

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

*Hans-Peter Koschitzky & Oliver Trötschler,  
VEGAS, Versuchseinrichtung zur Grundwasser und Altlastensanierung, Universität  
Stuttgart, Deutschland*

### 1. Zielsetzung

Die Auswahl und Optimierung einer Injektions- bzw. Zugabetechnik zur kontinuierlichen, homogenen Einmischung von Elektronenakzeptoren in einen Aquifer ist abhängig von den hydrogeologischen und stoffspezifischen Bedingungen des zu sanierenden Standorts und dem Zugabemedium. Am Beispiel des KORA-Feldstandorts „Testfeld Süd“ im Neckartal in Stuttgart, einer der Modellstandorte des BMBF Förderschwerpunktes KORA (*Kontrollierter natürlicher Rückhalt und Abbau von Schadstoffen bei der Sanierung kontaminierter Grundwässer und Böden, 2004 bis 2008*, <http://www.natural-attenuation.de/>), wird die Auswahl und Erprobung einer zielgerichteten und wirkungsvollen Zugabetechnik aufgezeigt. Ausgehend von ersten Auswahlüberlegungen über kleinskalige Laborversuche und großskalige Technikumsversuche bei VEGAS, beide begleitet von numerischen Simulationsrechnungen, erfolgte abschließend eine Pilotanwendung im Feld zur Sanierung eines Grundwasserschadens.

Aufbauend auf einer Literatur- und Marktstudie zur Vorauswahl der Injektionstechnik, erfolgte die Beurteilung der Techniken in kleinskaligen „Küvettenexperimenten“ (2-D Tracertests) die durch numerische Strömungsberechnungen ergänzt wurden. Hierfür wurde ein dreidimensionales Strömungs- und Transportmodell (MODFLOW, GSM4.0) eingesetzt. Im dritten Schritt wurde die praktische Anwendbarkeit der Injektionstechnik mit dem Betrieb eines Prototyps in einem Langzeitversuch im technischen Maßstab (Aquiferabmessungen mehrere Meter) bei VEGAS getestet. Während des Langzeitversuchs in der „Großen Rinne“ von VEGAS wurde der biologische Abbau von heterozyklischen Kohlenwasserstoffen mit Zugabe von Wasserstoffperoxid stimuliert und der Nachweis der Abbausteigerung unter naturnahen Bedingungen erbracht (ENA). Ein numerisches Modell wurde über Tracertests in der „Großen Rinne“ parametrisiert und diente zur Auslegung einer Pilotanwendung im Feld. Im vierten Schritt erfolgte eine Pilotanwendung am KORA- Standort „Testfeld Süd“.

### 2. Injektions-/ Zugabetechniken

Basierend auf den Ergebnissen einer Literaturstudie kamen für die Standort- und Schadstoffcharakteristik (gut durchlässiger Aquifer, BTEX und NSO Heterozyklen) für eine wirtschaftliche und weitreichende Einmischung einer Nährlösung folgende Injektions-/ Zugabetechniken in Frage:

- Grundwasserzirkulationsbrunnen (GZB) (Patente EU 0418570, EU 0418571): Über abgepackte Filterelemente wird in einem Brunnen auf verschiedenen Teufen Grundwasser gefördert und auf anderen Teufen nach Zugabe von Elektronenakzeptoren (EA) wieder zugegeben. Hierdurch werden Zirkulationsströmungen senkrecht zur Grundwasserfließrichtung aufgebaut und somit die dreidimensionale Vermischung erhöht (Mohrlok et al., 1999).

- Multilevelinjektionsbrunnen (MLB): Über abgepackte Filterelemente können auf verschiedenen Teufen Elektronenakzeptoren zugegeben werden. Im Falle unterschiedlicher Retardationszeiten der EA und der Kontaminanten können durch Wechsel der Zugabetiefen und -zeiten die für den Abbau erforderlichen Kontaktzeiten erzielt werden. Im Gegensatz zum GZB erfolgt im Falle des MLB keine erhöhte Quervermischung.
- Injektion gasförmiger Nährstoffe (Hazen and Looney, 1993): Die Elektronenakzeptoren werden in gasförmiger Form ähnlich dem Bio-Sparging zugegeben. Durch die vergleichsweise hohe Dispersion von Gasen soll eine weitreichende Einmischung der EA erfolgen. Die gasförmige Injektion von Nährstoffen wurde aufgrund der Ergebnisse zum biologischen Abbau von Heterozyklen in diesem Projekt nicht weiter verfolgt.

### 3. 2-D Untersuchungen

Die Injektionstechniken GZB und MLB wurden zunächst in zweidimensionalen Untersuchungen in einer Küvette (kleine 2-D Rinne, einseitig verglast) mit den Maßen: 1,46 m x 0,66 m x 0,08 m verglichen. In der Küvette wurde ein vertikaler Brunnen mit 2 Filterelementen installiert, der als GZB, bzw. als MLB betrieben wurde. Über seitlich eingebaute Filterkammern konnte eine horizontal gerichtete Grundströmung erzeugt werden. Das Bodenmaterial (quartäres Silikat) entsprach der Sandmischung (1-2 mm-Körnung,  $k_f$ -Wert:  $3,5 \times 10^{-3}$  m/s), wie sie bei den nachfolgenden Versuche in der „Großen Rinne“ auf der Technikumsskala vorlagen.

