



Technische Möglichkeiten für
ressourcenschonende In-situ-
Sanierungen – dargestellt an
Fallbeispielen
Sensatec Webinarreihe

10.02.2026

Dr. Stephan Hüttmann

Vortragsinhalte

Fall 1 Problematik: effektive Fahnenbehandlung nach erfolgreicher Quellensanierung

- ✓ Nutzung eines passiven Wirkstofftransport im Grundwasser
- ✓ Aufbau von Langzeit-Wirkstoffdepots im Grundwasserleiter

Fall 2: wirksame Sicherungsmaßnahme für komplex zusammengesetzte Abstromfahne

- ✓ Aufbau eines standort-angepassten Betriebsregimes für Sauerstoffeinträge
- ✓ Minimierung von Wirkstoffverlusten

Fall 3: ISCO-Anwendung bei Ölphasenproblematik

- ✓ Nutzung gezielter Ölphaseneinlösung für eine ISCO-Sanierungsstrategie
- ✓ Schadstoff-spezifische Wahl eines geeigneten Oxidationsmittels

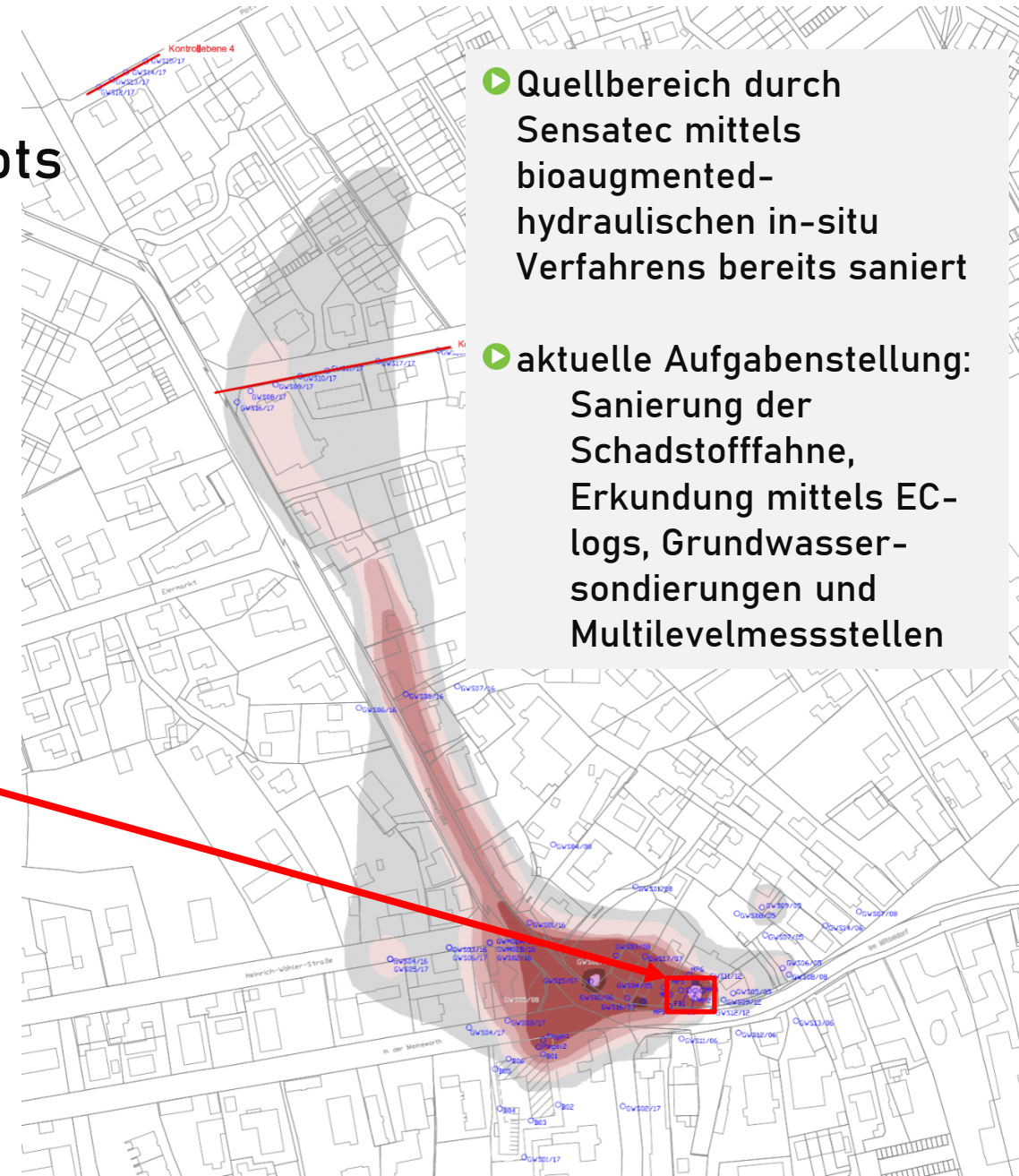
Fall 1:

Gezielter Aufbau von Wirkstoffdepots

Projektbeispiel Burgwedel

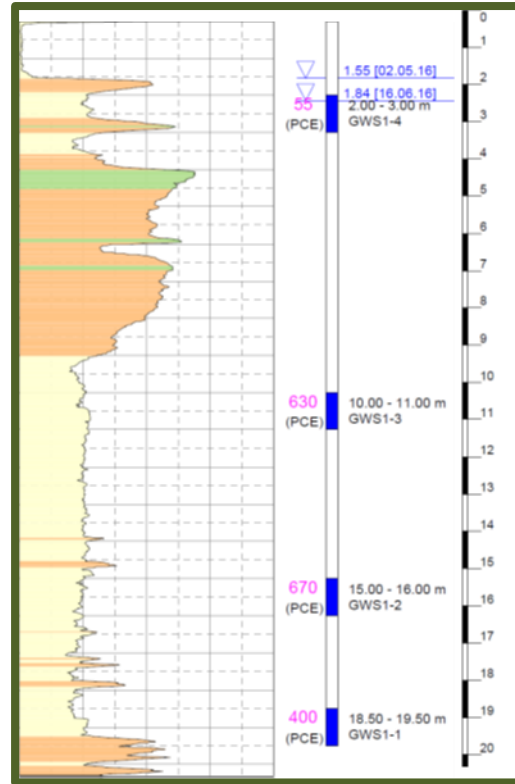


- ▶ Ausbildung einer Schadstofffahne (LCKW) ausgehend vom Grundstück einer chemischen Reinigung

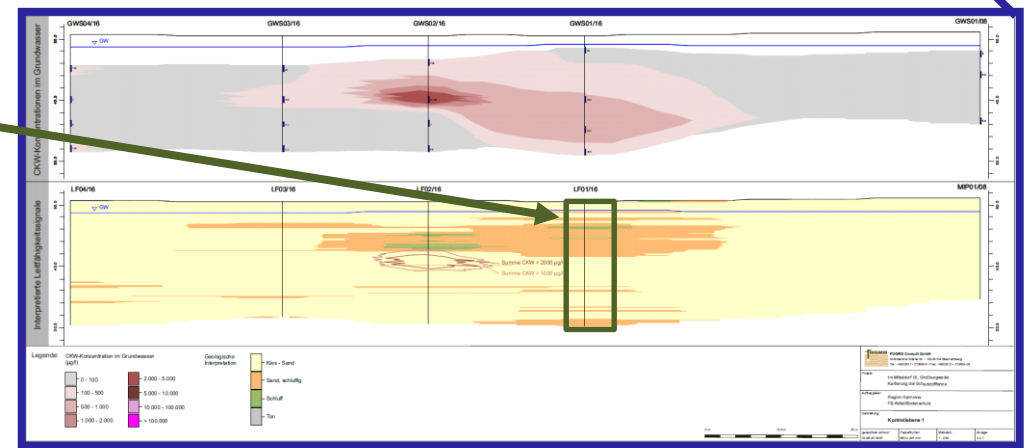
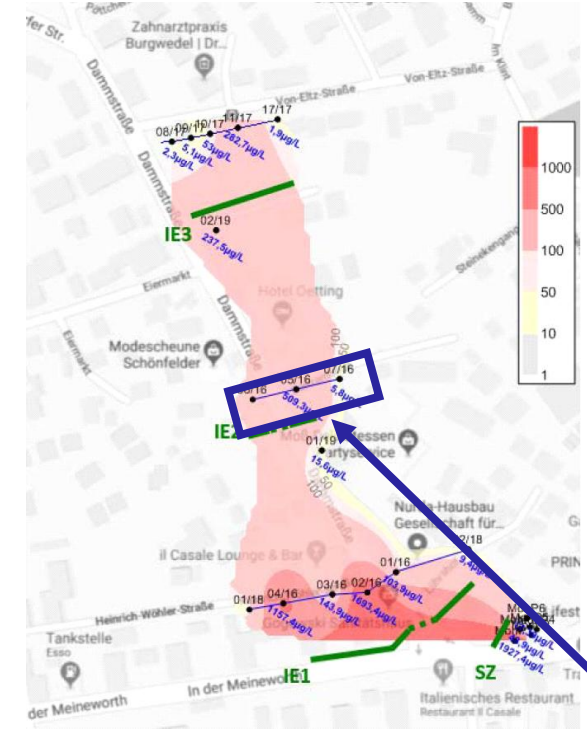


- ▶ Quellbereich durch Sensatec mittels bioaugmented-hydraulischen in-situ Verfahrens bereits saniert
- ▶ aktuelle Aufgabenstellung: Sanierung der Schadstofffahne, Erkundung mittels EC-logs, Grundwasser-sondierungen und Multilevelmessstellen

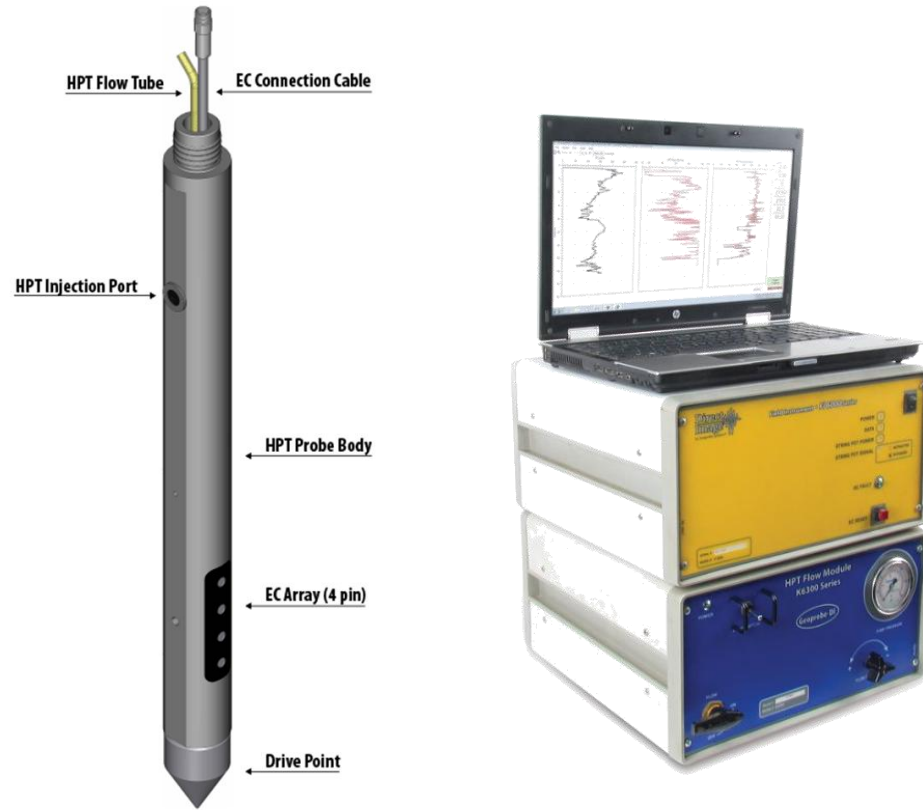
Projektbeispiel Burgwedel



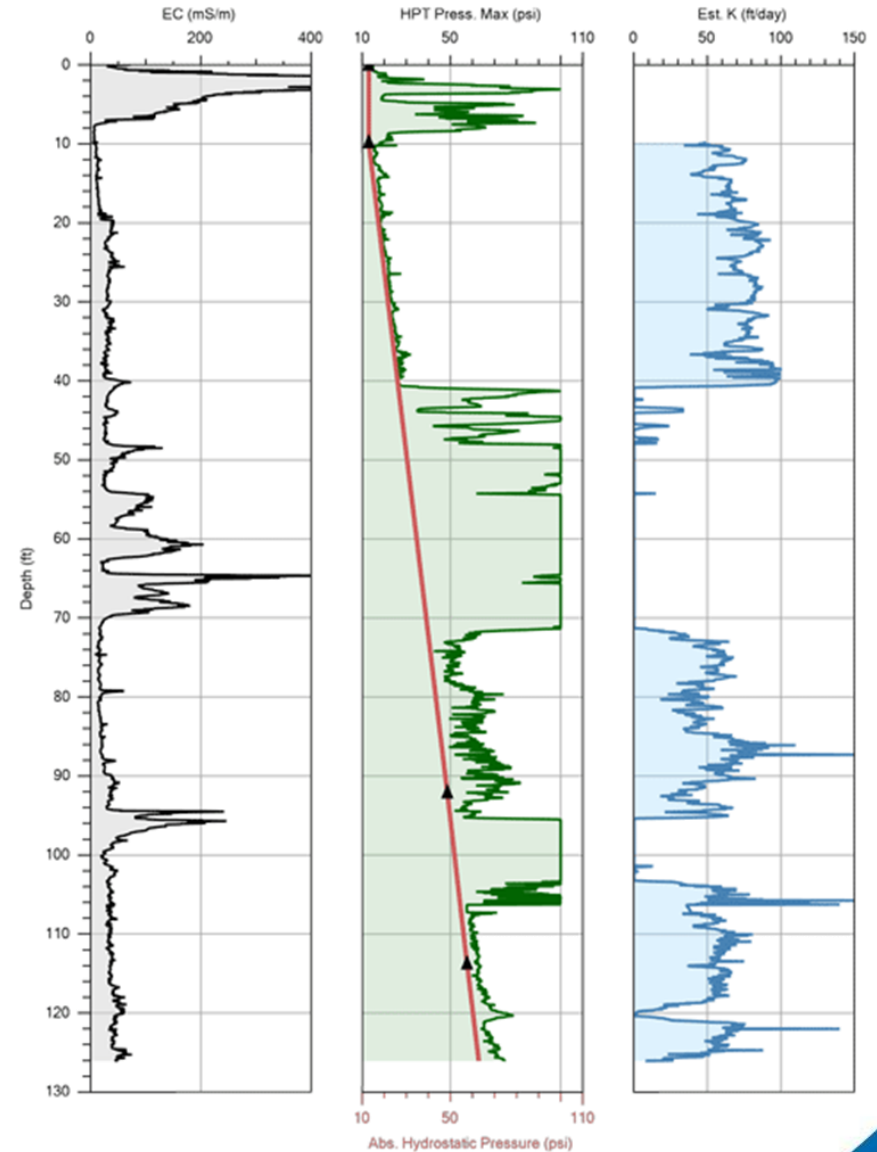
- Erkundung mittels EC-logs, Grundwassersondierungen und Multilevelmessstellen



