



# FABEKO

REMEDIATION OF PFAS IN  
SOIL & GROUNDWATER

## Grundwasserschutz durch flächenhafte Aufbereitung PFAS-verunreinigter Böden durch On-Site-Bodenelektion und Wasseraufbereitung durch elektrostimulierte Aktivkohle (FABEKO)

M.Sc. Aglaia Nagel, Mull & Partner Ingenieurgesellschaft mbh, Hannover

M.Eng. Anja Wilken, Sensatec GmbH, Kiel

Dipl.-Geol. Harald Oeder, GEOlogik Wilbers & Oeder GmbH, Münster

Dr. Anett Georgi, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ, Leipzig

Karlsruhe, 18.06.2024

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

- Einleitung
- Sanierungsverfahren
  - on-site Sanierungsansatz
  - Biopolymere
- Wasserbehandlungsverfahren
  - Schaumfraktionierung
  - Elektrod-/desorptionsmodule
- Pilottests
- Standortbewertungstool
- Fazit und Ausblick

- Verbundprojekt gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)
- Projektpartner:
  - Sensatec GmbH, Friedrichsorter Str. 32, 24159 Kiel
  - Mull und Partner Ingenieurgesellschafts mbH (M&P), Neulandstr. 2-4, 49074 Osnabrück
  - GEOlogik Wilbers & Oeder GmbH, Feldstiege 98a, 48161 Münster
  - Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH (UFZ), Permoserstr. 15, 04318 Leipzig
- Vorhabenszeitraum: 03/2021 – 02/2024

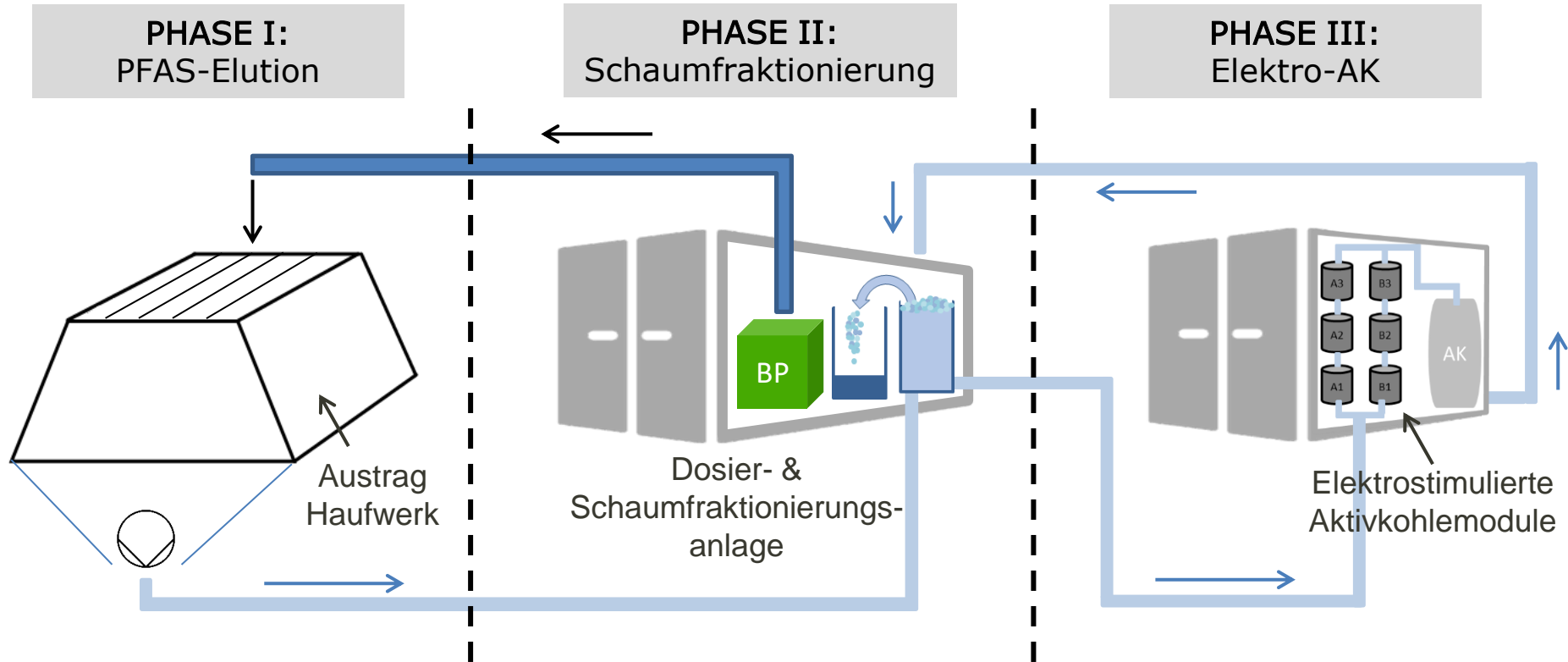
- Adaptation von biopolymerbasierter in situ PFAS-Elution (Forschungsprojekt Biokon) für on-site Haufwerke
- Etablierung von Elektroad-/desorptionsmodulen für die Wasseraufbereitung von PFAS
- Reduzierung großvolumiger PFAS-Belastungen auf kleinvolumige PFAS-Konzentrate
- Entwicklung eines Standortbewertungstools

