



# IN-SITU-SANIERUNG EINES PFAS-SCHADENS DURCH BIOPOLYMERRELUTION

A. Wilken, M. Kunz, S. Hüttmann (Sensatec GmbH)  
S. Kreutzer (ECOS Umwelt Nord)

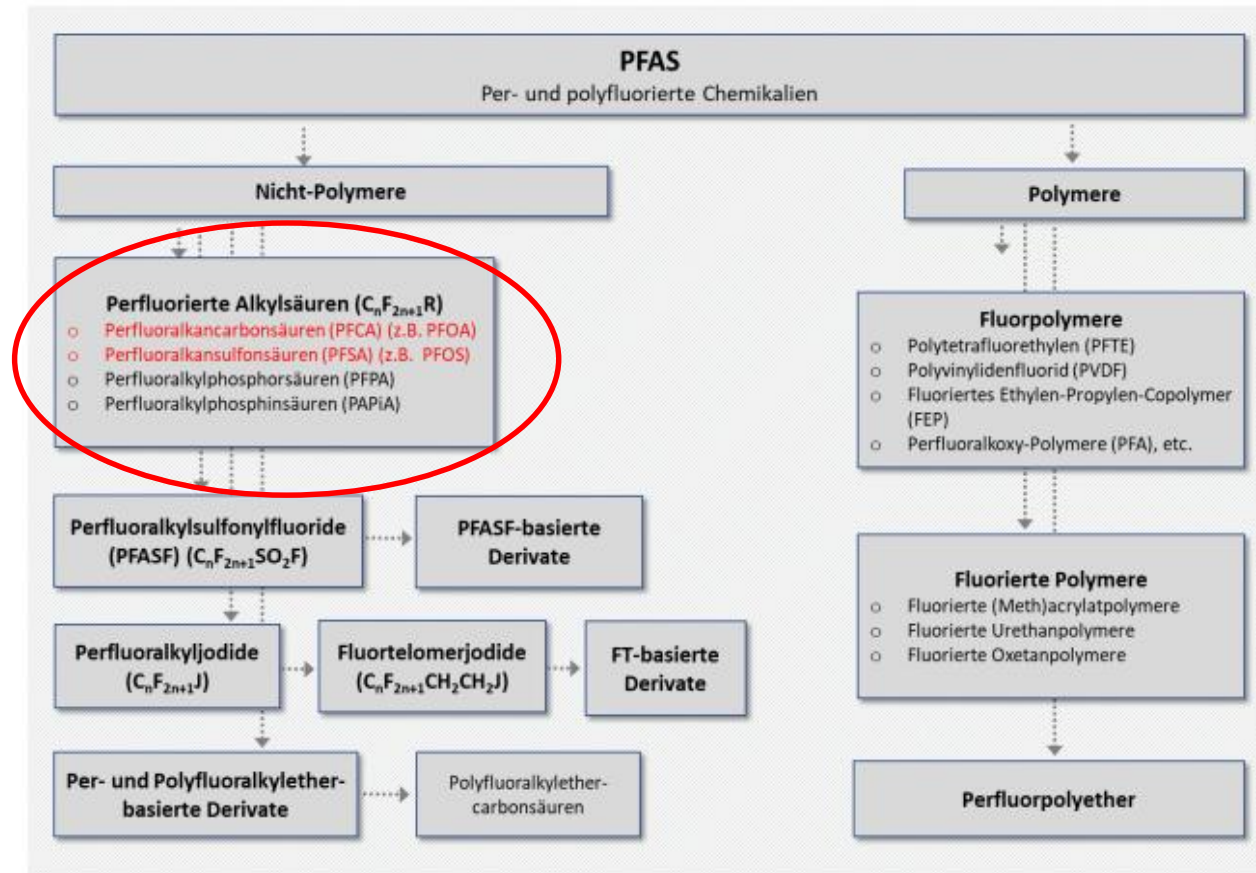
16.12.2025

# INHALT

- ▶ Einleitung
  - PFAS
  - Standort
  - Verfahren
- ▶ Labormachbarkeitsstudie
- ▶ Aufbau Feldanwendung
- ▶ Durchführung Feldanwendung
- ▶ Ergebnisse
- ▶ Ausblick

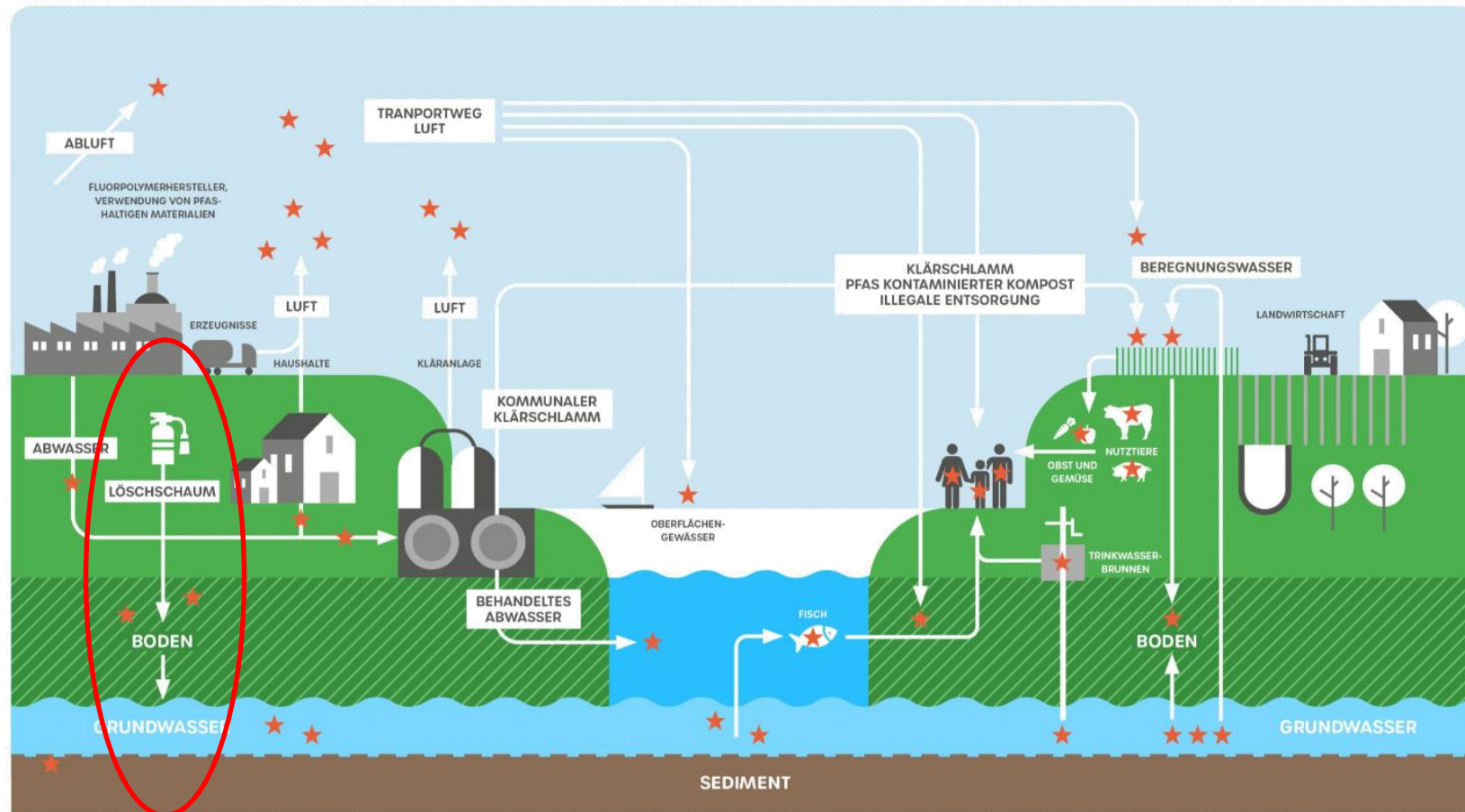
# REMINDER PFAS

- ▶ Chemikaliengruppen von > 10.000 Einzelkomponenten
- ▶ ausschließlich vom Menschen produziert
- ▶ Produktion seit ca. 40er Jahren
- ▶ Anwendung in Industrie und Konsumgütern
- ▶ Fokus in der Umweltsanierung auf den
  - perfluorierten Alkylsäuren
  - Precursor Substanzen
  - Ersatzstoffen



[9]

# PFAS IN DEN UMWELTKOMPARTIMENTEN

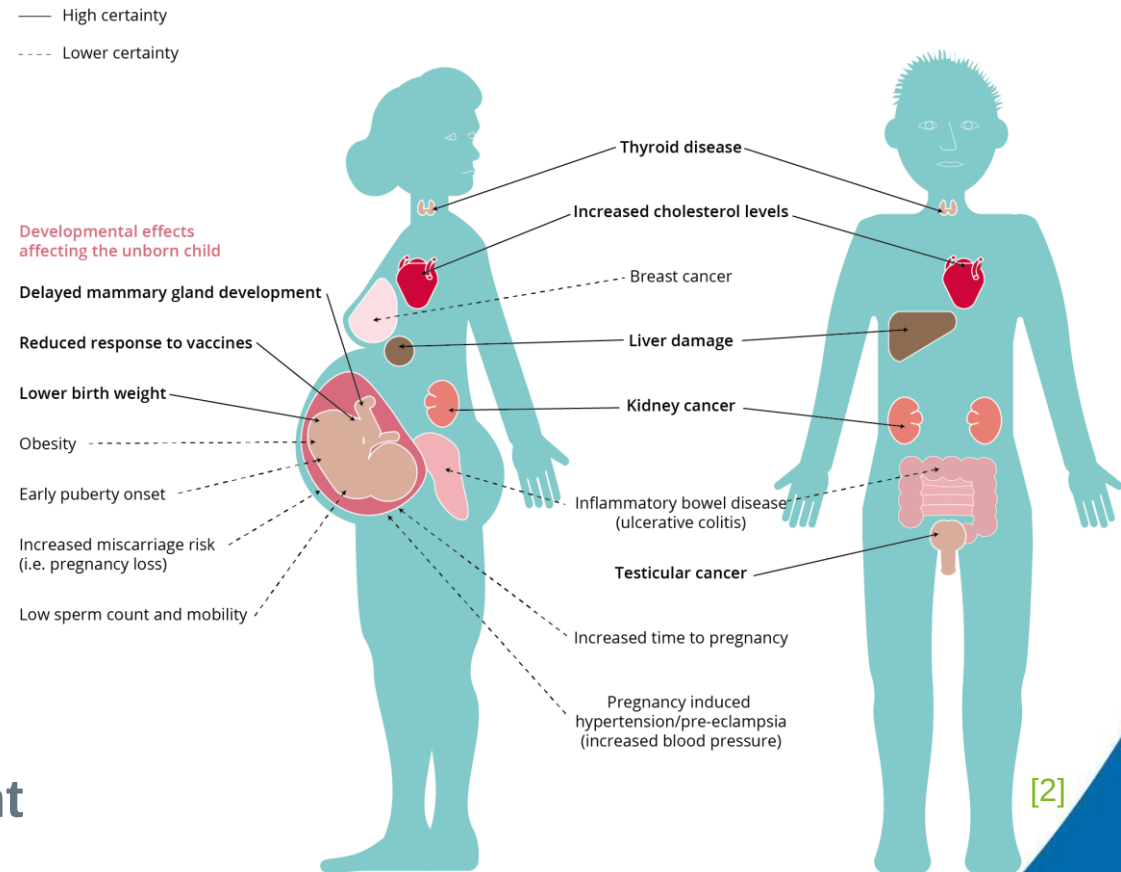


★ = PFAS

[1]

