

Immobilisierung von PFAS-belasteten Böden – Ergebnisse aus Laborversuchen mit verschiedenen Wirkstoffen

2. Workshop des Netzwerks PerFluSan

Karlsruhe, 18. Juni 2024

Andrew Rolfe / Sigmar Stiasny / Francisco Barajas

Gliederung:

- **Hintergrund**
- **Ziele der Immobilisierungsversuche**
- **Methodik**
- **Ergebnisse**
- **Diskussion, Schlussfolgerungen & Ausblick**
- **Fragen**

Hintergrund

Hintergrund

- Die Immobilisierungsversuche wurden an Bodenproben durchgeführt, welche mit per- und polyfluorierten Substanzen (PFAS) verunreinigt sind.
- Standort mit einer militärischen Nutzung in Deutschland.
- Die PFAS gelangten in den Untergrund bei Feuerlöschübungen mit PFAS-haltigen Feuerlöschschäumen auf Teilen des Standorts.
- Großflächige ($> 24.000 \text{ m}^2$) Belastung des Oberbodens mit überwiegend PFOS (bis 90%).



Ziele der Boden-Immobilisierungsversuche

Ziele der Boden-Immobilisierungsversuche

- Auswahl einer Reihe von kommerziell verfügbaren Wirkstoffen auf Grundlage der Standortbedingungen, dem Schadstoffspektrum und Erfahrungswerten von anderen Studien.
- Bewertung der Eignung ausgewählter Wirkstoffe, die Elution von PFAS im Boden zu reduzieren.
- Bewertung, ob die Bodenimmobilisierung ein geeignetes und wirtschaftliches Sanierungs- / Sicherungsverfahren für den PFAS-belasteten Bereich am Standort darstellt.
- Bewertung, ob bei der Bodenimmobilisierung die Verwertungskategorie VK 2 (z. B. Wiedereinbau) eingehalten werden.

Methodik

Methodik

Folgende (4) Bodenproben wurden entnommen:

- eine Probe aus dem Oberboden (TOC: 5,2 mg/l) „**BS01 0-0,2 m**“: PFAS: 7.024 µg/l
- drei Proben aus den darunter anstehenden sandigen Tonen (TOC: 1,4 – 2,1 mg/l) „**GWM78B 0,2-1,0 m**“, „**GWM78B 1,0-2,0 m**“, and „**GWM78A 0,2-1,0 m**“: PFAS: 32 - 320 µg/l



Methodik – Auswahl der Wirkstoffe

➤ Pflanzenkohle (Biochar, BC):

- Wird mittels Pyrolyse (z. B. bei Temperaturen >500 °C) hergestellt und ist sehr stabil, da fast die gesamte organische Masse entfernt wird und lediglich der stabile Kohlenstoff übrig bleibt.
- Pflanzenkohle ist nachhaltiger (EBC-Standard) und kostengünstiger als andere Wirkstoffe (z. B. GAC/PAC und Fluoro-sorb[®] 100).

❖ Pflanzenkohle geringer Qualität: kostengünstiger mit geringerer Adsorptionskapazität im Vergleich zur Pflanzenkohle hoher Qualität.

❖ Pflanzenkohle hoher Qualität: Pflanzenkohle mit einer vergrößerten Oberfläche (verdoppelt!) => erhöhte Adsorptionskapazität von PFAS im Boden.



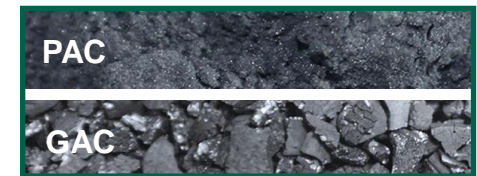
Methodik – Auswahl der Wirkstoffe

➤ Aktivkohle („Granular Activated Carbon“, GAC):

- Die optimale Aktivkohleart und -menge hängt von der Bodenart und anderen standortspezifischen Merkmalen ab.

➤ Kombination Aktivkohle in Pulverform („Powdered Activated Carbon“, PAC) & GAC

- 50% PAC und 50% GAC.
- Vom Anbieter vorab getestet, um die spezifische GAC/PAC-Kombination für den Versuch zu bestimmen.



Quelle: Carbon Activated Corporation

➤ Fluoro-sorb® 100 (FS):

- Modifizierter Bentonit, der als Wirkstoff zur Immobilisierung von PFAS vermarktet wird – geeignet auch bei erhöhtem TOC.



Quelle: cetco.com

AECOM

Methodik – Laborversuche

- Die Labortests wurden im AECOM-Versuchslabor in Austin, Texas durchgeführt.
- Chemische Analysen wurden in einem kommerziellen Labor durchgeführt.
- November 2021 bis April 2022.



