000	0,3	HP 10	reproduktions-toxisch	1 ²⁾
PFOA-verwandte Verbindungen	8:2 FTI		Skin Irrit. 2 Eye Irrit. 2 STOT SE 3	H315 H319 H335	200.000	20	HP 4 HP 5	Hautreizung und Augenschädigung Spez. Zielorgan-Toxizität (STOT)/ Aspirationsgefahr	40 ³⁾
Perfluorooctansulfonsäure (PFOS) und ihre Derivate	Perfluorooctansulfonsäure (PFOS)	607-624-00-8	Repr. 1B	H360D	3.000	0,3	HP 10	reproduktions-toxisch	50

1) Überprüfung durch die Europäische Kommission bis spätestens 30.12.2027.
2) gilt für PFOA und ihre Salze bzw. PFHxS und ihre Salze; Überprüfung durch die Europäische Kommission bis spätestens 30.12.2027.
3) gilt für die Summe der PFOA-verwandten Verbindungen bzw. die Summe der PFHxS-verwandten Verbindungen; Überprüfung durch die Europäische Kommission bis spätestens 30.12.2027

Skin. Irrit. 2 = Äzwirkung auf die Haut / Hautreizung, **H315 Verursacht Hautreizungen**
Eye Irrit. 2 = schwere Augenschäden / Augenreizung, **H319 Verursacht schwere Augenreizungen**
STOT SE 3 = Spez. Zielorgan-Toxizität bei einmaliger Exposition, **H335 Kann die Atemwege reizen**
Skin Sens. = Sensibilisierung der Atemwege / Haut, **H317 Kann allergische Hautreaktionen verursachen**
Repr. 1B = Reproduktionstoxizität, **H360D Kann das Kind im Mutterleib schädigen**



Leitfaden zur PFAS-Bewertung

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

Stand: 21.02.2022

Polyfluoriert

Tabelle 1: Nach DIN-Normen analysierbare PFAS

Substanz	Abkürzung	Summenformel	CAS-Nr.	Perfluorierte Kettenlänge
Perfluorbutansäure	PFBA	$C_4HO_2F_7$	375-22-4	kurzkettig
Perfluorpentansäure	PFPeA	$C_5HO_2F_9$	2706-90-3	
Perfluorhexansäure	PFHxA	$C_6HO_2F_{11}$	307-24-4	
Perfluorheptansäure	PFHpA	$C_7HO_2F_{13}$	375-85-9	
Perfluoroctansäure	PFOA	$C_8HO_2F_{15}$	335-67-1	langkettig
Perfluornonansäure	PFNA	$C_9HO_2F_{17}$	375-95-1	
Perfluordecansäure	PFDA	$C_{10}HO_2F_{19}$	335-76-2	
Perfluorbutansulfonsäure	PFBS	$C_4HO_3F_9S$	375-73-5	kurzkettig
Perfluorhexansulfonsäure	PFHxS	$C_6HO_3F_{13}S$	355-46-4	langkettig
Perfluorheptansulfonsäure	PFHpS	$C_7HO_3F_{15}S$	357-92-8	
Perfluoroctansulfonsäure	PFOS	$C_8HO_3F_{17}S$	1763-23-1	
6:2-Fluortelomersulfonsäure	6:2 FTSA (H4PFOS)	$C_6H_5O_3F_{13}S$	27619-97-2	
Perfluoroctansulfonamid	PFOSA	$C_8H_2F_{17}NO_2S$	754-91-6	

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

Tabelle 3a: BMUV - Leitfaden zur PFAS-Bewertung

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

	VK = Verwertungskategorie	VK 1 $\triangleq$ Z0 Uneingeschränkter offener Einbau	VK 2* $\triangleq$ Z1 Eingeschränkter offener Einbau in Gebieten mit erhöhten PFAS- Gehalten (* siehe Erläuterungen)	VK 3 $\triangleq$ Z2 Eingeschränkter Einbau in technischen Bau- werken mit definierten Sicherungsmaßnahmen
	W/F = 2 : 1 Eluat	Vorläufige Vorsorgewerte $\triangleq$ GFS		
kurzkettig	Perfluorbutansäure, PFBA	$\leq 10,0$	$\leq 20,0$	≤ 50 Faktor 5
kurzkettig	Perfluorhexansäure, PFHxA	$\leq 6,0$	$\leq 12,0$	≤ 30
langkettig	Perfluoroktansäure, PFOA	$\leq 0,1$	$\leq 0,2$	≤ 1 Faktor 10
langkettig	Perfluornonansäure, PFNA	$\leq 0,06$	$\leq 0,12$	$\leq 0,6$
kurzkettig	Perfluorbutansulfonsäure, PFBS	$\leq 6,0$	$\leq 12,0$	≤ 30
langkettig	Perfluorhexansulfonsäure, PFHxS	$\leq 0,1$	$\leq 0,2$	≤ 1
langkettig	Perfluoroktansulfonsäure, PFOS	$\leq 0,1$	$\leq 0,2$	≤ 1

In BW:

Z0 $\triangleq$ BM-0/0*Z1 $\triangleq$ BM-F0*/2Z2 $\triangleq$ BM-F3

Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit
und Verbraucherschutz

Stand 21.02.2022

* Keine Anwendung VK2 im Raum Baden-Baden, Rastatt, Mannheim
nicht großflächig Siedlungsbeding sondern punktuell erhöhte Gehalte (Erlass 22.08.2022 UM BW)

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

kurzkettig

langkettig

langkettig

langkettig

langkettig

langkettig

	VK 1 $\triangleq$ Z0 Uneingeschränkter offener Einbau Vorläufige Vorsorgewerte $\triangleq$ GOW	VK 2 $\triangleq$ Z1 Eingeschränkter offener Einbau in Gebieten mit erhöhten PFAS- Gehalten (* siehe Erläuterungen)	VK 3 $\triangleq$ Z2 Eingeschränkter Einbau in technischen Bauwer- ken mit definierten Sicherungsmaßnahmen
Perfluorpentansäure, PFPeA	$\leq 3,0$	$\leq 6,0$	≤ 15 Faktor 5
Perfluorheptansäure, PFHpA	$\leq 0,3$	$\leq 0,6$	≤ 3 Faktor 10
Perfluordecansäure, PFDA	$\leq 0,1$	$\leq 0,2$	≤ 1
Perfluorheptansulfonsäure, PFHpS	$\leq 0,3$	$\leq 0,6$	≤ 3
6:2-Fluortelomersulfonsäure, 6:2 FTSA (H4PFOS)	$\leq 0,1$	$\leq 0,2$	≤ 1
Perfluorooctansulfonamid, PFOSA	$\leq 0,1$	$\leq 0,2$	≤ 1
Weitere PFAS	$\leq 0,1$	$\leq 0,2$	≤ 1

In BW:

Z0 $\triangleq$ BM-0/0*Z1 $\triangleq$ BM-F0*/2Z2 $\triangleq$ BM-F3

Stand 21.02.2022



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit
und Verbraucherschutz

* Keine Anwendung VK2 im Raum Baden-Baden, Rastatt, Mannheim
nicht großflächig Siedlungsbeding sondern punktuell erhöhte Gehalte (Erlass 22.08.2022 UM BW)

Novellierung der BBodSchV – Inkrafttreten am 01.08.2023

Stoff	Prüfwert
	[µg/l]
Aldrin	0,03
Summe alkylierte Benzole (BTEX) ¹⁾	20
Benzol	1
Summe Chlorbenzole	2
Chlorethen (Vinylchlorid)	0,5
Summe Chlorphenole	2
Hexachlorbenzol (HCB)	0,1
Summe Kohlenwasserstoffe ²⁾	200
Summe leichtflüchtige Halogenkohlenwasserstoffe (LHKW) ³⁾	20
Summe Tri- und Tetrachlorethen	10
Methyl-tertiär-butylether (MTBE)	10
Summe Nonylphenole (=4-Nonylphenol, verzweigt und Nonylphenol-Isomere)	3
Pentachlorphenol (PCP)	0,1
Phenol	80
Summe aus PCB ₆ und PCB 118	0,01
PAK ₁₅ ⁴⁾	0,2
Naphthalin und Methylnaphthaline	2
2,4-Dinitrotoluol	0,05
2,6-Dinitrotoluol	0,05
2,4,6-Trinitrotoluol (TNT)	0,2
2,2', 4,4', 6,6'-Hexanitrodiphenylamin (Hexyl)	2
1,3,5-Trinitro-hexahydro-1,3,5-triazin (Hexogen)	1
Nitropenta (Pentaerythrityltetranitrat (PETN))	10
Perfluorbutansäure (PFBA)	10
Perfluorhexansäure (PFHxA)	6
Perfluoroktansäure (PFOA)	0,1
Perfluorononansäure (PFNA)	0,06
Perfluorbutansulfonsäure (PFBS)	6
Perfluorhexansulfonsäure (PFHxS)	0,1
Perfluoroktansulfonsäure (PFOS)	0,1

GFS-Werte als
Prüfwerte für den
Wirkungspfad Boden-
Grundwasser

Ehem. TLW = GFS = VK 1 = PW BBodSchV
Wirkungspfad Boden-Grundwasser (neu seit
01.08.2023)

TLW = Trinkwasserleitwert
GFS = Geringfügigkeitsschwellenwert*
VK 1 = Verwertungskategorie 1
PW = Prüfwert BBodSchV

* GFS = Grenze zwischen geringfügigen Veränderungen der chemischen Beschaffenheit des Grundwasser und einer schädlichen Verunreinigung (Gefahrenschwelle)

Anlage 2, Tabelle 3: Prüfwerte für organische Stoffe für den Wirkungspfad Boden-Grundwasser am Ort der Probennahme und im Sickerwasser am Ort der Beurteilung

6.5 Verwertung und Beseitigung auf Deponien

Für **Inertabfalldeponien** nach **Deponieklasse DK 0** können die **Werte der VK 1** in Tabellen 3 a/b (uneingeschränkte offene Verwertung) herangezogen werden.

Bodenmaterial, welches im **Eluat** bei einem **W:F Verhältnis 10:1** einen **Orientierungswert** von **PFAS_{gesamt} < 100 µg/l** (bei **W/F-Verhältnis 2:1 PFAS_{gesamt} < 500 µg/l**, s. Kapitel 4.3) aufweist, kann bei Einhaltung der Zuordnungswerte der DepV **auf Deponien der Klasse DK I abgelagert werden**

Als **PFAS_{gesamt}** ist hier die Summe der in Tabelle 1 aufgeführten **13 Verbindungen nach DIN 38414-14** zu bestimmen.

Leider wurden keine Orientierungswerte für DK II und DK III Deponien festgelegt, was zu unterschiedlichen Interpretationen führt:

- z. B. Rheinland-Pfalz¹ wendet die DK I Orientierungswerte auch auf Deponien der DK II an (d.h. $\geq 500 \mu\text{g/l}$ 2:1 = gefährlicher Abfall)
- z. B. Baden-Württemberg²: Obergrenze für die Ablagerbarkeit auf Deponien DK II & DK III (**Monobereich!**) 50 mg/kg PFOS und für PFOA und PFHxS + Salze/+verwandte Verbindungen $\leq 1/40 \text{ mg/kg}$ (EU POP-VO, Anhang IV)
- z. B. Deponie DK I bis III in NRW: DK I nach BMUV-Leitfaden, DK II & DK III nur Obergrenze der EU-POP-VO Anhang IV $\text{PFOS} \leq 50 \text{ mg/kg}$ (**kein Monobereich**) (seit 2023 für PFOA und PFHxS + Salze/+verwandte Verb. $\leq 1/40 \text{ mg/kg}$)
Mündl. Auskunft: Derzeit werden keine höher belasteten PFAS-Abfälle angenommen

¹ LfU Rhl.-Pf. (2023): Einstufung von Böden, die mit PFAS belastet sind / Abgrenzung gefährlicher / nicht gefährlicher Abfall in Rheinland-Pfalz, Mainz

² Regierungspräsidien Baden-Württemberg (2024), <https://rp.baden-wuerttemberg.de/>

Ablaufschema Deponierung von PFAS-haltigem Bodenaushub

🔦 BW-Erlass:

Im Regelfall ist davon auszugehen, dass es sich bei als Abfall eingestuftem PFAS-haltigem Bodenmaterial um nicht gefährlichen Abfall handelt

→ Erst ab einem PFOS-Gehalt von 3.000 mg/kg handelt es sich um einen gefährlichen Abfall (HP 10).