- Reihe von Säulenversuchen mit PFAS-belastetem Boden
  - Biopolymerscreening
  - variierende BP-Konzentrationen
  - pH-Wert Adaption
  - Ergebnis: 99% Abreinigung



- in-situ Pilotversuch in Süddeutschland
  - Belastung mit Papierschlämmen
  - Elution aus der ungesättigten Zone
  - Ergebnis: 80% Abreinigung





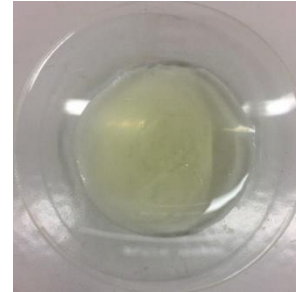
## Ziel:

- Optimierung der Kosten-, Zeit- und Ressourceneffizienz, insbesondere durch Reduzierung des Biopolymerbedarfs und Sanierungsdauer

## **Zu klären ist:**

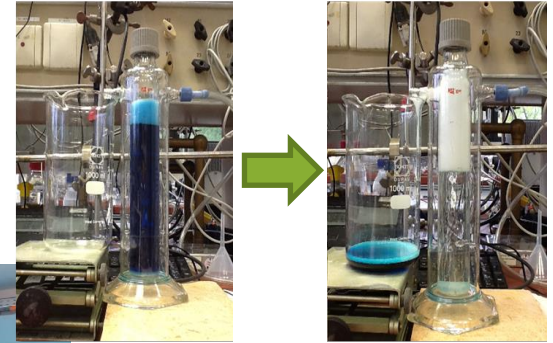
- ob das Recycling von Biopolymeren durch den abgeänderten Verfahrensansatz und die Zweistufigkeit des Wasseraufbereitungsverfahrens möglich ist,
- ob die zweistufige Aufbereitung den Reinigungsgrad des Sickerwassers erhöht und somit längere Standzeiten ermöglicht werden können und
- ob durch den intensiveren Biopolymer-Boden-Kontakt im Verfahrensansatz „Haufwerk“ Zeit eingespart und der Biopolymerbedarf reduziert werden kann.

