

In-situ-Sanierung und Wirkstoffverteilung - Problematik der strukturellen Heterogenität von Grundwasserleitern und deren Auswirkungen auf hydraulische und pneumatische Prozesse im Aquifer



Dr. Stephan Hüttmann, Sensatec GmbH, Kiel



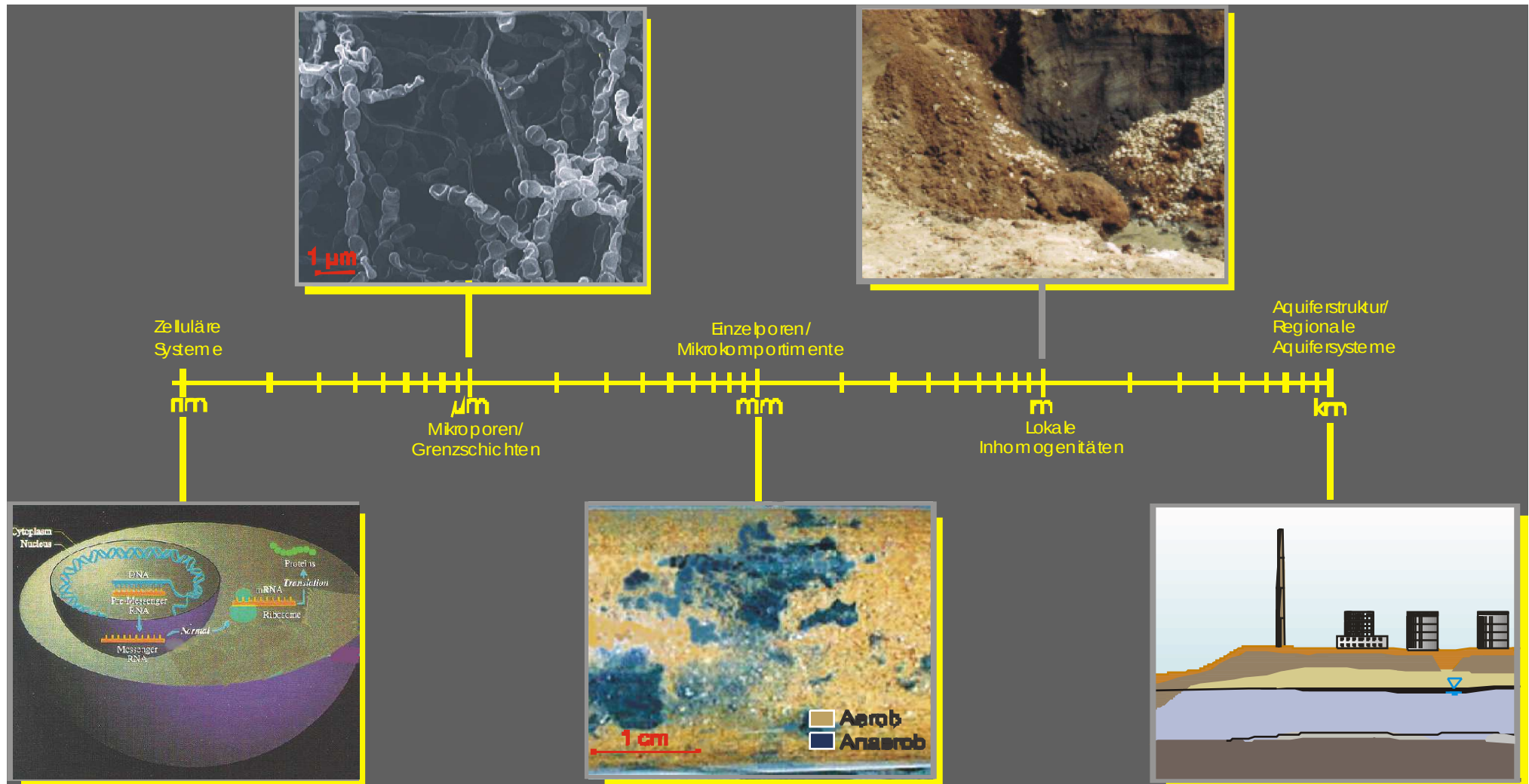
ÖVA-Technologie-Workshop



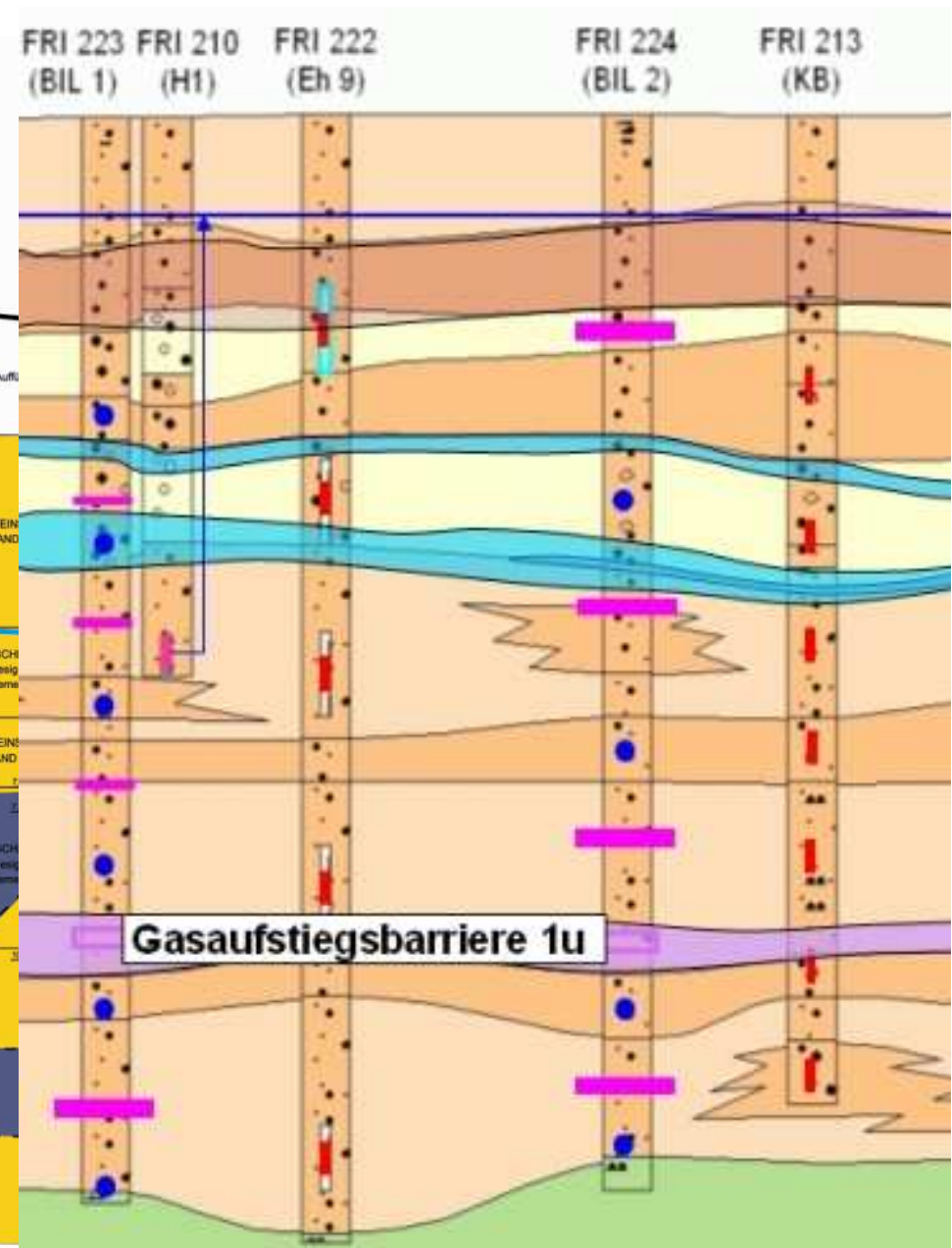
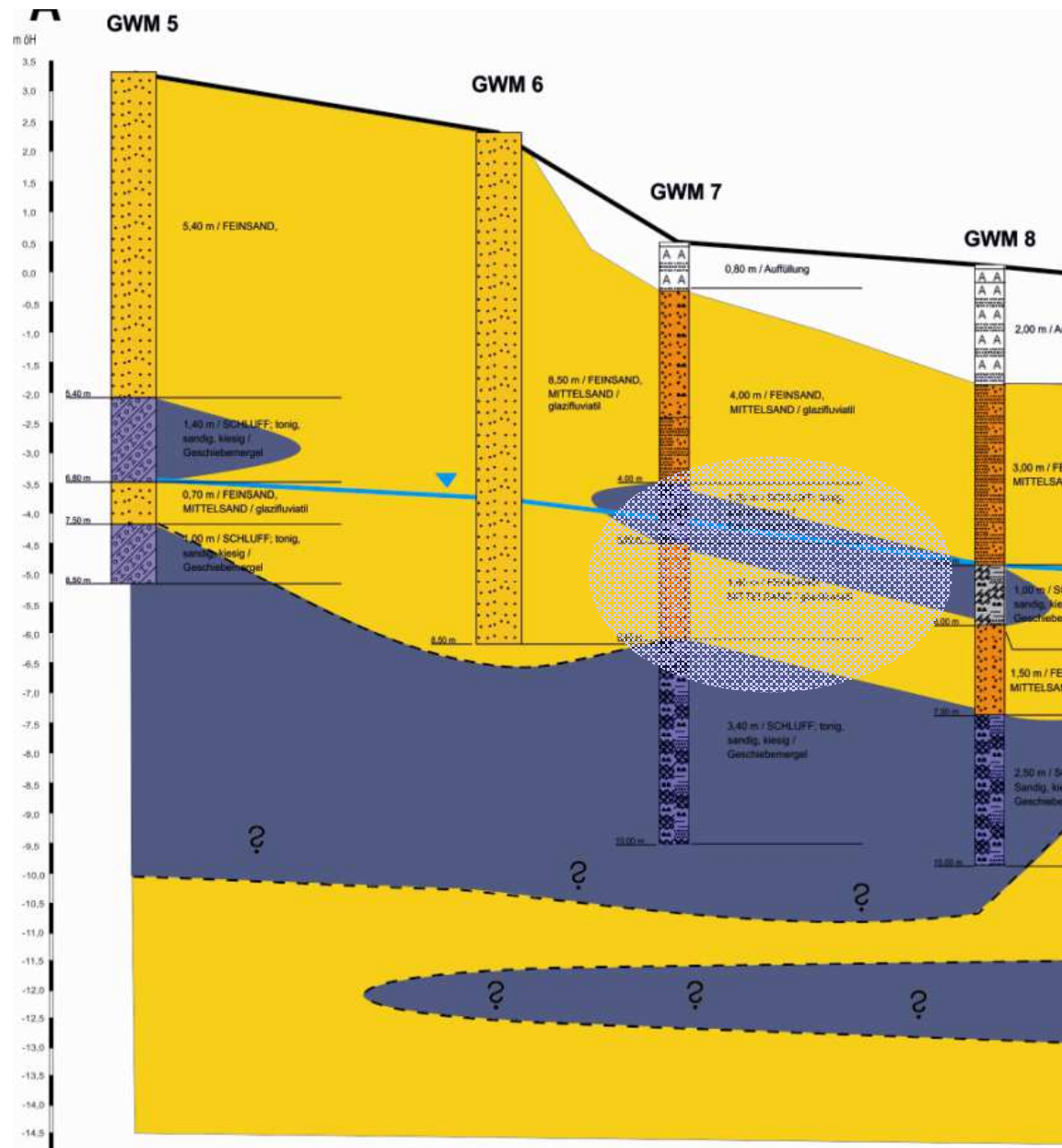
Wien, 5.11.2015



Sanierungsplanung – von Prozessen auf Nanometerebene bis zum Kilometermaßstab



Beherrschung der strukturellen Heterogenität für In-situ-Prozesse



Probleme bei der Stoffversorgung in-situ

Problematik	Konsequenz für In-situ-Prozess
Preferential flow – Es kommt zur Ausbildung bevorzugter Strömungskanäle im Aquifer.	Die Verteilung von Wirkstoffen im Aquifer erfolgt nur auf Vorzugsbahnen – nicht besser als Pump-and-Treat-Strategie
Schadstoffe sind diffusiv in hydraulisch oder pneumatisch schwer zugängliche Speicherstrukturen eingedrungen.	Die Speicherstrukturen sind mit herkömmlichen In-situ-Verfahren nicht erreichbar.
Die natürliche Grundwasserströmung ist räumlich-zeitlich variabel.	Es erfolgt keine stabile Wirkstoffversorgung während der In-situ-Sanierung.
Mächtige Grundwasserleiter weisen eine geochemisch stark heterogene Zonierung auf (stark reduktiv bis aerob).	Die gewählte Wirkstoffversorgung funktioniert möglicherweise nicht im gesamten Aquifer
Geochemische Begleitprozesse stören den In-situ-Sanierungsprozess, z.b. Carbonatfällung, Eisenfällung, Versauerung.	Der In-situ-Sanierungsprozess wird empfindlich beeinträchtigt oder führt zu deutlich höheren Wirkstoffverbräuchen.

1. Verteilung gasförmiger Wirkstoffe

- Passive Verteilung
- Aktive Verteilung

2. Verteilung flüssiger Wirkstoffe

- Passive Verteilung
- vertikale Grundwasserzirkulation
- horizontale Grundwasserzirkulation

3. Ausblick

1. Verteilung gasförmiger Wirkstoffe

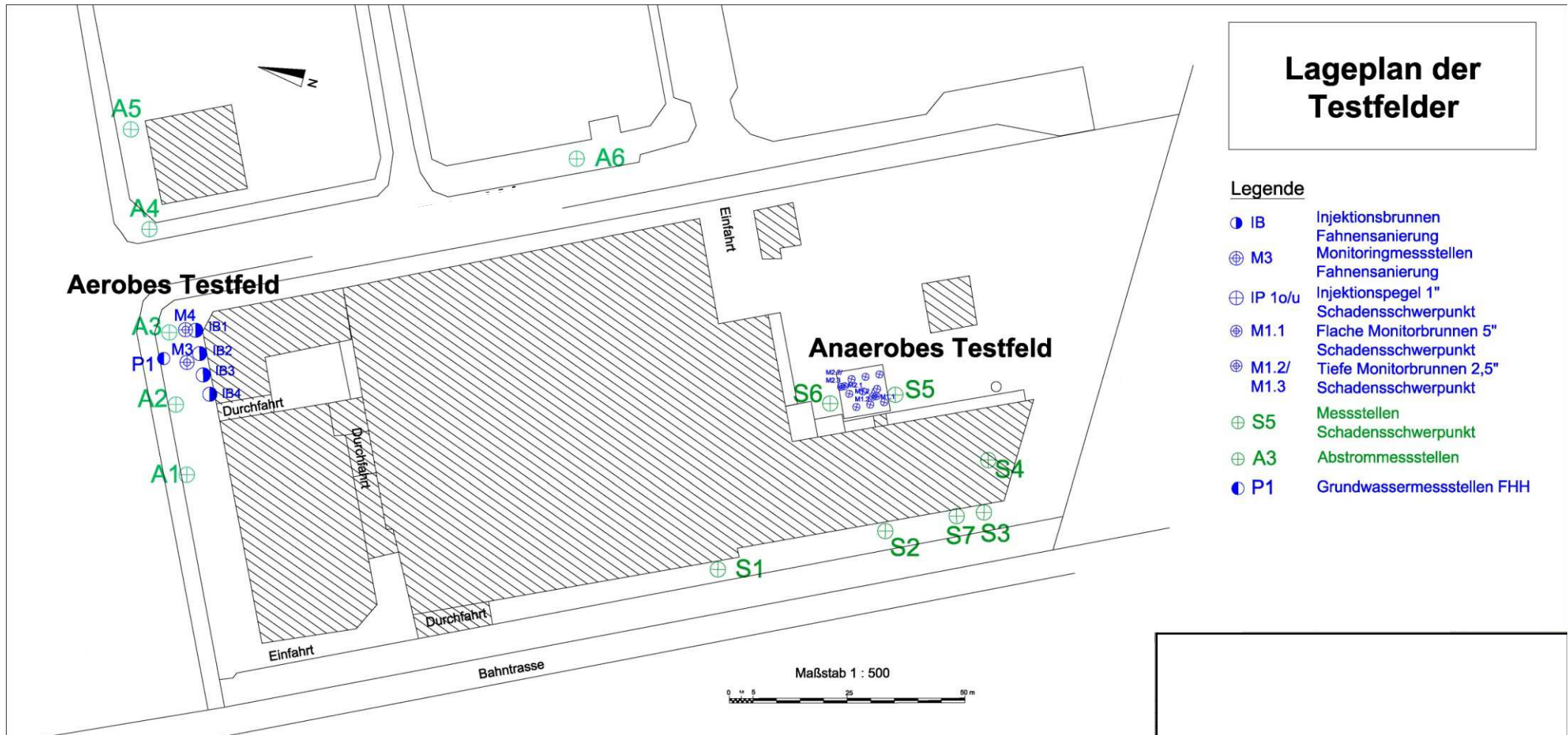
- **Passive Verteilung**
- Aktive Verteilung

2. Verteilung flüssiger Wirkstoffe

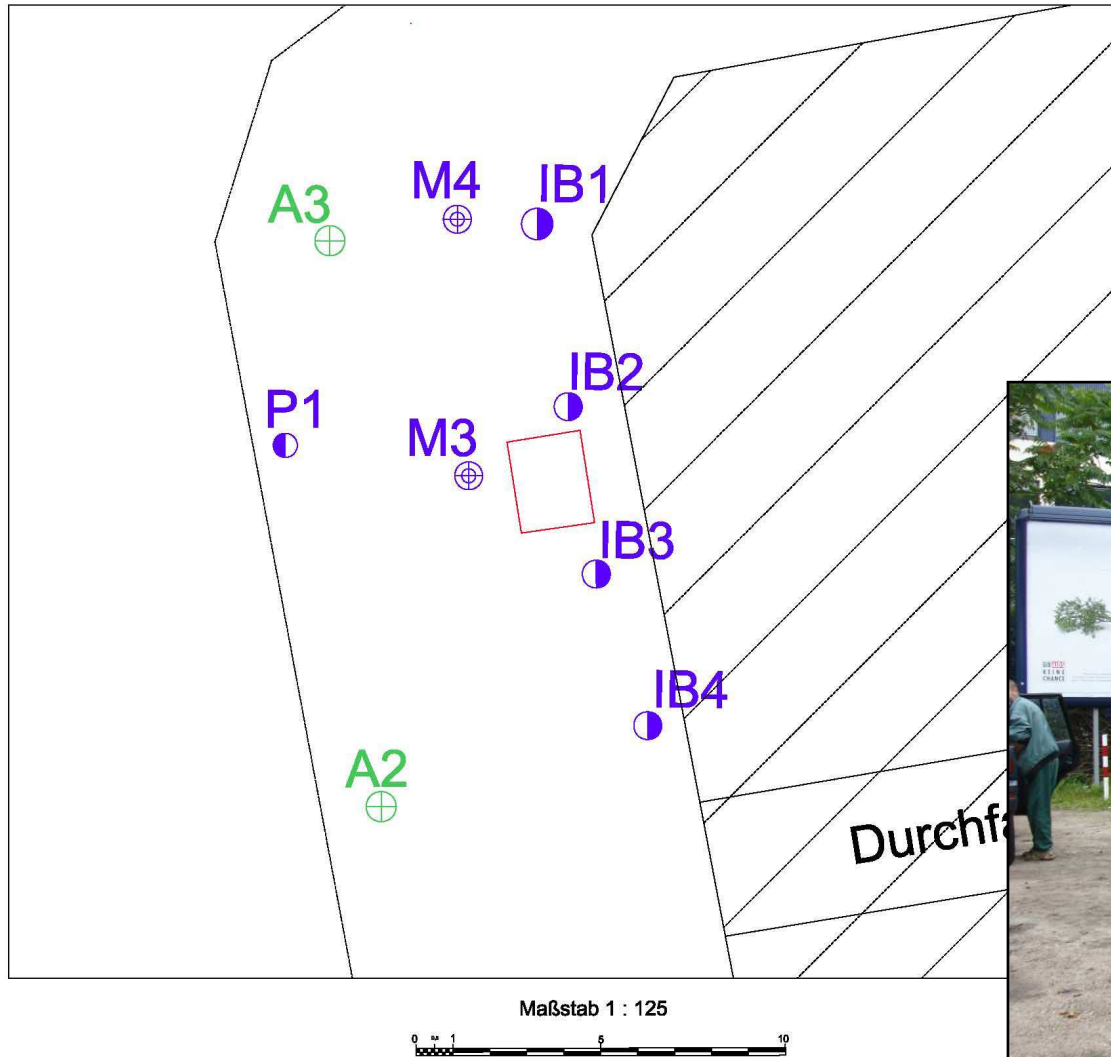
- Passive Verteilung
- vertikale Grundwasserzirkulation
- horizontale Grundwasserzirkulation

3. Ausblick

Lageplan

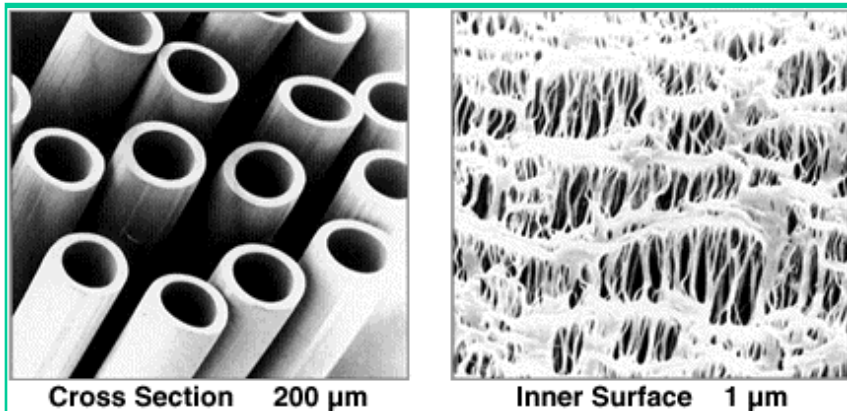


Testfeldinfrastruktur – aerobes Feld



iSOC™ (In-Situ Submerged Oxygen Curtain)

