
Vom Labor ins Feld: Einmischen reaktiver Stoffe in einen Aquifer mittels Grundwasserzirkulation



Hans-Peter Koschitzky & Oliver Trötschler
Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung
Universität Stuttgart, koschitzky@iws.uni-stuttgart.de



7. ÖVA Technologieworkshop
Technologien zur Einbringung und Verteilung von Stoffen in
den Untergrund und Möglichkeiten zum Nachweis der
Verteilung und der Erfolgskontrollen

Wien, Kommunalkredit Austria, 05. November 2015



Was können Sie erwarten

- Zielsetzung
- Injektions- / Zugabetechniken
- 2-D Untersuchungen
- Untersuchungen im Technikumsmaßstab, 3-D
- Pilotanwendung zur In-situ-Behandlung (ENA) von NSO-HET durch Zugabe von H_2O_2
- Installation des GZB im Testfeld
 - Dimensionierung GZB
 - Pilotanwendung
 - Geplante Demonstrationsanwendung
- Fazit

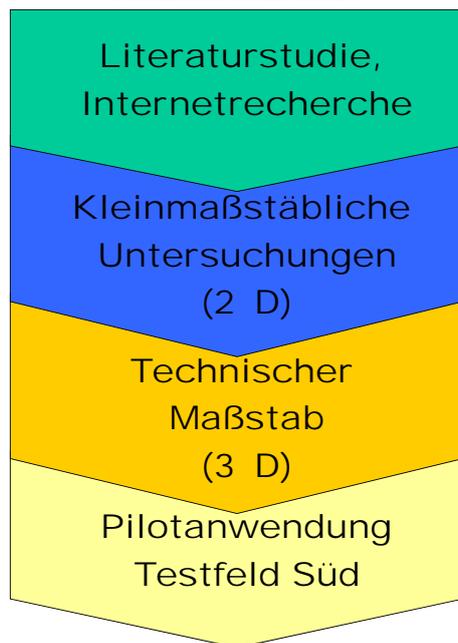
© VEGAS



Vom Labor ins Feld: Einmischen reaktiver Stoffe
in einen Aquifer mittels Grundwasserzirkulation

7. ÖVA Technologieworkshop
Technologien zur Einbringung und
Verteilung von Stoffen in den Untergrund
Wien, KPC, 05.11.2015

Kos
2



Entwicklung eines

➤ **kostengünstigen**

➤ **feldtauglichen**

Zugabe-/ Injektionssystem

➤ **Versorgung von Mikroorganismen
mit Nährstoffen**

➤ **bzw. Zugabe und gezielte Verteilung
von Reagenzien**

in einem Aquifer

© VEGAS

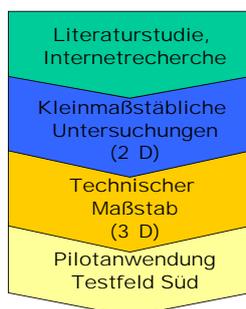


Vom Labor ins Feld: Einmischen reaktiver Stoffe
in einen Aquifer mittels Grundwasserzirkulation

7. ÖVA Technologieworkshop
Technologien zur Einbringung und
Verteilung von Stoffen in den Untergrund
Wien, KPC, 05.11.2015

Kos
3

Entwicklung eines kostengünstigen, feldtauglichen Zugabe-/ Injektionssystems zur Versorgung der Mikroorganismen mit Nährstoffen



Literaturrecherche: (für die Standort- und Schadstoffcharakteristik, d.h. gut durchlässiger Aquifer, BTEX und NSO Heterozyklen)

- **Grundwasserzirkulationsbrunnen (GZB)**

Durch abgepackte Filterelemente im Brunnen Entnahme und Zugabe von Grundwasser und Reagenzien auf unterschiedlichen Teufen
➔ Zirkulationsströmungen / dreidimensionale Vermischung

- **Multilevelinjektionsbrunnen (MLB)**

Über abgepackte Filterelemente variable Zugabe von Reagenzien in verschiedenen Teufen
➔ durch Wechsel der Zugabetiefen und -zeiten können Kontaktzeiten (Reagenz/Schadstoff) beeinflusst werden
➔ aber keine erhöhte Quervermischung

- **Injektion gasförmiger Nährstoffe**

Gasförmige Zugabe der Elektronenakzeptoren analog Bio-Sparging
➔ ausgeschieden, nicht geeignet beim biologischen Abbau von HET

© VEGAS



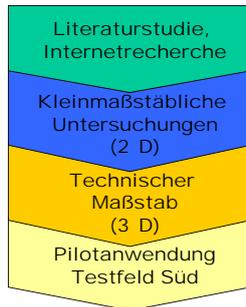
Vom Labor ins Feld: Einmischen reaktiver Stoffe
in einen Aquifer mittels Grundwasserzirkulation

7. ÖVA Technologieworkshop
Technologien zur Einbringung und
Verteilung von Stoffen in den Untergrund
Wien, KPC, 05.11.2015

Kos
4

Kleinmaßstäbliche 2-D Untersuchungen

Entwicklung eines kostengünstigen, feldtauglichen Zugabe-/ Injektionssystems zur Versorgung der Mikroorganismen mit Nährstoffen



2-D Untersuchungen für GZB und MLB

- Küvette, d.h. kleine 2-D Rinne, einseitig verglast (1,46 m x 0,66 m x 0,08 m)
- Vertikaler Brunnen mit 2 Filterelementen
 → als GZB bzw. als MLB betrieben in
 → horizontal gerichtete Grundströmung
- Bodenmaterial (quartäre Sande k_f -Wert: $3,5 \times 10^{-3}$ m/s) analog den nachfolgenden Technikums-Versuche in der „Großen Rinne“ bei VEGAS
- Injektion / Zugabe von tracerdotiertem Wasser in eine Grundwasserströmung
- Dokumentation der Ausbreitung und Vermischung
- Begleitende numerische Modellierung

© VEGAS



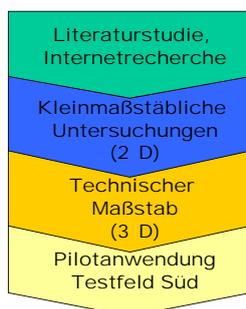
Vom Labor ins Feld: Einmischen reaktiver Stoffe in einen Aquifer mittels Grundwasserzirkulation

7. ÖVA Technologieworkshop
 Technologien zur Einbringung und
 Verteilung von Stoffen in den Untergrund
 Wien, KPC, 05.11.2015

Kos
5

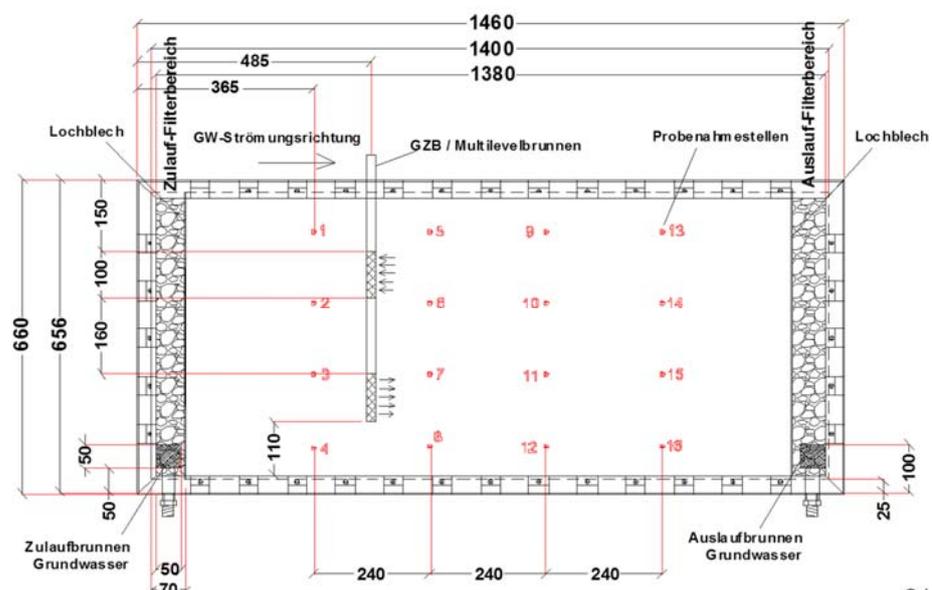
Kleinmaßstäbliche 2-D Untersuchungen

Entwicklung eines kostengünstigen, feldtauglichen Zugabe-/ Injektionssystems zur Versorgung der Mikroorganismen mit Nährstoffen



