



Wirkung von In-Situ-Sorptionsbarrieren  
gegen PFAS-Fahnen im Grundwasser

Photo: Union Investmen

**Ariette Schierz, Anett Georgi, Jannes Beihnsner, Navid Saeidi, Sarah Sühnholz,  
Katrin Mackenzie**

Helmholtz-Center for Environmental Research – UFZ, Leipzig, Germany

Department of Environmental Engineering

# Gliederung

---

- In-situ Sorptionsbarrieren mit kolloidaler Aktivkohle (CAC)
  - Installation + Funktion/Wirkweise
  - Adsorption von PFAS an Aktivkohle
  - Fallbeispiele
- Neue Ansätze: Trap&Treat – In-situ Reaktionsbarrieren

# In-situ-Sorptionsbarrieren

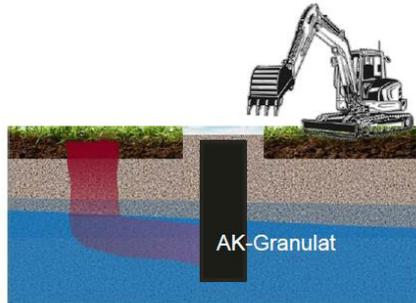
Adsorbiermaterial: Aktivkohle



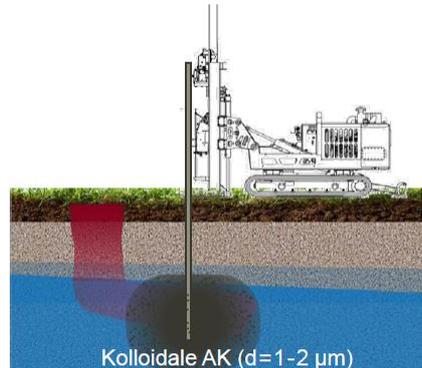
Am Markt verfügbar sind kolloidale Aktivkohlen wie Intraplex<sup>®</sup> und PlumeStop<sup>™</sup>.

## *In-situ*-Barrieren

erweitern das Einsetzfeld und werden langfristig als ökonomisch eingeschätzt.



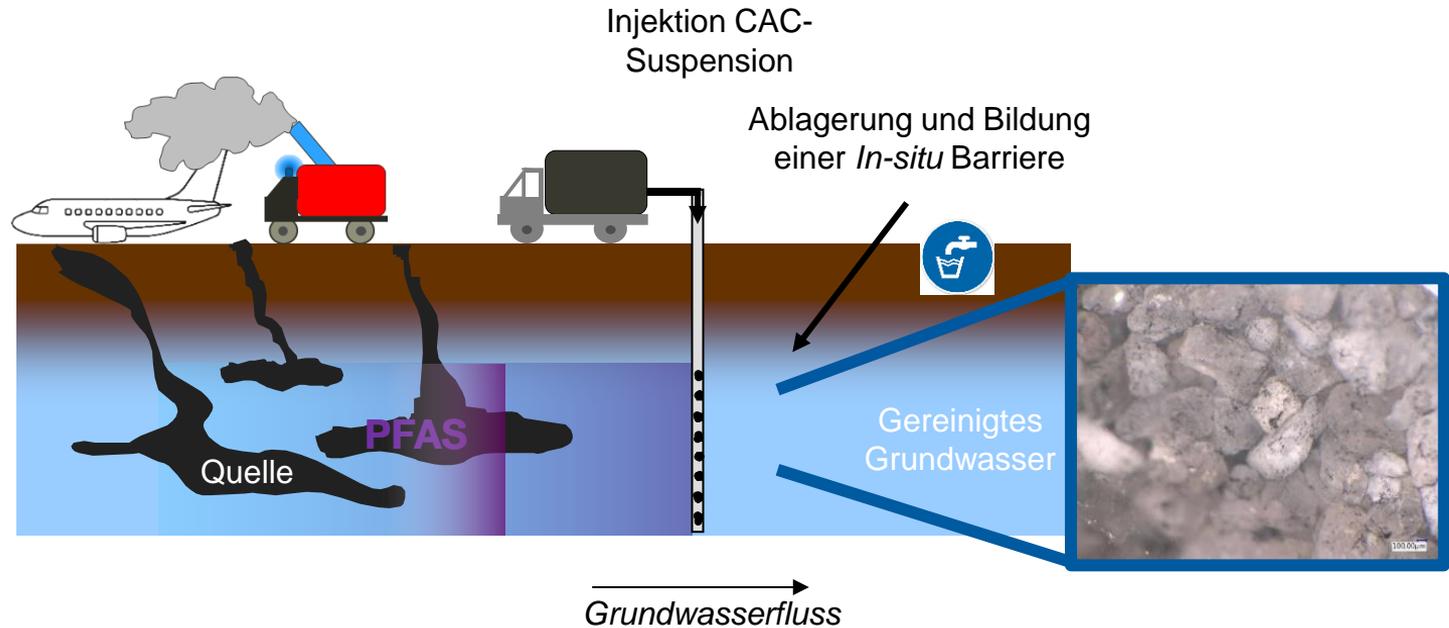
Eingebaute Sorptionsbarriere



Eingespülte Sorptionsbarriere

- Fläche uneingeschränkt nutzbar
- Standorteignung und Hydrogeologie muss gut erkundet werden

# In-situ-Sorptionsbarrieren durch Injektion von kolloidaler Aktivkohle



- Im Grundwasser: minimalinvasive Verfahren
- Für schnelle Umsetzung unter Umgebungsbedingungen
- Selektive Anreicherung der Schadstoffe

# Kolloidale Aktivkohle

Kommerzielle Produkte (z.B. Intraplex, Plumestop)  
CAC – Colloidal activated carbon

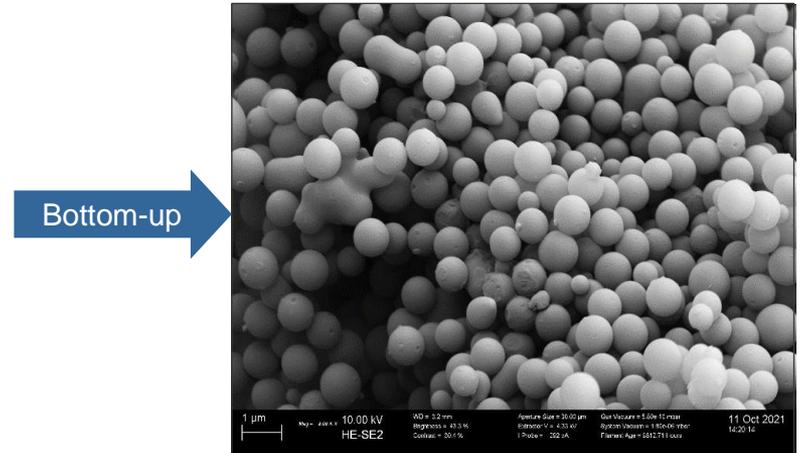


Colloidal AC  
( $\varnothing \approx 0.5 \dots 2 \mu\text{m}$ )

