

Entsorgung von PFAS-haltigen Abfällen

Überblick

29. Dreiländertreffen D-CH-AT - 2025

DI Sonja Löw
Abt V/3, Tel: +43/1/71100-613520; sonja.loew@bmluk.gv.at
13. Oktober 2025

Quelle: BAFU shutterstock



Wo ist mit PFAS- Kontamination zu rechnen?

- **Industrieprozesse:** Galvanik (Cr VI-Nebelunterdrückung), **Papierindustrie** (Beschichtungen), **Textil- und Garnindustrie**, **PFAS-haltige Arbeitskleidung**, **Lederindustrie**, **Fluorpolymerherstellung**, **Elektronikindustrie**, **Chem. Industrie:** PFAS Produktion, Prozesshilfsmittel, **Automobil- u. Luftfahrtindustrie:** PFAS-haltige Hydraulikflüssigkeiten, Beschichtungen, **Abfallbehandlung**, **Wärmepumpen/Energietechnik** (Rotorblätter-Beschichtung, Schmierstoffe), **Pharma-/Kosmetikindustrie**, **Labortechnik**, **Li-Batterienherstellung** (Additive in Elektrolyt-lösungen), **Autowaschanlagen** – Wachse, Polituren
- **Brandschadensfälle:** Löschwasser (Löschschäume mit PFAS)
- **Altlastenflächen:** insbesondere
 - Flächen der Feuerwehr/ Löschübungsflächen, Flughäfen bzw. ehem. Flugplätze, Produktionsstandorte, Seveso-Industrieanlagen mit PFAS-Löscheinrichtungen, Flächen mit historischen Großbrandereignissen
 - **Deponien** (Altlastenstandorte): Sickerwasser/Schlämme aus Sickerwasserbehandlung mit PFAS aus abgelagerten Abfällen
- **Klärschlämme, insb. industrielle Abwasserschlämme**
- **Tunnelausbrüche:** PFAS in Imprägnierungen/Hydrophobierungen, Brandschutzsystemen / Fugenabdichtungen, Löschwasser: Brände /Übungen (AFFF-Schaum), verunreinigte Bauprodukte: PFAS-haltige Additive, Spezialmörtel, Schalöle.
- **Bestimmte Pestizide** (PFAS als Netzmittel) – Abbauprodukt TFA (Trifluoressigsäure) – Missbildungen bei Tieren

PFAS in Feuerlöschern und Löschsystemen – Merkblatt des BMK

Umstellung auf fluorfreie Alternativen. Pauschal keine Aussage über PFAS-Konzentration möglich.

- Schaumlöschmittel, die PFAS enthalten: SN 52725 g; Feuerlöscher, die PFAS enthalten (können): SN 59803 g
- **PFAS-Feuerlöscher und Schäume sind gefährliche Abfälle und POP-Abfälle! Begleitschein.**
- Umfüllvorgänge nur durch dazu berechnigte BEHANDLER für gefährliche Abfälle
- „Erlaubnisfreie Rücknehmer“: KEINE Zerlege-/Umfüllvorgänge zwecks Entsorgung! AUSNAHME: Schaumkartuschen-Feuerlöscher - Entnahme PFAS-Kartusche - Übergabe an BEHANDLER –AUFZEICHNUNGSPFLICHT!
- **EU-VO 2025/1988 zur Änderung von Anhang XVII der REACH-VO Nr. 1907/2006 in Bezug auf PFAS in Feuerlöschschäumen angenommen – PFAS-Verbot in Feuerlöschern mit bestimmten Ausnahmen.**
- Restentleerte PFAS Behälter (d.h. vollkommen entleert, aber nicht gereinigt) – gefährlicher Abfall, POP-Abfall
- Nachweislich nach dem Stand der Technik gereinigte Behältnisse - nicht gefährliche Abfälle. Berücksichtigung des REBOUND EFFEKTS – Näheres: **EU Guidance for transitioning to Fluorine-Free Firefighting Foams** -> https://substitution-perfluores.ineris.fr/sites/substitution-perfluores/files/documents/eu_guidance_for_transitioning_tofluorine-free_firefighting_foams_2025_echa.pdf