Zusätzlich sind die Technischen Hinweise zur Einstufung von Abfällen nach ihrer Gefährlichkeit (LAGA) zu berücksichtigen.

Beprobung des PFAS-haltigen Bodenmaterials auf 13 PFAS-Verbindungen entsprechend der DIN-Normen: PFBA, PFPeA, PFHxA, PFHpA, PFOA, PFNA, PFDA, PFBS, PFHxS, PFHpS, PFOS, (H4PFOS) und PFOSA
= $PFAS_{ges}$

Summe $PFAS_{ges} \leq 100 \mu g/L$ bei W/F-Verhältnis 10:1
(bei W/F-Verhältnis 2:1 $PFAS_{ges} \leq 500 \mu g/L$)

Anf. DK I Deponien

Nein → „entsprechend kontaminierte Abfälle“

Eluatwerte Verwertungskategorie (VK) 1 eingehalten?

Verwertungsprüfung verläuft negativ

Ja

Nein

Ablagerung auf DK 0 bzw. DK „-0,5“

Ablagerung auf DK I

Unter Berücksichtigung der Anforderungen des Bundes-Leitfaden (Kapitel 6.5) und den Ergänzungen des BW-Erlasses (v.a. bzgl. der Überwachung des Grundwassers), u.a.

- Sickerwasserreinigung: Es ist sicherzustellen, dass eine geeignete Sickerwasserbehandlung (vor Ort, in einer externen Anlage oder Kombi von beidem) erfolgt, mit der die vorgegebenen Einleitbedingungen (RPK: VKI-Werte) eingehalten und die PFAS nachhaltig aus dem Stoffkreislauf ausgeschleust werden können.
- Zur Minimierung der Entstehung sowie zur effektiven Behandlung von PFAS-haltigem Sickerwasser kann ein Monobereich in Betracht gezogen werden.

Werden die Konzentrationsgrenzen des Anhang IV der POP-VO für die nachfolgend aufgeführten PFAS eingehalten?

PFOS & Derivate	50 mg/kg
PFOA	1 mg/kg (PFOA und ihre Salze), 40 mg/kg Summe der PFOA verwandten Verbindungen
PFHxS	1 mg/kg (PFHxS und ihre Salze), 40 mg/kg Summe der PFHxS-verwandten Verbindungen

Ja

Nein

Ablagerung auf DK II

Ablagerung auf DK III

Ablagerung in permanenten unterirdischen Speichern für gefährliche Abfälle einschließlich Salzbergwerke

Unter Berücksichtigung der Anforderungen des Bundes-Leitfaden (Kapitel 6.5) und den Ergänzungen des BW-Erlasses (v.a. bzgl. des Deponiesickerwassers und der Überwachung des Grundwassers), insbesondere:

- Sickerwasserreinigung: Ist die Ablagerung auf Deponien der Klassen DK II oder DK III vorzunehmen und eine PFAS-Signifikanz aus der Ablagerung im Sickerwasser zu erwarten, ist sicherzustellen, dass eine Sickerwasserbehandlung vor Vermischung mit anderem Abwasser erfolgt, um PFAS aus dem Stoffkreislauf nachhaltig ausschleusen zu können.
- Monobereich erforderlich, damit Sickerwasserbehandlung vor Vermischung möglich ist (-> Bei Bestandsdeponien kaum umzusetzen, da flächiger Einbau)

Zerstörungsgebot!

6.5 Verwertung und Beseitigung auf Deponien (Fortsetzung)

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

Es ist sicherzustellen, dass eine geeignete Sickerwasserbehandlung erfolgt, mit der die vorgegebenen Einleitungsbedingungen eingehalten und die **PFAS nachhaltig aus dem Stoffkreislauf ausgeschleust werden** können. Dies kann unmittelbar durch eine Sickerwasserreinigungsanlage vor Ort, durch Reinigung in einer geeigneten, externen Abwasserreinigungsanlage oder durch eine Kombination beider Möglichkeiten erfolgen. Die PFAS sind danach zu zerstören.

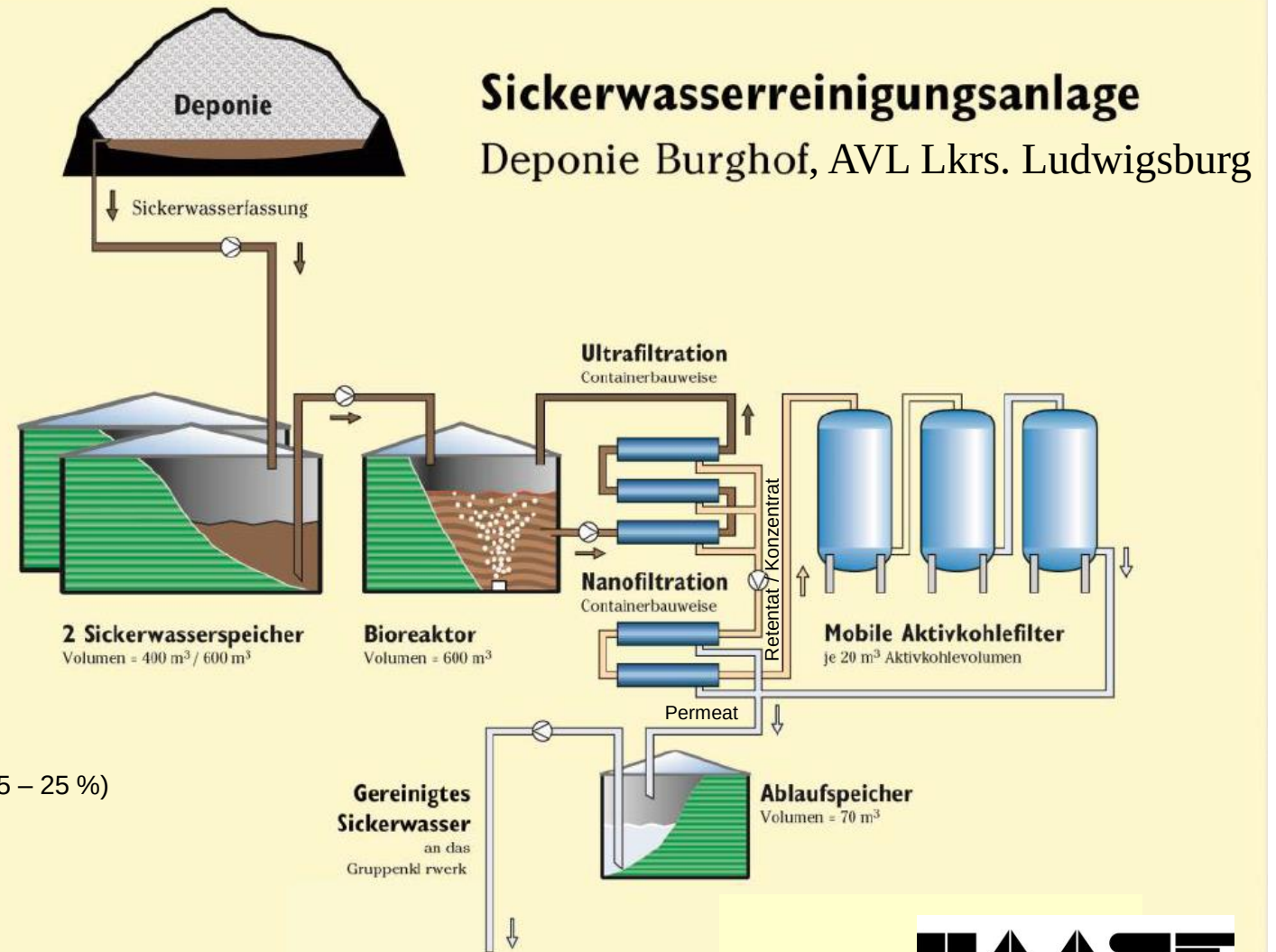
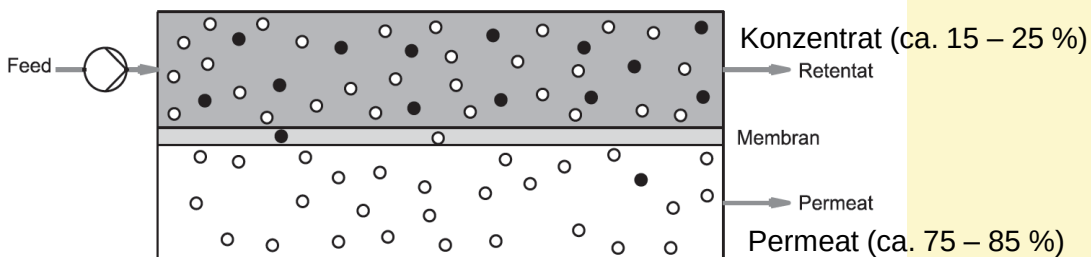
Zur Minimierung der Entstehung sowie zur effektiven Behandlung von PFAS-haltigem Sickerwasser aus der Ablagerung PFAS-verunreinigter Abfälle **kann in Betracht gezogen werden**, das Bodenmaterial in einem **Monobereich mit getrennter Sickerwassererfassung und -ableitung** einzubauen. Der **Einbaubereich**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

Die Ablagerung auf Monobereichen ermöglicht zudem **eine spätere Rückholung** der Böden zur Verwertung, wenn dann geeignete Behandlungsverfahren zur Verfügung stehen.

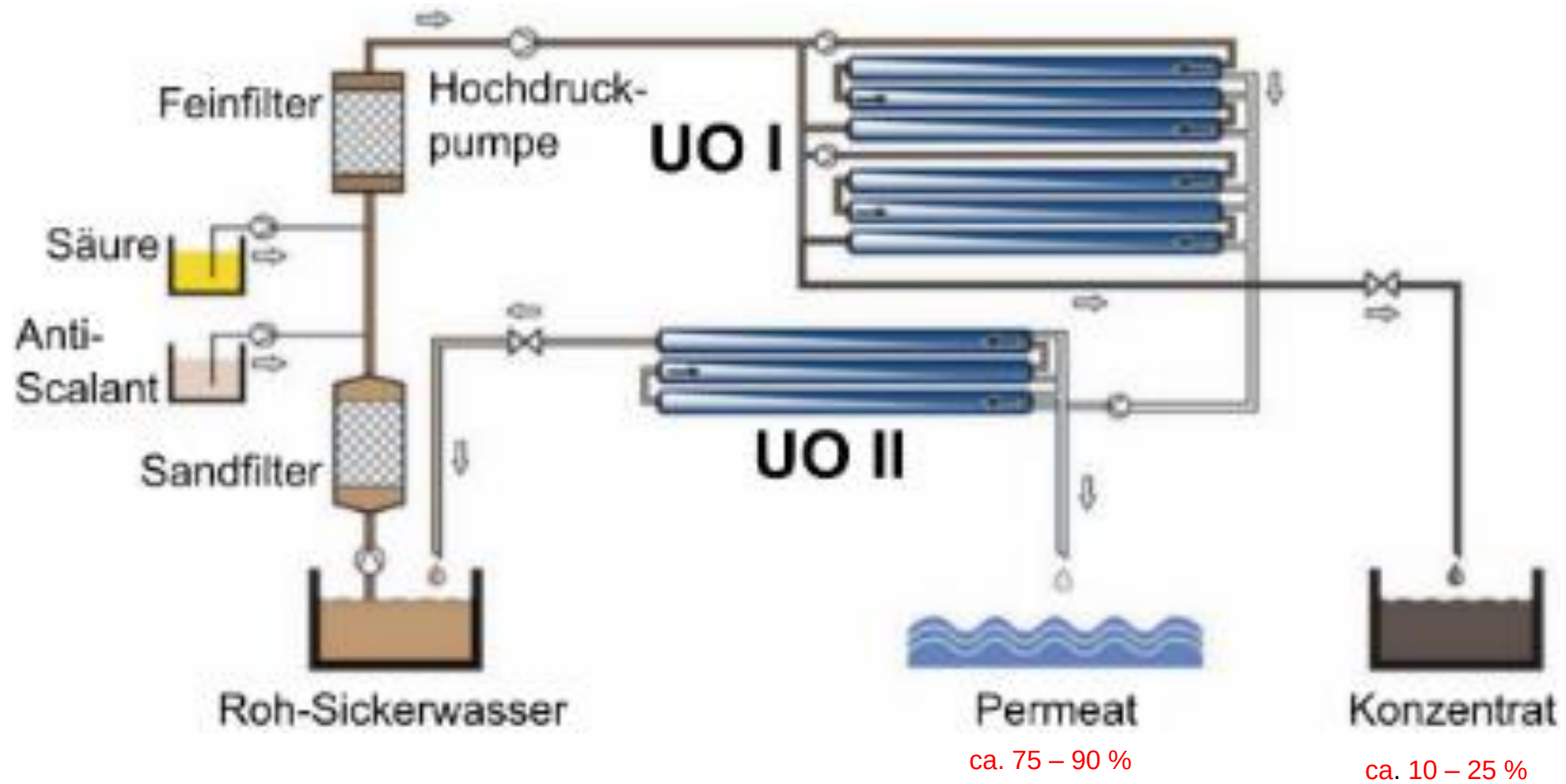
Sickerwasserreinigung mit Nanofiltration und Aktivkohle