Der direkte Vergleich beider Systeme zeigt eine deutliche Erhöhung der Quervermischung (Querdispersion) durch den GZB. Ein Tracer wird gleichmäßig im Modellaquifer verteilt, während die Tracerausbreitung beim MLB durch die horizontale Ausbreitung entsprechend der Lagerung des Modellaquifers dominiert wird. Das Strömungs- und Transportverhalten konnte in sehr guter Übereinstimmung mit den Experimenten numerisch modelliert werden (siehe Abb. 1 und 2).

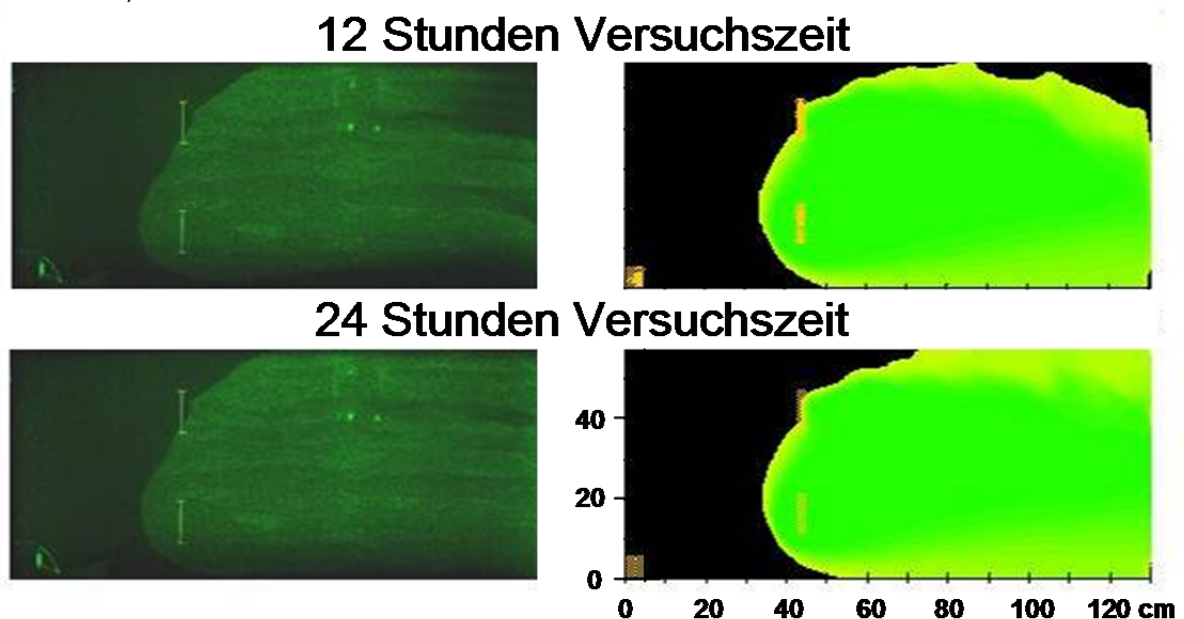


Abb. 1: Vergleich der Stoffausbreitung zwischen Experiment (links) und Numerik (rechts) für einen GZB

## 18 Stunden Versuchszeit

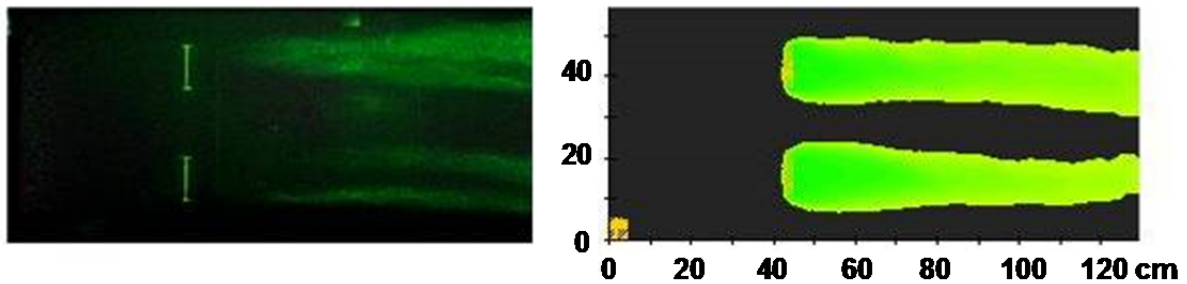


Abb. 2: Vergleich der Stoffausbreitung zwischen Experiment (links) und Numerik (rechts) für einen MLB

### 4. Untersuchungen im Technikumsmaßstab

Da das Grundwasserzirkulationssystem strömungstechnische Vorteile gegenüber der Infiltration an Einzelbrunnen besitzt, wurde im Modellaquifer „Große Rinne“ ein GZB in 3“-Ausführung zur Infiltration der Elektronenakzeptoren installiert (Abb. 3)