Methodik – Laborversuche

Phase 1 Batch-Versuche:

- Den vier Bodenproben wurden entweder 1% oder 3% der Wirkstoffe zugemischt:
=> 8 verschiedene Boden-Wirkstoff-Mischungen + Kontrollprobe.
- Eluate nach DIN EN 12457-4 / DIN 38414 (S4; 10:1 Eluat).
- Eluate wurden auf PFAS (13 Einzelsubstanzen) untersucht.

Wirkstoff	1% Zumischung	3% Zumischung
Kontrollprobe (ohne Wirkstoff)	-	-
Pflanzkohle geringer Qualität	X	X
Pflanzkohle hoher Qualität	X	X
Aktivkohle (GAC)	X	X
Kombination aus PAC / GAC	X	-
Fluoro-Sorb [®] 100 (FS)	X	-

Methodik – Phase 2 Langzeitversuche

- Die beiden Wirkstoffe mit den besten Ergebnissen der Phase 1 wurden für die Langzeitversuche (Phase 2) ausgewählt.
- Gemäß den Empfehlungen der US-Umweltschutzbehörde (EPA) wurde das Mehrfachextraktionsverfahren („*Multiple Extraction Procedure*“, MEP) angewendet.
- 9 separate Elutionsversuche (‘T1’ bis ‘T9’) – Wiederverwenden des Bodenmaterials aus der Vorprobe.
- Bestätigung der „Langlebigkeit“ der Immobilisierung.
- Eluate wurden auf PFAS (13 Einzelsubstanzen) untersucht.

Ergebnisse

Ergebnisse – Phase 1 Batch-Versuche

Phase 1 PFAS-Ergebnisse (µg/l) [PFAS-Rückhaltevermögen in %]

Probe:	GWM78B 0,2-1,0 m	GWM78B 1,0-2,0 m	GWM78A 0,2-1,0 m	BS01 0-0,2 m
Bodenart:	Sandige Tone			Oberboden
Kontrollprobe (ohne Wirkstoff)	32,4 [-]	89,5 [-]	319,5 [-]	7,024 [-]
Pflanzkohle geringer Qualität 1%	1,6 [97,8%]	0,36 [99,3%]	3,9 [98,4%]	141,6 [84,6%]
Pflanzkohle hoher Qualität 1%	0,013 [99,9%]	0,05 [99,9%]	0,03 [99,9%]	8,2 [99,1%]
Pflanzkohle geringer Qualität 3%	0,198 [99,7%]	0,39 [99,3%]	0,596 [99,7%]	34,4 [96,2%]
Pflanzkohle hoher Qualität 3%	0,005 [99,9%]	0,022 [99,9%]	0,09 [99,9%]	0,78 [99,9%]
Fluoro-Sorb® 100 1%	0,065 [99,9%]	0,01 [99,9%]	0,0697 [99,9%]	0,37 [99,9%]
GAC 1%	0,21 [99,7%]	0,22 [99,6%]	0,449 [99,8%]	28,1 [96,9%]
GAC 3%	0,15 [99,7%]	0,1 [99,8%]	0,328 [99,8%]	4,85 [99,4%]
PAC/GAC 1%	0,096 [99,8%]	0,074 [99,8%]	0,303 [99,8%]	9,39 [98,9%]

Ergebnisse – Phase 1 Batch-Versuche

Phase 1 PFAS-Ergebnisse (µg/l) [PFAS-Rückhaltevermögen in %]

Probe:	GWM78B 0,2-1,0 m	GWM78B 1,0-2,0 m	GWM78A 0,2-1,0 m	BS01 0-0,2 m
Bodenart:	Sandige Tone			Oberboden
Kontrollprobe (ohne Wirkstoff)	32,4 [-]	89,5 [-]	319,5 [-]	7,024 [-]
Pflanzkohle geringer Qualität 1%	1,6 [97,8%]	0,36 [99,3%]	3,9 [98,4%]	141,6 [84,6%]
Pflanzkohle hoher Qualität 1%	0,013 [99,9%]	0,05 [99,9%]	0,03 [99,9%]	8,2 [99,1%]
Pflanzkohle geringer Qualität 3%	0,198 [99,7%]	0,39 [99,3%]	0,596 [99,7%]	34,4 [96,2%]
Pflanzkohle hoher Qualität 3%	0,005 [99,9%]	0,022 [99,9%]	0,09 [99,9%]	0,78 [99,9%]
Fluoro-Sorb® 100 1%	0,065 [99,9%]	0,01 [99,9%]	0,0697 [99,9%]	0,37 [99,9%]
GAC 1%	0,21 [99,7%]	0,22 [99,6%]	0,449 [99,8%]	28,1 [96,9%]
GAC 3%	0,15 [99,7%]	0,1 [99,8%]	0,328 [99,8%]	4,85 [99,4%]
PAC/GAC 1%	0,096 [99,8%]	0,074 [99,8%]	0,303 [99,8%]	9,39 [98,9%]