ÜBERSICHT BEHANDLUNGSMETHODEN

I. THERMISCHE BEHANDLUNG

II. BODENWASCHANLAGEN

III. CP-BEHANDLUNG VON PFAS-HALTIGEN FLÜSSIGKEITEN /ABWÄSSERN

IV. DEPONIERUNG - Geplante PFAS-Grenzwerte

V. VERWERTUNG VON BODENAUSHUB/BODENAUSHUBVO – Grenzwerte

VI. DÜNGEMITTELVO, KOMPOST-VO (Klärschlamm) - ABFALLVERZEICHNISVO

VII. WEITERE BEHANDLUNGSTECHNOLOGIEN

VII. PFAS-BEHANDLUNGSTECHNOLOGIEN (PILOTANLAGEN ODER IN ENTWICKLUNG)

I. THERMISCHE VERFAHREN

a) PFAS-ABFÄLLE in VERBRENNUNGSANLAGEN für GEFÄHRLICHE ABFÄLLE

- Erhebungen (Fragebögen) durch UBA: ca. **300.000 Feuerlöscher mit PFAS ($\geq 1,2$ t PFAS)** in AT vermutet!
- Löschschäume: ca. **0,5 % Fluorgehalt** bei fertigen Ansatzlösungen bis **max. 8 % Fluor im Konzentrat**.
- **Abfallverbrennungsanlage für gef. Abfälle : Kapazität von ca 2.200 t /Jahr für diese Abfälle**, Normalbetrieb bis zu 1,6 kg Fluor/h im Drehrohr möglich, um Korrosion hintanzuhalten.
- **Übernahme: nur augenscheinlich DRUCKENTLASTETE Feuerlöscher** (tw. Anbohrung bei genehmigten Abfallbehndlern) und Anlieferung in Auffangwannen.
- **Einige Studien gaben bisher für die vollständige Zerstörung der PFAS nötige T >1.000 °C an; andere Literatur $>1200 \rightarrow 1300$ °C; Verweilzeiten sind auch wichtig!**
- **Verbrennung: mind. 99.999% Zerstörung erreicht**
- Studie von Loganathan et al. (2007) Verbrennung von PFAS-belastetem Klärschlamm - Ascheanalyse: **Absenkung aller Verbindungen bis unter Nachweisgrenze nicht möglich!** Einige PFAS-Verbindungen "überleben", fluorierte Zwischenprodukte können entstehen.

I. THERMISCHE VERFAHREN

b) PFAS-ABFÄLLE in ABFALLVERBRENNUNGSANLAGEN (MVAs)

- **STUDIE - Chemosphere 365/2024: PFAS-Verbrennung in Drehrohr-PILOTANLAGE: BRENDA** (BRENnkammer mit Dampfkessel) Rauchgasreinigung - 17. BlmSchV - **FACIT: >99.99% Mineralisierung** (nur 2 Nachkommastellen signifikant)
- **Gemischte Probe von Fluorpolymeren** – Verbrennung unter Bedingungen für **kommunale MVAs (T: 860 °C für 2 s)** und in **Verbrennungsanlage für gef. Abfälle (T: 1095 °C für 2 s)** nach EU-Standards. Neuester Stand der Emissionsprobenahme und Analysemethoden für PFAS (35 langkettige PFAS, TFA, 5 C₁-C₃ PFAS) verwendet.
- Ergebnisse: **nicht nachweisbare bis vernachlässigbare Mengen von PFAS**. Anorganische F als HF nachgewiesen
- **Temperatur hatte keinen erkennbaren Einfluss auf die Mineralisierung von Fluorpolymeren** - Tests bei T: 860 °C gegenüber T: 1095 °C ergaben keine Anzeichen für einen Anstieg der PFAS-Emissionen!
- **Manche Experten gehen weiter von Zerstörungs-T: 1050-1100 °C aus, da hier nur Ergebnisse der PILOTANLAGE!**
- **2025 GROSSVERSUCH in der MVA Schweinfurt (Bayern)** - Untersuchungen PFAS, insb. Erprobung von PFAS-Messvorschriften, Festlegung einheitlicher Mess-/Analysevorgaben. **Ende 2025 - endgültige Aussagen zur Zerstörung von PFAS in MVAs**. Versuche unter finanzieller Beteiligung der österr. Abfallverbrennungsanlagen