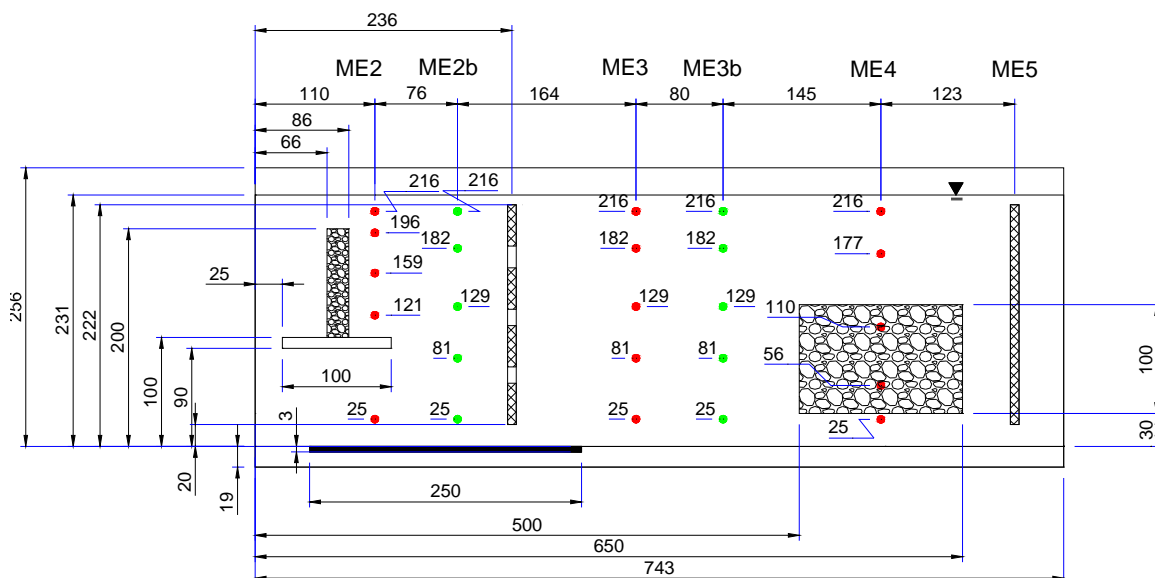


Abb. 3: Schematischer Aufbau der Großen Rinne mit Lage der Messebenen (Maße in cm)

Das „Große Rinne Experiment“ diente dem Nachweis und der Optimierung des aeroben biologischen Abbaus der Heterozyklen. Dieser wurde im Rahmen des KORA Projektes anhand von zahlreichen anderen Untersuchungen, die nicht Gegenstand dieses Vortrags sind, untersucht und nachgewiesen (siehe hierzu Kurzfassung zum NatAtt Symposium 2007 am Ende des Beitrags). Der Modellaquifer (s. Abb. 3 und 4) mit einer Länge von 7,5 m, einer Breite von 1,0 m und einer Höhe von 2,5 m bestand aus Mittelsand, der so homogen als technisch möglich, in der „Großen Rinne“ eingebaut war. Im Rahmen eines bereits vor dem KORA Projekt abgeschlossenen mehrjährigen BMBF-Forschungsprojektes (Finkel et al., 2001) wurde der Aquifer im oberstromigen Drittel mit Teerölen kontaminiert (Eberhardt & Grathwohl, 2002). Durch die Grundwasserströmung wurden aus dieser Teerölkontamination Heterozyklen herausgelöst und führten zu einer abstromigen Grundwasserkontamination. Allerdings waren infolge ihrer guten Wasserlöslichkeit die Heterozyklen nach mehrjährigem Betrieb der Großen Rinne ausgespült. Daher wurde eine neue „Schadstoffquelle“ für die Heterozyklen in die Rinne eingebaut. Über einen Brunnenkasten konnte eine den Standort repräsentierende Lösung von Heterozyklen infiltriert werden. Anaerobes Wasser durch-

strömte den Aquifer mit einer mittleren Fließgeschwindigkeit von 0,45 m/d. Der GZB war unterstromig der Heterozyklenquelle installiert und wurde mit einem Förderverhältnis von 2,5 zwischen Grundströmung und Umwälzrate des GZB betrieben.

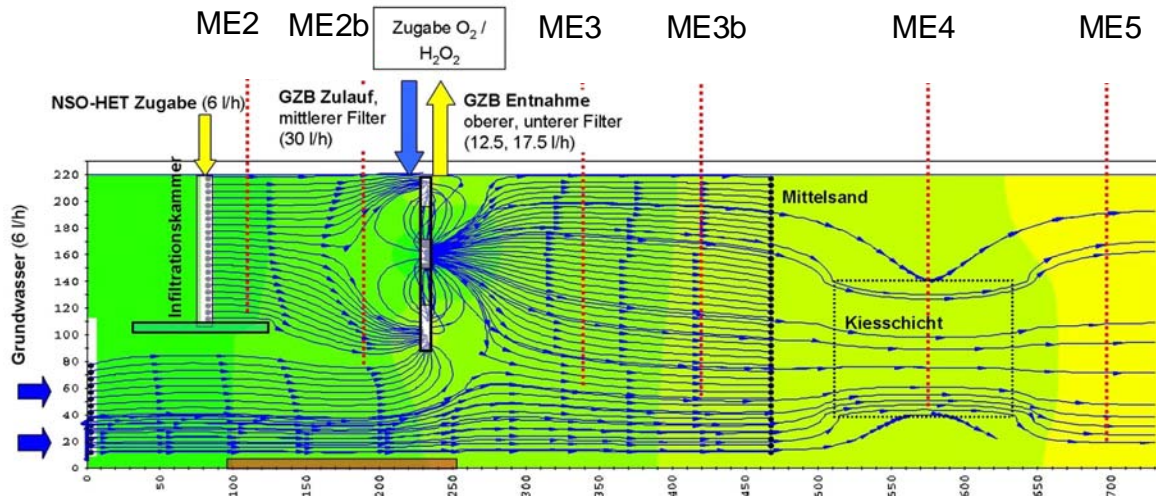


Abb. 4: Versuchsaufbau und Strömungsverhältnisse "Große Rinne"

Nach mehrtägiger Tracerzugabe über den Infiltrationskasten ergab eine Stichtagsmessung an allen 64 Probenahmestellen der Messebenen ME2 bis ME4 eine inhomogene Tracerverteilung oberstromig des GZB und eine homogene Verteilung unterstromig des GZB (Abb. 5).