2-D Untersuchungen für GZB und MLB

2-D Rinne
 (Küvette)
 einseitig verglast
 L = 1,46 m
 H = 0,66 m
 T = 0,08 m



© VEGAS



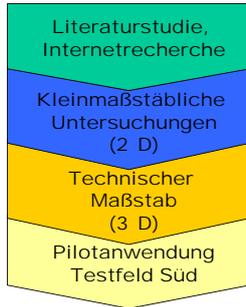
Vom Labor ins Feld: Einmischen reaktiver Stoffe in einen Aquifer mittels Grundwasserzirkulation

7. ÖVA Technologieworkshop
 Technologien zur Einbringung und
 Verteilung von Stoffen in den Untergrund
 Wien, KPC, 05.11.2015

Kos
6

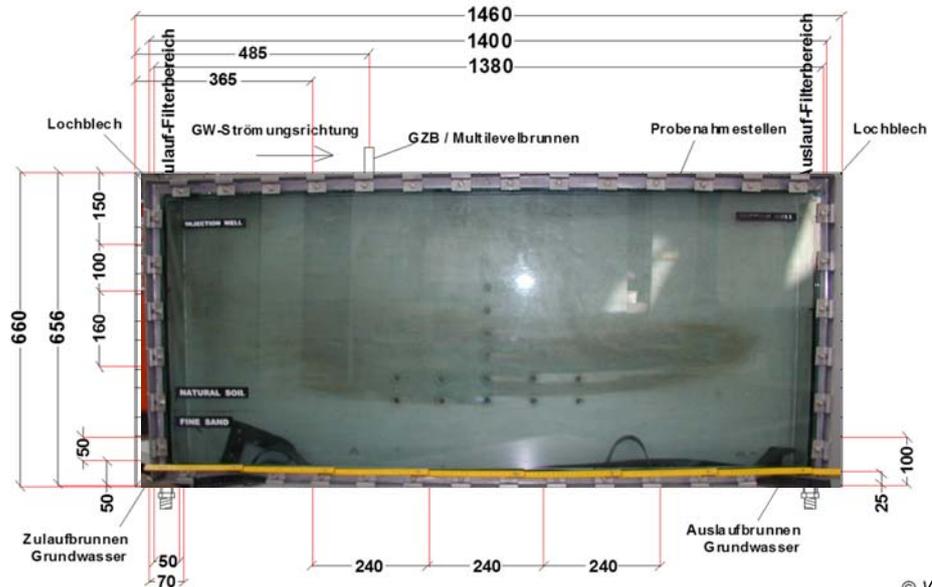
Kleinmaßstäbliche 2-D Untersuchungen

Entwicklung eines kostengünstigen, feldtauglichen Zugabe-/Injektionssystems zur Versorgung der Mikroorganismen mit Nährstoffen



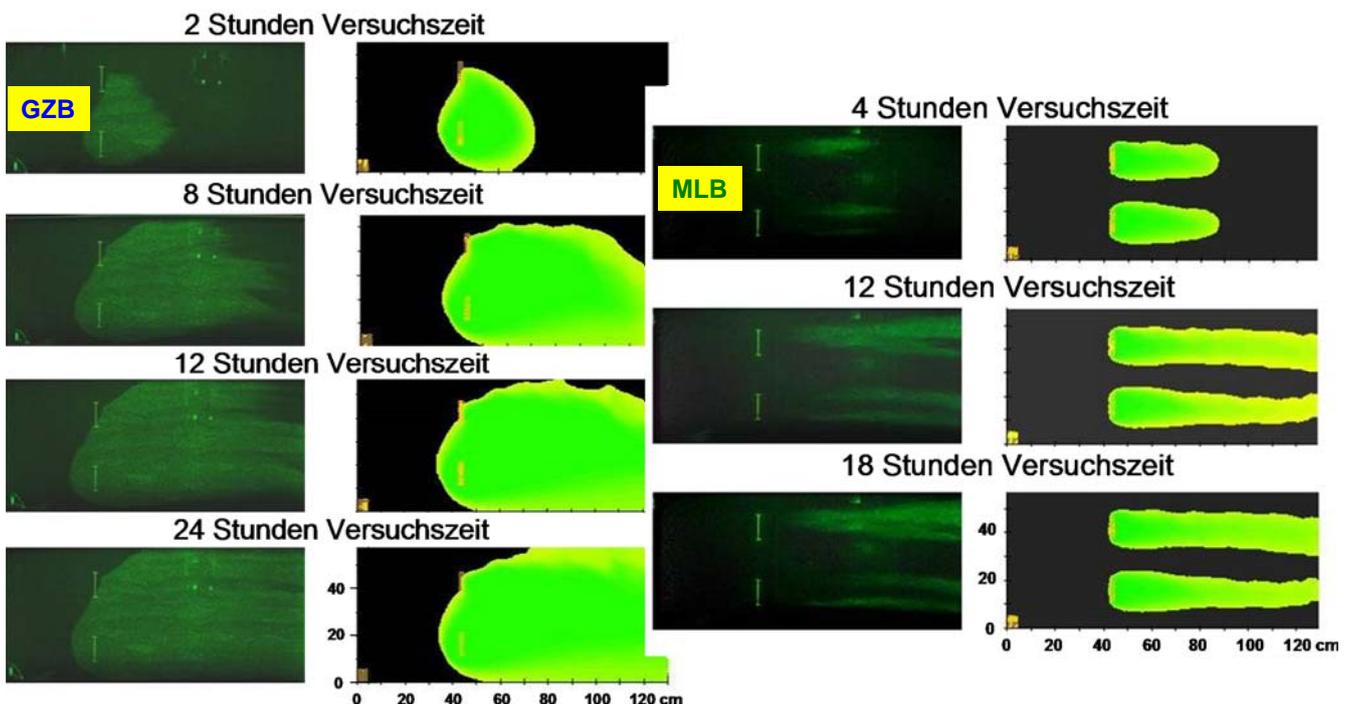
2-D Untersuchungen für GZB und MLB

2-D Rinne
(Küvette)
einseitig verglast
L = 1,46 m
H = 0,66 m
T = 0,08 m



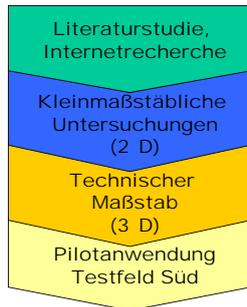
Kleinmaßstäbliche 2-D Untersuchungen

Vergleich GZB und MLB in 2-D Untersuchungen und Numerik



Kleinmaßstäbliche 2-D Untersuchungen

Entwicklung eines kostengünstigen, feldtauglichen Zugabe-/Injektionssystems zur Versorgung der Mikroorganismen mit Nährstoffen



Vergleich GZB - MLB

- Strömungs- und Transportverhalten
➔ sehr gute Übereinstimmung zwischen Experiment und Strömungsberechnung
- **GZB:**
deutliche Erhöhung der Quervermischung (Querdispersion)
➔ Tracer wird gleichmäßig im Modellaquifer verteilt
- **MLB:**
Tracerausbreitung durch Lagerung (Schichtung) des Modellaquifers dominiert

