

HLUG Stadthalle Limburg 12.06. – 13.06.2013

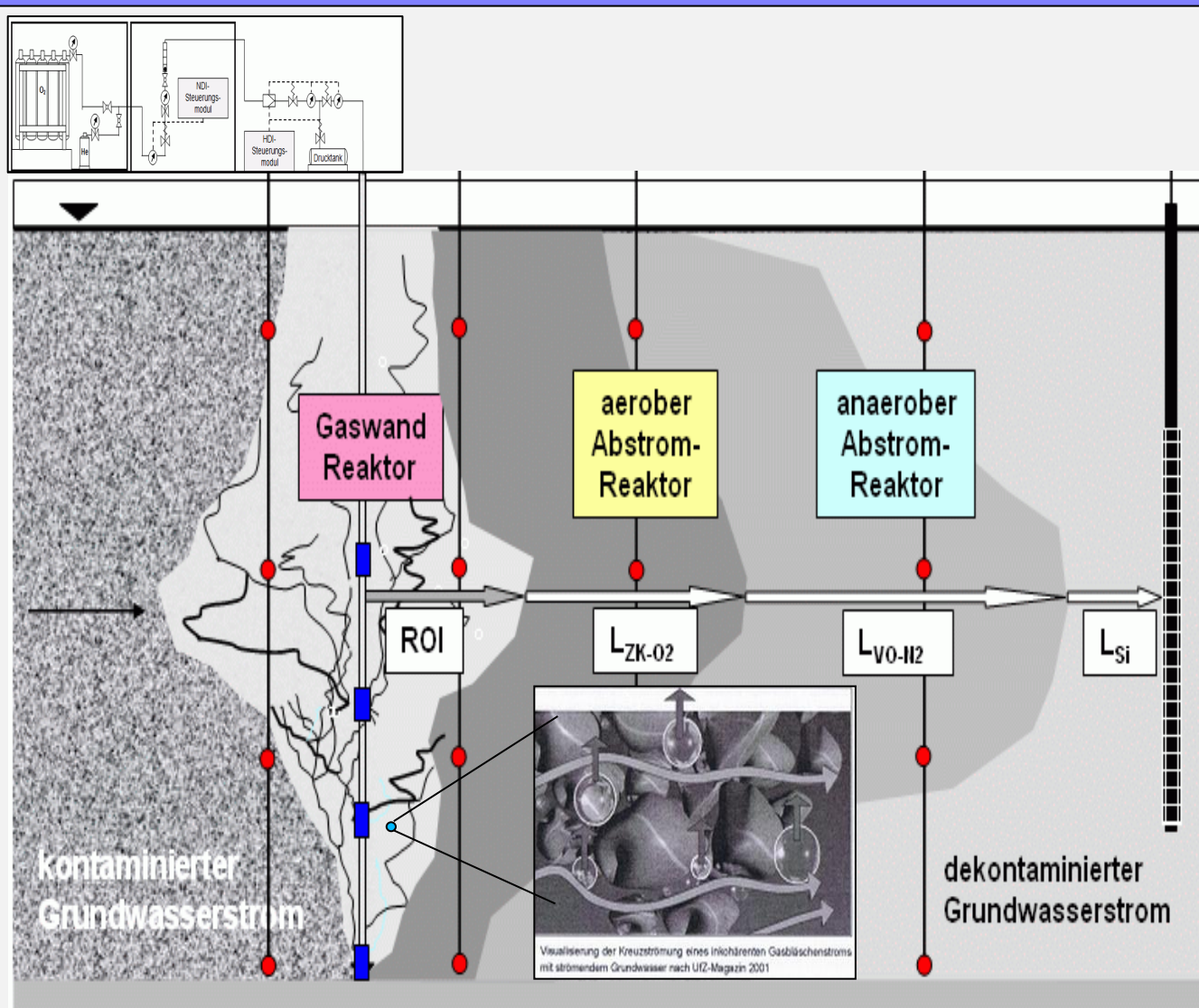
Direktgasinjektionen zur In-Situ- Reinigung kontaminierter GW-Ströme

Verfahren / Techniken / Kosten

Genehmigung / Monitoring

1. Verfahrensmerkmale von Direktgasinjektionen

1.1 In-Situ-Reinigung kontaminierter GW-Ströme



BIOXWAND-Verfahren bestehend aus Gaswand und Abstromreaktoren

Injektion reaktiver Gasgemische

- ✓ permeable Reinigungswand
- ✓ Injektion über Gaslanzen
- ✓ Wirkstoffdepot durch Gasblasen
- ✓ Gaswanddurchströmung

Direktgasinjektionen (DGI)

- ✓ DGI + Mikroorganismen
- ✓ DGI + Tenside

Quellensanierung

- ✓ Fa. Shell (EP 1 169 271 B1)
- ✓ Fa. Biopract (DE 102 25 100)

NH₄-Fe(II)-PTSA-Fahne

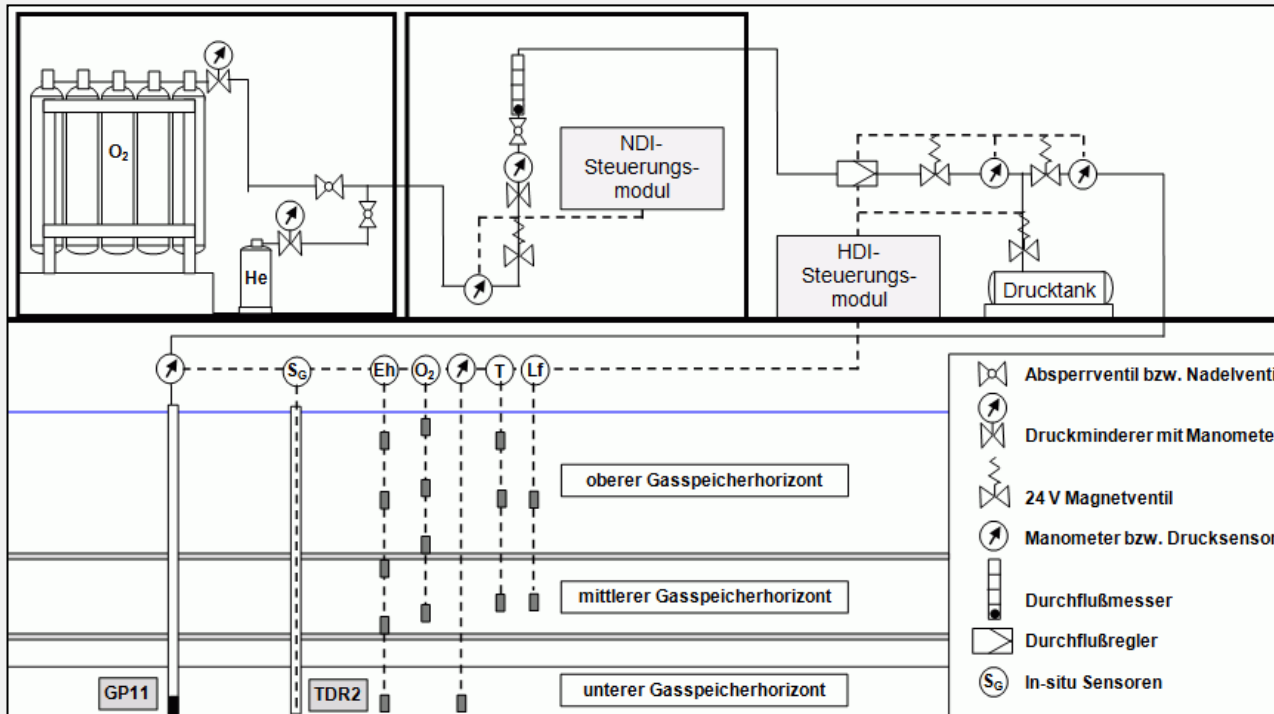
- ✓ BWB (EP 1550519)

Schadstoffe in Fahnen

- ✓ BTEX, MKW, MTBE, Aph, PAK, CKW

1. Verfahrensmerkmale von Direktgasinjektionen

1.2 Gaseintrag



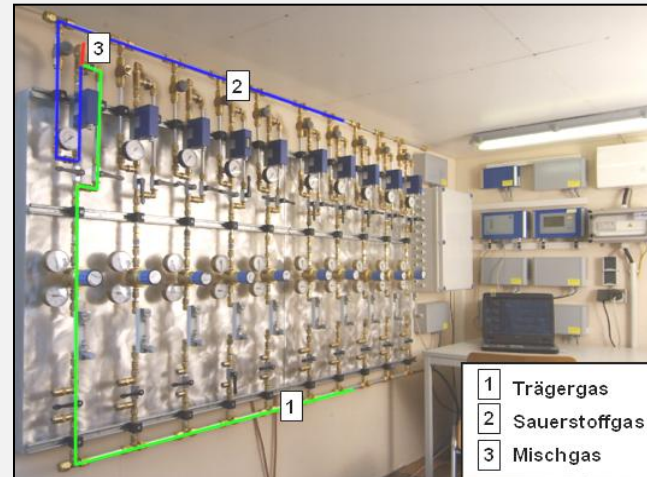
- ✓ keine Injektion bis zu Airsparging
- ✓ Gasspeicherung
- ✓ Gaseinlösung und Verbrauch

Druckstation

- ✓ Kompressoren für Druckluft
- ✓ Sauerstoffflaschen
- ✓ Flüssig-Sauerstoff + Verdampfer