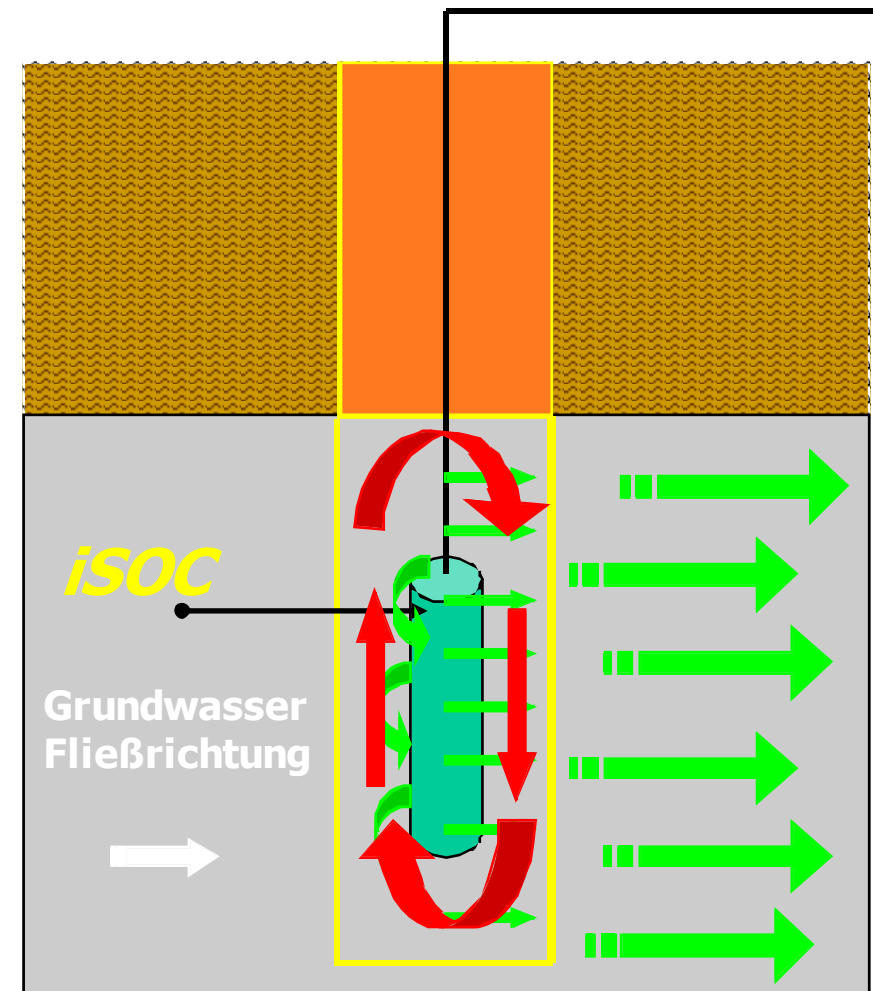
Mikroporöse Membranen



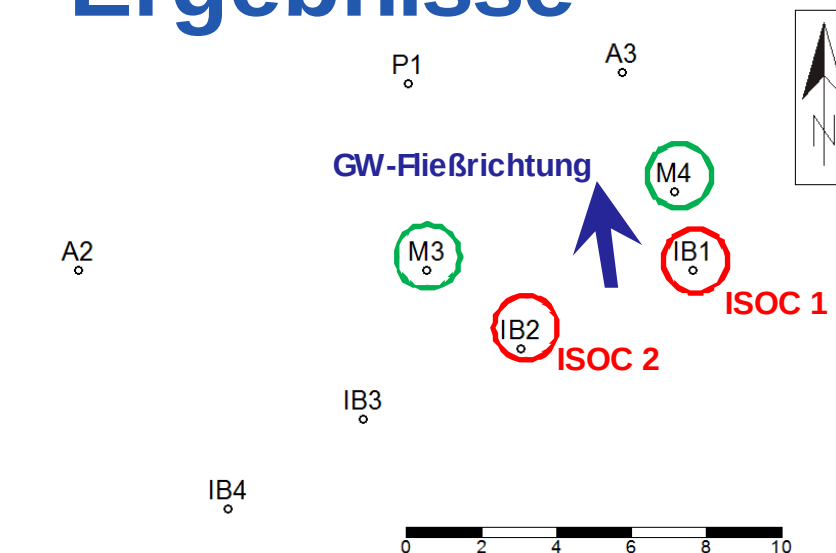
iSOC



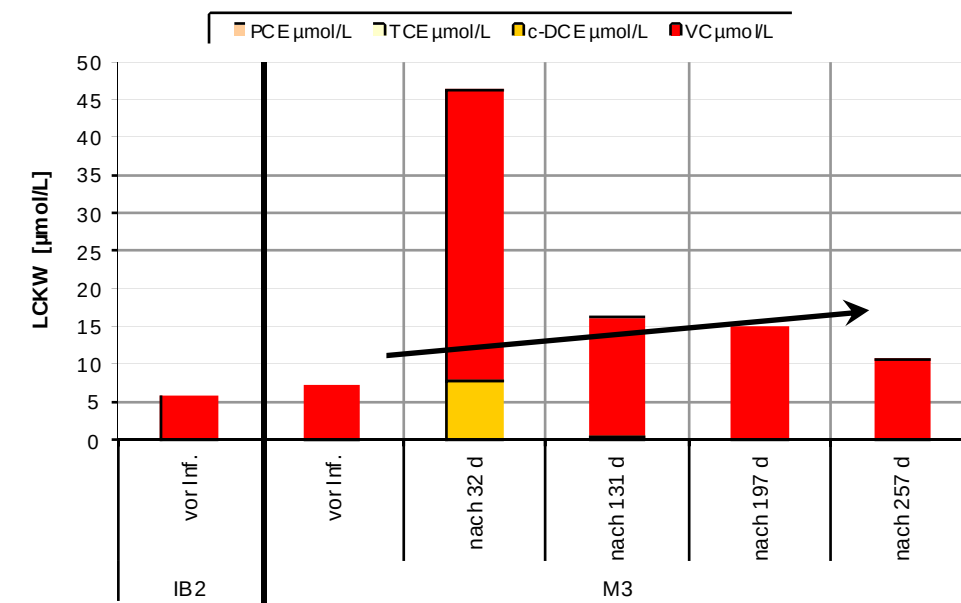
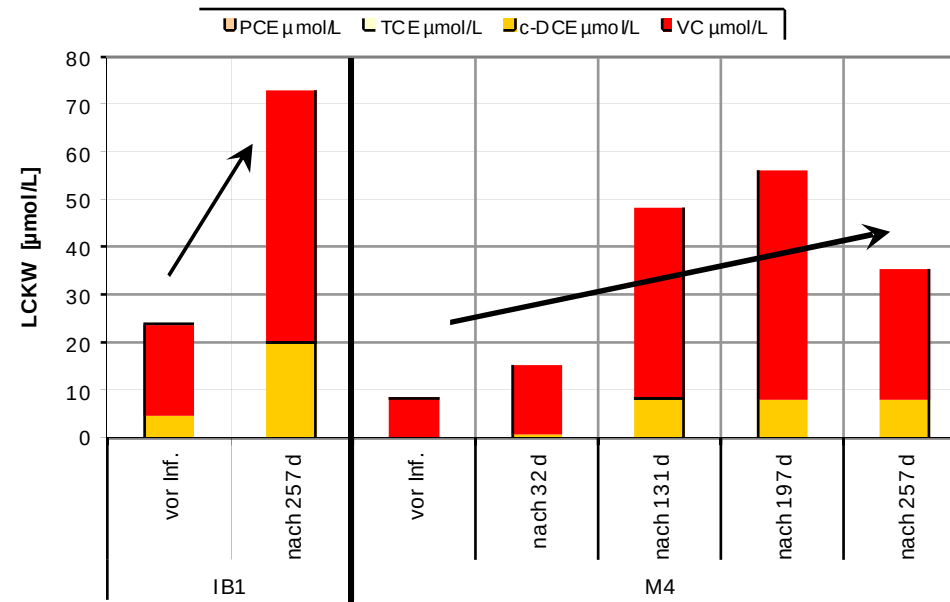
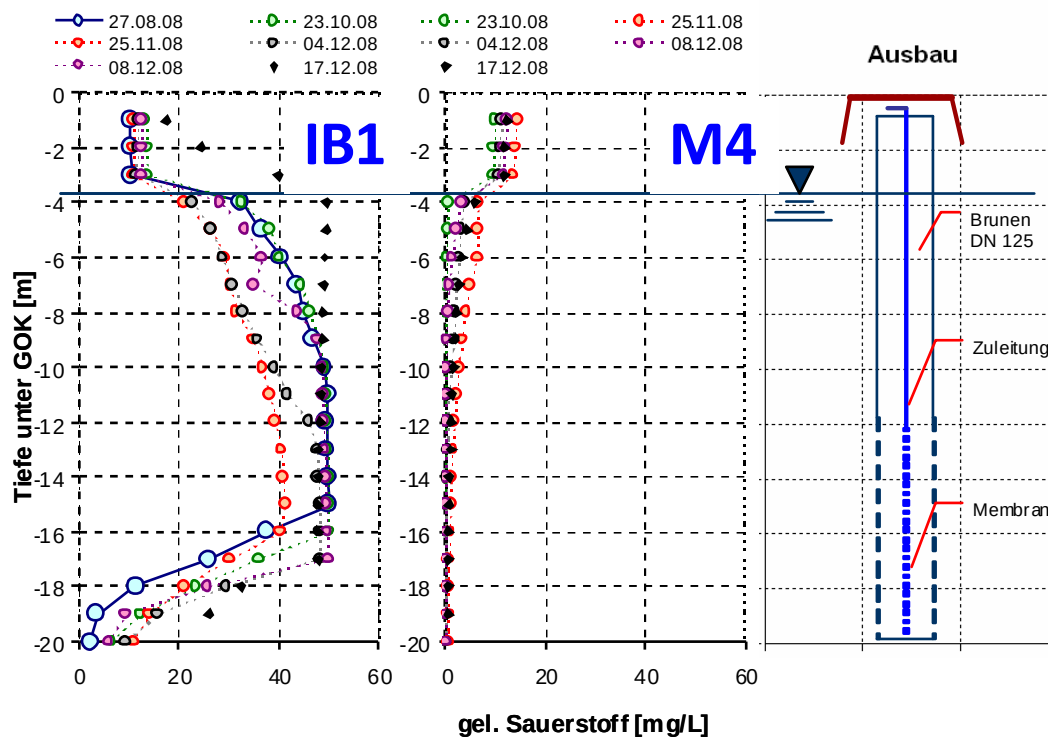
Technischer Sauerstoff



Ergebnisse



IB1 → M4, IB2 → M3



Kein Gastransfer IB ⇒ M

kein Schadstoffabbau

1. Verteilung gasförmiger Wirkstoffe

- Passive Verteilung
- **Aktive Verteilung**

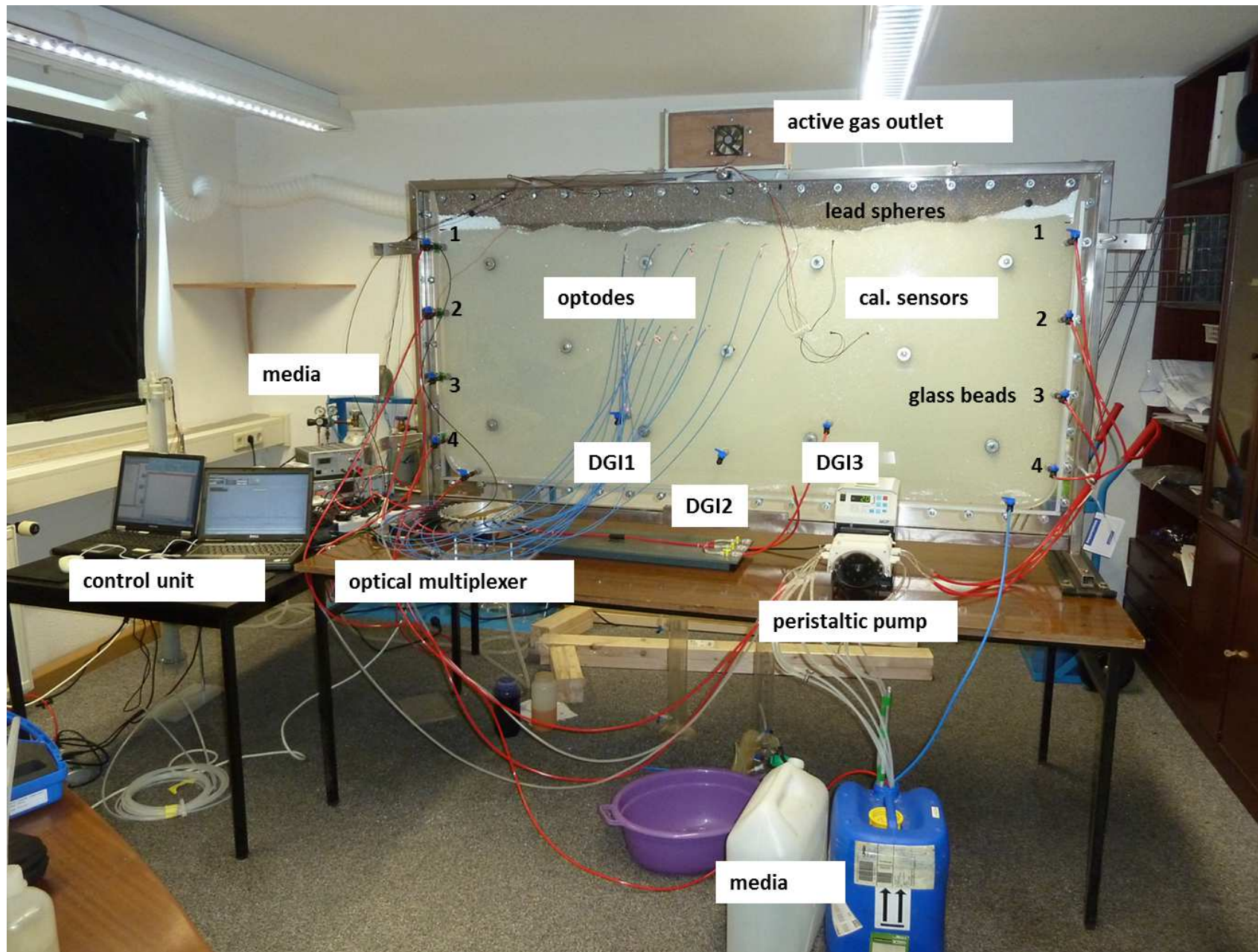
2. Verteilung flüssiger Wirkstoffe

- Passive Verteilung
- vertikale Grundwasserzirkulation
- horizontale Grundwasserzirkulation

3. Ausblick

FuE-Projekt zur Gasinjektionstechnik (UFZ Leipzig/Sensatec) 2012-2014)

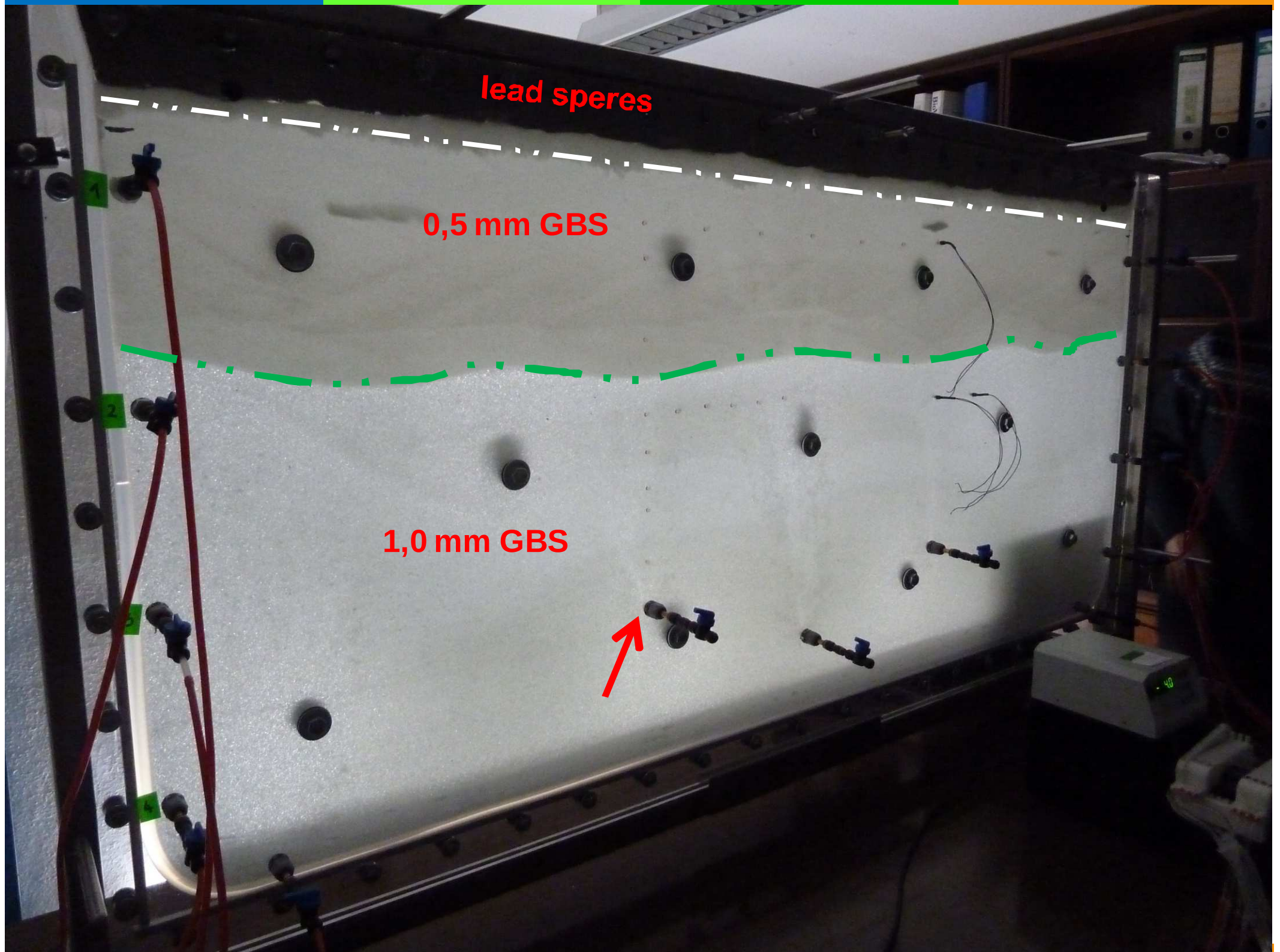
Teilprojekt: 2D-Tankexperimente zur Gasverteilungsdynamik



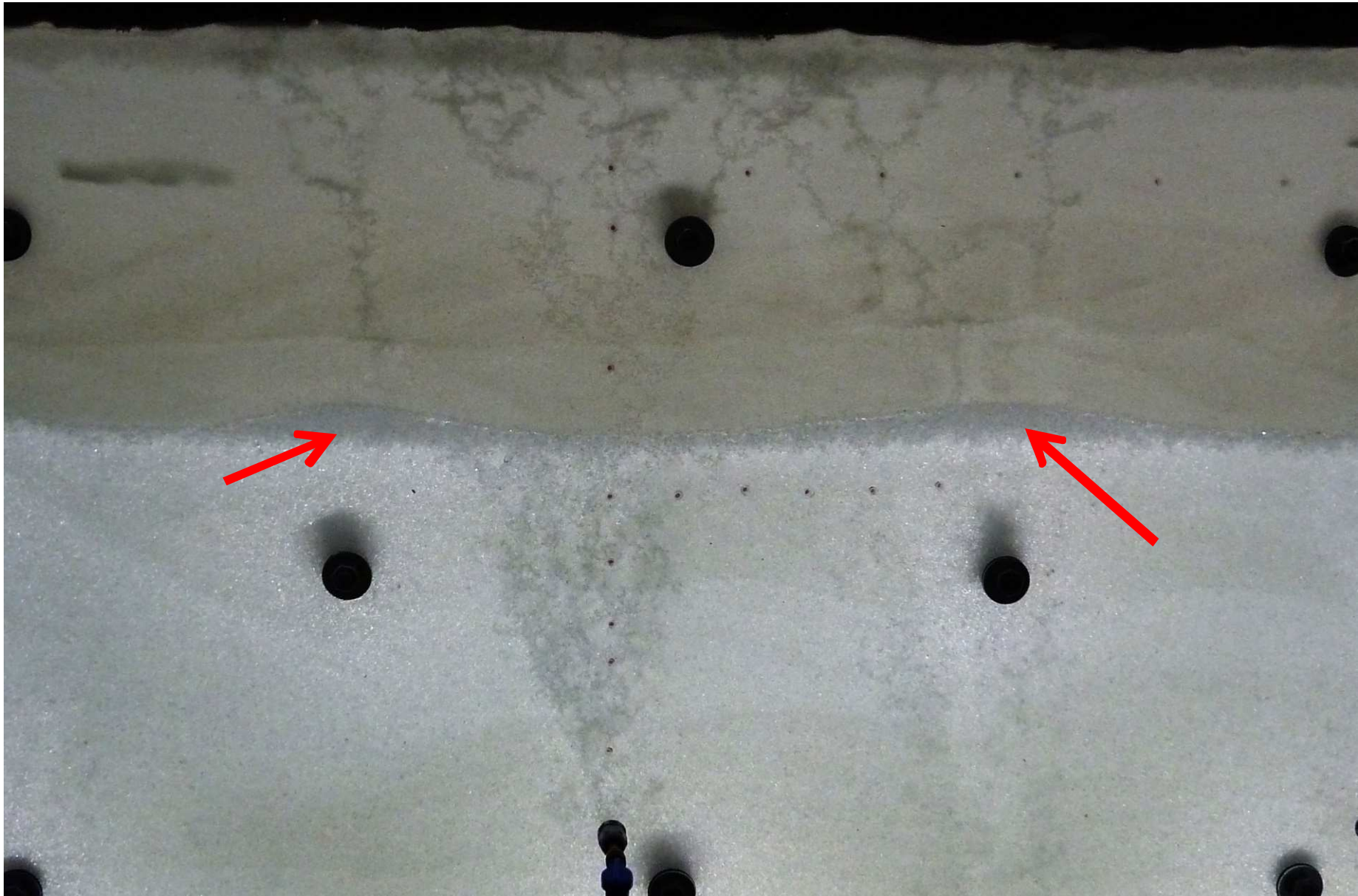
lead speres

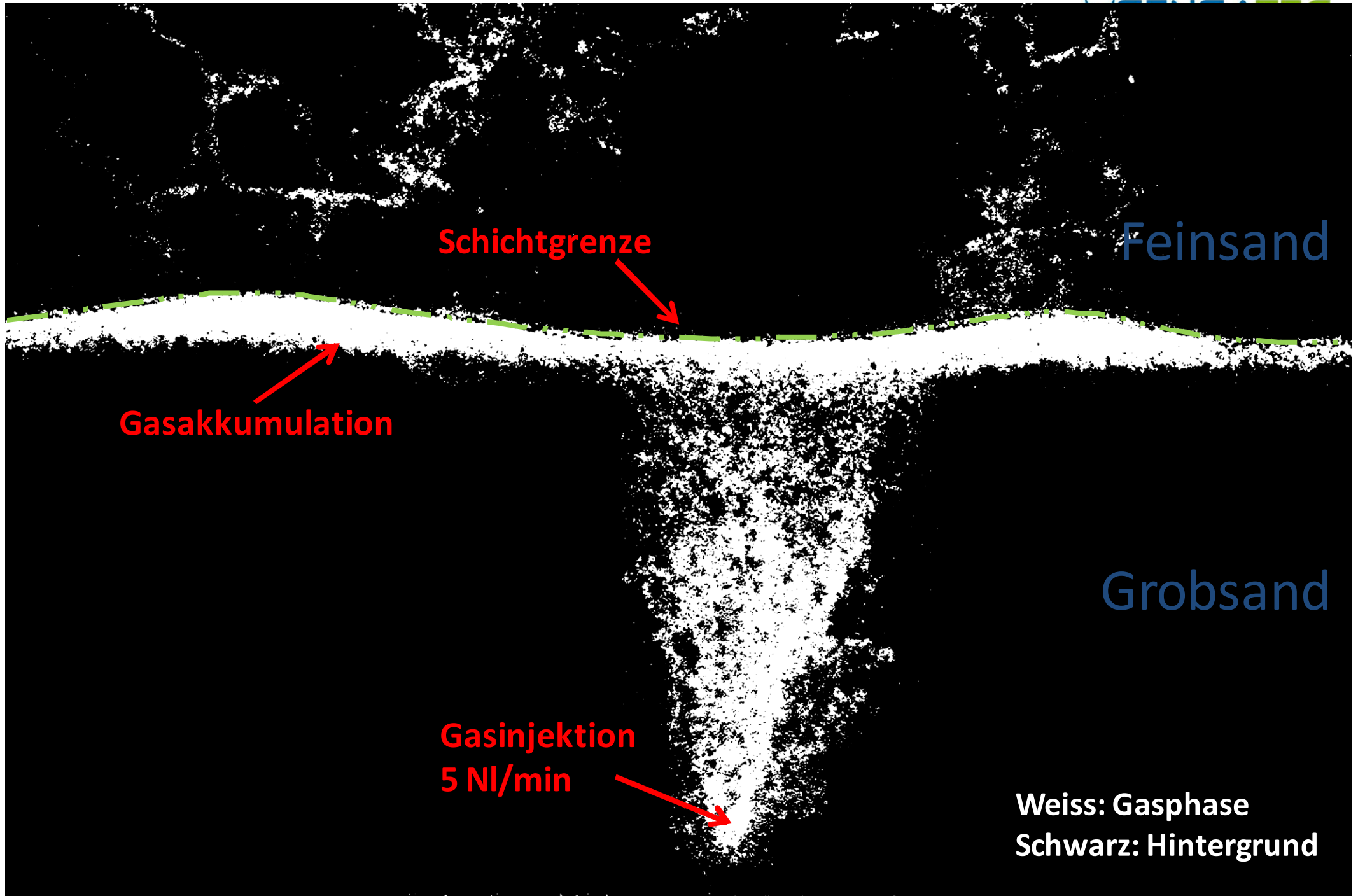
0,5 mm GBS

1,0 mm GBS



2D-Tank Gas injection 500 ml/min





- **0,5 mm GBS with 1,0 mm GBS layer on Top**
- **oxygen injection at INJ01**
- **steady state pictures (transmission light)**
- **+ reflection pictures from backside as usual**
- **100-200-500-1000-2000-4000 ml/min**
- **after experiment continuous optode / multiplexer measurement of residuals over 7 days**
- **simulated GW-velocity 0,2 m/d**