Nicht Projektbeispiel

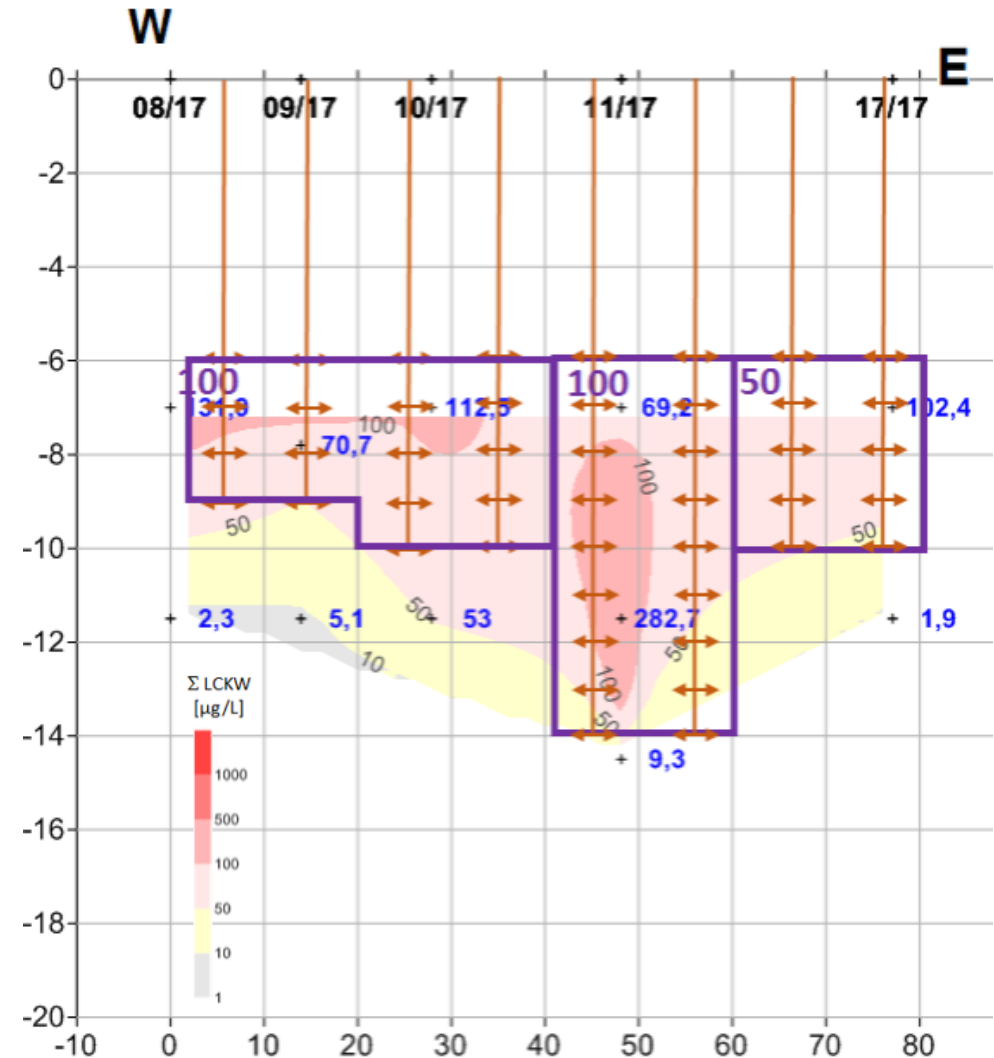


- ▶ HPT Sondierungen zur Ermittlung von k_f Werten im Vertikalprofil



Dim

- ▶ Projektion der Belastung in den Kontrollebenen auf die Injektionsebenen
- ▶ Frachtermittlung anhand von kf-Werten in 1-D-Stromröhren (analog ElKriBag)
- ▶ Ableitung von Wirkstoffbedarfen je Ansatzpunkt und Injektionstiefe



Projektbeispiel Burgwedel

Wirkstoffkombinationspräparat Provect-IR:

- ▶ nullwertiges Eisen (ZVI Zero Valent Iron): langanhaltende Freisetzung von Wasserstoffäquivalenten, pH-Regulierung
- ▶ Natrium Sulfit: Sauerstoff Scavenger, schützt das ZVI vor Oxidation und bewirkt rasche initiale Absenkung des Redoxmilieus
- ▶ Calcium Propionat: schnell verfügbares Substrat
- ▶ Kelpmehl, Cellulose: langsame DOC Freisetzung, lang verfügbares Substrat
- ▶ Hefeextrakt: mittlere DOC Freisetzung
- ▶ RYR-Extrakt: hemmt konkurrierende Mikroorganismen (methanogene Mikroorganismen)

Wirkprinzip:

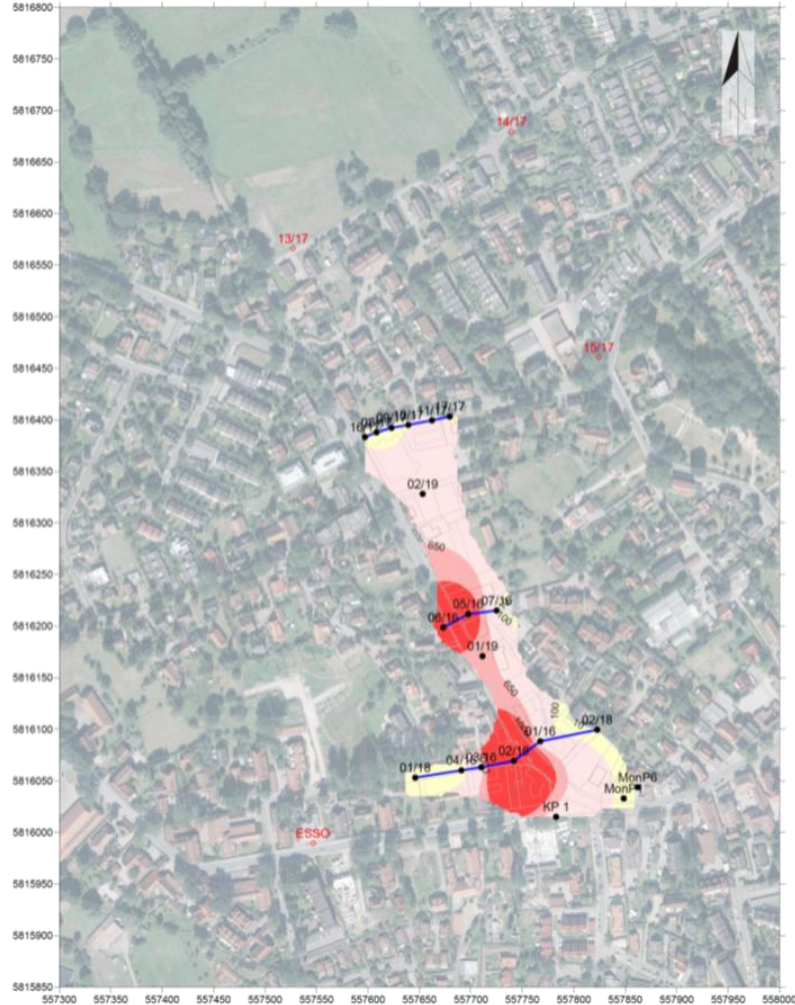
Die komplexe Zusammensetzung führt zu einer den üblichen Maßnahme Verläufen angepassten DOC- und Wasserstoff-Freisetzungsrate. Die Wirkdauer bei einmaliger Injektion beträgt zwischen 4 und 7 Jahren:

- ▶ bis ca. Tag 200 > 1000 ppm DOC
- ▶ ca. Tag 200 – ca. Tag 600 > 200 ppm DOC
- ▶ ca. Tag 600 – ca. Tag 1400 > 50 ppm DOC

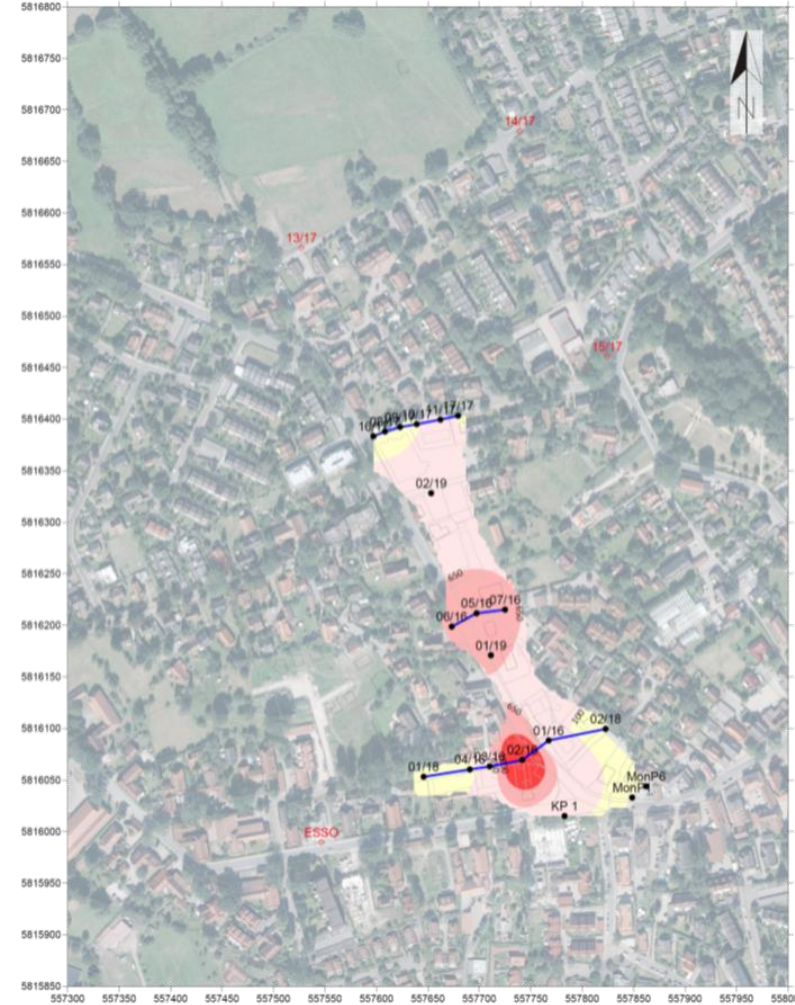


Einbringung des Provect-IR von Provectus

Projektbeispiel Burgwedel



März 2020



September 2020



**DOC-Versorgung für > 36 Monate gesichert, keine Anlagentechnik nötig,
Fahne bricht zusammen**

Berücksichtigung des geobiologischen Abbaupotenzials

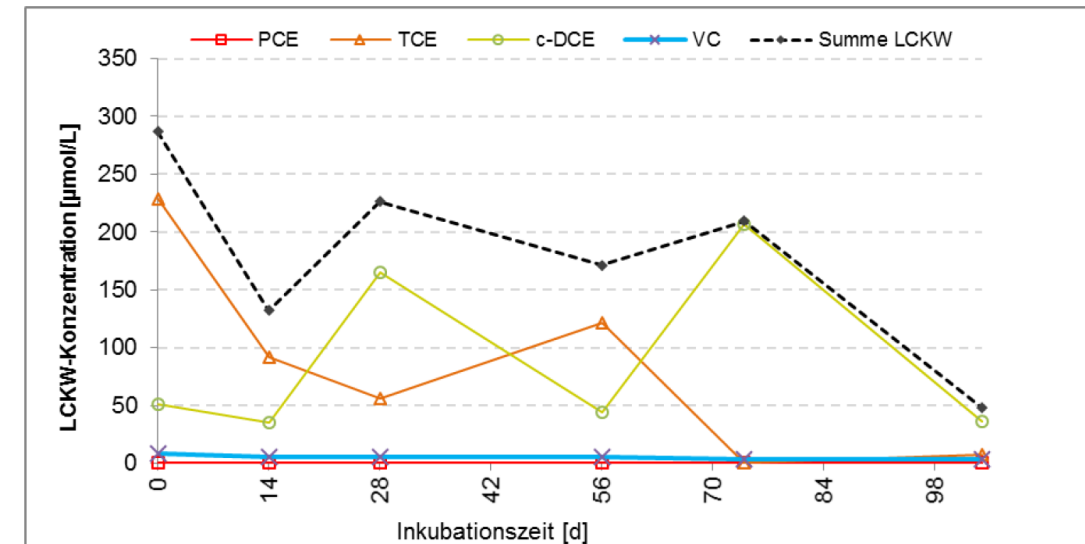
Beispiel LCKW-Schaden im Großraum Frankfurt – Laboruntersuchungen zur ERD-Biostimulation

Überblick Ergebnisse der mikrobiologischen Abbauntersuchungen

	Umbau	Abbau C/Co < 0,75	Ethen C/Co > 1	Methan C/Co < 1	Redoxpot Eh < 100 mV
A1: Sterilkontrolle	-	-	-	+	-
A2: unbehandelt	+	+	-	+	-
A3: unbehandelt + Animpfkultur	+	n.b.	+	+	-
A4: NPK	+	+	+	-	-
A5: NPK + Augmentation	+	+	+	+	+
A6: NPK + Cosubstrat high donor	+	-	-	-	-
A7: NPK + Cosubstrat high donor + Animpfkultur	+	-	~	-	+
A8: NPK + Cosubstrat low donor	+	+	-	+	+
A9: NPK + Cosubstrat low donor + Animpfkultur	+	-	~	+	+

Ergebnisse der molekularbiologischen Untersuchungen

Messstelle	Datum PN	bvcA	vcrA
[Bezeichnung]	[dd.mm.jjjj]	[Kopien/mL]	[Kopien/mL]
MW4	11.06.2014	8,75E+02	3,77E+03
MW9	11.06.2014	4,46E+01	0,00E+00
P2/08	11.06.2014	0,00E+00	0,00E+00

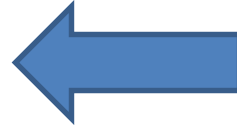


Verlauf der LCKW-Konzentration im Versuchsverlauf (Ansatz NPK-Medium mit Animpfkultur)

Einsetzen der Dynamik nach DHC-Bioaugmentation

Messstelle	Datum PN	bvcA	vcrA	tceA	score
[Name]	[dd.mm.jjjj]	[copies/mL]	[copies/mL]	[copies/mL]	[copies/mL]
FöBr1	12.08.2015	1,30E+02	1,20E+01	1,28E+01	1,55E+02
FöBr1	03.12.2015	4,99E+04	4,72E+05	2,53E+04	5,47E+05
FöBr1	31.05.2016	6,92E+03	1,59E+05	8,02E+03	1,74E+05