➔ Weiterführende Untersuchungen mit GZB

© VEGAS



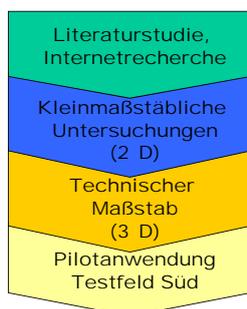
Vom Labor ins Feld: Einmischen reaktiver Stoffe in einen Aquifer mittels Grundwasserzirkulation

7. ÖVA Technologieworkshop
Technologien zur Einbringung und
Verteilung von Stoffen in den Untergrund ...
Wien, KPC, 05.11.2015

Kos
9

Technischer Maßstab 3-D Untersuchungen

Entwicklung eines kostengünstigen, feldtauglichen Zugabe-/Injektionssystems zur Versorgung der Mikroorganismen mit Nährstoffen



3-D Untersuchungen für GZB

- Nachweis und der Optimierung des aeroben biologischen Abbaus der Heterozyklen (KORA Projekte)
➔ Stimulation der „MO“ mittels Sauerstoffzugabe
➔ vollständiger Abbau der NSO-HET bei H₂O₂-Zugabe, auch oberstromig GZB
- Nachweis der hydraulischen Wirksamkeit des GZB und Entwicklung des numerischen Modells
- Nachweis der „homogenen“ Einmischung mittels GZB eines Tracers in eine Grundströmung mit numerischer Begleitung
- VEGAS „Große Rinne“
Modellaquifer Länge 7,5 m, Breite 1,0 m, Höhe 2,5 m
Mittelsand k_f -Wert: $3,5 \times 10^{-3}$ m/s
Grundströmung

© VEGAS



Vom Labor ins Feld: Einmischen reaktiver Stoffe in einen Aquifer mittels Grundwasserzirkulation

7. ÖVA Technologieworkshop
Technologien zur Einbringung und
Verteilung von Stoffen in den Untergrund ...
Wien, KPC, 05.11.2015

Kos
10

Technischer Maßstab 3-D Untersuchungen

3-D Untersuchungen für GZB - VEGAS „Große Rinne“



© VEGAS



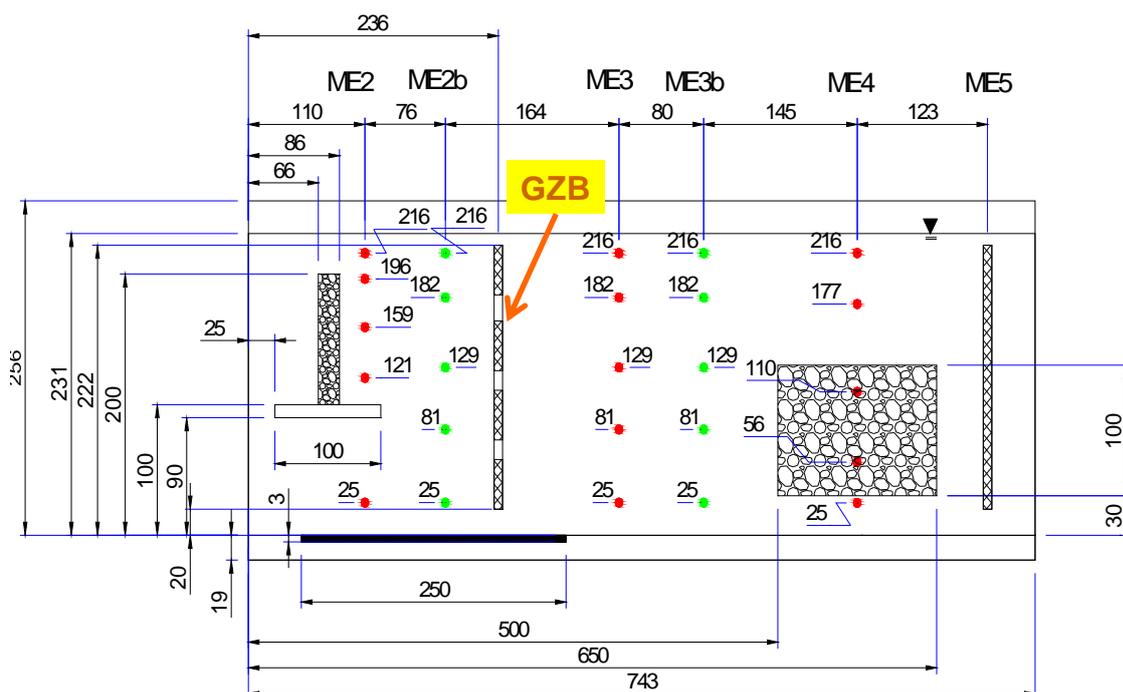
Vom Labor ins Feld: Einmischen reaktiver Stoffe in einen Aquifer mittels Grundwasserzirkulation

7. ÖVA Technologieworkshop
Technologien zur Einbringung und
Verteilung von Stoffen in den Untergrund
Wien, KPC, 05.11.2015

Kos
11

Technischer Maßstab 3-D Untersuchungen

3-D Untersuchungen für GZB - VEGAS „Große Rinne“



© VEGAS

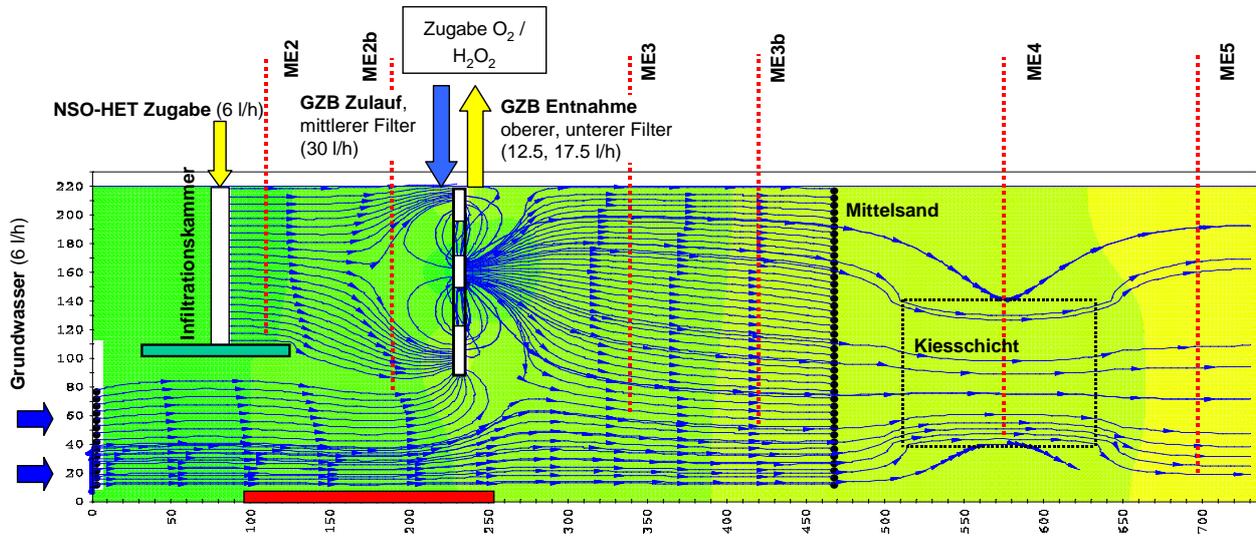


Vom Labor ins Feld: Einmischen reaktiver Stoffe in einen Aquifer mittels Grundwasserzirkulation

7. ÖVA Technologieworkshop
Technologien zur Einbringung und
Verteilung von Stoffen in den Untergrund
Wien, KPC, 05.11.2015