# GEFÄHRDUNG DURCH PFAS FÜR DEN MENSCH

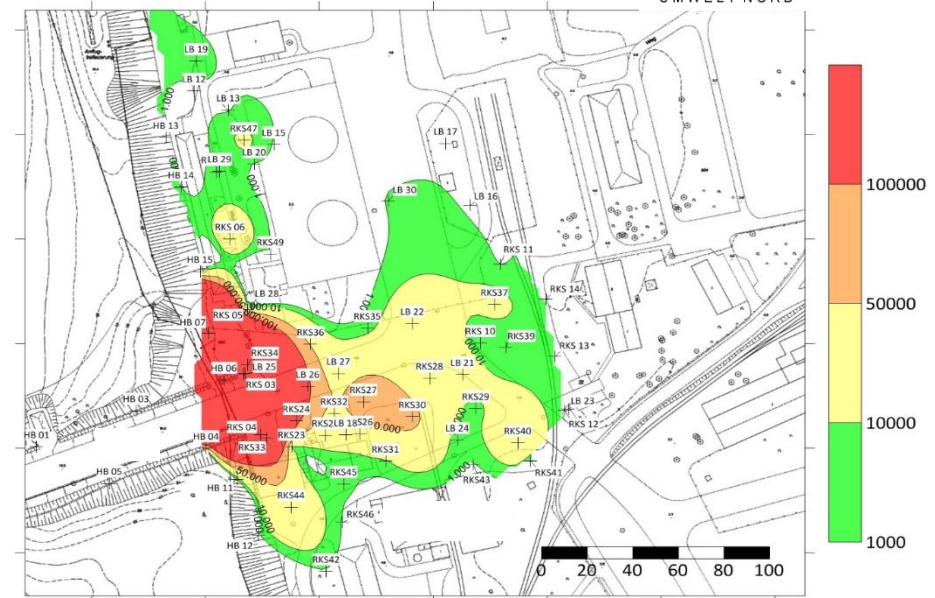
- ▶ hohe Halbwertszeiten im Körper
- ▶ Gesundheitsprobleme durch PFAS
  - Leberschäden
  - Schilddrüsenerkrankungen
  - Krebs
  - Fruchtbarkeitsstörungen
- ▶ besonders starke Folgen für Embryonen und die Kindesentwicklung
- ▶ UBA Studie „Mit PFOS waren **100 Prozent** aller Kinder in der Studie belastet“



# STANDORT

- ▶ PFAS Eintrag durch Löschmittel
- ▶ mehrere Eintragspunkte → mehrere Fahnenverläufe
- ▶ gemäß Sanierungsuntersuchung (ECOS Umwelt Nord) präferierte Sanierungsvariante - Sicherung
  - quellnahe Sicherungen in Form von Sorptionsbarrieren
  - Fahnensicherungen, falls erforderlich
  - in situ Bodenelution als Ergänzung zur Reduktion der Fracht und Erhöhung der Laufzeiten der Barrieren

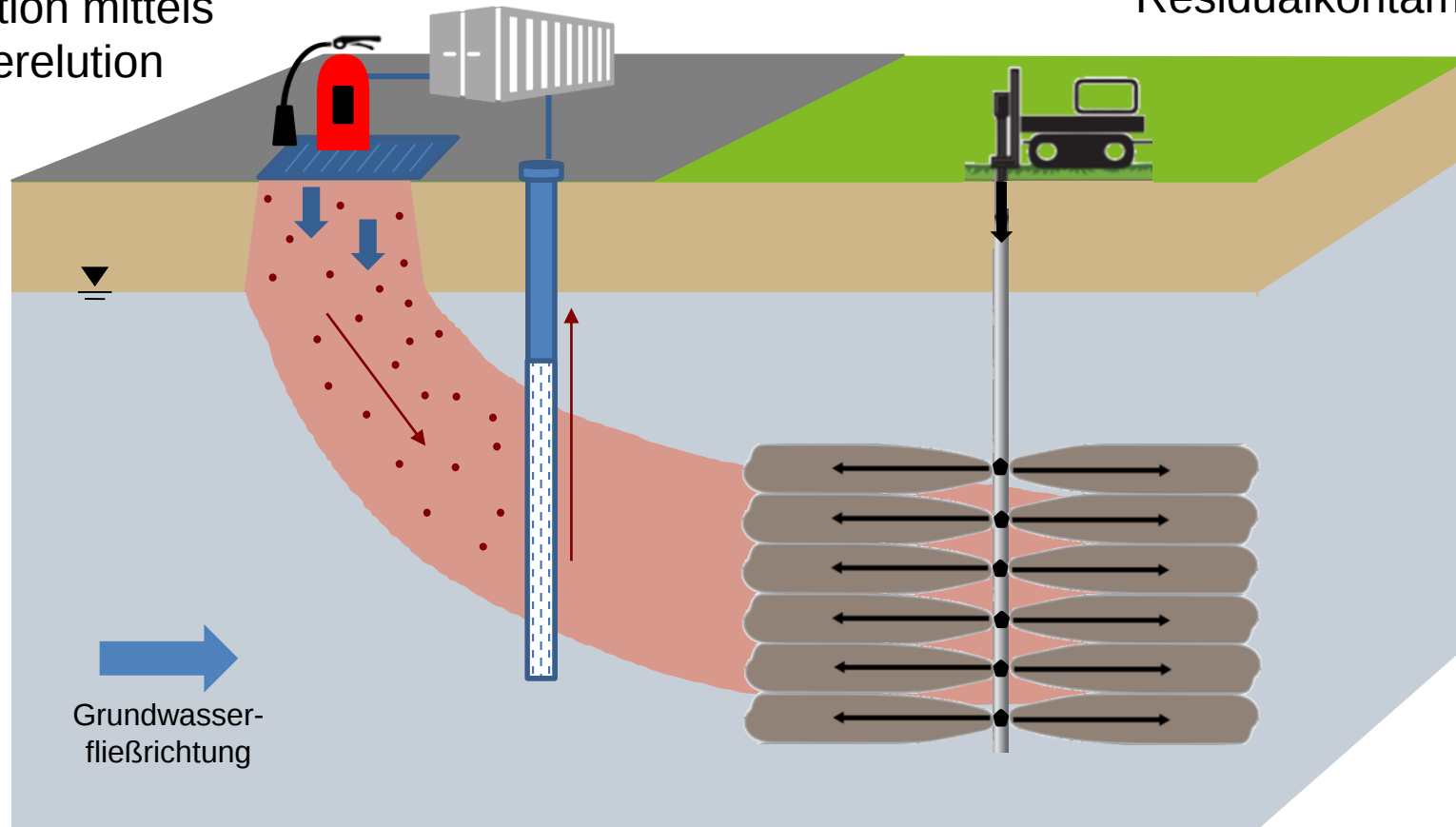
➡ Durchführung einer in situ Bodenelution im Teilbereich eines Schadensherdes zur standortspezifischen Prüfung der Wirksamkeit



# VERFAHRENSKOMBINATION IN SITU

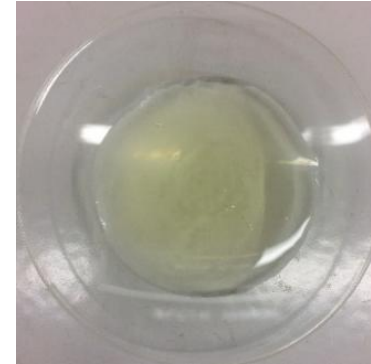
Phase 1:  
Frachtreduktion mittels  
Biopolymerelektion

Phase 2:  
Immobilisierung der  
Residualkontamination



# BIOPOLYMERE

- ▶ oberflächenaktive Substanzen
- ▶ gut biologisch abbaubar
- ▶ amphiphil
- ▶ Hauptbestandteile:
  - Aminosäuren
  - Zuckerverbindungen
  - Fettsäuren und Lipide
- ▶ Variierende Zusammensetzung liefern sehr unterschiedliche (Elutions-) Eigenschaften



## ANWENDUNG DES VERFAHRENS

- ▶ Machbarkeit des Verfahrens muss standortspezifisch untersucht werden
- ▶ Abreinigung abhängig von
  - PFAS Ausgangskomponente
  - Bodentyp
  - Organikanteil
- ▶ Laborstudie zur Bestimmung der
  - Eluierbarkeit der vorliegenden PFAS-Komponenten
  - Polymereinsatzkonzentration
  - Elutionsdauer

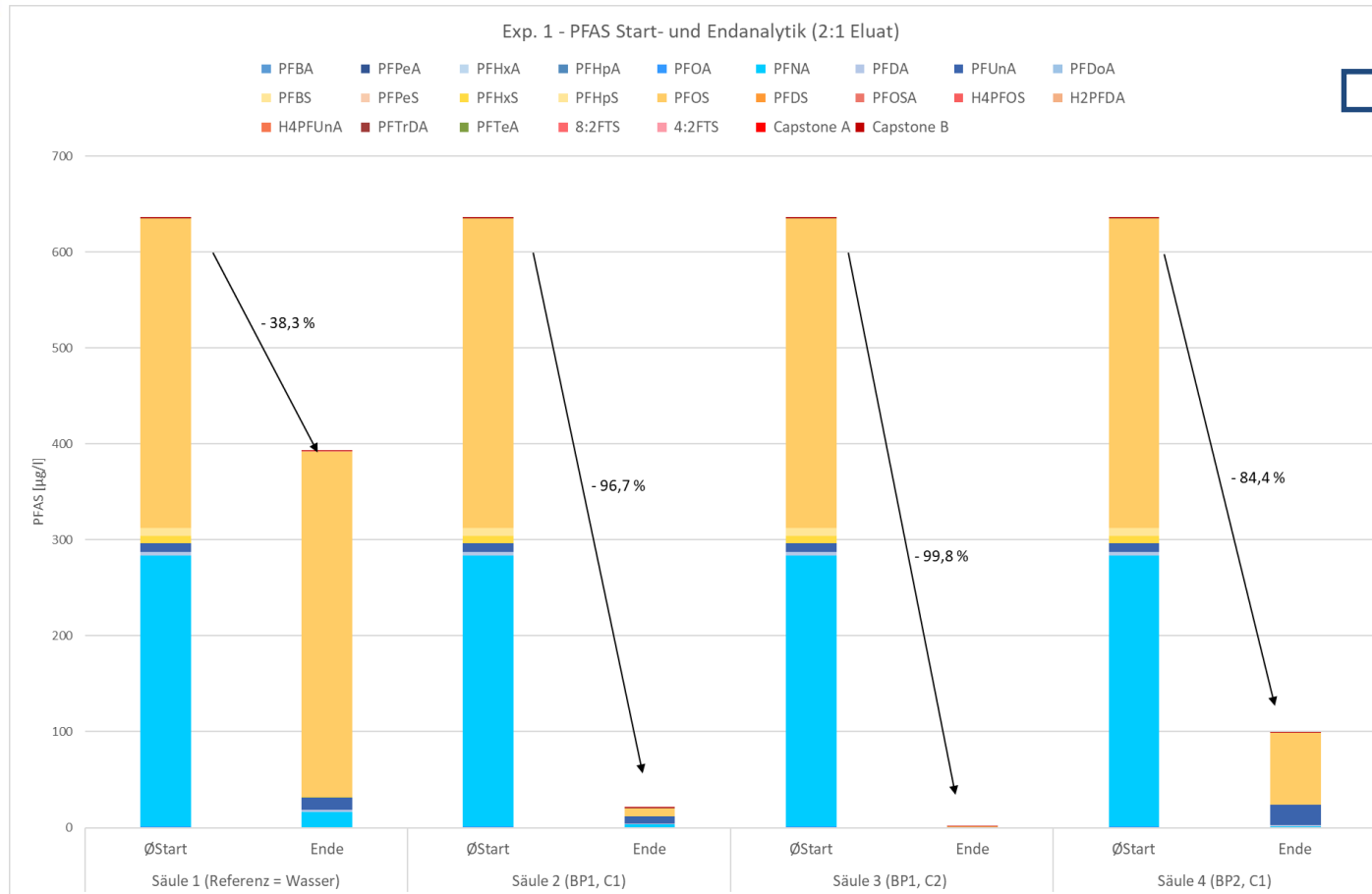


# AUFBAU DER LABORSTUDIE

- ▶ Laborstudie bestehend aus zwei Untersuchungen
  - Exp. 1 – Biopolymerauswahl
  - Exp. 2 – Optimierung des Biopolymereinsatzes
- ▶ Säulenaufbau
- ▶ Standortboden wird versch. Biopolymerspülungen unterworfen
- ▶ Bestimmung des Abreinigungserfolges über
  - Bodenanalytik vorher/nachher
  - Perkolatanalytik
- ▶ Vergleich zu unbehandelter Referenz (Leitungswasser)