FöBr1: bioaugmentiert am 28.10.2015

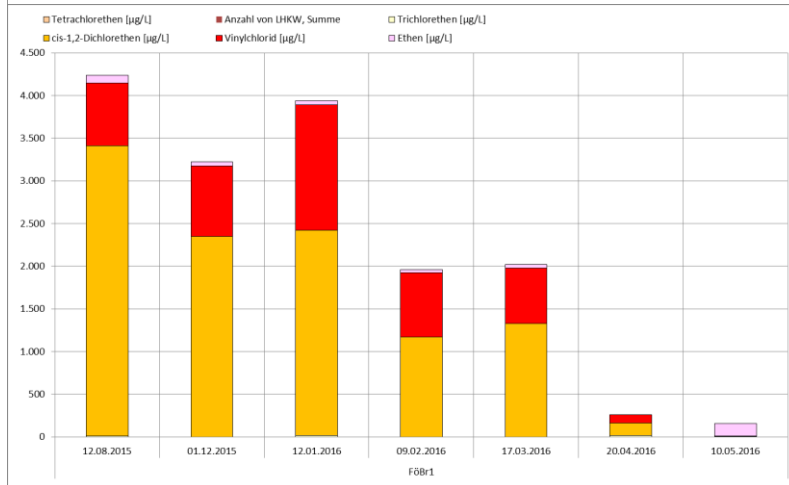
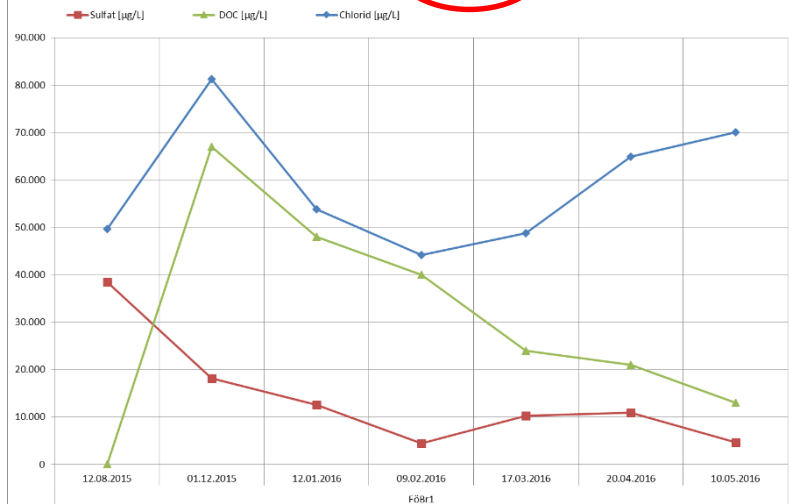
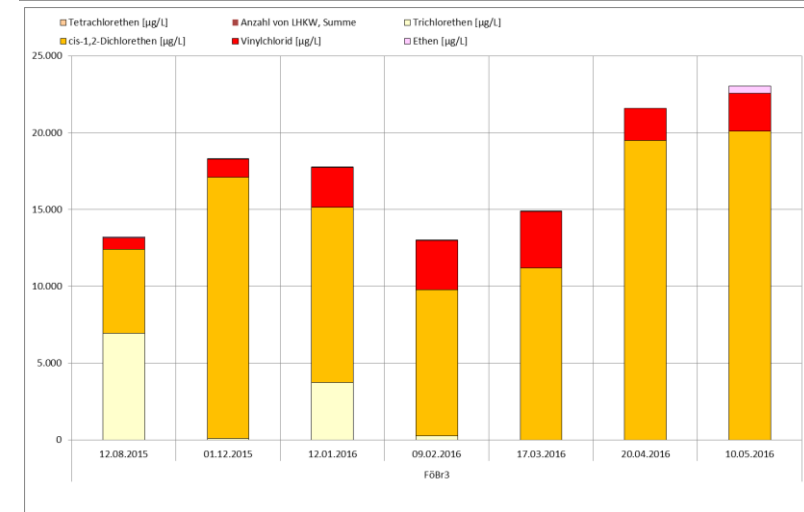
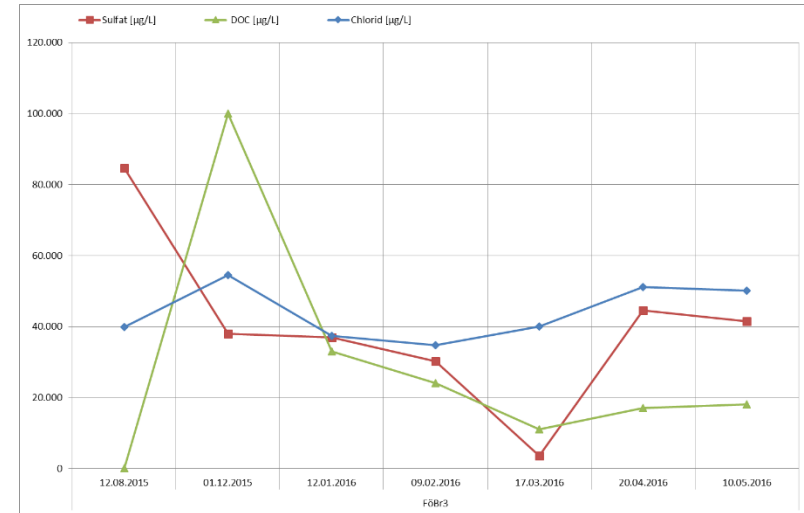


FöBr3: nicht bioaugmentiert

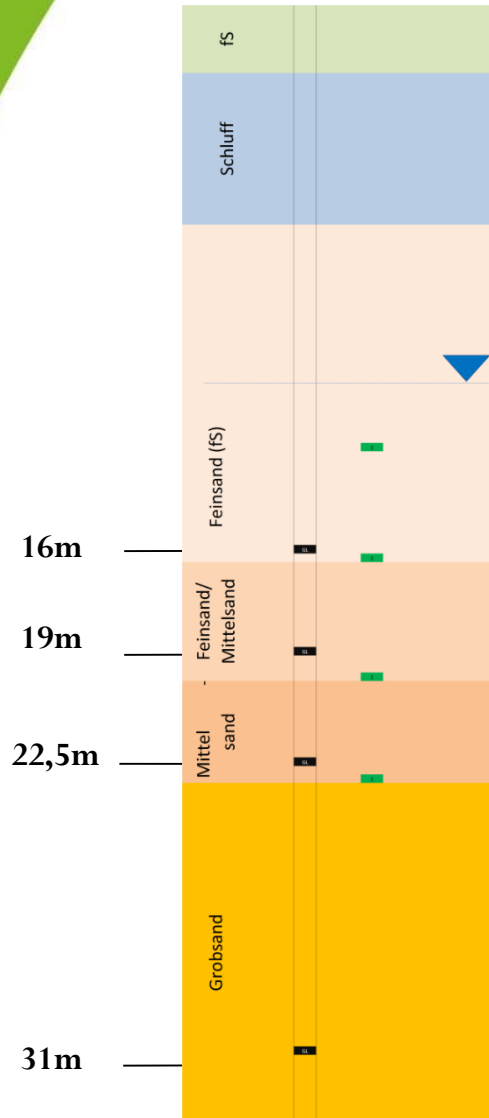


Zeitverlust ohne Animpfung
Mindestens 12 – 24 Monate
oder noch länger!

Messstelle	Datum PN	bvcA	vcrA	tceA	score
[Name]	[dd.mm.jjjj]	[copies/mL]	[copies/mL]	[copies/mL]	[copies/mL]
FöBr3	12.08.2015	1,39E+02	1,37E+00	2,79E+00	1,43E+02
FöBr3	03.12.2015	9,90E+01	1,20E+03	8,27E+01	1,38E+03
FöBr3	31.05.2016	5,36E+03	6,88E+04	4,33E+02	7,46E+04

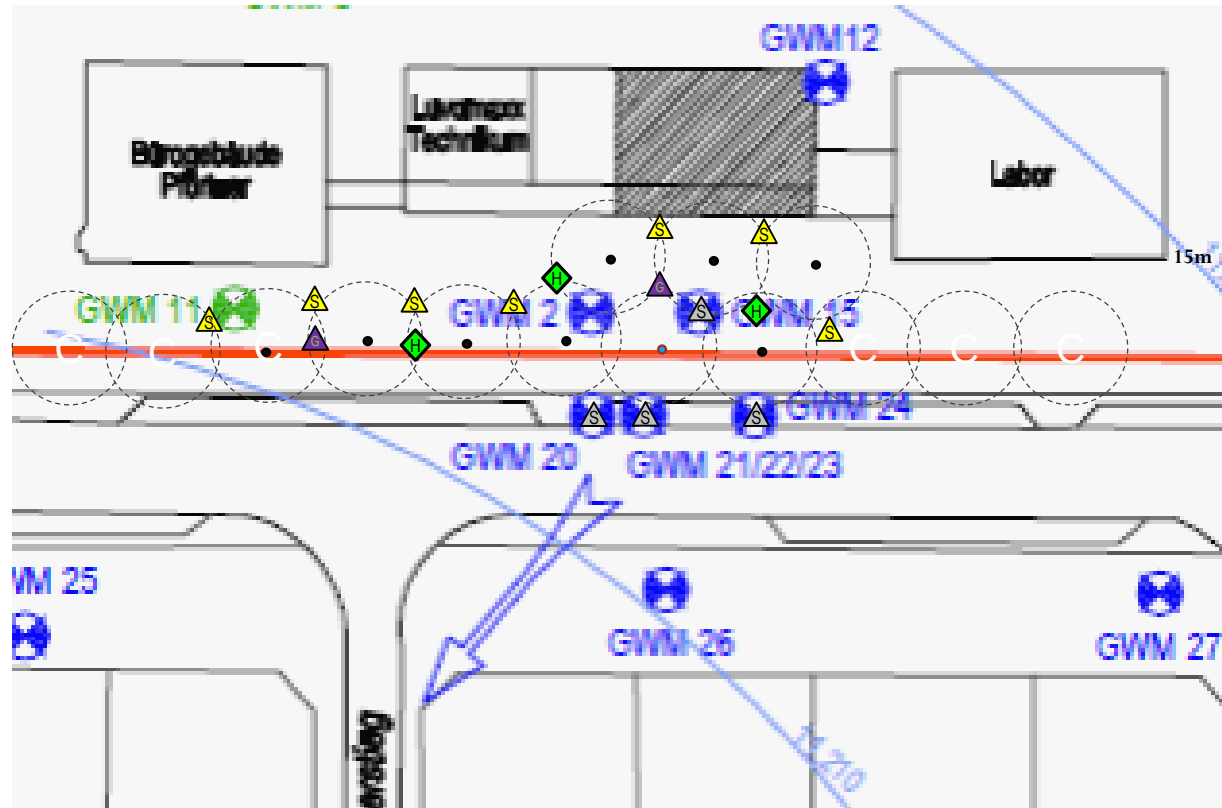


Fall 2: Biologische Abstrombarriere (Chlorbenzol, VC, BTEX)



- ▶ Quelle (bisher) nicht sanierbar
- ▶ Langfristige hydraulische Sicherung ausgeschrieben
- ▶ Bioxwand (aerobe, biologische Reinigungszone im abstromigen Grundstücksbereich) angeboten
- ▶ Zuschlag aufgrund großer Kostenvorteile und guter Genehmigungsfähigkeit

Umsetzung des Biobarriere-Konzepts



Verfahren verhindert seit ca. 10 Jahren zuverlässig ein Abströmen von Chlorbenzol, Vinylchlorid, teilw. BTEX!

Schadstoffahne im Abstrom ist zusammengebrochen!

○ Wirkkreis 4fach-Gaslanze

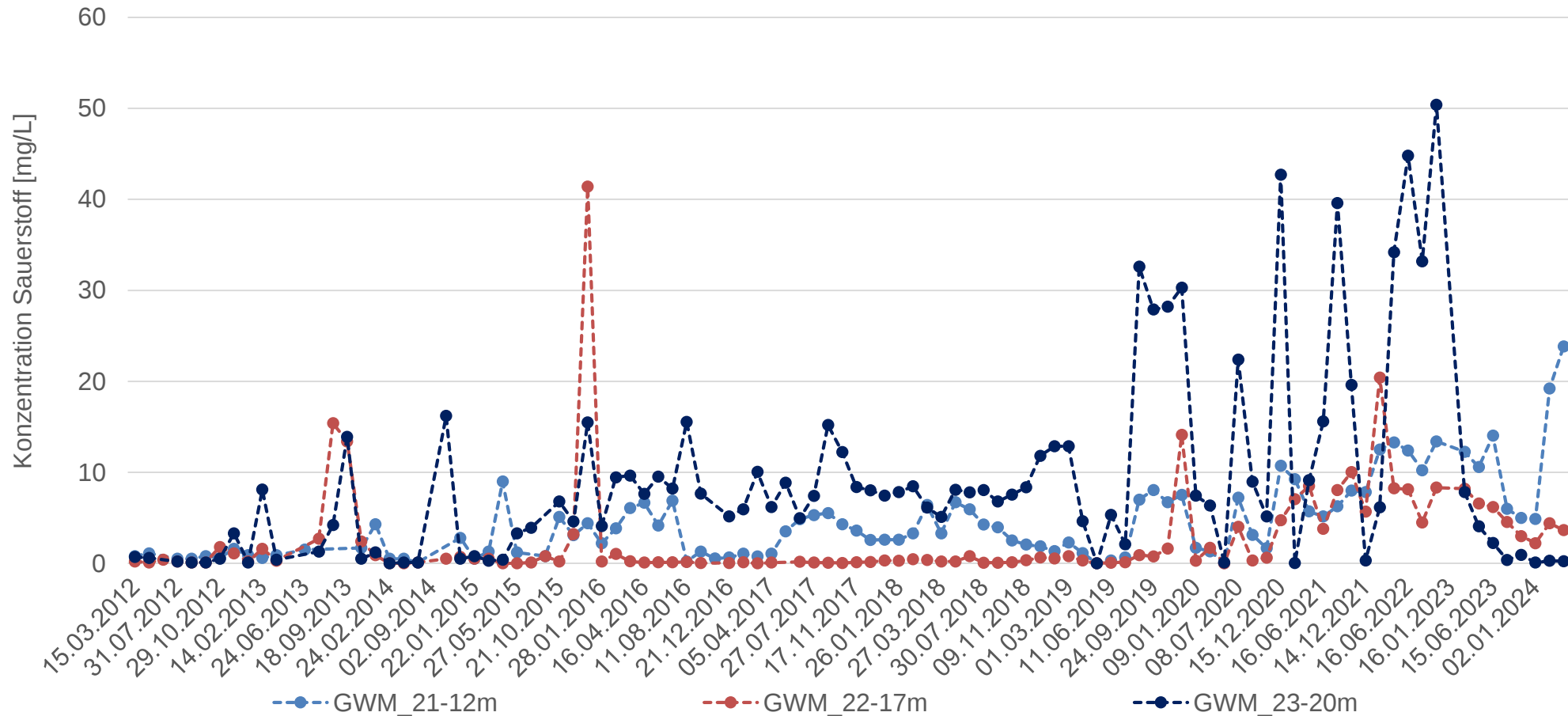
▲ 4fach-Eh Sensoren in Monitoringlanzen

▲ installierte Redoxsensoren

◆ Ansatzpunkt Bohrverfahren „Hydraulic Profiling Tool“ (HPT)