+ Stabilisator  
= injizierbare  
Suspension



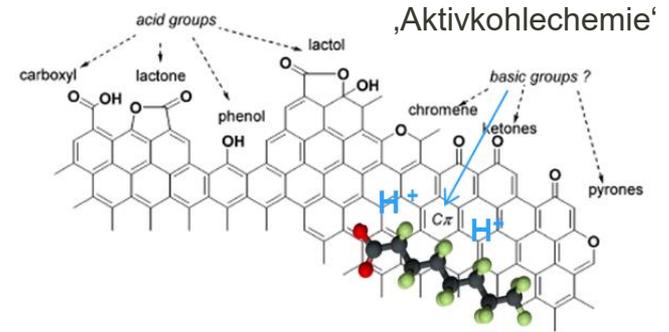
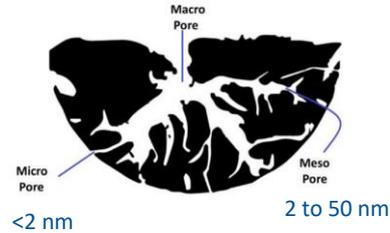
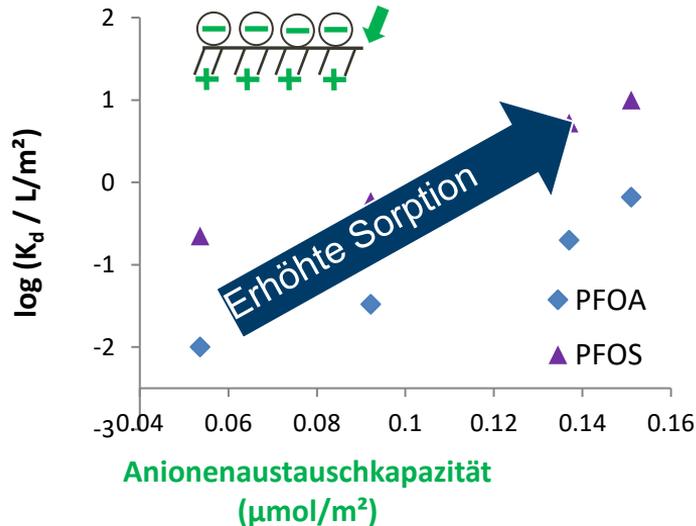
Im Forschungsstadium  
ACS – Activated Carbon Spheres



Balda *et al.*, *Int. J. Mol. Sci.* **2023**, *24*(4), 3831

# Aktivkohleeigenschaften

Verschiedene Aktivkohlen mit gleichen physikalischen Eigenschaften aber unterschiedlicher Oberflächenchemie



- Ideale AK für PFAS muss hydrophobe Wechselwirkung + Ionenpaarbildung ermöglichen !!!
- Optimierung der AK möglich
- Qualität der AK ist entscheidend für die Barriere-Lebensdauer!

# Retardierungseffekt AK: beobachtet vs. vorhergesagt

## Säulenversuche mit kolloidaler Aktivkohle (Intraplex<sup>®</sup>, Intrapore GmbH)



CAC Beladung

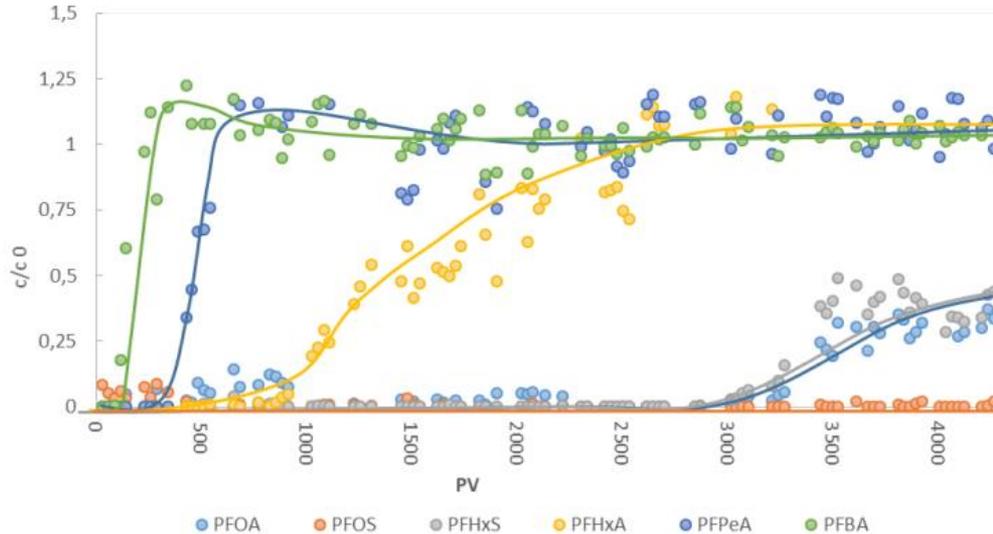
# Retardierungseffekt AK: beobachtet vs. vorhergesagt

## Säulenversuche mit kolloidaler Aktivkohle (Intraplex<sup>®</sup>, Intrapore GmbH)



0.2 wt% AK

Durchbruchskurve 0.2 wt% AK



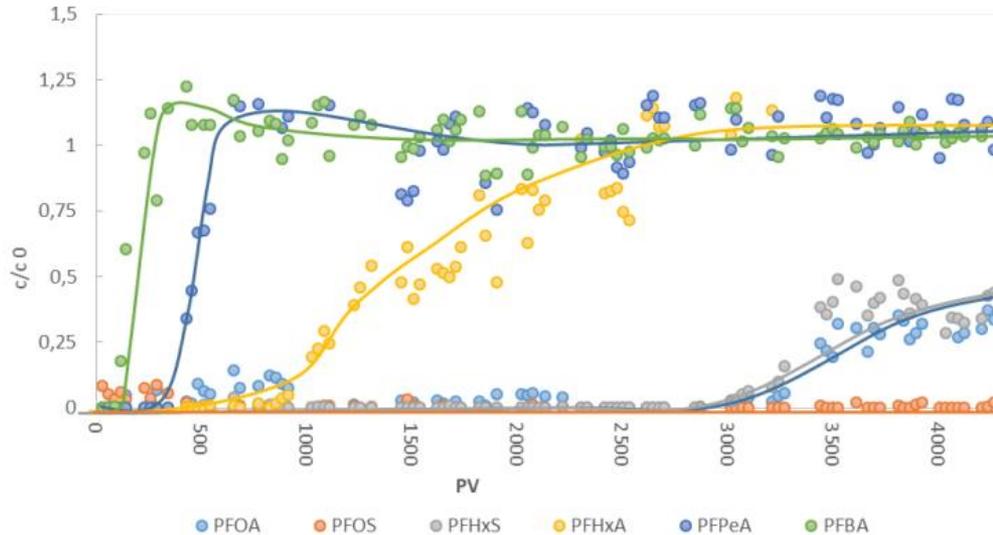
PFBA (C4) < PFPeA (C5) < PFHxA (C6) < PFHxS (C6-S)  $\approx$  PFOA (C8) < PFOS (C8-S)

# Retardierungseffekt AK: beobachtet vs. vorhergesagt

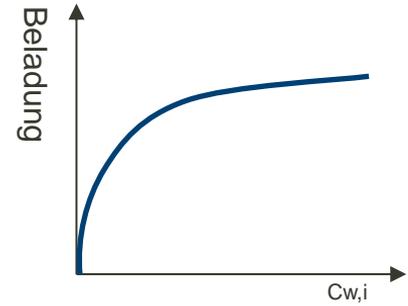
## Säulenversuche mit kolloidaler Aktivkohle (Intraplex<sup>®</sup>, Intrapore GmbH)