# EXPERIMENT 1 - BIOPOLYMER-AUSWAHL

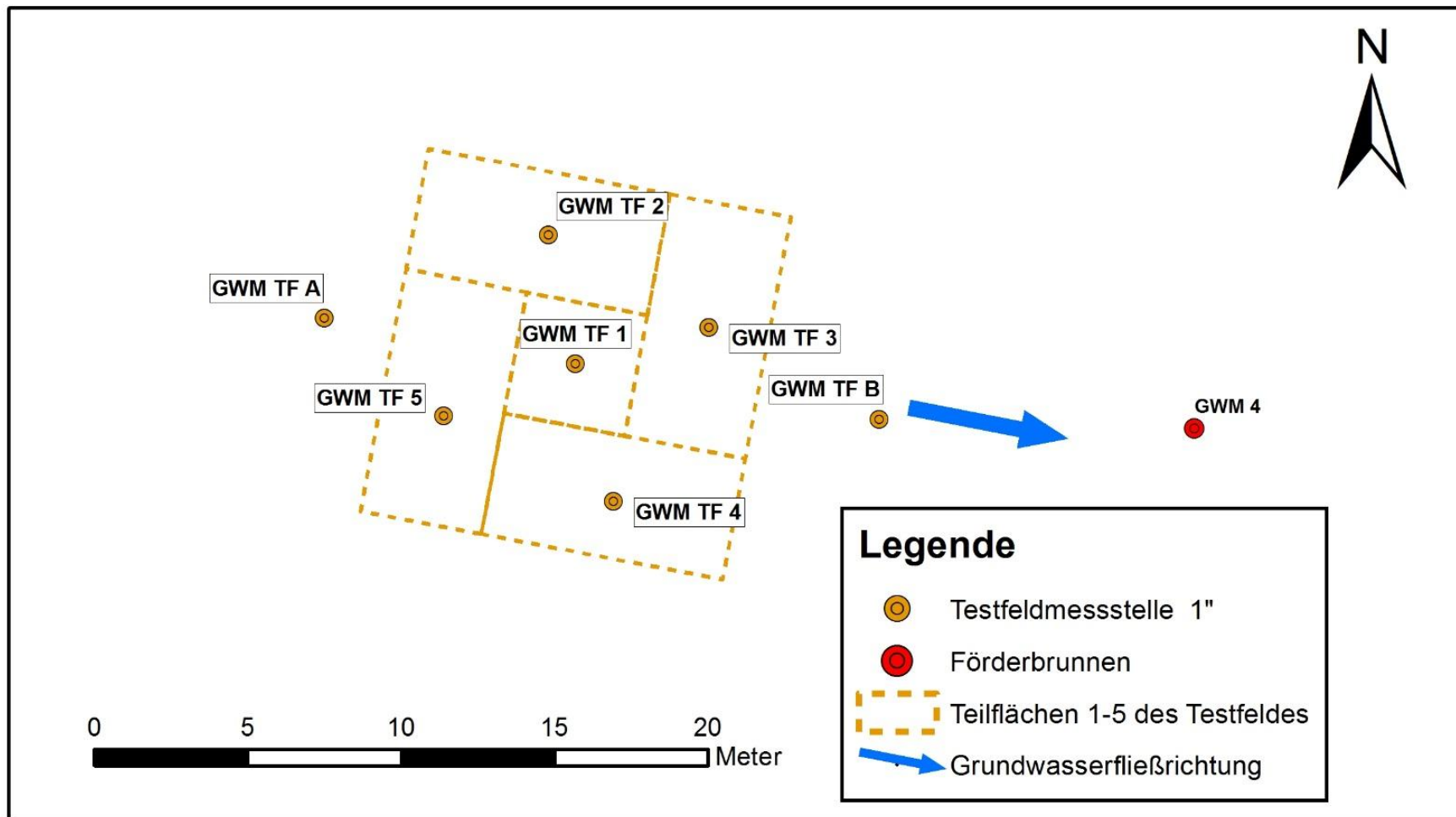


## Experiment 2 Optimierung des Biopolymer- einsatzes

Identifikation eines  
geeigneten Spülzyklus  
für eine effiziente und  
produktsparende,  
sowie nachhaltige  
Elutionsstrategie

Ergebnisse Experiment 1 - PFAS im 2:1 Eluat vor und nach der Elution

# LAGEPLAN FELDDANWENDUNG



# ABLAUF DER FELDDANWENDUNG



Erfassung  
Ausgangs-  
belastung  
Boden

Erfassung  
Zwischen-  
belastung  
Boden I

Erfassung  
Zwischen-  
belastung  
Boden II

Erfassung  
Restbelastung  
Boden

29.10.

25.11.

12.12.

17.01.

21.02

14.03

02.06

Aufbau  
Pilotversuch

H<sub>2</sub>O

BP

H<sub>2</sub>O

Sicherung  
I

H<sub>2</sub>O

Sicherung  
II

Auswertung  
Pilotversuch

## KENNZAHLEN FELDANWENDUNG

|                       |   |                                     |
|-----------------------|---|-------------------------------------|
| ▶ Wasserspülungen     | } | 5314 m <sup>3</sup> Rohwasser GMW 4 |
| ▶ Biopolymerspülungen |   |                                     |
| ▶ Wasserspülungen     |   | 2564 m <sup>3</sup> für Elution     |

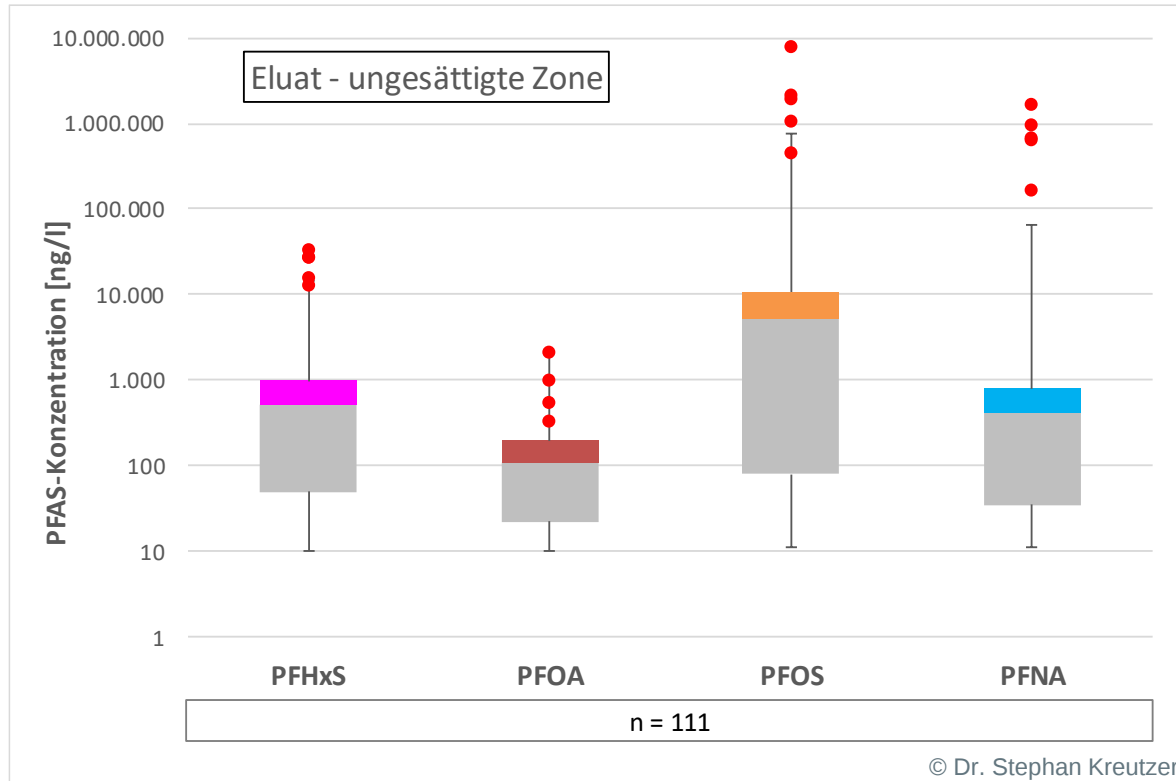
- 5-wöchiger Sicherungsbetrieb 2350 m<sup>3</sup>
- weitere 3-wöchige Elutionsphase Wasserspülungen
- 12-wöchiger Sicherungsbetrieb 6.450 m<sup>3</sup>