Verfahrenstechnik der
SRA Deponie Burghof
(Firma Haase)

Prinzip der Stofftrennung durch Nanofiltration/Ultrafiltration
mit dichten Lösungs-Diffusions-Membranen, verändert nach
Melin & Rautenbach (2007) in HdA Edel et al. 2018

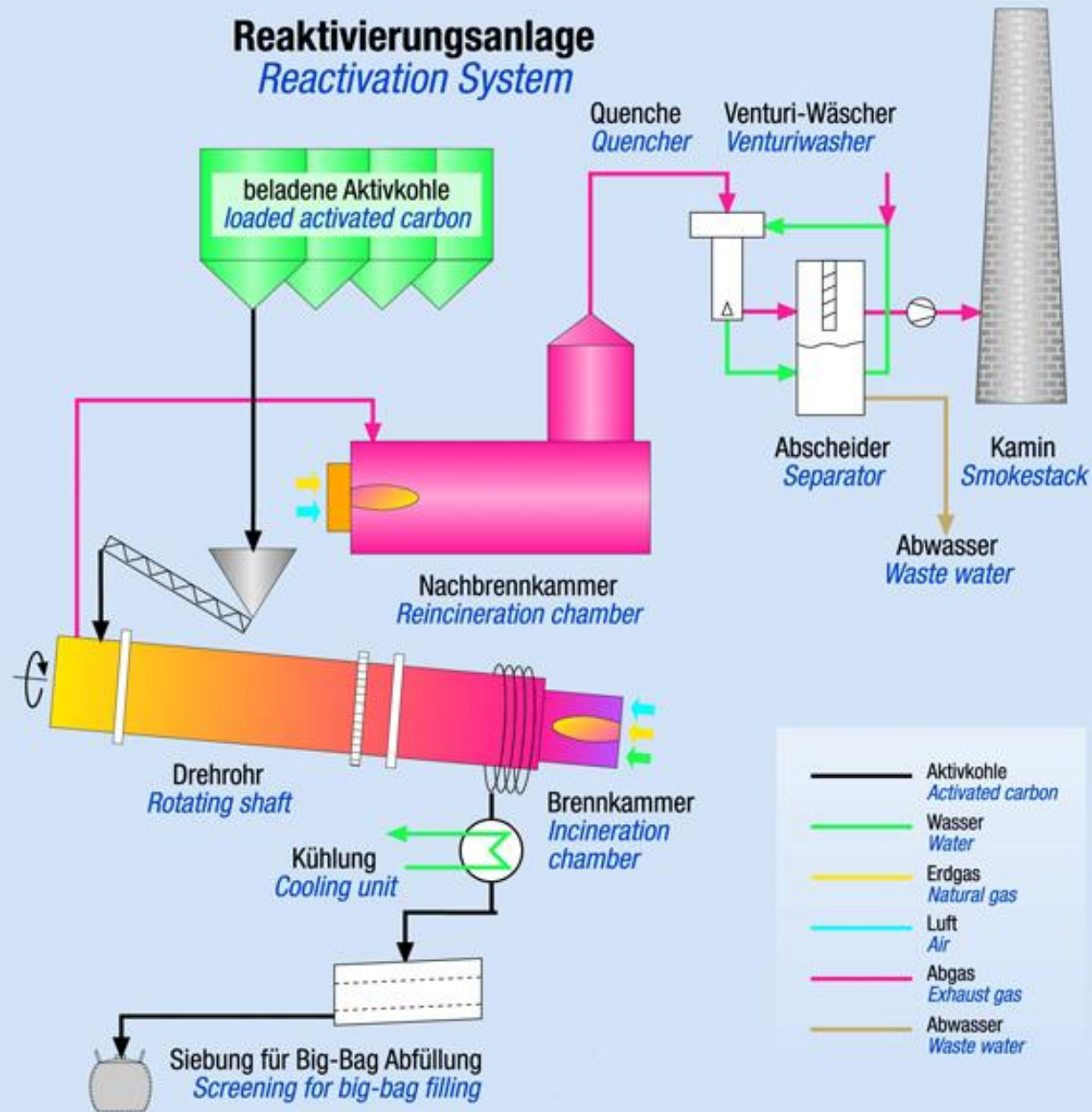


Quelle:
Jedele
(2013)



Anstiscalant zu Verhinderung des Zusetzens (Verblockung) der Membran

Thermische Reaktivierung von beladenen Aktivkohlen

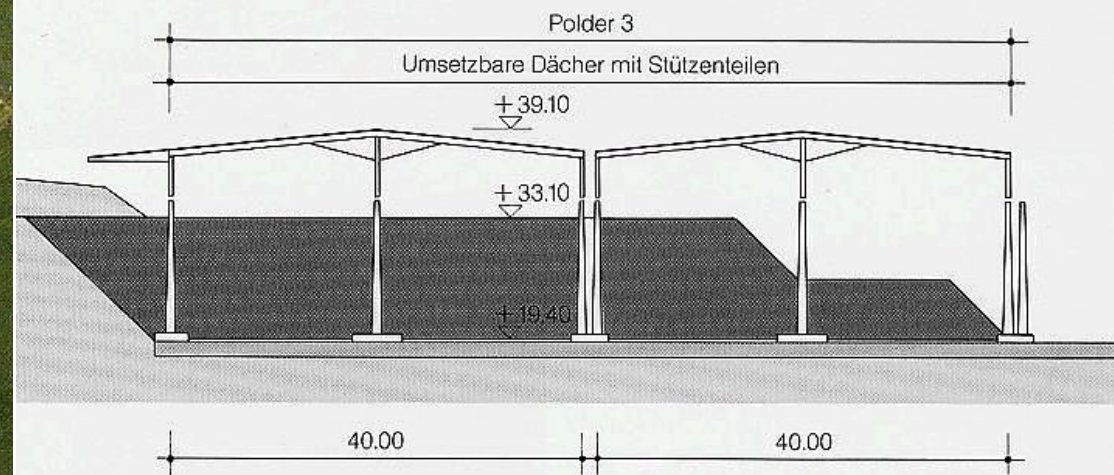
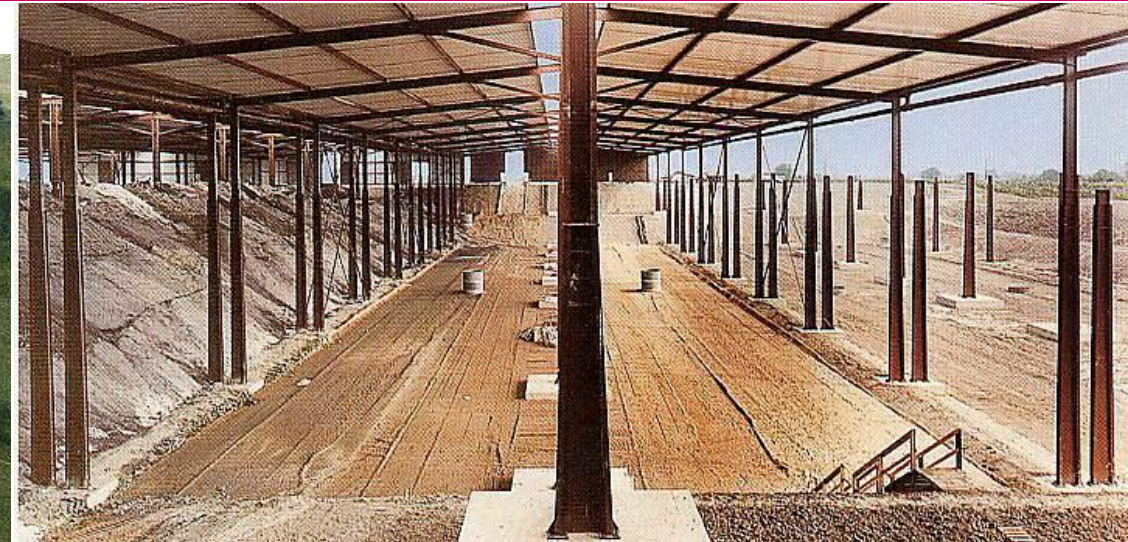


Bei dem **Prozess der thermischen Reaktivierung** werden die gebrauchten und beladenen Aktivkohlen innerhalb des Drehrohrofens in mehreren Temperaturzonen nach und nach stärker erhitzt, bis sie bei der letzten Zone schließlich Temperaturen von über 1.000 °C erreichen.

Während dieser kontinuierlichen Temperaturerhöhung werden die von der gebrauchten Aktivkohle adsorbierten Stoffe wieder abgegeben (desorbiert) und im Anschluss daran erfolgt eine erneute Aktivierung der nun unbeladenen Aktivkohle durch Wasserdampf.

Die während des Reaktivierungsprozesses freigesetzten Schadstoffe werden bei hohen Temperaturen bis 1.200 °C verbrannt und das Rauchgas sorgfältig nachbehandelt.

Ehemalige Sonderabfalldéponie Rondeshagen



Quelle: Gesellschaft zur Beseitigung von Sonderabfällen mbH (GBS) Sonderabfalldéponie Rondeshagen, Groß Weeden, Niedersachsen

Extrembeispiel: Überdachte Deponie (Wirmsthal, Lkr. Bad Kissingen)

→ Minimierung des Sickerwasseranfalls



- Je nach Auslegung des Leitfadens zur PFAS-Bewertung für die Deponieklassen DK II und III werden mittlere bis hohe PFAS-Belastungen auf diesen Deponien zugelassen.
- Da sich PFAS sich de facto nicht abbauen, sondern eher akkumulieren, kann heute niemand vorhersagen, wie die PFAS-Konzentrationen im Sickerwasser zukünftig aussehen werden und welche Grenzwerte für die Einleitung zukünftig gelten
- Insofern werden die **Deponiebetreiber möglicherweise nicht aus der NACHSORGE entlassen!**
- Die Schaffung von Monobereichen mit getrennter Sickerwassererfassung ist bei Bestandsdeponien schwierig
- nach Kenntnis des Verfassers gibt es derzeit in Deutschland keine Monodeponien für PFAS-haltige Abfälle
- PFAS sind sog. „**Problemabfälle**“ – deshalb nehmen viele Deponiebetreiber keine PFAS-haltigen Abfälle an
- Aufgrund des **Makels „Problemabfall“** ist die Standortsuche und Plangenehmigung für neue PFAS-Monodeponien bzw. Monodeponiebereiche schwierig
- Derzeit gibt es nach Ansicht des Verfassers keine aussichtsreichen Konzepte zur Schaffung eines ausreichenden Deponievolumens für PFAS-haltige Abfälle

Grundsätzliche Entsorgungs-, Sicherungs- und Sanierungsmöglichkeiten für PFAS-haltige Abfälle (Böden und Boden-Bauschuttgemische, kommunale/industrielle Klärschlämme, Produktionsabfälle z. B. aus der Galvanik):