I. THERMISCHE VERFAHREN

c) PFAS-ABFÄLLE in ZEMENTWERKEN

- Einsatz von PFAS kontaminiertem Aushubmaterial zum Rohmehl nur in Zementanlagen mit Erfassung aller Abluftströme (auch aus Vorwärmzone) und Nachverbrennung (ansonsten Abschwelen der POPs)
- Flüssige PFAS-Abfälle - Beimischung zu flüssigem Brennstoff (Hauptbrenner) möglich.
- Zementdrehrohröfen: Flammen-T. am Hauptbrenner ca. 2.000 °C, Material-T ca. 1.450 °C, lange Verweilzeiten (min).
- **TA Luft:** „Soweit Abfälle mit relevanten Gehalten an organ. Inhaltsstoffen als Rohstoffe eingesetzt werden, deren Einsatz nicht in der 17. BImSchV geregelt ist, ...soll eine Zugabe über den Ofeneinlauf oder den Calcinator erfolgen“.
- Bei der **Zuführung von PFAS in den Calcinator und Hauptofen** wurden gemäß internat. Studien diese weder in den Emissionen noch PFAS im Zementklinker nachgewiesen
- **Zerstörungseffizienz für PFOS, PFOA und PFHxS bei 99,999 % oder besser.**
- Prozessübliche HF-Konz. in Rauchgasen änderte sich nicht durch PFAS-Abfälle. Derzeitige Annahme: durch die verstärkte Bildung von CaF_2 (wegen Ca-Überschuss in Zementanlagen) PFAS Zerstörung positiv beeinflusst.

I. THERMISCHE VERFAHREN

d) THERMISCHE BODENBEHANDLUNGSANLAGEN

Monobehandlung – zB. Drehrohröfen mit T: 815 °C und Abgas bis zu 1200 °C- PFAS zersetzt; mit fossilen Brennstoffen betrieben. **Entfernungseffizienzen > 99,99 % möglich**; vollständige Oxidation wichtig – sonst toxische F-Verbindungen, HF, kurzkettige PFAS – Leistungsfähige Abgasreinigung nötig! Schlacken /Aschen analysieren für sichere Entsorgung

e) THERMISCHE DESORPTIONSMETHODEN

THERMISCHE DESORPTION: T: 350–550 °C, PFAS nicht zerstört, gehen von Boden in Gasphase - weitere Behandlungsstufen der Gase nötig! HF, perfluorierte Bruchstücke, **völlige Zerstörung von PFAS nicht sicher!** PFAS muss in Nachverbrennung oder in Plasmaeinheit behandelt werden ; PFAS in Reststoffen überwachen!

VAKUUMDESTILLATION: VacuDry®-Verfahren: PFAS-kontaminierter Boden - T: 250–450 °C (Druck: 50–100 mbar), PFAS-Vorstufen + leichtflüchtige Fluortelomeralkohole verdampfen, bei T>400 °C → langkettige PFAS in kürzere F-Bruchstücke gespalten oder desorbiert. PFAS-Abscheidung im Kondensat; nicht-kondensierbare Gase (ev. PFAS-Spuren) - fester Rückstand (z. B. Boden) weitgehend PFAS-frei, aber abhängig von PFAS-Art! Nachbehandlung Kondensat und Gase.

II. BODENWASCHANLAGEN

Monobehandlung (Vermeidung von Querkontaminationen).

PFAS gehen in die **Wasserphase! Spezielle Prozesswasserbehandlung in der CP-Anlage nötig ! „Normale“ Kläranlagen derzeit nicht in der Lage, PFAS zu behandeln.**

Einleitung von Abwässern unter PFAS-Monitoring und Verweis auf TrinkwasserVO.

Anschlussentsorgungswege nach Bodenwaschung:

- **Gereinigte Fraktionen:** Mineralik: Deponierung - sofern zulässig (sonst Thermik)
- **PFAS-angereicherte Fraktionen:** Feinkorn, Grobkorn, Leichtgut: **Thermische Entsorgung!**
- **Aktivkohle:** Thermische Entsorgung od. geeignete Aufbereitungsanlagen

III. CP-BEHANDLUNG FLÜSSIGER PFAS-HALTIGER ABFÄLLE /ABWÄSSER

a) ADSORPTIONSMETHODEN

AKTIVKOHLE-ADSORPTION: Im Trinkwasserbereich **Stand der Technik** zur PFAS-Entfernung
Abtrennung/Fällung von Störstoffen vor der PFAS Behandlung mittels Aktivkohle (pulverförmig oder granuliert) notwendig!