➡ Gesamtentnahmemenge 13.730 m<sup>3</sup>

# IMPRESSIONEN FELDANWENDUNG

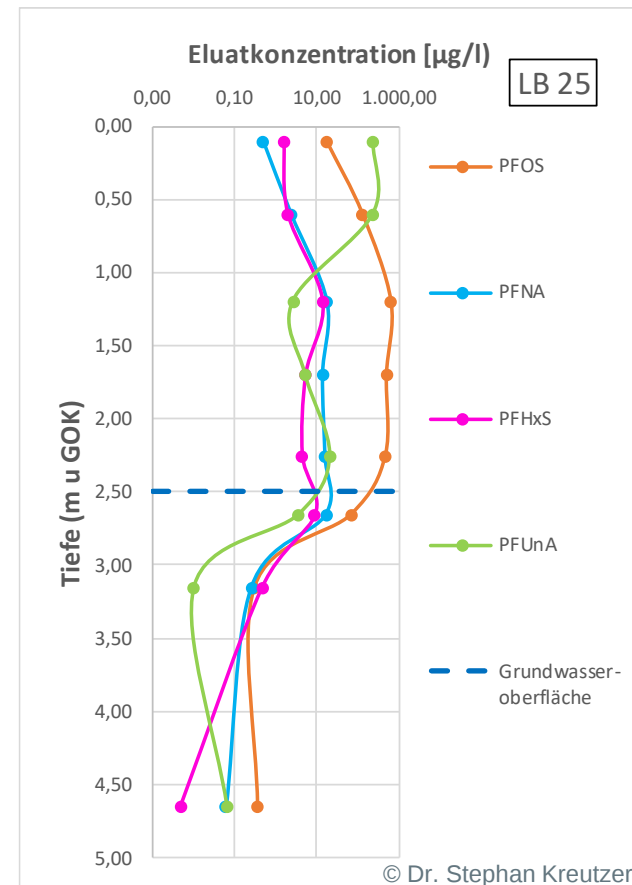


# AUSGANGSBELASTUNG



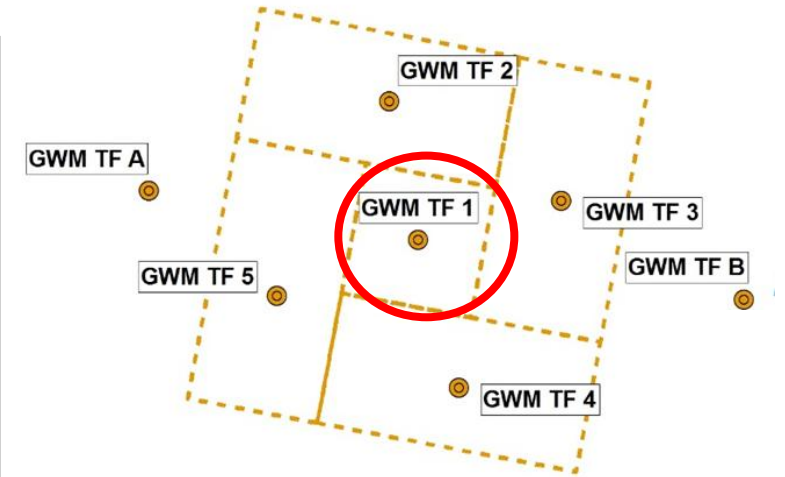
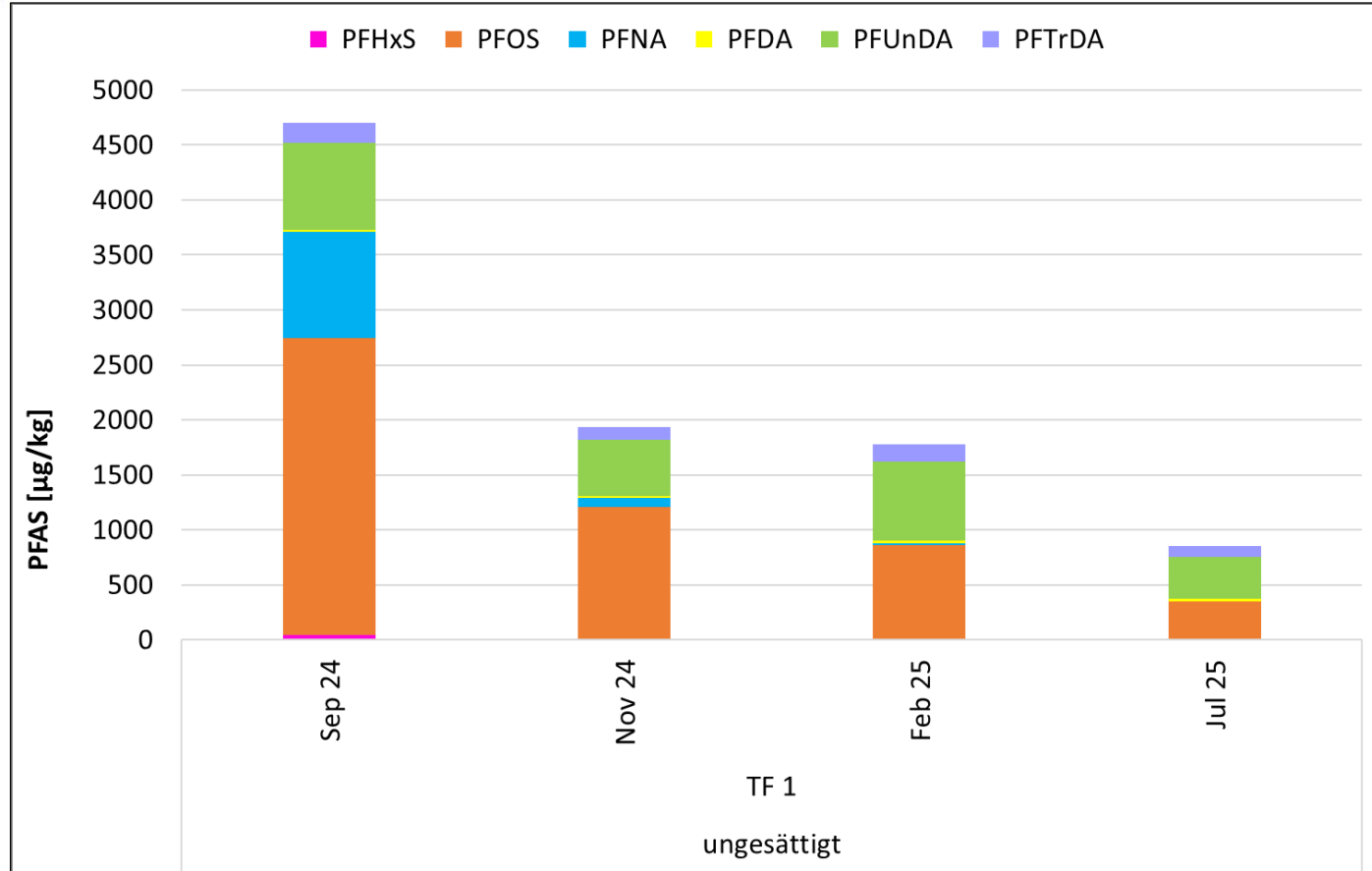
Boxen: Verteilung der Daten aus der SU  
rote Kreise: Ausgangsbelastung im Testfeld

➡ Testfeld „Hot-Spot“ innerhalb der Schadensquelle

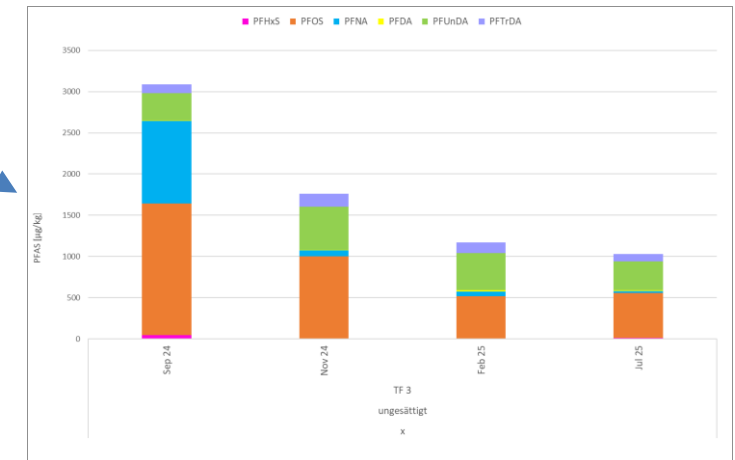
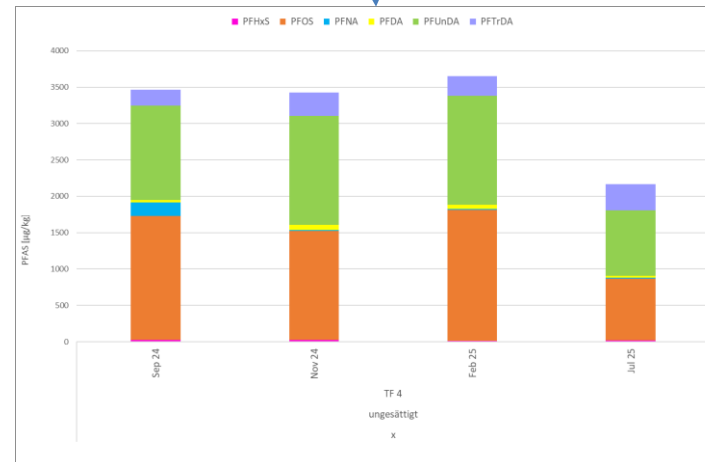
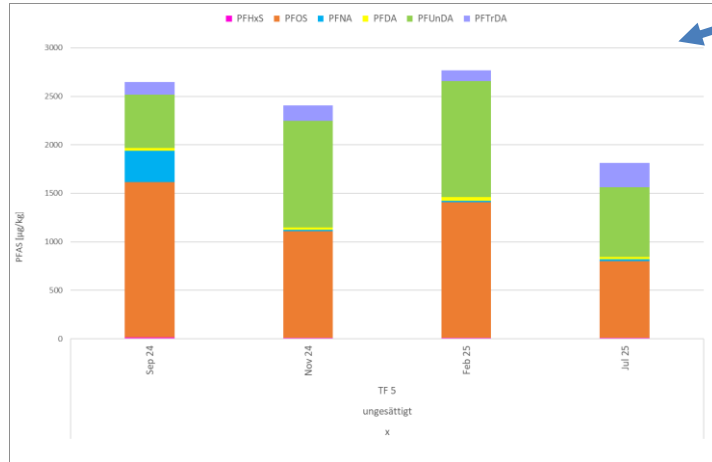
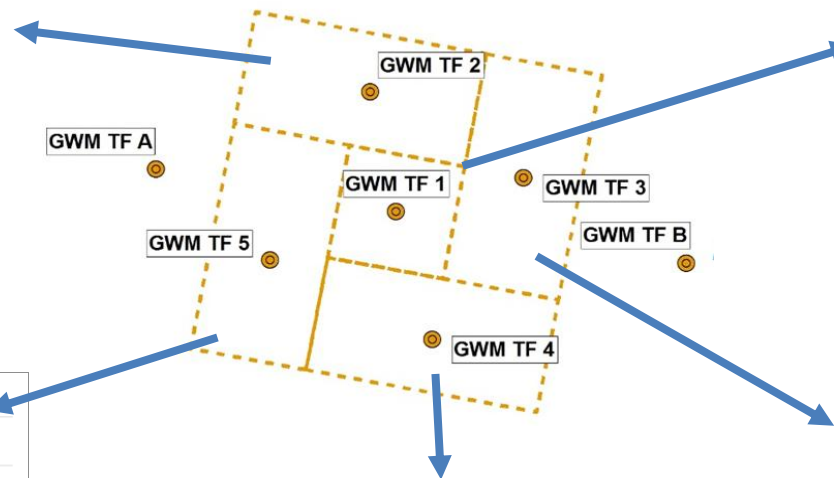


Vertikale Verteilung der Einzelstoffe:  
PFOS, PFNA und PFHxS: ähnlich  
PFUnDA: vertikal wenig verlagert