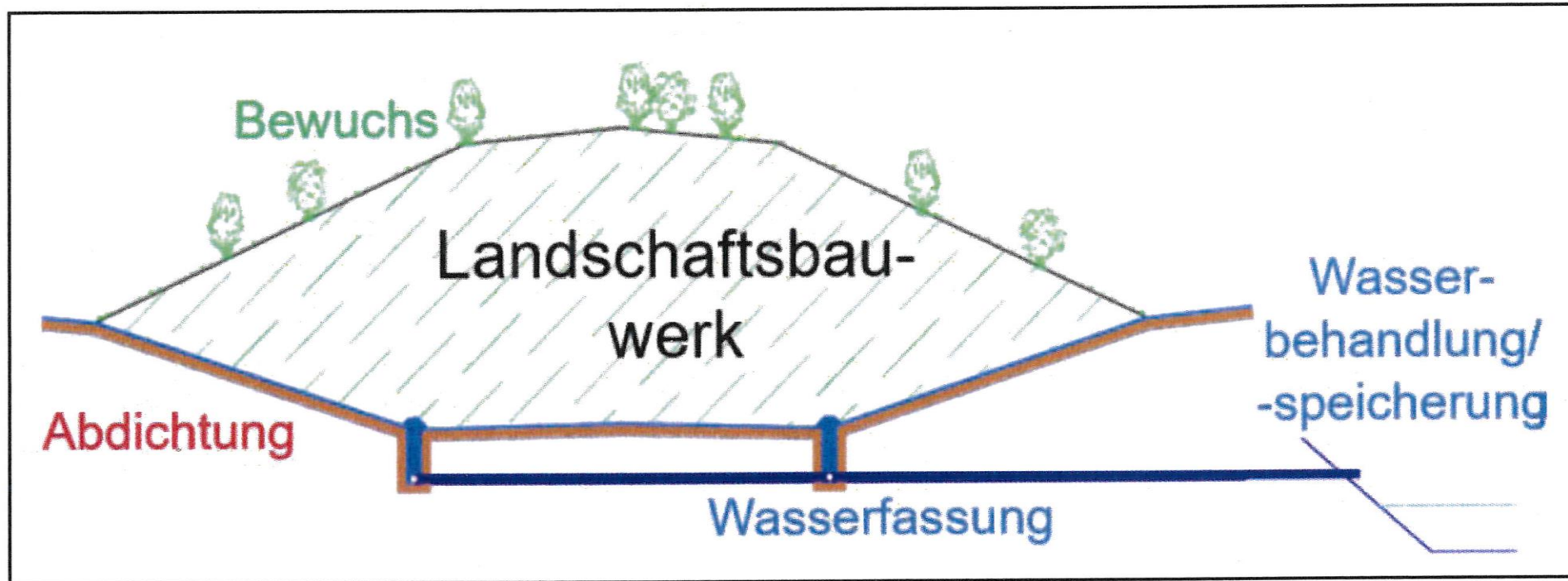
- „Offene“ Verwertung (VK1) und Verwertung in technischen Bauwerken mit definierten technischen Sicherungsmaßnahmen (VK3) (z.B. Böden in Lärm-/Sichtschutzwälle) gem. BMUV-Leitfaden PFAS-Bewertung
- Sonderabfallverbrennungsanlagen, prinzipiell geeignet (vollständige Zerstörung PFAS), abfallartenspezifisch aber eher selten
- Hausmüllverbrennungsanlagen, für die spezielle PFAS-Entsorgung eher ungeeignet (vollständige Zerstörung PFAS?)
- Klärschlammverbrennungsanlagen, für die spezielle PFAS-Entsorgung eher ungeeignet (vollständige Zerstörung PFAS?)
- Thermische Bodenreinigung (=> Sanierungsmaßnahme!) geeignet (vollständige Zerstörung PFAS), nur begrenzte Kapazitäten
- ggf. Zementwerke (z.B. geeigneter PFAS-verunreinigter Boden als Zuschlagstoff für Zement oder PFAS-verunreinigte brennbare z. B. Farben und Lacke), eher begrenzte Kapazitäten
- Bodenwäsche (=> Sanierungsmaßnahme!) nur für nichtbindige Böden geeignet, Entsorgung der entstehenden Outputfraktionen (Schlämme aus der Wasseraufbereitung, Regenerierung/Entsorgung Aktivkohlen)
- Immobilisierung z. B. RemBind® Fa. Zieltek, <https://ziltek.com/>
- Sicherung durch on site Sickerwasserreinigung z. B. Huesker PFAS-Sorptionsmatte Tektoseal® Active PFAS
- Untertagedeponien geeignet, aber nur in speziellen Ausnahmefällen (aufwändige Genehmigungsverfahren, hohe Kosten)
- Bergversatz in Salzbergwerken ist gut geeignet, aber derzeit nur begrenzte Kapazitäten, aufwändige Genehmigungsverfahren
- Beseitigung auf Deponien, spezielle Sickerwassereinigung erforderlich, Bestandsdeponien haben i.d.R. keine Monobereiche mit getrennter Sickerwassererfassung und Reinigung
- Derzeit bundesweit keine Deponie bekannt, die über alle sinnvollen technischen Voraussetzungen verfügt
Monobereiche für PFAS-Abfälle, separate Sickerwassererfassung und geeignete Sickerwasserreinigung, Abdeckmöglichkeiten zur Sickerwasserminimierung, ggf. Rückholbarkeit
- Sicherung als Sanierungsmaßnahme durch Umlagerung und Wiedereinbau belasteter Böden in Gebieten mit derselben schädlichen Bodenveränderung gem. BBodSchV/-G (Bsp. Sicherung durch Überbauung, Gewerbegebiet Bußmatten, Bühl)

Problemlösungen?

PFAS – Alternativen zur Deponierung (für i. W. Bodenmaterial)

- **„Landschaftsbauwerk“ (Sicherungsbauwerk)** am Sanierungsstandort (Beispiel: Ehem. Militärflugplatz Bitburg)
Gesicherte Verwahrung am Standort im Rahmen eines Sanierungsplans (Schadstoff-Sanierungskonzept), konstruktive Auslaugung durch Niederschlagswasser und passive Sickerwasserreinigung, Rückholbarkeit wenn geeignete Sanierungsverfahren verfügbar sind
- **Umlagerung und Sicherung von Bodenmaterial durch Versiegelung im Rahmen der Sanierung.**
Gemäß BBodSchV/BBodSchG kann **Bodenmaterial im Rahmen der Sanierung innerhalb derselben schädlichen Bodenveränderung oder Altlast innerhalb des Gebietes eines für verbindlich erklärten Sanierungsplans auf- oder eingebracht oder umgelagert und durch Versiegelung gesichert werden.**
Beispiel: Gewerbegebiet Bußmatten, Stadt Bühl, großflächige PFAS-Verunreinigung im Raum BAD-Rastatt
- **Unter Tage Versatz in Salzbergwerken** => prinzipiell gute Lösung, aber - kapazitätsmäßig (bundesweit) begrenzt, regional ungleich verteilt (Salzlagerstätten), vergleichsweise hochpreisig, i.d.R. langwierige Genehmigungsverfahren mit Bergbauverträglichkeitsgutachten nach Bergrecht
Beispiele: Grube Teuschenthal, Salzbergwerk Stetten => bergrechtliche Genehmigung! (Rahmenbetriebsplan)
- **Sicherungsverfahren PFAS-belasteter Böden durch Schadstofffilter**
- **Abfallverbrennungsanlagen – Neue Erkenntnisse zur PFAS-Eliminierung?**

Landschaftsbauwerk statt Monodeponie?



Systemskizze Landschaftsbauwerk

DEPONIEForum Stuttgart
Edel & Grüneberg 2019
Züblin & Strabag

Landschaftsbauwerke – ursprünglich Bergehalden – später Elemente der Bodensanierung



Vorschriftensammlung Bergbau der Bezirksregierung Arnsberg. Richtlinie für die Zulassung von Bergehalden im Bereich der Bergaufsicht

4.3.2 Halden sollen großflächig in möglichst natürlichen Formen angelegt werden, um bei gleichzeitiger optimaler Bergeunterbringung eine Eingliederung in die Landschaft zu ermöglichen (Landschaftsbauwerk).

<https://esb.bra.nrw.de/2-technische-richtlinien-und-rundverfuegungen/219-tagebaue-und-halden/bergehalden-richtlinien/richtlinie>

„Diese so genannten *Landschaftsbauwerke* werden immer zahlreicher, z. B. der *TriMonte Park* an der Wiemelhauser- / Wasserstraße in Bochum (ehemals Maschinenfabrik Mönninghoff), am Phoenix-See in Dortmund (ehemals Thyssen-Krupp) oder an der Weidestraße in Hagen (ehemals Varta).

De facto handelt es sich um Deponierung des kontaminierten Bodens auf dem eigenen Gelände“.

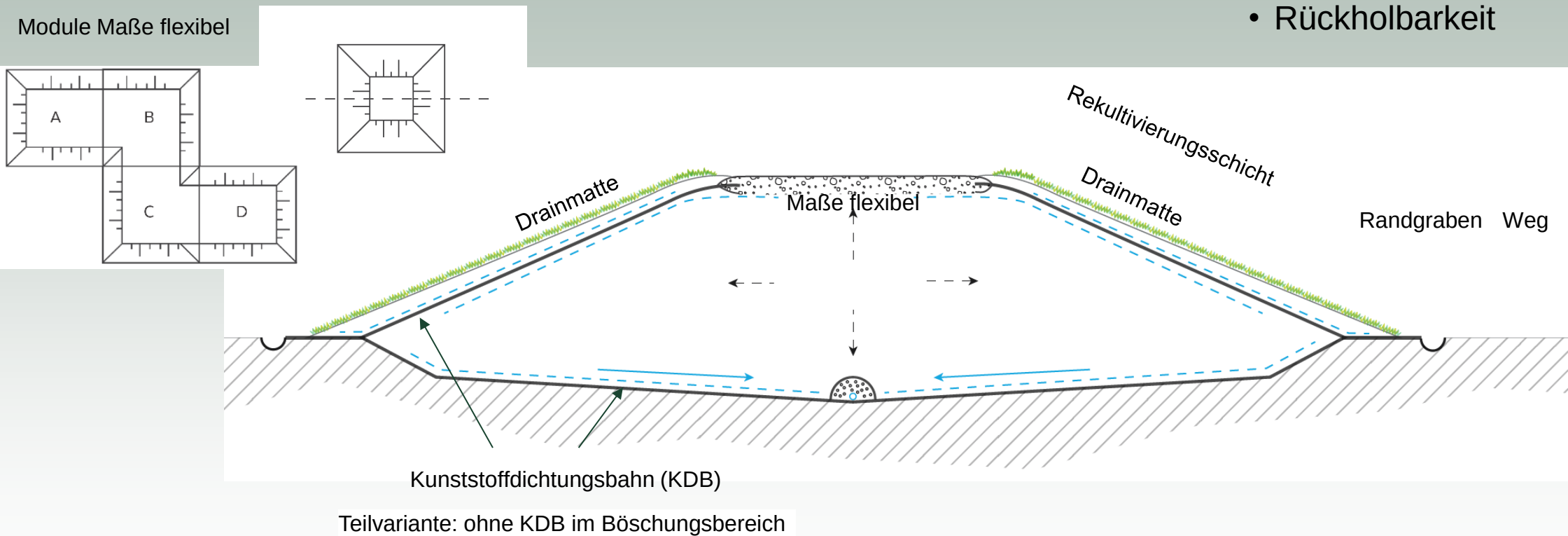
<https://de.wikipedia.org/wiki/Bodensanierung>

"Landschaftsbauwerk" Neuer Kaiserberg am Phoenix-See (ehemals Stahlwerk Thyssen-Krupp, Dortmund)

3 Militärflugplatz Bitburg - PFAS Bodenmanagement - Planung

Landschaftsbauwerk (Sicherungsbauwerk) Prinzipieller Aufbau eines Moduls

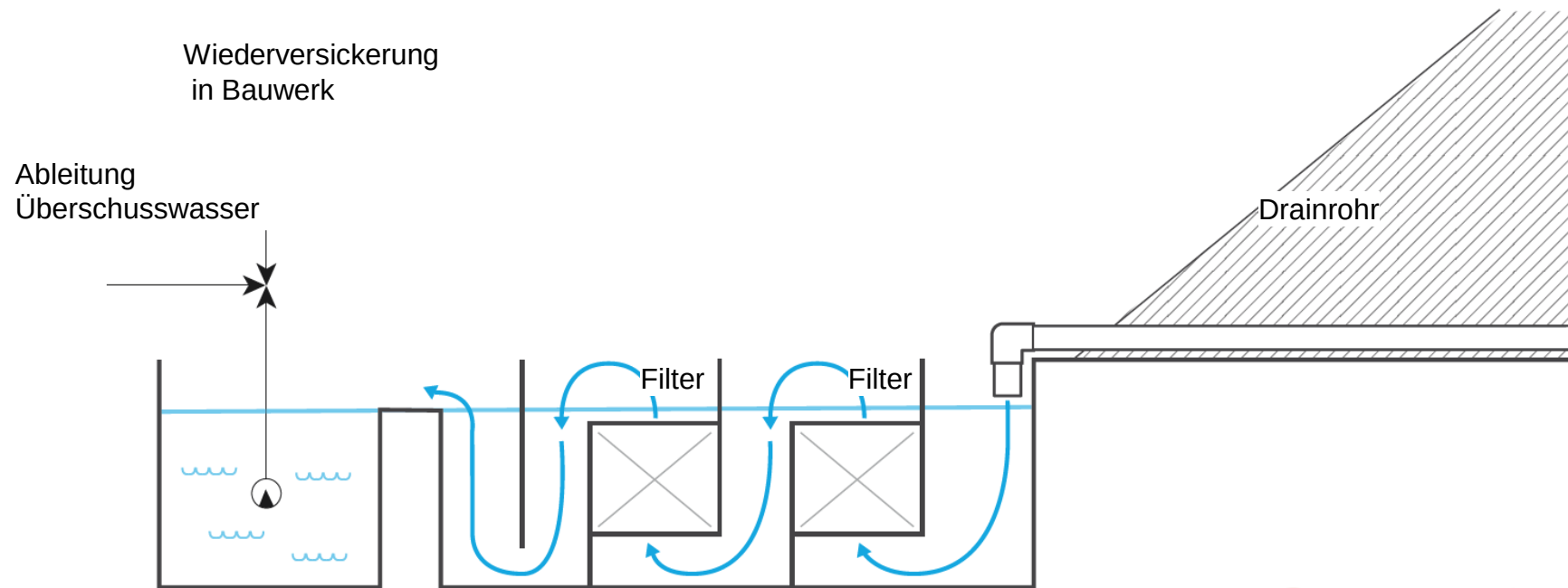
- Sanierungsplan nach BBodSchG
- gesicherte Verwahrung
- zeitlich befristetes Langzeitlager
- Rückholbarkeit