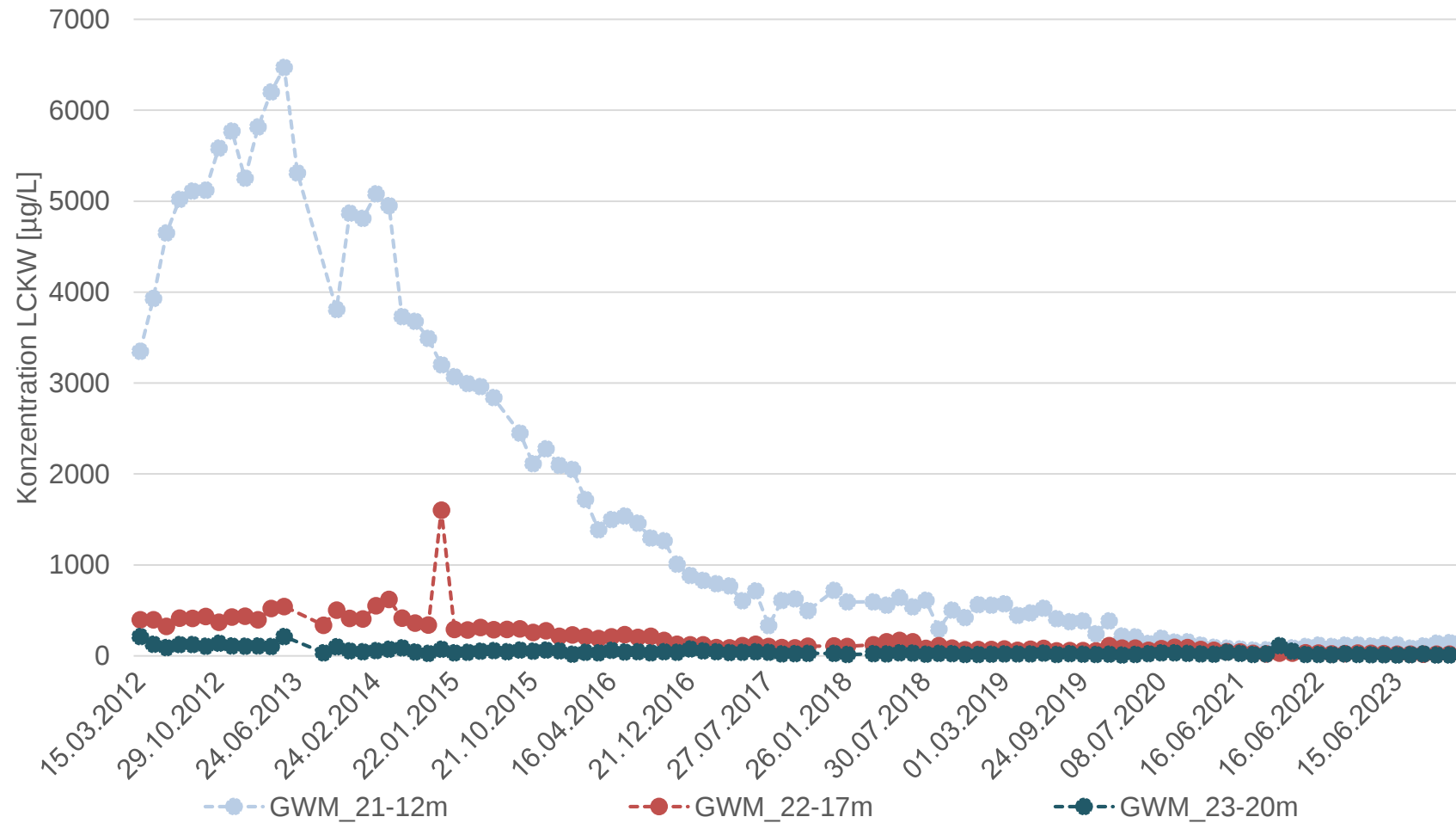
▲ Gassättigungs-Monitoring

Schadstoffabreinigung in der Biobarriere



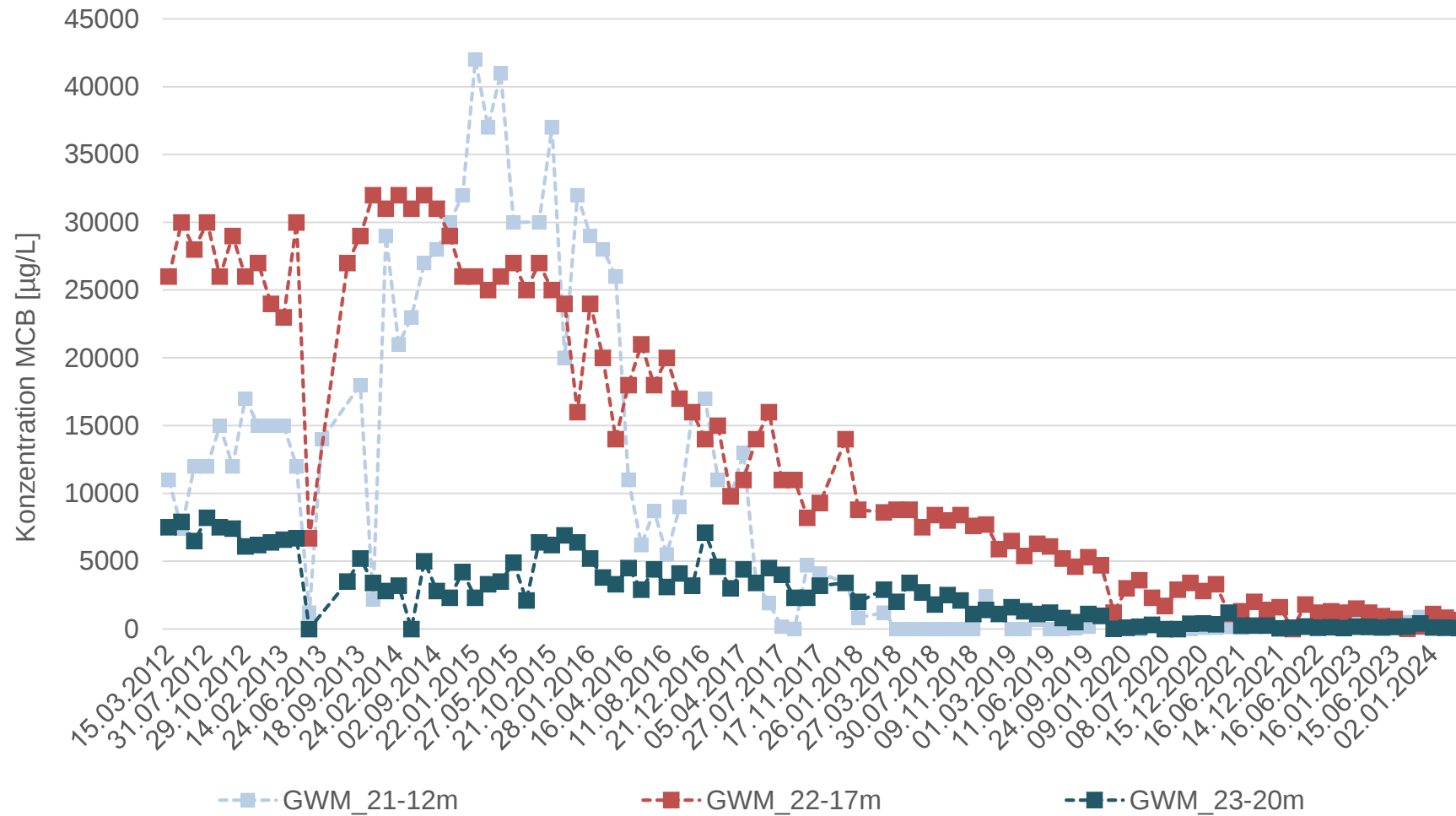
Nach Realisierung der Matrixoxidation (v.a. Pyritoxidation)
stabile Sauerstoffversorgung im direkten Bioxwandabstrom!

Abreinigung VINYLCHLORID in der Biobarriere



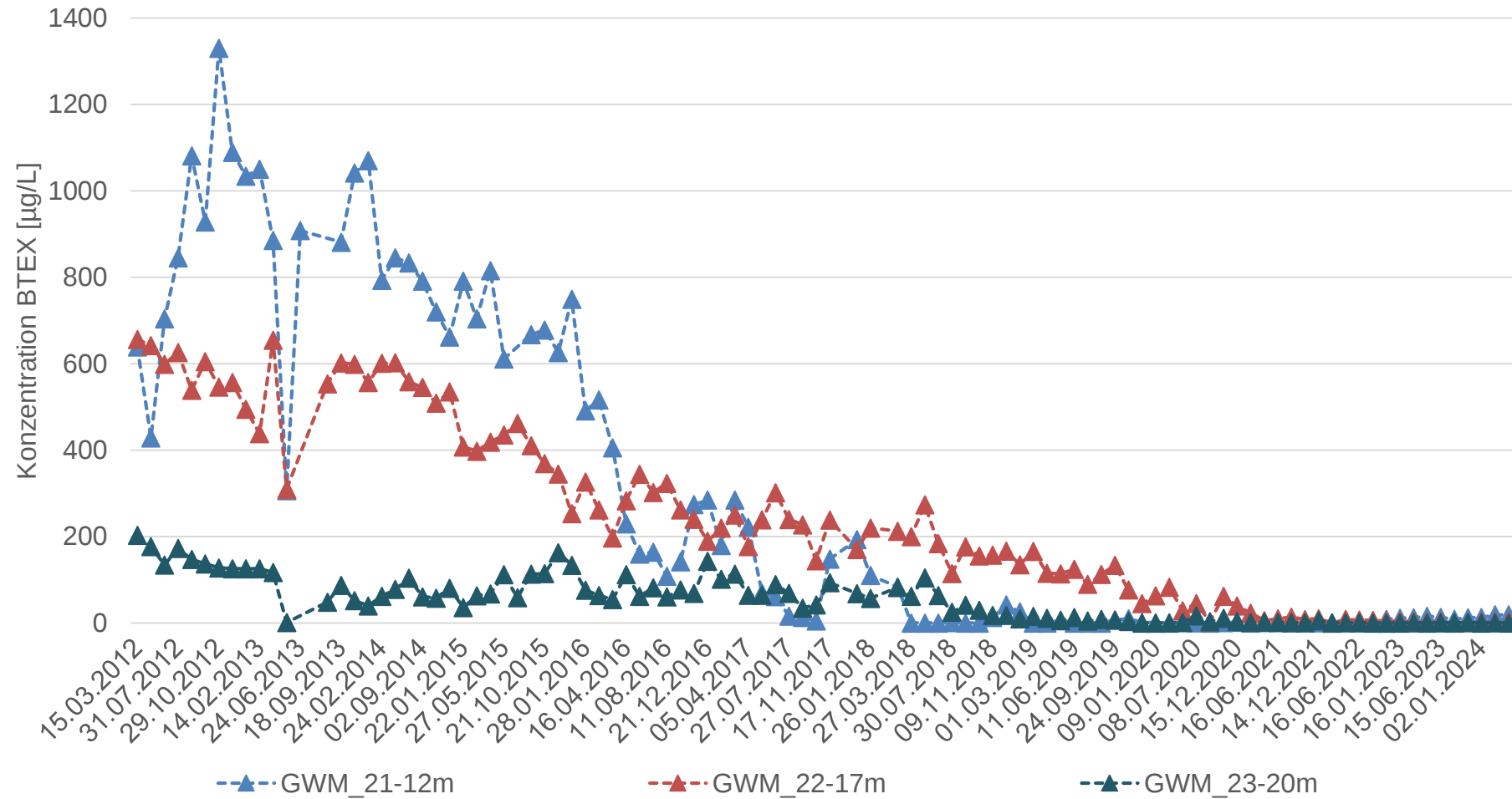
Stabile Abreinigung von VINYLCHLORID seit Inbetriebnahme!

Abreinigung CHLORBENZOL in der Biobarriere



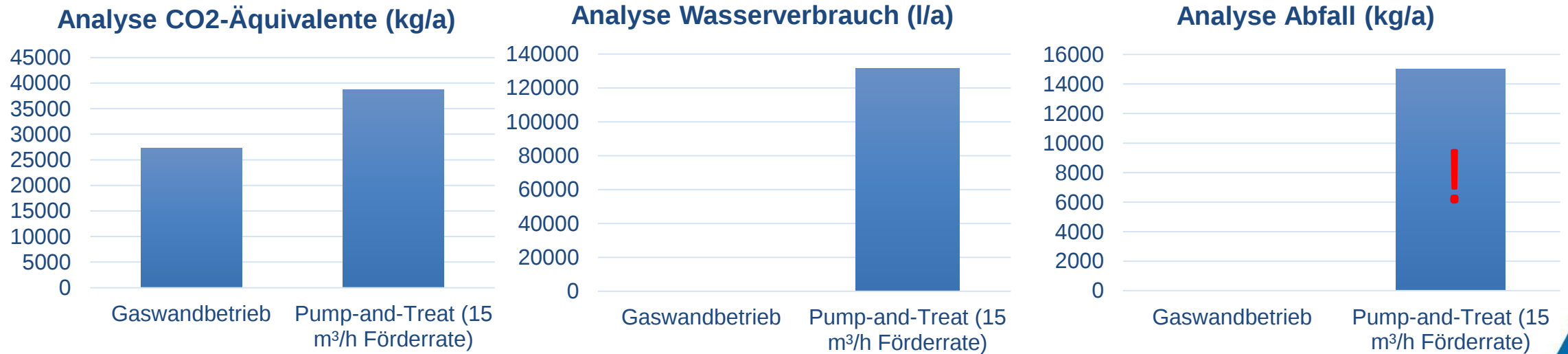
Stabile Abreinigung seit Inbetriebnahme!