- Langkettige PFAS : mehrstufige Aktivkohle-Adsorptionsanlage
- Kurzkettige PFAS:
 - mehrstufige Aktivkohle-Adsorptionsanlage bzw. spezielle Aktivkohlen mit modifizierten Poren ODER
 - mit spezialisierten Ionenaustauschern (modifizierte Oberflächen) für kurzkettige PFAS ODER
 - Behandlung von PFAS durch zweistufige UmkehrosmoseOftmals kombinierte Anwendung der Verfahren!

III. CP-BEHANDLUNG FLÜSSIGER PFAS-HALTIGER ABFÄLLE /ABWÄSSER

ANDERE MATERIALIEN ZUR ADSORPTION DER PFAS:

- **IONENTAUSSCHER:** Zuverlässige Abscheidung langkettiger PFAS. **Mittels spezieller Ionentauscher können auch kurzkettige PFAS aus Wasser entfernt werden.**
- **TONMINERALE** (z. B. Bentonit, modifizierte Zeolithe)
- **BIOBASIERTE SORBENTIEN:** z. B. modifizierte Cellulose, Chitosan, Lignin, β -Cyclodextrin
- **PERFLUOR-AD®-Verfahren:** Biologisch abbaubare Flüssigkeit auf Ölsäurebasis bindet PFAS als Mikroflocken. Flockenentfernung durch Trennverfahren (z. B. Sedimentation, Filtration) aus dem Wasser - ordnungsgemäße Entsorgung! Hohe Abscheideleistung **für langkettige PFAS**, als Vorbehandlung vor Aktivkohle- oder Ionentauschsystemen zur Effizienzsteigerung
- **KOHLENSTOFF-NANOMATERIALIEN** (z. B. Biochar aus Biomasse)

III. CP-BEHANDLUNG FLÜSSIGER PFAS-HALTIGER ABFÄLLE /ABWÄSSER

„IMMOBILISIERUNG“ – STARKE BINDUNG VON PFAS

- **RemBind®** (<https://rembind.com/products/soil/>), ein **pulverförmiges Sorptionsmittel** (Patent - Mischung aus Aktivkohle, amorphem $\text{Al}(\text{OH})_3$ u. weiteren Adsorptionsmitteln), bindet PFAS stark im Boden (1–3 % Dosierung) binnen 24 h– keine PFAS-Verfrachtung ins Grundwasser
- **Langzeitstabilität** der RemBind-Reaktion wurde mit **Methoden der EPA** getestet, die **Stabilität >100 Jahre** unter unterschiedlichsten Umweltbedingungen (pH-Bereich 2–12, wiederholte Auslaugungen in Batch- u. Säulenszenarien) simulieren. 2018 Böden am Standort der US-Regierung mit RemBind behandelt → **bisher keine signifikante PFAS-Auslaugung**.
- Auch für flüssige Abfälle zur Behandlung.

III. CP-BEHANDLUNG FLÜSSIGER PFAS-HALTIGER ABFÄLLE /ABWÄSSER

- **FILTRATION DURCH MEMBRANEN**
 - **UMKEHROSMOSE (MEMBRANFILTRATION)** für lang- und kurzkettige PFAS zuverlässig.
 - **DRUCKLOSE MEMBRANVERFAHREN: VORWÄRTSOSMOSE** - osmotischer Druckgradient zwischen Abwasserstrom u. konzentrierter „Zuglösung“. **Langkettige PFAS besser zurückgehalten.**
 - **ULTRAFILTRATION (UF) - „SELPAXT-Technologie“** chemisch unterstützte UF - Schwed. Technologie
- **MEMBRANDESTILLATION** - nutzt Temperaturgradienten, um Wasserdampf durch hydrophobe Membran zu leiten. **Langkettige PFAS effektiv zurückgehalten**
- **ABWASSERSTRIPPUNG:**

Abwasser + Luft → intensiv miteinander in Kontakt gebracht - volatile PFAS u.a. Stoffe gehen in **Gasphase** - meist **Teil eines Kombi-Verfahrens**, wenn hohe Hintergrundbelastungen und Aktivkohle ineffektiv - **aber geeignete Abgasbehandlung nötig!**

IV. DEPONIERUNG PFAS-HALTIGER ABFÄLLE - Novelle der DeponieVO

DERZEIT: Bei Deponierung PFAS-belasteter Abfälle prüfen, ob Sickerwasserreinigungsanlage der Deponie imstande ist, PFAS ausreichend zurückzuhalten (zB. Umkehrosmose oder (mehrstufige) Aktivkohlefilter)

PFAS-GESAMTGEHALT untersuchen, ob POP-Abfall; bei Bedarf Precursor /PFOS-Ersatzstoffe (vgl. Altlasten).