Kos
12

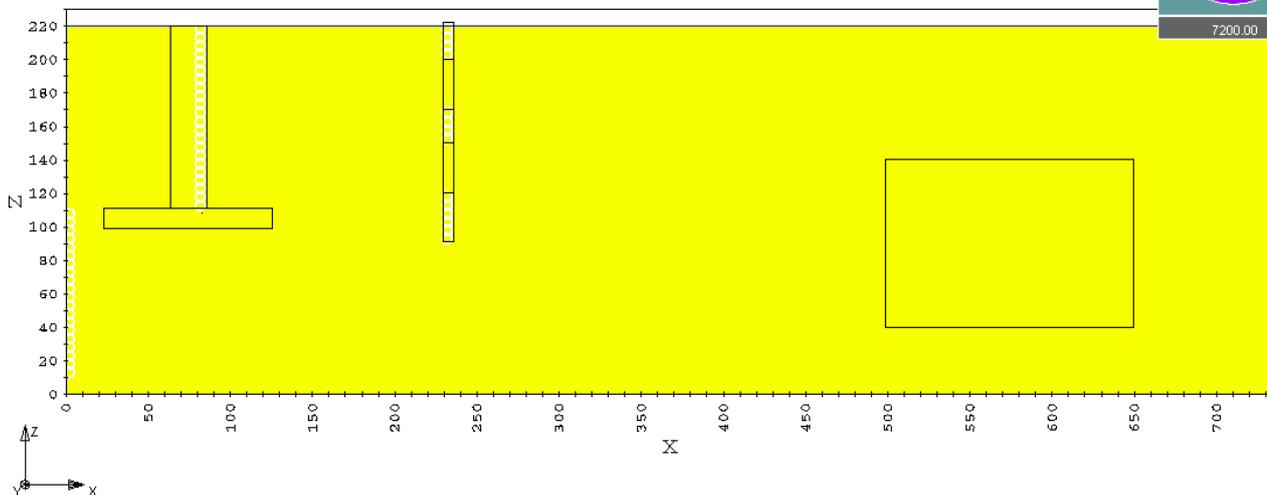
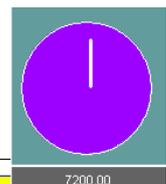
3-D Untersuchungen für GZB - VEGAS „Große Rinne“



© VEGAS

Simulation der Tracerausbreitung

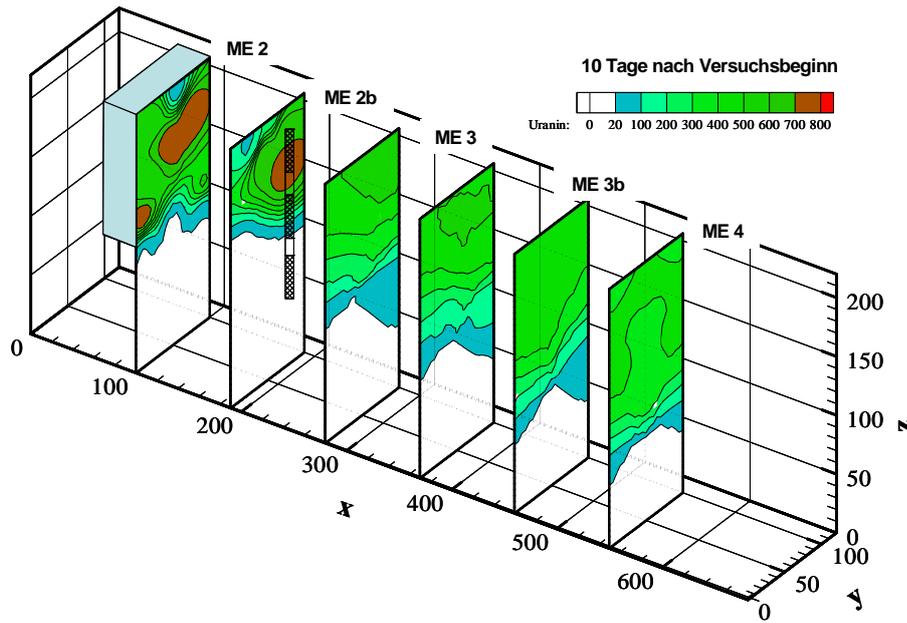
Inverse Modellierung zur Bestimmung der k_f -Wert-Verteilung (Schichtenverteilung)



© VEGAS

Technischer Maßstab 3-D Untersuchungen

3-D Untersuchungen für GZB - VEGAS „Große Rinne“



Uraninkonzentrationen 10 Tage nach Versuchsstart

© VEGAS



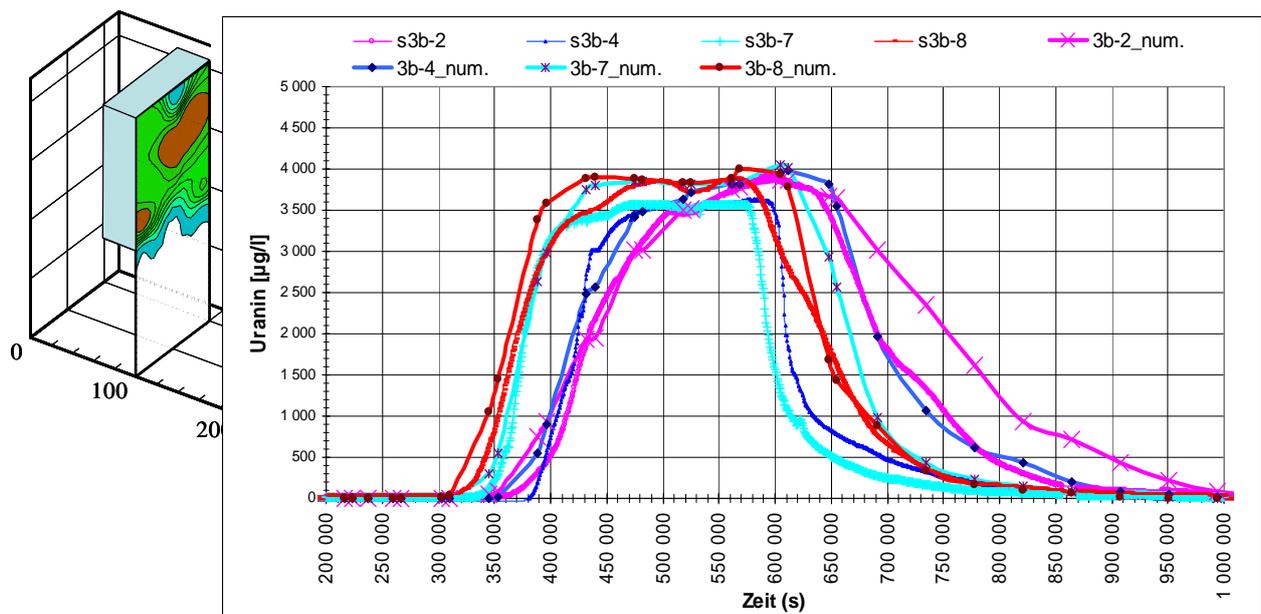
Vom Labor ins Feld: Einmischen reaktiver Stoffe in einen Aquifer mittels Grundwasserzirkulation

7. ÖVA Technologieworkshop
Technologien zur Einbringung und
Verteilung von Stoffen in den Untergrund
Wien, KPC, 05.11.2015