Durchbruchskurve 0.2 wt% AK



$$R_i = \frac{u}{u_i} = 1 + \frac{\rho}{\varepsilon} f_{AK} K_{d,i}$$



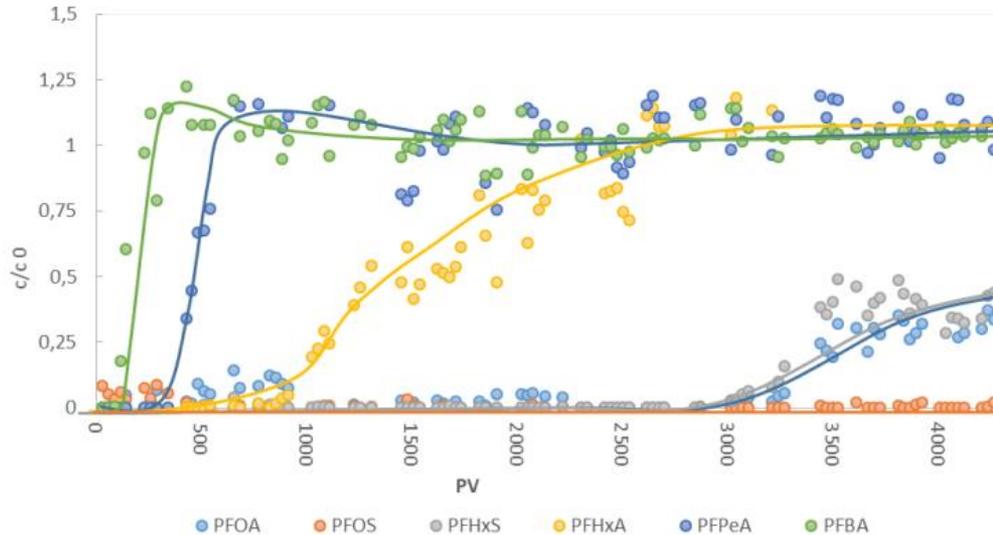
PFBA (C4) < PFPeA (C5) < PFHxA (C6) < PFHxS (C6-S) ≈ PFOA (C8) < PFOS (C8-S)

# Retardierungseffekt AK: beobachtet vs. vorhergesagt

## Säulenversuche mit kolloidaler Aktivkohle (Intraplex<sup>®</sup>, Intrapore GmbH)

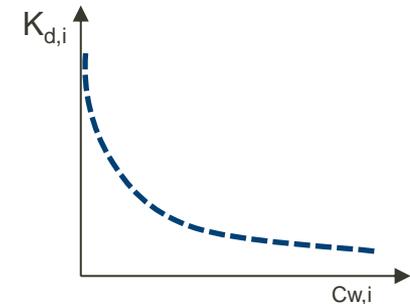
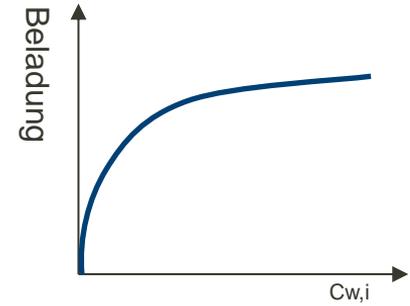


Durchbruchskurve 0.2 wt% AK



PFBA (C4) < PFPeA (C5) < PFHxA (C6) < PFHxS (C6-S) ≈ PFOA (C8) < PFOS (C8-S)

$$R_i = \frac{u}{u_i} = 1 + \frac{\rho}{\varepsilon} f_{AK} K_{d,i}$$

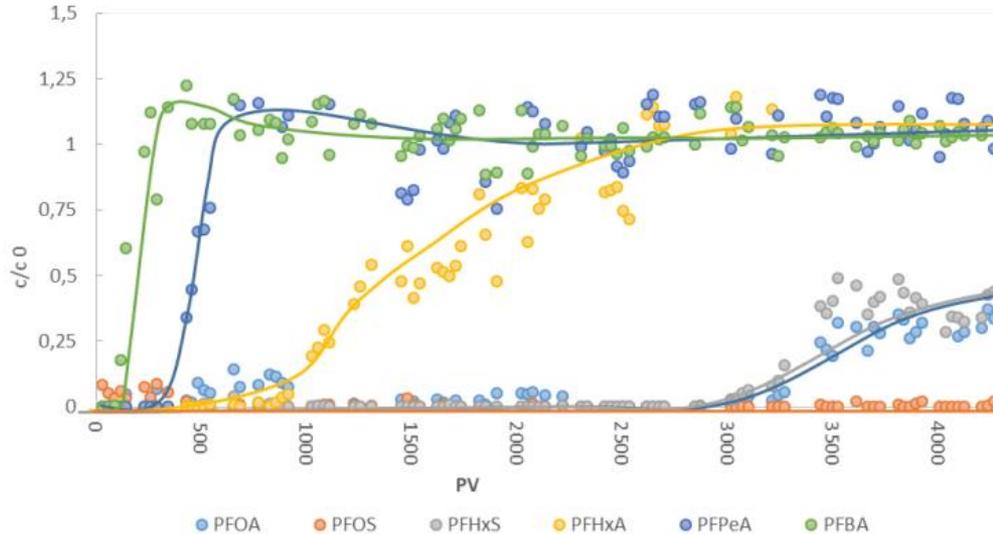


# Retardierungseffekt AK: beobachtet vs. vorhergesagt

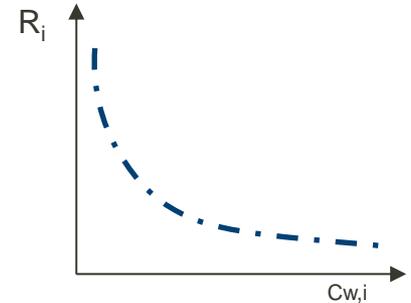
## Säulenversuche mit kolloidaler Aktivkohle (Intraplex<sup>®</sup>, Intrapore GmbH)



Durchbruchskurve 0.2 wt% AK



$$R_i = \frac{u}{u_i} = 1 + \frac{\rho}{\varepsilon} f_{AK} K_{d,i}$$



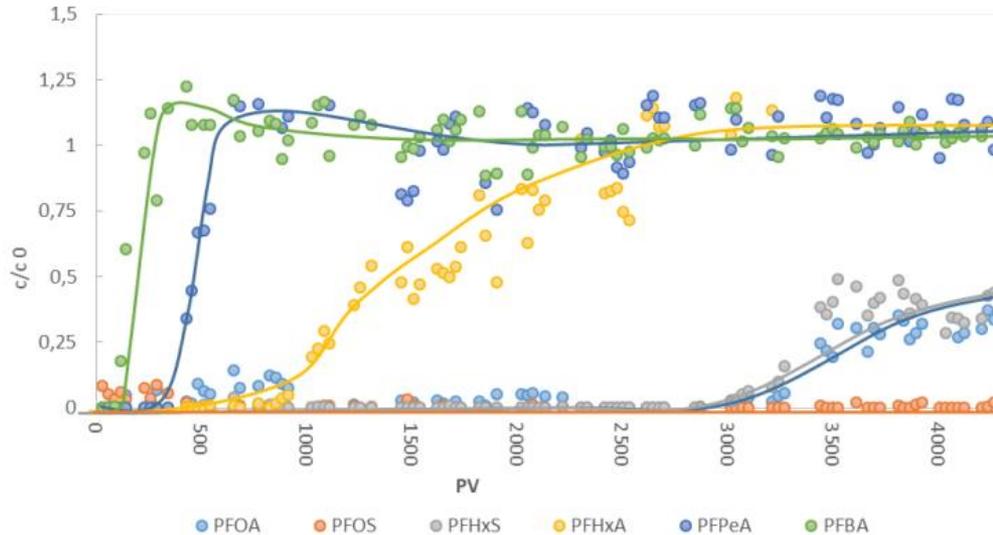
PFBA (C4) < PFPeA (C5) < PFHxA (C6) < PFHxS (C6-S) ≈ PFOA (C8) < PFOS (C8-S)