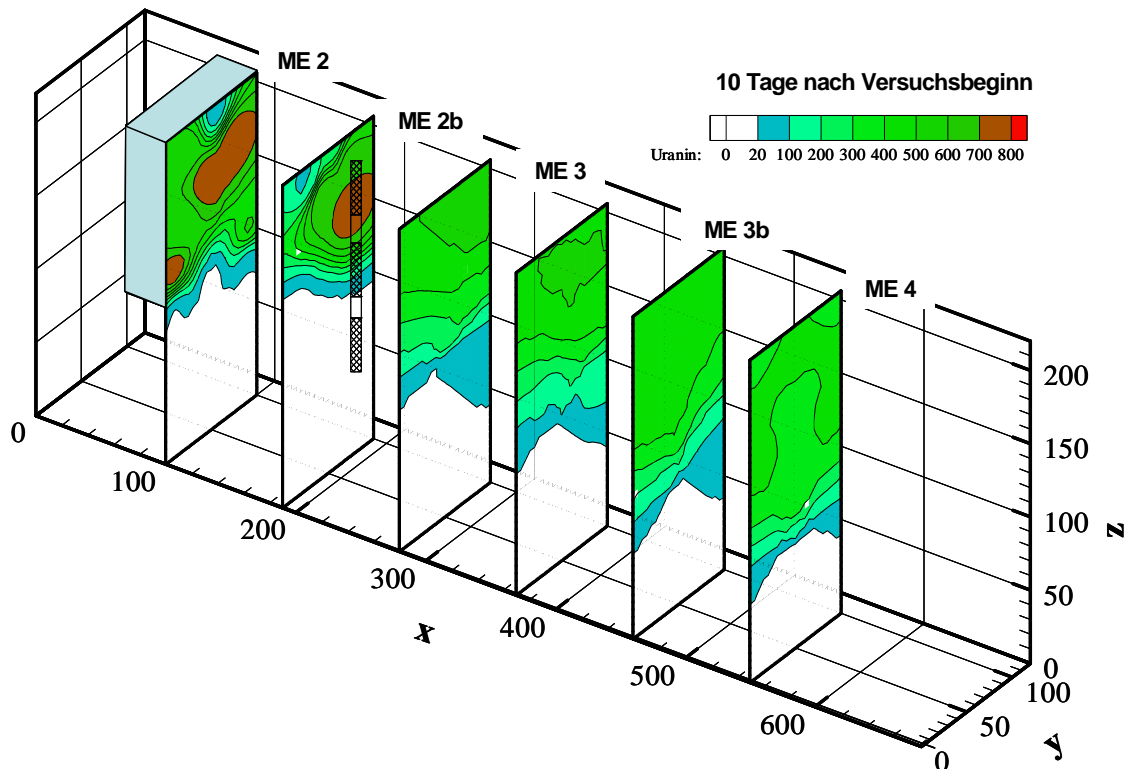


Abb. 5: Tracerverteilung bei Zugabe von Uranin über den Infiltrationskasten

Anhand der gemessenen Durchbruchkurven an den Messebenen ME3 bis ME4 wurden die Parameter für das numerische Modell ermittelt. Die sehr gute Übereinstimmung zwischen numerischem und physikalischem Modell bestätigte den Einsatz des numerischen Modells zur Auslegung der Feldanwendung.

## 5. Pilotanwendung zur In-Situ-Behandlung (ENA) von heterozyklischen Kohlenwasserstoffen durch die Zugabe von Wasserstoffperoxid

### 5.1. Installation des GZB im Testfeld

In der vorhandenen 6"-Messstelle B86 wurde im Sommer 2006 ein GZB im westlichen Bereich der Schadstofffahne installiert und einschließlich der erforderlichen Verfahrenstechnik in Betrieb genommen. Der Grundwasserzirkulationsbrunnen wurde im Testfeld mit einem unten gelegenen Entnahmefilter und einem mittels Packer (Länge ~ 1 m) abgetrennten oberen Zugabefilter im ca. 4 m mächtigen quartären Aquifer installiert (Abb. 6).

Der Packer wurde im Bereich zwischen 5,0 und 6,1 m u. GOK eingebaut. Durch den Ausbau der Messstelle mit Tonringdichtungen im Filterkies entstehen zwei hydraulisch getrennte Filterstrecken. Im Bereich zwischen 6,1 und 7,5 m wurde eine 4"-Grundwasserpumpe zur Entnahme des Wassers installiert. Die Infiltration erfolgte oberhalb des abgepackerten Bereiches zwischen 3,5 und 5 m u. GOK. Oberhalb des verfilterten Brunnenrohrs wurde in B86 ein zusätzlicher Packer im Vollrohr über eine Länge von ca. 1,5 m installiert. Die numerischen Berechnungen sahen einen Volumenstrom von 10 m<sup>3</sup>/h vor, um eine Erfassungsbreite von ca. 10 m zu erzielen.