Gas-Dosier- und Misch-System

- ✓ Druckregelung
- ✓ Mengendosierung
- ✓ Gasleitungen
- ✓ Gaslanzen



1. Verfahrensmerkmale von Direktgasinjektionen

1.3 Gasausbreitung in der Saturationszone

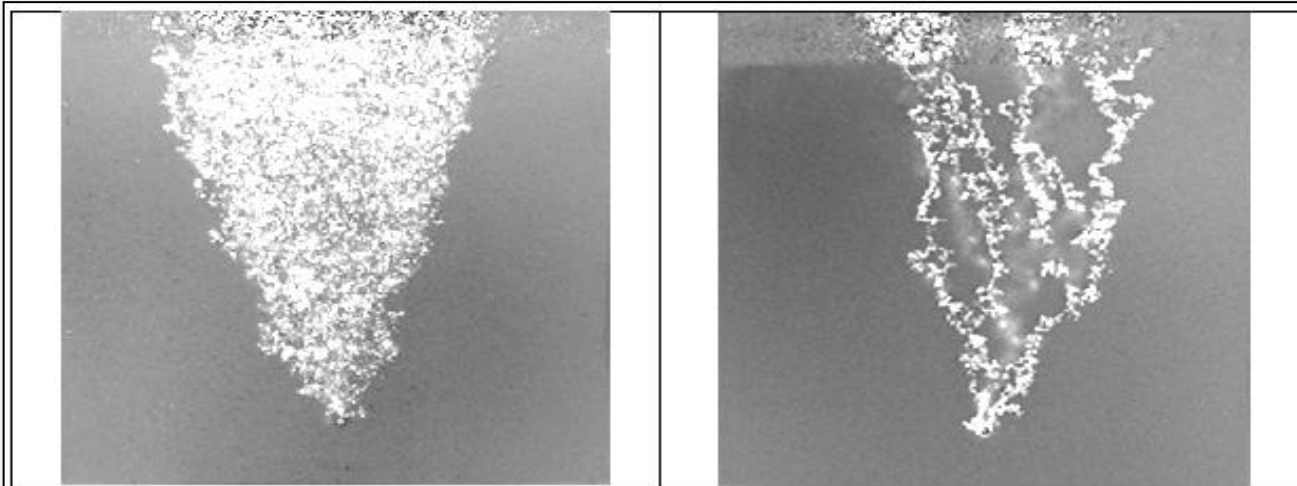
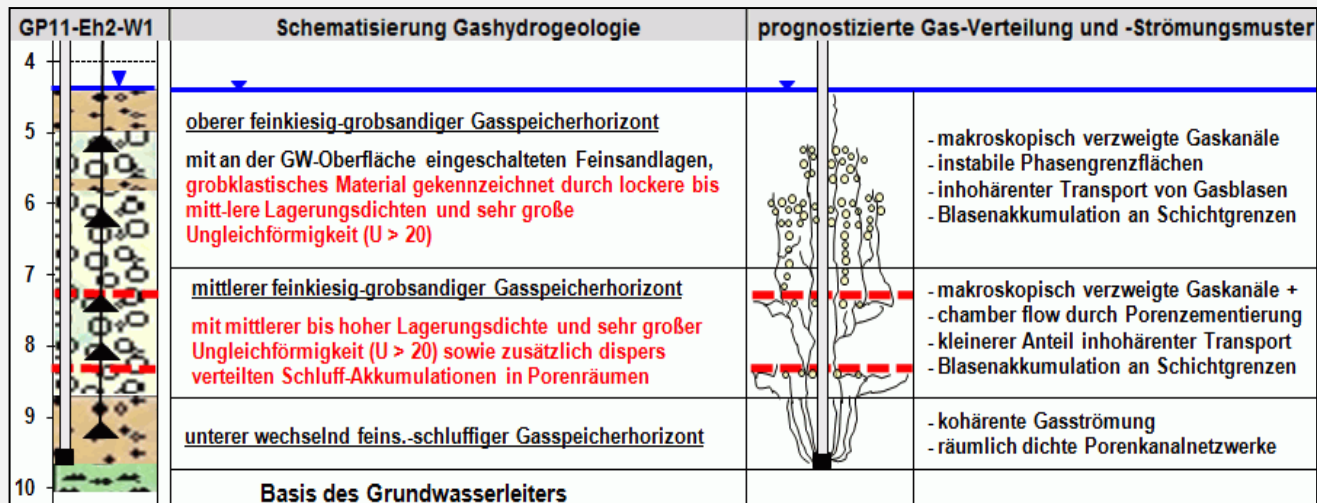


Figure 2 Basic gas flow types for bench scale direct gas injection in water saturated porous media (Geistlinger et al., 2006)
left: incoherent bubbly flow in coarse sand (gas clusters)
right: coherent channelized gas flow (viscous fingering)



abhängig auf Kapillarnetzskala

- ✓ Gaseintragsdruck im Filter
- ✓ Kapillarkräfte
- ✓ Gravitationskräfte
- ✓ Reibungskräfte
- ✓ Gasauftriebskräfte

mit Zunahme der Heterogenität

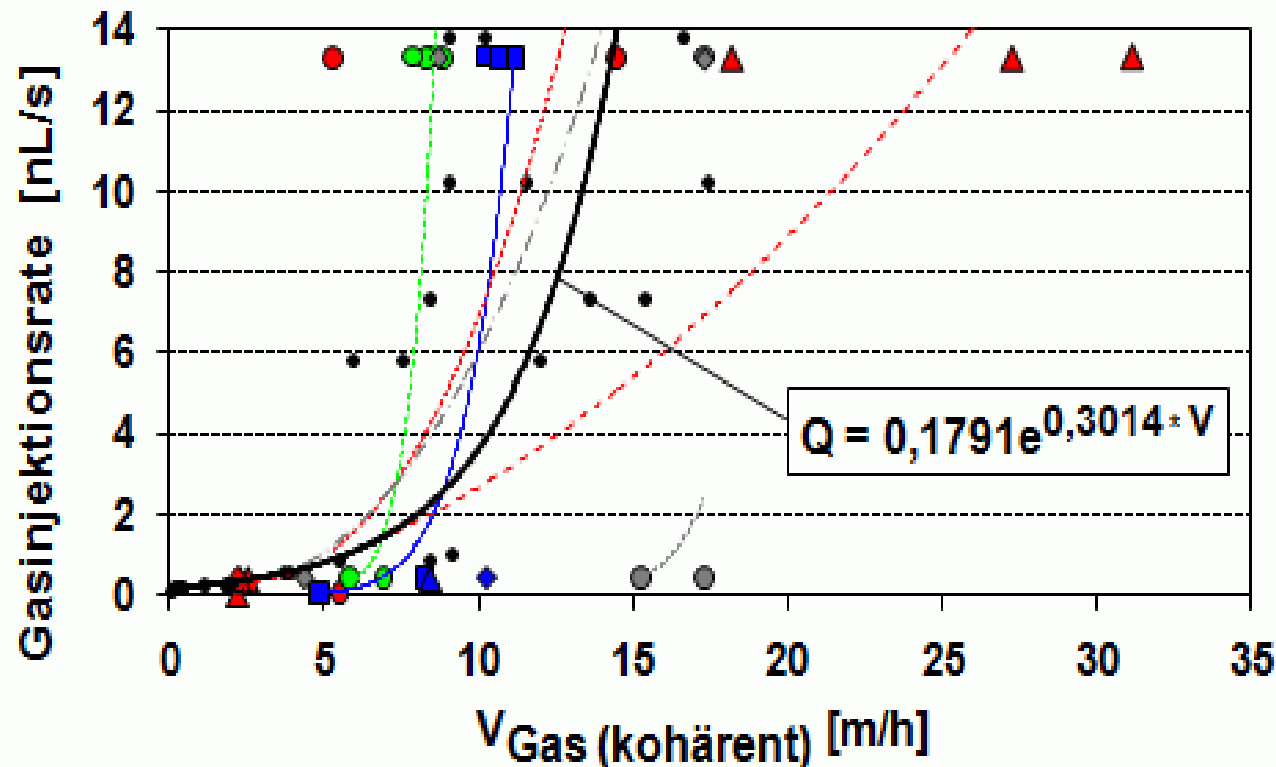
- ✓ gashydrogeologischer Aufbau

Gasausbreitungsprozesse

- ✓ zusammenhängende Phase
- ✓ nicht zusammenhängende Phase
- ✓ nicht abhängig von GW-Dynamik
- ✓ Speicherung im Anstrom möglich
- ✓ keine gezielte Kanalisierung
- ✓ keine Verteilungsprognose
- ✓ Speicher räumlich unregelmäßig
- ✓ Abweichungen von Trichterform

1. Verfahrensmerkmale von Direktgasinjektionen

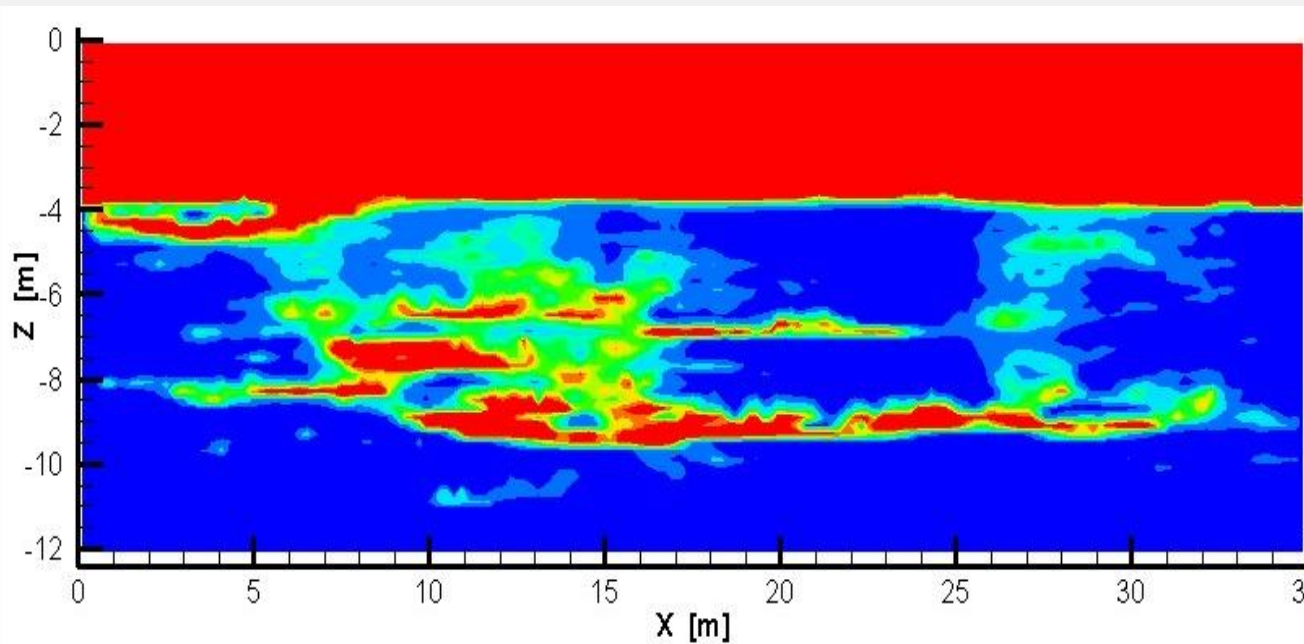
1.4 Gasausbreitungsgeschwindigkeiten



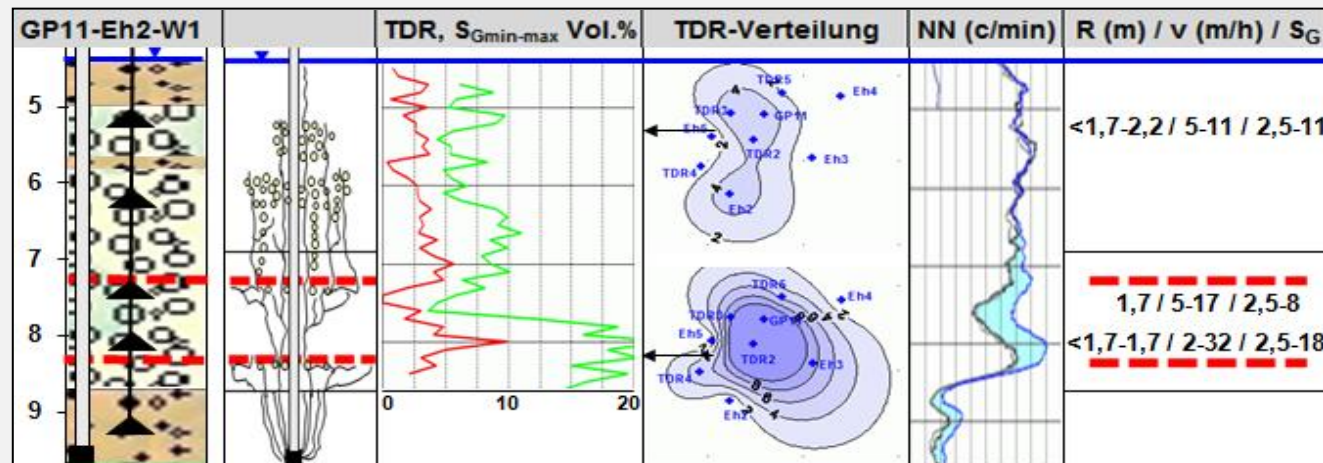
- ✓ abhängig von Gaseintragsrate
- ✓ bei $1,0 - 2,0 \text{ Nm}^3_{\text{Gas}}/h$
in FS und MS bis $5,0 - 10,0 \text{ m/h}$
- ✓ $V_{\text{Gas}} \gg V_{\text{GW}}$
- ✓ Reduzierung Gaseintragsdauer
zur Verhinderung von Gasdurchbrüchen über die GW-Oberfläche
- ✓ Reduzierung Gaseintragsdauer
zur Verhinderung schneller Gasverblockungen in Grobporen