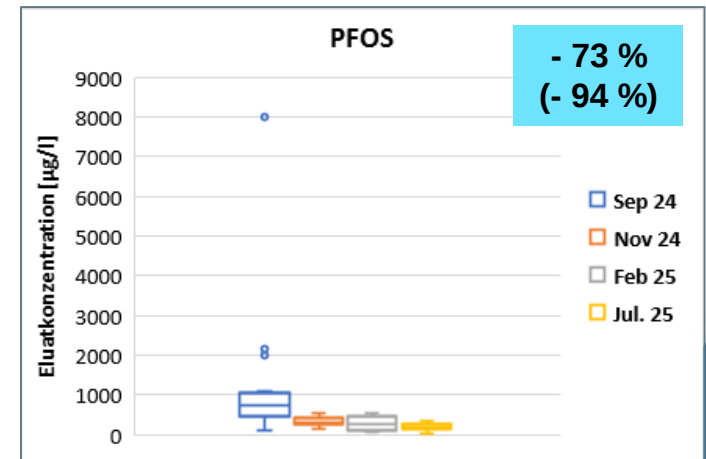
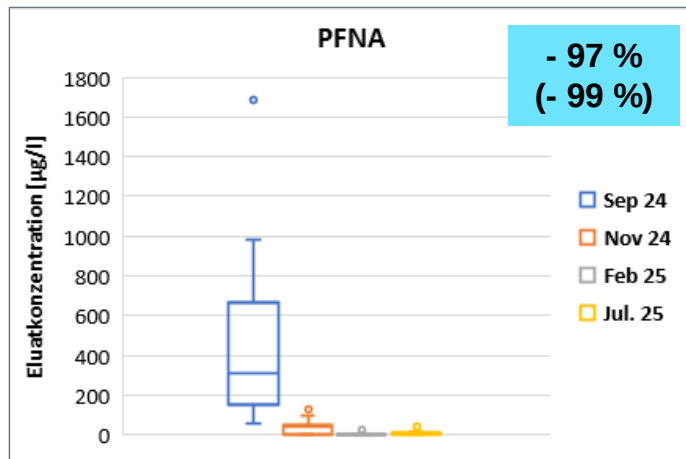
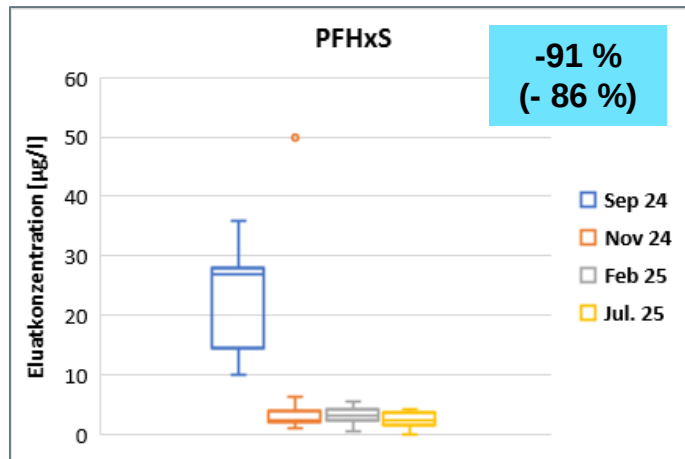
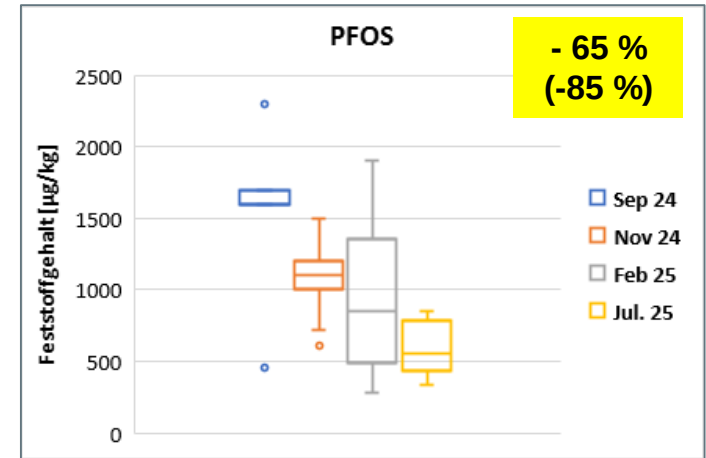
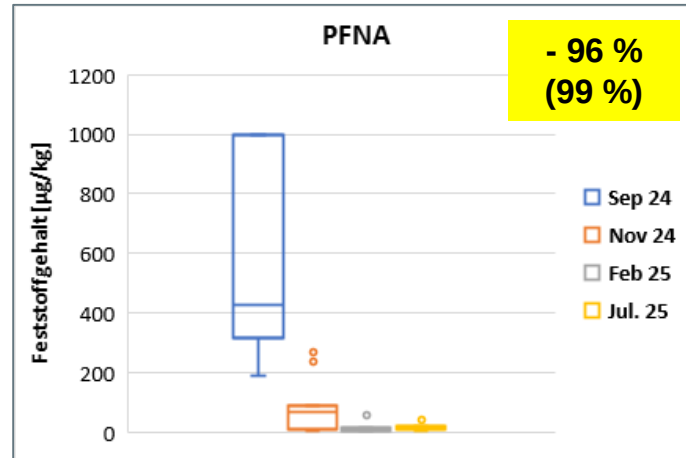
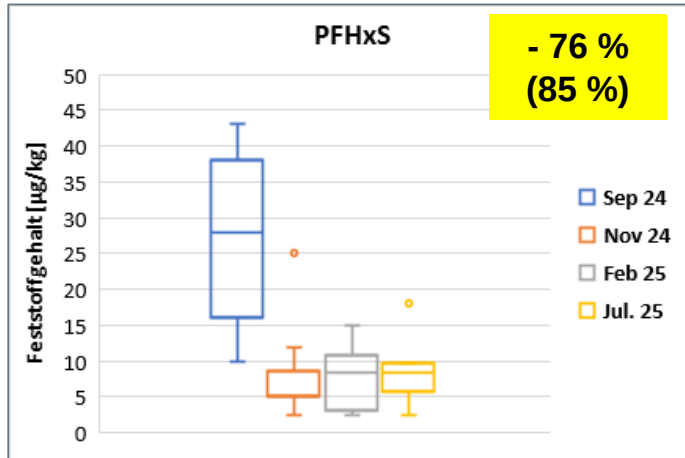
# ABNAHME DER FESTSTOFFGEHALTE – TEILFLÄCHE 1