Szenario 2

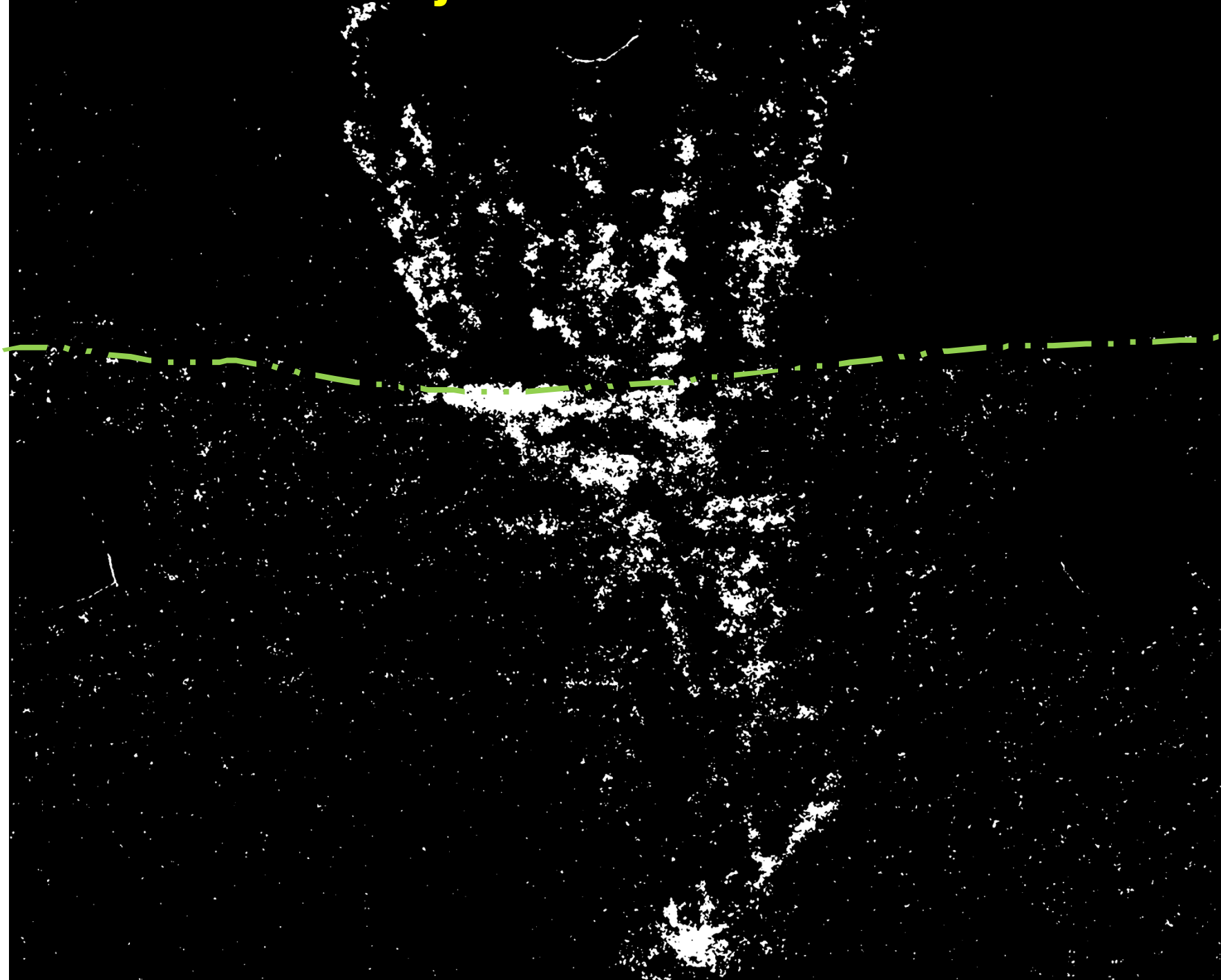
O_2 ; 20 -5000 ml/min

1,0 mm GBS

0,5 mm GBS

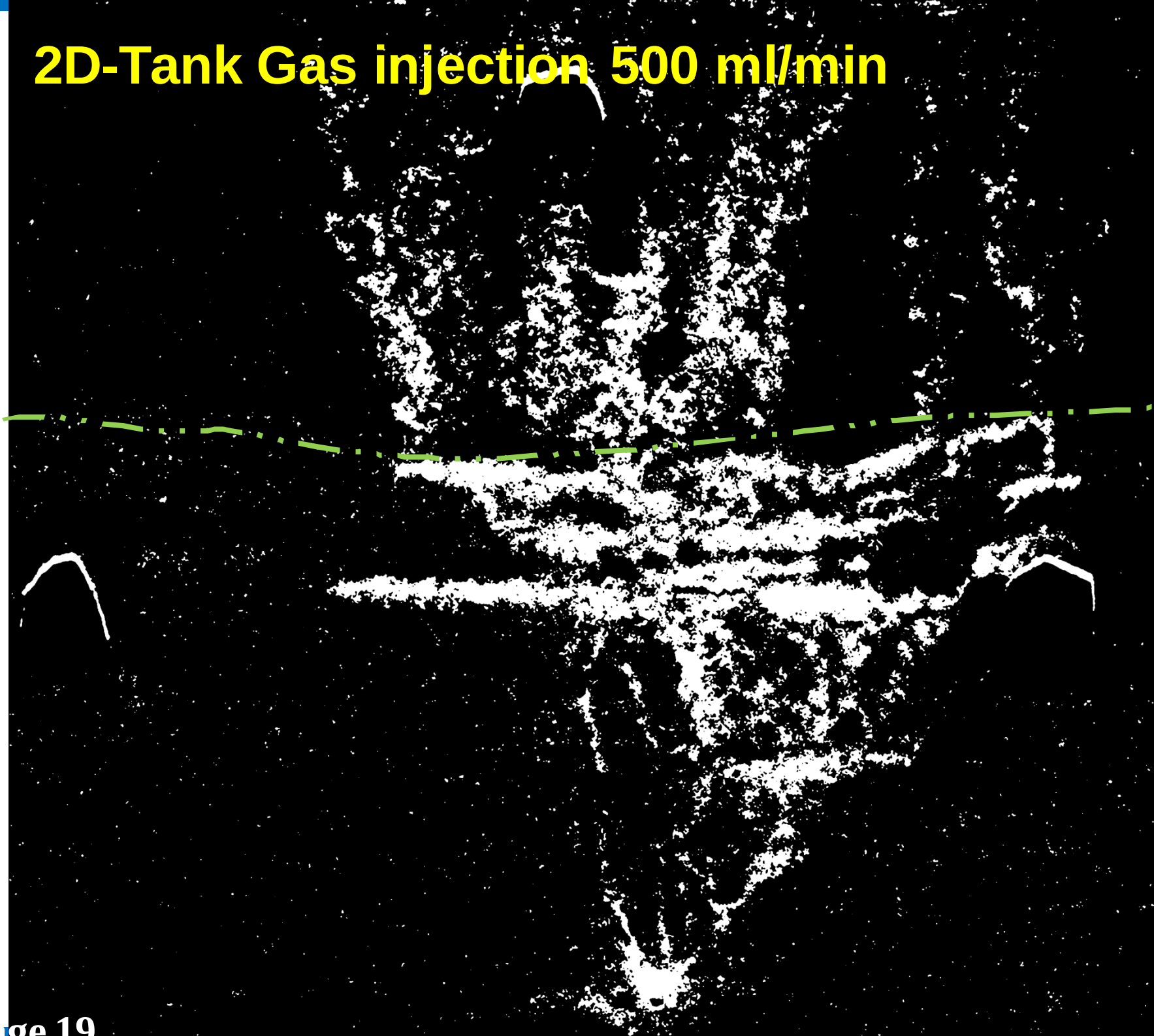
2D-Tank Gas injection 100 ml/min

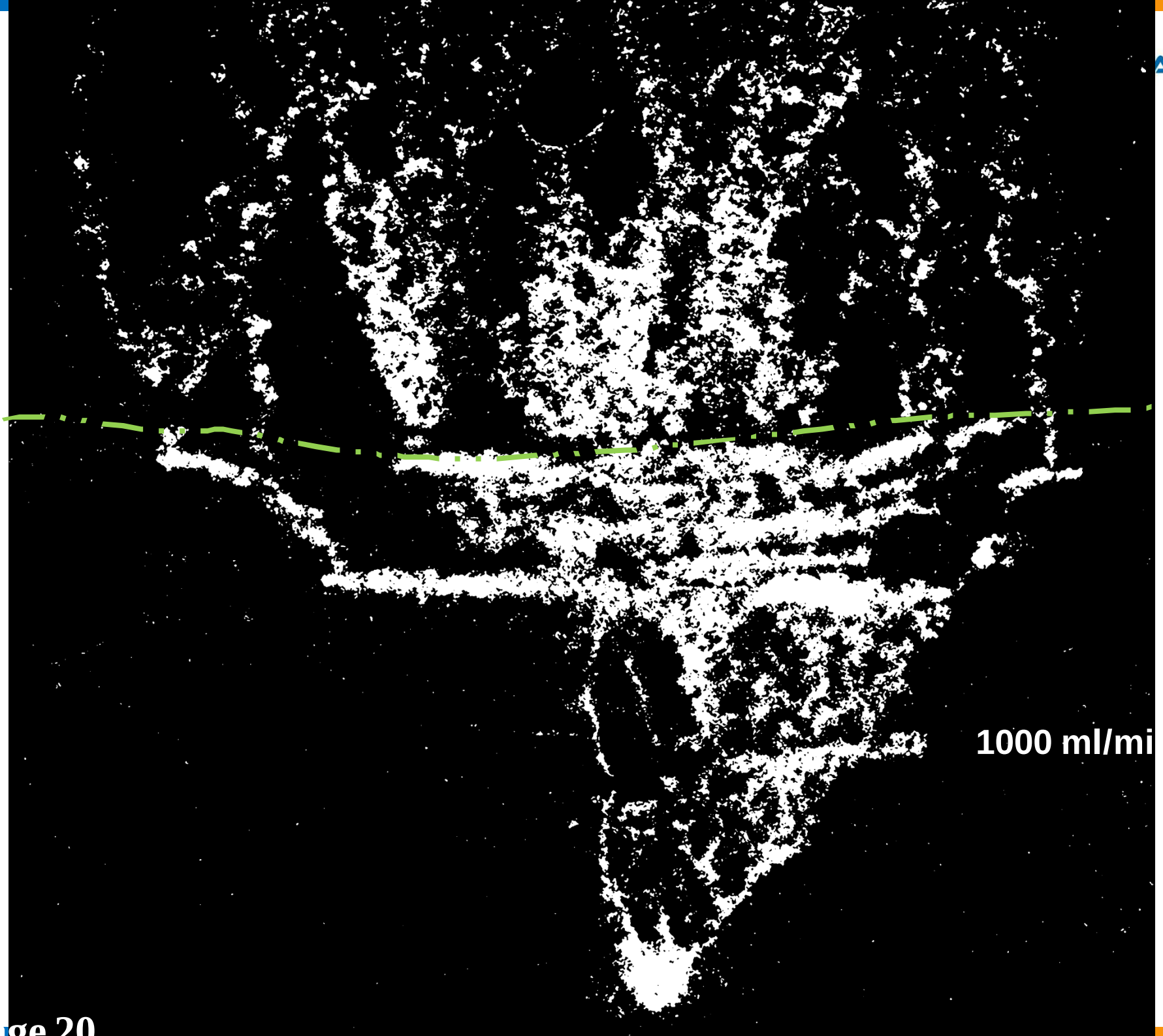
ATEC

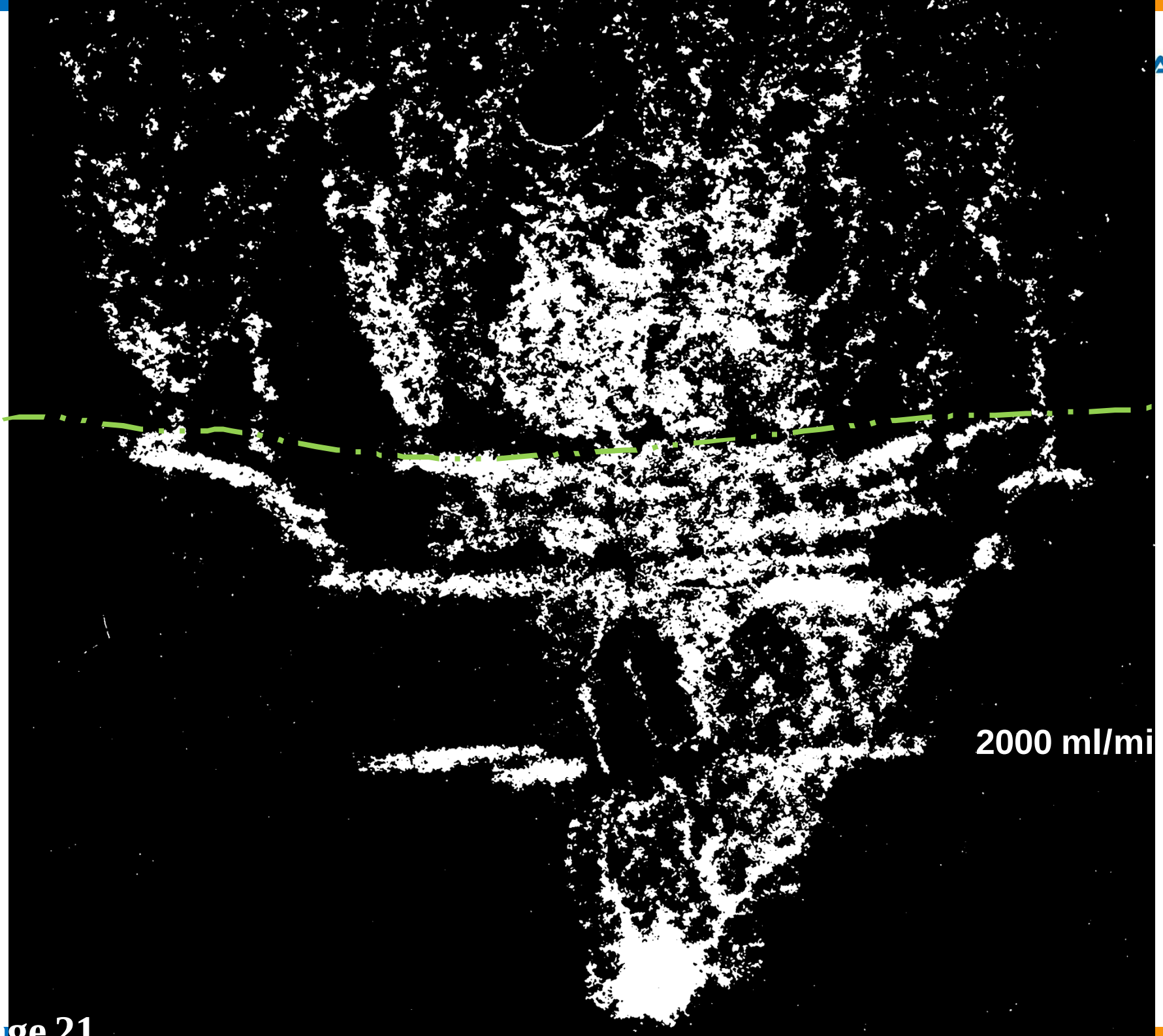


2D-Tank Gas injection 500 ml/min

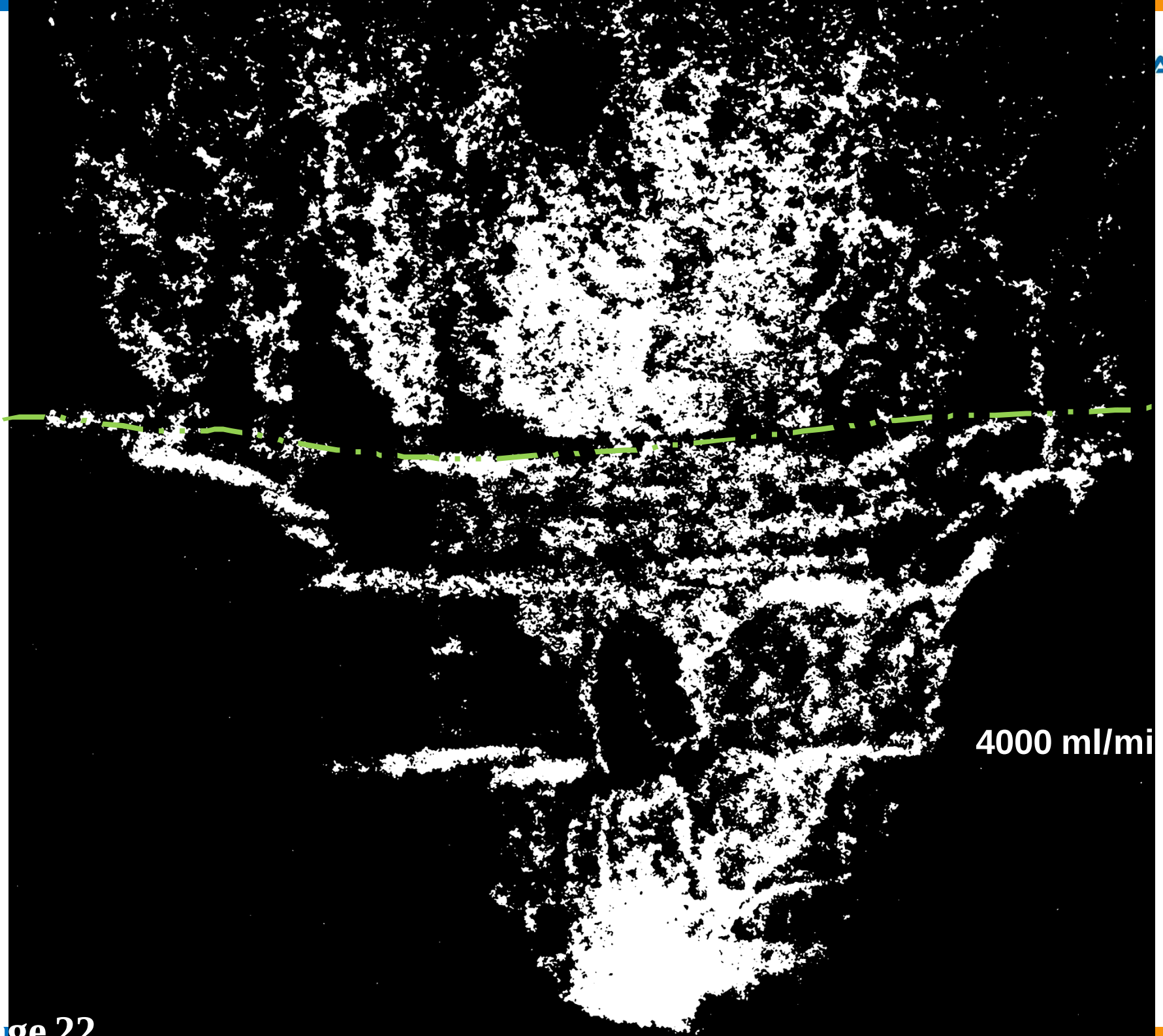
ATEC



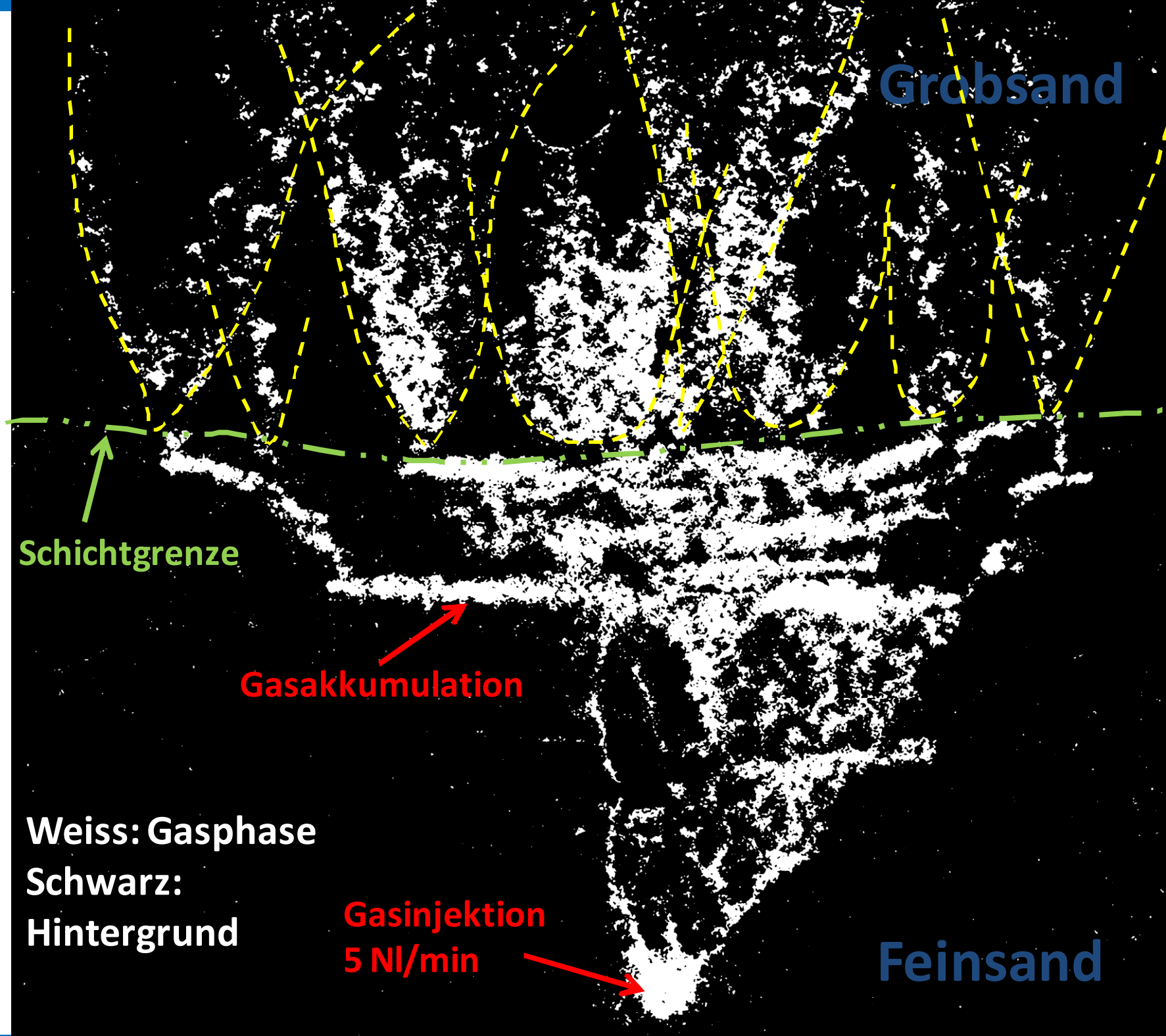




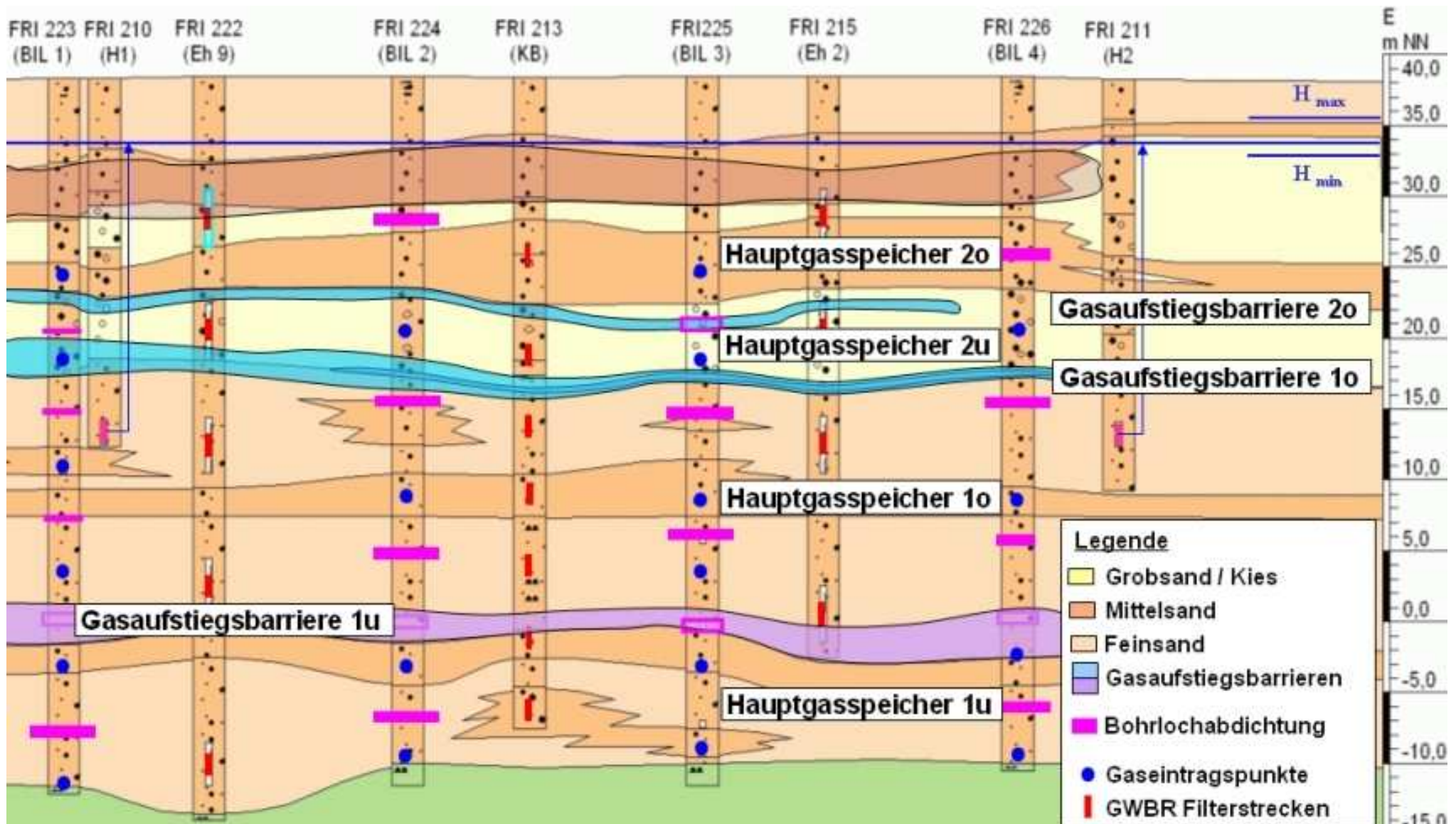
2000 ml/mi



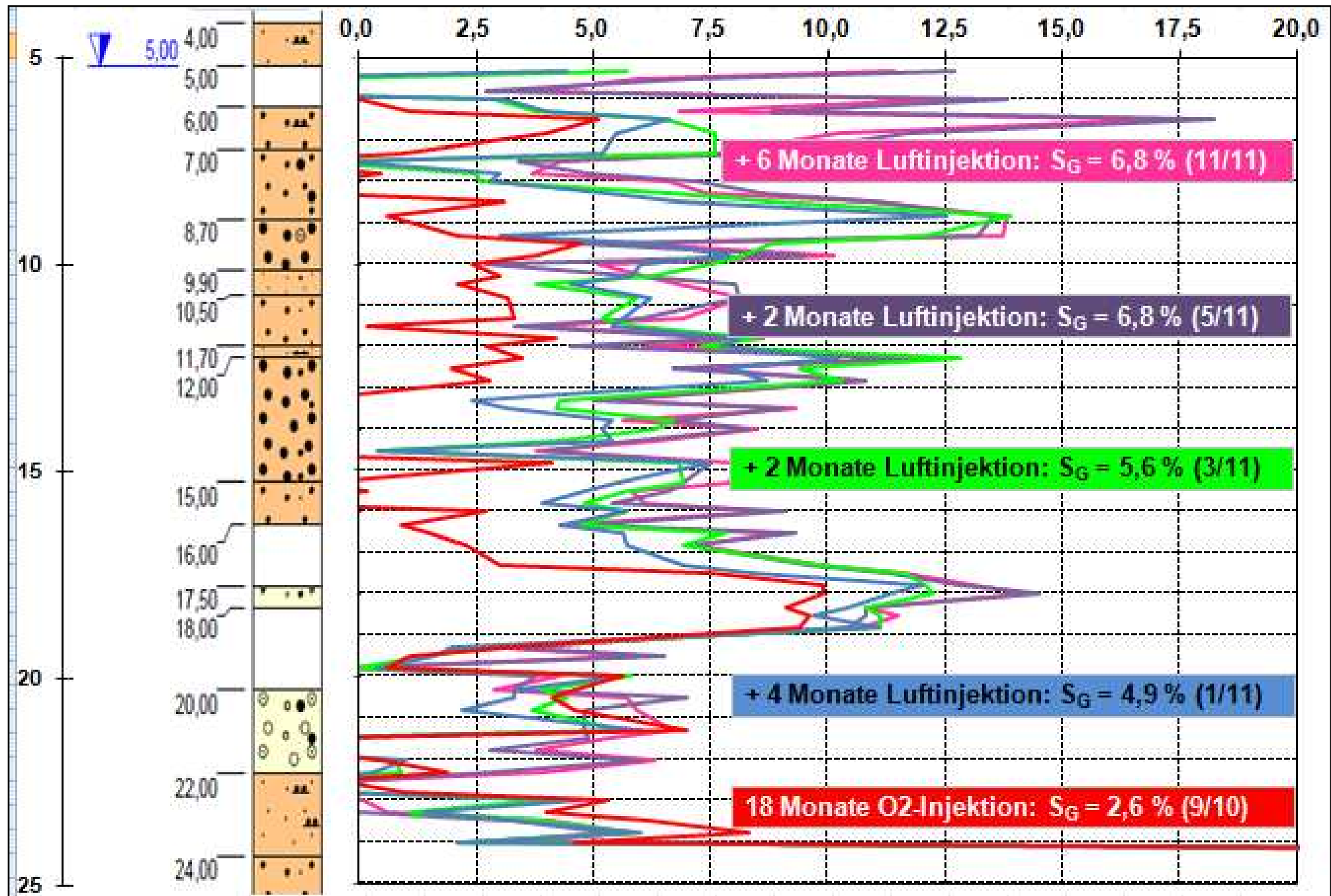
4000 ml/mi



Konsequenz: Notwendigkeit eines Gashydrogeologischen Modells zur Identifizierung geeigneter Gaseintragshorizonte



Analyse der Gasakkumulation im Aquifer



- 1. Passiver Sauerstoffeintrag mit der natürlichen Grundwasserströmung führt zu dem Engpass der ausreichenden Stoffnachlieferung**
 - geringe O₂-Löslichkeit + geringe Strömung = geringer Sauerstoffgesamteintrag im Aquifer
- 2. Aktive Gaseinträge können bereits bei leicht strukturierten Aquiferen (fS, mS, gS) zu Gasakkumulationen führen, die zu hydraulischen Umströmungseffekten führen.**
 - Die geologische Struktur des Aquifers muss gut bekannt sein, u.a. für die sinnvolle Festlegung von Gaseintragebenen.
 - Spezifisches Monitoring notwendig für horizontspezifische Eintragsraten und zur Vermeidung von Umströmung

1. Verteilung gasförmiger Wirkstoffe