Entwurf der DVO Novelle:

- **PFAS-Eluatgrenzwert: 0,001 mg/kg TM (= 1 µg/kg) für MAD + RS-Deponie; Ablagerung auf Kompartiment mit nachweislich geeigneter Sickerwasserbehandlung - Limit: 0,1 mg/kg TM (= 100 µg/kg).**
- **PFAS-Eluatgrenzwert: 0,001 mg/kg TM (= 1 µg/kg) für BAD, IN + BRM-Deponie; BAD zusätzlich: Gesamtgehalt PFAS: 0,002 mg/kg (= 2 µg/kg)**
- Bei Verdacht: **Summe der 20 PFAS-Parameter gemäß EU-Trinkwasserrichtlinie**
- Gesamtgehalt : **DIN 38414-14** (HPLC-MS/MS) Einzelsubstanzen - Summe erst ab Konz. 0,0002 mg/kg TM (=0,2 µg/kg TM);
Eluat: **DIN 38407-42:2011** (HPLC-MS/MS) - Einzelsubstanzen – Summe erst ab 0,0001 mg/kg TM (=0,1 µg/kg TM)

Grenzüberschreitende Verbringung – Einlagerung in UTD-Salzminen: für mineralische, belastete Abfälle

EU-Trinkwasserrichtlinie 2020/2184: Summe von 20 PFAS: 0,1 µg/l – Grenzwert gültig ab 12. Jänner 2026.

V. BODENAUSHUB –VERWERTUNG - NEUE AUSHUBVERORDNUNG

BODENAUSHUB - VERWERTUNG - BAWP 2023: VORGABEN werden übernommen

Klassen A1, A2-G, A2 und BA : Gesamt- PFAS: 0,002 mg/kg (= 2 µg/kg), Eluat: 0,001 mg/kg (= 1 µg/kg)
- Untersuchungen bei Verdacht. **Ab 2026 bei Klasse A2G (Grundwasser) verpflichtende PFAS–Untersuchung**

VI. DÜNGEMITTEL- UND KOMPOST UND NOVELLE ABFALLVERZEICHNISVO

DÜNGEMITTEL-VO (DMV): Summe von PFOA+PFOS –Gesamtgehalt bisher 100 µg /kg TM – NOVELLE:
DEUTLICHE SENKUNG geplant (für 20 PFAS gemäß Trinkwasser RL)

KOMPOST-VO: Für Klärschlämme - **VERWEIS auf PFAS-Grenzwert gemäß Novelle der DMV (für 20 PFAS)**

- Jeder Klärschlamm soll vor 1.Einsatz untersucht werden.
- Jährliche Untersuchung, wenn PFAS-Wert > als die Hälfte des Grenzwertes /kg TM ist!

ABFALLVERZEICHNISVO – NOVELLE: geplanter Eluatwert in HP15

- Gefährlichkeit: PFAS (20 PfAS)-Eluat: 0,1 mg/kg TM (=100µg/kg TM) bzw. Flüssigkeiten: 0,01 mg/l

VII. WEITERE PFAS-BEHANDLUNGSVERFAHREN (nicht abschließend)

- **OZONFRAKTIONIERUNG:**

PFAS gelangen über aufsteigendes Ozon **an Wasseroberfläche**. Resultierende Ströme des Verfahrens sind:

- **hochbelastetes Schaumkonzentrat** (0,5% bis 5% des Zulaufvolumenstroms) – **Entsorgung des PFAS!**
- **gereinigtes Wasser** (entsprechend 95 – 99,5% des Zulaufs), PFAS-Abbau- oder Oxidationsprodukte checken.
- **Abgasstrom, der mit Ozon und ggf. volatilen PFAS belastet ist – NACHBEHANDLUNG !**

für Grund- u. Deponiesickerwässer praxiserprobt, für komplexe Industrieabwässer noch nicht großtechnisch

- **SCHAUMFRAKTIONIERUNG** : ähnlich, aber **Nutzung von Umgebungsluft** insbes. für **Entfernung langkettiger PFAS** (> C6). **Spezielle Additive ermöglichen auch Abscheidung von kurzkettigen PFAS**.
Schaumphase wird abgezogen und entsorgt.