Kos
15

Technischer Maßstab 3-D Untersuchungen

3-D Untersuchungen für GZB - VEGAS „Große Rinne“



Tracerdurchbruch an ME3b - vier Messtellen:
Vergleich Messung – Rechnung

© VEGAS

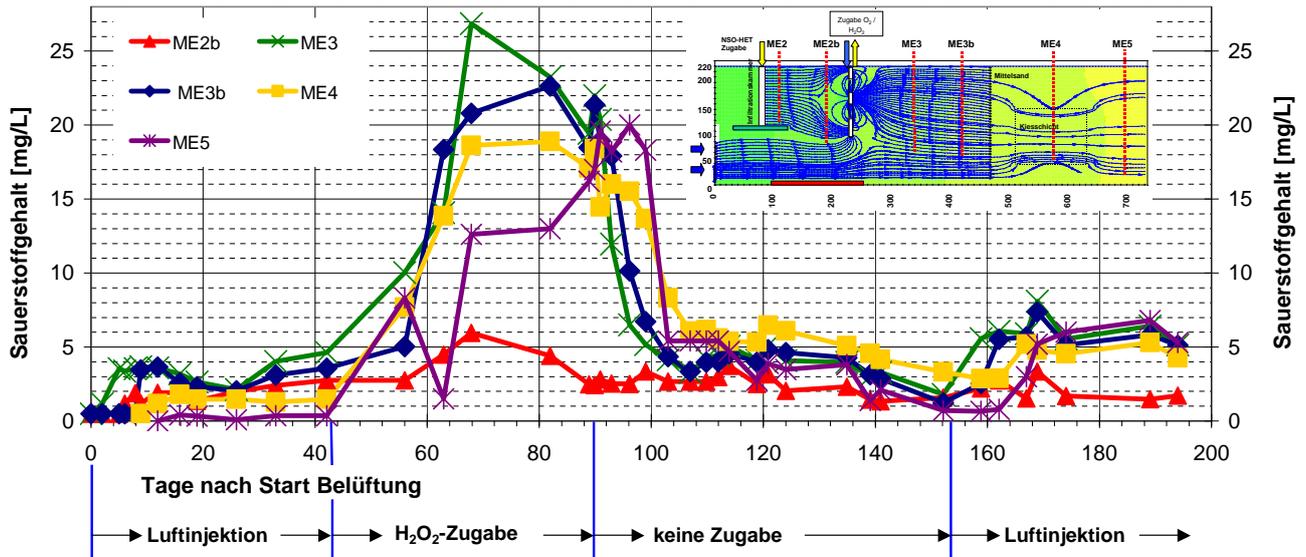


Vom Labor ins Feld: Einmischen reaktiver Stoffe in einen Aquifer mittels Grundwasserzirkulation

7. ÖVA Technologieworkshop
Technologien zur Einbringung und
Verteilung von Stoffen in den Untergrund
Wien, KPC, 05.11.2015

Kos
16

Sauerstoffentwicklung nach H₂O₂ Zugabe in der Großen Rinne



- Zugabe H₂O₂: O₂-Gehalte bis 5 mg/L oberstomig GZB
- Keine Verockerung / Eisenausfällung nachweisbar
- Höhere O₂-Gehalte nach H₂O₂-Zugabe

© VEGAS

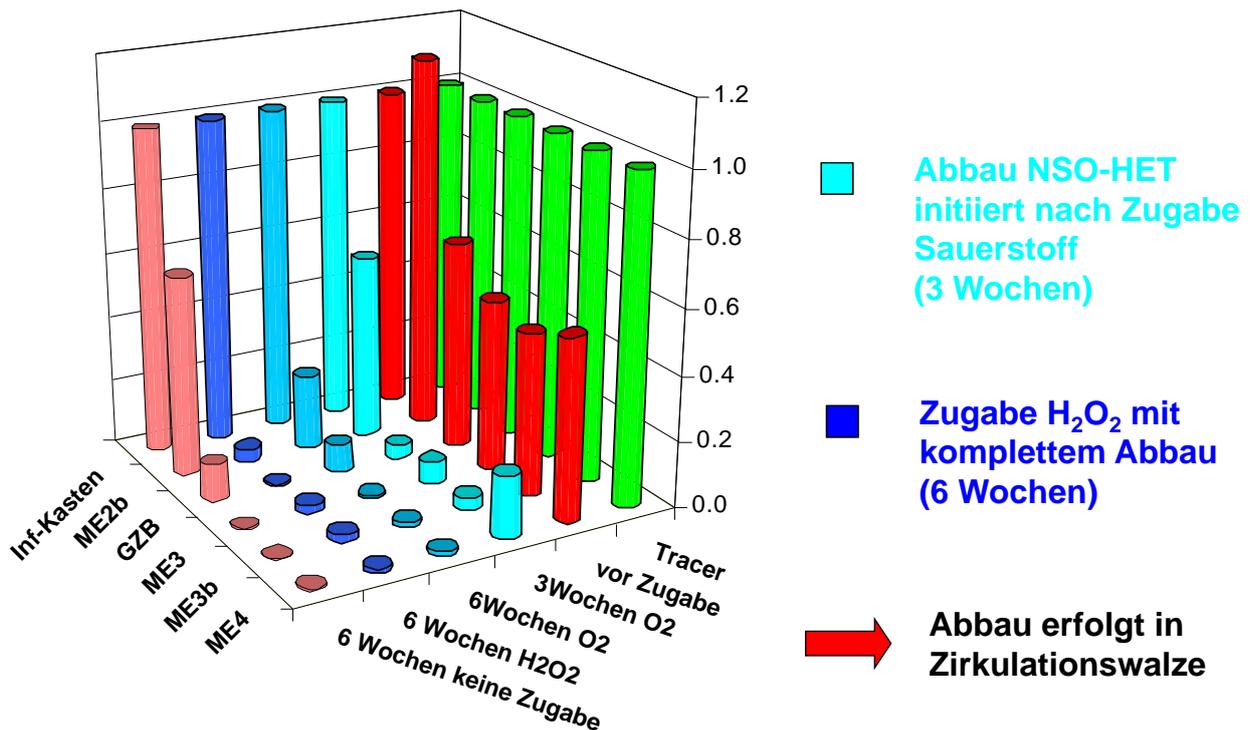


Vom Labor ins Feld: Einmischen reaktiver Stoffe in einen Aquifer mittels Grundwasserzirkulation

7. ÖVA Technologieworkshop
Technologien zur Einbringung und
Verteilung von Stoffen in den Untergrund
Wien, KPC, 05.11.2015

Kos
17

Biologischer Abbau der NSO-HET



© VEGAS



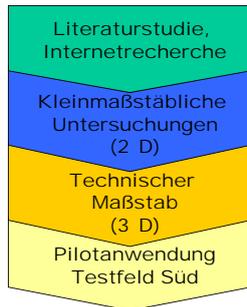
Vom Labor ins Feld: Einmischen reaktiver Stoffe in einen Aquifer mittels Grundwasserzirkulation

7. ÖVA Technologieworkshop
Technologien zur Einbringung und
Verteilung von Stoffen in den Untergrund
Wien, KPC, 05.11.2015

Kos
18

Pilotanwendung Testfeld Süd

Entwicklung eines kostengünstigen, feldtauglichen Zugabe-/Injektionssystems zur Versorgung der Mikroorganismen mit Nährstoffen



Pilotanwendung Testfeld Süd

- Umsetzung einer ENA Maßnahme:
 - ➔ Stimulation des mikrobiologischen Abbaus durch Sauerstoffzugabe über H_2O_2
 - ➔ Nachweis der Anwendbarkeit eines GZB zum gleichmäßigen Eintrag von H_2O_2
 - ➔ deutliche Reduzierung der Schadstofffrachten
- Fünf Versuchsabschnitte (1) bis (5)
 - ➔ (2) Reichweitenbestimmung des GZB über Tracertests

© VEGAS

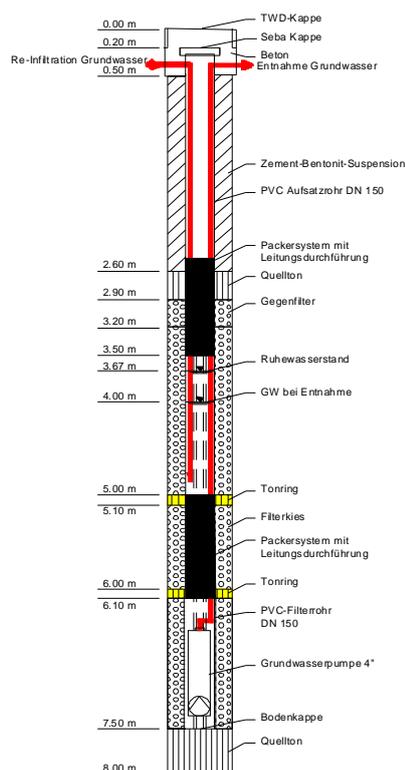


Vom Labor ins Feld: Einmischen reaktiver Stoffe in einen Aquifer mittels Grundwasserzirkulation