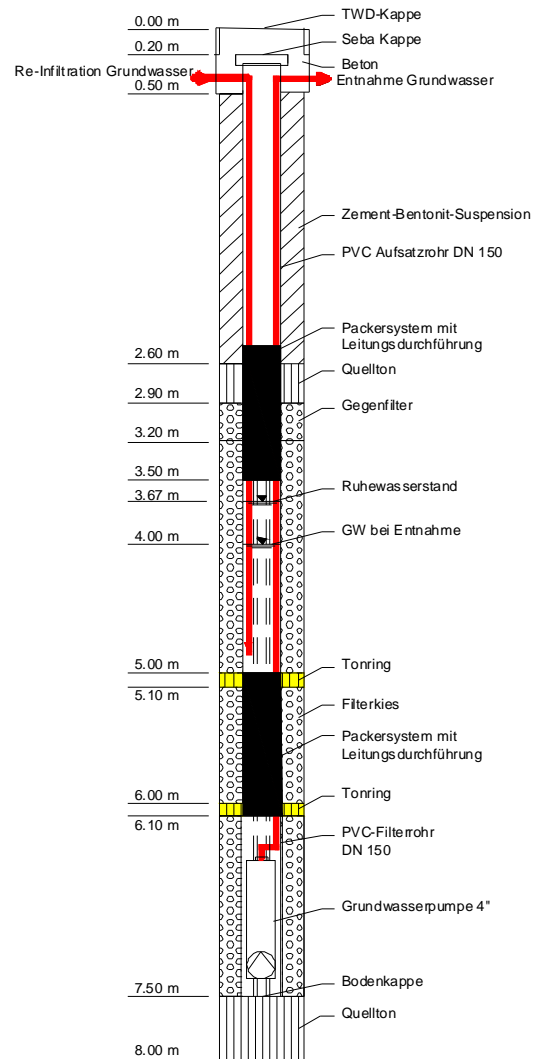


Abb. 6 Querschnittsbild des GZB

### 5.2. Dimensionierung und hydraulische Auslegung des GZB

Die Dimensionierung und hydraulische Auslegung des GZB zur Pilotanwendung auf dem Testfeld Süd erfolgte, analog der Vorgehensweise beim Experiment in der VEGAS-Rinne, über den Aufbau eines kleinräumigen numerischen Modells des Testfelds (Software Modflow2000 u. MTD3D: GMS 6.0 ©, Brigham Young University, Utah, USA). Das „numerische Modellgebiet“ umfasste eine Fläche von ca. 8 ha (400 x ca. 200 m) und ist begrenzt im Westen durch den Talrand des Neckartals, im Osten durch den Neckar, im Norden durch die Kontrollebene CP3 und im Süden durch die Kontrollebene CP1 (Abb. 7).