Abreinigung BTEX in der Biobarriere



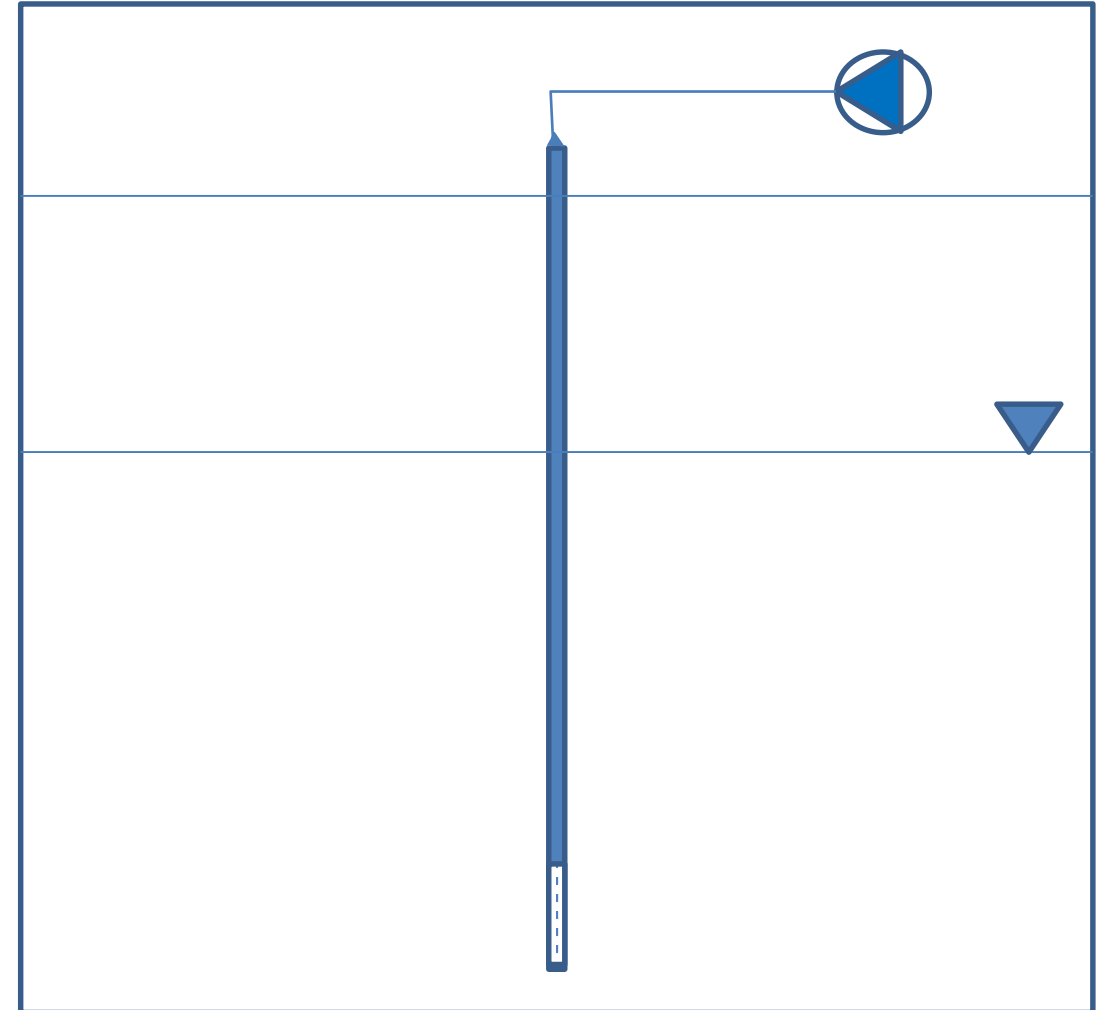
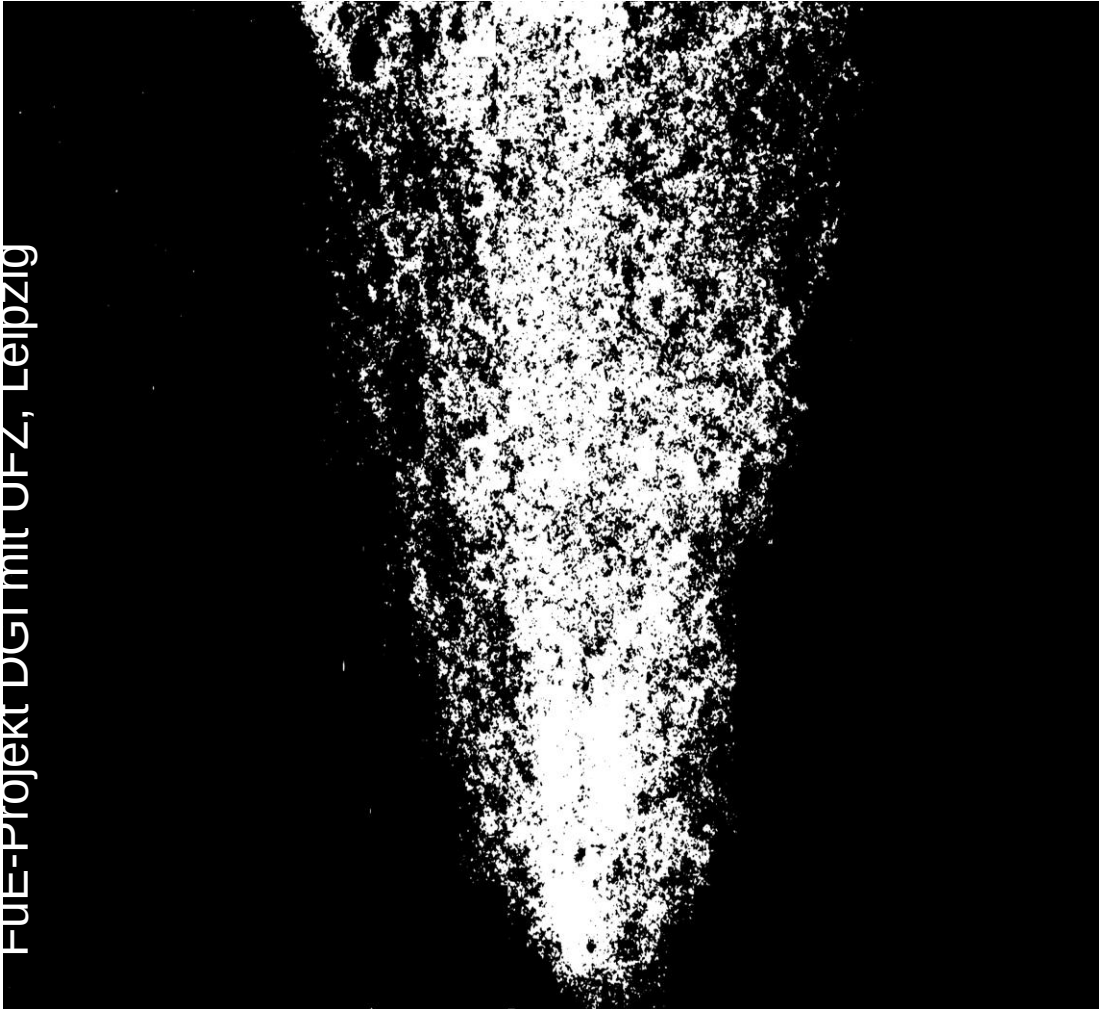
Stabile Abreinigung von BTEX seit Inbetriebnahme!

Analyse des Ressourceneinsatzes Biobarriere



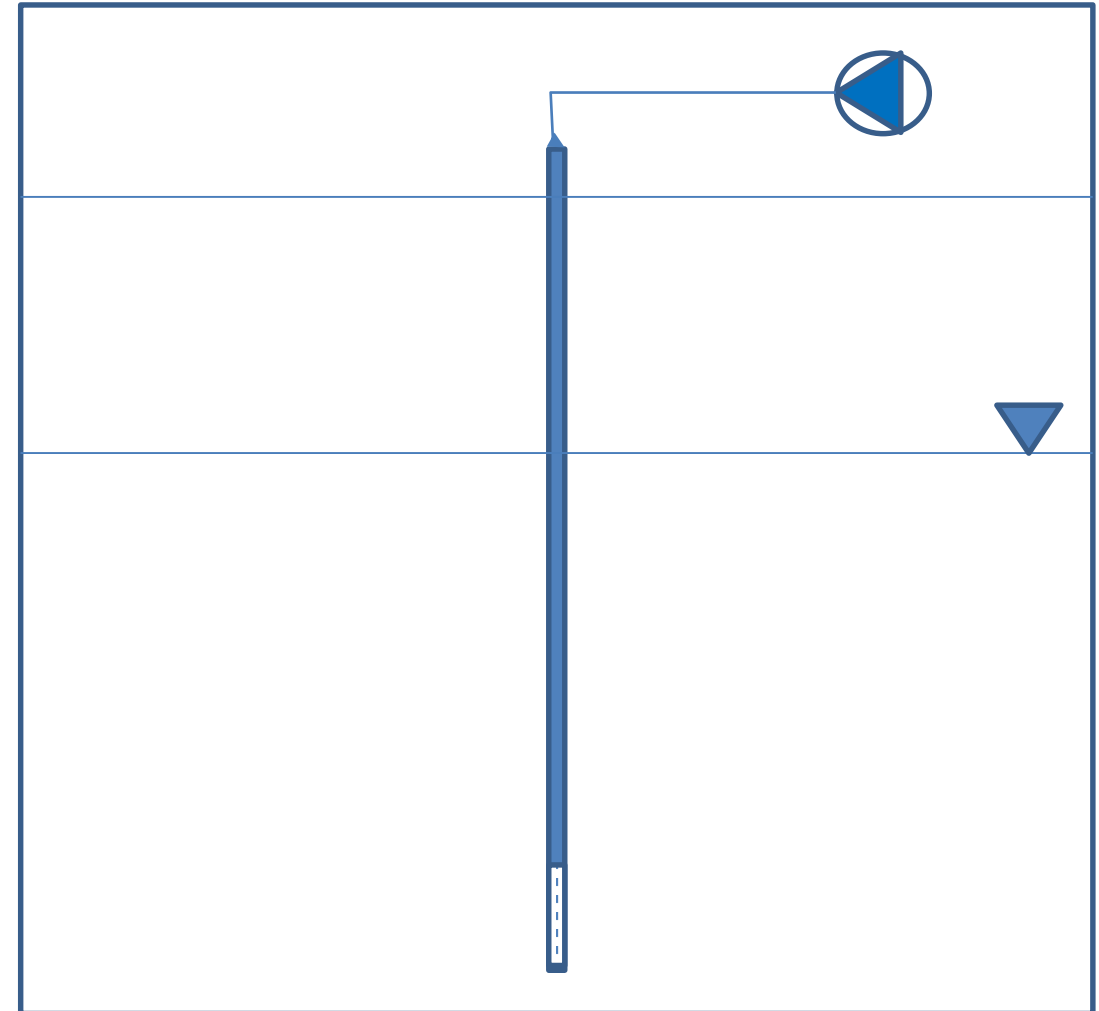
Biologischer Reaktionsriegel verhindert seit > 10 Jahren einen Schadstoffabstrom bei deutlich geringerem Ressourceneinsatz im Vergleich zu hydraulischer Sicherung!

Wie wurden die gasförmigen Wirkstoffverluste in die ungesättigte Bodenzone minimiert?
Antwort: Messung der standortspezifischen Gasdurchbrüche