# Retardierungseffekt AK: beobachtet vs. vorhergesagt

## Säulenversuche mit kolloidaler Aktivkohle (Intraplex<sup>®</sup>, Intrapore GmbH)



Durchbruchskurve 0.2 wt% AK



$$R_i = \frac{u}{u_i} = 1 + \frac{\rho}{\varepsilon} f_{AK} K_{d,i}$$

	$R_{obs}$	$R_{pre}$
PFBA	130	110
PFOA	710	850

PFBA (C4) < PFPeA (C5) < PFHxA (C6) < PFHxS (C6-S)  $\approx$  PFOA (C8) < PFOS (C8-S)

# Fallbeispiel: Feldversuch Militärgelände, Viersen, NRW (Partner: Intrapore GmbH)

PFOA, PFHxS, PFOS... jeweils 0,02 – 0,03 µg/L

- 180 kg AK auf 6,5 x 7,5 m Querschnittsfläche  
18 m<sup>3</sup> von 10 g/L AK-Suspension
- Annahme 4 m Barrierenlänge in GW-Fließrichtung  
→ 0,05 Masse-% AK auf Sediment

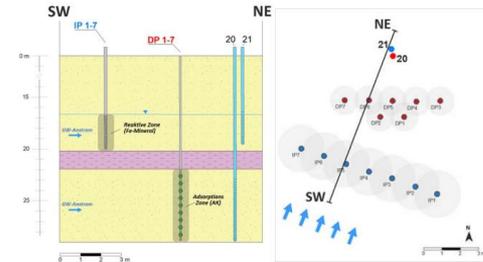
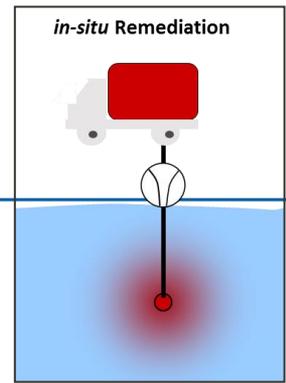
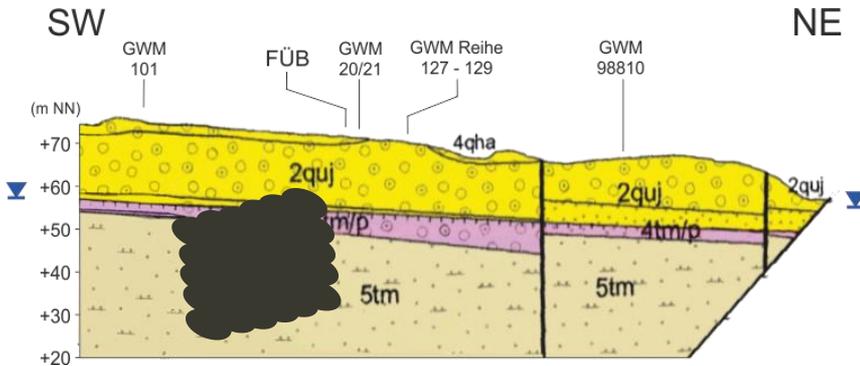


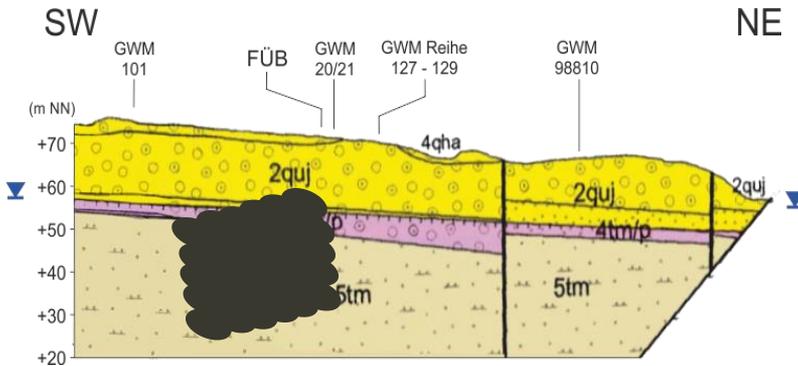
Abbildung 53: Lage der Partikel-Injektionstrassen im Profilschnitt (links) und in einem Lageplan (rechts).



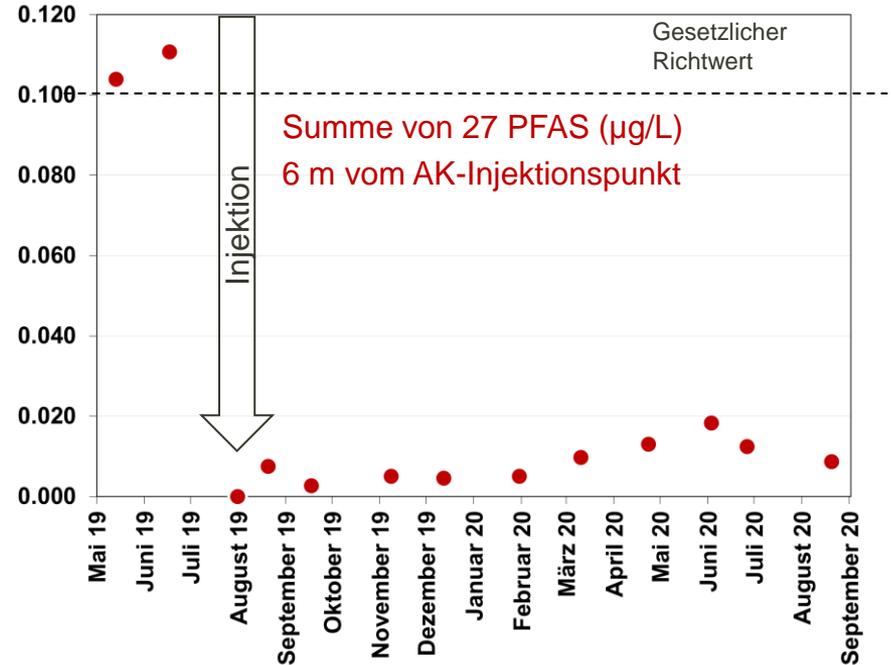
# Fallbeispiel: Feldversuch Militärgelände, Viersen, NRW (Partner: Intrapore GmbH)

PFOA, PFHxS, PFOS... jeweils 0,02 – 0,03 µg/L

- 180 kg AK auf 6,5 x 7,5 m Querschnittsfläche  
18 m³ von 10 g/L AK-Suspension
- Annahme 4 m Barrierenlänge in GW-Fließrichtung  
→ 0,05 Masse-% AK auf Sediment