- Biopolymerauswahl gem. Ergebnissen BioKon
- Biopolymercharakteristika
  - bestehend aus Aminosäuren, Fettsäuren & Lipiden
  - biologisch gut abbaubar
  - amphiphil
- Bildung von Biopolymer-PFAS-Komplexen
- Die Verwendung von Biopolymeren führt zu einer verbesserten PFAS-Elution in belasteten Böden





- Behandlung von PFAS-belastetem Wasser
  - Zugabe von Biopolymer
  - Zufuhr von Luft
  - Transfer von PFAS-Wasser-Lösung in Konzentrate
- 95% Aufreinigung im Labormaßstab
- Feldanwendung als sequenzielle Versuchsreihe
  - Durchlauf 2 m<sup>3</sup>/h
- 75% Aufreinigung im Feldmaßstab
  - Optimierung ausstehend



- Nutzung von flachen, feinfasrigen Aktivkohlevliesen
  - hohe PFAS-Sorptionsselektivität
  - Modifizierung der Aktivkohlevliese
- Regeneration
  - durch Anlegen eines negativen Potentials
  - Rückspülung (je E-AK mehrere Rückspülzyklen möglich)
- vielversprechende Regenerationsraten im Labormaßstab (z.B. 95% PFDA und 70% PFBA bei Verweilzeiten von < 5 min)
- Transfer zu Pilotzelle im Labor mit 0,25 m<sup>3</sup>/h Durchfluss



Laborzelle ca. 200 ml



Pilotzelle ca. 25 l



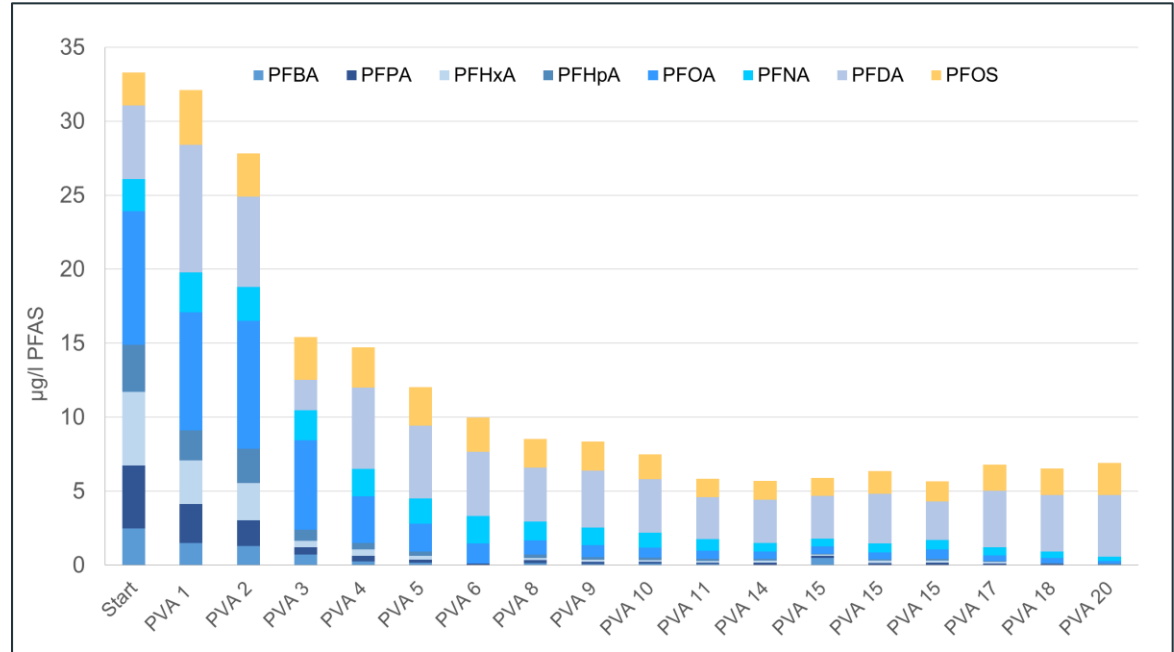
- Süddeutschland
- $\sum \text{PFAS}_{\text{FS}} \approx 300 \mu\text{g/kg}$
- Belastungsherkunft :  
Papierschlämme
- Hauptkontaminant: PFDA