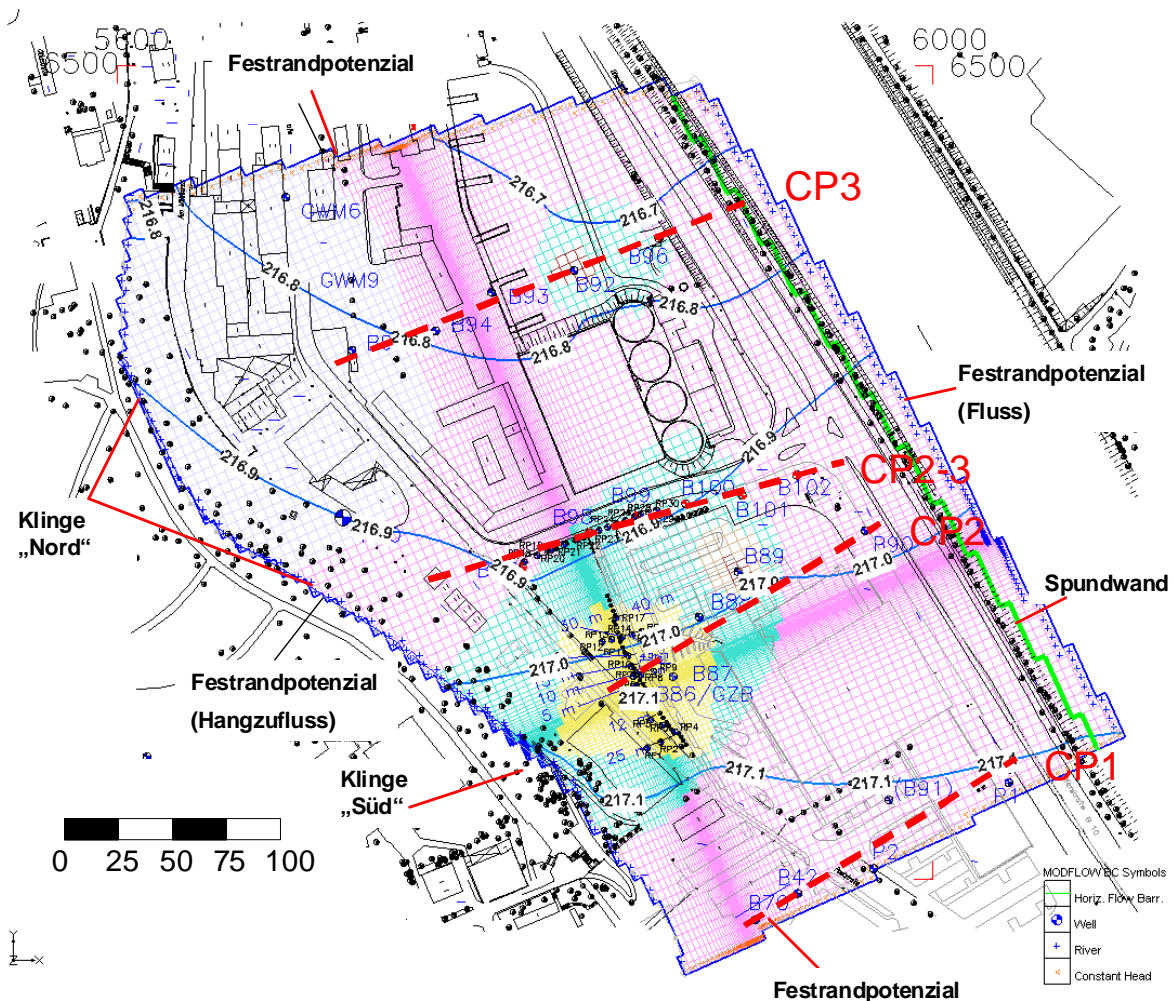
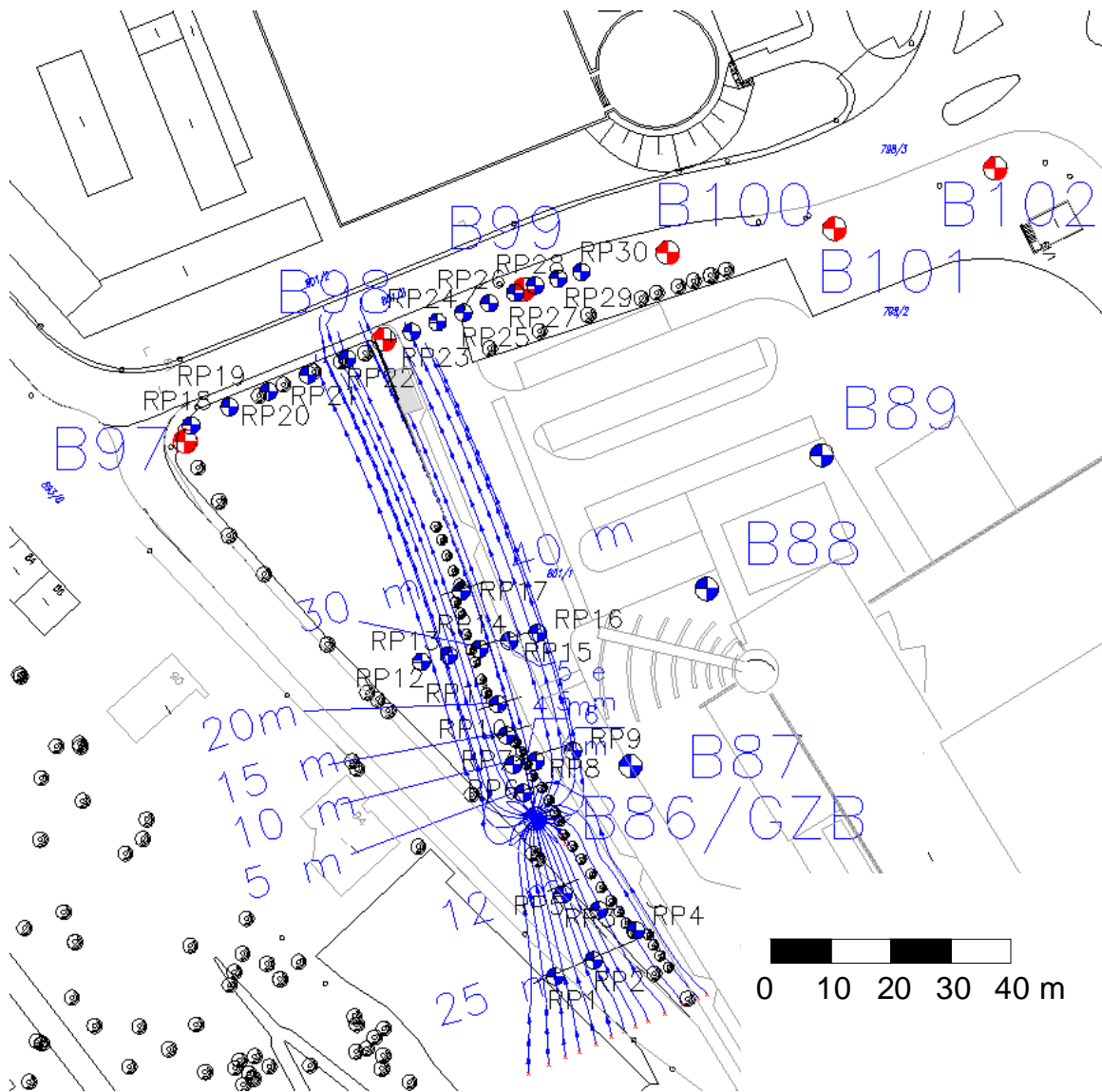


Abb. 7: Aufsicht Numerisches Modell TFS

Der berechnete Einzugsbereich des GZB bei einer Förderrate von 10 m<sup>3</sup>/h (Entnahme im unteren Filterbereich, Zugabe oben) betrug im kalibrierten Modell ca. 10 m. Entlang der simulierten Grundwasserströmungsrichtung wurde die „Centerline“, der Grundwasserpegel (RP) ausgehend vom GZB zur Bestimmung der Wirksamkeit der ENA-Maßnahme errichtet.

Der tatsächliche Einzugsbereich des GZB und die Grundwasserströmungsrichtung konnten im Rahmen von drei Markierungsversuchen mit Zugabe des konservativen Tracers Uranin im oberstromig des GZB gelegenen Pegel (RP2, 3 und 4) bestimmt werden. Die Tracertests dienten der Diskretisierung der Modellzellen im Einzugsbereich des GZB und entlang der Grundwasserhauptströmungsrichtung ausgehend vom GZB. Das kleinräumige numerische Modell wurde somit angepasst und validiert.