7. ÖVA Technologieworkshop
Technologien zur Einbringung und
Verteilung von Stoffen in den Untergrund
Wien, KPC, 05.11.2015

Kos
19

Pilotanwendung Testfeld Süd



GZB Einbau in 6“-Messstelle

- 7,5 – 6,1 m u. GOK: unterer Entnahmefilter mit 4“-Grundwasserpumpe
- 6,1 und 5,0 m u. GOK: Packer
- 5,0 bis 3,5 m u. GOK: oberer Zugabefilter (im ca. 4 m mächtigen quartären Aquifer)
- 3,5 – 2,0 zusätzlicher Packer
- Ausbau der Messstelle mit Tonringdichtungen im Filterkies
- Aus numerischer Berechnungen
 - ➔ Volumenstrom von $10 \text{ m}^3/\text{h}$ für
 - ➔ Erfassungsbreite von ca. 10 m

© VEGAS

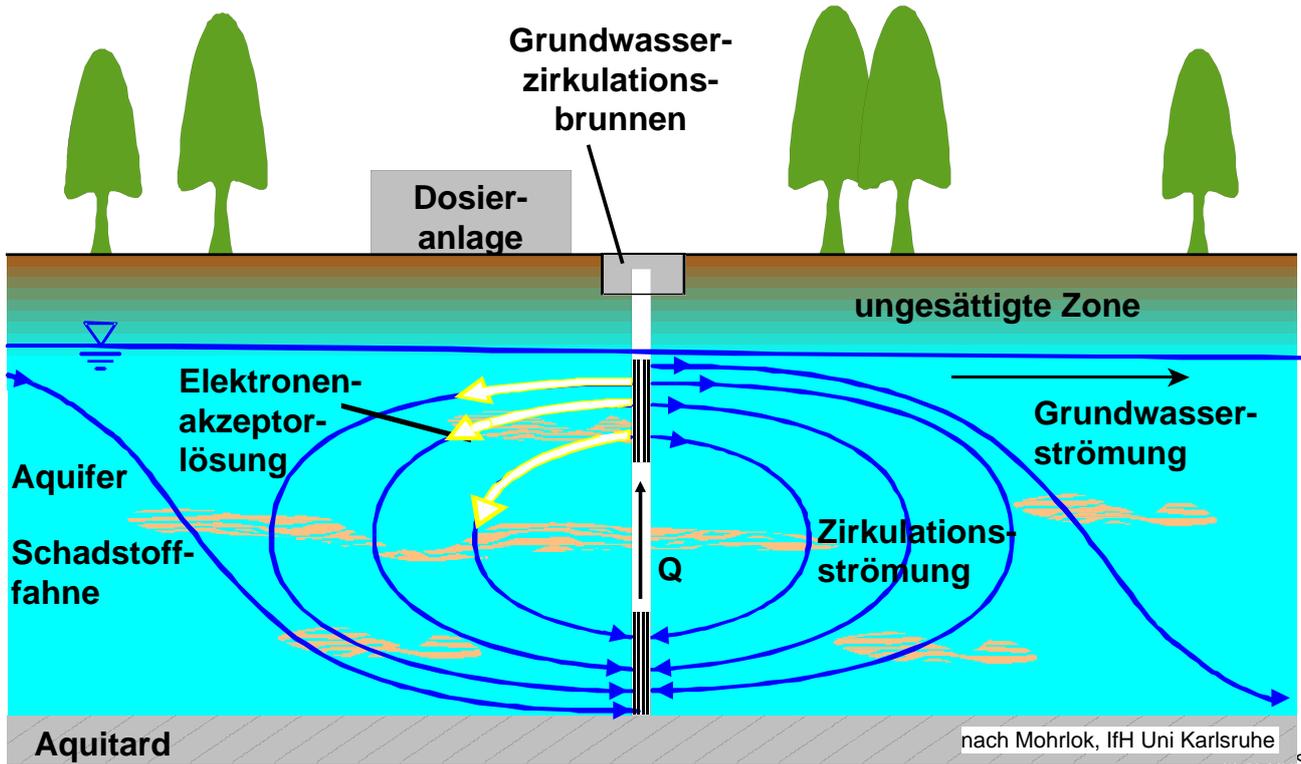


Vom Labor ins Feld: Einmischen reaktiver Stoffe in einen Aquifer mittels Grundwasserzirkulation

7. ÖVA Technologieworkshop
Technologien zur Einbringung und
Verteilung von Stoffen in den Untergrund
Wien, KPC, 05.11.2015

Kos
20

Prinzip Grundwasserzirkulationsbrunnen GZB



nach Mohrlök, IfH Uni Karlsruhe

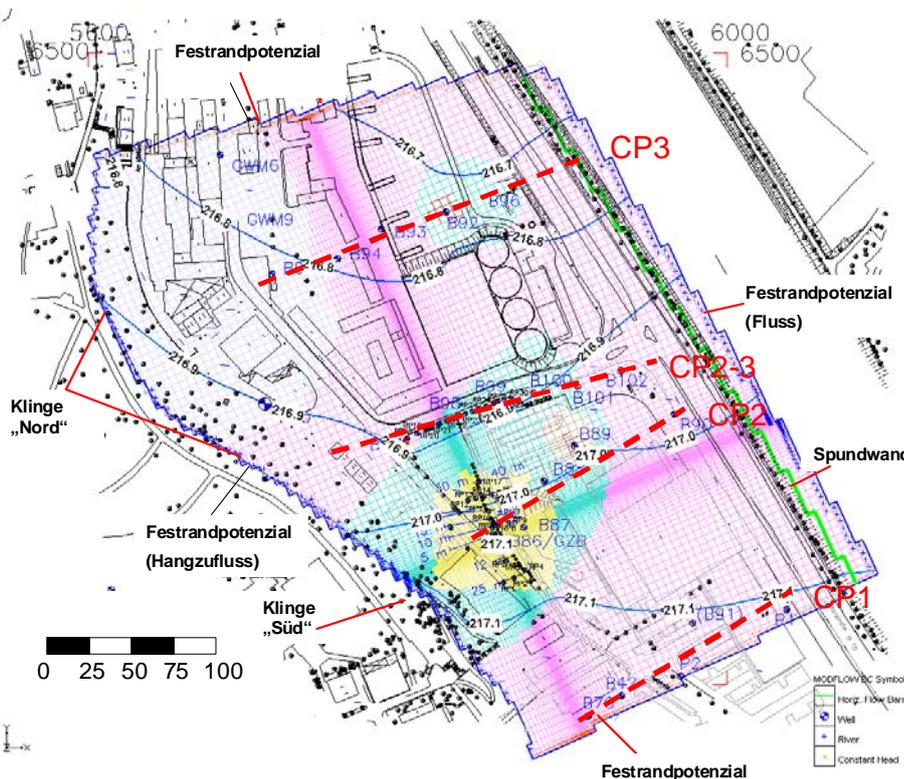


Vom Labor ins Feld: Einmischen reaktiver Stoffe in einen Aquifer mittels Grundwasserzirkulation

7. ÖVA Technologieworkshop
Technologien zur Einbringung und
Verteilung von Stoffen in den Untergrund
Wien, KPC, 05.11.2015

Kos
21

Numerisches Modell: Testfeld Süd



numerisches Modell

(Modflow2000 u. MTD3D: GMS 6.0 ©, Brigham Young University, Utah, USA).