- Norddeutschland
- $\sum \text{PFAS}_{\text{FS}} \approx 340 \mu\text{g/kg}$
- Belastungsherkunft:  
Feuerlöschschäume
- Hauptkontaminanten:  
PFOS, PFUnA

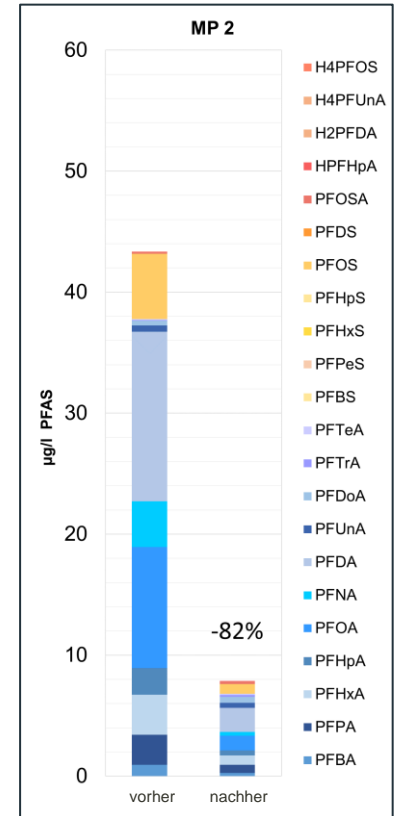
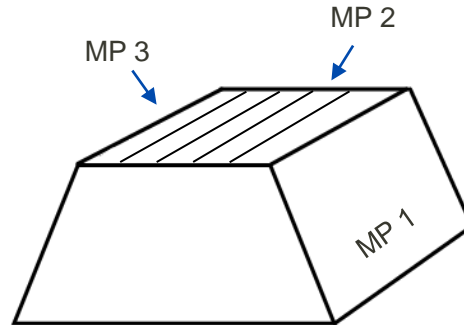
Standort 1  
landwirtschaftlich  
genutzte Fläche

Standort 2  
Flughafenstandort  
(ehem. Feuerwache)

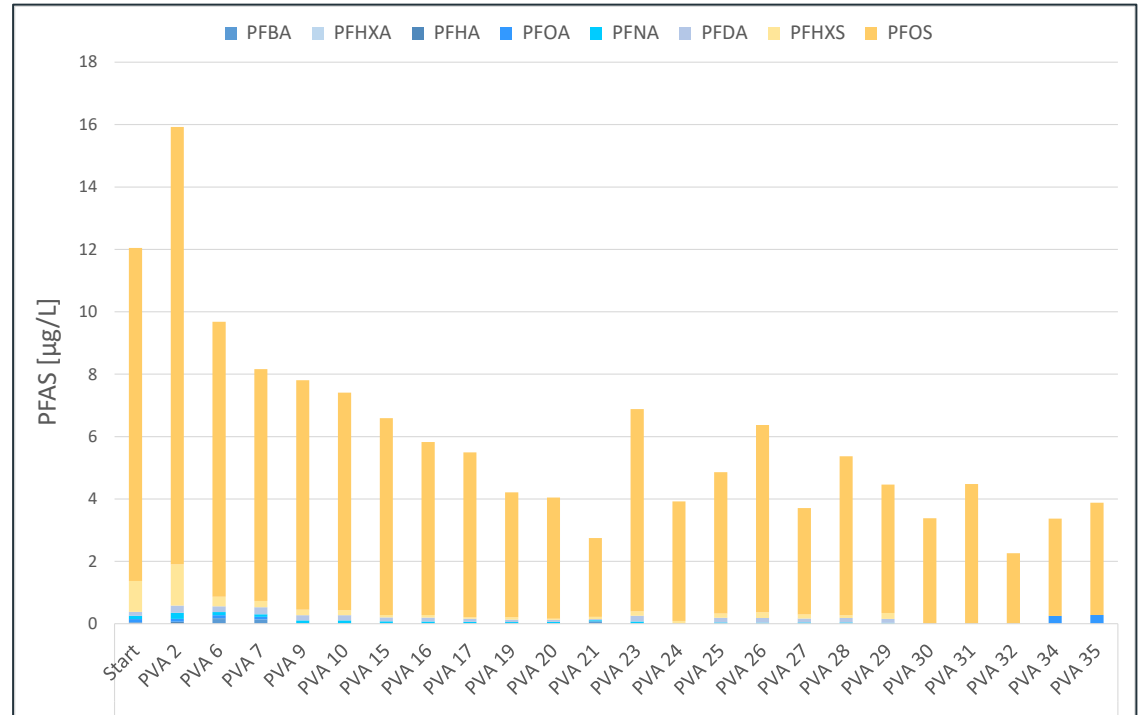
- kontinuierliche Analytik des Perkolats
- Abnahme der Elution über die Zeit
- kurzkettinge PFAS nur zu Beginn relevant
- BP-Zudosierung zwischen PVA 5 und 11
- Elutionsdaten verwendet für Standortbewertungstool