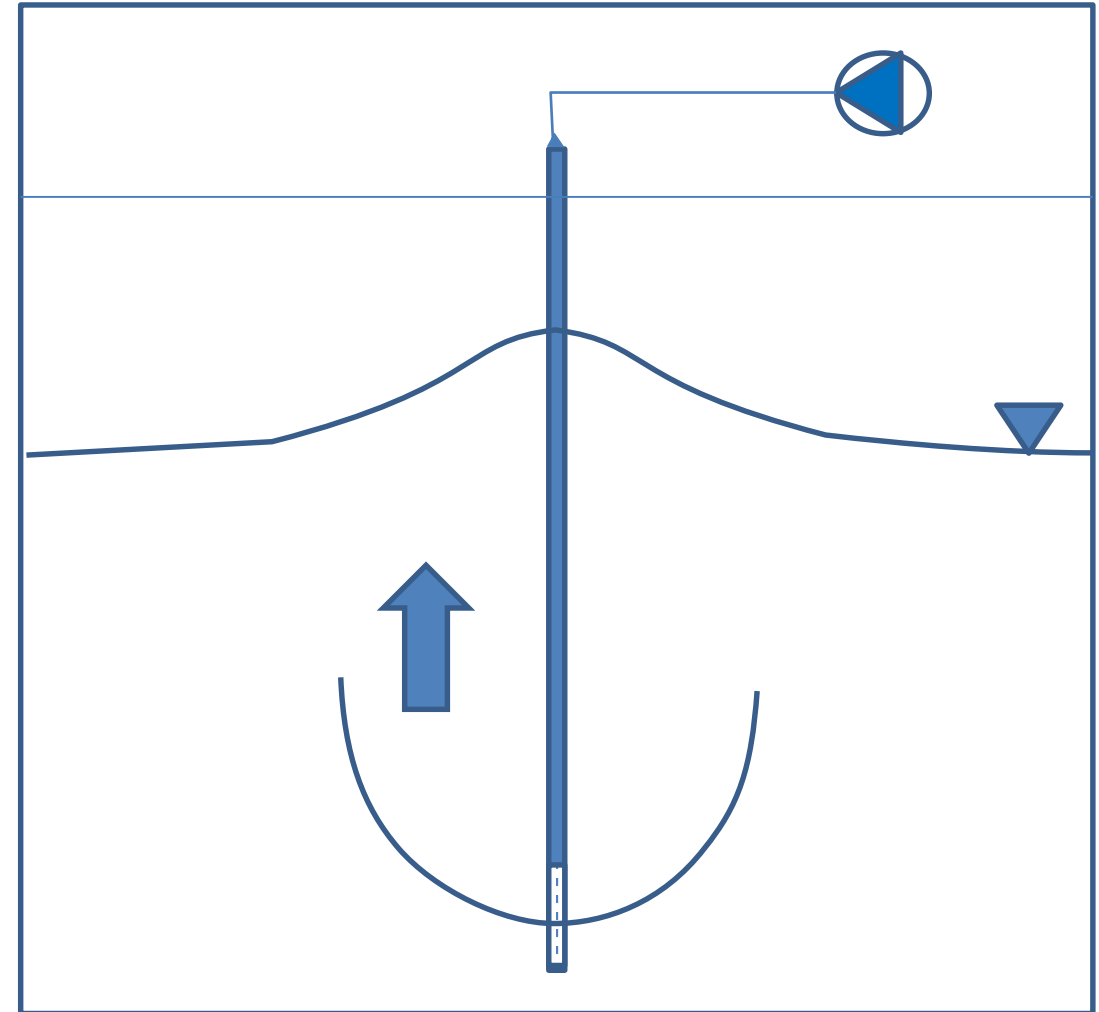
Minimierung von Wirkstoffverlusten

1. Ruhezustand (kein Lufteintrag)



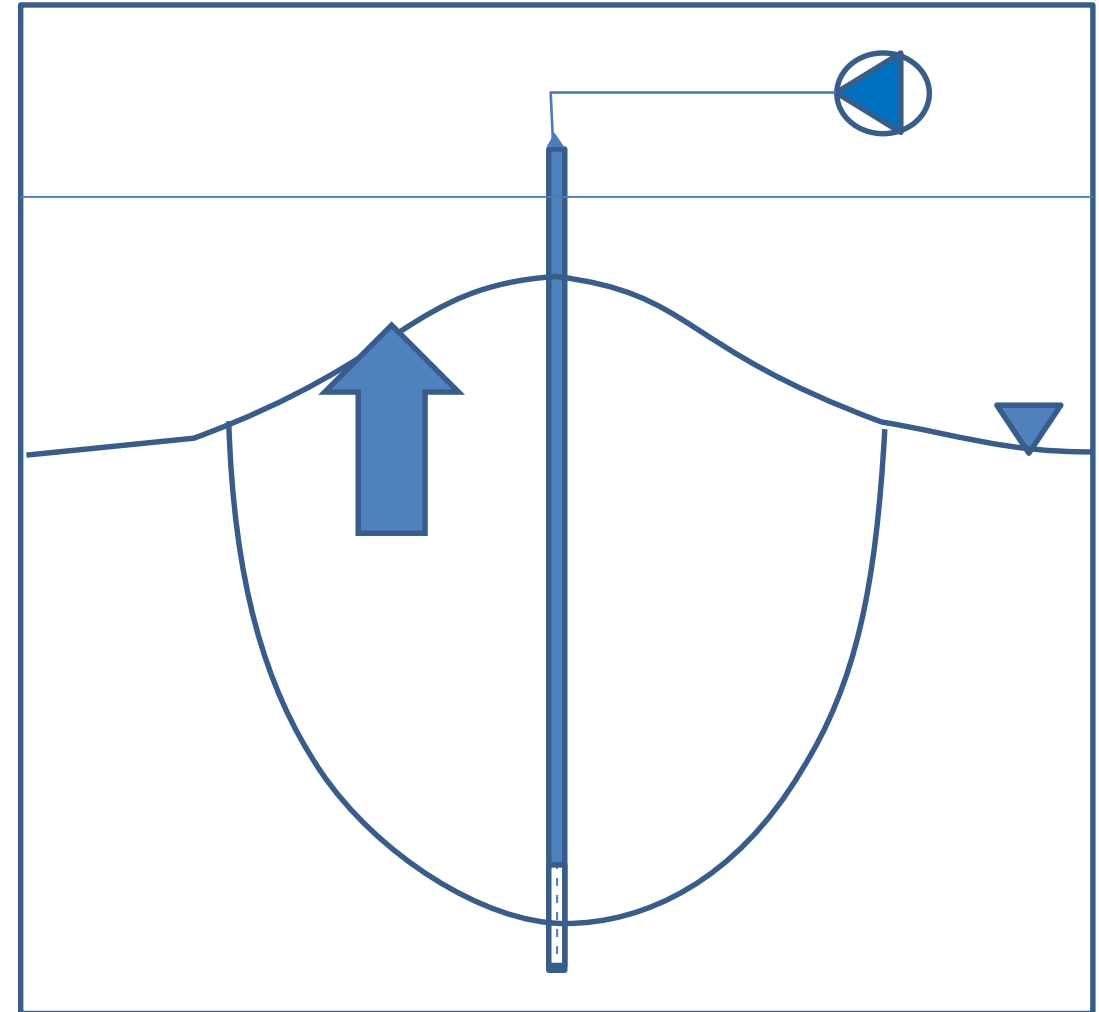
Minimierung von Wirkstoffverlusten

2. Beginn des Drucklufteintrags



Minimierung von Wirkstoffverlusten

3. Luftkanäle brechen durch bis an die GW-Oberfläche

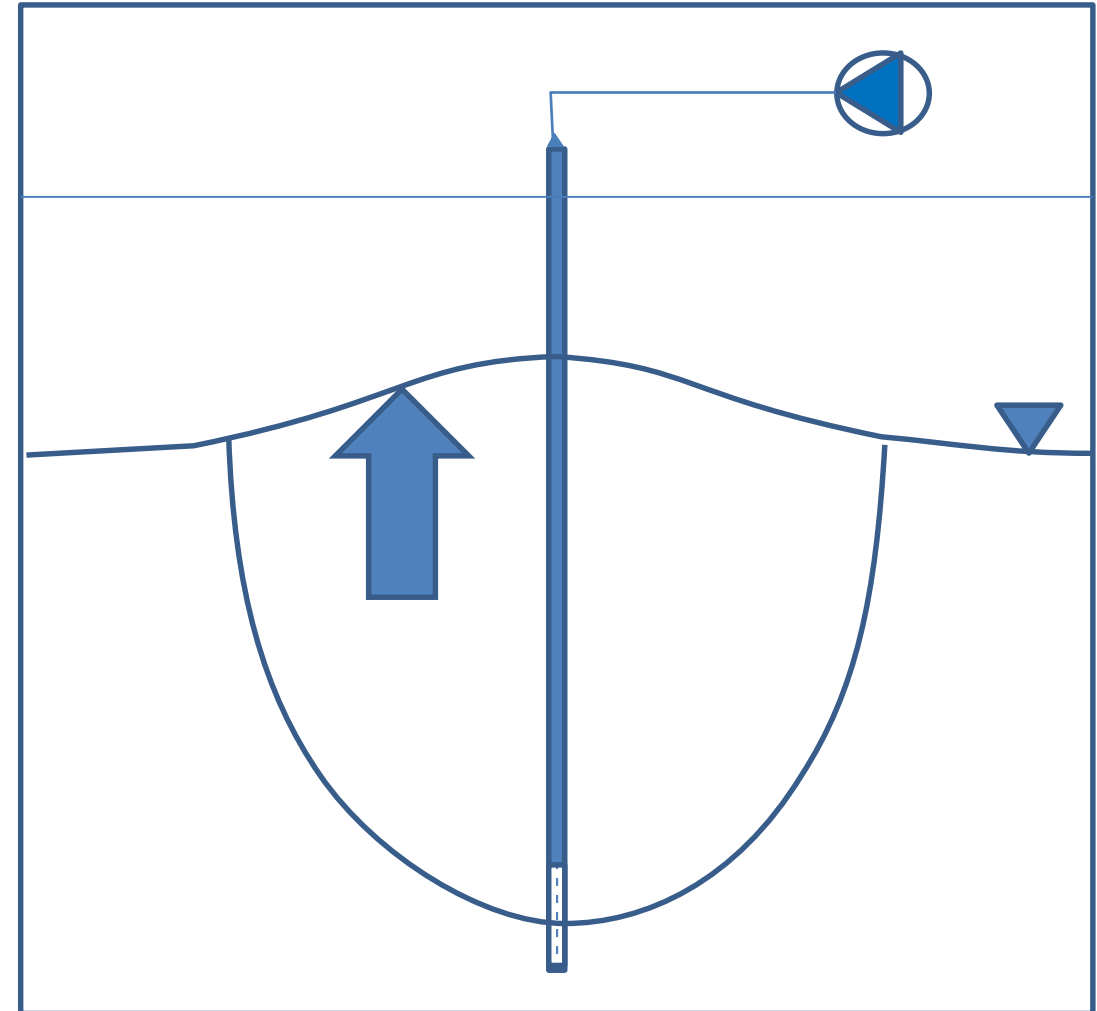


Minimierung von Wirkstoffverlusten

4. Viel eingepresster Luft-Sauerstoff wird nun durchgeleitet in die Bodenluft

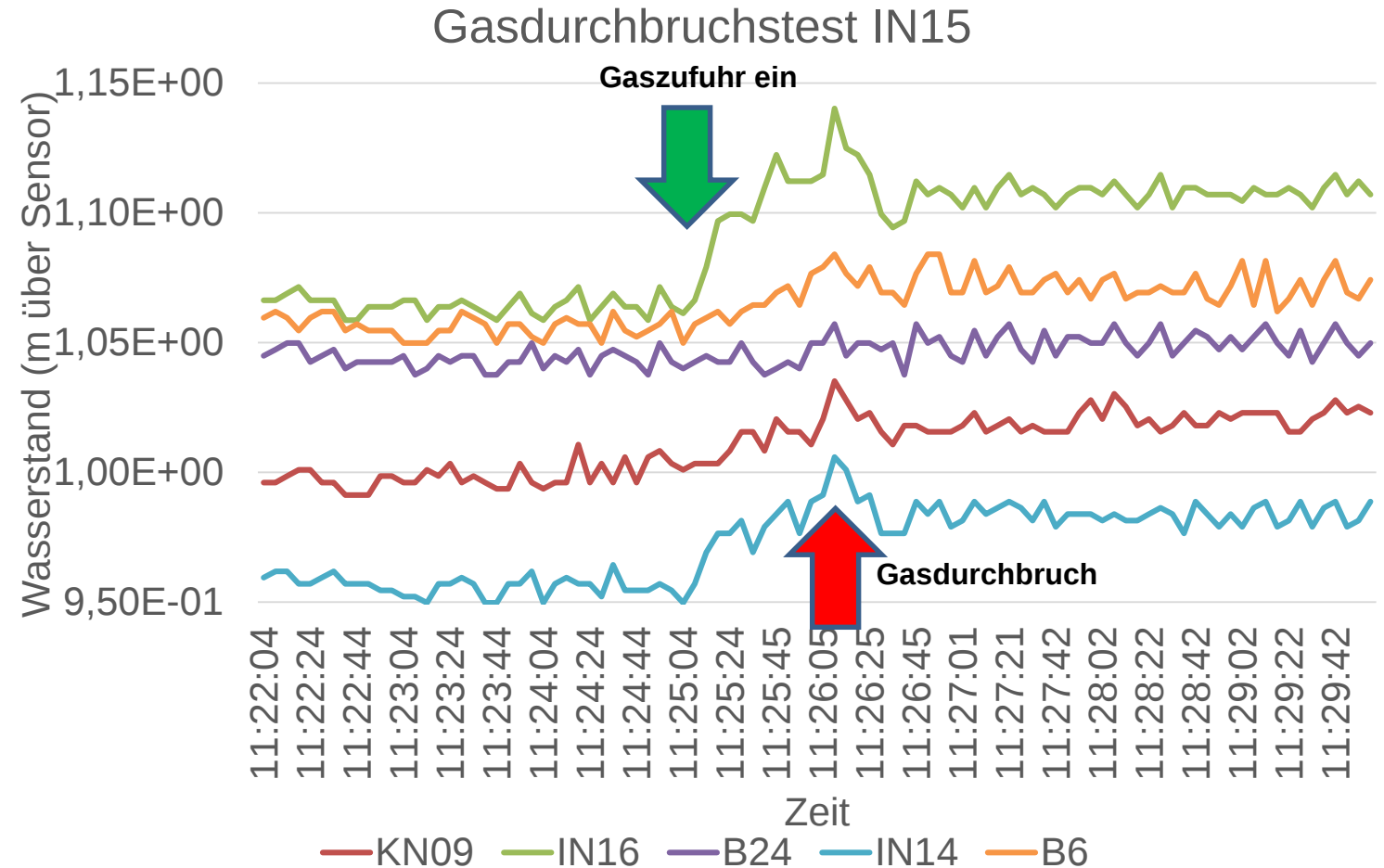
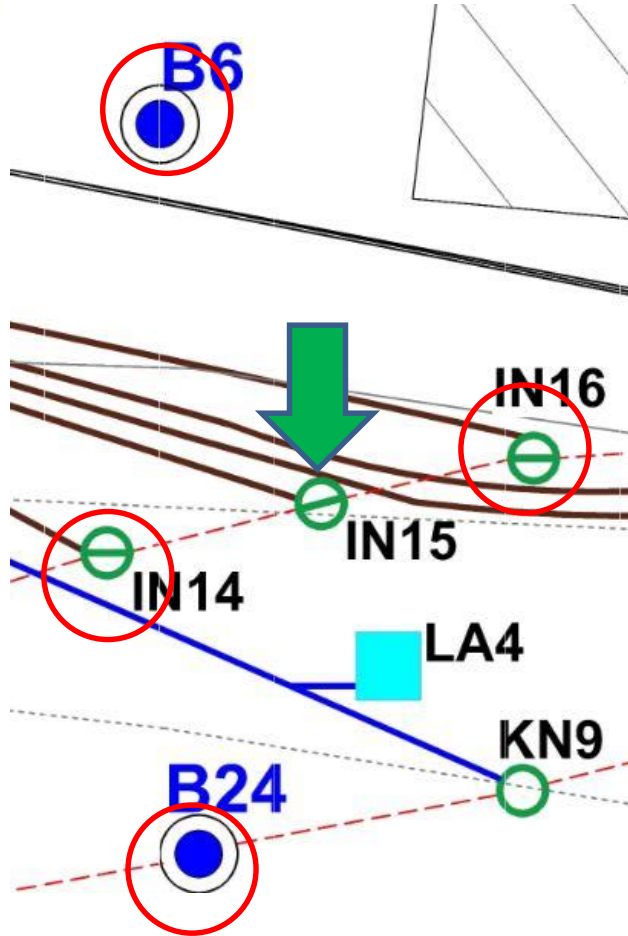