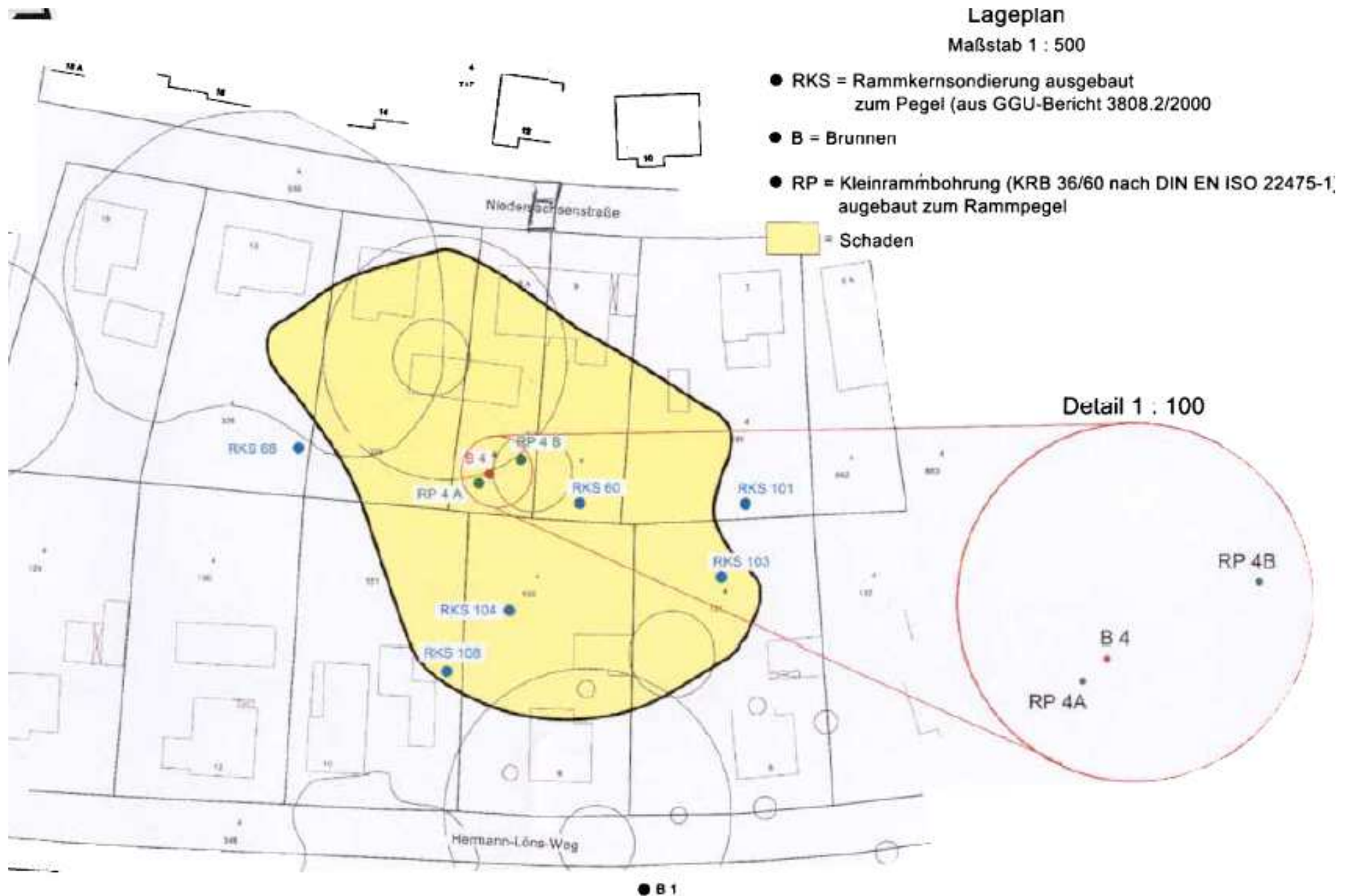
- Passive Verteilung
- Aktive Verteilung

2. Verteilung flüssiger Wirkstoffe

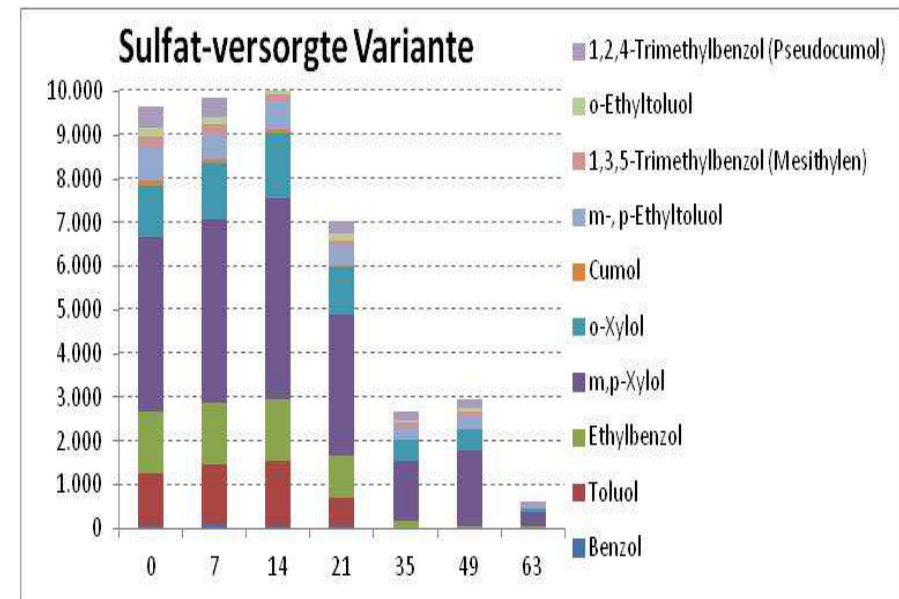
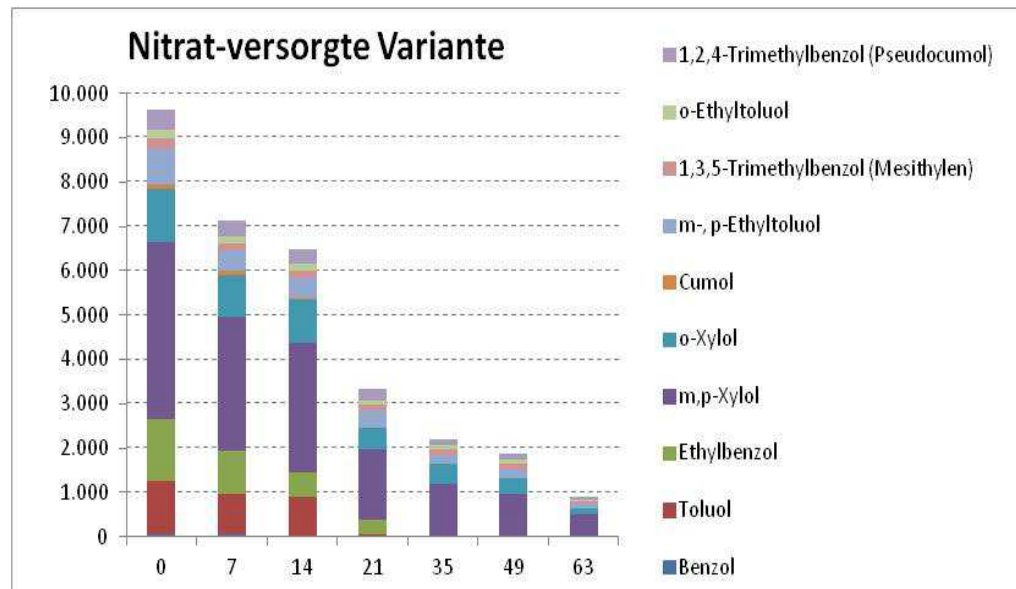
- **Passive Verteilung**
- vertikale Grundwasserzirkulation
- horizontale Grundwasserzirkulation

3. Ausblick

BTEX-Grundwasserschaden auf ehem. Wehrmacht-Tanklager (jetzt Wohngebiet)



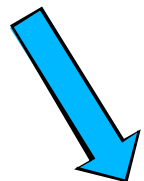
- Stimulierung der mikrobiologischen Abbauprozesse wurde sowohl durch die Zugabe von Nitrat als auch Sulfat erreicht
- Nitrat führte zu einer Verdreifachung der Abbauraten im Vergleich zum unbehandelten Ansatz bei einem schnellen Start des Abbaus
- Nach Zugabe von Sulfat Beginn des Schadstoffabbaus nach 14 Tagen mit höheren Abbauraten
- Sowohl Nitrat als auch Sulfat sind für den Einsatz im Feld als Elektronenakzeptor zur Stimulierung mikrobiologischer BTEX-Abbauprozesse als vielversprechend zu bewerten.



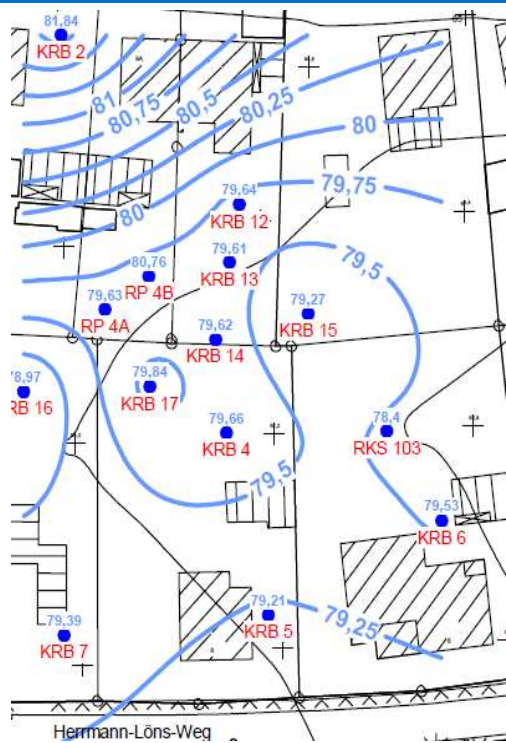


Direkt-Push-Injektion von Wirkstoffen

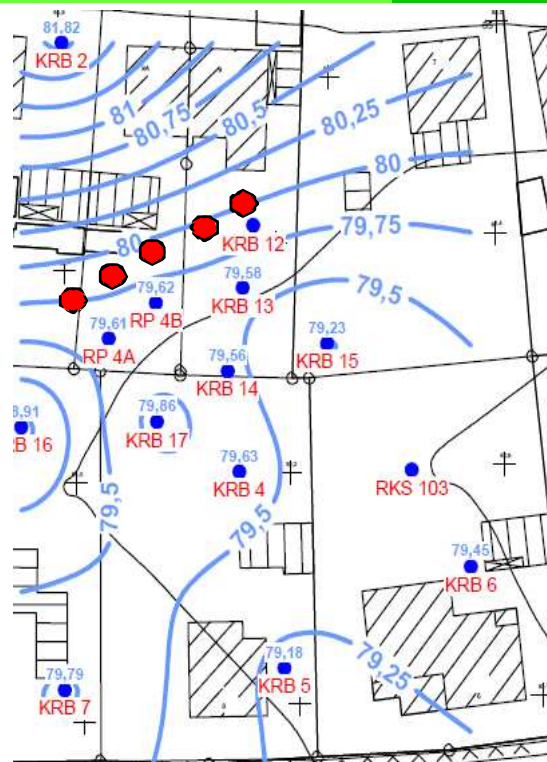
- Versorgung des Schluffbereiches als Wirkstoffdepot
- Injektion im Grundwasserleiter für schnelle Wirkstoffverteilung
- Dimensionierung der Wirkstoffversorgung auf der Grundlage von In-situ-Verbrauchsmessungen
- 1 Injektionsgalerie