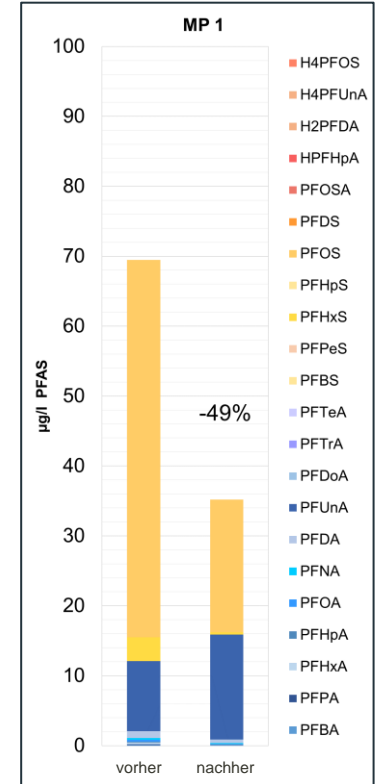
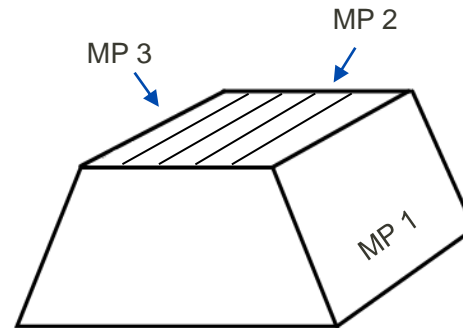
- Entnahme mehrerer Mischproben
- Analytik Feststoff und 2:1 Eluat
- max. 82% Abreinigung in MP 2
- Abreinigung von perfluorierten Sulfon- & Carbonsäuren
- PAP hier nicht abzureinigen
  - Stimulierung von Transformationsprozessen?



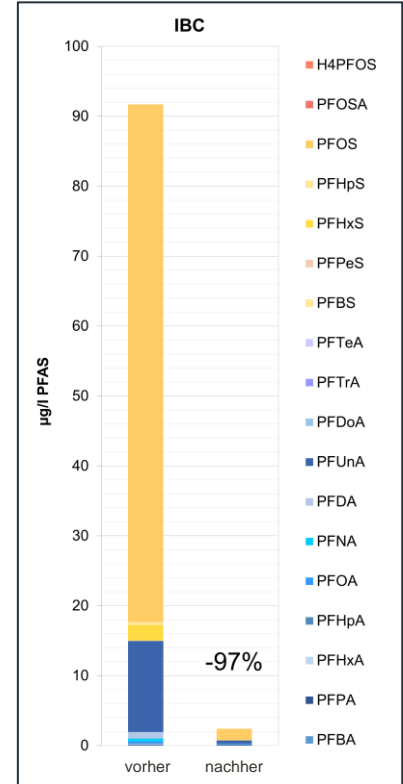
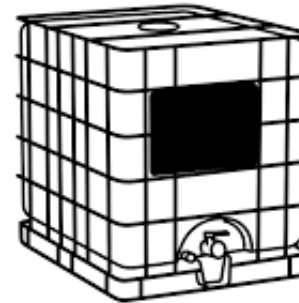
- kontinuierliche Analytik des Perkolats (je PVA)
- Abnahme der Elution über die Zeit
- geringere PFAS-Konzentrationen im Vergleich
- hauptsächlich PFOS
- Biopolymerzugabe zwischen PVA 18-23 und 32-33