Ergebnisse – Phase 1 Batch-Versuche

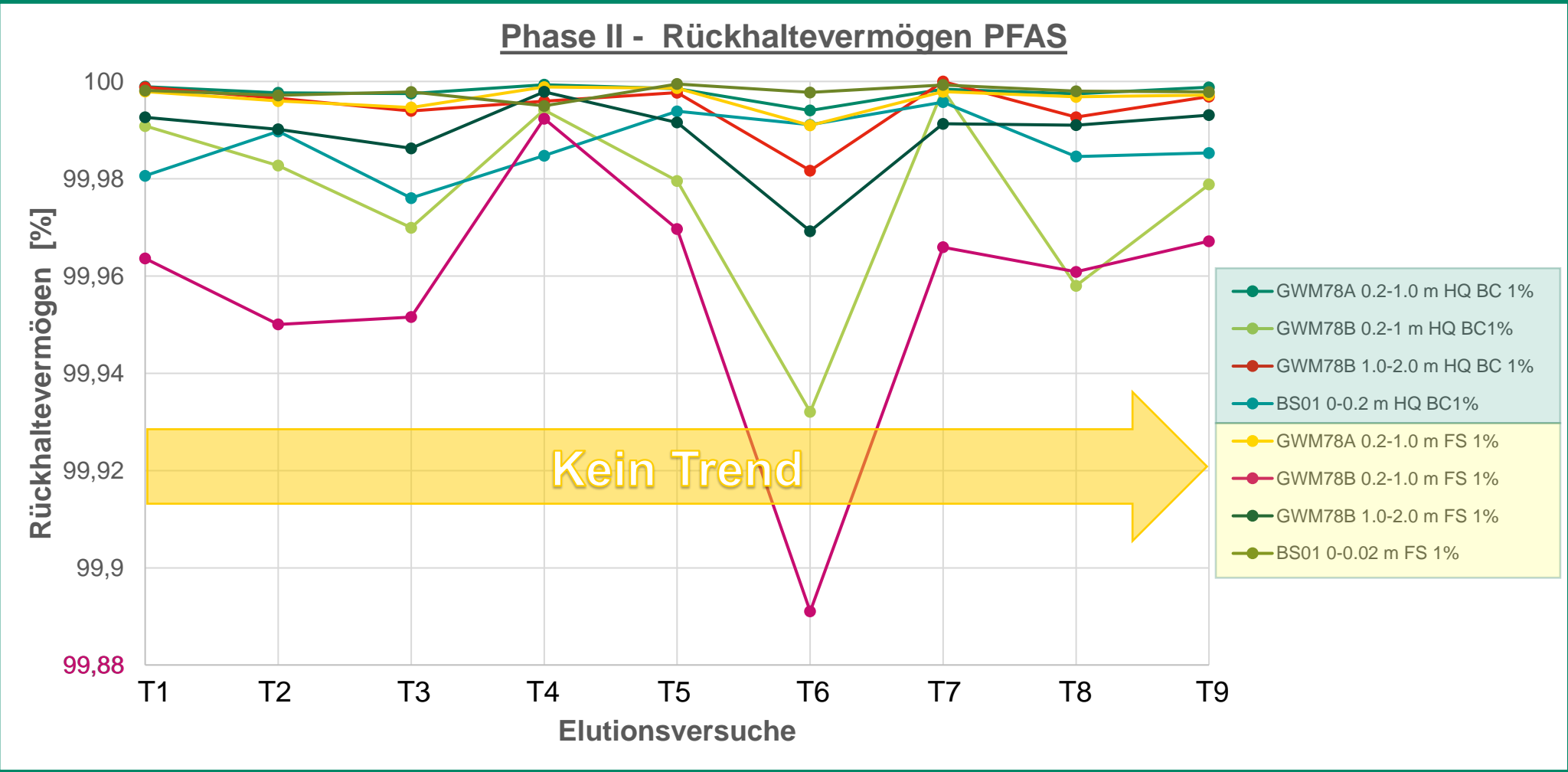
Phase 1 PFAS-Ergebnisse (µg/l) [PFAS-Rückhaltevermögen in %]