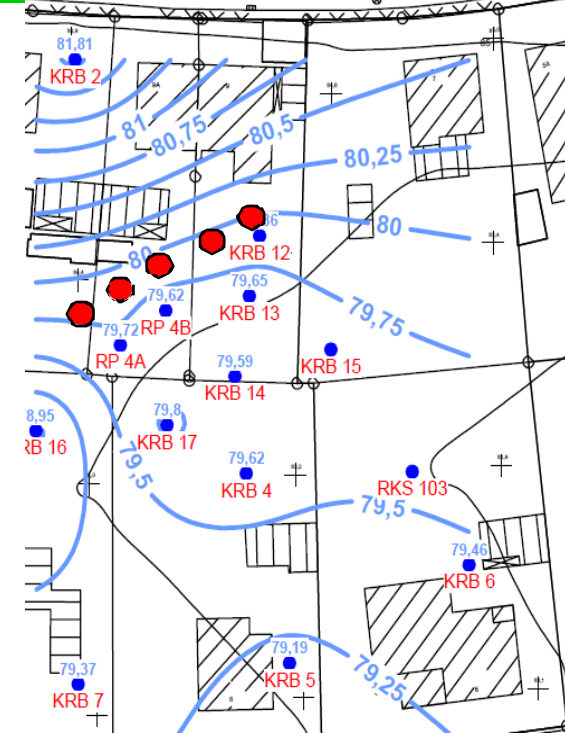
erwartete GW-
Fließrichtung



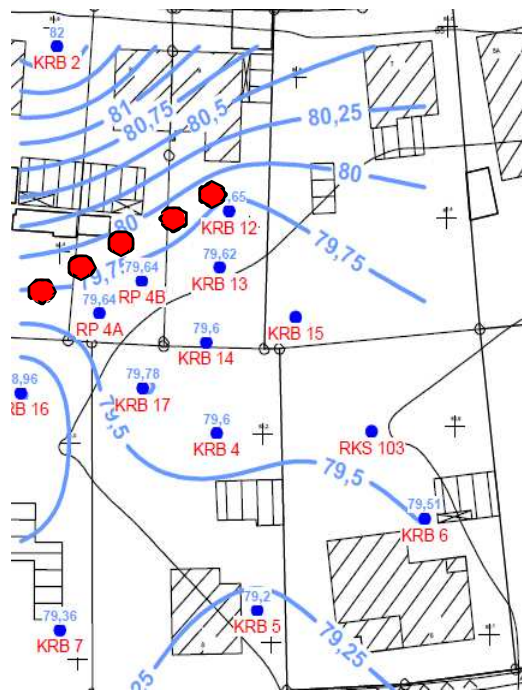
Start, April 2014



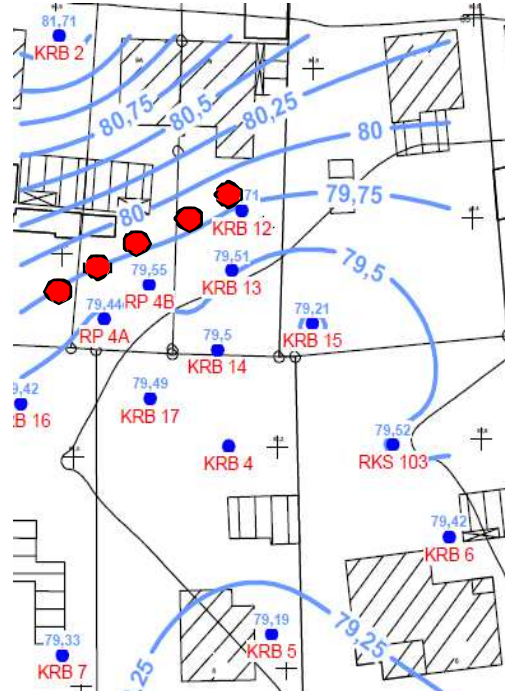
21.05.14, nach einer Injektion



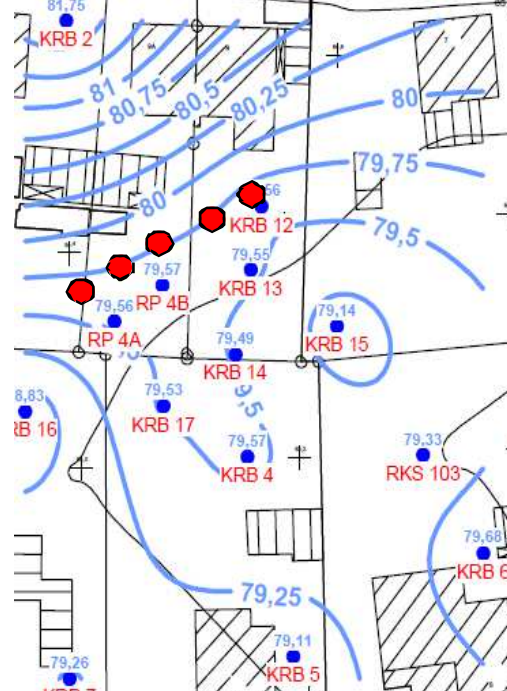
14.07.14, nach einer Injektion



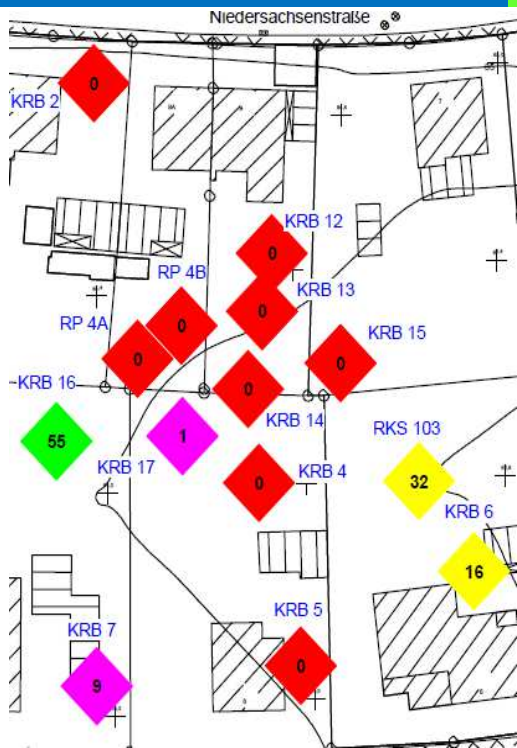
11.08.14, nach zwei Injektionen



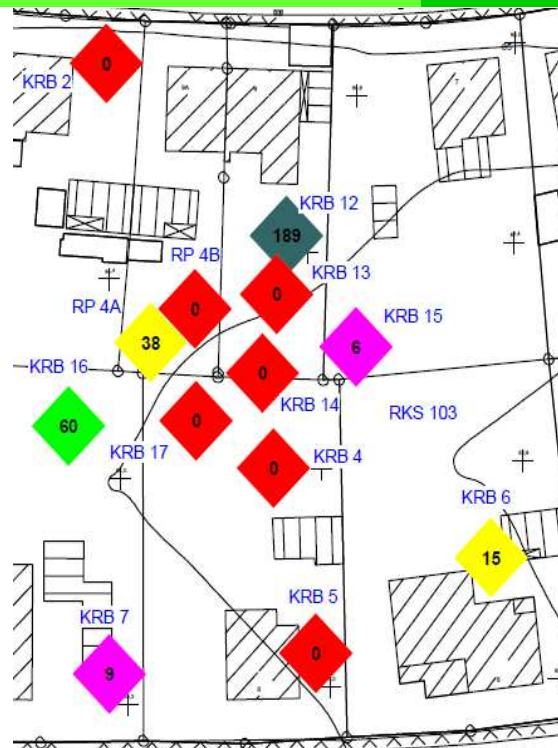
7.10.14, nach zwei Injektionen



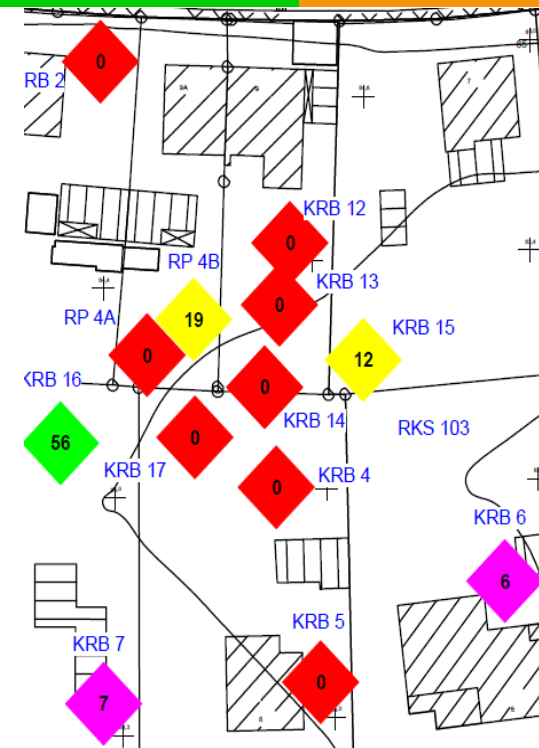
19.01.15, nach drei Injektionen



Start, April 2014

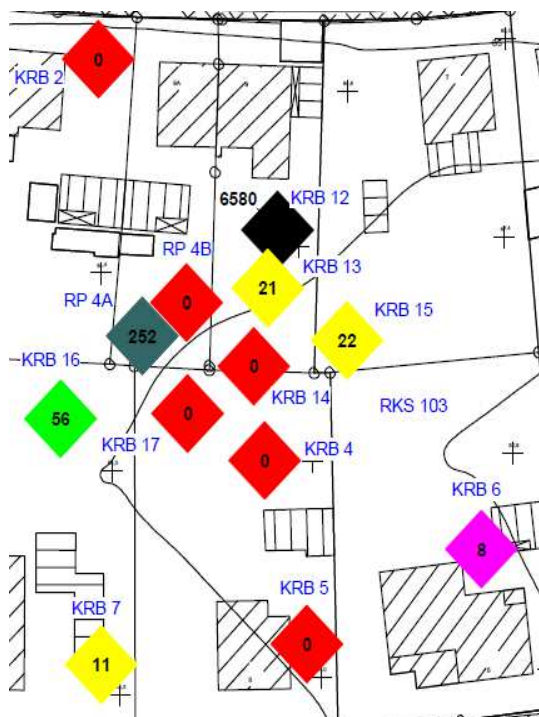
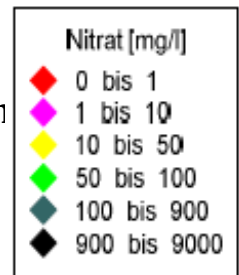


21.05.14, nach einer Injektion

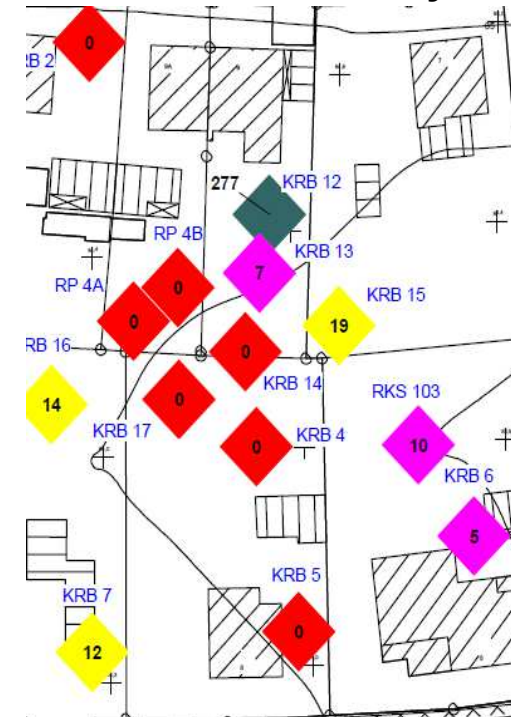


14.07.14, nach einer Injektion

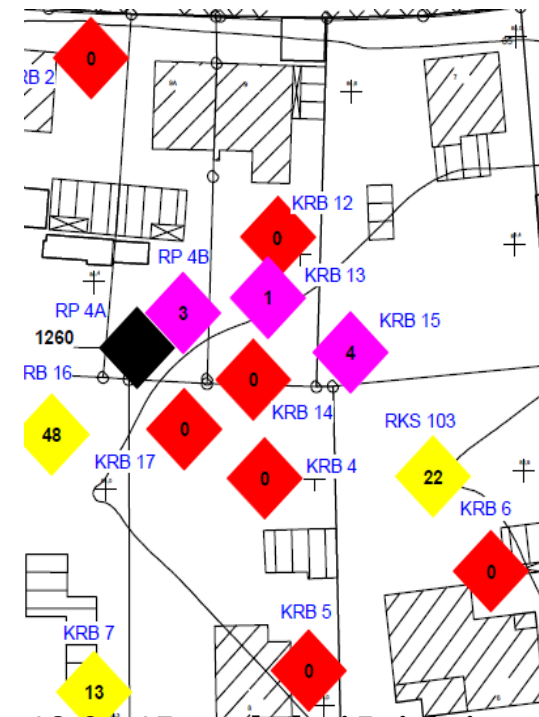
Nitrat



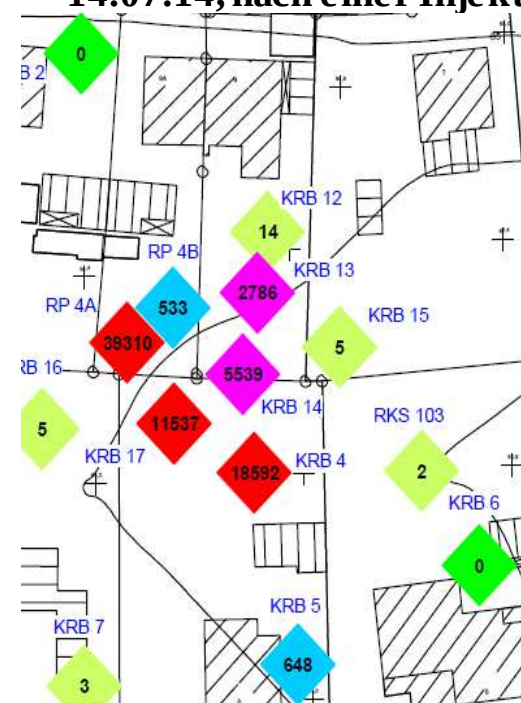
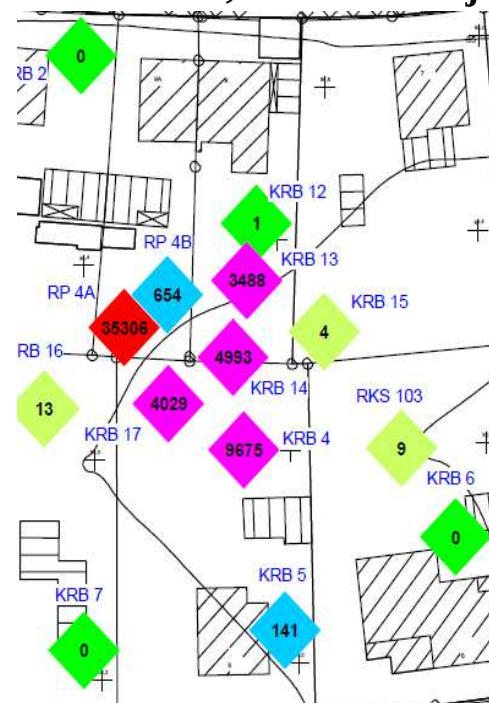
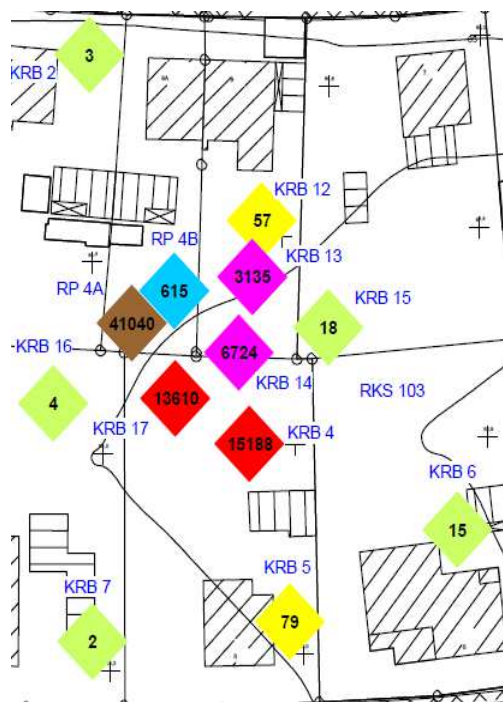
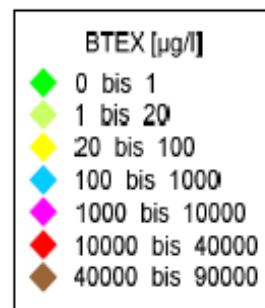
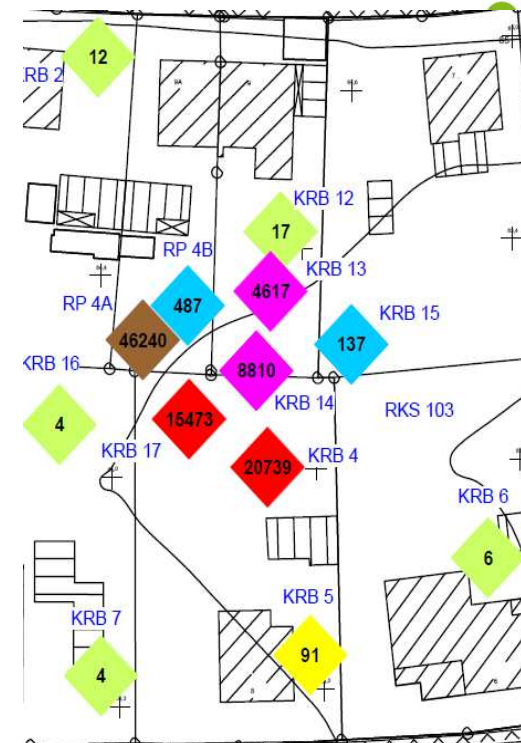
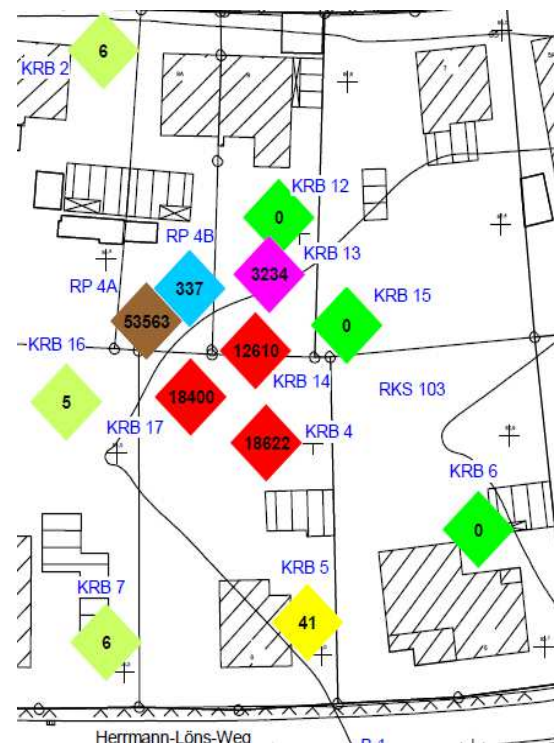
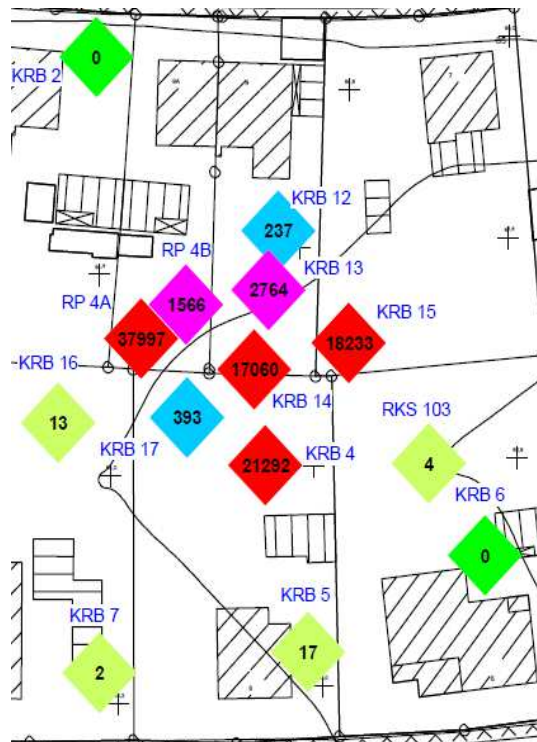
11.08.14, nach zwei Injektionen



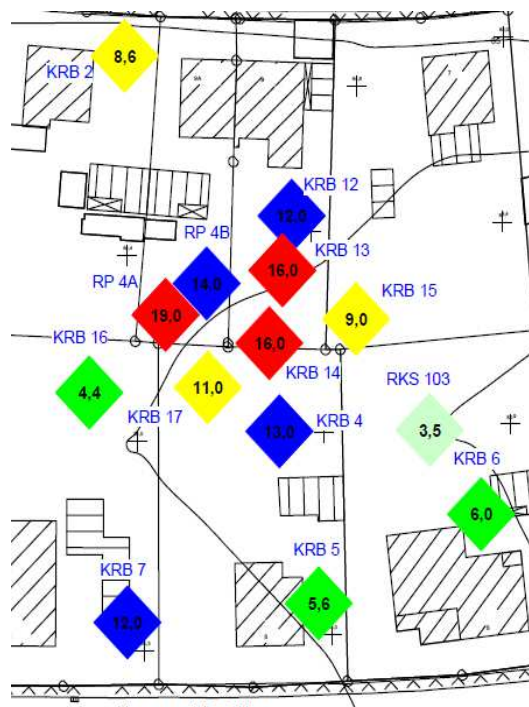
7.10.14, nach zwei Injektionen



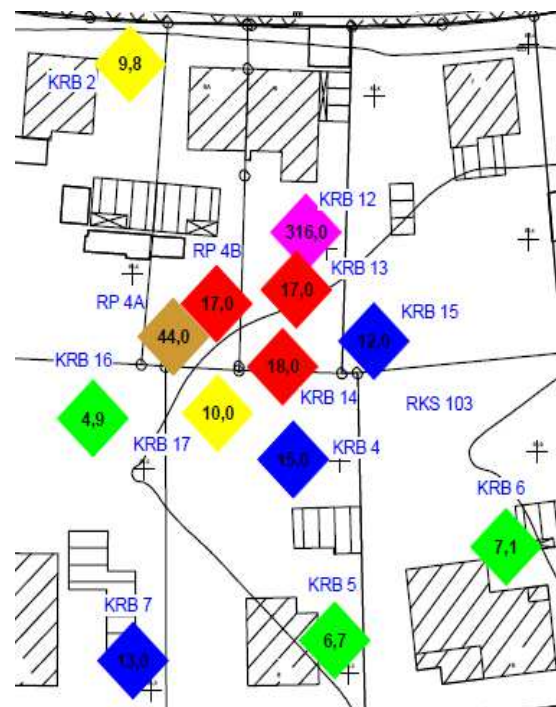
19.01.15, nach drei Injektionen



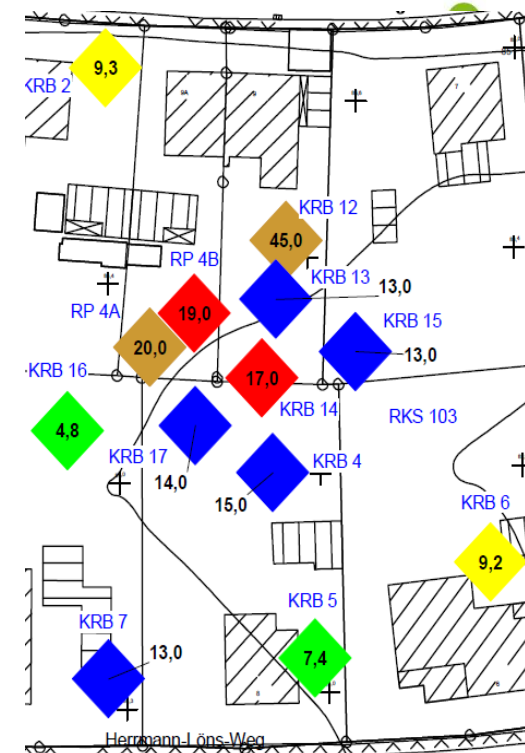
Natrium



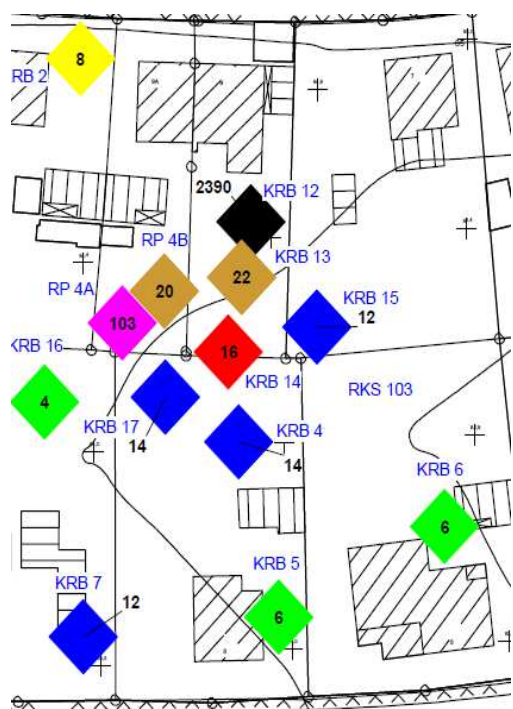
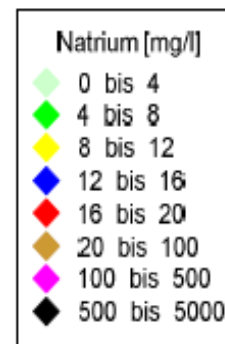
Start, April 2014