- Entnahme mehrerer Mischproben
  - Entnahmestrategie analog zu Pilotversuch 2
- Analytik Feststoff und 2:1 Eluat
- max. 49% Abreinigung in MP 1
- Abreinigung von perfluorierten Sulfon- & Carbonsäuren

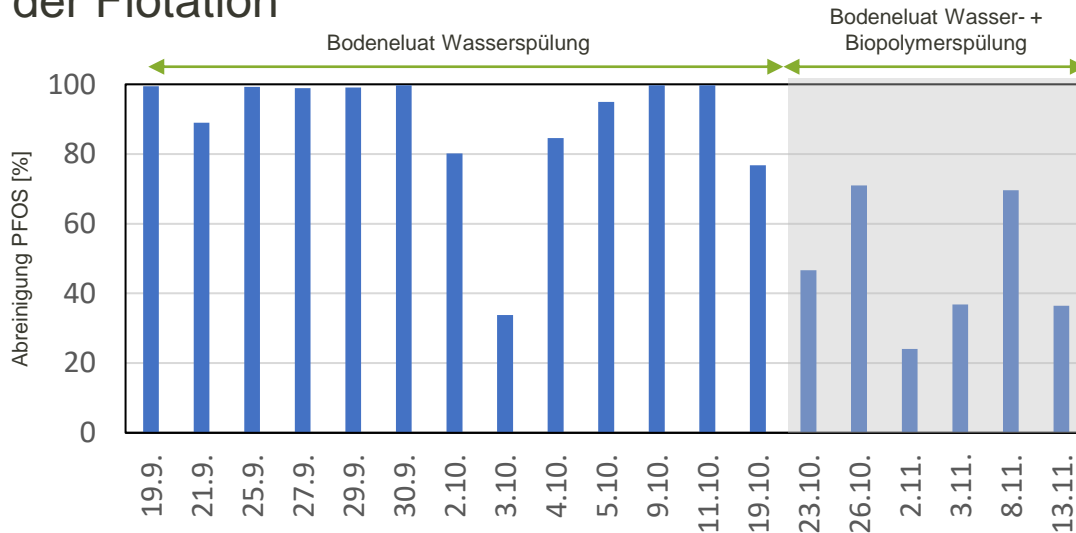


- Zusätzlicher Versuch mit AFFF-belastetem Material
  - 1 m<sup>3</sup> Bodenmaterial in IBC-Container
  - Einstellung vollständig gesättigter Verhältnisse mittels Adaption des Spülregimes aus dem Haufwerk
- Entnahme Mischprobe Feststoff vorher/nachher
- Analytik Feststoff und 2:1 Eluat
- 97% Abreinigung im IBC-Container