Geringe Effizienz der Sauerstoffanreicherung bei Verstärkung von Strippeffekten



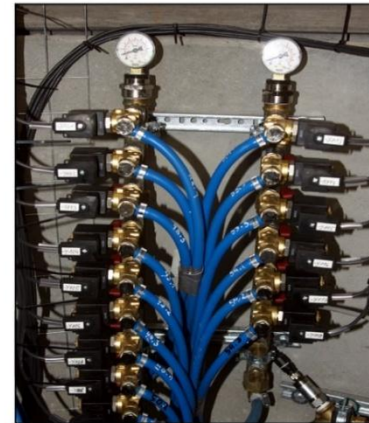
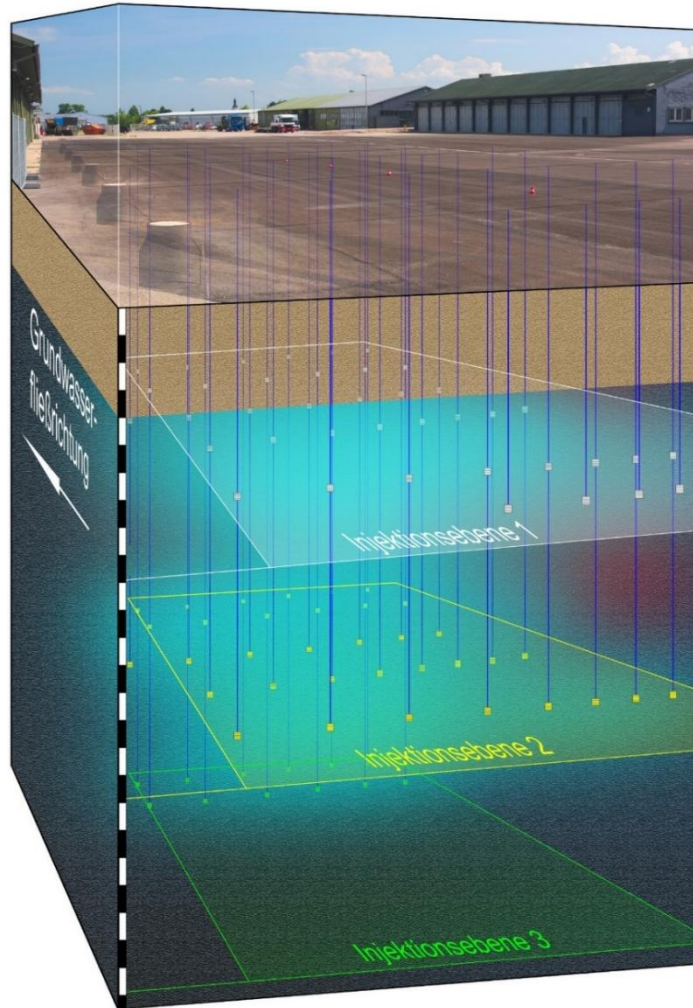
Minimierung von Wirkstoffverlusten am Beispiel Sauerstoffzufuhr

Projektbeispiel Biosparging

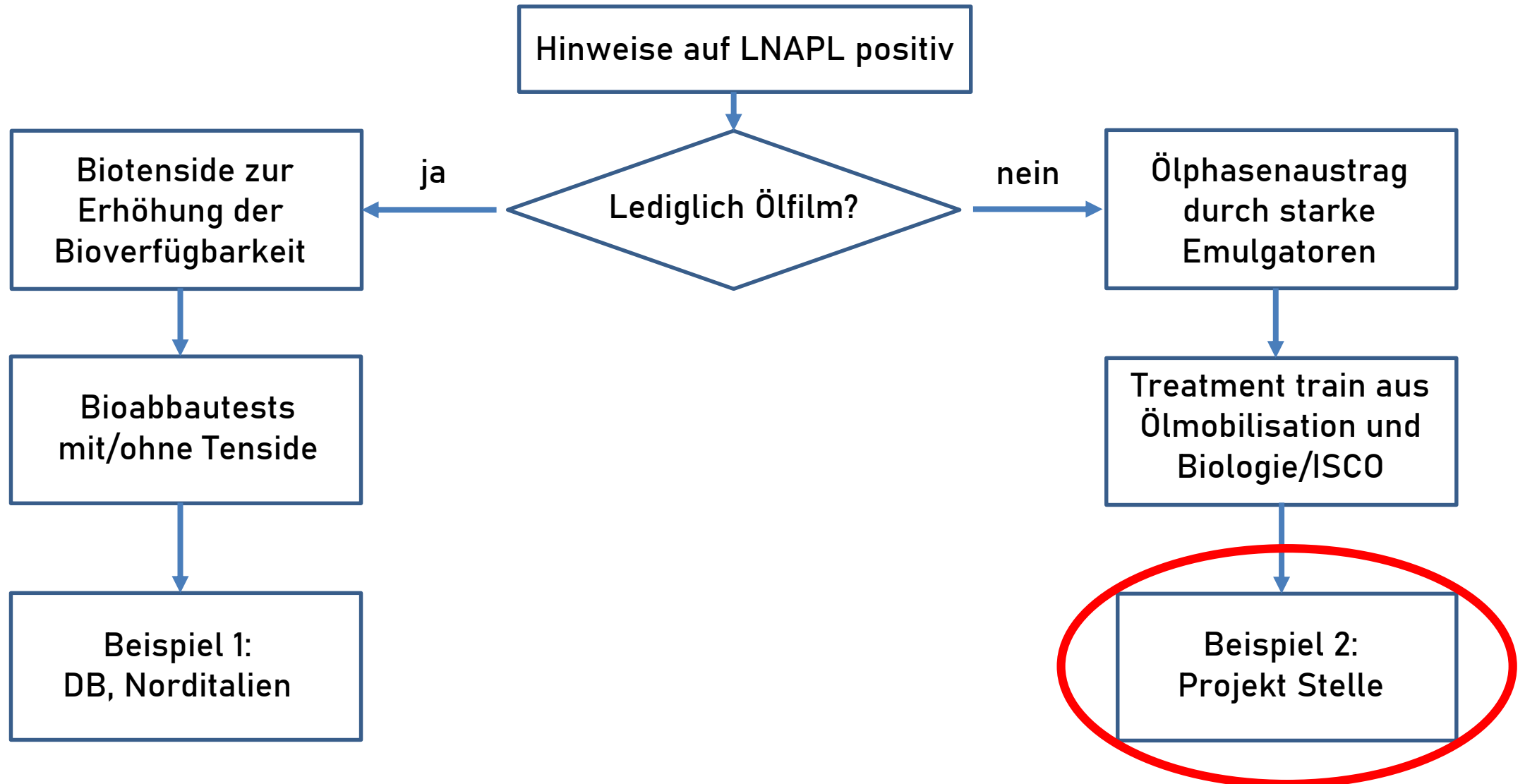


Optimierung der Betriebsführung bei Schadstoffpräsenz

Beispiel Injektion technischer Sauerstoff zur Schadensherdsanierung



Fall 3: ISCO-Projekt bei Vorliegen mobiler Phase?



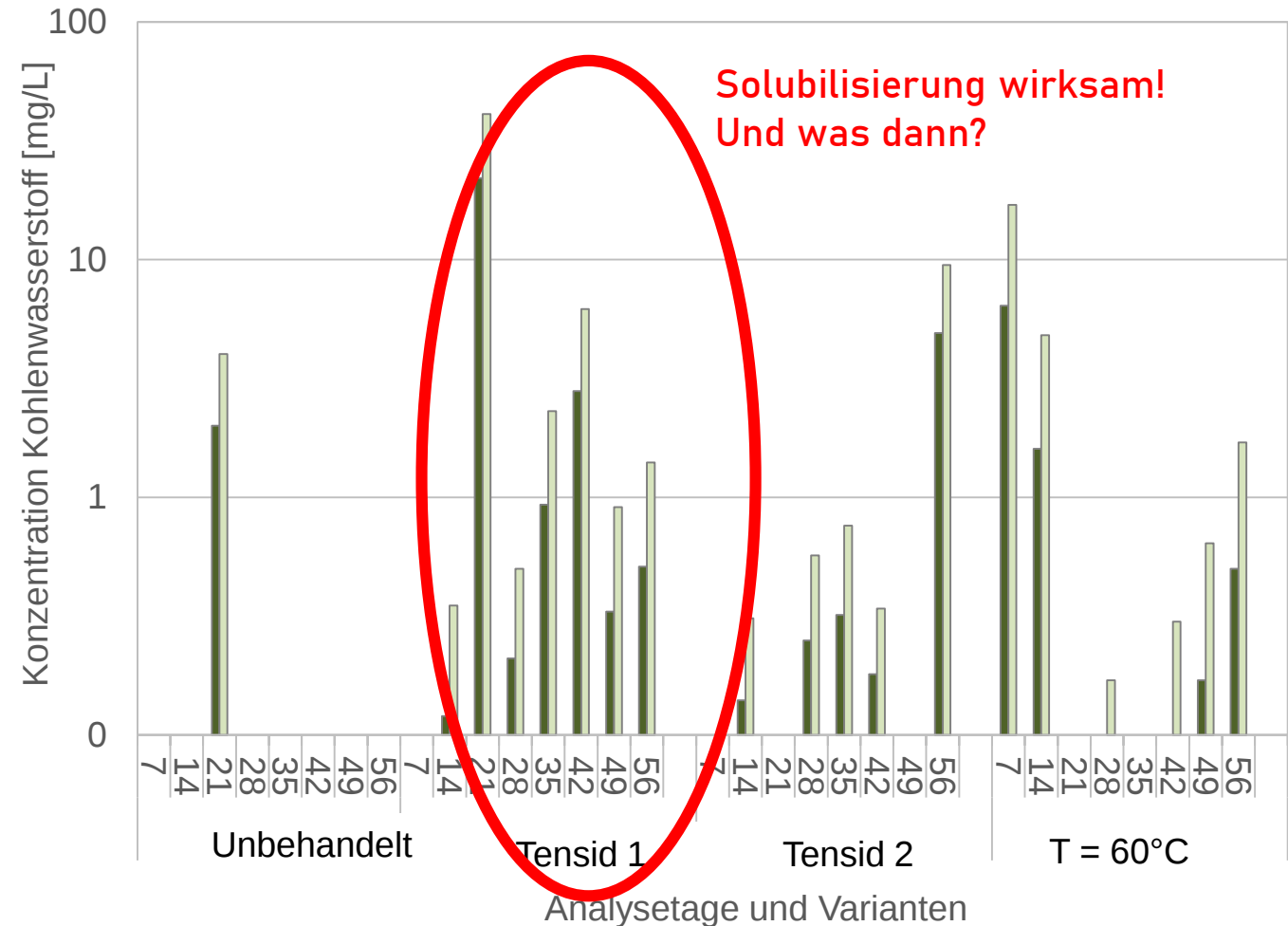
Nicht nur ein Ölfilm, sondern LNAPL? – Beispiel Emulgatoreinsatz

KW C10 - C22 und C10 - C40 im Säuleneluat

■ KW C10 -C22 ■ KW C10 - C40

Aspekte zum Emulgatoreinsatz:

- ▶ Desorption / Solubilisierung der Phase
- ▶ HLB-Wert ist für Effektivität wichtig!
- ▶ Schädigt Mikroorganismen bei hoher Konzentration
- ▶ mögliche Mobilisation von Schadstoffen



ISCO – Oxidationsmittelauswahl

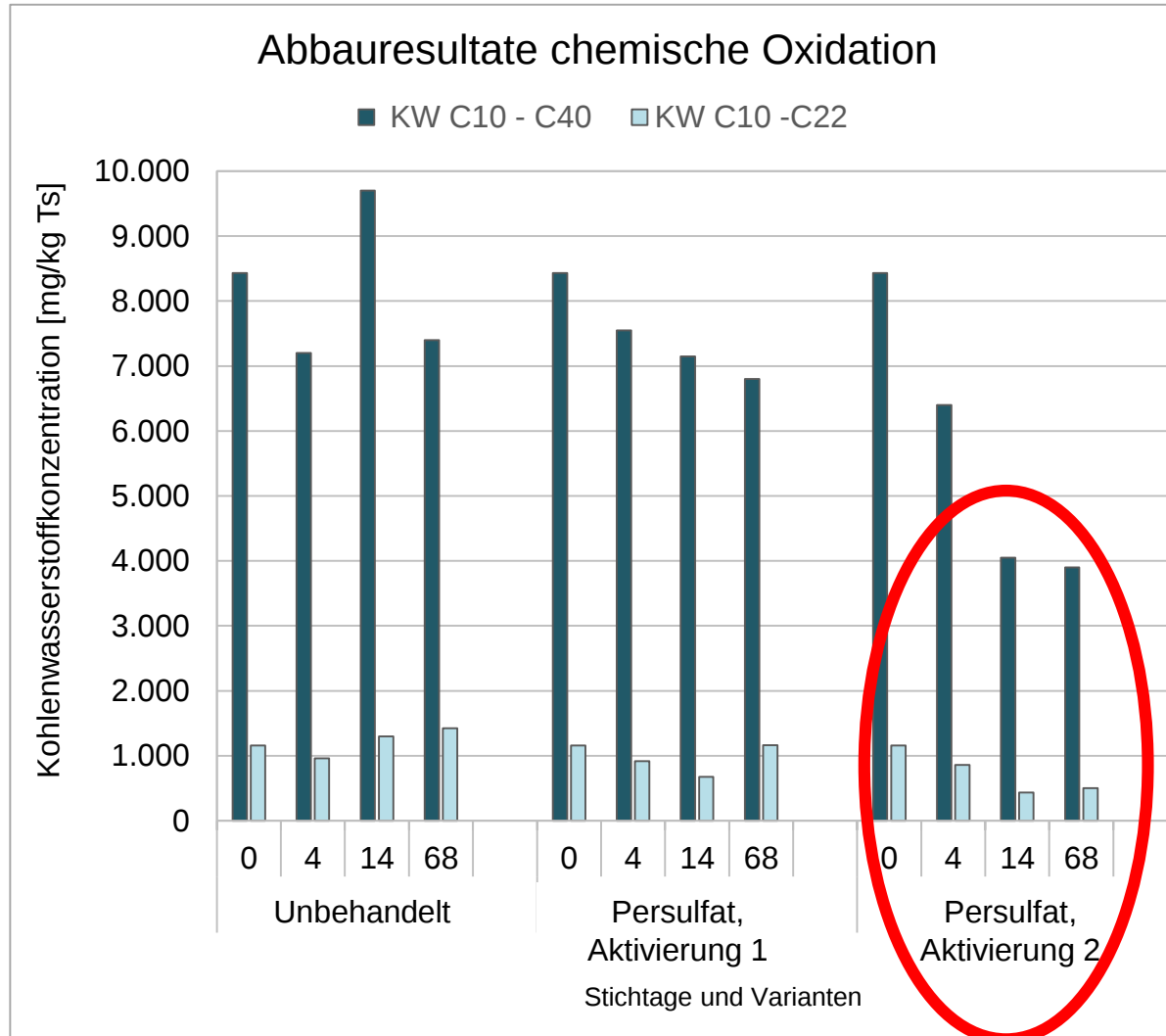
Oxidationsmittel	Reaktionsmechanismus	Ox. pot. (V)
1. Perozon	$2 \text{O}_3 + \text{H}_2\text{O}_2 \rightleftharpoons 2 \text{OH}^\bullet + 3 \text{O}_2$	$E_{\text{red}}^0 = 2,80$
2. Fenton's Reagenz	$\text{Fe}^{2+} + \text{H}_2\text{O}_2 \rightleftharpoons \text{Fe}^{3+} + \text{OH}^- + \text{OH}^\bullet$	$E_{\text{red}}^0 = 2,70$
3. Aktiv. Persulfat	$\text{S}_2\text{O}_8^{2-} + \text{H}_2\text{O}_2 \rightleftharpoons 2 \text{SO}_4^{\bullet -} + 2 \text{OH}^\bullet$	$E_{\text{red}}^0 = 2,60$
4. C-Sparge (Ozon)	$\text{O}_3 + 6 \text{H}^+ + 6\text{e}^- \rightleftharpoons 3\text{H}_2\text{O}$	$E_{\text{red}}^0 = 2,42$
5. Persulfat	$\text{S}_2\text{O}_8^{2-} + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightleftharpoons 2\text{HSO}_4^{-1}$	$E_{\text{red}}^0 = 2,01$
6. K-/Na-MnO ₄	$2 \text{MnO}_4^- + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightleftharpoons 2 \text{H}_2\text{O} + 2\text{MnO}_2$	$E_{\text{red}}^0 = 1,69$
7. H ₂ O ₂	$\text{Fe}^{3+} + \text{H}_2\text{O}_2 \rightleftharpoons \text{Fe}^{2+} + \text{HO}_2^\bullet + \text{H}^+$	$E_{\text{red}}^0 = 1,77$
8. Permeox (Regenesis)	$\text{Fe}^{3+} + \text{H}_2\text{O}_2 \rightleftharpoons \text{Fe}^{2+} + \text{HO}_2^\bullet + \text{H}^+$	$E_{\text{red}}^0 = 1,77$
9. Reinsauerstoff		$E_{\text{red}}^0 = 0,7$

Zerstörung mittels chemischer Oxidation (ISCO)

- ▶ Nicht jedes Oxidationsmittel kann jeden Schadstoff zerstören!
- ▶ Doppelbindungen und aromatische Strukturen sind leichter chemisch zu zerstören als C-C-Einfachbindungen!