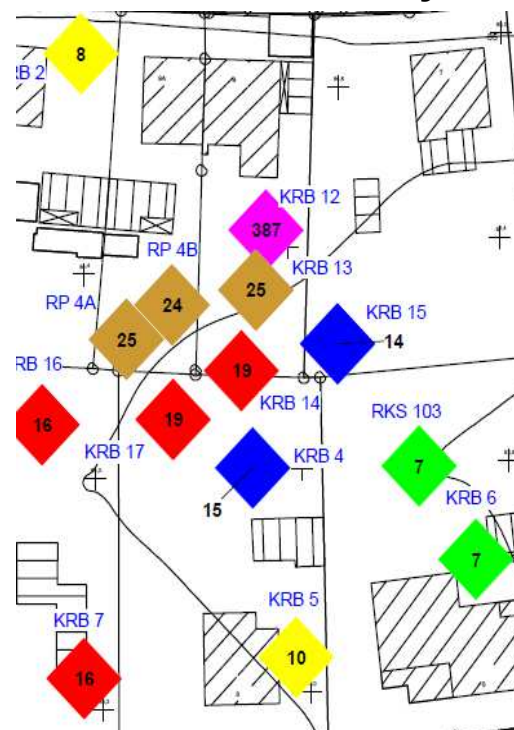
21.05.14, nach einer Injektion



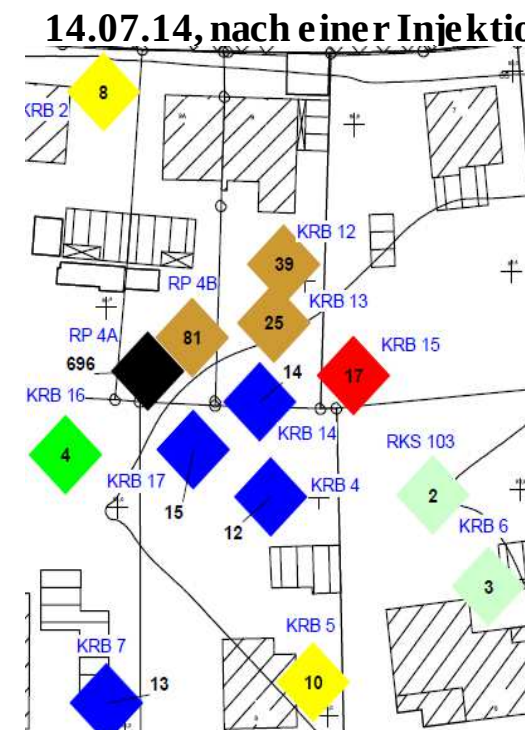
14.07.14, nach einer Injektion



11.08.14, nach zwei Injektionen



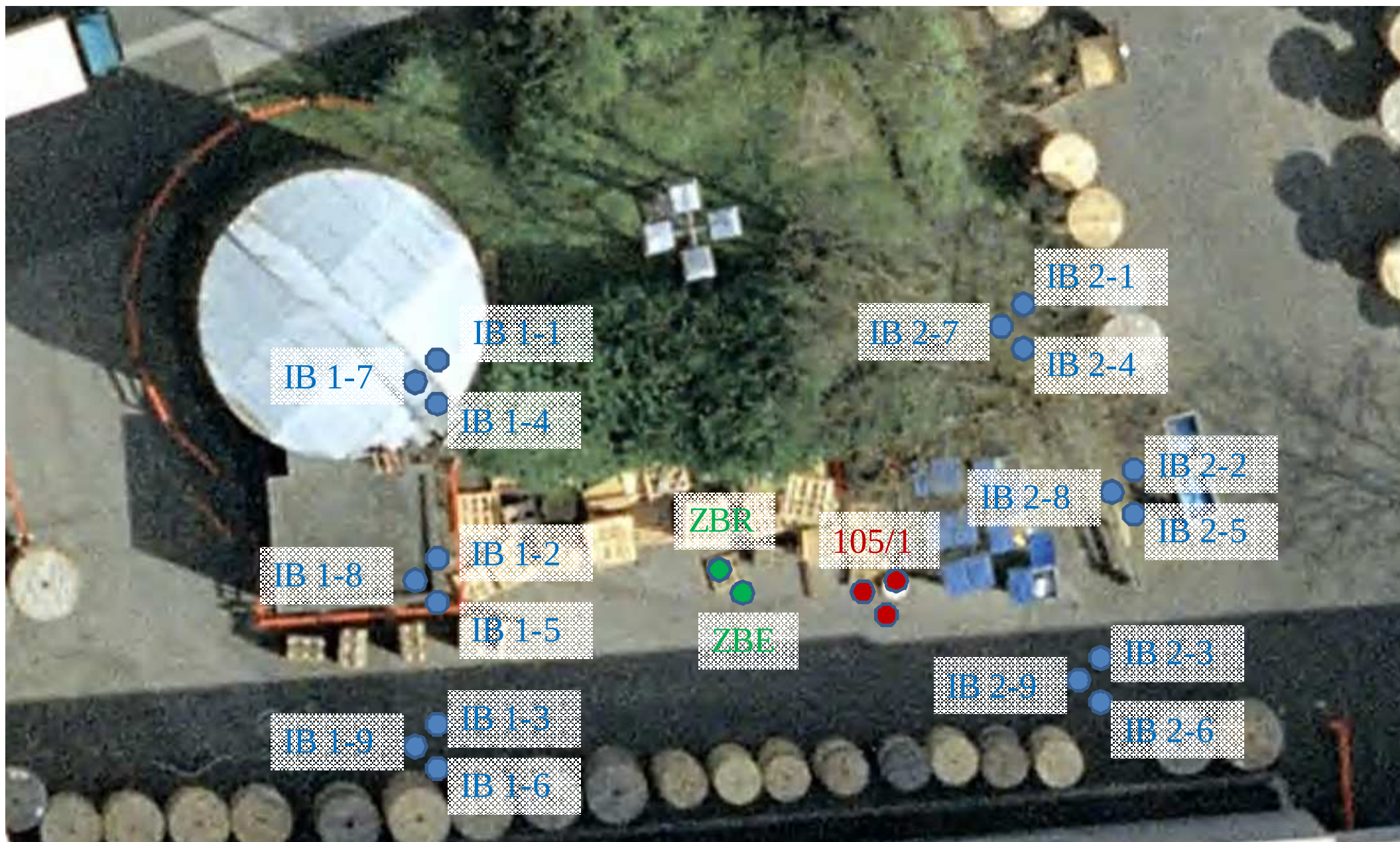
7.10.14, nach zwei Injektionen



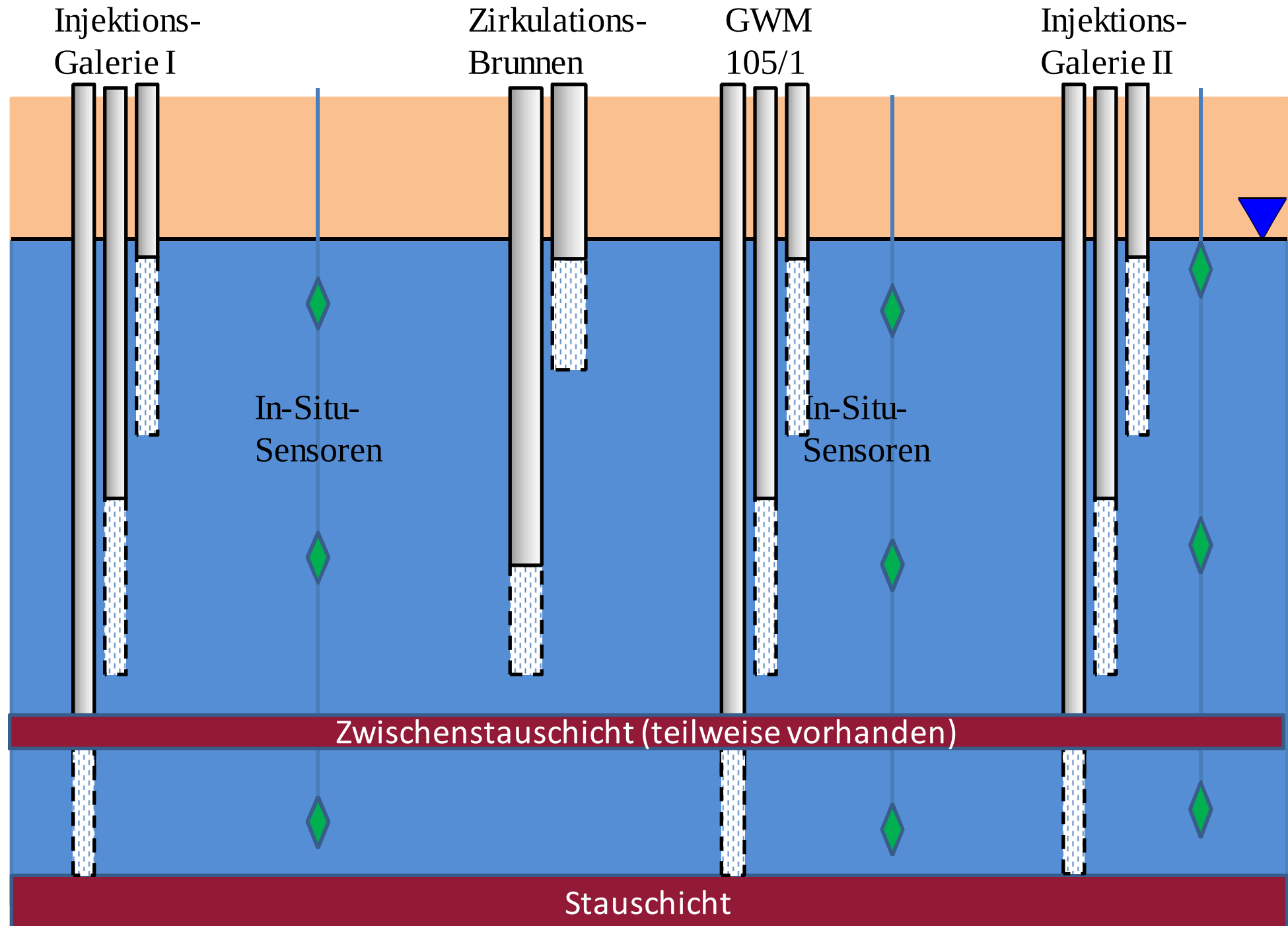
19.01.15, nach drei Injektionen

1. Verteilung gasförmiger Wirkstoffe
 1. Aktive Verteilung
 2. Passive Verteilung
2. Verteilung flüssiger Wirkstoffe
 1. Passive Verteilung
 2. **vertikale Grundwasserzirkulation**
 3. **horizontale Grundwasserzirkulation**

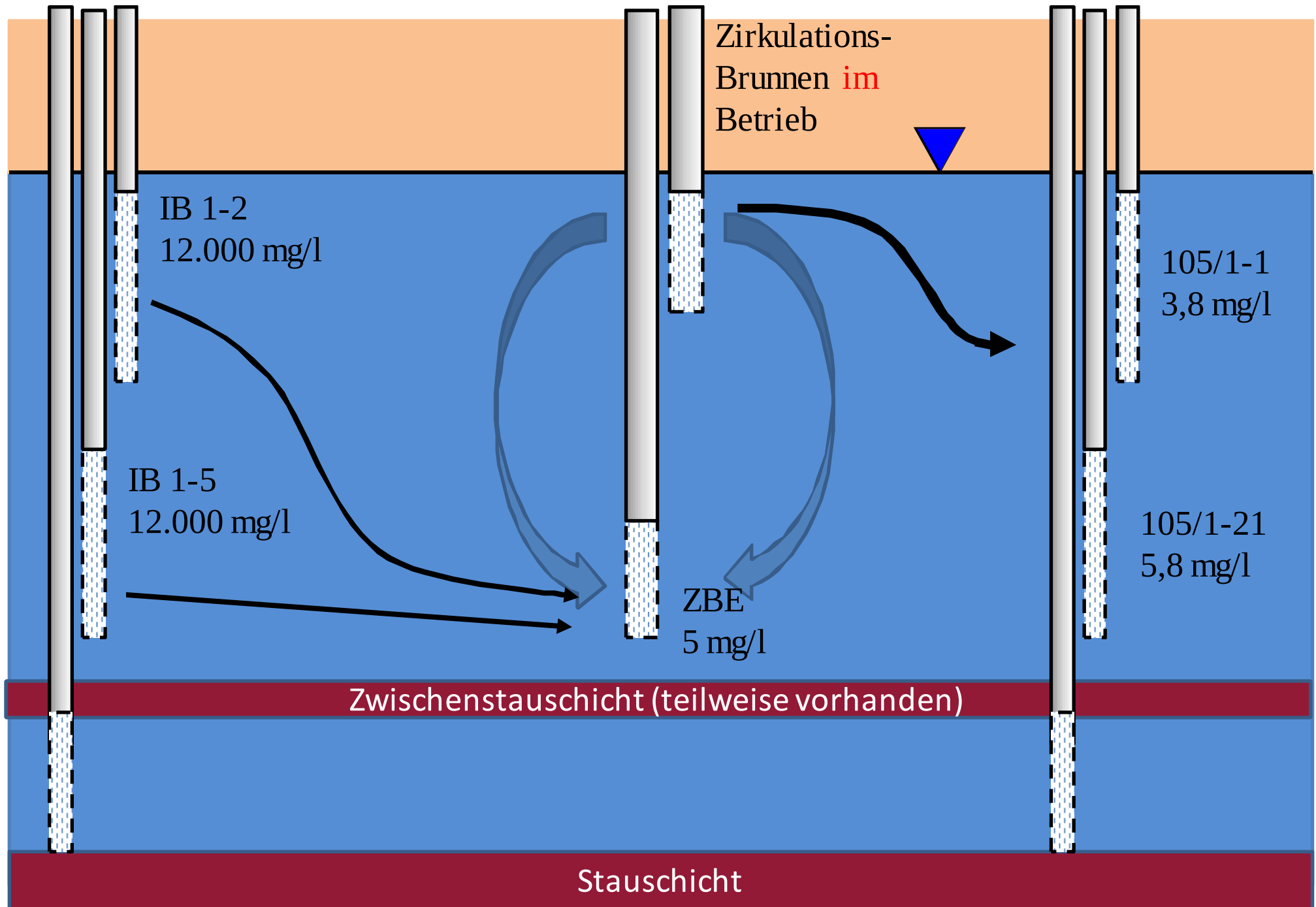
In-situ-Sanierung in schwacher GW-Strömung



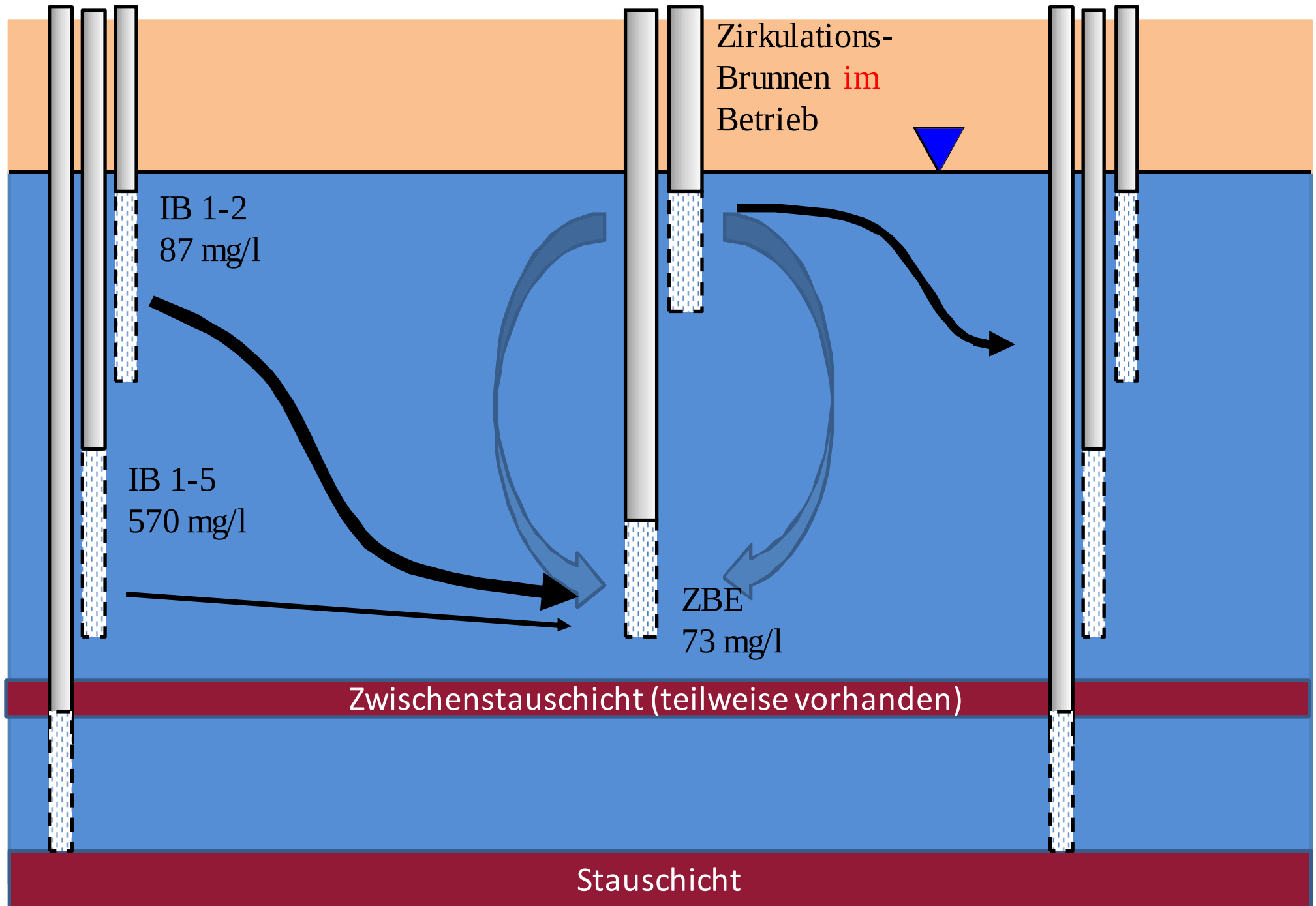
Übersicht Lanzenfeld



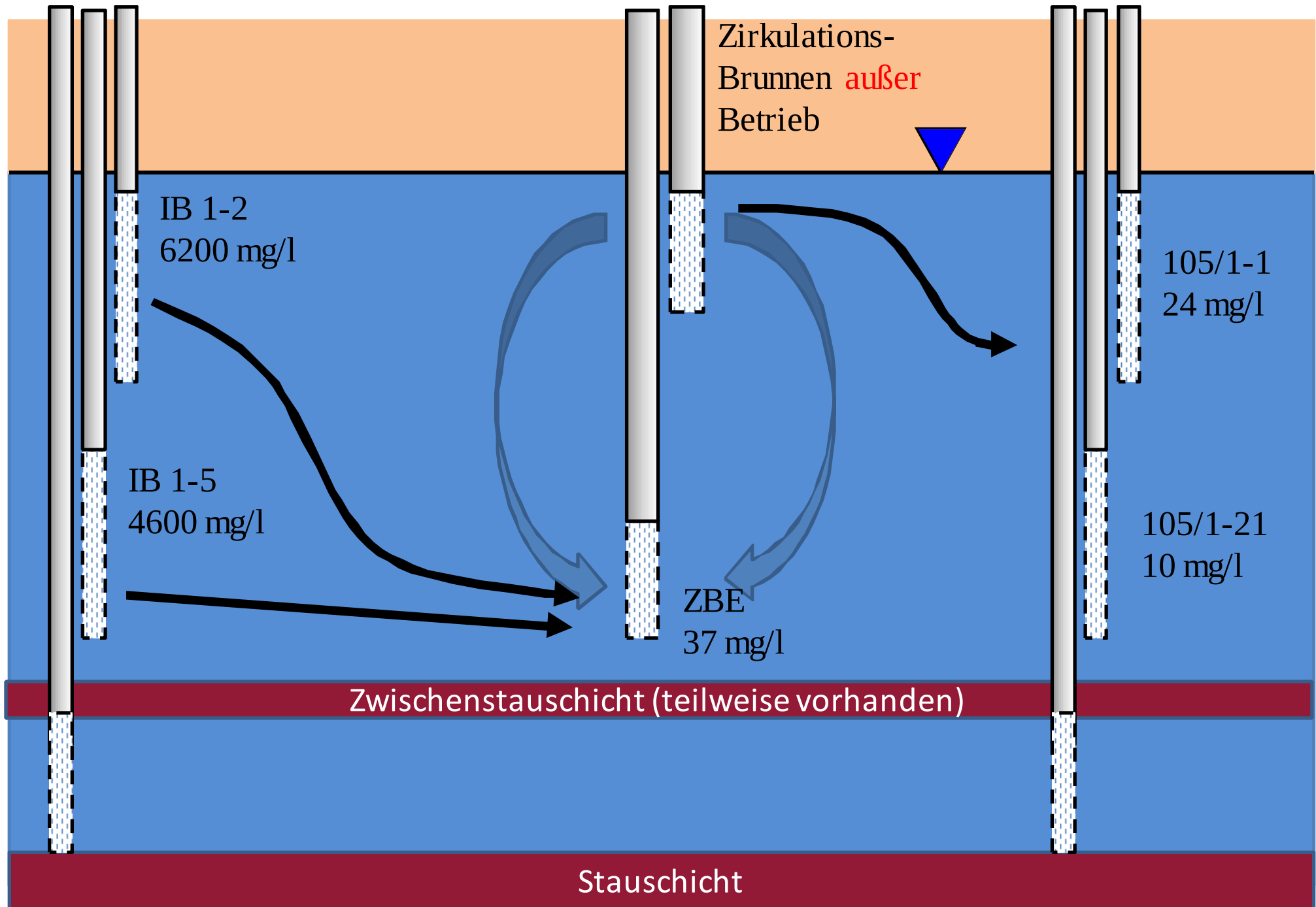
DOC-Gehalte nach der ersten Injektion am 10.09.12



DOC-Gehalte bei Probenahme am 4.10.12

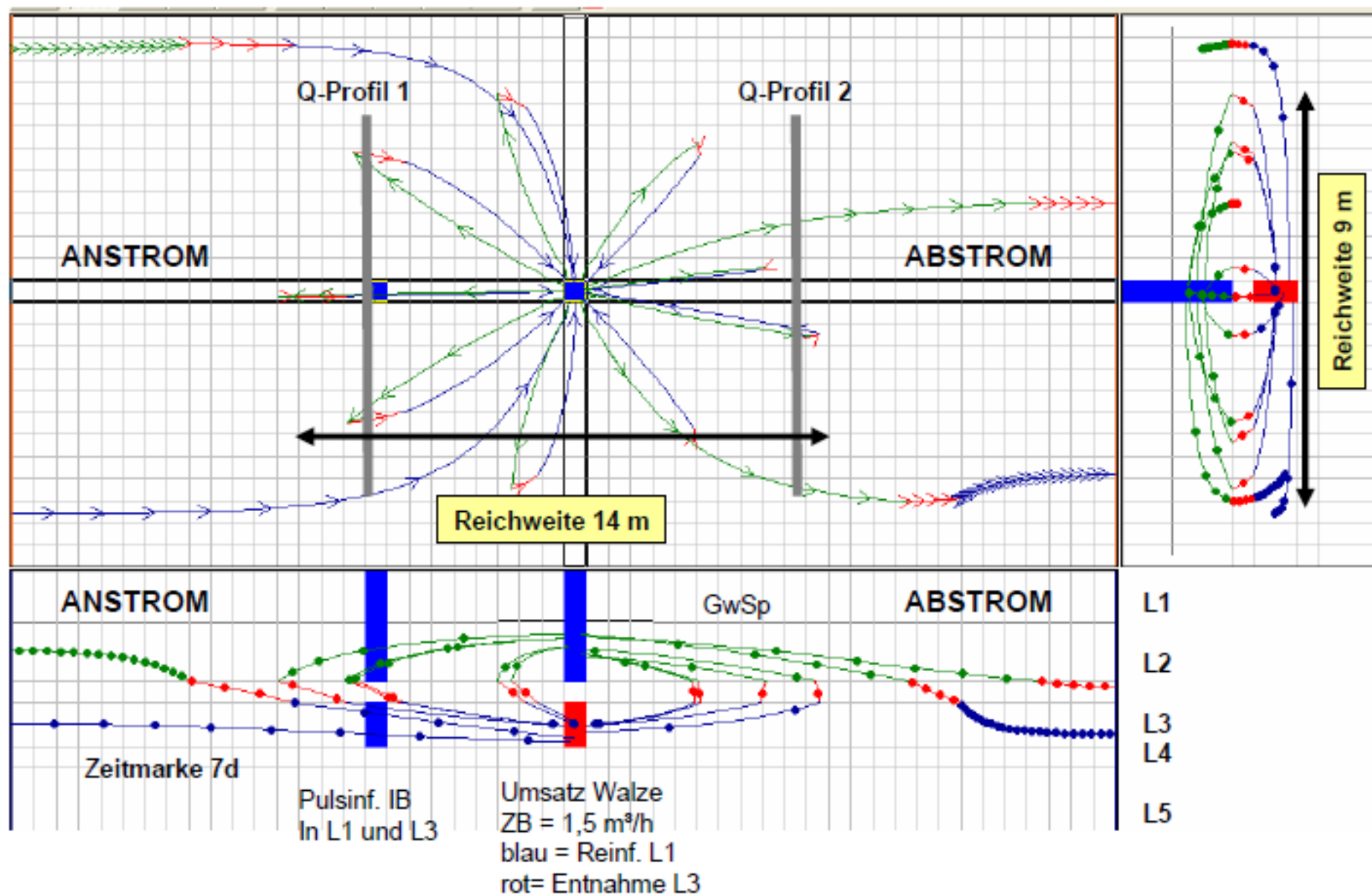


DOC-Gehalte bei Probenahme am 19.11.12



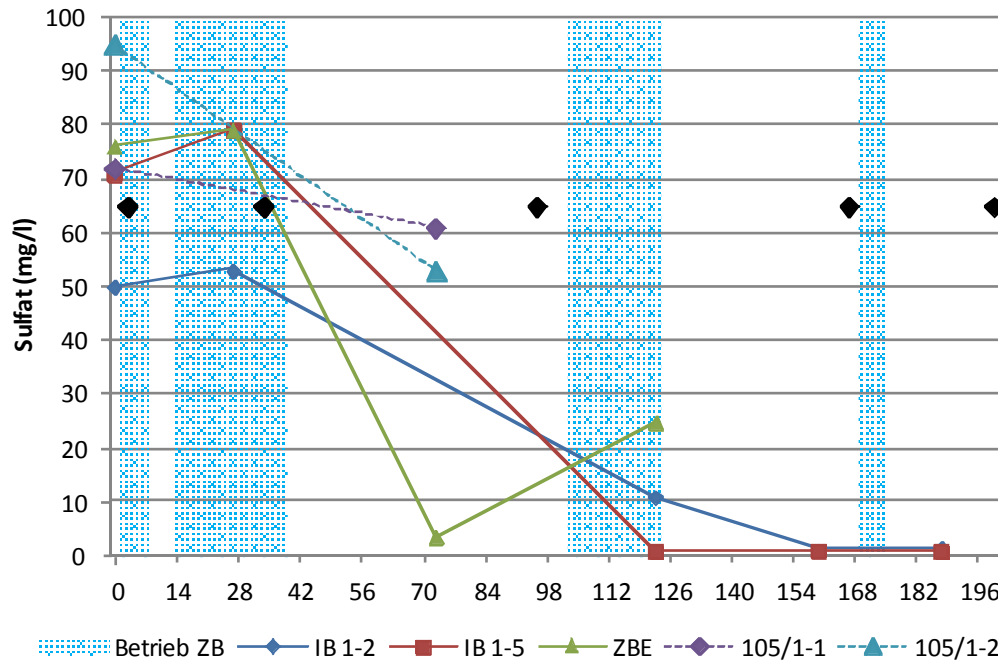
Hydraulische Dimensionierung

Raster 1 x 1 m, 5 Modell-Layer (L1-L5), kf 8E-04 m/s (L1-L2, L5) – 1E-03 m/s (L3), L4 Stauer