Die Tracertests zeigten, dass selbst mit einer Förderrate des GZB von ca. 4 m<sup>3</sup>/h eine oberstromige Erfassungsbreite um 18 - 20 m erzielt wird (Abbildung 8). Das Strömungsmodell wurde entsprechend den Durchbruchzeiten über Veränderung der vertikalen Anisotropie des Aquifers (1 → 6) und der Porosität (0,25 → 0,15) im Bereich von B86 – B87 angepasst.



**Abb. 8: Numerische Simulation des GZB nach Markierungsversuchen**

Das validierte numerische Modell wurde im Verlauf der ENA-Pilotanwendung auf dem Testfeld eingesetzt, um die Auswirkungen von geänderten Betriebsweisen des GZB zu bestimmen. Änderungen der Betriebsweisen waren infolge der Verockerung des Zugabefilterbereichs des GZB und den beobachteten Eisenausfällungen unterstromig des GZB erforderlich geworden.

### **5.3. Pilotanwendung**

Die Pilotanwendung gliederte sich in mehrere Versuchsabschnitte. Begonnen wurde mit der Ermittlung der Schadstofffrachten und der räumlichen Konzentrationsverteilung an NSO-HET und PAK, dann folgten die Schritte:

- (1) Adaption der Standortorganismen an aerobe Verhältnisse: Inbetriebnahme des GZB mit Zugabe von (Luft)sauerstoff in die Zirkulationsströmung (3 Wochen)
- (2) Reichweitenbestimmung des GZB über Tracertests, während der Luftzugabe und dem intermittierendem Betrieb ENA: GZB ohne Dosierung von Elektronenakzeptoren (3 Monate)

- (3) Initialisierung und Steigerung des aeroben biologischen Abbaus: GZB mit hoher Förderleistung und Dosierung von Wasserstoffperoxid (6 Wochen)
- (4) Steigerung und Konstanz des aeroben biologischen Abbaus im hydraulisch kontrollierten Reaktionsraum: Betrieb des GZB mit reduzierter Förderleistung und Dosierung von Wasserstoffperoxid mit zusätzlichem Infiltrationsbrunnen im unterstromigen Bereich der Zirkulationswalze (5 Monate Betrieb)
- (5) abschließende Ermittlung der Schadstofffrachten über Immissionspumpversuche (IPV) und räumliche Konzentrationsverteilung.

Die Auswirkungen der Aerobisierung des Aquifers und des Grundwassers wurde durch Probenahme des Grundwassers im zeitlich engen Raster (2 bis 4-Wochen Rhythmus) an den Messstellen im Nahbereich des GZB (RP1 – RP17) und im weiteren Bereich CP1, CP2, CP2-3, sowie an RP1 – RP30 zwei, vier und sechs Monate nach Beginn der Zugabe von Wasserstoffperoxid überwacht. Beispielhaft ist die Veränderung der NSO-HET Konzentration während der Pilotanwendung in Abbildung 9 dargestellt. Für andere Schadstoffe (z.B. PAK) oder Parameter erfolgten analoge Auswertungen.

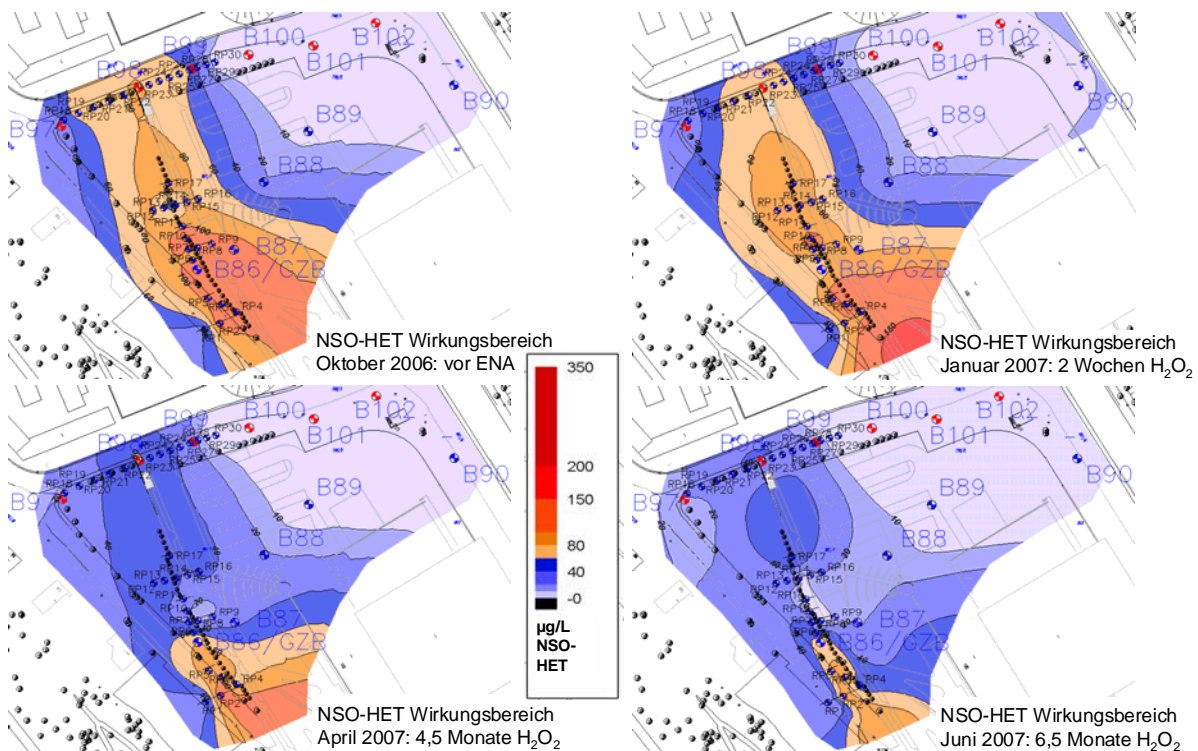


Abb. 9: Entwicklung der NSO-HET Konzentrationen im Wirkungsbereich bei Zugabe  $H_2O_2$