Fläche „numerisches Modellgebiet“

→ ca. 8 ha
(400 x ca. 200 m)

© VEGAS

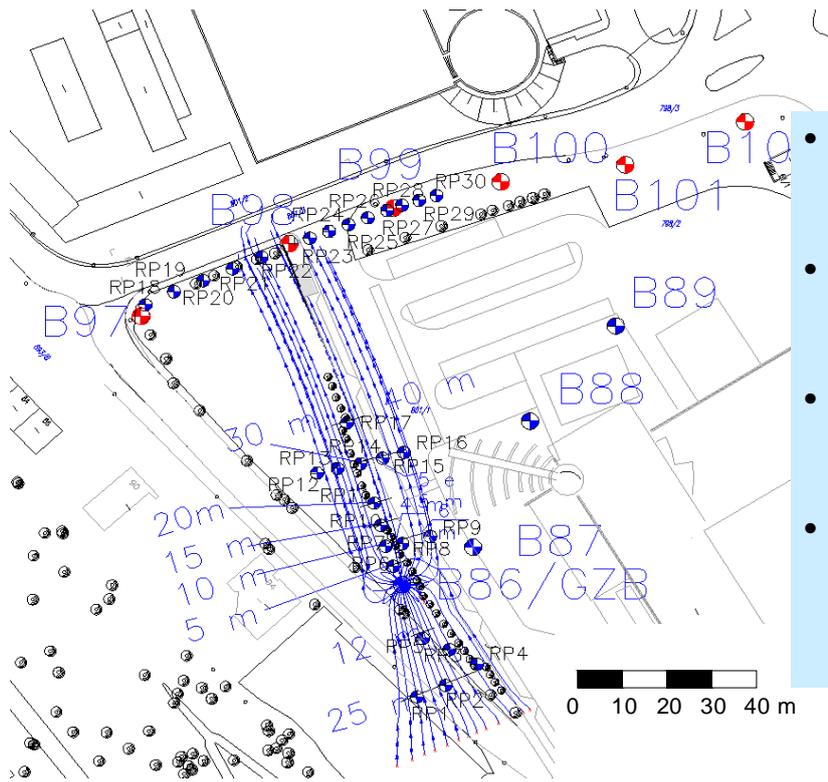


Vom Labor ins Feld: Einmischen reaktiver Stoffe in einen Aquifer mittels Grundwasserzirkulation

7. ÖVA Technologieworkshop
Technologien zur Einbringung und
Verteilung von Stoffen in den Untergrund
Wien, KPC, 05.11.2015

Kos
22

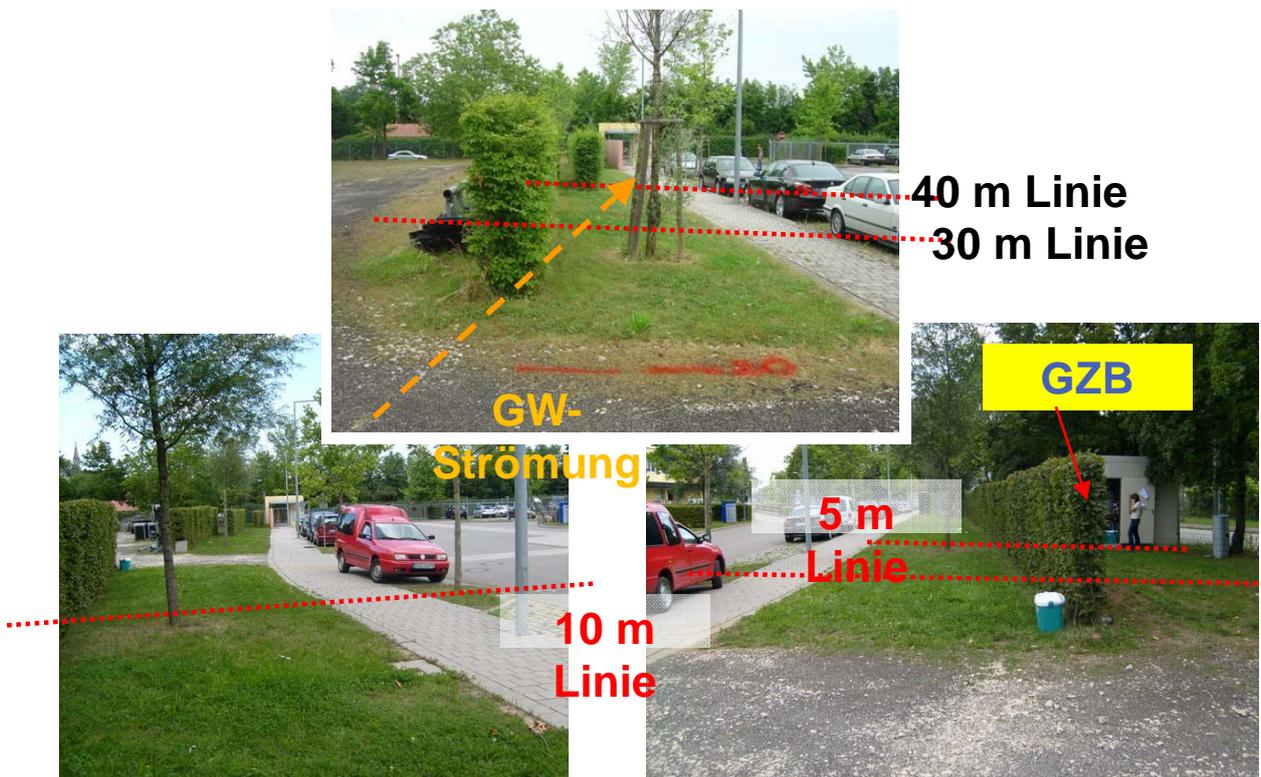
Numerisches Modell: Testfeld Süd



- Berechneter Einzugsbereich GZB bei 10 m³/h
→ ca. 10 m
- Drei Mark.-Versuche
→ Tatsächlicher E-Bereich GZB und GW-S.-Richtung
- Förderrate GZB ca. 4 m³/h
→ Erzielung oberstromige Erfassungsbreite 18 - 20 m
- Diskretisierung der Modellzellen
→ Anpassung und Validierung numerisches Modell