- **ELEKTRO-KOAGULATION (EC)** - durch Gleichstrom gehen Metallionen (typisch: Fe oder Al) von **Opferanoden** in Lösung - Hydroxidbildung adsorbiert PFAS; an Kathode entstehen H₂-Gasblasen → Elektroflotation - bessere Entfernung langkettiger PFAS als kurzkettige → **Entsorgung des PFAS – angereicherten Schlamms**

VII. WEITERE PFAS-BEHANDLUNGSVERFAHREN

„Oxyle-System“ gegen Grundwasser-Kontamination mit PFAS

Oxyle System befindet sich in 24-Fuß-Container (ca. 7,5 m) für den Einsatz vor Ort.

<https://www.chemie.de/news/1185462/oxyle-erhaelt-16-millionen-us-dollar-zur-bekaempfung-von-ewigkeitschemikalien-in-unserem-wasser.html>

Mehrere Einheiten:

- **PFAS-Aufkonzentrierung:** **Schaumfraktionierung und Nanofiltration**
- **Katalytische Zerstörung:** nanoporöser **Katalysator mit piezoelektrischen Eigenschaften** - durch Turbulenz oder mechanische Energie werden ladungstragende Phänomene erzeugt, die **Hydroxylradikale aktivieren**, die die stabilen **chem. Bindungen aufbrechen**. Es entstehen hauptsächlich CO₂, F, SO₄⁻ und Mineralstoffe.
- **Echtzeit-Überwachung von F⁻-Freisetzung und Rest-PFAS**
- Wasseraufbereitung: bis zu **99 % der PFAS zerstört** - *keine peer-reviewte wissenschaftliche Publikationen*

VIII. PFAS-BEHANDLUNGSTECHNOLOGIEN (Pilotanlagen / in Entwicklung)

<i>Technologie</i>	<i>Anwendungsbereich</i>	<i>Vorteile</i>	<i>Herausforderungen / Status</i>
SCWO - Superkritische Wasseroxidation – Wasser-T > 374 °C, Druck > 221 bar	Konzentrate, flüssige Abfälle	Vollständige Mineralisierung Keine Luftemissionen	Hoher technischer Aufwand Pilotanlagen in Betrieb (USA, Japan)
Plasmatechnologie (NTP – non thermal plasma) – Kontakt mit ionisiertem Gas	Wässer mit niedrigen PFAS-Gehalten	Sehr hohe Zerstörungsraten, sequentielle Spaltung	teuer, energiereich (USA, Japan)
Elektrochemische Oxidation (Boron Doped Diamond Electrodes - BDD Elektroden)	Erzeugung reaktiver Sauerstoffspezies für PFAS-Abwasser od. Konzentrate	Gute Zerstörung auch kurzer PFAS	Elektrode teuer! AOX, Bromat- und Perchloratbildung aus Cl, Br im Wasser – Nachbehandlung !
Photokatalyse / UV-Advanced Oxidation Process (AOP) – UV+H ₂ O ₂ +Ozon od. Persulfat	Abwasser, Vorbehandlung	Kombinierbar mit anderen Verfahren	Bildung unerwünschter Nebenprodukte - Nachbehandlung!
Thermokatalyse / Pyrolyse	Feststoffe (z. B. Aktivkohle) oder Klärschlämme	Hohe Temperaturen, ohne Sauerstoff	Noch in Entwicklung / Pilotmaßstab

VIII. PFAS-BEHANDLUNGSTECHNOLOGIEN (Pilotanlagen / in Entwicklung)

<i>Technologie</i>	<i>Anwendungsbereich</i>	<i>Vorteile</i>	<i>Herausforderungen / Status</i>
Sonolyse - hochfrequenter Ultraschall (typisch: 20–1000 kHz)	Wässrige Lösung- Thermische Zerstörung durch Kavitationsblasen- T (>5000 K) und hohem Druck > 1000 bar	Langkettige PFAS (PFOA, PFOS)	Keine Chemikalien, vollständige Zerstörung möglich
Nano-Zero-Valent Iron (nZVI) – Elementare Fe-Partikel 1-100 nm in Kombination mit anderen Methoden (z. B. Persulfat oder H ₂ O ₂ +UV) → Radikalbildung zur PFAS-Oxidation	In situ einsetzbar (z. B. bei kontaminierten Böden).		Bildung von toxischen Nebenprodukten (kurzkettige PFAS, F-Ionen).
Photo-Fenton-Reaktion: Eisen(II) + H ₂ O ₂ + UV-Licht → Bildung von •OH Radikalen	Abbau bei kurzkettigen PFAS oder Vorstufen (Precursoren)		Bildung von CO ₂ , HF, sowie ggf. PFAS-Zwischenprodukten
Pilzenzyme	Biokatalytische Oxidation durch Peroxidasen/Laccasen	Vorläufer, F-Telomeralkohole, evtl. kurzkettige PFAS	Umweltfreundlich, bestimmter pH, T und Co-Substrate erforderlich – LANGSAM !