21. Karlsruher Altlastenseminar (2021)

3 Militärflugplatz Bitburg - PFAS Bodenmanagement - Planung

Landschaftsbauwerk (Sicherungsbauwerk) Prinzip passive Abreinigung Ablaufwasser



Welche Verfahren kommen zu PFAS-Eliminierung aus Grund- und Sickerwässern in Frage?

aktualisierter
Kostenvergleich:
 $Q_w = 25 \text{ m}^3/\text{h}$,
 $\Sigma \text{PFAS} = 10 \text{ } \mu\text{g/l}$
Fracht 2 kg/a

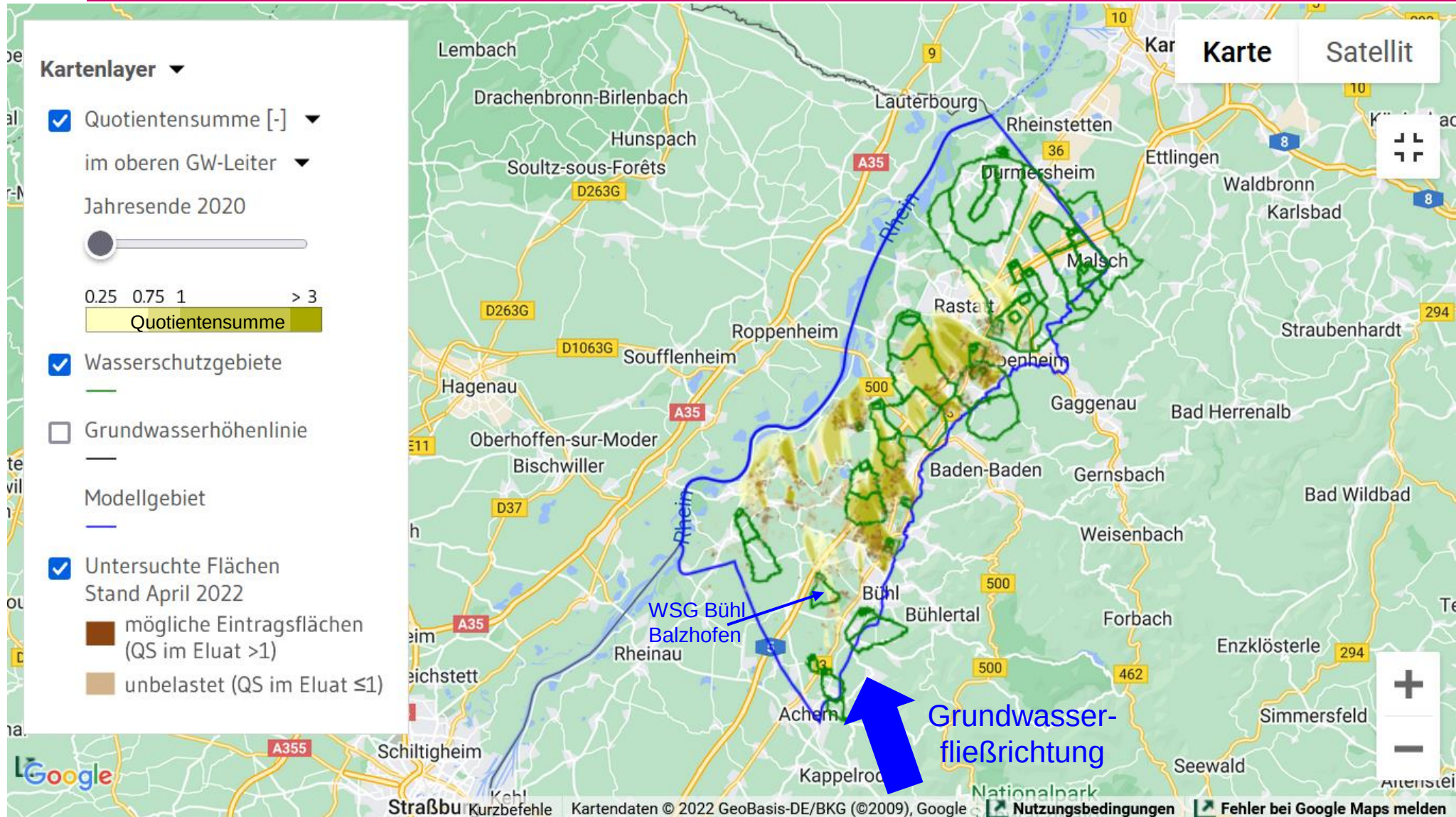
Reinigungs- verfahren	Aktivkohle- adsorption	Ionen- austausch	Flockung	Membran- verfahren
erzielbare Ablaufwerte: $\text{PFC} < 10 \text{ ng/L}$	ja	nein (Nach- reinigung erforderlich)	nein (Nach- reinigung erforder- lich)	ja
Nachreinigung	keine	Aktivkohle- adsorption	Aktivkohle- adsorption	Aktivkohle- adsorption für Retentat
Abfall/Schlamm	kein	Regenerat, IAT-Harz	Schlamm	Retentat
Wieder- verwertung	ja (Reakti- vat)	nein	nein	–
Störstoffe: DOC, Fe^{2+} , Mn^{2+} , u. a.	mit Vorbe- handlung	mit Vorbe- handlung	ohne Vorbe- handlung	mit Vorbe- handlung
Betriebssicherheit	sehr hoch	hoch	hoch	hoch
spezifische Kos- ten*	0,92 €/m ³	1,17 €/m ³	1,31 €/m ³	3,42 €/m ³

* $\Sigma \text{PFC} 1 - 100 \text{ } \mu\text{g/l}$, ohne Vorbehandlung für Störstoffe

Edel, H.-G.
ÖVA/Umweltbundesamt
Schadstoffworkshop
PFAS-Kontaminationen
14. Sept. 2022 Wien

Vergleich praxisrelevanter Verfahren zur PFC-Grundwassersanierung (in HdA: Edel et al. 2018)

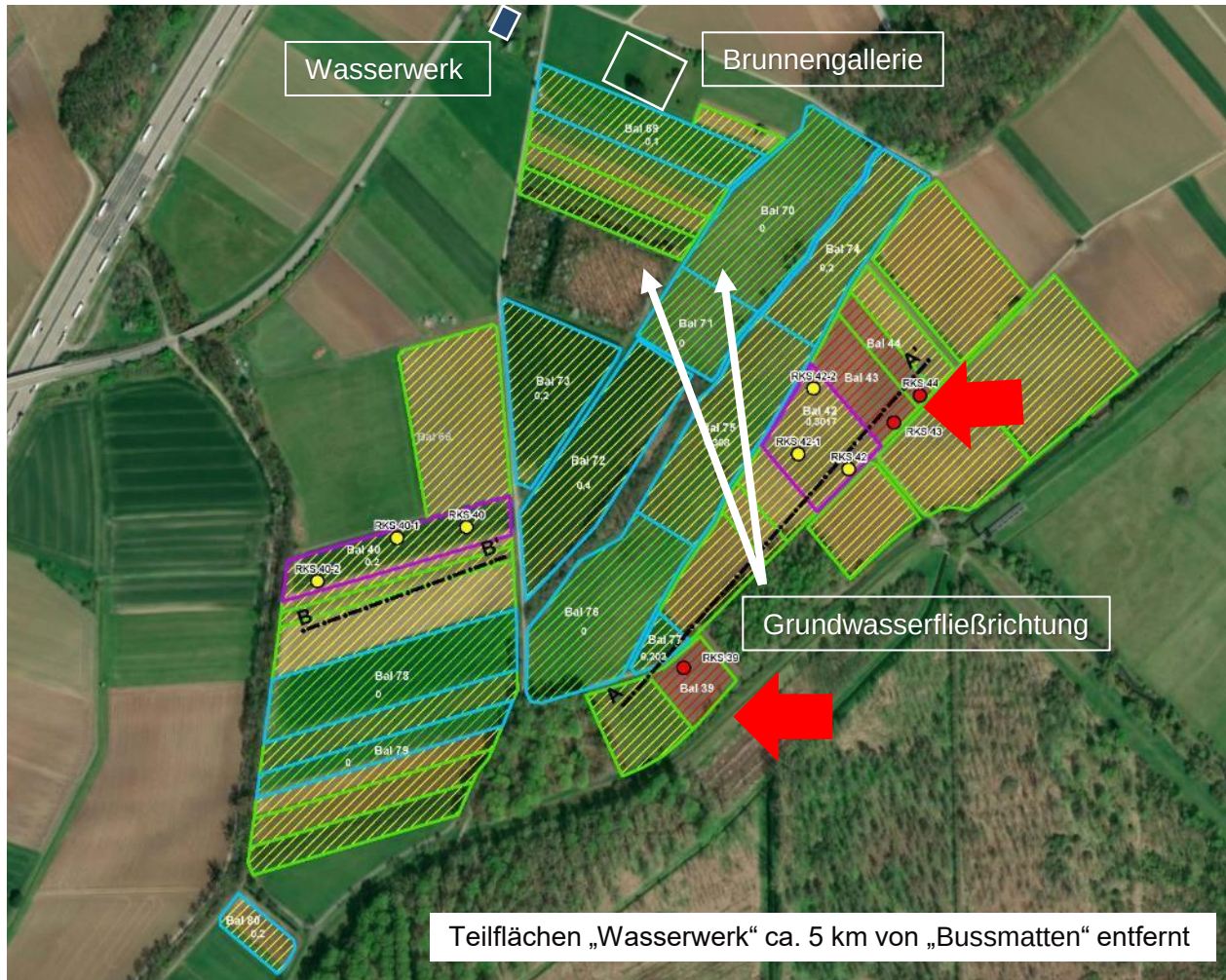
PFAS-Kontaminationen durch Klär- und/oder Papierschlämme