© VEGAS

Testfeld Süd

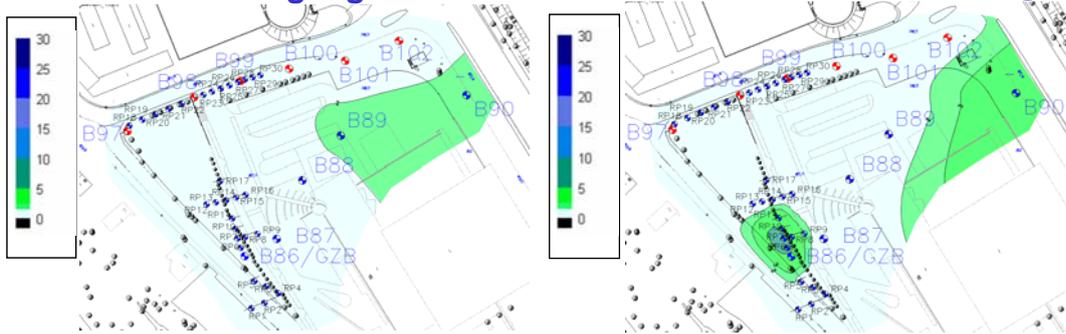


© VEGAS

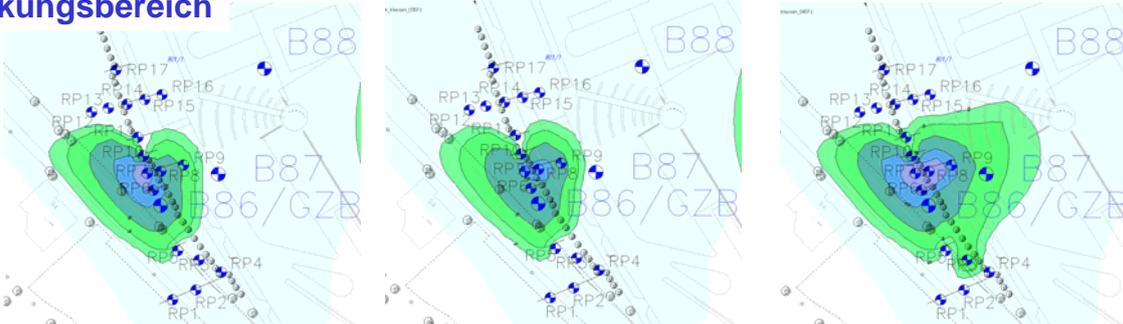
Wirksamkeit H₂O₂: Sauerstoff-Verteilung

Oktober 2006: Ausgangszustand

Dezember 2006: 2 Wochen Zugabe



Wirkungsbereich



Februar 2007: 2 Wo GZB-RP6

März 2007

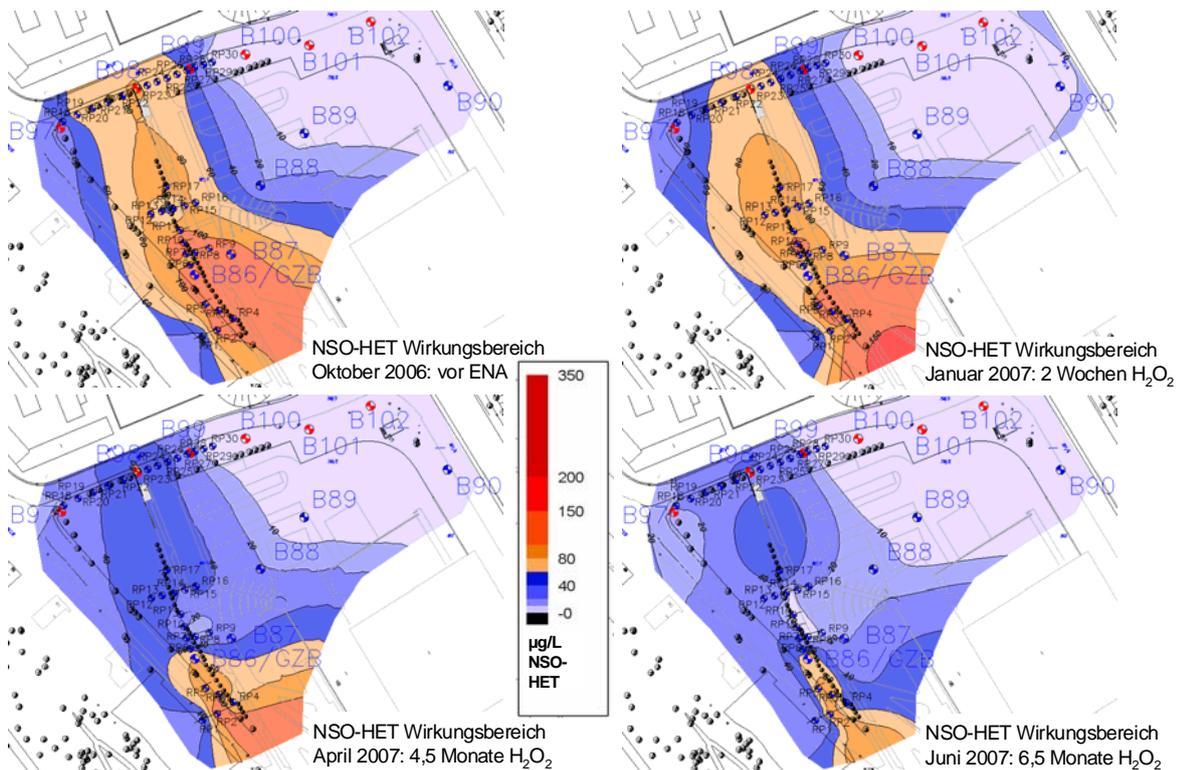
April 2007: 5 Monate Betrieb

VEGAS Vom Labor ins Feld: Einmischen reaktiver Stoffe in einen Aquifer mittels Grundwasserzirkulation

7. ÖVA Technologieworkshop
Technologien zur Einbringung und
Verteilung von Stoffen in den Untergrund
Wien, KPC, 05.11.2015

Kos
25

Entwicklung NSO-HET Konzentrationen bei H₂O₂-Zugabe



© VEGAS

VEGAS Vom Labor ins Feld: Einmischen reaktiver Stoffe in einen Aquifer mittels Grundwasserzirkulation

7. ÖVA Technologieworkshop
Technologien zur Einbringung und
Verteilung von Stoffen in den Untergrund
Wien, KPC, 05.11.2015

Kos
26

Fazit

- **Entwicklung und Installation des Injektionssystems**
 - ➔ Wirkungsweise GZB in 2-D (Küvette) und 3-D (Große Rinne) nachgewiesen und im Dauerbetrieb getestet
 - ➔ Homogener Eintrag von Stoffen nachgewiesen
 - ➔ Keine Verockerung od. Eisenausfällung beobachtet
- **ENA in "Großer Rinne"**
 - ➔ Stimulation der MO mittels Sauerstoffzugabe (über GZB)
 - ➔ vollständiger Abbau der NSO-HET bei H_2O_2 -Zugabe, auch oberstromig GZB
- **Numerische Modellierung des Betriebs GZB**
 - ➔ Entwicklung und Nachweise mit numerischen Modellen begleitet
 - ➔ Modell in "Großer Rinne" validiert
 - ➔ Übertragung auf Feldstandort erfolgreich
 - ➔ Nach Pump- und Tracertest Modell modifiziert zur Auslegung GZB

© VEGAS



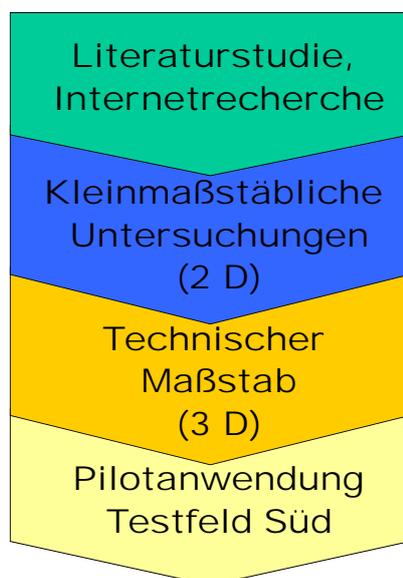
Vom Labor ins Feld: Einmischen reaktiver Stoffe in einen Aquifer mittels Grundwasserzirkulation

7. ÖVA Technologieworkshop
Technologien zur Einbringung und
Verteilung von Stoffen in den Untergrund
Wien, KPC, 05.11.2015

Kos
27

Fazit

Entwicklung eines kostengünstigen, feldtauglichen Zugabe-/Injektions-Systems zur Versorgung der Mikroorganismen mit Nährstoffen



Grundwasserzirkulationssystem

- 👍 aktive, homogene Durchmischung
 - 👍 Auslegung über num. Modellierung
 - 👎 hoher Durchsatz erforderlich
-
- Förderung des aeroben biol. Abbaus
 - Intermittierender Betrieb (O_2 / H_2O_2)
 - Verockerung / Eisenausfällung beachten

© VEGAS



Vom Labor ins Feld: Einmischen reaktiver Stoffe in einen Aquifer mittels Grundwasserzirkulation

7. ÖVA Technologieworkshop
Technologien zur Einbringung und
Verteilung von Stoffen in den Untergrund
Wien, KPC, 05.11.2015

Kos
28

...danke für Ihre Geduld
und Interesse

Fragen ?



koschitzky@iws.uni-stuttgart.de
<http://www.vegas.uni-stuttgart.de>

Dr.-Ing. Hans-Peter Koschitzky
Technischer Leiter VEGAS,
Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und
Altlastensanierung, Universität Stuttgart



Vom Labor ins Feld: Einmischen reaktiver Stoffe
in einen Aquifer mittels Grundwasserzirkulation

7. ÖVA Technologieworkshop
Technologien zur Einbringung und
Verteilung von Stoffen in den Untergrund
Wien, KPC, 05.11.2015

Kos
29