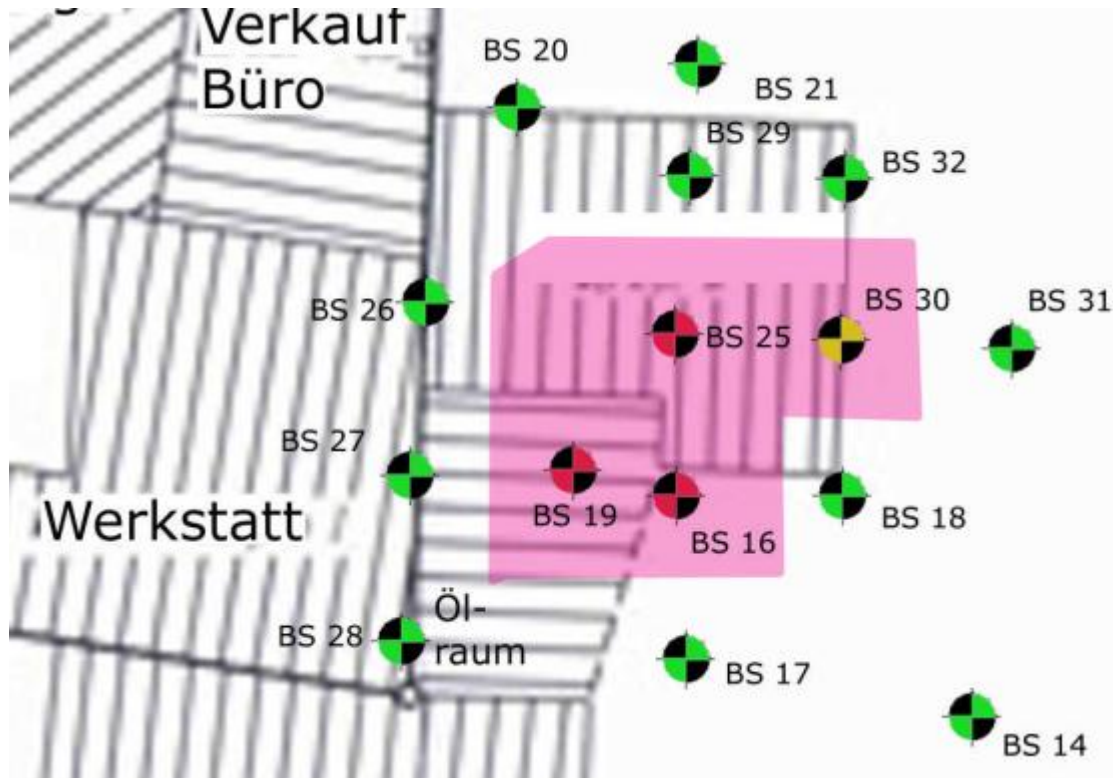
Bindungstyp	Volt (eV)
Kohlenstoff-Kohlenstoff-Bindung - einfach (Langkettige Kohlenwasserstoffe, PAK, MtBE, Chlorethane)	2,5
Aromatische Kohlenstoff-Kohlenstoff-Bindung (Monoaromaten, BTEX, PCP, Phenole)	2,0
Kohlenstoff-Kohlenstoff-Doppelbindung (PCE, TCE, cDCE, VC)	1,5
Kohlenstoff-Wasserstoff-Bindung (Alkane)	1,0

ISCO – Laborstudie bei unterschiedlicher Persulfat-Aktivierung

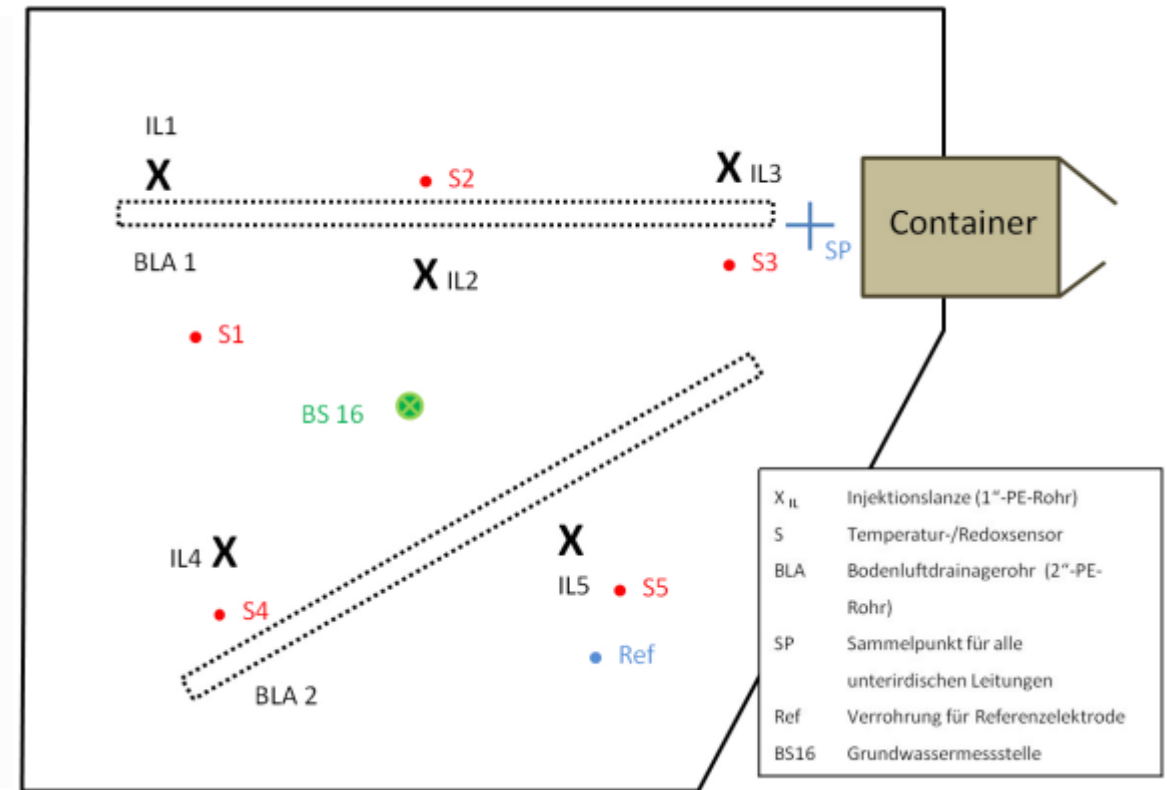


Fall 3 – Surfactant enhanced ISCO

Lageplan Erkundung:
Ölphase (rot); Kontamination (lila)

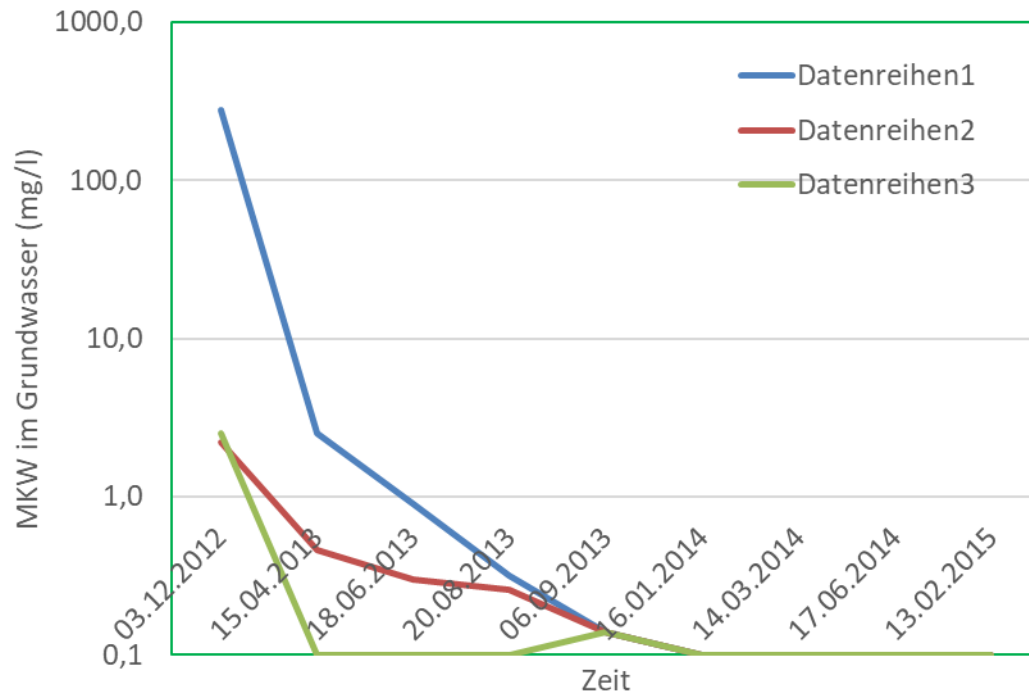


Lageplan Ausführung:
Injektionslanzen (X), BLA 1 + 2, In-situ-Sensorik (T)

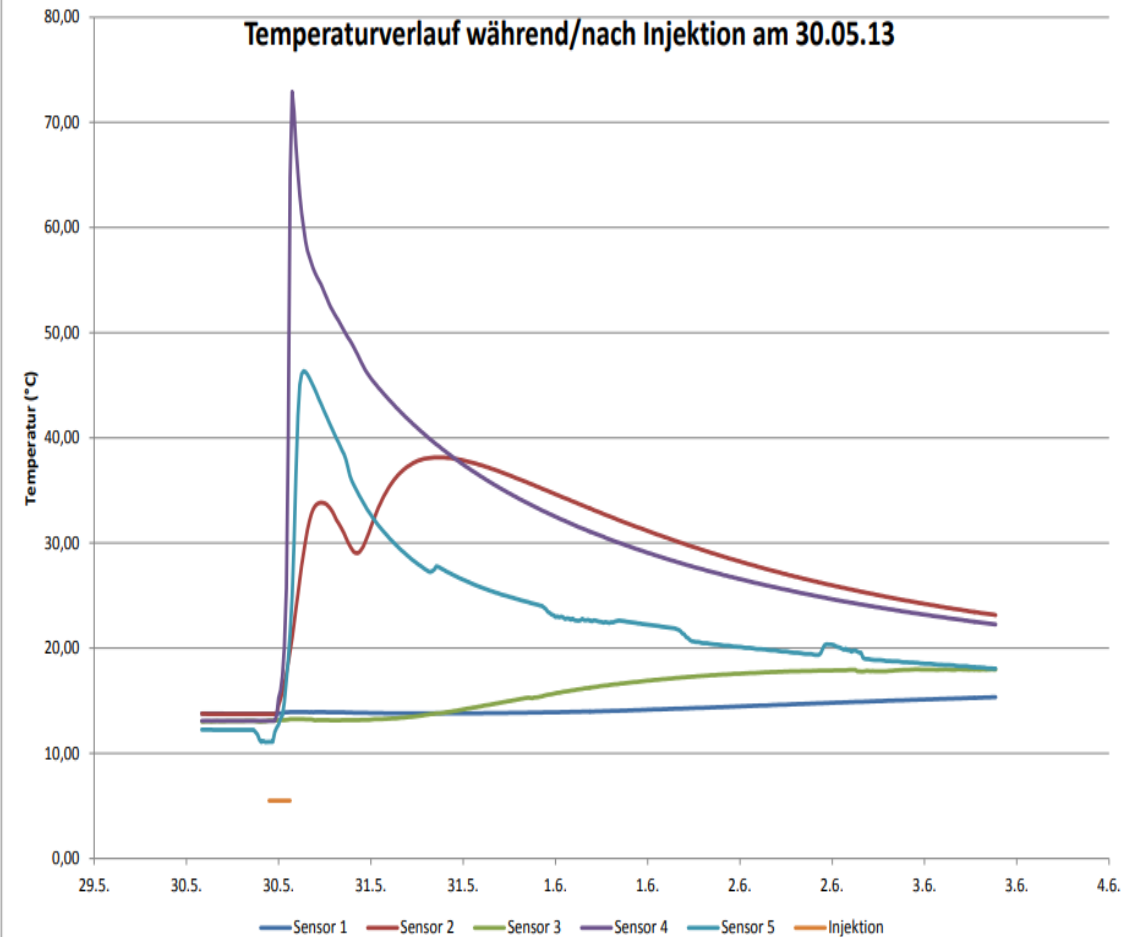


Projektbeispiel – Surfactant enhanced ISCO

Projekt "Stelle": Surfactant enhanced ISCO - Abnahme
MKW im Grundwasser



Temperaturverlauf während/nach Injektion am 30.05.13



FAZIT

- ▶ Die Entscheidung für eine ressourcenschonende In-situ-Sanierung führt häufig zu erheblichen Einsparungen in Wirkstoffverbräuchen und Energieaufwand sowie geringem oder gar keinem Abfallaufkommen.
- ▶ Eine genaue, idealerweise sensorgestützte Erkundung der Schadstoffverteilung und Schadstoff-Frachten dient als ideale Grundlage für die Dimensionierung und Positionierung der Wirkstoffeinsätze.
- ▶ In standortspezifischen Tests im Labor und im Feldbetrieb können Betriebsparameter für eine ressourcenschonende Betriebsführung weiter verbessert werden.



**SIE WÜNSCHEN MEHR
INFORMATIONEN?**

Sensatec GmbH
Sanierungs- und Sensoriktechnologien

Firmenzentrale

Friedrichsorter Str. 32,
D- 24159 Kiel

Tel. (0431) 389009-0
Fax (0431) 389009-19

info@sensatec.de

www.sensatec.de