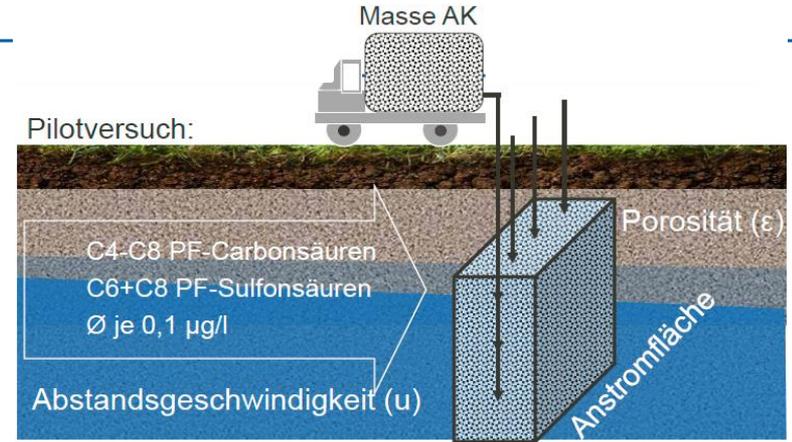


Georgi et al., Altlasten Spektrum 2020



# Abschätzung der erreichbaren Barriere-Lebenszeit

$$t_{\text{Durchbruch},i} = \frac{\text{Masse AK}}{\text{Anstromfläche}} \cdot \frac{1}{\varepsilon \cdot u} \cdot K_{d,i}$$



Pilotversuch: Viersen

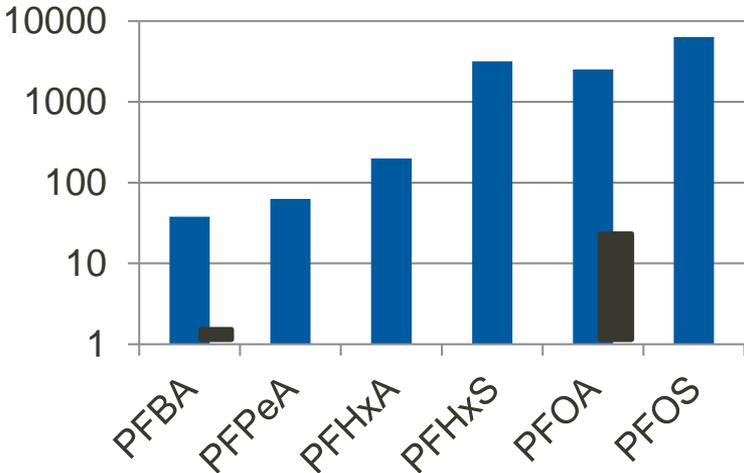
180 kg AK auf 6,5 x 7,5 m Anstromfläche  
bei 4 m Ausdehnung in Flussrichtung

→ 0,05 Ma% AK auf Sediment

# Abschätzung der erreichbaren Barriere-Lebenszeit

$$t_{\text{Durchbruch},i} = \frac{\text{Masse AK}}{\text{Anstromfläche}} \cdot \frac{1}{\varepsilon \cdot u} \cdot K_{d,i}$$

Standzeit der Aktivkohlebarriere in Jahren

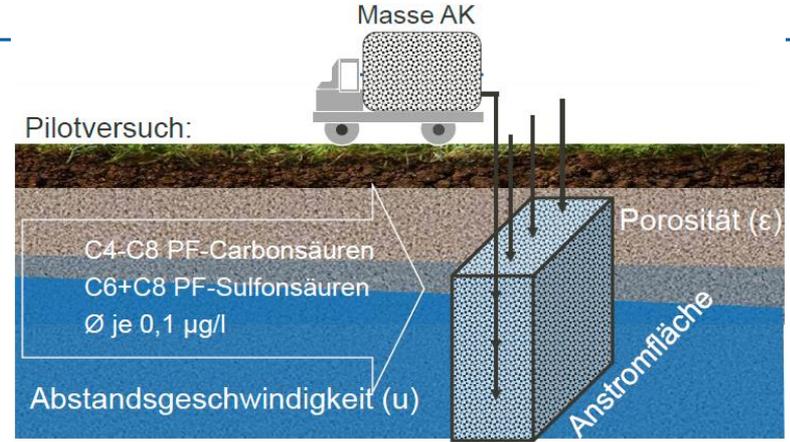


Optimierte AK:

$$K_{d,\text{PFBA...PFOS}} \cdot 10^5 - 10^7 \text{ L/Kg}$$

Schlechteste AK:

$$K_{d,\text{PFBA...PFOS}} \cdot 10^3 - 10^5 \text{ L/Kg}$$



Pilotversuch: Viersen

180 kg AK auf 6,5 x 7,5 m Anstromfläche bei 4 m Ausdehnung in Flussrichtung

→ 0,05 Ma% AK auf Sediment

# Bisherige Erfahrungen mit CAC in-situ Sorptionsbarrieren

Carey et al. (2022). Longevity of colloidal activated carbon for in situ PFAS remediation at AFFF-contaminated airport sites. *Remediation*, 33, 3– 23. <https://doi.org/10.1002/rem.21741>

- Review zu 17 Pilotstudien bzw. Sanierungsanwendungen und Modellierung der Lebensdauer
- Meist Anwendungen in schluffigem Sand bzw. Feinsand
- 0,02 bis 0,78 % CAC (PlumeStop™) auf Sediment nahe Injektionsbereich
- Konzentrationen um >90% bis >99% reduziert an 14 von 16 Standorten mit Monitoring
- Monitoring 1-6 Jahre, Ø 1,2 Jahre

Solute	Longevity (years) based on criteria		
	HA	DL = 0.001 µg/L	State = 0.07 µg/L
PFOS	915	924	936
PFOA	262	265	268
PFHxS	n/a	233	235

Abbreviations: CAC, colloidal activated carbon; DL, detection limit; HA, health advisories;n/a, not available; PFHxS, perfluorohexanesulfonic acid; PFOA, perfluorooctanoic acid; PFOS, perfluorooctanesulfonic acid.

Modellierung der Standzeit (Jahre) bis zum Erreichen verschiedener Grenzwerte

0,08% CAC, 12 m Barrierelänge, u = 3 m/d



# Bisherige Erfahrungen mit CAC in-situ Sorptionsbarrieren

Niarchos et al. (2023). „In-situ application of colloidal activated carbon for PFAS-contaminated soil and groundwater: A Swedish case study“ *Remediation*, 33, 101-110, DOI: 10.1002/rem.21746

- Pilotstudie mit Plume-Stop™, Regenesis Direktinjektion (2000 kg CAC in U-Form um Hauptbrunnen)
- Heterogener Aquifer: Schluffiger Lehm/Tonschichten
- Konzentrationen um > 82% PFOA bis > 83% PFOS reduziert ( $\Sigma 11$ PFAS: 76%), aber nach ca. 6 Monaten: Konzentrationsanstieg (Rebound), durch by-pass der Barriere → gesamt 21 Monate:  $\Sigma 11$ PFAS: 52%
- **Hydrogeologische Komplexität:** wechselnde Fließrichtungen, hohe Permeabilität in tiefen Schichten, Jahreszeitliche Grundwasserschwankungen

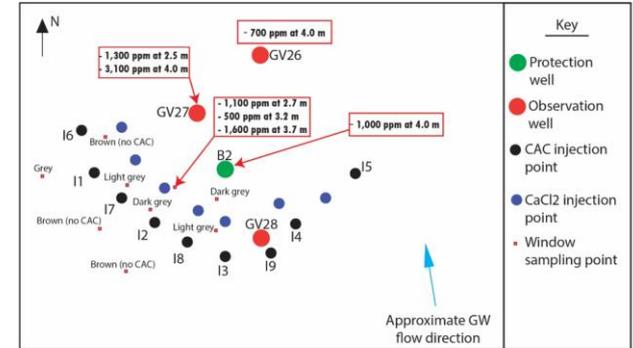
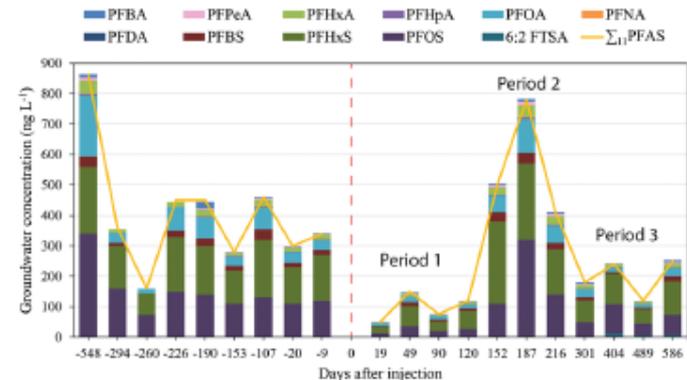


Figure S6. Estimation of the radius of influence of CAC based on colorimetric measurements of groundwater and window sampling of soil.