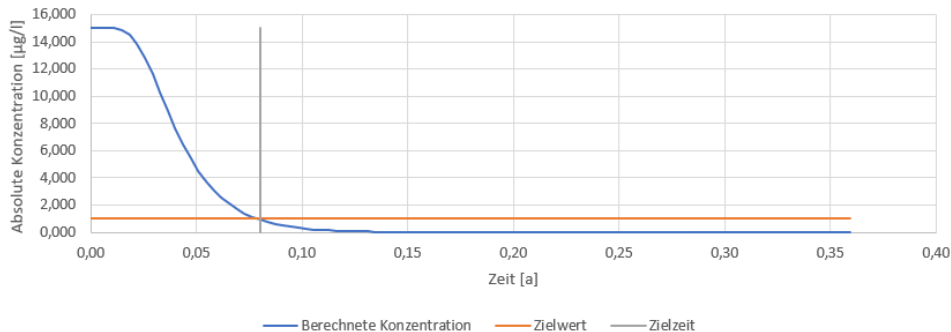


- hoher Abreinigungsgrad für PFOS in Wasser trotz hoher Flussrate, Reduktion der Abreinigung durch Beimengung Biopolymer
- Biopolymer reduziert Adsorption → Optimierung durch Biopolymerentfernung in der Flotation



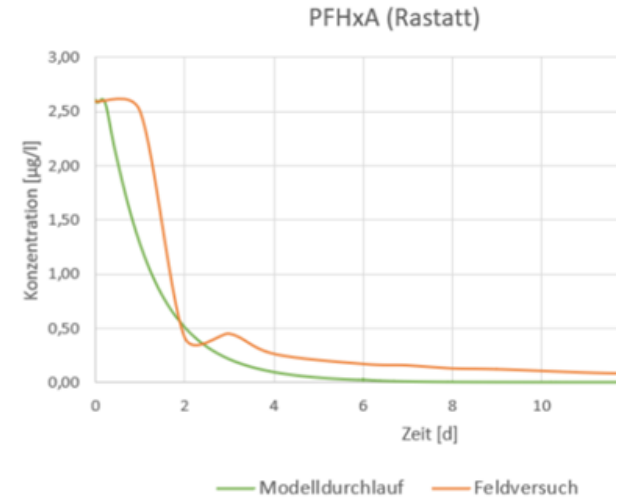
- 3 Module in Reihe
- 4 kg Aktivkohle insgesamt
- ca. 500 l/h Durchfluss
- ca. 7 min Verweilzeit
- bis zu 99% Abreinigung (ohne Biopolymer)

- Entwicklung eines Standortbewertungstools als Möglichkeit einer ersten Abschätzung der benötigten Sanierungsdauer anhand der Eingabe einiger standortspezifischer Parameter. Diese sind u. A.:
  - Stoffinventar des Standortes
  - $C_{org^-}$ , Ton- und Schluffgehalt
  - Porosität
  - Sorptionseigenschaften der Stoffe



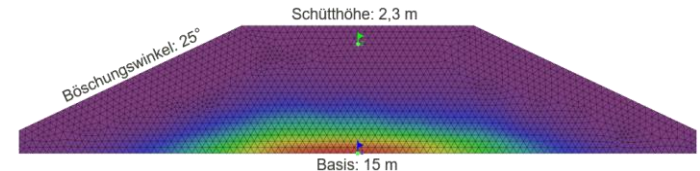
prognostizierter Sanierungsverlauf für PFOS (15 µ/l) bis zum Erreichen des Zielwertes unter beispielhaften Bedingungen analog zum Pilotversuch 1 (0,08a → ca. 30 Tage)

- Parameter können in vorangehenden Laborversuchen ermittelt werden und modular eingebaut werden
- je nach vorhandener Informationsdichte sind stufenweise genauere Aussagen über den Sanierungsverlauf möglich (verschiedene Subtools mit zunehmender Aussagegenauigkeit)
- ressourcenschonende Aussage zum Sanierungsverlauf und Vordimensionierung mittels Fitting der Parameter an die Ziele möglich



- biopolymerbasierte PFAS-Elution ist on site anwendbar
  - bis zu 97% Abreinigung im Zuge der zwei Pilottests (Feststoff)
- Abreinigungseffektivität im Boden hängt stark zusammen mit
  - Bodenart
  - Sättigungsgrad des Bodens
  - Biopolymerspülregime
- Ad-/Desorption mittels elektrostimulierter Aktivkohle zeigt bis zu 99% Abreinigung des Wassers
  - Desorption wirkt für kurzkettige PFAS besser, als für langkettige PFAS