1. Verfahrensmerkmale von Direktgasinjektionen

1.5 Gasverteilung und Gasspeicherung



Gelstlinger (2011): UFZ Halle Leipzig

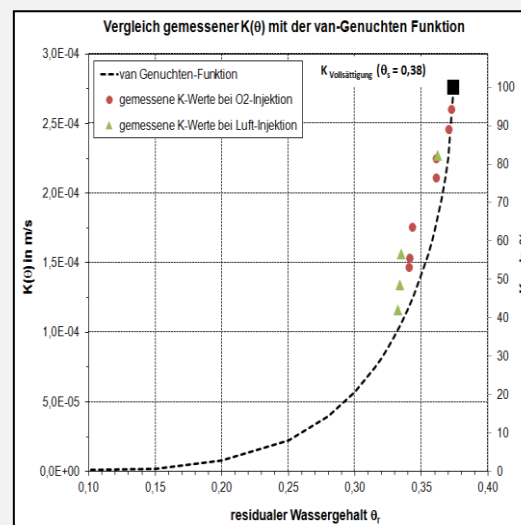
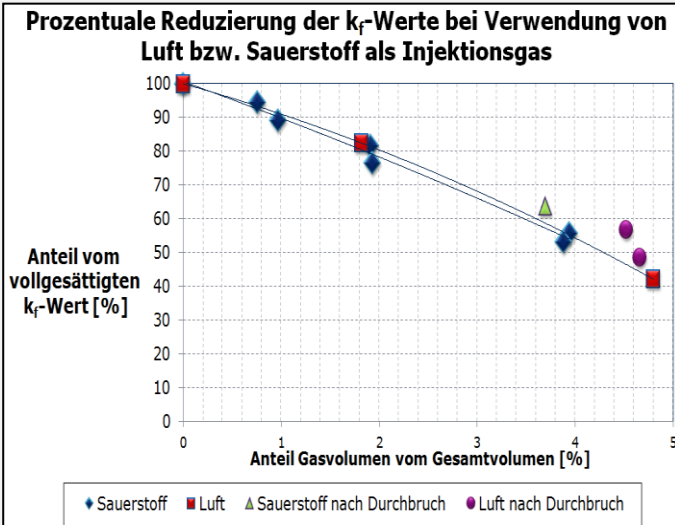


GAB + GAH

- ✓ hindern Gas am Vertikal-Aufstieg
- ✓ Gasaufstiegsbarrieren (GAB)
Ton, Schluff
- ✓ Gasaufstiegshemmer (GAH)
horizontale Ablenkung
sandige Geschiebemergel
Braunkohleschichten
Anisotropieeffekte,
Schichtwechsel, Dichteänderung
- ✓ Gasspeicher
GS, G, MS, FS
Kiese bilden Gaslinsen, hohe ROI
Auflockerungszonen bedingen
Gasaufstieg, verringern ROI
- ✓ Gasverteilung extrem heterogen
- ✓ Gaslanzenabstand $1/2-1/3 M_{H_2O}$
- ✓ Gaslanzen überlappend bauen

1. Verfahrensmerkmale von Direktgasinjektionen

1.6 Gaseinfluß auf die hydraulische Leitfähigkeit



Gasspeicherung

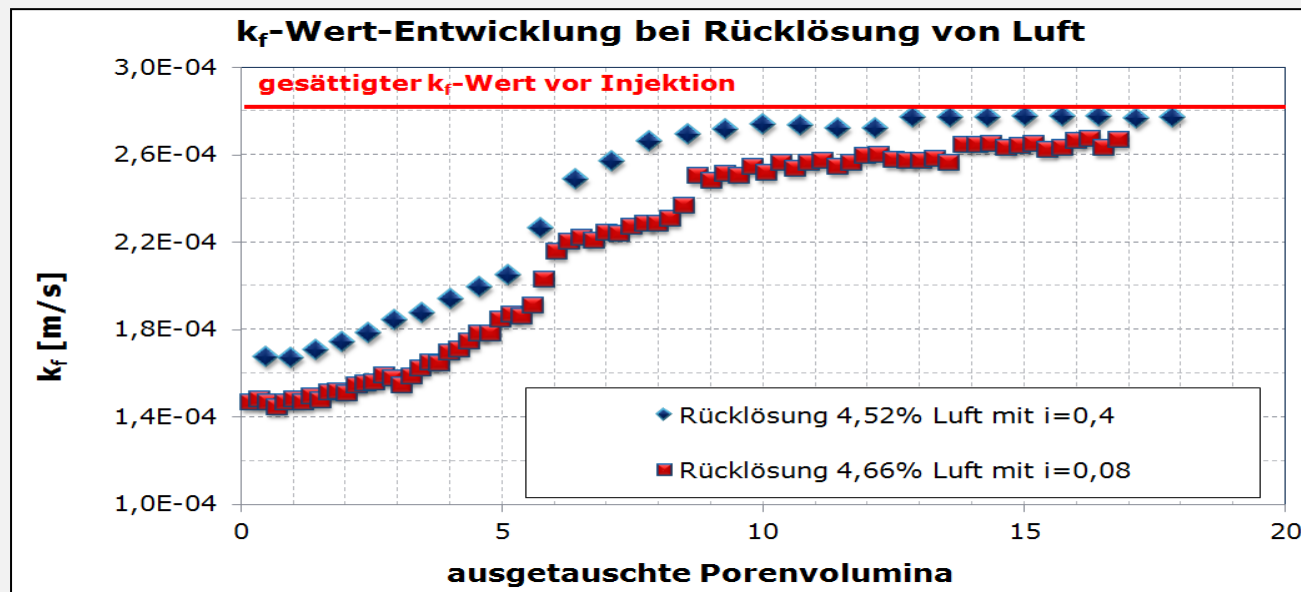
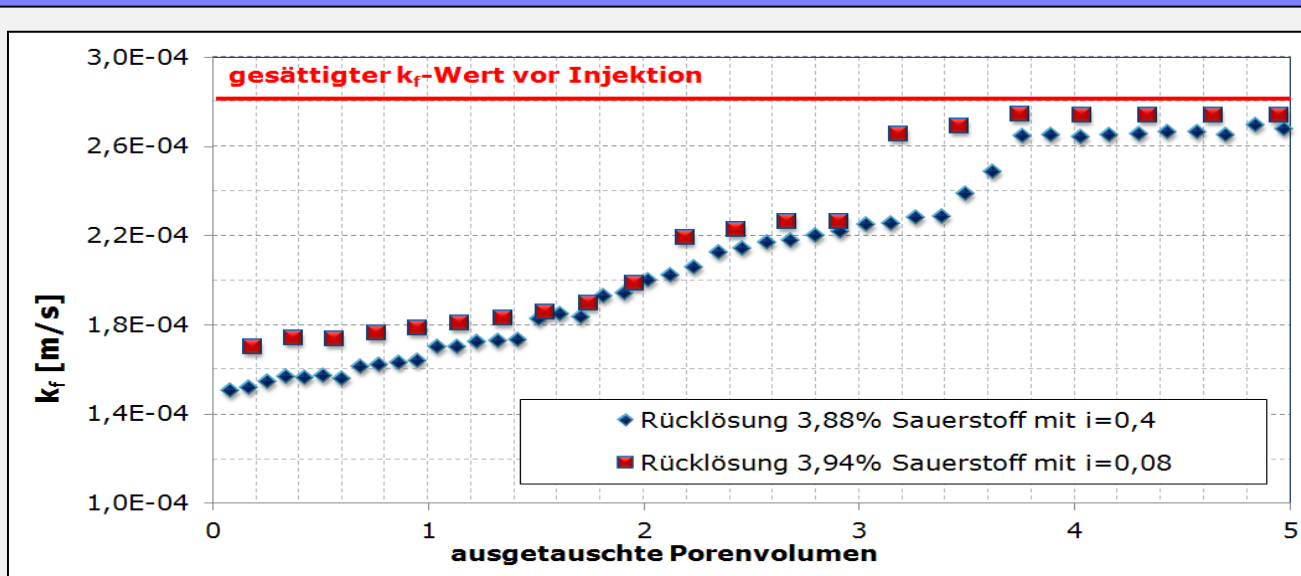
- ✓ durch Minimierung Grenzflächenenergien Gasspeicherung in größten freien Porenradien
- ✓ Verringerung hydr. Leitfähigkeit
- ✓ 4% Gas verringert k_f um 50%
- ✓ analog Aerationzone
- ✓ Verringerung Fließgeschwindigk.
- ✓ Verlängerung Aufenthaltszeit
- ✓ 1 – 2 cm GW-Spiegelanstiege
- ✓ Fließrichtungsänderungen
- ✓ hydraulische Selbstregulierung
- ✓ Verbesserung Wirkstoffverteilung

Abschätzungen für GW-Modelle

- ✓ bei homogenen Sanden Nutzung der van Genuchten Funktion
- ✓ Absicherung durch Feldmessungen

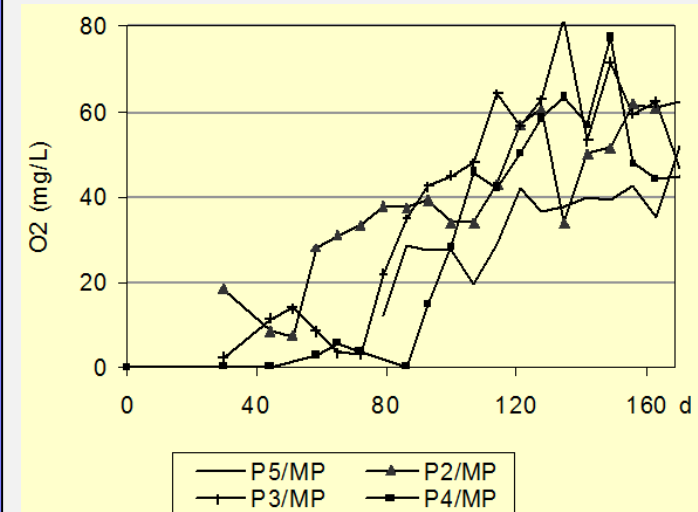
1. Verfahrensmerkmale von Direktgasinjektionen