PFAS - Sanierung Wasserwerk Bühl Balzhofen



Wasserwerk Bühl-Balzhofen



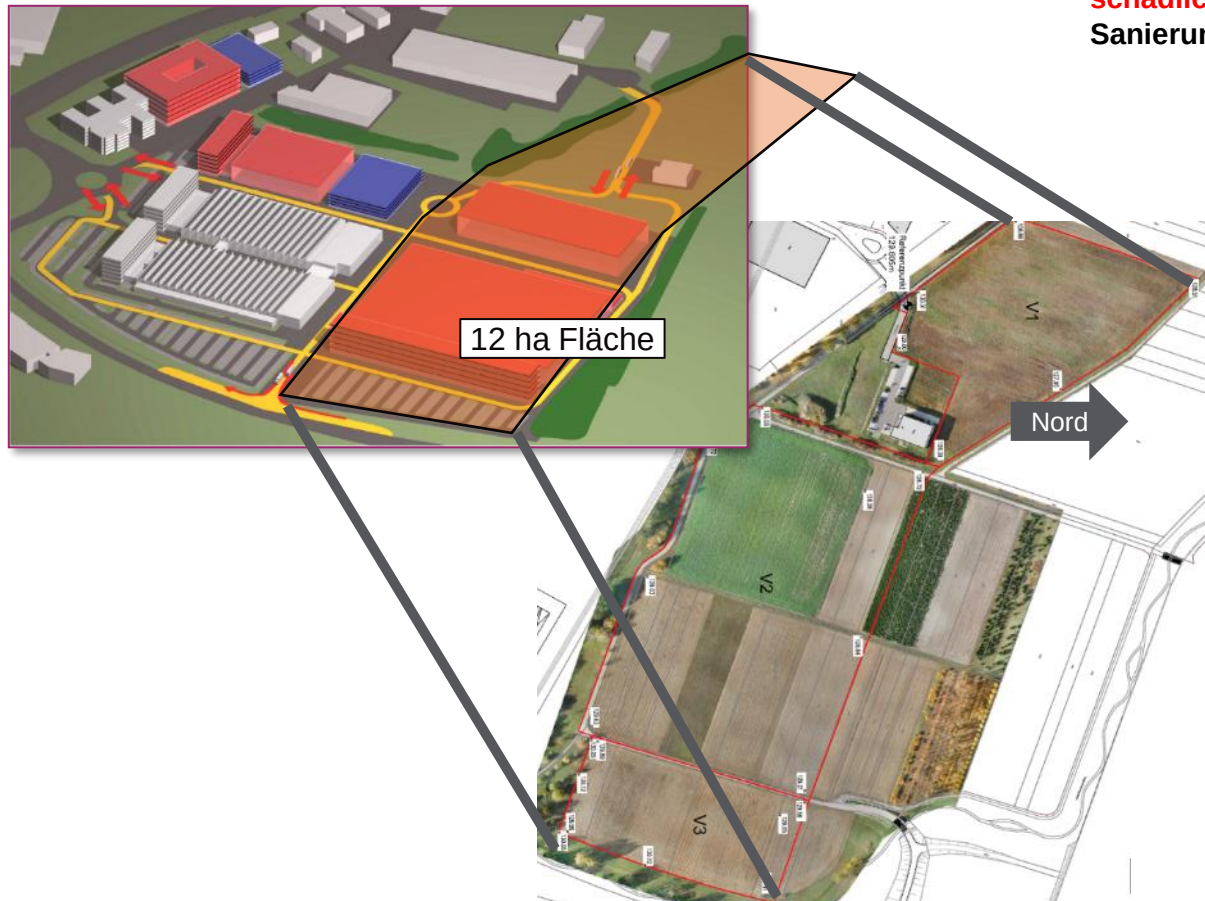
- drei hochbelastete Flächen (rd. 1 - 1,2 ha Ackerfläche) in einem ansonsten gering beeinflussten Grundwasserzustrom eines Wasserwerkes
- Mittelfristig war mit einem Anstieg der PFAS-Konzentrationen zu rechnen
- Aushub der Schadstoffquelle ca. 0,6 – max. 1 m; rund 9.000 cbm)
- Quertransport zu Sanierung „Bussmatten“
- Einbau unter Versiegelung
- Aushubmulden bleiben erhalten (Habitate Kiebitz und Großer Brachvogel)
- Sanierung abgeschlossen - keine belasteten Flächen mehr im Anstrom

Markus Benkeser, Stadt Bühl
Dr. Dominik Greinacher, Rechtsanwälte Graf von Westfalen
Dr. Michael Reinhard, Arcadis Germany GmbH

23. Karlsruher Altlastenseminar 2023

Lösung: Sicherung durch Versiegelung

Teilflächen „Bußmatten“



- Umlagerung und Sicherung von Bodenmaterial durch Versiegelung im Rahmen der Sanierung. Gemäß BBodSchV/BBodSchG kann **Bodenmaterial** im Rahmen der Sanierung **innerhalb derselben schädlichen Bodenveränderung** oder Altlast **innerhalb des Gebietes eines für verbindlich erklärten Sanierungsplans** auf- oder eingebracht oder **umgelagert** und **durch Versiegelung gesichert** werden.

- Erweiterung Gewerbegebiet Bußmatten:
 - Versiegelung der Oberfläche
 - Entspricht einer Sicherung der darunter liegenden Belastungen
- Durch Bebauung ist eine Aufhöhung bis zu 1,5 m erforderlich (rd. 120.000 cbm Volumen, u. a. mit PFAS-belastetem Boden aus weiter entfernten Sanierungsmaßnahmen innerhalb derselben schädlichen Bodenveränderung)

Entscheidung:

**Sanierung durch vollständige Überbauung
= Versiegelung (Sicherung)**

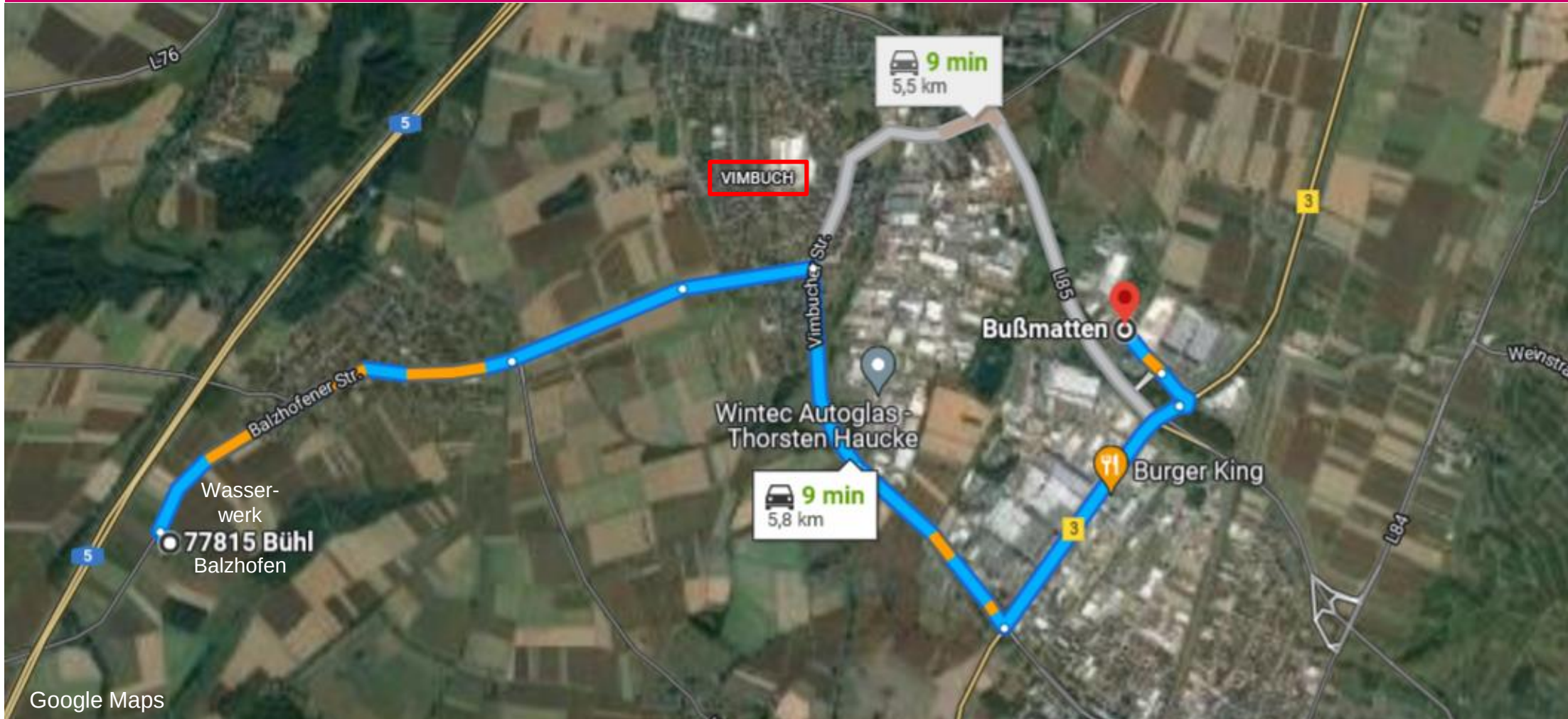


Sanierung läuft seit 2022

Markus Benkeser, Stadt Bühl
Dr. Dominik Greinacher, Rechtsanwälte Graf von Westfalen
Dr. Michael Reinhard, Arcadis Germany GmbH

23. Karlsruher Altlastenseminar 2023

PFAS Sanierungsgebiete Wasserwerk Bühl Balzhofen, Klärwerk Vimbuch, Gewerbegebiet Bußmatten



Reümee: Bereich derselben schädlichen Bodenveränderung oder Altlast – als verbindlich erklärter Sanierungsplan für dieses Gebiet - Umlagerungen in Gebieten mit erhöhten Schadstoffgehalten sind zulässig, insbesondere wenn die Schadstoffsituation am Ort des Aufbringens nicht nachteilig verändert wird – Sicherungsmaßnahmen statt Dekontaminationsmaßnahmen sind zulässig – die Beseitigungspflicht nach KrWG gilt hier nicht, wenn das Wohl der Allgemeinheit nicht beeinträchtigt wird.

§ 6 BBodSchV - Allgemeine Anforderungen an das Auf- oder Einbringen von Materialien auf oder in den Boden

Die §§ 6 bis 8 gelten nicht für das Auf- oder Einbringen von Materialien auf oder in den Boden im Rahmen der Sanierung von schädlichen Bodenveränderungen und Altlasten, soweit die Materialien im Bereich derselben schädlichen Bodenveränderung oder Altlast oder innerhalb des Gebietes eines für verbindlich erklärten Sanierungsplans umgelagert werden.

(4) Eine schädliche Bodenveränderung... ist auch dann nicht zu besorgen, wenn in Gebieten... mit erhöhten Schadstoffgehalten in Böden Bodenmaterial mit erhöhten Schadstoffgehalten innerhalb des Gebietes oder Standortes umgelagert wird und die... im Bundes-Bodenschutzgesetzes genannten Bodenfunktionen nicht zusätzlich beeinträchtigt werden sowie die stoffliche Situation am Ort des Auf- oder Einbringens nicht nachteilig verändert wird. Gebiete und Standorte im Sinne des Satzes 1 können von der zuständigen Behörde im Einzelfall der Bewertung zugrunde gelegt oder allgemein festgelegt werden.

§ 16 BBodSchV – Sanierungsuntersuchung und Sanierungsplanung

(5) Soll Bodenmaterial im Rahmen der Sanierung im Bereich derselben schädlichen Bodenveränderung oder Altlast oder innerhalb des Gebietes eines für verbindlich erklärten Sanierungsplanes, umgelagert werden, sind die Anforderungen nach § 4 (3) des BBodSchG zu erfüllen.

§ 4 BBodSchG - Pflichten zur Gefahrenabwehr

(3) ...Hierzu kommen bei Belastungen durch Schadstoffe neben Dekontaminations- auch Sicherungsmaßnahmen in Betracht, die eine Ausbreitung der Schadstoffe langfristig verhindern.

§ 13 BBodSchG - Sanierungsuntersuchungen und Sanierungsplanung

(5) Soweit entnommenes Bodenmaterial im Bereich der von der Altlastensanierung betroffenen Fläche wieder eingebracht werden soll, gilt § 27 Absatz 1 Satz 1 des KrWG („Beseitigung auf zugelassene Abfallbeseitigungsanlagen“) nicht, wenn durch einen für verbindlich erklärten Sanierungsplan...sichergestellt wird, dass das Wohl der Allgemeinheit nicht beeinträchtigt wird.