# ABNAHME DER FESTSTOFFGEHALTE

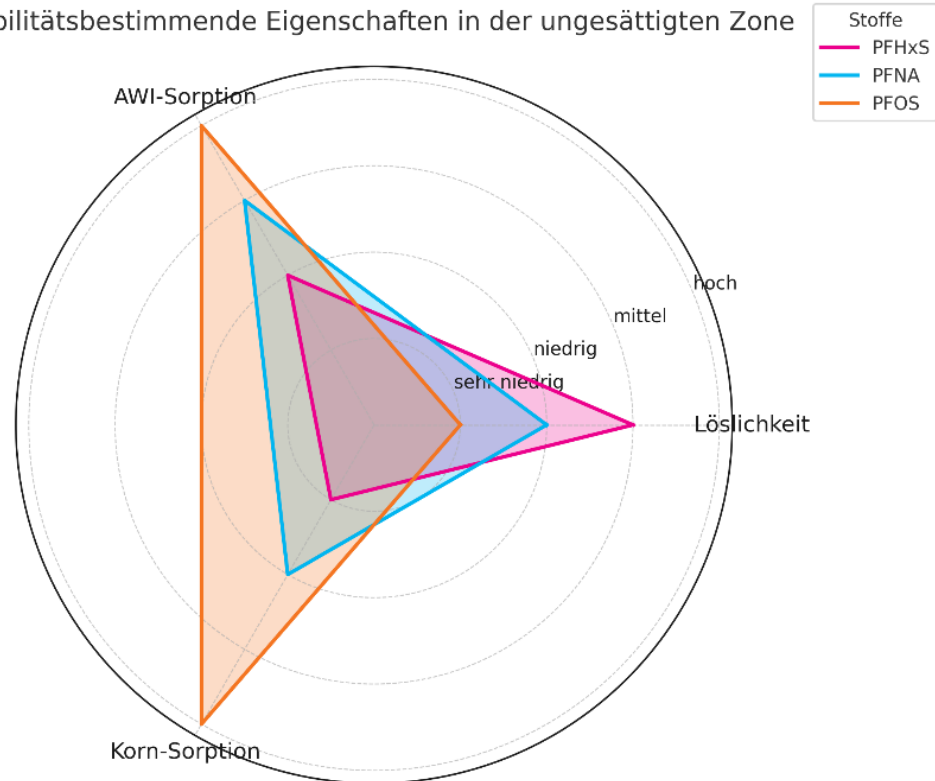


# ABNAHME DER FESTSTOFFGEHALTE UND ELUATKONZENTRATIONEN (UNGESÄTTIGTE ZONE)

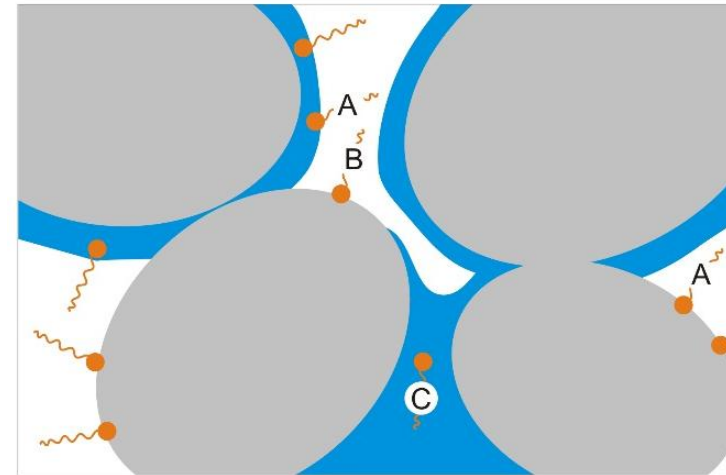


# MOBILITÄT VON PFHXS, PFNA UND PFOS

Mobilitätsbestimmende Eigenschaften in der ungesättigten Zone



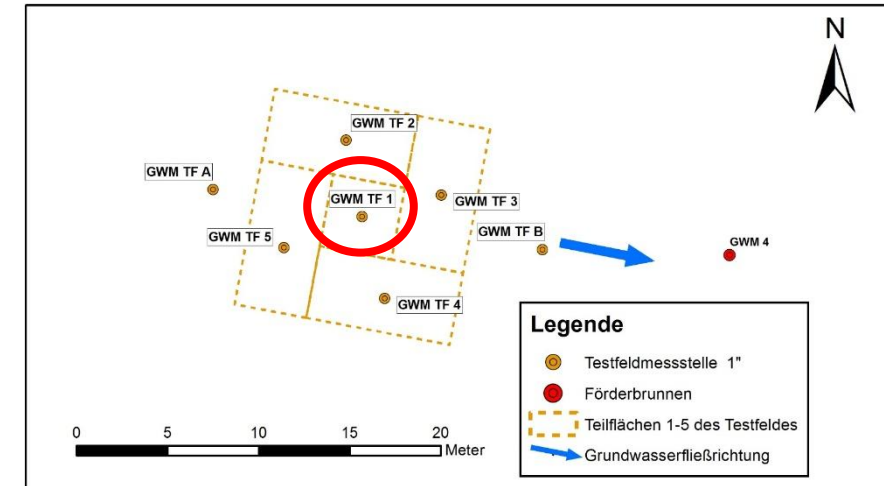
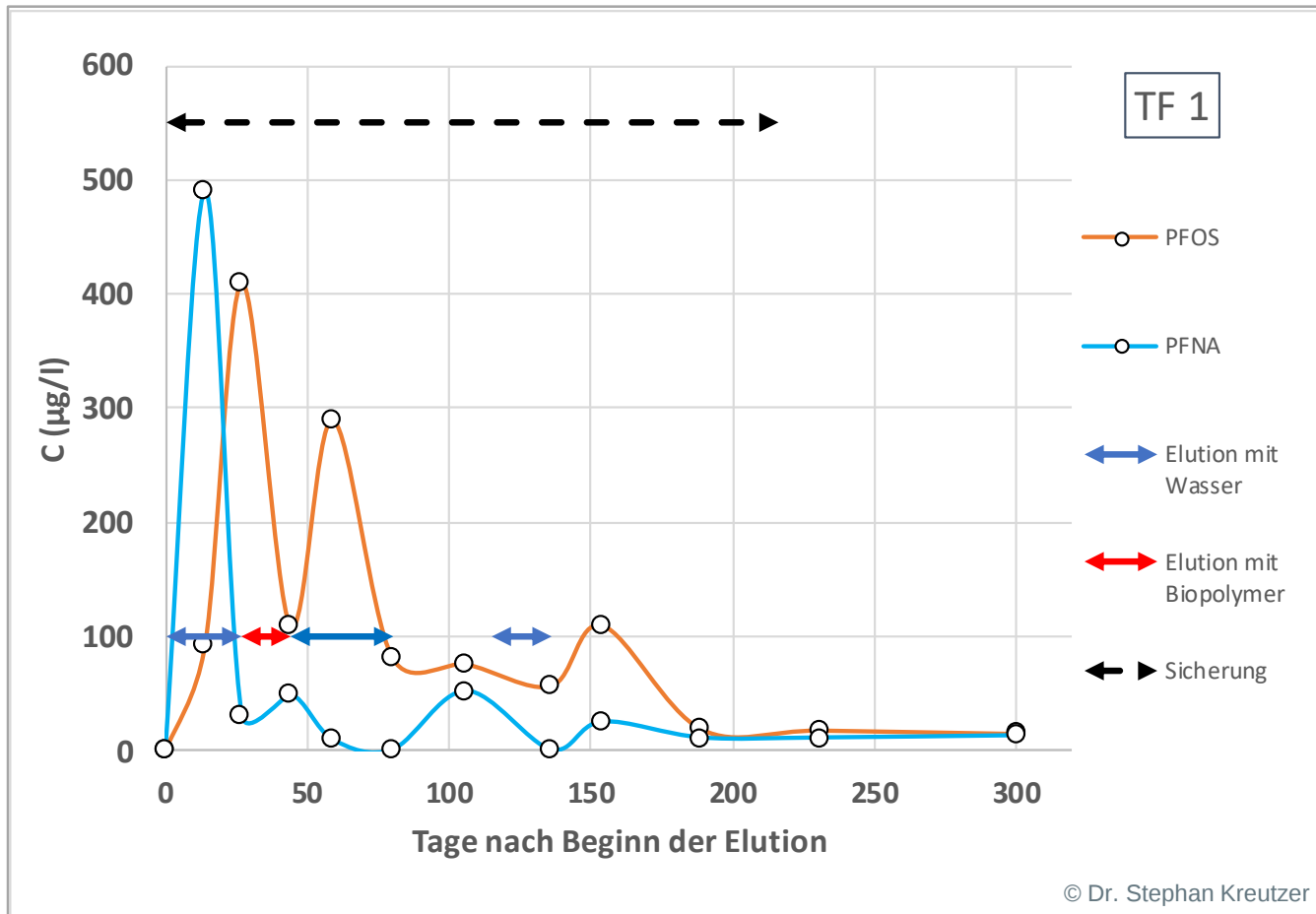
© Dr. Stephan Kreutzer



© Dr. Stephan Kreutzer

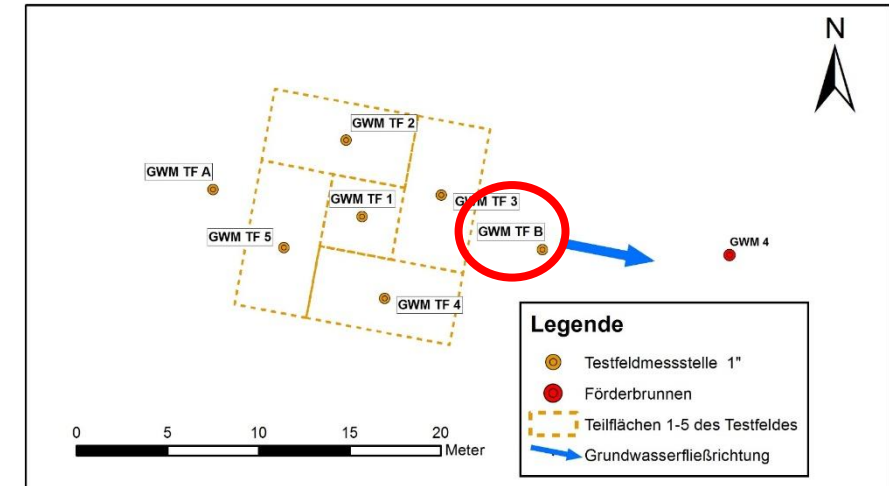
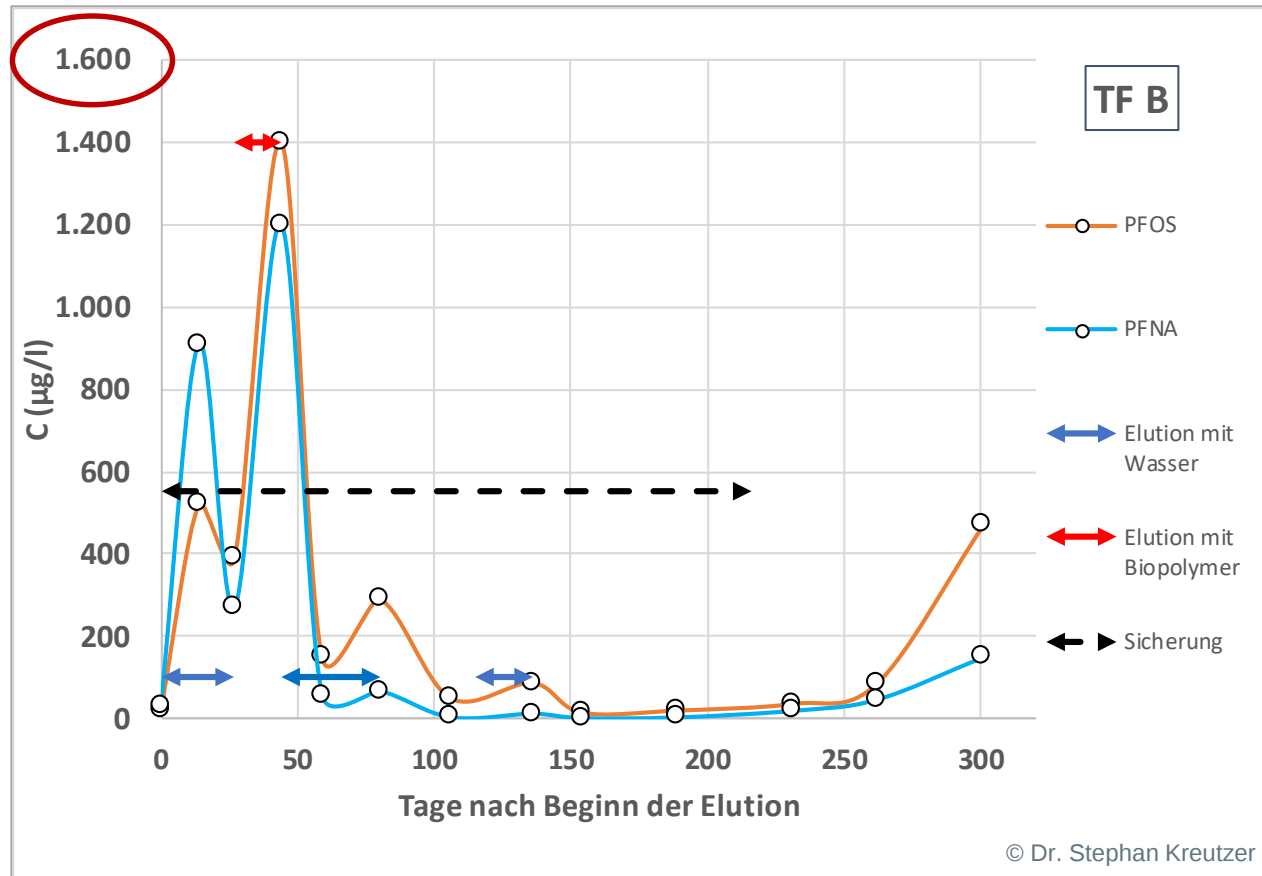
**Gesamtmobilität: PFHxS > PFNA > PFOS**

# SCHADSTOFFKONZENTRATIONEN IM GRUNDWASSER (UNTER DEM ELUTIONSFELD)



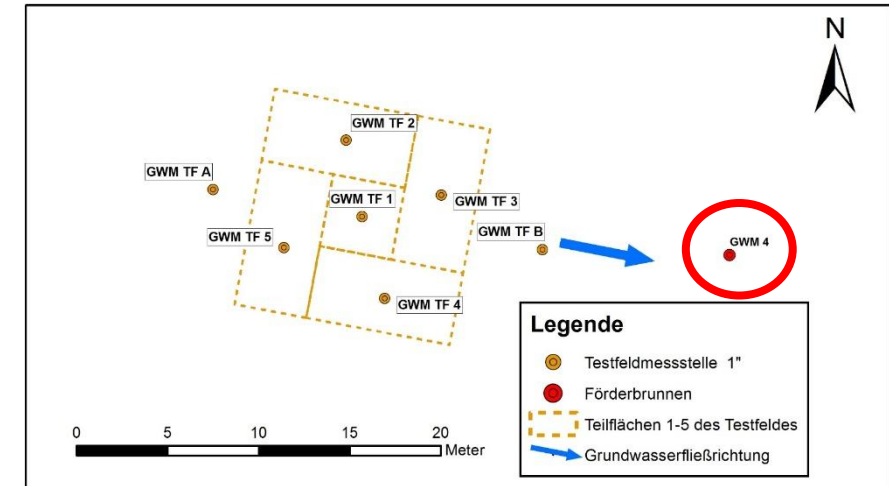
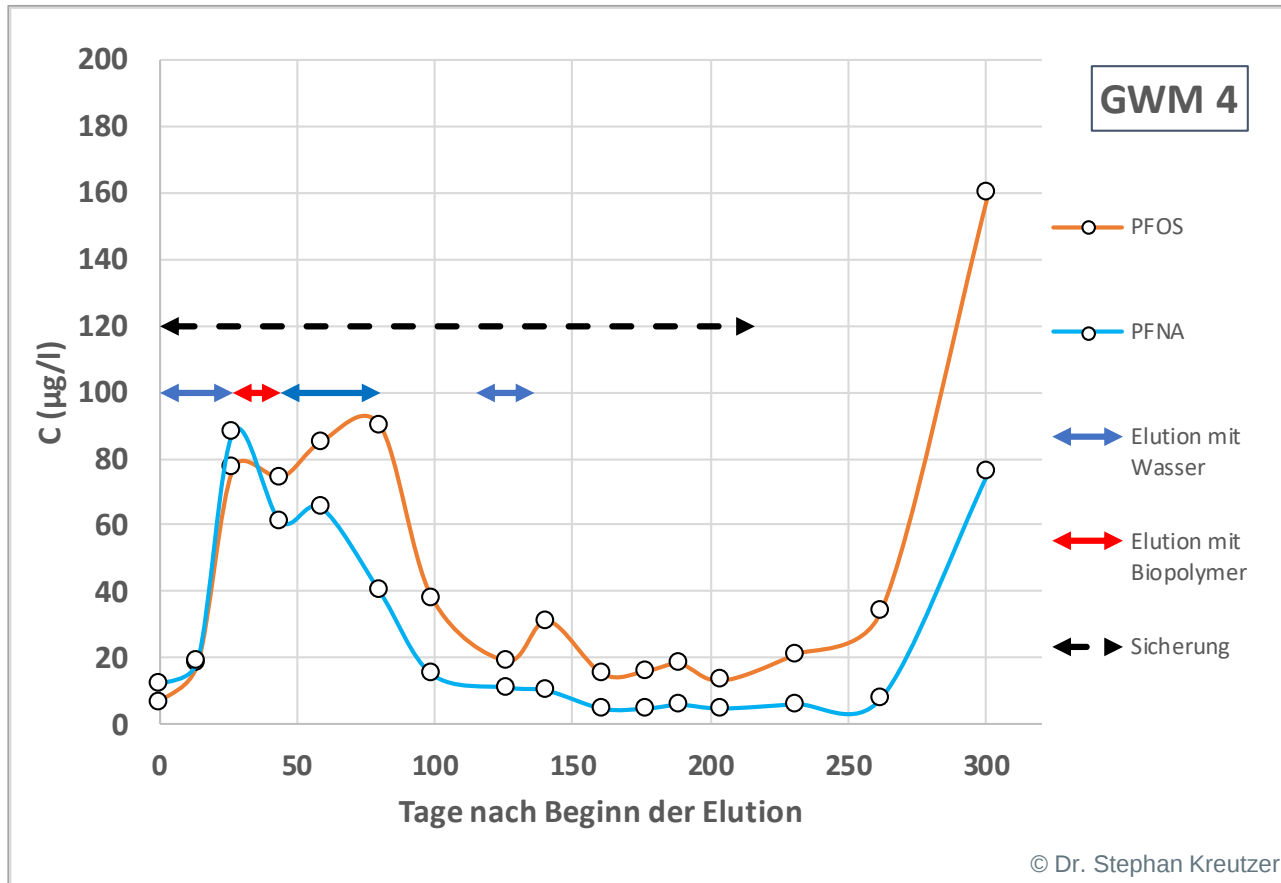
- ▶ zunächst PFNA Peak
- ▶ nachfolgend mehrere PFOS Peaks vor und nach Biopolymereinsatz