1.7 Gaseinlösung



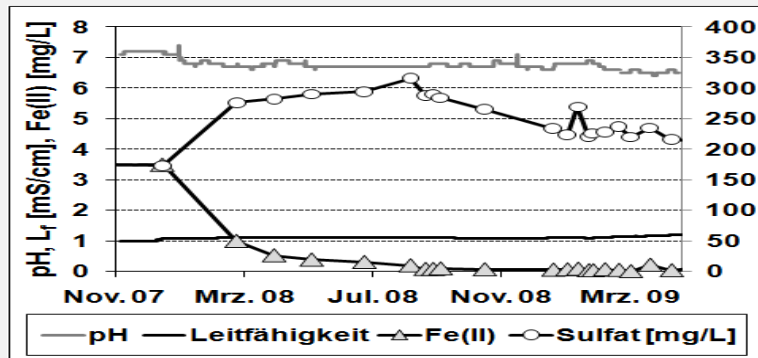
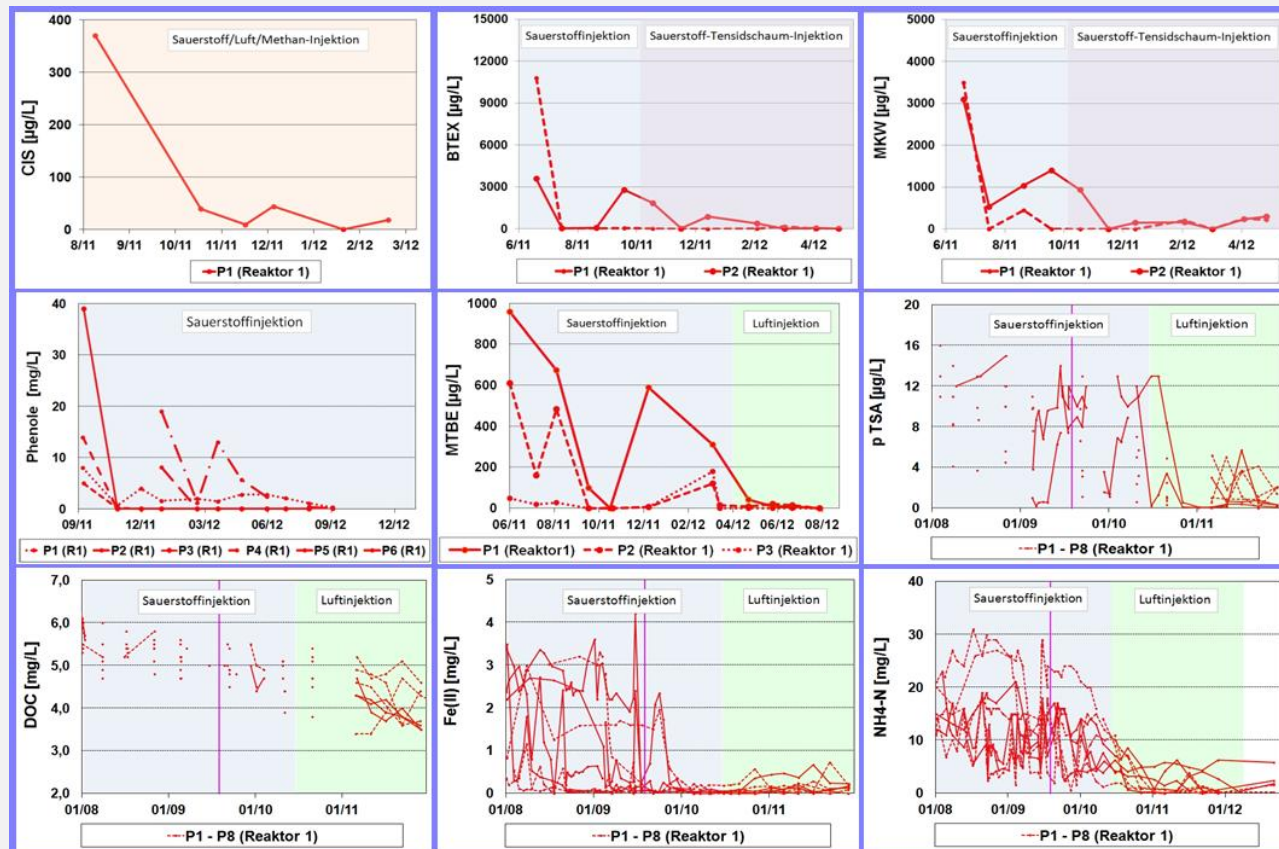
Burghardt et. al. (2012): Untersuchungen zum Einfluß der Gassättigung auf die hydraulische Leitfähigkeit. TU Dresden

- ✓ Bildung hohe O_2 -Konzentrationen
- ✓ in GW-Gaswand-Proben keine Unterscheidung in gasförmig und gelöst möglich
- ✓ zu hohe Konzentrationen toxisch
- ✓ Lösung gemäß Kontaktfläche
Gaspartialdruckverhältnisse
Gaskissen verringern Lösung
- ✓ O_2 : 4% Sättigung 4 facher PVA
- ✓ Luft: 4% Sättigung 10 facher PVA



1. Verfahrensmerkmale von Direktgasinjektionen

1.8 Sauerstoffinduzierte Stoffwandlungsprozesse



keine selektive Stoffumwandlung

Schadstoffabbauprozesse im GW

- ✓ mikrobiologische Prozesse
- ✓ Zielwerte nach ca. 2 a

hydrogeochemi. Begleitprozesse

- ✓ Oxidation reduz. Schwefelverbind.
- ✓ Versauerung
- ✓ Sulfatbildung
- ✓ Anstieg Gesamthärte
- ✓ unterirdische Enteisung

Mehrkomponentenmodelle

- ✓ Prognosemodelle für Abstromreaktoren
- ✓ Gaswand wegen Heterogenität Parameterfeld und Mehrphasendynamik mit konzentrierten Para.

2. Techniken zur Formierung von Gasspeichern

2.1 Erkundung der gashydrogeologischen Verhältnisse

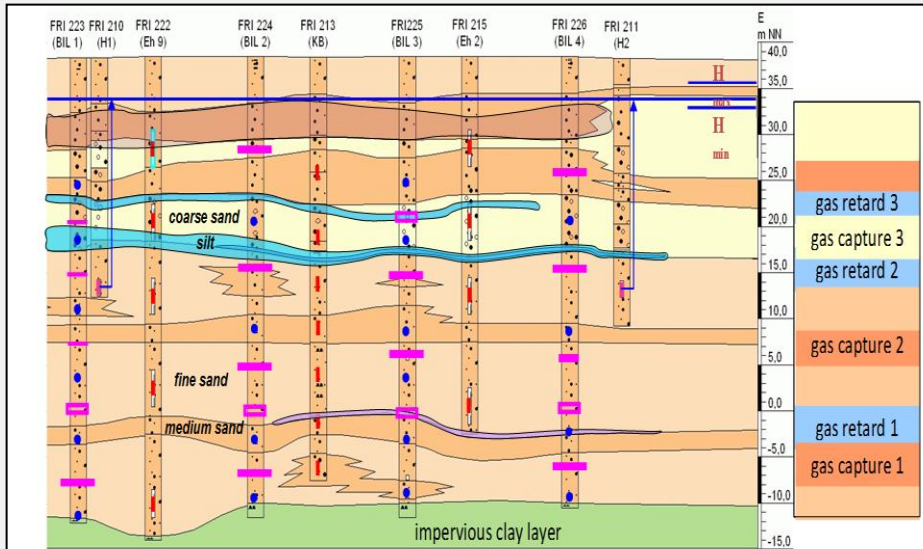
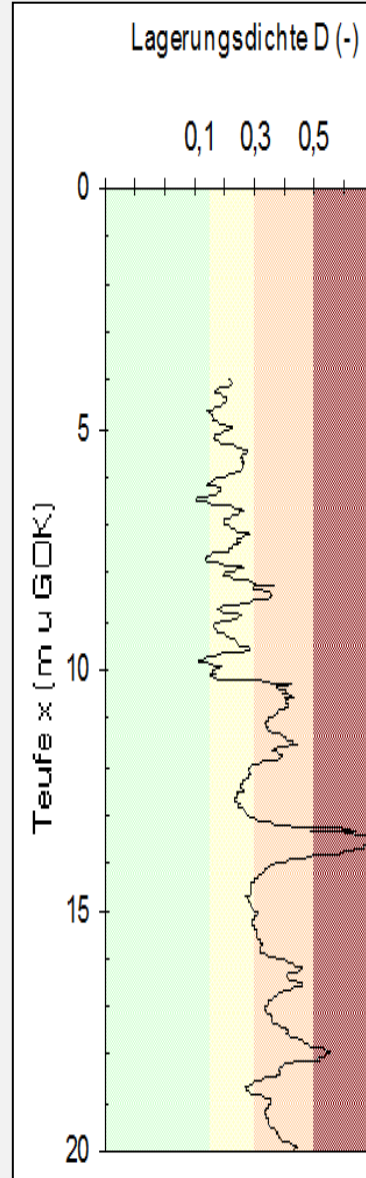
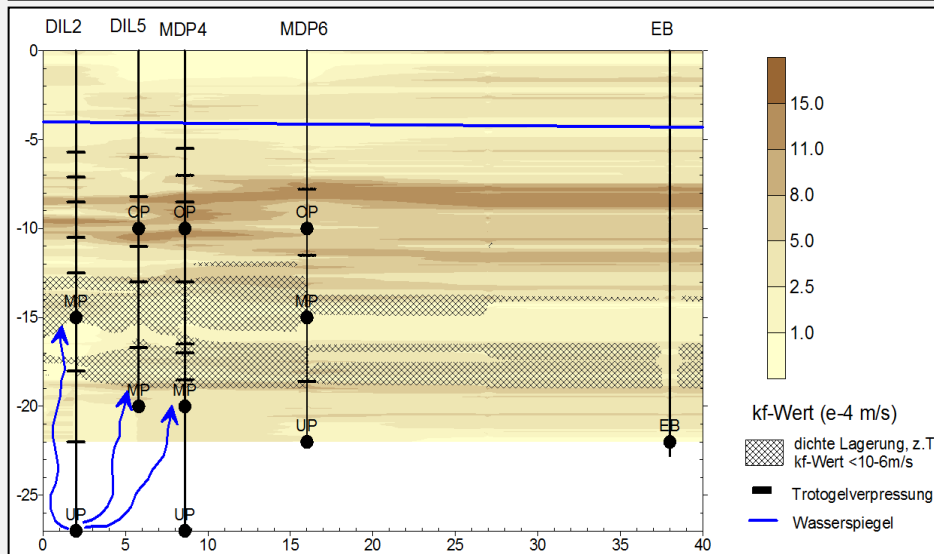
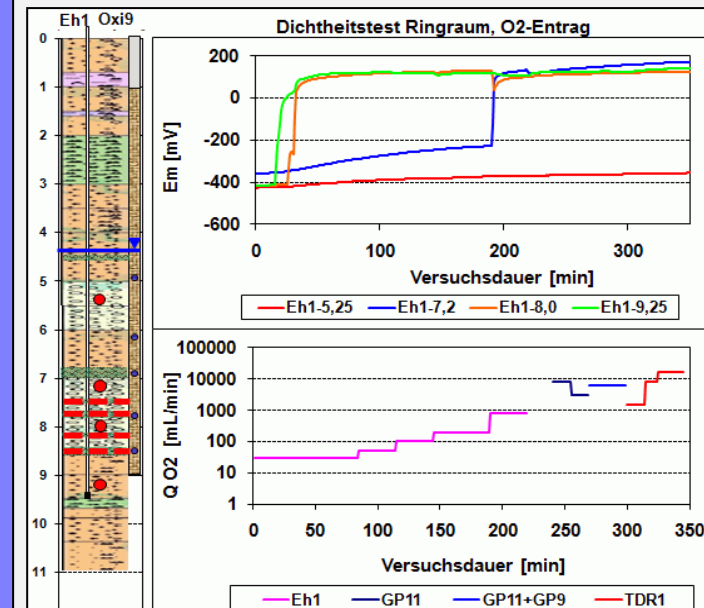