- entwickelte Technologie ist für Feldanwendung einsetzbar
- standortspezifische Machbarkeitsstudie im Labormaßstab als Grundlage benötigt
- Machbarkeit hängt stark ab von
  - Zusammensetzung der PFAS-Belastung
  - Bodenart und weiteren Standortparametern
- sowohl on-site als auch in-situ Ansatz denkbar in Abhängigkeit der Standortfaktoren
- Standortbewertungstool basierend auf den Ergebnissen aus BioKon & FABEKO prognostiziert den Sanierungserfolg





# FABEKO

REMEDIATION OF PFAS IN  
SOIL & GROUNDWATER

**Danke für die Aufmerksamkeit!**

**Mull & Partner Ingenieurgesellschaft mbH**

Neulandstraße 2-4

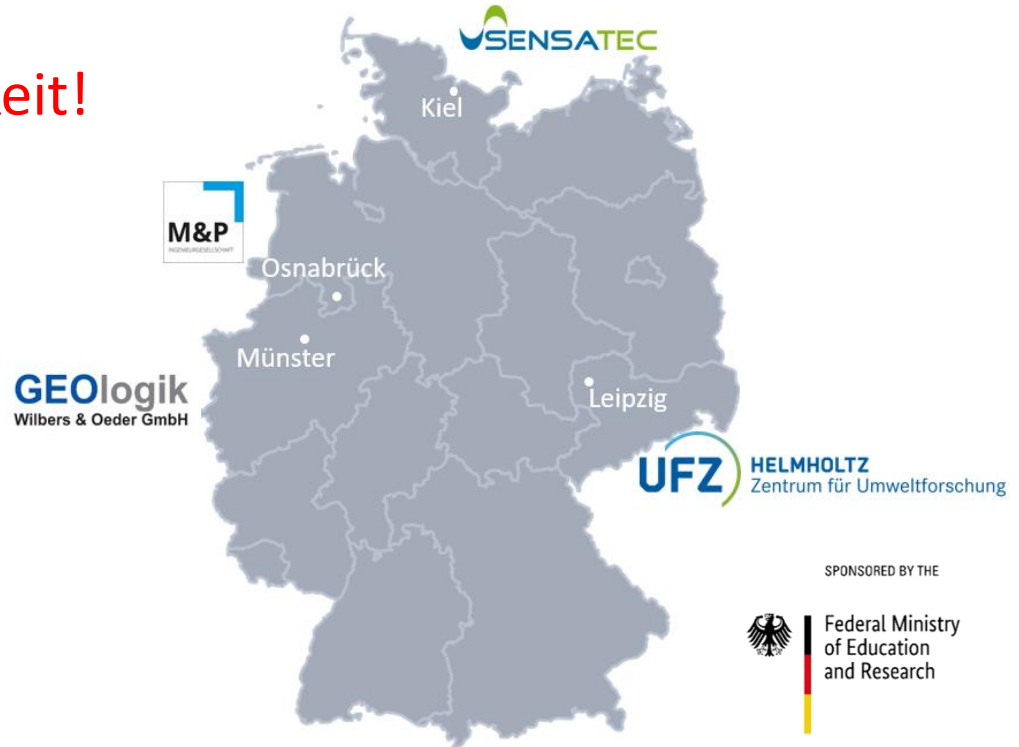
D- 49084 Osnabrück

**Aglaia Nagel, M.Sc.**

Phone: +49 511 12314 034

Mail: [aglaia.nagel@mup-group.com](mailto:aglaia.nagel@mup-group.com)

Web: [www.mullundpartner.de](http://www.mullundpartner.de)



SPONSORED BY THE



Federal Ministry  
of Education  
and Research