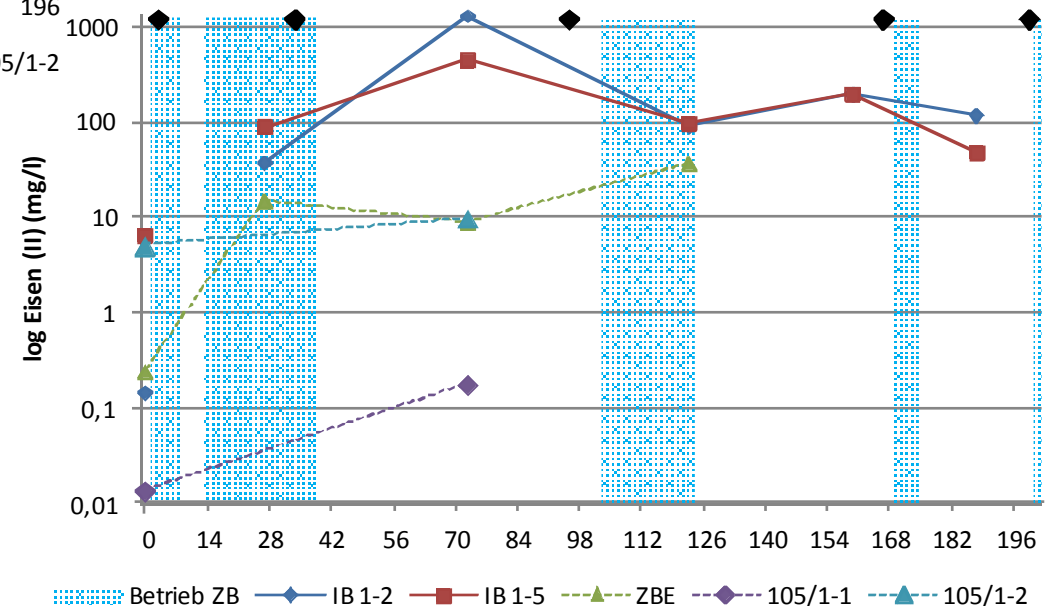
Ergebnisse

Stimulation der Anaeroben Dechlorierung



- Sulfatreduktion setzt nach der zweiten Injektion ein
- nahezu vollständige Sulfat-Reduktion in allen Messstellen
- deutlicher Anstieg von Eisen(II) bereits nach der ersten Injektion

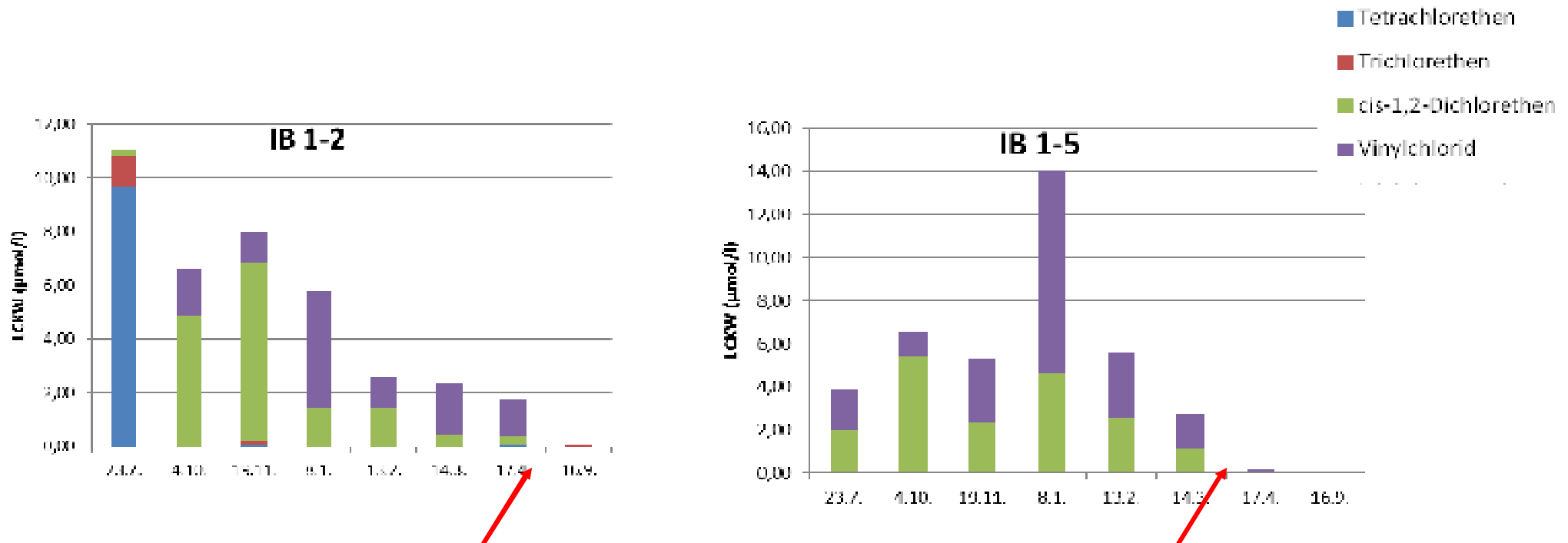
➤ die Parallelreaktionen der anaeroben Dechlorierung lassen sich in allen Messstellen nachweisen (auch im Abstrom)



Ergebnisse

Stimulation der Anaeroben Dechlorierung - Bereich der Injektionslanzen

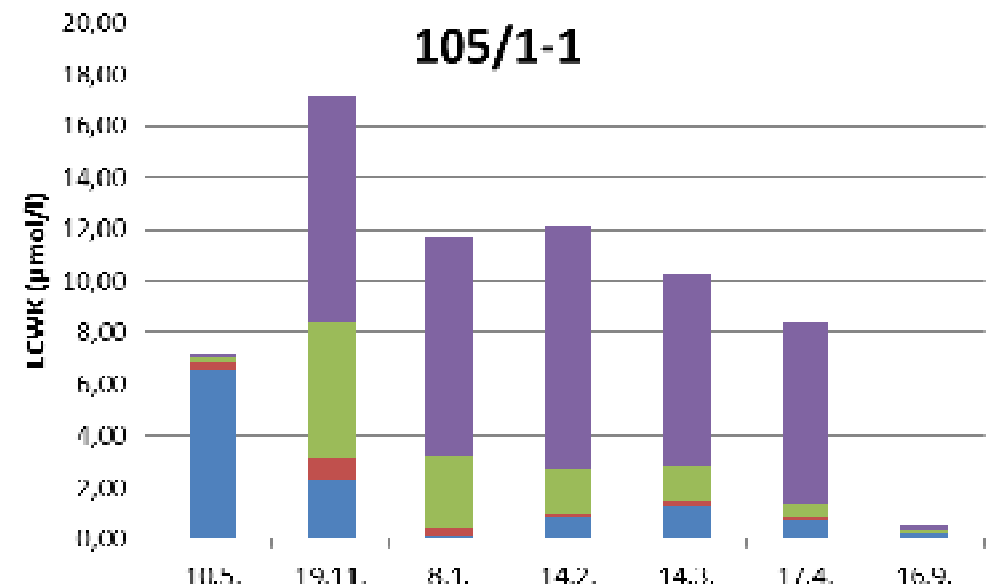
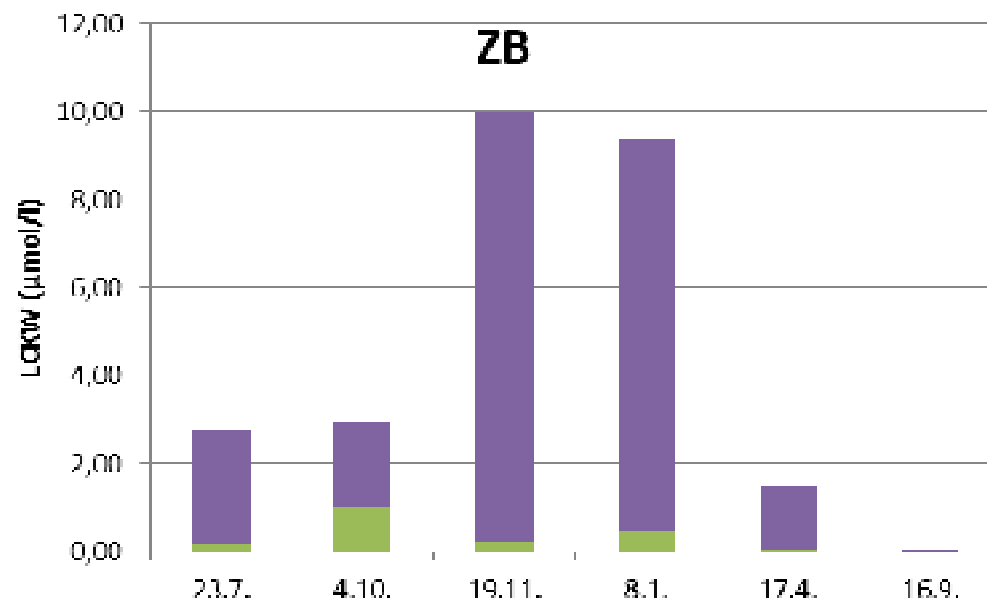
- sofortiger PCE und TCE-Abbau
- cDCE und VC-Abbau setzt später ein



deutliche Reduzierung nach Animpfung

Ergebnisse

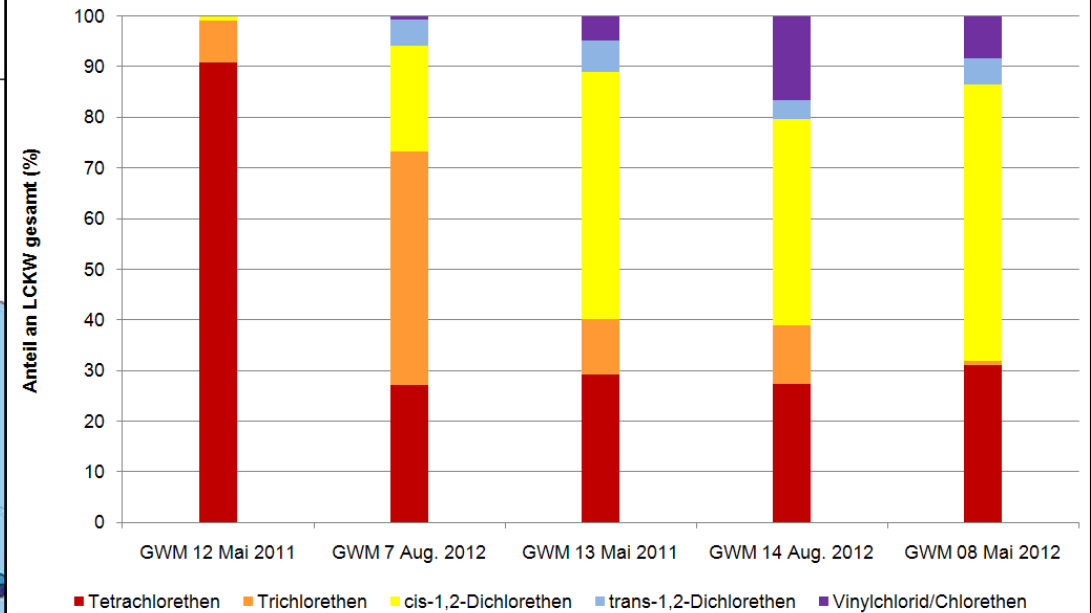
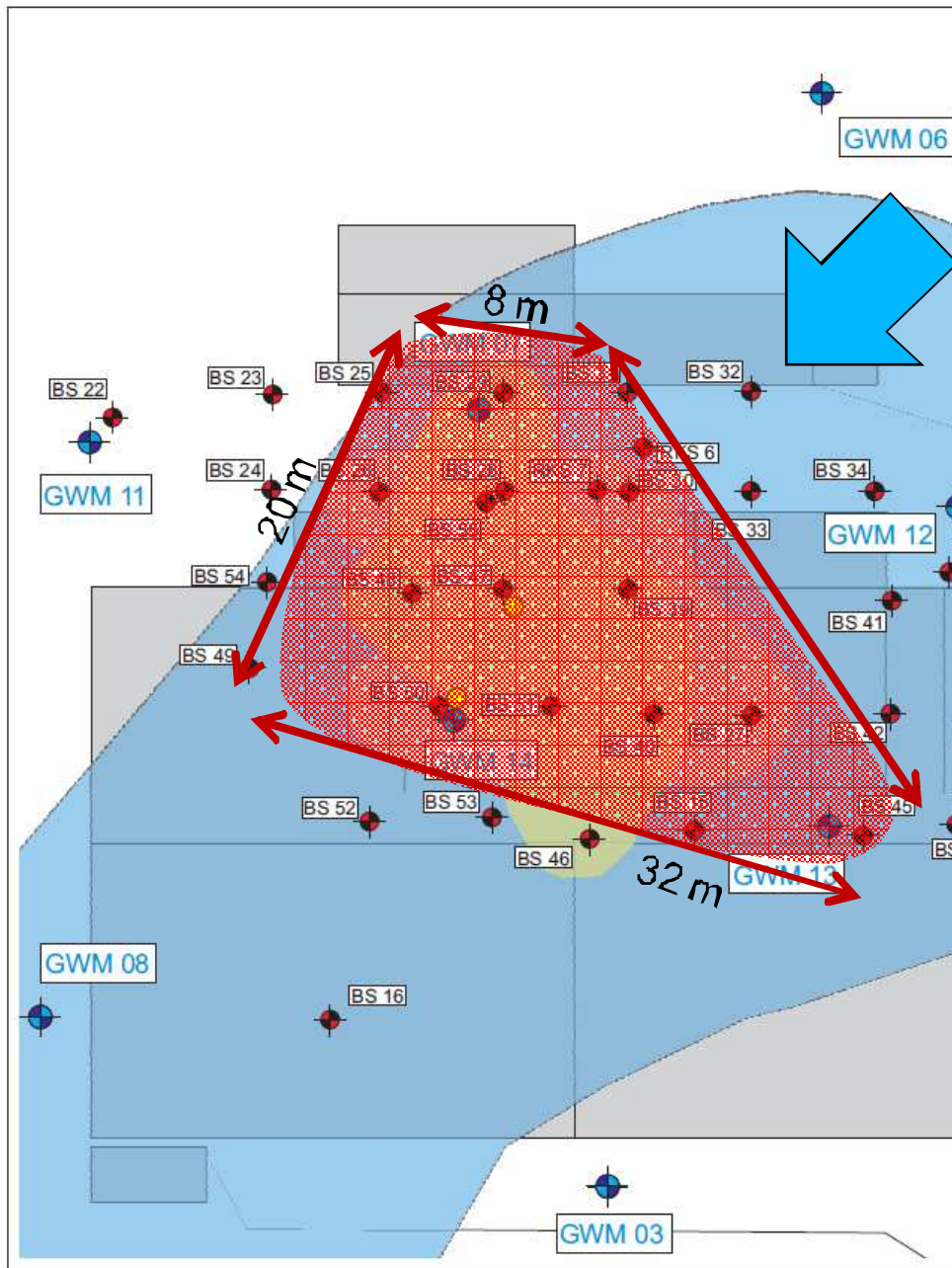
Stimulation der Anaeroben Dechlorierung - Bereich des „Abstroms“



- Tetrachlorethen
- Trichlorethen
- cis-1,2-Dichlorethen
- Vinylchlorid

- 1. Verteilung gasförmiger Wirkstoffe**
 - 1. Aktive Verteilung**
 - 2. Passive Verteilung**
- 2. Verteilung flüssiger Wirkstoffe**
 - 1. Passive Verteilung**
 - 2. vertikale Grundwasserzirkulation**
 - 3. horizontale Grundwasserzirkulation**

Kontaminationssituation am Standort



Anstrom:
(GWM 12): 90% Tetrachlorethen

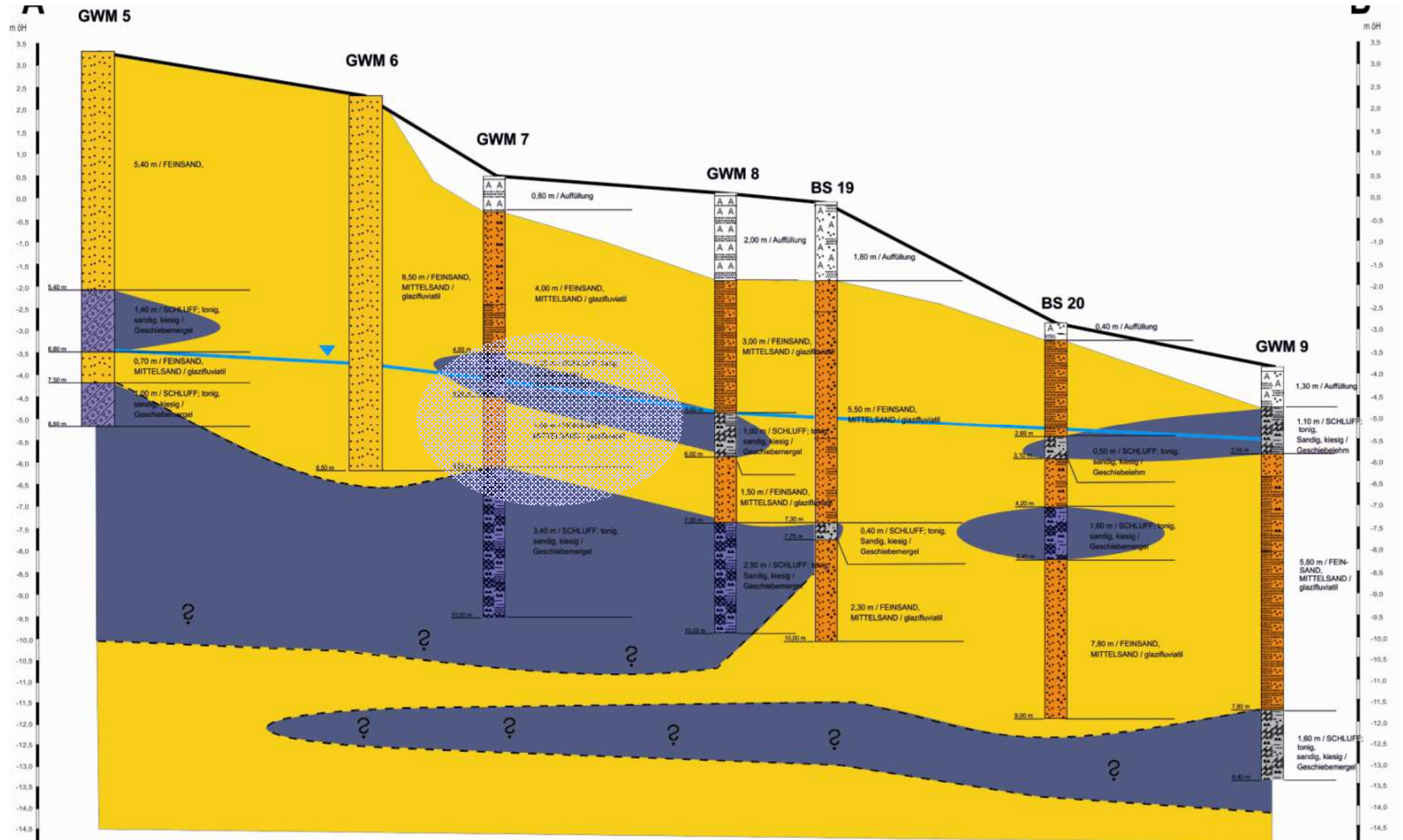
Im weiteren Verlauf mit der GW-Fließrichtung:
GWM 7: 25 % Tetrachlorethen, 50 % Trichlorethen, 20 % cis-1,2-Dichlorethen

GWM 13 / GWM 14: 30 % Tetrachlorethen, 10 % Trichlorethen, 50 % cis-1,2-Dichlorethen, 5 (15) % VC

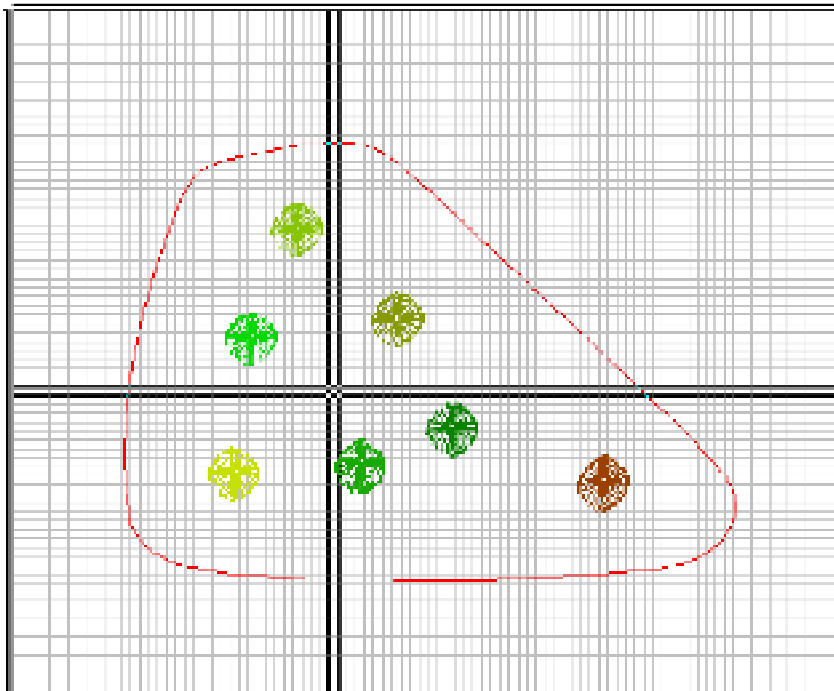
Abstrom:
GWM 8: 30 % Tetrachlorethen, 50 % cis-1,2-Dichlorethen, 10 % VC