Figure 5 Cross section of a gas PRB domain with gas-hydrogeological structure model (BIOXWAND)

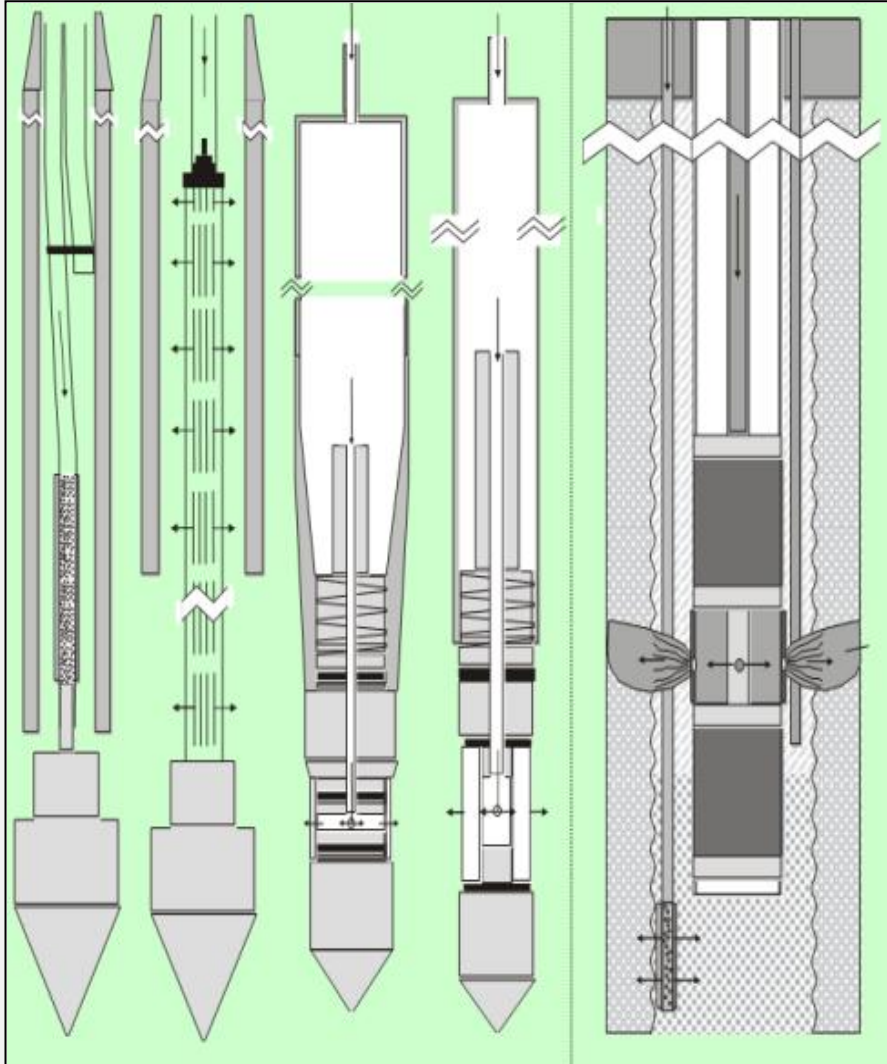


- ✓ vor Gaswandformierung mit geeigneten Methoden Aufbau eines Strukturmodells
- ✓ Modellerweiterung durch Komponenten für Gasspeicher. (GAB, GAH, Lagerungsdichten)
- ✓ Methoden
CPT, $L_f k_f$ Logs, In-Situ-Sensorik



2. Techniken zur Formierung von Gasspeichern

2.2 Gaslanzen



Vorraussetzungen

- ✓ keine Auflockerungen im Profil
- ✓ Ringräume verschließen
- ✓ Filtereinbautiefen > 50 m
- ✓ Lanzenmaterial hochdruckstabil
- ✓ Ermöglichung großer ROI

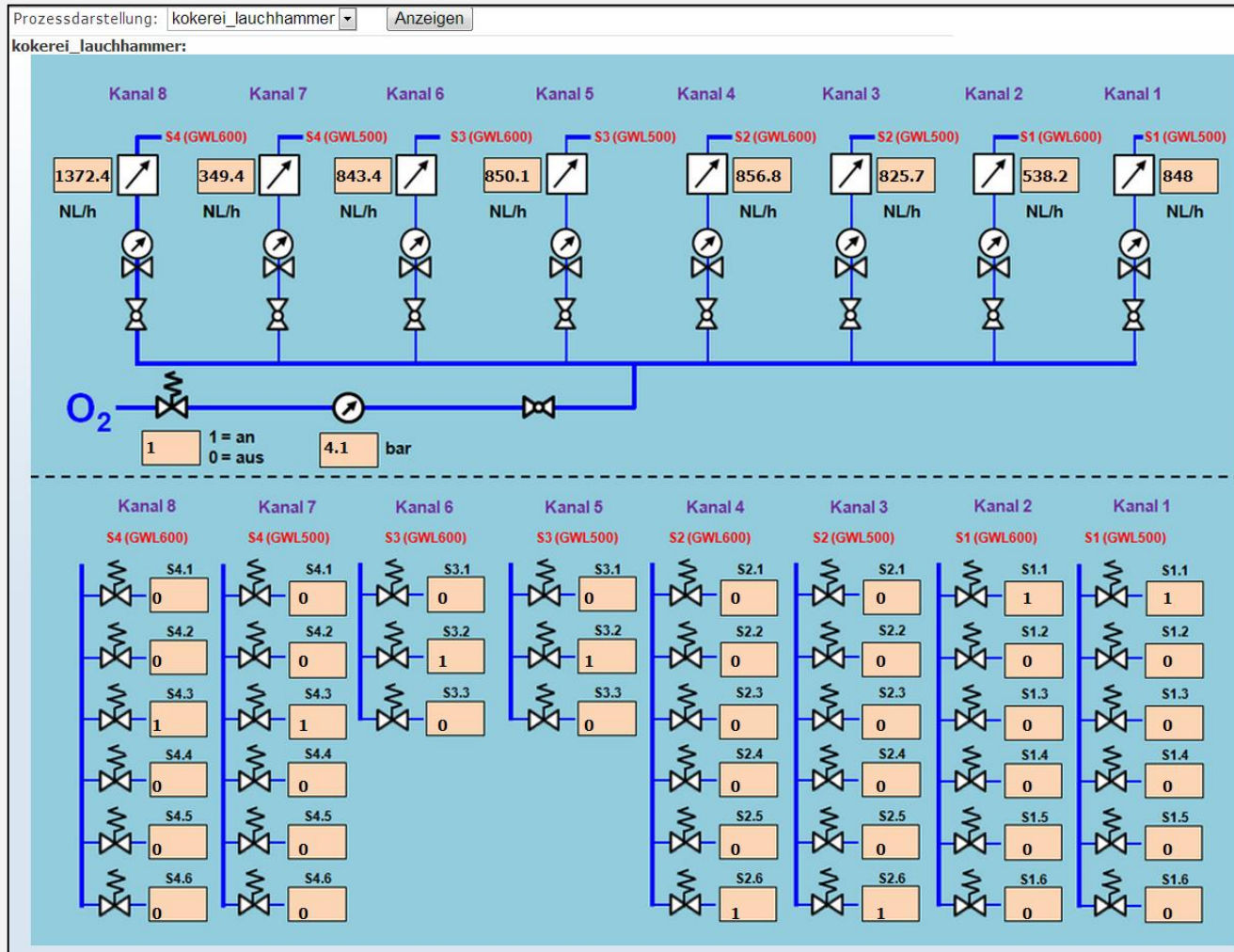
Bohr- und Sondierverfahren

- ✓ Bohrungs-Injektions-Lanzen
BIL
- ✓ Sondierungs-Injektions-Lanzen
RIL, DIL, VIL

- ✓ HDPE/PU-Gaslanzen
- ✓ 11mm Durchmesser
- ✓ Filteranpassung an Sediment
- ✓ Kiesschüttungen, Tonringe
- ✓ Rüttelverdichtung

2. Techniken zur Formierung von Gasspeichern

2.3 Vorhaltung, Mischung und Verteilung der Gase



Speicherformierung

- ✓ Einsatz von Reingasen
- ✓ Einsatz von Mischgasen
- Mischung in einer Anlage oder Mischung im Untergrund durch vorlaufende Stickstoff/Luft- bzw. Kohlendioxid-Injektion

Gaswandabschnitte

- ✓ Aufteilung der Gasmengen
- ✓ Einzel-Lanzenbeschickung
- ✓ sequentiell angeordnete, magnetventilgesteuerte Lanzen in Gassträngen (z.B. 6 Stck/Strang)

Bypassdosierungen

- ✓ Tenside
- ✓ Mikroorganismen
- ✓ Tracergase (He, Ar, Ne)