Untertageverwertung (UTV) und Untertagebeseitigung in Salzbergwerken in Deutschland



Standorte der Deponien und Versatzbergwerke im salinaren Wirtsgestein in Deutschland

Untertageverwertung (UTV)

- 1 UTV Zielitz
- 2 Werk Werra
UTV Hattorf
UTV Unterbreizbach
UTV Wintershall
- 3 UTV Bernburg
- 4 UTV Sondershausen
- 5 UTV Heilbronn/Kochendorf
- 6 UTV Stetten
- 7 UTV Bleicherode und UTV Sollstedt
- 8 UTV Staßfurt
- 9 UTV Teutschenthal

Untertagedeponie (UTD)

- 1 UTD Zielitz
- 4 UTD Sondershausen
- 5 UTD Heilbronn/Kochendorf
- 10 UTD Herfa-Neurode

- Kalirevier in Deutschland
- Vor-zechsteinzeitliche Ablagerungen
- Zechstein- und Muschelkalk-Salinar
- Rotliegend-Salinar
- Röt-Salinar



Wacker Chemie AG

Stetten/Deutschland

Salz aus dem Salzbergwerk Stetten: unentbehrlich für die Produktion und Garant für freie Straßen

Daten & Fakten zum Standort

Lage: 80 km südlich von Stuttgart, Haigerloch-Stetten, zwischen der A81 und der B27

Größe: 12 km² Werkgelände, Förderrechte auf 40 km²

Tiefe bis zu 150 m, Förderung ca. 500.000 t/a bzw. rund 250.000 m³/a

Produkte: Chemiesalz, Auftausalz, Sole

Einlagerung von Versatzmaterial

Transport unter Tage per zugelassenen LKW (Brandschutz) bis vor die Einbaustelle

Grenzwertliste Salzbergwerk Stetten - Haigerloch [Wacker Chemie AG]		
Parameter	Dimension	Zuordnungswert
organischer Anteil des Trockenrückstandes der Originalsubstanz		
TOC	Masse %	6
EC (Kohlenstoff elementar, sofern TOC > 6% => TOC - EC ≤ 6 %	Masse %	
Glühverlust	Masse %	12
Feststoffkriterien		
Σ 19 PFAS (gemäß PFAS-Leitlinie Bayern)	mg/kg TM	50
PFOS	mg/kg TM	50
PFOA	mg/kg TM	1
PFHxS (Perfluorhexansulfonsäure)	mg/kg TM	1
Arsen	mg/kg TM	450
Blei ¹⁾	mg/kg TM	2500
Cadmium	mg/kg TM	500
Chrom gesamt	mg/kg TM	1000
Chrom VI	mg/kg TM	80
Cobalt	mg/kg TM	500
Eisen	mg/kg TM	500.000
Kupfer ¹⁾	mg/kg TM	2.500
Nickel	mg/kg TM	600
Quecksilber ¹⁾	mg/kg TM	300
Zink ¹⁾	mg/kg TM	2.500
Zinn	mg/kg TM	15.000
Σ HP 14 ¹⁾	%	<0,25 ¹⁾
Einzelstoff HP 14 / H 410 ¹⁾	mg/kg TM	< 2.500 ¹⁾
PAK (EPA) - (OS)	mg/kg TM	200
Benzo-a-pyren	mg/kg TM	50
MKW [C10-C40]	mg/kg TM	1.000
MKW [C10-C20]	mg/kg TM	2.500
Kristallines SiO2 in der Fraktion <125 µm	Masse %	20
Eluatkriterien		
pH-Wert		
elektr. Leitfähigkeit	mS/cm	keine Eluatkriterien!
Alkalische Reserve bei pH>11,5		

„Salzbergwerk Stetten – Wacker Chemie AG“ in Haigerloch
Annahmekriterien für Bodenaushub mit einer PFAS-Belastung

- Eine Analytik gemäß Analyseumfang je Haufwerk und angefangene 500 m³ s. Grenzwertliste
- Probenahme und Probenahmeprotokolle gemäß LAGA PN 98
- Sofern möglich Bilder des Materials.
- Genehmigte Abfallschlüssel: AVV 170504
- Der Bodenaushub stammt aus ehem. landwirtschaftlich genutzten Flächen in den LK Rastatt, LK Karlsruhe, Stadt Baden-Baden sowie Stadt Karlsruhe.
Eine Übernahme von Bodenaushüben aus anderen LK in Ba-Wü sind mit Genehmigung des Bergamtes möglich.
- Die PFAS-Belastung stammt **vorwiegend** aus mit PFAS-belasteten Schlämmen aus der Papierherstellung versetzte Komposte.
Eine Übernahme von Bodenaushüben mit einer anderen PFAS-Genese ist mit Genehmigung des Bergamtes möglich.
- Der Bodenaushub darf keine nicht mineralischen Fremdbestandteile wie z. B. Anteile an Holz, Kunststoff, Folien, Metall, etc. enthalten.
- Der Bodenaushub **muss geruchlich unauffällig** sein
- Eine Kantenlänge < 200 mm ist einzuhalten
- Der Bodenaushub **muss ohne** Strukturverbesserungsmaßnahmen einbaufähig und verdichtbar sein.
- Der Bodenaushub **darf nicht stauben**.
- Bei Abweichungen des deklarierten Materials behalten wir uns die Verweigerung der Annahme vor.
- Ungeeignetes Material wird auf Kosten des Auftraggebers zurückgewiesen.
- Anlieferungen sind nur mit Übernahmescheinen und unter Angabe der Freigabenummer möglich.
- Anmeldungen sind mindestens vier Tage vor Anlieferung bis 12:00 Uhr per E-Mail anzukündigen.
- Wir behalten uns vor, aufgrund schlechter Witterung, baubedingter Behinderungen oder Wegfall / Fertigstellung der Bergversatzmaßnahme, auch nach bereits erfolgter Annahmeerklärung ohne weitere Ankündigung, die Annahme einzustellen oder das Material gänzlich abzulehnen.

REMEX SüdWest GmbH // Wertstraße 12 // 76189 Karlsruhe // Deutschland // T +49 721 205965-0
info.suedwest@remex.de // remex.de

Entsorgungsfachbetrieb nach § 56 KrWG

Bergrechtliche Genehmigung (Rahmenbetriebsplan) für den Versatz von PFAS-belasteten Böden aus Mittelbaden.

Belastung: Gemäß vorliegender Grenzwertliste Transport per speziell für den Untertagetransport zugelassen LKW bis vor die Einbaustelle im Salzbergwerk Stetten.

Preis inkl. Transport ab Großraum Karlsruhe ca. 100 € (netto) (Quelle: REMEX).

Interessante Entsorgungsvariante für PFAS-belastete Böden > VK3 und > BMF-3 aus Mittelbaden.

¹⁾ Zur Bewertung der gefahrenrelevanten Eigenschaft HP 14 "ökotoxisch" sind die Konzentrationen von Stoffen, denen die Gefahrenhinweise H400 + H410 + H411 zuzuordnen sind (z.B. Kohlenwasserstoff und einige Schwermetalle, wie Kupfer, Zink, Quecksilber), zu addieren, sofern deren Einzelkonzentration über dem Berücksichtigungswert von 0,1% bzw. 1.000 mg/kg liegt. Der Abfall ist gefährlich, wenn die Summe der zu berücksichtigenden Stoffe die Schwelle von 0,25 % oder den Wert von 2.500 mg/kg erreicht bzw. überschreitet.



Verbrennungsanlagen zur Beseitigung / zur Verwertung / Bodenbehandlung

Verbrennungsanlagen Bodenbehandlung

Hausmüllverbrennungsanlagen (HMVA), Sonderabfallverbrennungsanlagen (SAV), Klärschlammverbrennungsanlagen, Kraftwerke, Zementwerke.

Nach Literaturangaben sind **Verbrennungs- bzw. Nachverbrennungstemperaturen der Gasphase** von je nach Quelle > 1.100 bis > **1.200** bis > **1.300 °C** (1.200 °C s. LANUV 2011, 1.300 °C s. UBA 2018) für die Zerstörung der PFC erforderlich (auch die Verweilzeiten sind wichtig!).

Hausmüllverbrennungsanlagen (HMVA) mit **Rostfeuerung** erfüllen diese Anforderungen nach Ansicht der Autoren **in der Regel eher nicht (Herstellerangaben zwischen 850 und 1150 °C)**. Die **17. BImSchV** schreibt für Hausmüllverbrennungsanlagen eine Verbrennungstemperatur von **mindestens 850 °C für mindestens zwei Sekunden** nach der letzten Verbrennungsluftzufuhr vor. Für besonders überwachungsbedürftige (**gefährliche**) **Abfälle** (Sonderabfälle) 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 (17. BImSchV 1990).

Das Umweltbundesamt (UBA 2013) gibt für etwa 20 **Monoklärschlammverbrennungsanlagen** 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 bzw. die Abgase bei diesen Temperaturen in einer Nachbrennkammer nachverbrannt werden.

Ob solchermaßen thermisch behandelte Böden bzw. Abfälle noch einer sinnvollen Verwertung zugeführt werden können oder nicht abschließend beseitigt werden müssen ist mehr als fraglich.

Für die thermische Behandlung in einer Sonderabfallverbrennungsanlage werden **stark marktabhängige Preise von ca. 250 – 300 €/t (netto)** genannt (Aug./Sept. 2022).

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.

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.

Studie des KIT: Abfallverbrennung reduziert PFAS-Emissionen nahezu vollständig



In der Verbrennungsanlage BRENDA am KIT testen die Forschenden unter Leitung von Dr. Hans-Joachim Gehrman, ob und in welchem Umfang PFAS über die Abfallverbrennung in die Umwelt gelangen.

Studie des KIT: Abfallverbrennung reduziert PFAS-Emissionen nahezu vollständig

Eine aktuelle Studie des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT), veröffentlicht im Fachmagazin Chemosphere, untersucht die Rolle der Abfallverbrennung bei der Freisetzung von PFAS. Das Forschungsteam unter Leitung von Dr. Hans-Joachim Gehrman hat gemeinsam mit internationalen Partnern analysiert, wie effektiv Fluorpolymere in Verbrennungsanlagen behandelt werden.

Versuche in der Pilotbrennkammer BRENDA am KIT.

Die Versuche fanden in der Pilotbrennkammer BRENDA (Brennkammer mit Dampfkessel) am KIT statt. Ziel war es herauszufinden, unter welchen Verbrennungsbedingungen eine möglichst vollständige Zerstörung der PFAS erreicht werden kann. Die Forscher verwendeten zwei Temperaturstufen: 860 Grad Celsius, entsprechend den europäischen Standards für die Hausmüllverbrennung, und 1.095 Grad Celsius, wie sie bei der Verbrennung von gefährlichem Abfall üblich sind. In beiden Fällen betrug die Mindestverweilzeit der Abgase in der Brennkammer zwei Sekunden.

Die Ergebnisse der Studie sind bemerkenswert. Bei 860 Grad Celsius und einer Verweilzeit von zwei Sekunden wurde ein Abbaugrad von über 99,99 Prozent erreicht. Dies bedeutet, dass die meisten Fluorpolymere unter diesen Bedingungen nahezu vollständig mineralisiert werden konnten. Interessanterweise ergab die Verbrennung bei 1.095 Grad Celsius keinen signifikanten zusätzlichen Abbau. „Eine Verbrennung bei 1 095 Grad Celsius hat den Abbaugrad nicht signifikant erhöht. Das legt nahe, dass eine höhere Temperatur keinen wesentlichen Einfluss auf die Mineralisierung der Fluorpolymere hat“, sagte Gehrman.

Für die Verbrennungstest wurde eine repräsentative Mischung von Fluorpolymeren gewählt, die etwa 80 Prozent der weltweit genutzten Fluorpolymere abdeckt. Dazu gehören unter anderem Polytetrafluorethylen (PTFE), Polyvinylidenfluorid (PVDF), Perfluoralkoxy-Polymere (PFA) und Fluorkautschuk (FKM).