## Lessons-learned

- Komplexe Hydrogeologie kann die **Barrierefunktion stark beeinträchtigen**
- hydrogeologischen Standortcharakteristik ist entscheidend für die Effektivität
- Langzeitmonitoring notwendig



# Bisherige Erfahrungen mit CAC in-situ Sorptionsbarrieren

Standorte		Aquifer	CAC	PFAS
17 Standorte: USA, UK, Kanada, Saudi Arabien Carey et al (2022)	Pilot - Fullscale	schluffiger Sand bzw. Feinsand	Plumestop, Regensis	C4-C9 (PFOS, PFOA; PFHxS, PFNA)
Arboga, Schweden Niarchos et al. (2023)	Pilot	Ton- und Geschiebemergelschichten	Plumestop, Regensis	C4-C9
Viersen, D Georgi et al. (2023)	Pilot	Feinsand	Intraplex, Intrapore GmbH	C4-C9 (PFOS, PFHxS, PFOA)

# Bisherige Erfahrungen mit CAC in-situ Sorptionsbarrieren

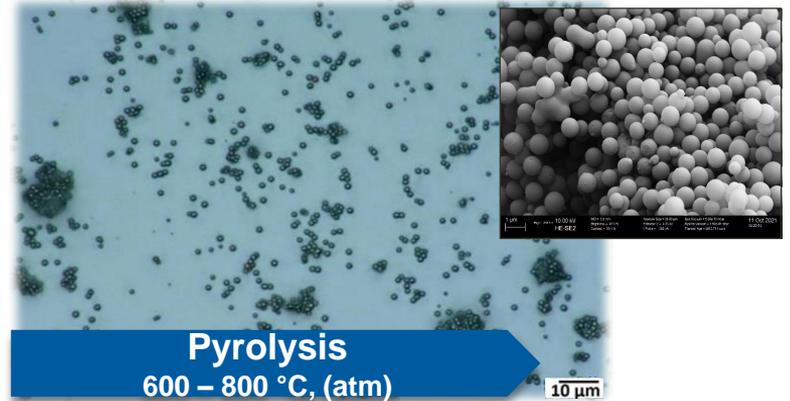
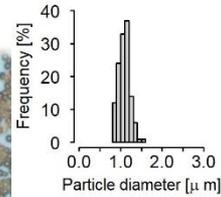
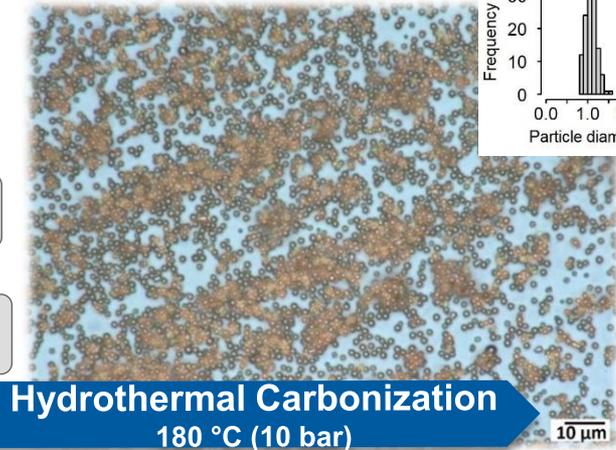
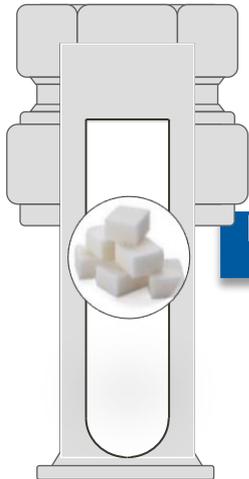
Standorte		Aquifer	CAC	PFAS
17 Standorte: USA, UK, Kanada, Saudi Arabien Carey et al (2022)	Pilot - Fullscale	schluffiger Sand bzw. Feinsand	Plumestop, Regensis	C4-C9 (PFOS, PFOA; PFHxS, PFNA)
Arboga, Schweden Niarchos et al. (2023)	Pilot	Ton- und Geschiebemergelschichten	Plumestop, Regensis	C4-C9
Viersen, D Georgi et al. (2023)	Pilot	Feinsand	Intraplex, Intrapore GmbH	C4-C9 (PFOS, PFHxS, PFOA)

- **Schnelle, kostengünstige Methode zur langfristigen Eindämmung der Ausbreitung von PFAS-Schadstofffahnen**
- **Gute Wirkweise für langkettige PFAS und bei niedrigem DOC**
- **Hydrogeologische Standortbedingungen sind entscheidend**
- **Mehr Monitoring/Langzeitstudien**

# Derzeit Forschung Maßschneidern von nachhaltigeren Kohlenstoffquellen

- Kolloide ohne Mahlvorgang durch „Bottom-up“-  
Hydrothermale Synthese

Quelle: heimische  
Zuckerrüben



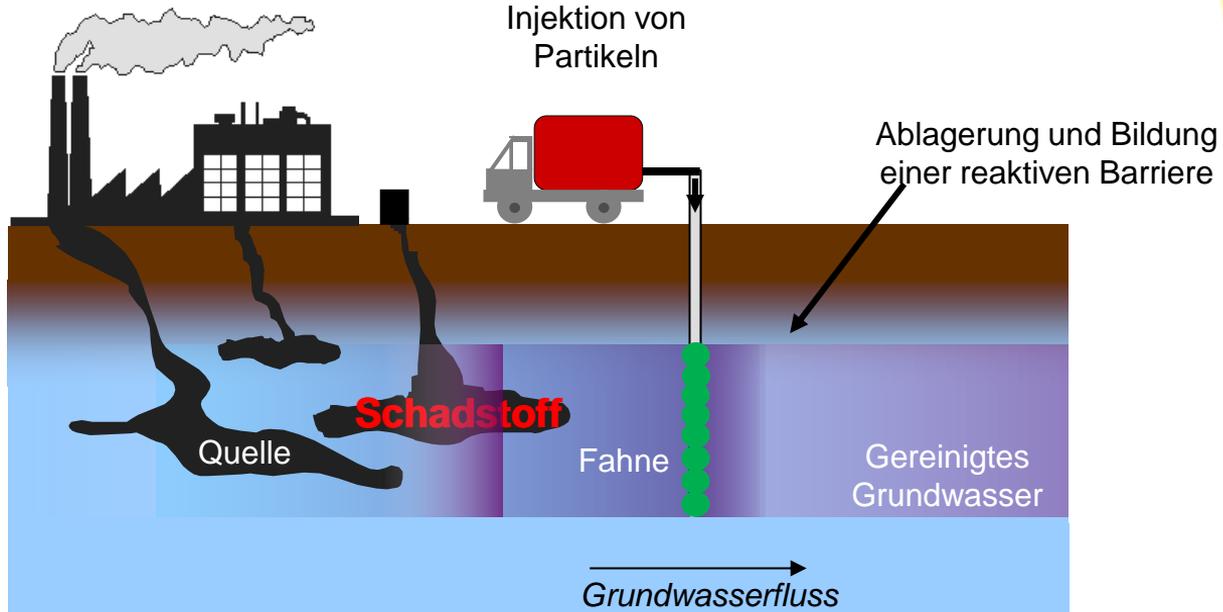
- Einheitliche Kugeln  $d \sim 1 \mu\text{m}$
- Maßschneidern der Partikelgröße
- Aktivkohlepartikel
- Maßgeschneidert nach Sorptionsbedarf
  - Dispergierbarkeit
  - Porengröße
  - Oberflächeneigenschaften