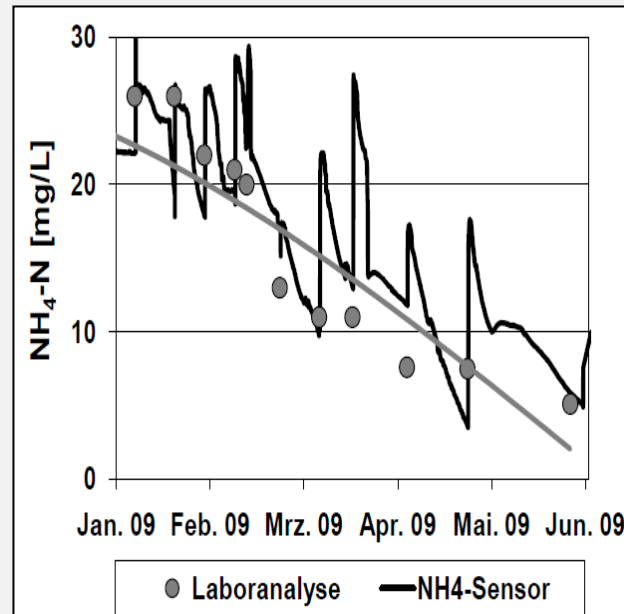
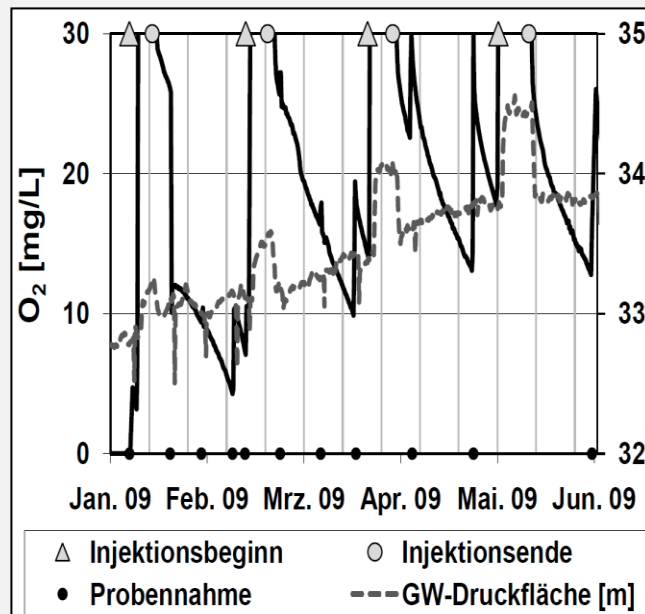
2. Techniken zur Formierung von Gasspeichern

2.4 Steuerung der Injektions-Raten, -Dauer, Drücke

Table 1 Field parameters for NDI and HDI gas injection (sandy to gravel sediments)

	pressure difference at injection point	flow rate (normalized) at injection point	mean propagation velocity over ROI	flow type / injection type, frequency
	Δp_{IP} [kPa]	$Q_{g,IP}$ [Nm ³ /h]	$v_{g,ROI}$ [m/h]	-
NDI, low	< 50	< 1.5	0.01 to 0.1	pervasive or bubbly/ continuous, pulsed $f < 1/d$
NDI, high	50 to 150	1.5 to 2.5	0.1 to 1.0	channelized or bubbly / pulsed $f < 1/h$
HDI	> 300	> 5	> 0.5	channelized or bubbly / pulsed $f > 1/min$

Giese, Engelmann, Swaboda, Uhlig, Luckner (2013): Reactive (Oxygen) Gas Barrier and Zone Technologies - RGBZ, CleanUp conference, Adelaide 2011



Druckvarianten

- ✓ Niedrig-Druck-Injektion (NDI)
- ✓ Hoch-Druck-Injektion (HDI)
- ✓ Grundsatz: $p_{\text{Injektion}} > p_{\text{ws}}$

NDI

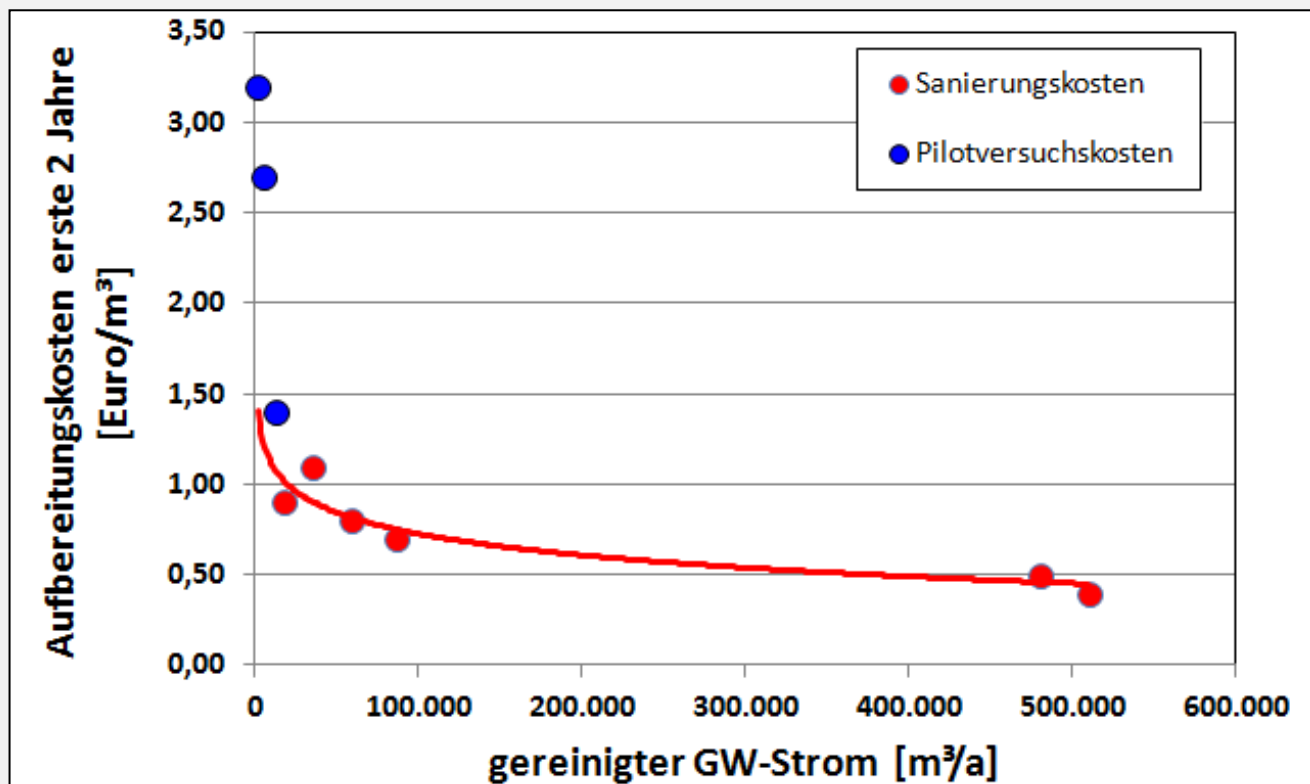
- ✓ 100-300 mbar > hydrost. Druck
- ✓ Injektionsraten 0,01 – 2 Nm³/h
- ✓ intervallweise Schaltung
- ✓ kontinuierlich nur bei
gewünschtem Gaseintrag in
Aerationszone oder Zielstellung
Gasverblockung in GS und G
- ✓ sukzessive Anpassung an Bedarf

HDI

- ✓ 8 - 10 bar > hydrost. Druck
- ✓ zeitlich sehr kurze Raten
- ✓ Erschließung neuer Gaskanäle

3. Kosten

Investitions- und Betriebskosten für Einfahrphasen (2a)



BIOX-Wand	Anzahl Lanzen	Tiefe/Abstand [m]	Wanddicke in GW-Stromri. [m]	GW-Strom [m³/a]	Stoffe	Pilotversuch (P) / Sanierung (S) Aufbereitungskosten erste 2a [Euro/m³xa]
1	2	6 / 2	4	1.800	MTBE	3,20 (P)
2	3	6 / 4	4	5.000	LCKW	2,70 (P)
3	6	15 / 2	5	13.000	CIS, VC	1,40 (P)
4	3	10 / 8	6	18.000	BTEX, MKW	0,90 (S)
5	6	10 / 6	6	26.000	CIS, VC	1,50 (S)
6	10	12 / 4	8	35.000	BTEX	1,10 (S)
7	9	10 / 9	6	59.000	BTEX	0,80 (S)
8	6	28 / 7	18	86.000	MCB, LCKW	0,70 (S)
9	22	30 / 12	20	480.000	Alk-Phenole	0,52 (S)
10	12	40 / 12	25	510.000	NH ₄ , pTSA	0,40 (S)

Datenmaterial

- ✓ 10 Projekte
- ✓ Gaswandtiefen 6 – 45 m
- ✓ Gaswanddicken 4 – 25 m
- ✓ Lanzenanzahl 2 – 22 Stck
- ✓ Schadstoffe (siehe Tabelle)
- ✓ gereinigte GW-Ströme
1.800 – 510.000 m³/a

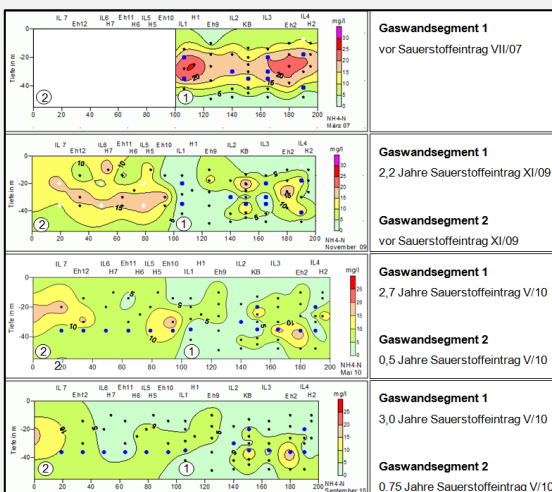
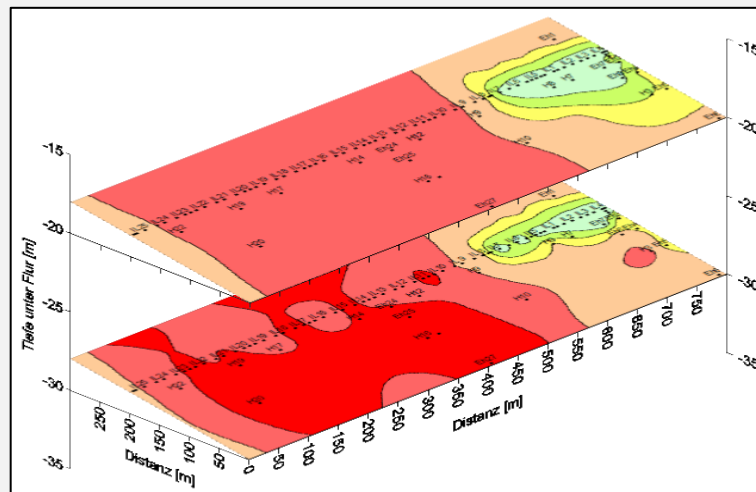
überwiegend 50.000 m³/a
→ 0,6 – 1,1 €/m³