Deutliche Hinweise auf aktive mikrobielle Dechlorierung

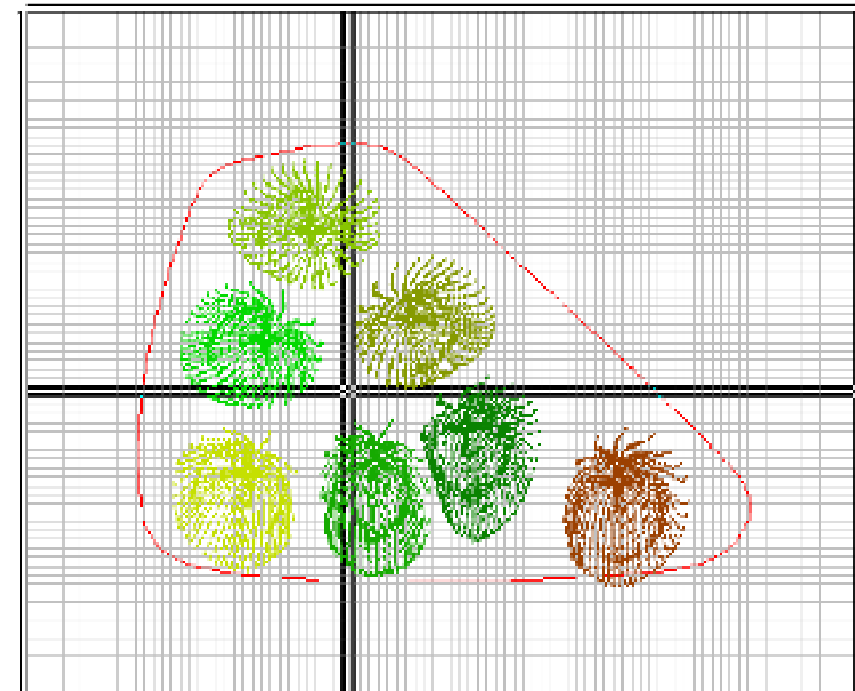
Geologischer Schnitt Nord- Süd



Problem Verteilungsstrategie: Beispielrechnung - Normaldruckinjektion über 7 Injektionspegel



Stromlinien 28 d nach einmaliger Injektion
(pro Pegel 2 m³)



Stromlinien 40 Wochen nach zehnmaliger Injektion
(10 x 2 m³ pro Pegel)



Zugabe von Wirkstoffen per Normaldruckinjektion über 7
Injektionspegel führt zu einer lückenhaften Verteilung / Zugabe

Anpassung der Injektionsstrategie des Wirkstoffs

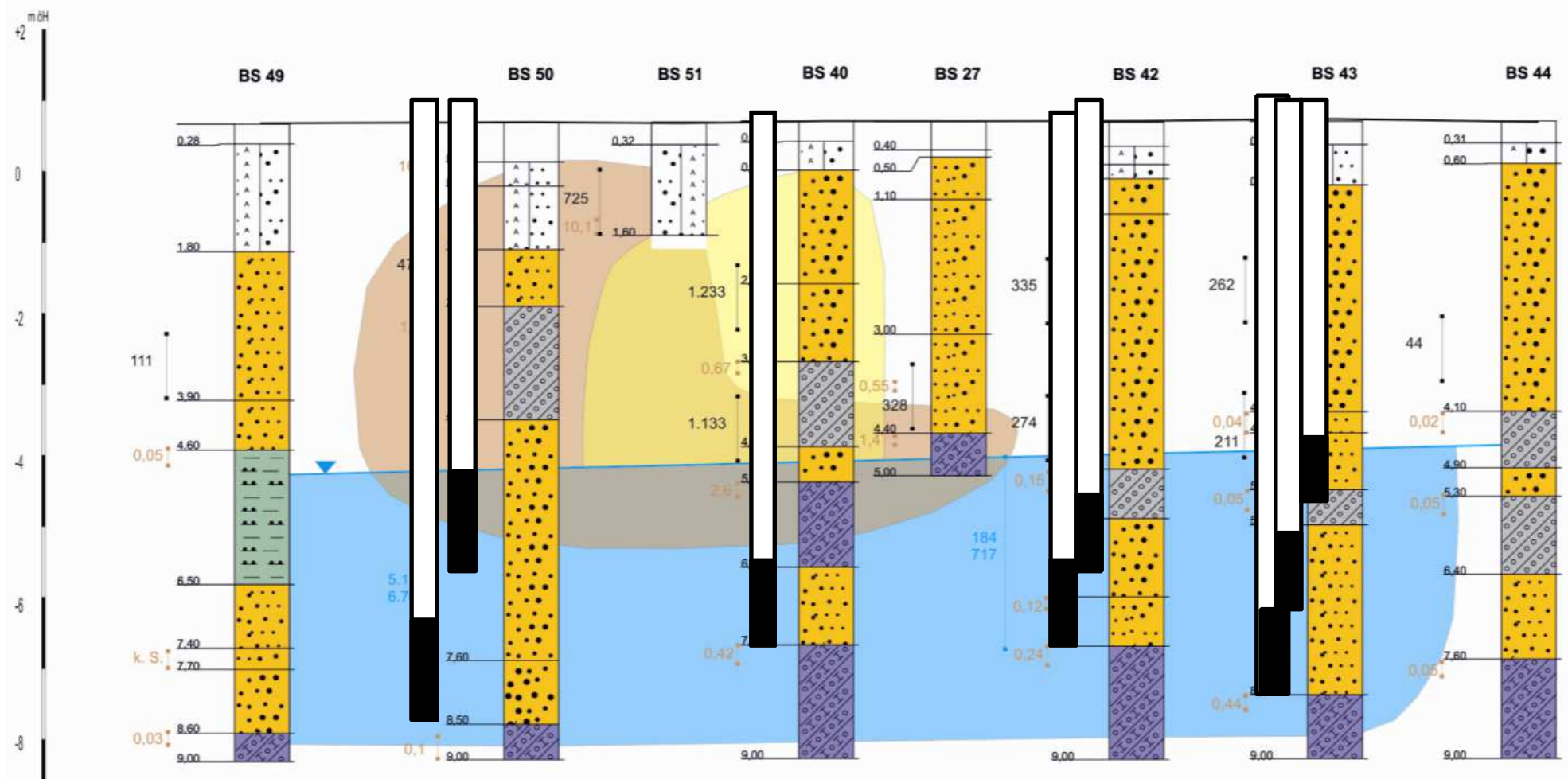
- ✓ **Verdichtung der Injektionspegel**
- ✓ **Erhöhung des Injektionsvolumens**
- ✓ **Einsatz innovativer Injektions- und Verteilungsstrategien**

Wechsel von

- Dynamischen Druck-Injektionen (Molaferm 2,5%ig in Standortwasser) in mehrfach ausgebaute Injektionspegel, da Normaldruckinjektion nicht ausreicht, um gesamten Aquifer zu erreichen und
- Mobilen Zirkulationzellen über die mehrfach ausgebauten Injektionspegel zur wirksamen Dynamisierung der Verteilung der Wirkstoffe.

Errichtung der Injektionspegel:

- Abdeckung der gesamten Aquifermächtigkeit
- Kurze Filterstrecken (max. 1 m)
- Druckfest bis zu 5 bar



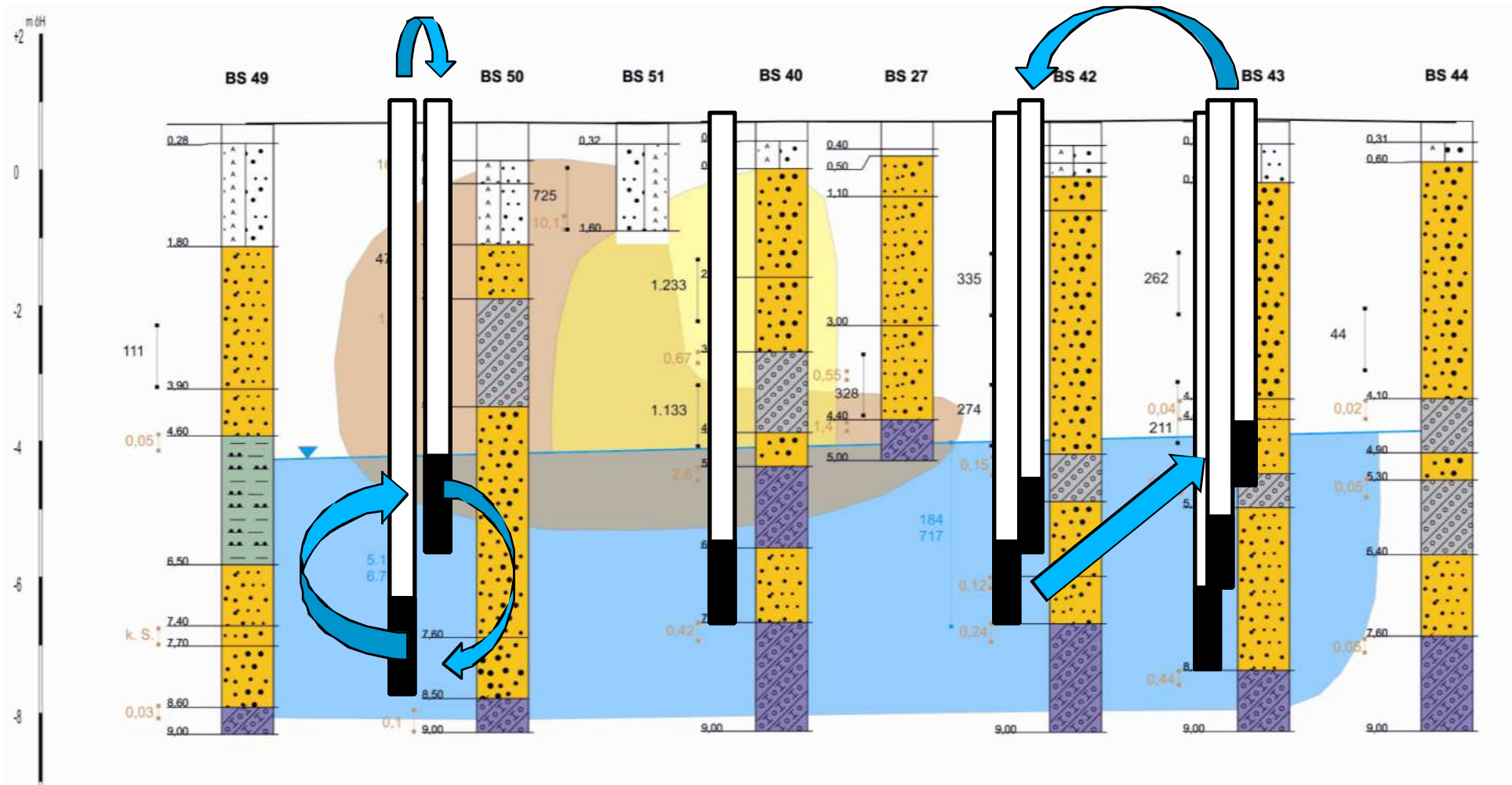
Aufbau temporärer Zirkulationszellen

Vertikale Zirkulation

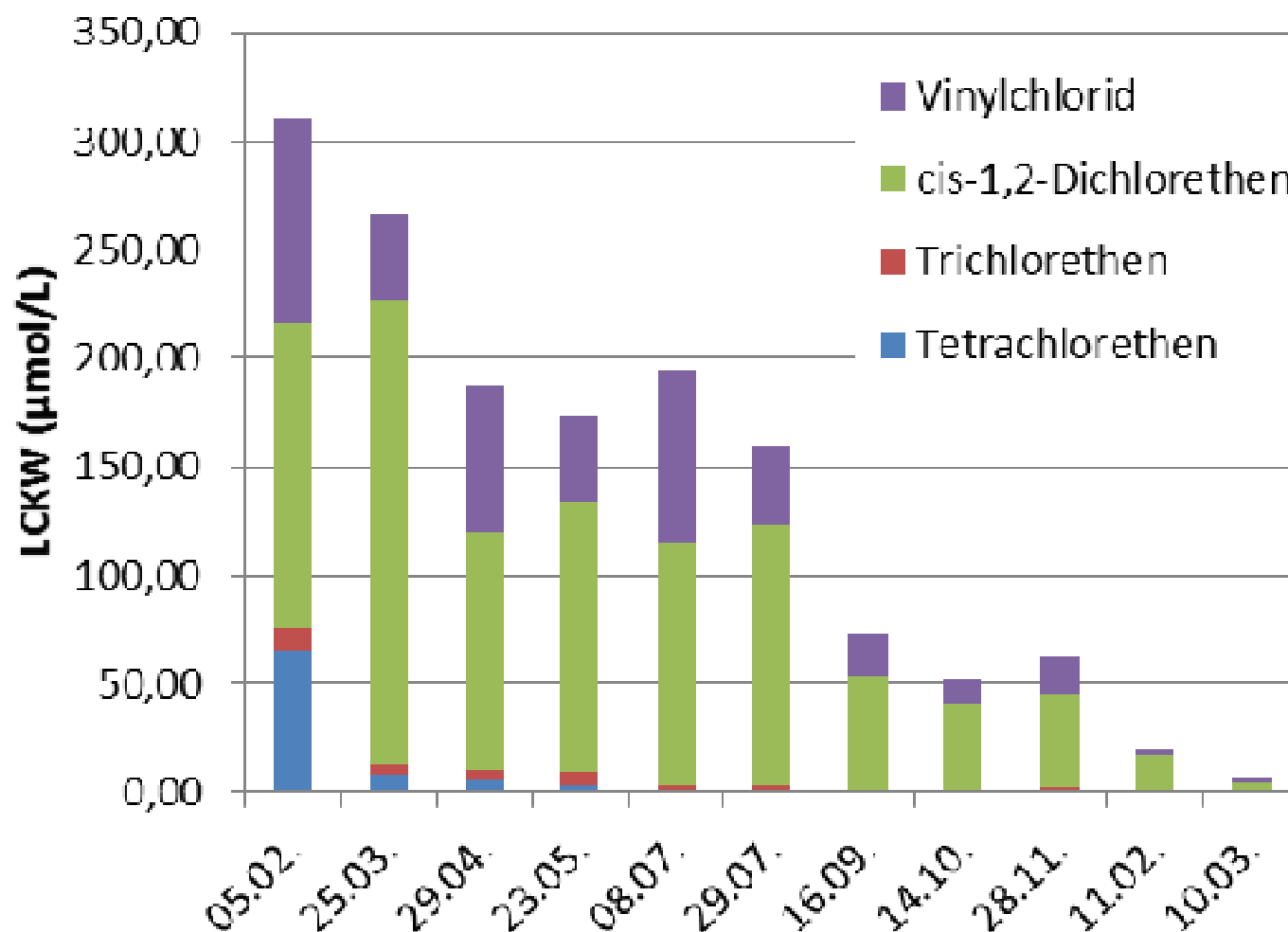
- Regelmäßiger Wechsel von Eingabe- und Entnahmeebene

Horizontale Zirkulation

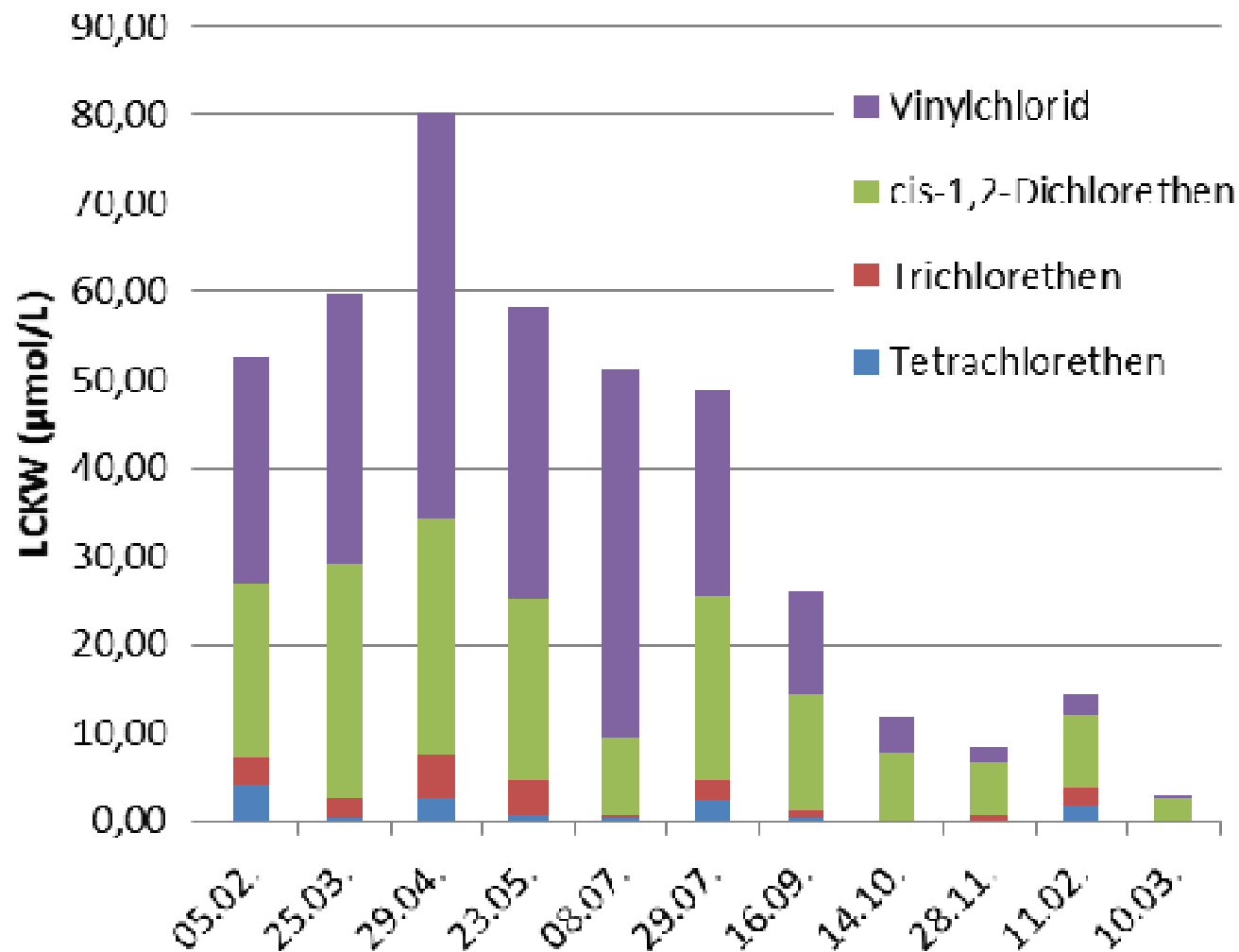
- Dynamisierung der Verteilung durch Wechsel der Zirkulationsebenen



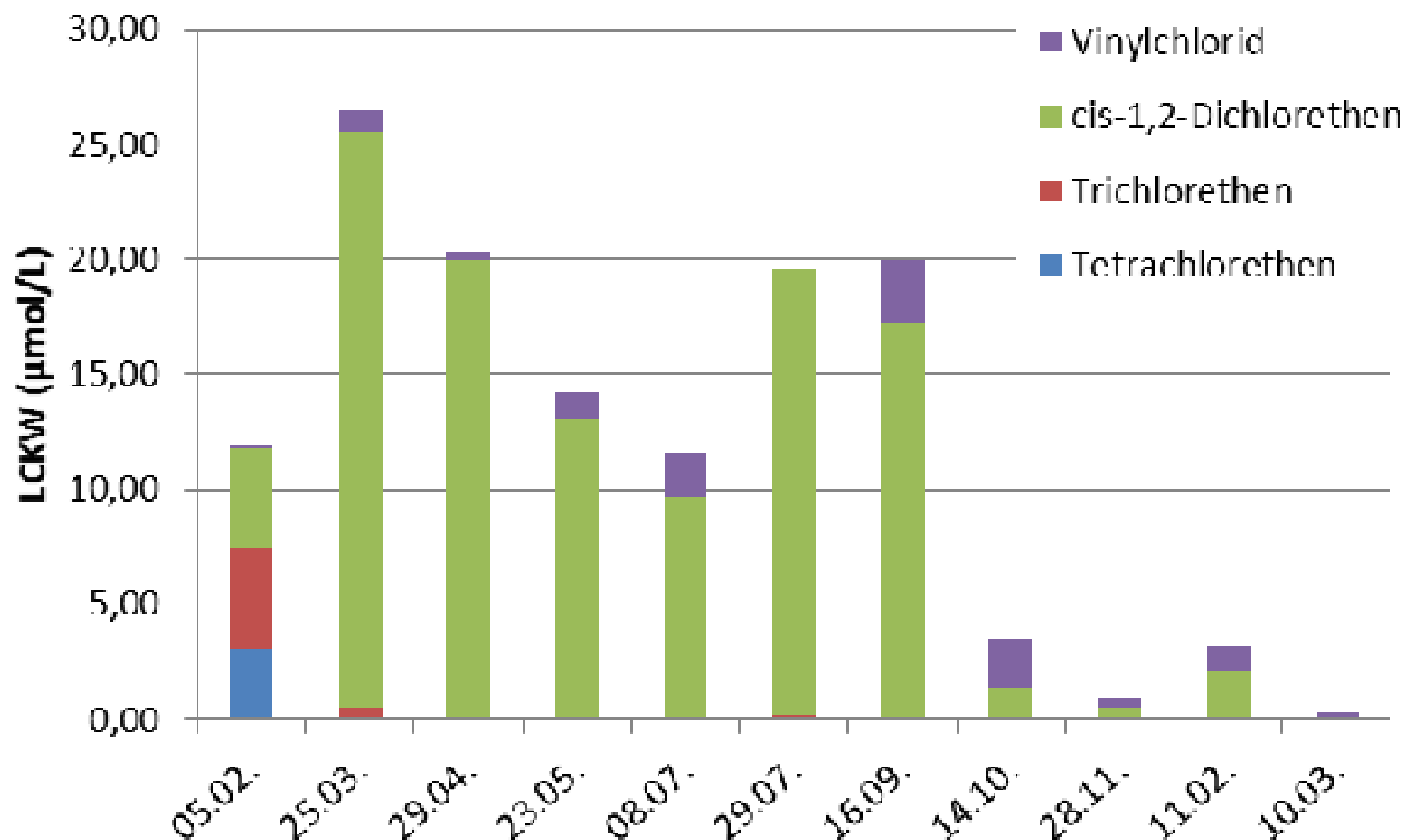
Monatliches Grundwassermonitoring – LCKW (GWM 16)



- Tetrachlorethen-Startwert lag bei über 10.000 µg/l (21 mol%)
- In den letzten Analysen kein PCE mehr nachweisbar
- Summe LCKW sank um 98% in 13 Monaten
- Keine Anreicherung des Produktes Vinylchlorid!



- Starker Rückgang der LCKW-Gehalte um 95% (Summe LCKW)
- Hohe Ethengehalte zwischen 250 und 1.000 µg/l zeigen vollständigen Abbau der LCKW
- Zwischenzeitliche Mobilisation im Rahmen der GW-Förderung und durch DDI-Infiltration



- Vollständiger Abbau der Ausgangsprodukte PCE und TCE
- Keine Akkumulation von Vinylchlorid
- Geringe Restgehalte von 26 $\mu\text{g/L}$ (Summe LCKW)

- 1. Passive Einträge mit der natürlichen Grundwasserströmung führen bei variabler Strömung nicht unbedingt ins „Ziel“**
- 2. Aktiv hydraulisch bewirtschaftete In-situ-Reaktoren lassen deutlich mehr Verfahrenskontrolle zu:**
 - Wirkstoffe werden effektiv und schnell im Aquifer verteilt.**
 - Störstoffe werden abtransportiert.**
 - Die in-situ-Sanierung wird durch die Erfassung des umgewälzten Wasservolumens und seiner stofflichen Zusammensetzung erst bilanzierbar.**

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Stephan Hüttmann

Sensatec GmbH

www.sensatec.de

s.huettmann@sensatec.de