# Gliederung

---

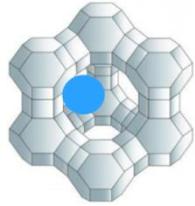
- In-situ Sorptionsbarrieren mit kolloidaler Aktivkohle
  - Installation + Funktion/wirkweise
  - Adsorption von PFAS an Aktivkohle
  - Fallbeispiel: Viersen, NRW
- Neue Ansätze F&E: Trap&Treat – In-situ Reaktionsbarrieren

# Partikel – als in-situ Reagenzien



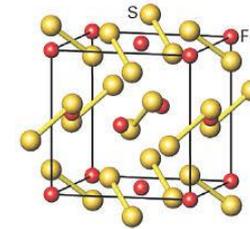
Es ist kein Mischen im Aquifer möglich!

# Partikel – als in-situ Reagenzien: TRAP & TREAT

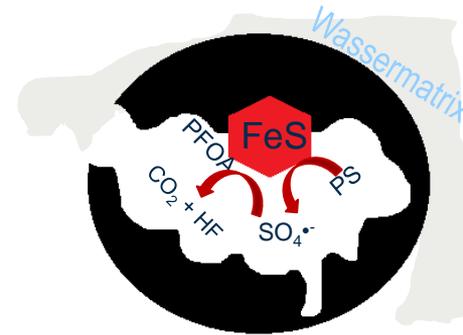
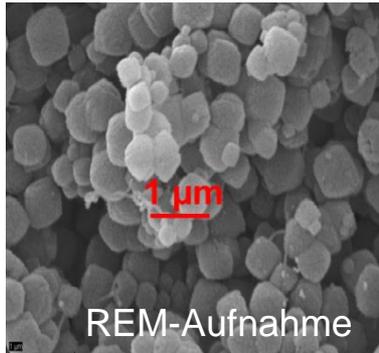


TrapOx® - Zeolithe

(UFZ patent EP 18203 492.6)

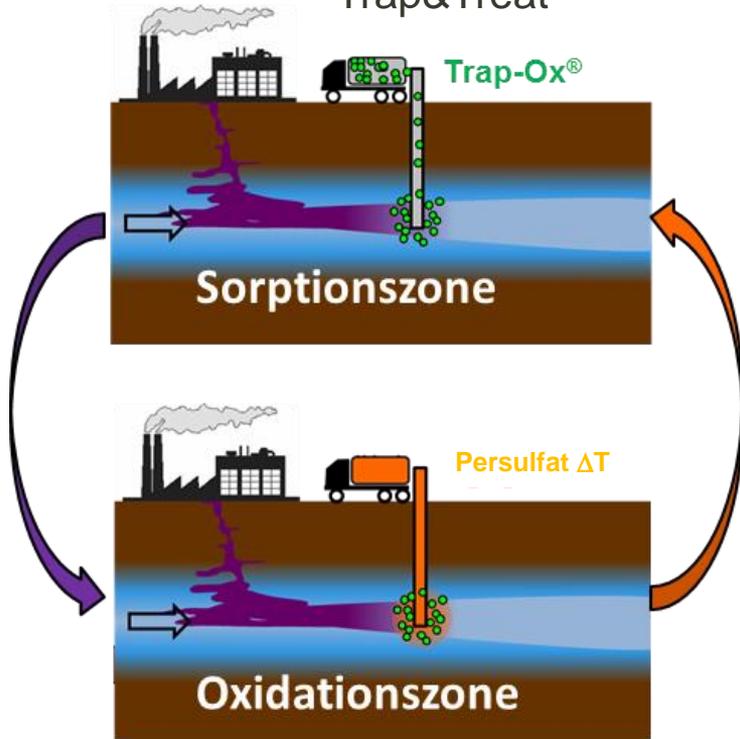


FeS – Partikel

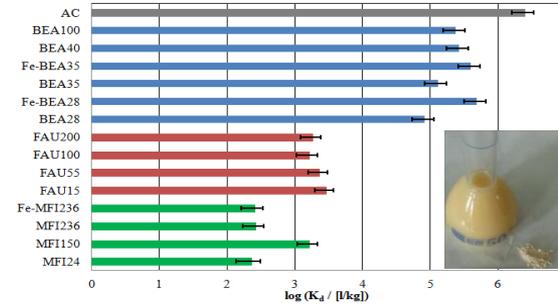


# In-situ regenerierbare Absorbentien: TrapOx® (UFZ patent EP 18203 492.6)

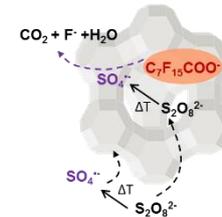
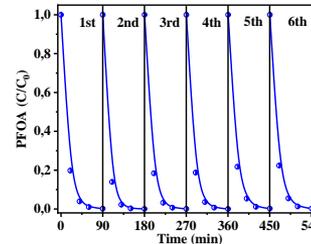
Trap&Treat



## Sorption von PFOA an verschiedenen Zeolithen



## Abbau von PFOA adsorbiert am Zeolithen



Perfluorcarbonsäuren und Polyfluorierte Verbindungen (z.B. 6:2 FTS)