500.000 m³/a
→ 0,4 – 0,5 €/m³

Pilotversuche bis 13.000 m³/a
→ 1,4 – 3,2 €/m³

4. Erfahrungen zur Genehmigung

Verfahrensunsicherheiten + Risikominderung



Quelle: Sensatec Büro Brandenburg/BWB "Handlungsalgorithmus zur Verfahrensoptimierung nach Aquifervoroxidation"

Verfahrensunsicherheit	Risikominderung	Parameteranpassung
schlechte Wirkstoffverteilung	Lageoptimierung Gaseintragspunkte	- horizontal: $L_{x,y} = ROI$ mit $ROI = M/1..3$ - ROI-Überlappung - 2 Injektionsgalerien in Fließrichtung - vertikal: Anpassung an chamberflow - Injektion unterhalb Kontamination
	p, Q Variation und Intervallschaltungen zur Schaffung neuer Kanäle	- Δp , ΔQ bei NDI und HDI - Kombination NDI-HDI
	Einsatz von Trägergasen	- N_2 -Speicherformierung - N_2 -Speicherbeladung mit Wirkstoff (O_2) - Gemischtgaseintrag (Luft- CH_4)
	Nutzung Abstromreaktor für Abbau	- Nutzung longitudinale Makrodispersion - Vergrößerung Reaktorlängen - Erhöhung der Standzeit
limitierte Einlösung	Injektion in feinkörnige Sedimente	- Formierung engmaschiger Porennetze - Verbesserung der Homogenität
	Minimierung Injektion in grobe Sedimente	- Verhinderung Gaskissenbildung
abbauhemmende Wirkstoffkonzentrationen	Absenkung der Wirkstoffkonzentration	- Reduzierung der Gassättigung - Variation Mischgaspartialdrücke
	Änderung hydrogeochemischer Parameter	- Aerosol-, Sorptionsträgerinjektion zur: - pH-, Härte-Änderung, Organikabbau - Wasserstoffperoxid-, Puffereinträge
	Nährstoffzugaben	- Gasinjektion (N , CH_4 , CO_2)
Verblockungen, k_f -Reduzierung	Realisierung aerob/anaerob Wechsel	- Verkürzung Eintragszyklen - Verlängerung Ruhephasen - Vermeidung Inertgaseinsatz - Anpassung Gasbedarf an Verbrauch
Teilumströmung von Gaswänden	Optimierung hydraulische Selbstregulierung	- Kopplung BIOXWAND-WW-Bewirtschaftung

Ort der Beobachtung

- ✓ primär Abstromreaktor
Zielwert zeitabhängig !!!
- ✓ sekundär Gaswand
Wirkstoffmanagement
primärer Abbau bei extrem heterogenen Verhältnissen
- ✓ Verfahrenssteuerung
Unsicherheiten / Risikominderung
- ✓ Pilotversuche
- ✓ Berücksichtigung Patentfragen
- ✓ Monitoring
GW-Probenahme
In-Situ-Sensorik
raumintegrierende Parametererf.

5. Monitoring

5.1 Grundwasseraufschlüsse zur Probenahme

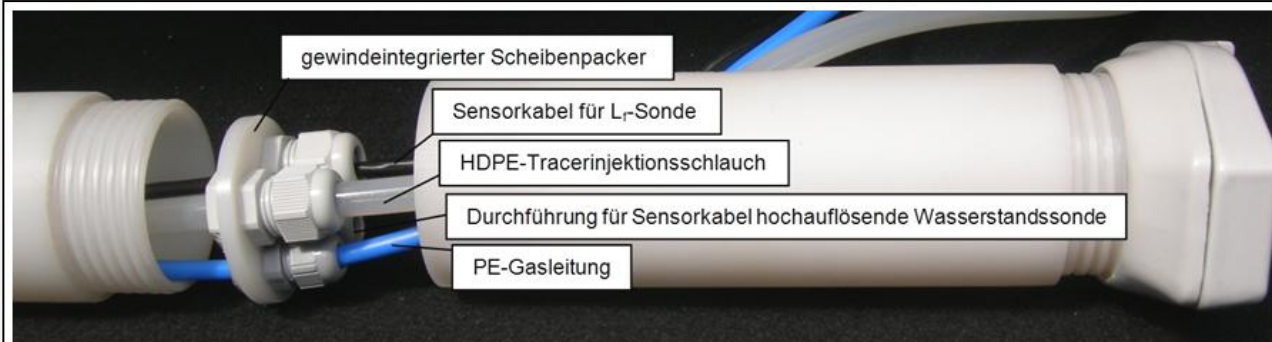
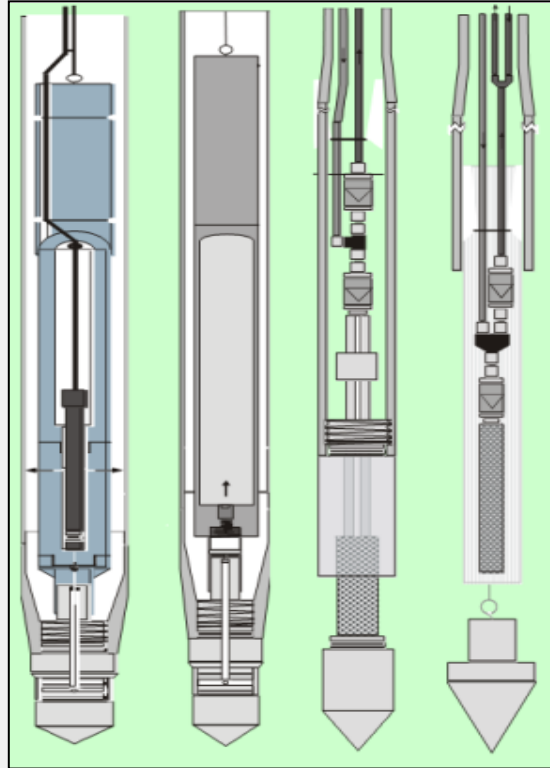


Abb. 8.3.5: gewindeintegrierter Scheibenpacker über feinkiesgefüllter Tracerkammer (Länge 1 m)

GW-Meßstellen mit Kiesschüttung

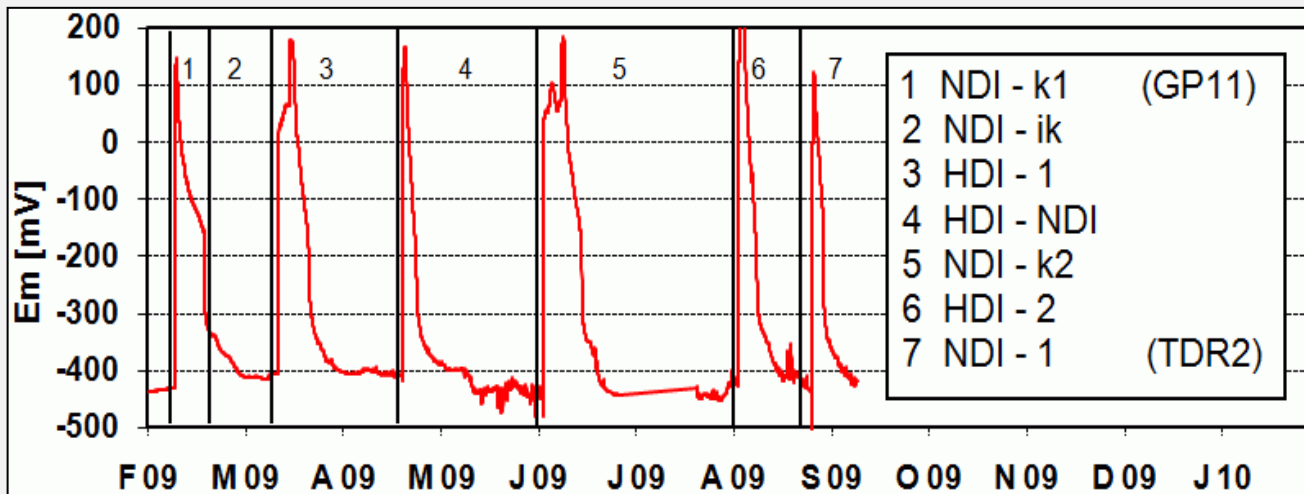
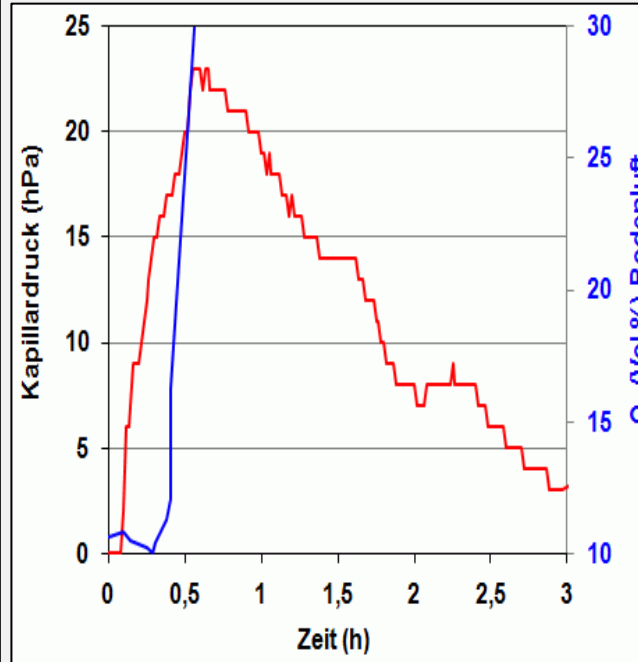
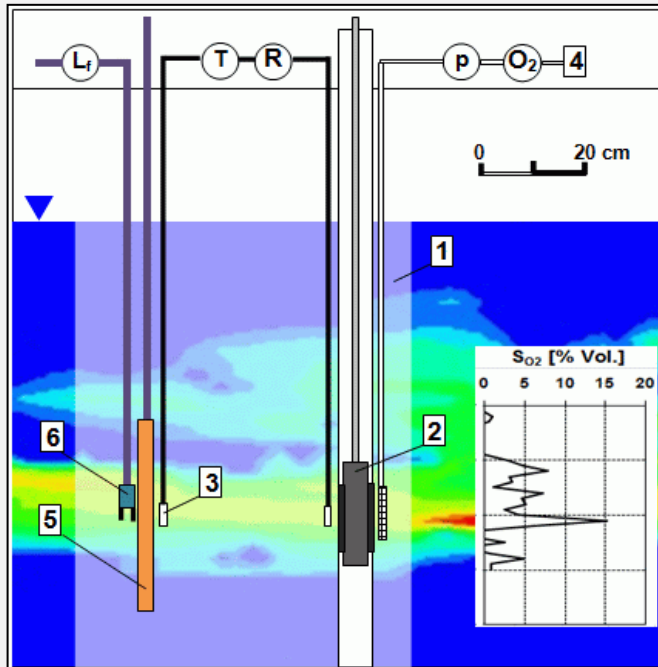
- ✓ ungeeignet das Gaskissenbildung
- ✓ Ausgasungen