VIII. PFAS-BEHANDLUNGSTECHNOLOGIEN (Pilotanlagen / in Entwicklung)

Technologie	Anwendungsbereich	Vorteile	Herausforderungen / Status
Elektronenstrahl (Radiolyse + Radikalreaktionen)	hochenergetische Elektronen (meist 0,5–10 MeV) durch e^- - Beschleuniger in wässrige PFAS-Lösungen geleitet	Sehr schnell	hohe Investitionskosten!
Chemische Fluorentfernung („Nucleophilic Defluorination“ od. „Alkaline Thermal Defluorination“)	Perfluoralkylcarbonsäuren (PFCAs) mit NaOH in Dimethylsulfoxid <u>DMSO</u> zu anorgan F innerhalb 24 h	Abbau auch bei verzweigten Perfluoralkylethercarbonsäuren	T: 120–180 °C; außer PFCAs keine anderen PFAS damit behandelbar . Höhere Anfangskonz. nötig (zB angereichert in Aktivkohlen).
GPCR - Gasphasen-Chemische Reduktion	Flüssig, gasförmige od. feste Abfälle - in Gasphase bei T: 600 - 900 °C - Reduktion mit H ₂ od. Synthesegas (Reduktionsmittel) Kein O ₂ !	Zerstörungsrate: > 99,99 % für viele PFAS. HF entsteht!	C wird zu CH ₄ , CO, CO ₂ , teuer; <u>Abgasnachreinigung wegen HF!</u>
Sorptionsmatte Tektoseal® Active PFAS (Fa. Huesker)	In Situ Entfernung von PFAS aus Sickerwasser aus Deponiemonobereichen für PFAS-kontaminierte Böden	Kombi aus selektiven Anionentauschern + ausgewählter Aktivkohle - höhere Schadstoffaufnahmekapazität als bisherige Alternativen	In Erprobung – Probefeld Zentraldeponie Emscherbruch DE

Danke für Ihre Aufmerksamkeit!

LITERATUR

- <https://www.bmluk.gv.at/service/publikationen/klima-und-umwelt/pfas-feuerloescher-und-pfas-schaummittel-aus-feuerloeschern.html>
- https://altlasten.gv.at/Ueber_Altlasten/fachthemen/pfas-strategie-altlasten.html - PFAS Strategie im Rahmen der Vollziehung des ALSAG
- <https://www.bmluk.gv.at/service/publikationen/klima-und-umwelt/pfas-aktionsplan.html> - PFAS Aktionsplan
- <https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/rep0820.pdf> - PFAS Report 2022
- <https://www.umweltbundesamt.at/umweltthemen/stoffradar/pfas/feuerloeschschaume> - Feuerlöschschäume
- <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653524023014> - Mineralization of fluoropolymers from combustion in a pilot plant under representative european municipal and hazardous waste combustor conditions
- <https://www.science.org/doi/10.1126/science.abm8868>
- <https://www.thermalrs.com/perfluorad-frequently-asked-questions-faqs/>
- <https://pyreg.com/pyrolysis-not-only-eliminates-pfas-from-sewage-sludge-but-also-absorbs-existent-pfas/>
- <https://www.igb.fraunhofer.de/de/presse-medien/presseinformationen/2023/plasma-gegen-toxische-pfas-chemikalien.html>
- <https://echa.europa.eu/documents/10162/071a3boe-afab-8775-9323-426268d0dfoe>
- <https://www.chemietechnik.de/sicherheit-umwelt/oxyle-nimmt-pfas-zerstoerungssystem-in-betrieb-533.html>
- <https://selpaxt.com/insights/how-selpaxt-effectively-removes-pfas-from-water>
- https://perfluores.substitution.fr/sites/substitution-perfluores/files/documents/eu_guidance_for_transitioning_tofluorine-free_firefighting_foams_2025_echa.pdf
- https://www.huesker.de/fileadmin/media/Brochures/DE/PB_Tektoseal_Active_DE.pdf