Probe:	GWM78B 0,2-1,0 m	GWM78B 1,0-2,0 m	GWM78A 0,2-1,0 m	BS01 0-0,2 m
Bodenart:	Sandige Tone			Oberboden
Kontrollprobe (ohne Wirkstoff)	32,4 [-]	89,5 [-]	319,5 [-]	7,024 [-]
Pflanzkohle geringer Qualität 1%	1,6 [97,8%]	0,36 [99,3%]	3,9 [98,4%]	141,6 [84,6%]
Pflanzkohle hoher Qualität 1%	0,013 [99,9%]	0,05 [99,9%]	0,03 [99,9%]	8,2 [99,1%]
Pflanzkohle geringer Qualität 3%	0,198 [99,7%]	0,39 [99,3%]	0,596 [99,7%]	34,4 [96,2%]
Pflanzkohle hoher Qualität 3%	0,005 [99,9%]	0,022 [99,9%]	0,09 [99,9%]	0,78 [99,9%]
Fluoro-Sorb® 100 1%	0,065 [99,9%]	0,01 [99,9%]	0,0697 [99,9%]	0,37 [99,9%]
GAC 1%	0,21 [99,7%]	0,22 [99,6%]	0,449 [99,8%]	28,1 [96,9%]
GAC 3%	0,15 [99,7%]	0,1 [99,8%]	0,328 [99,8%]	4,85 [99,4%]
PAC/GAC 1%	0,096 [99,8%]	0,074 [99,8%]	0,303 [99,8%]	9,39 [98,9%]

Ergebnisse & Kosten: Pflanzkohle hoher Qualität 1% und Fluoro-Sorb® 100 1% => Langzeitversuche der Phase 2

Ergebnisse – Phase 2 Langzeitversuche

Zusammenfassung der Phase 2 Ergebnisse: PFAS-Rückhaltevermögen [%]



Ergbnisse – Phase 2 Langzeitversuche

Rückhaltevermögen über die 9 Elutionsversuche:

- Beide Wirkstoffe halten die **PFAS** in den beiden Bodenarten mit über 99,8% zurück.
- Pflanzenkohle hoher Qualität 1% hält **PFOS** in den sandigen Tonen zu über 99,9% zurück und im **Oberboden** zu über 99,3%.
- Fluoro-Sorb[®] 100 1% hält **PFOS** in beiden Bodenarten zu über 99,9% zurück.

Ergebnisse – Phase 2 Langzeitversuche

Bewertung zur [Verwertung](#) (Wiedereinbau):

- Beide Wirkstoffe halten **PFOS** in den sandigen Tonen zurück, sodass die Verwertungskategorie VK 2 von 40 ng/l über die 9 Elutionsversuche eingehalten wurde.
- Die Eluat-Konzentrationen von **PFOS** und **6:2 Fluortelomersulfonsäure (6:2 FTSA)** überschritten die Verwertungskategorie VK 2 von 40 ng/l mit der Pflanzenkohle hoher Qualität 1% in der Oberboden-Probe bei allen 9 Elutionsversuchen.
- Die Eluat-Konzentrationen von **6:2-FTSA** (7/9), **Perfluorhexansäure (PFHxS, 2/9)**, und **PFOS** (2/9) überschritten mit dem Fluoro-Sorb[®] 100 Wirkstoff die Verwertungskategorie VK 2 von 40 µg/l im Oberboden.
 - Diese Einzelstoffe können vermutlich mit einem höheren Anteil an Wirkstoff besser immobilisiert werden (z. B. auch in höher belasteten Bereichen).

Diskussion der Ergebnisse & Schlussfolgerungen

Diskussion der Ergebnisse & Schlussfolgerungen

- Der Aushub und die Entsorgung von PFAS-belasteten Böden auf einer Deponie wird als nicht nachhaltig und wirtschaftlich angesehen.
- Die Boden-Immobilisierung zum Wiedereinbau hat das Potential wirtschaftlicher und nachhaltig zu sein.
- Unter Berücksichtigung der Versuchsergebnisse als auch der Kosten wurde der Schluss gezogen, dass:
 - Pflanzenkohle hoher Qualität 1% PFAS in den sandigen Tonen am Standort immobilisieren kann.
 - Pflanzenkohle als Abfallprodukt nachhaltig (Emissionszertifikat) und wirtschaftlich ist.
 - Fluoro-Sorb® 100 1% PFAS in beiden Bodenarten (Oberboden und sandige Tone) am Standort immobilisieren kann.

Ausblick

- Die PFAS-belasteten Böden im Hauptschadensbereich müssen zur Gefahrenabwehr des Wirkungspfad des Boden-Grundwasser behandelt werden.
- Feldversuche müssen folgen, um die Immobilisierung im Gelände zu bestätigen.
- In den kommenden Jahren werden weitere Bodensanierungsverfahren zur Verfügung stehen. Die Bodenimmobilisierung kann (auch) als Zwischenmaßnahme geeignet sein.
- Die langfristige Wirksamkeit der Bodenimmobilisierung von PFAS muss jedoch noch weiter untersucht werden.
- Das Aktivierungsverfahren für die Pflanzenkohle muss weiterentwickelt werden, um kommerzielle Mengen hoher Qualität herzustellen zu können.

Fragen

AECOM Deutschland GmbH
Sigmar Stiasny
M +49 179 9333 772
sigmar.stiasny@aecom.com
Brunnenstrasse 5
70372 Stuttgart-Bad Cannstatt
www.aecom.com