Meßstellen ohne Kiesschüttung

- ✓ Sondierungsverfahren
 - ✓ mit und ohne verlorene Spitzen
 - ✓ low-flow Beprobungstechnik
 - ✓ geringe Raumauflösung
 - ✓ gewindeintegrierte Scheibenpackerlösungen für 2" HDPE-Rammfilter und Tiefen bis 12 m
 - ✓ Nutzung der Gaslanzen zur GW-Probenahme
- alle Konstruktionen sind in die Kategorie Sondermeßstellen einzuordnen

5. Monitoring

5.2 in-Situ-Gassensorarrays

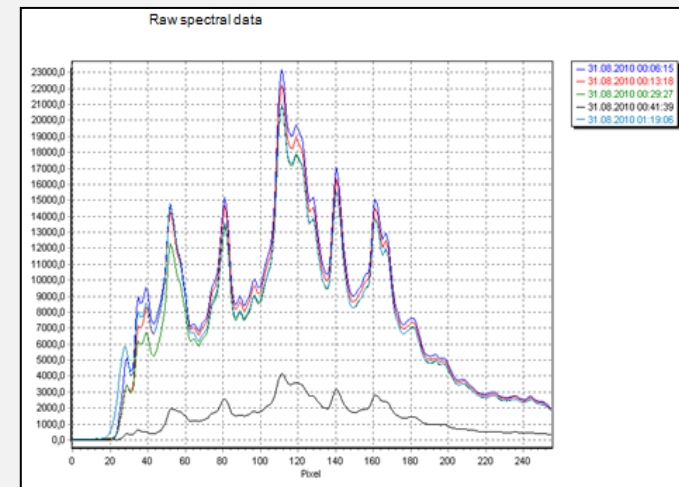


Bestimmung Gasverteilung

- ✓ Aufbau von Meßnetzen mit In-Situ-Sensorik in Kornmatrix
- Eh, O_2 -Optoden, Temperatur, Druck, Gassensoren CH_4 , H_2S , CO_2 , pH, ISA-Spektrometer für NH_4 , NO_3 , DOC, SO_4 , Fe(II), UV

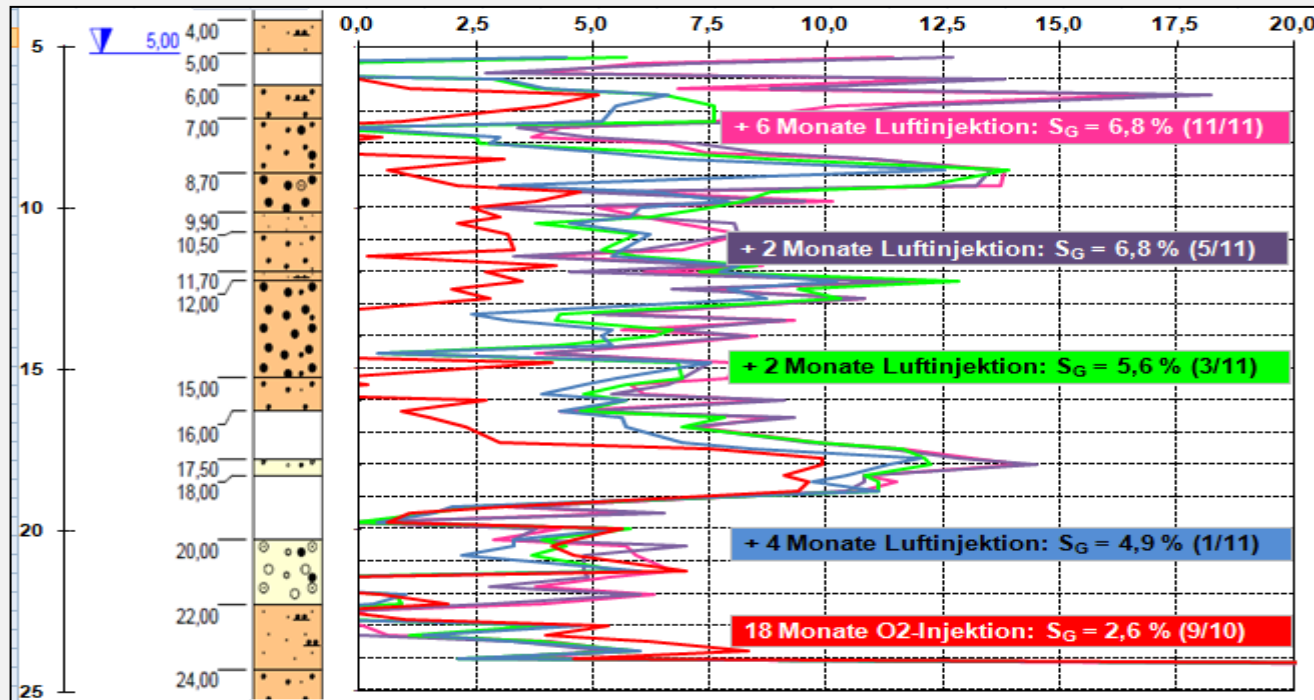
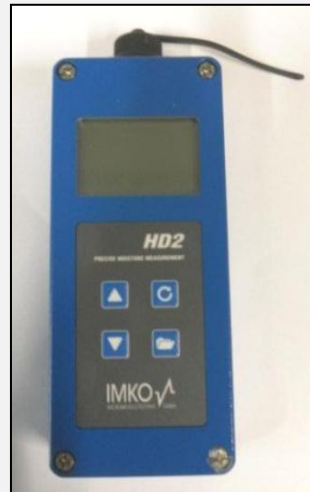
Bestimmung Gasdurchbrüche

- ✓ Sensorik in der Saturations- und Aerationzone



5. Monitoring

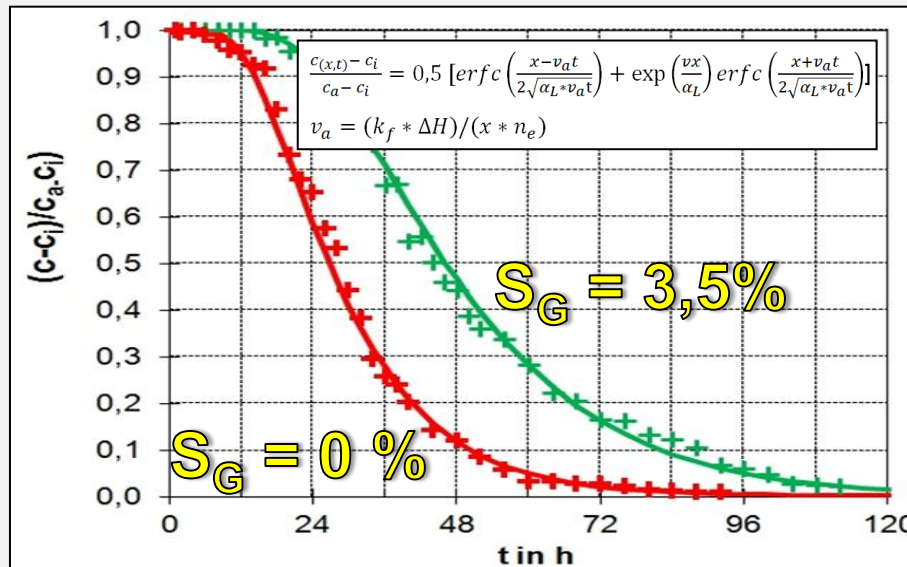
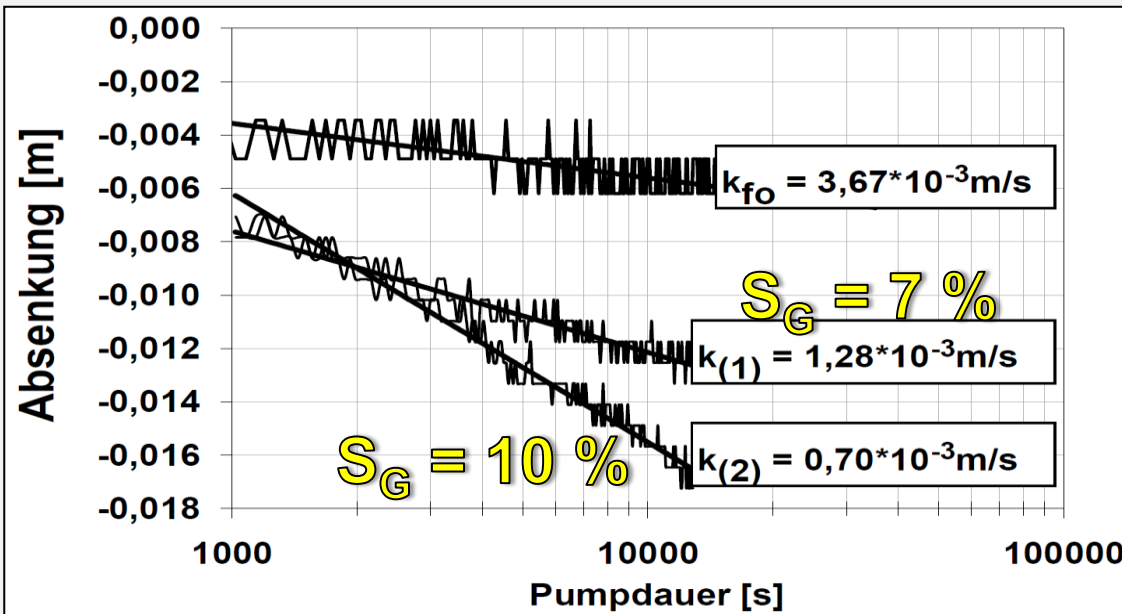
5.3 Messungen zur Gassättigung



TDR-Messungen

- ✓ Time Domain Reflektometry
- ✓ dielektrisches Meßverfahren
- ✓ Ermittlung Laufzeiten elektromagnetischer Impulse
- ✓ Ermittlung Gassättigung unter den jeweiligen Druckbedingungen in speziell kalibrierten, wasserfrei abgeteuten Meßrohren
- ✓ teufengerechte Quantifizierung eingespeicherter Stoffmengen
- ✓ Detektion von GAB, GAH und Gasspeichern
- ✓ Detektion von Änderungen im Begasungsregime
- ✓ Ermittlung der Änderung der Heterogenität in der Gasverteilung in Abhängigkeit vom Begasungsregime

5.4 raumintegrierende Parameteridentifikation



Ergänzungsmonitoring für Gas

- ✓ punktuell Spezialuntersuchungen
- ✓ Erfassung größerer Reichweiten bei der Bestimmung von Gassättigungen durch Gasspeicherpumpversuche, Auffüllversuchen und Einbohrlochtracertests (Aufnahme von Kennwerten vor einer Gasinjektion und nach einem definierten Gaseintragsregime)

Ergänzungsmonitoring für GW

- ✓ punktuell Spezialuntersuchungen
- ✓ Erfassung größerer Reichweiten für Sondermeßstellen durch Anwendung kleindimensionierter Emissionspumpversuche