# SCHADSTOFFKONZENTRATIONEN IM GRUNDWASSER (NAHER ABSTROM)



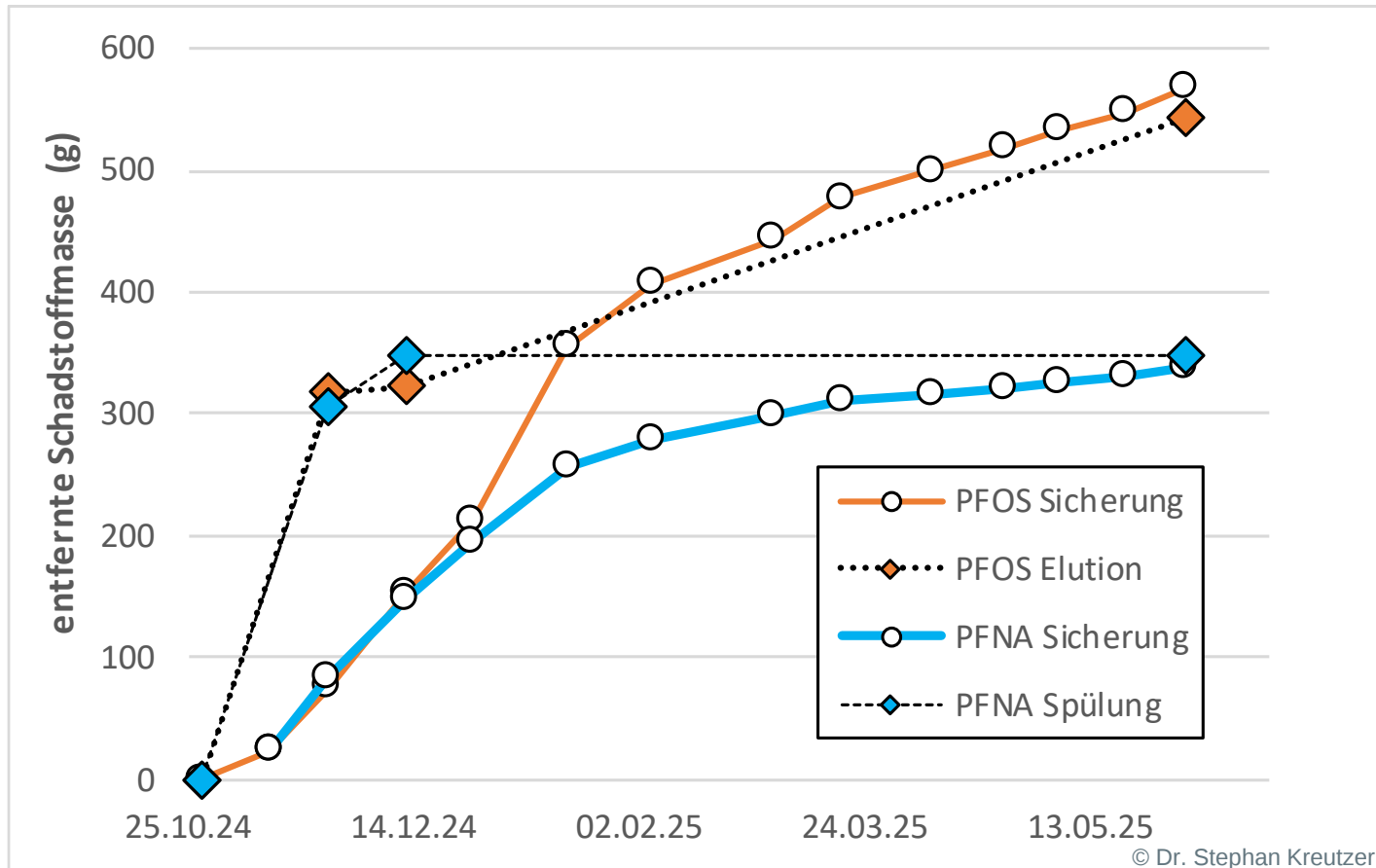
- ▶ deutlich höhere Konzentrationen
- ▶ zwei PFNA Peaks
- ▶ PFOS Peak aus TF1 verzögert in TF B messbar

# SCHADSTOFFKONZENTRATIONEN IM GRUNDWASSER (SICHERUNGSBRUNNEN)



- ▶ Ansteigende Konzentration im Sicherungsbrunnen GWM 4
- Weitere Überwachung aufgrund nötig

# BILANZIERUNG UND GRÖßENORDNUNG DER ABGESCHÖPFTEN MASSEN



PFOS-Masse entfernt: ca. **550 g**  
entspricht in etwa:

- PFOS-Grundwasserfracht in der Fahne innerhalb von **13 Jahren**

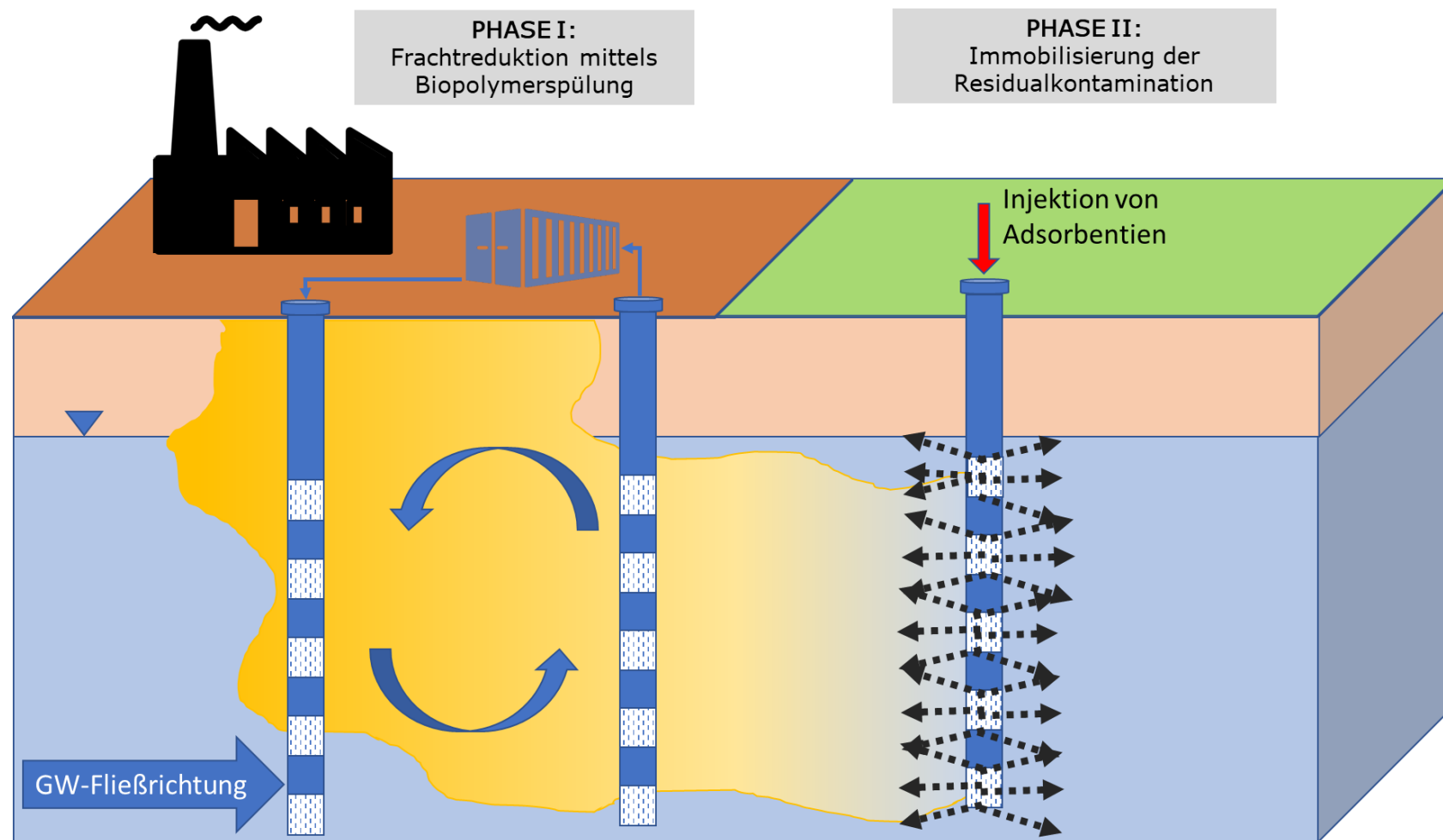
PFNA-Masse entfernt: ca. **350 g**  
entspricht in etwa:

- PFNA-Grundwasserfracht in der Fahne von **12,5 Jahren**

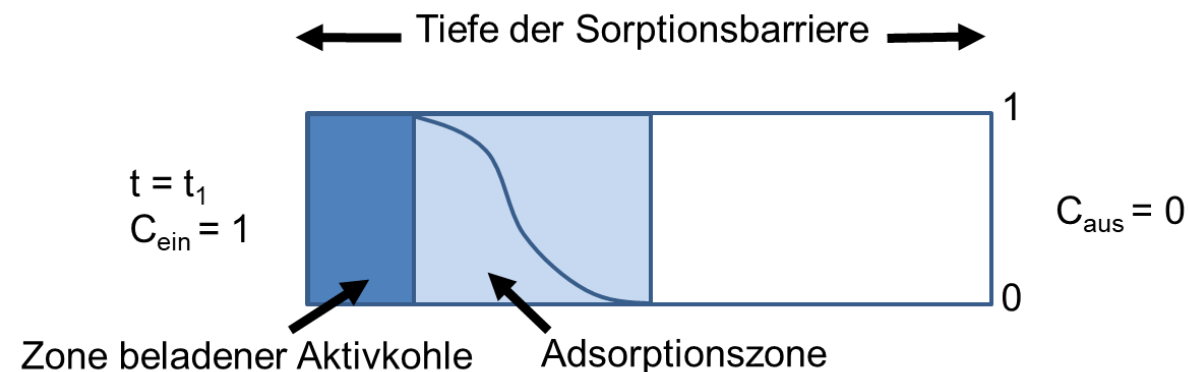
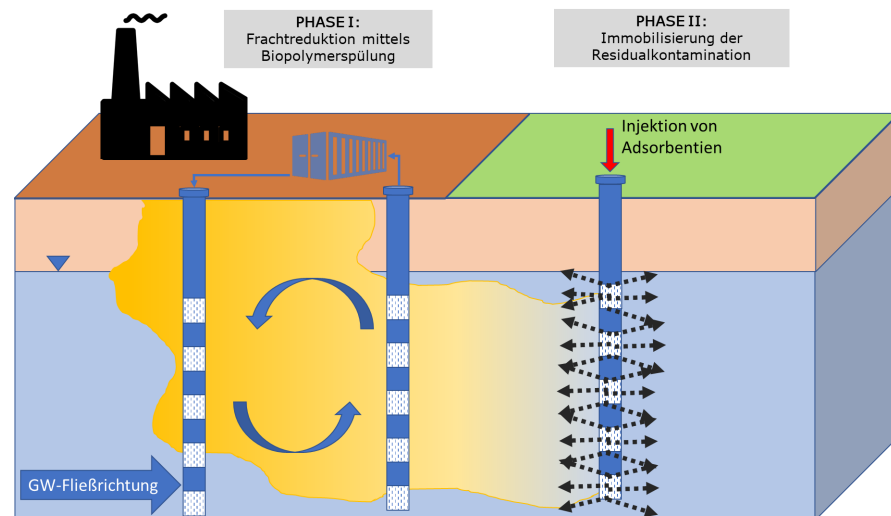
## FAZIT

- ▶ Durchführbarkeit des Verfahrens am Standort bewiesen
- ▶ Abreinigungen im Feststoff von bis zu
  - 85% für PFHxS
  - 99% für PFNA
  - 65% für PFOS
- ▶ Abreinigungswirkung stärker in den 2:1 Eluatdaten
- ▶ PFAS Austrag in Grundwassermessstellen sichtbar
- ▶ Datengrundlage für optimierte Auslegung einer Sorptionsbarriere liegt vor

# VERFAHREN ZUR BEHANDLUNG DER RESIDUALBELASTUNG



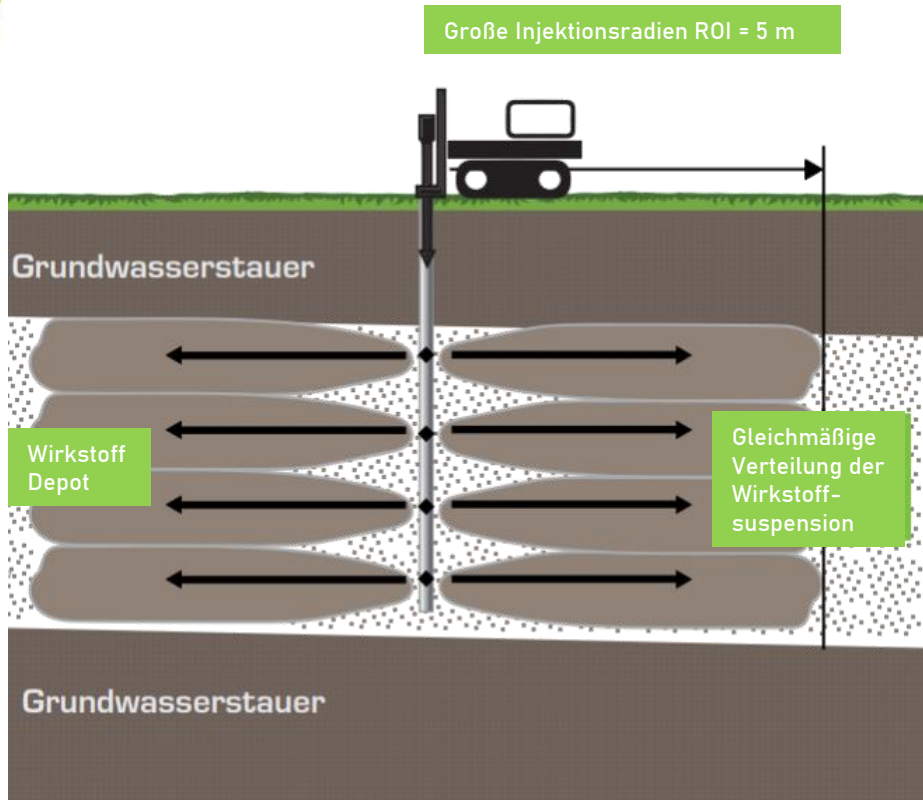
# ANALOGIE ZU AKTIVKOHLEFILTER



## ► Dimensionierung der Sorptionsbarriere ist abhängig von:

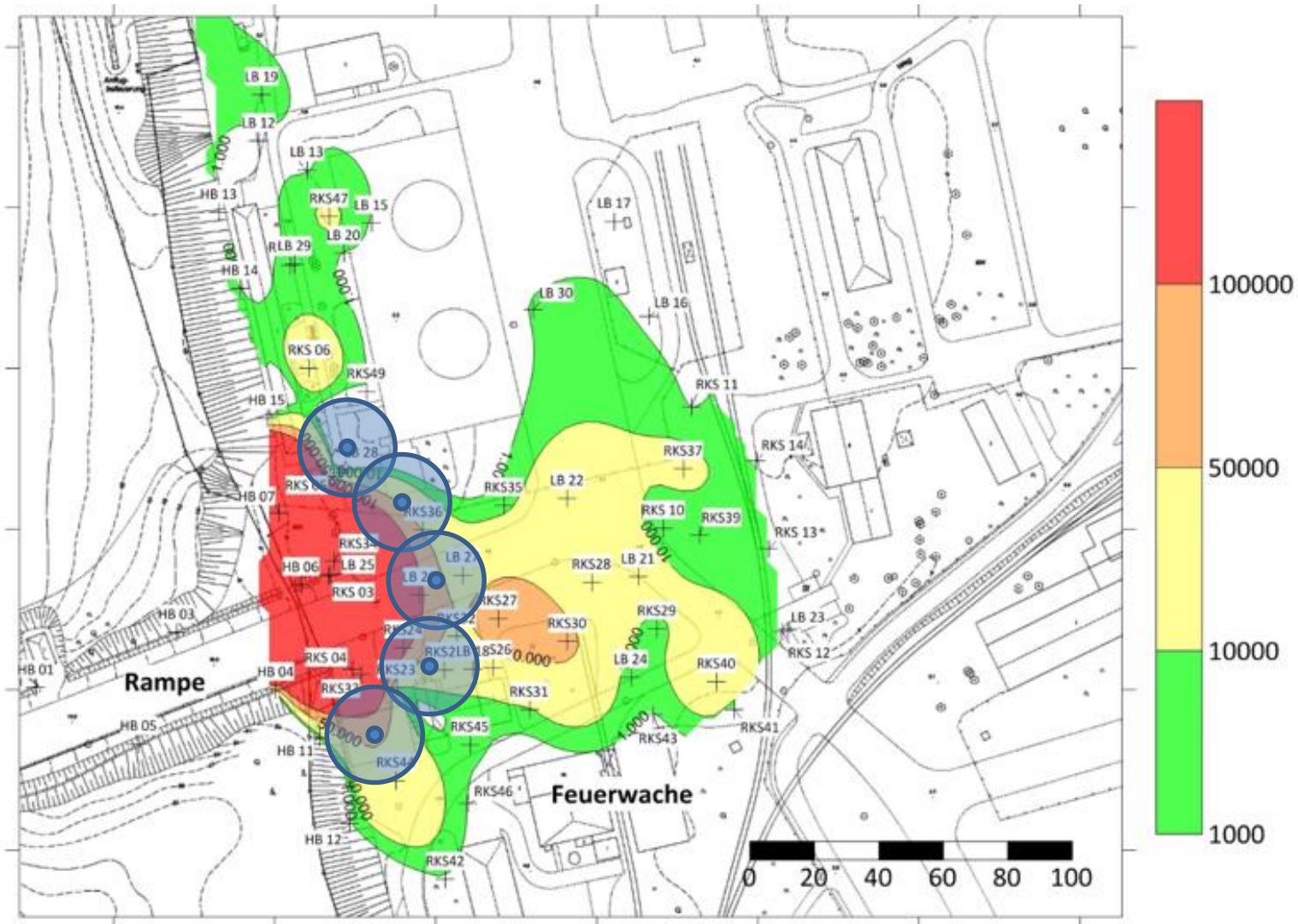
- PFAS-Fracht und Abreinigungs-Zielwerten
- PFAS-Zusammensetzung (Verhältnis kurzkettiger zu mittel- u. langkettigen PFAS)
- Grundwasserfließgeschwindigkeit
- PFAS Adsorptionsisotherme = Adsorbat- und standortabhängig z.B. von DOC, pH
- Überprüfung der Dimensionierung in Labor- / Säulenversuchen

# TSE-VERFAHREN ZUR TEUFENGERECHTEN EINBRINGUNG VON PARTIKULÄRER AKTIVKOHLE IN HOHER QUALITÄT



- ▶ TSE Verfahren: zielgerichtete Injektion einer hochviskosen Wirkstoffsuspension mittels hydraulischen Drucks über ein Bohrgestänge direkt in den Untergrund (Environmental Fracturing)
- ▶ Trägermedium verhindert Entmischung der Wirkstoffe und ermöglicht größere Injektionsradien durch fracturing
- ▶ Hochdruck ermöglicht Injektion in gering durchlässigen Böden (Schluff, Ton) und sogar Festgestein
- ▶ Injektion von Feststoffen bewirkt Schaffung von Wirkstoffdepots
- ▶ bei Bedarf können mittels TSE große Mengen von Aktivkohle (mehrere 100 kg / Injektionsmeter) horizontspezifisch verpresst werden

# LANGZEITSTABILISIERUNG DER PFAS-RESTKONTAMINATION DURCH EINER GAK-AKTIVKOHLEBARRIERE IN-SITU NACH ENTFERNUNG MOBILER PFAS



# SENSATEC – DIENSTLEISTUNGEN FÜR PFAS-KONTAMINATIONEN



kontaminierter Standort



Bohrtechnologie zur Erkundung



Machbarkeitsstudien zur Mobilisierung und Sorption



Feldtest zur Eignungsprüfung



Biopolymerinfiltration zur in situ Elution



Aktivkohleinjektion zur in situ Sorption

VIELEN DANK FÜR IHRE  
AUFMERKSAMKEIT.



#### KONTAKT

**Sensatec GmbH**

Friedrichsorter Str. 32  
D-24159 Kiel

[a.wilken@sensatec.de](mailto:a.wilken@sensatec.de)  
[s.huettmann@sensatec.de](mailto:s.huettmann@sensatec.de)

[info@sensatec.de](mailto:info@sensatec.de)

[www.sensatec.de](http://www.sensatec.de)