Sicherungsverfahren PFAS-belasteter Böden durch Schadstofffilter

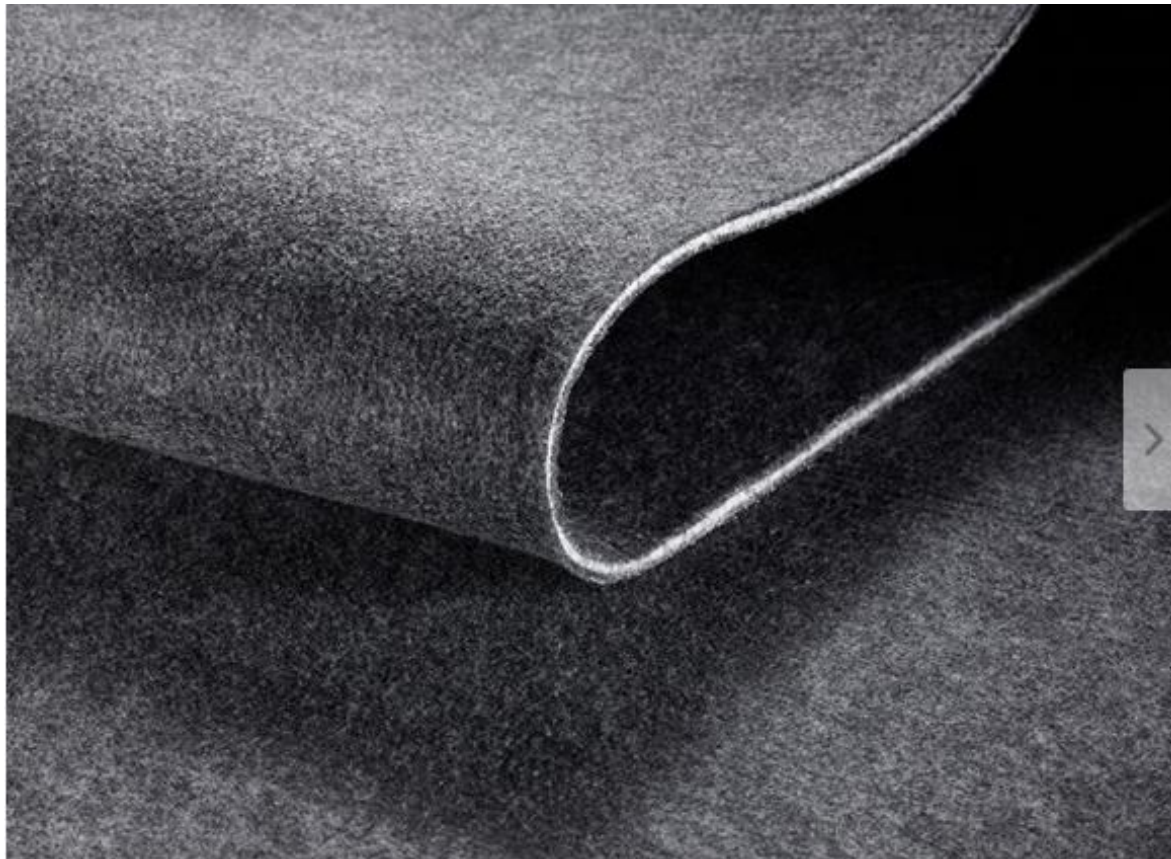


Durchführung von Versuchen zur Schaffung einer Ablagerungsmöglichkeit von PFAS-belastetem Bodenmaterial auf Deponien.

Die AGR mbH plant auf der ZDE die Durchführung von Versuchen zur Schaffung einer Ablagerungsmöglichkeit von PFAS-belastetem Bodenmaterial in Monobereichen auf Deponien.

Auf der ZDE soll die Wirksamkeit einer Sorptionsmatte für die In-situ-Entfernung von PFAS aus migrierendem Sickerwasser nachgewiesen werden. Hierzu soll diese Sorptionsmatte in einem Monobereich, welcher mit PFAS-belastetem Boden beschickt wird, eingebaut werden.

Sicherung durch on site Sickerwasserreinigung durch Schadstofffilter. Einbau von Geotextilien mit Adsorptionsmitteln. On site Adsorption von PFAS mit Aktivkohle und/oder Ionenaustauscherharzen, Organoclay (organophilierter Bentonit)



Huesker PFAS-Sorptionsmatte Tektoseal® Active PFAS

(derzeit noch in der Erprobung, z. B. Probefeld Zentraldeponie Emscherbruch

Vorstellung der Ergebnisse von Detlef Löwe auf dem 35. KA Deponieseminar im Okt. 2025)

Quelle: Dr. Stephan Niewerth,
Huesker Synthetic GmbH

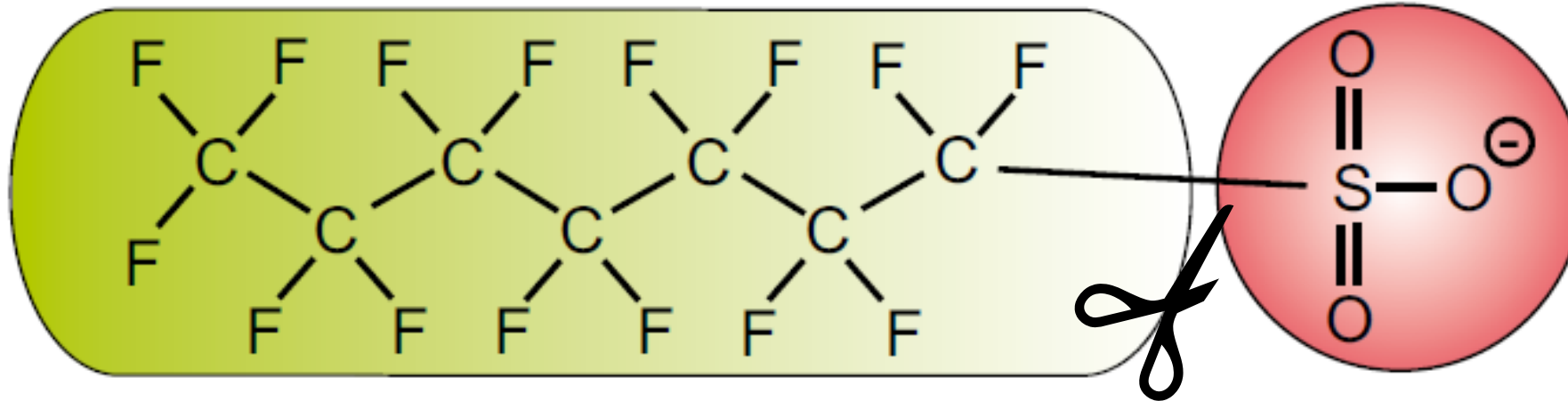
Eine Meldung im SPIEGEL unter der Rubrik Wissenschaft zu PFAS-Verbindungen „Chemiker kriegen unzerstörbare Schadstoffe doch noch klein“ machen Hoffnung, stimmen aber zugleich auch skeptisch. Statt die extrem starken chemischen Bindungen von Kohlenstoff- und Fluoratomen anzugreifen, von denen es in jedem PFAS-Molekül gleich mehrere gibt, zielten die Forschenden auf das, was sie „Achillesferse“ nennen: die polare Kopfgruppe mit ihren Sauerstoff-, Kohlenstoff- oder Schwefelatomen.

Unter „milder Hitze“ von 80 bis 120 Grad Celsius gab dieser Kopf im Lösungsmittel Dimethylsulfoxid (DMSO) in Reaktion mit Natriumhydroxid nach, und dann zerfiel – mehrere Atome auf einmal – auch die Kette aus Fluor und Kohlenstoff. Übrig blieben laut zitiertem Artikel im Wissenschaftsmagazin „Science“ nur harmlose Stoffe, und das mit einer günstigen und einfachen, bisher nur unentdeckten Methode.

In Kooperation mit der University of California in Los Angeles und der chinesischen Universität Tianjin wurden die Experimente für bisher zehn von geschätzt mehr als 12.000 bekannten PFAS-Verbindungen bestätigt.

Eine Meldung im SPIEGEL unter der Rubrik Wissenschaft zu PFAS-Verbindungen „Chemiker kriegen

zugleich auch
skulpturen
anzu
auf d
oder
Unter
Dime
auf e
Wiss



Fluortensid

DMSO + NaOH +
Temp. 80 – 120 °C

atomen
erscheden
Kohlenstoff-

mehrere Atome
ikel im
nd einfachen,

bisher nur unentdeckten Methode.

In Kooperation mit der University of California in Los Angeles und der chinesischen Universität Tianjin wurden die Experimente für bisher zehn von geschätzt mehr als 12.000 bekannten PFAS-Verbindungen bestätigt.

Forever chemicals' Achilles' heel

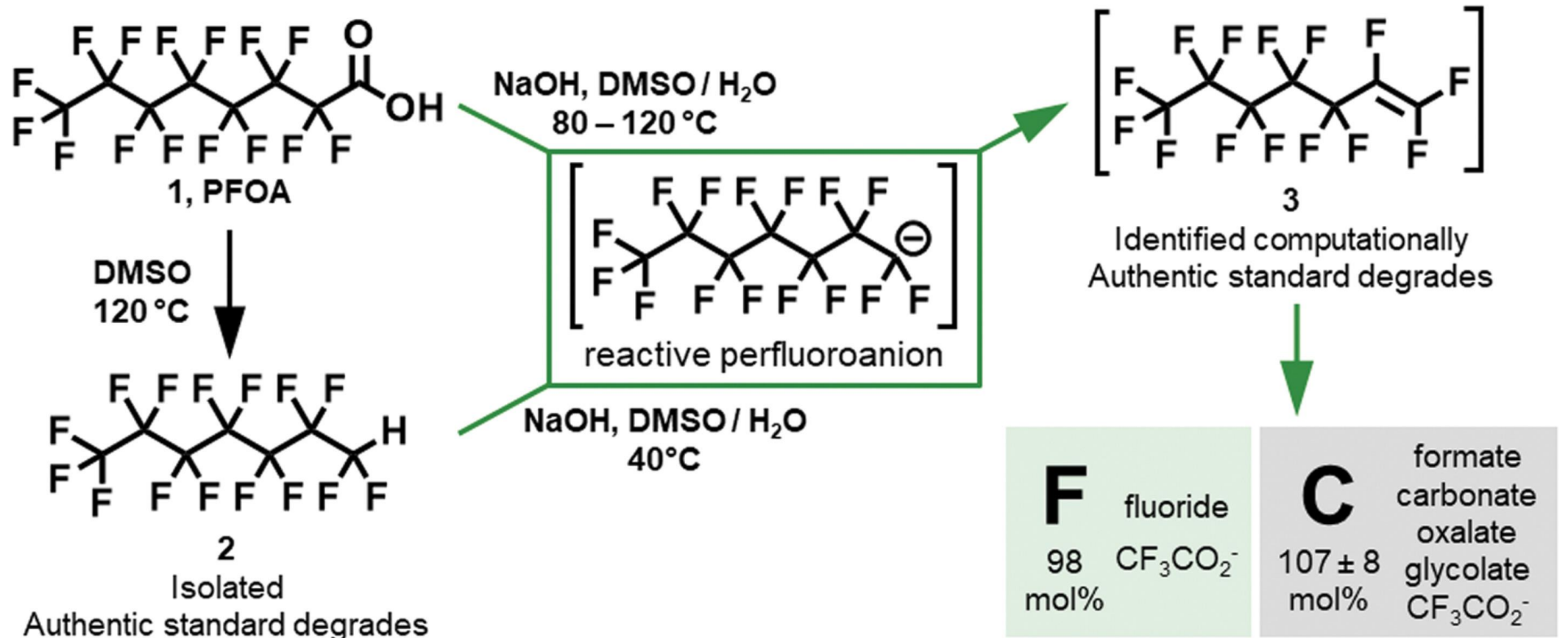


Abb. 1: Übersicht über die in dieser Studie identifizierten Abbaupfade. Durch Erhitzen von PFCAs in polaren aprotischen Lösungsmitteln wie DMSO werden diese zu 1H-Perfluoralkanen decarboxyliert. Führt man diese Reaktion in Gegenwart von NaOH durch, mineralisiert das PFCA zu Fluorid, Natriumtrifluoracetat und nichtfluorierten kohlenstoffhaltigen Produkten. Das 1H-Perfluoralkan durchlief den gleichen Abbauprozess bei noch niedrigeren Temperaturen. Computergestützte Studien identifizierten die entsprechenden Perfluoralkene als wahrscheinliche Zwischenprodukte, und ein authentischer Standard des sieben Kohlenstoffatome umfassenden Perfluoralkens war für den Abbau geeignet.

Oxyle erhält 16 Millionen US-Dollar zur Bekämpfung von „Ewigkeitschemikalien“ in unserem Wasser

Revolutionäre Wasseraufbereitungstechnik zerstört über 99% der PFAS und verändert die Art, wie Industrien mit toxischer Wasserverschmutzung umgehen

Silvan Staufert und Fajer Mushtaq: Die Oxyle-Gründer haben sich dem Kampf gegen Ewigkeitschemikalien verschrieben.
31.01.2025



Revolutionäre Wasseraufbereitungstechnik zerstört über 99% der PFAS und verändert die Art, wie Industrien mit toxischer Wasserverschmutzung umgehen. Das System zerstört die PFAS-Moleküle vollständig. Dabei erreicht die Technologie Eliminierungsraten von über 99% und verbraucht 15-mal weniger Energie als alternative Verfahren. Der dreistufige Prozess kombiniert Schaumfraktionierung, katalytische Zerstörung und maschinelles Lernen, um eine Echtzeitüberwachung und kontinuierliche Optimierung zu gewährleisten. Aufwendige Laboranalysen entfallen – die Ergebnisse sind sofort verfügbar.

Vielen Dank
für Ihre Aufmerksamkeit!

Thomas Egloffstein

icp@icp-ing.de
www.icp-ing.de

Entsorgung von PFAS-haltigen Abfällen

Since 1991

Engineering for a Better Tomorrow

3. PFAS-PerFluSan-Workshop
24. Juni 2025
IHK Karlsruhe, Saal Baden