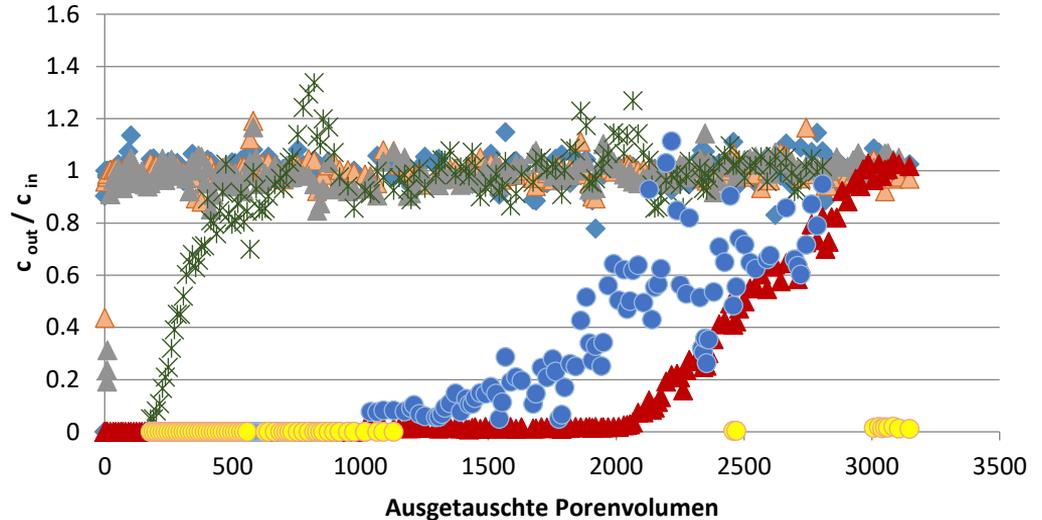


# Adsorption von PFAS an Zeolith-beladenen Sandsäulen



0.5 wt% Zeolith

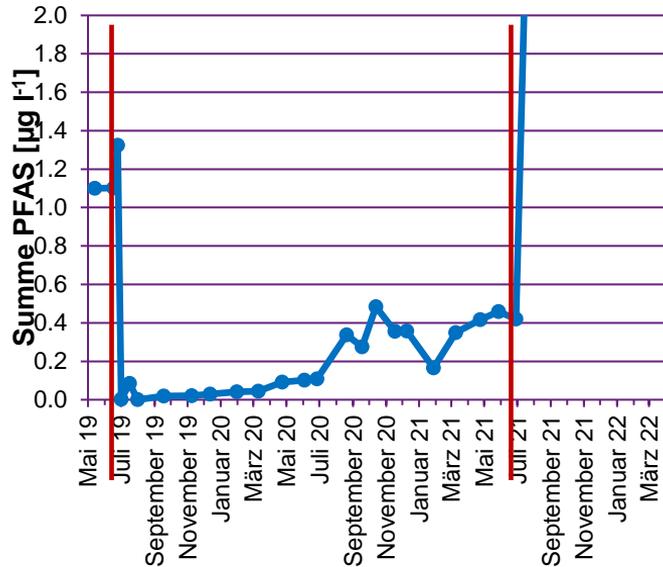
- Durchbruchzeit von PFAS steigt mit der Kettenlänge (wie bei AK)
- PFOA zeigt späten Durchbruch nach 2500 ausgetauschten Porenvolumina - entspricht gut der Vorhersage (2300) basierend auf Batch-Gleichgewichts- $K_d$  und Zeolithgehalt in der Säule
- PFOS noch stärker verzögert, noch kein Durchbruch



◆ PFBA ▲ PFPeA ▲ PFHxA ▲ PFOA ✕ PFHxS linear ● PFOS branched ● PFOS linear

# Forschungsansatz: FeS –Partikel als Aktivator für Persulfat

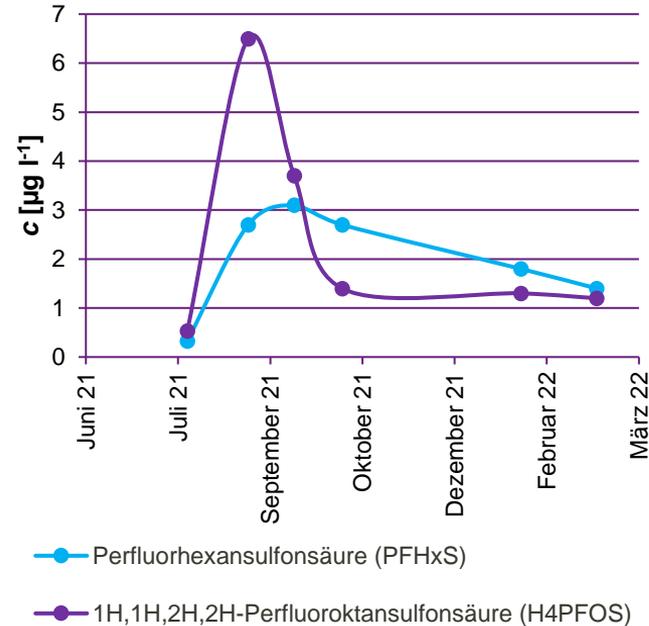
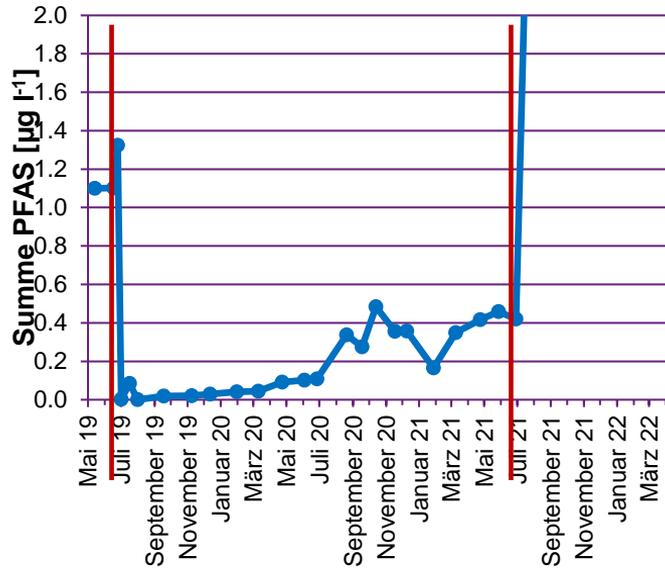
## Feldversuch, Viersen (NRW)



- FeS-Injektion führt zur Abnahme der PFAS-Konzentration durch Adsorption.

# Forschungsansätze: FeS –Partikel als Aktivator für Persulfat

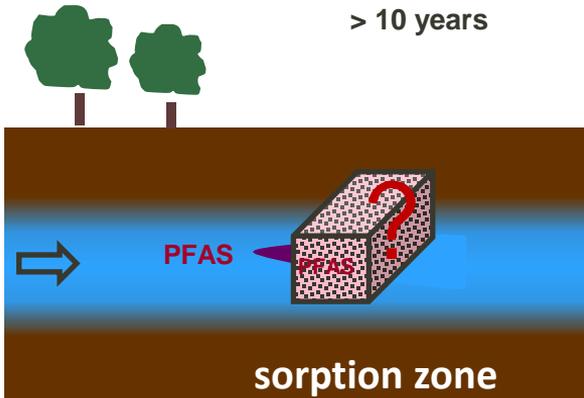
## Feldversuch mit per- und polyfluorierten Alkylsubstanzen (PFAS)



- FeS-Injektion führt zur Abnahme der PFAS-Konzentration durch Adsorption.

- Nach PS-Injektion starke Zunahme der PFAS-Konzentration mit anschließender Abnahme der Konzentration der „oxidierbaren“ PFAS.

# Zentrale Fragestellungen – Forschungsprojekte



- **Mehr als 100 PFAS-Projekte** befinden sind derzeit in der Umsetzungs- oder Planungsphase
- Noch gibt es **keine Langzeitbeobachtungen!**
- Wie gestalten sich die **Betriebszeiten unter Umweltbedingungen?** (*Co-Kontamination, PFAS Dark Matter, Wassermatrix... Stabilität der Barriere unter variablen geochemischen Bedingungen?*)
- Wird eine beladene **Barriere zur Quelle?**
- Kann man **Barriere oder Adsorbat** „zurückholen“?
- Wie kann man **regenerierbare Barrieren** gestalten?



A photograph of laboratory glassware, including a beaker and several test tubes, containing a dark, granular substance. The scene is lit with a blue light, creating a scientific atmosphere. The glassware is arranged on a reflective surface.

VIELEN DANK für Ihre Aufmerksamkeit!