Zur Kontrolle und Verifizierung der ENA-Maßnahme wurde die integrale Erkundung (Frachtbestimmung über IPV) in dem von dem Grundwasserzirkulationsbrunnen erfassten Abstrombereich wiederholt. Durch den Vergleich der Frachtabnahmen zwischen den beiden Teil-Kontrollebenen vor und nach der ENA-Maßnahme ließ sich der Erfolg der ENA überprüfen. Im Untersuchungszeitraum wurden die Schadstofffrachten um mehr als 50% reduziert. Bei Fortführung der ENA-Maßnahme wäre eine weitere Frachtreduzierung zu erwarten gewesen.



#### **5.4. Geplante ENA-Demonstrationsanwendung**

Das aufgebaute Grundwassermodell konnte nach Abschluss der Pilotanwendung zur hydraulischen Auslegung einer ENA-Demonstrationsanwendung und der Planung einer „ENA-Komplettsanierung“ eingesetzt werden. Diese wurde zwar konkret geplant und ausgearbeitet, jedoch dann im Zuge der zu diesem Zeitpunkt noch nicht absehbaren völlig anderen Standortentwicklung durch den Eigner nicht mehr umgesetzt.

#### **6. Fazit**

Im Rahmen des KORA Projektverbunds TV2 erfolgte die Auswahl und Erprobung einer wirkungsvollen Zugabetechnik für die Zugabe von Wasserstoffperoxiden zur Unterstützung (ENA) des In-situ-Bioabbaus von heterozyklischen Kohlenwasserstoffen im Grundwasser. Ausgehend von ersten Auswahlüberlegungen über kleinskalige Laborversuche und großskalige Technikumsversuche bei VEGAS, beide begleitet von numerischen Simulationsrechnungen, erfolgte abschließend eine Pilotanwendung im Feld zur Sanierung eines Grundwasserschadens.

Der am Standort verfolgte ENA-Ansatz konnte über die Kombination der Methoden zur Bestimmung der Schadstofffrachten mittels Immissionspumpversuchen und der Installation von kleinskaligen Rammpegeln zur Überwachung der Wirksamkeit der Maßnahme („Centerline“-Methode), der Steigerung des aeroben biologischen Abbaus von NSO-HET mittels Zugabe von Wasserstoffperoxid und der Methodik zur Auswahl und Umsetzung der effektiven Einmischung von Elektronenakzeptoren (GZB) verwirklicht werden. Das Ziel einer deutlichen und konstanten Reduzierung der Schadstofffrachten konnte im Rahmen der Pilotanwendung am Standort innerhalb von 6 Monaten erreicht werden. Die Schadstoffkonzentrationen im Wirkungsbereich der Pilotanwendung (Fahnenbreite ca. 20 - 30 m) konnten zwischen 55 – 80% reduziert werden.

Problematisch für den Einsatz des GZB bzw. aller Injektionsmethoden von Wasserstoffperoxid (Sauerstoff) ist ein hoher Eisengehalt im Grundwasser. Die einhergehende Verockerung des Filternahbereichs führte zu einem starken Rückgang des infiltrierbaren, mit Wasserstoffperoxid versetzten Grundwassers. Die auf Dauer infiltrierbare Grundwassermenge sank um einen Faktor 5 – 10 ab. Als praktikable Methode zur Steigerung und Aufrechterhaltung der erforderlichen Mindestfördermenge (Erfassungsbereich 12 – 15 m) hat sich die Installation bzw. Nutzung von kleinskaligen Infiltrationsbrunnen im unterstromigen Bereich der Zirkulationswalze des GZB erwiesen.

Der Betrieb des Grundwasserzirkulationsbrunnens war für den untersuchten Bereich des Testfeldes Süd in Folge der unerwartet hohen Eisengehalte im Grundwasser und den hierdurch erforderlichen Wartungsintervallen (2 – 3 mal wöchentlich) personal- und kostenintensiv.

Eine ursprünglich geplanten ENA-Demonstrationsanwendung und ENA-Komplettsanierung des Standorts wurde nach dem Beschluss des Standorteigners die Schadensquelle auszugraben und mittels einer hydraulischen Barriere zu sichern, nicht mehr umgesetzt.

## 7. Literaturhinweise

- Eberhardt, C., Grathwohl, P. (2002): Time scales of organic contaminant dissolution from complex source zones: coal tar pools vs. blobs.- J. Contam. Hydr. 59, 45-66
- Finkel, M., Eberhardt, C., Teutsch, G., Grathwohl, P., Liedl, R., (2001): Langzeitentwicklung der Schadstoffkonzentrationen aus Schadensherden, FKZ 02WT9714/0
- Mohrlök et. al. (1999): Maßstabsübergreifende Experimente zur hydraulischen In-Situ-Grundwassersanierung unter Verwendung von vertikalen Zirkulationsströmungen in VEGAS...die ersten vier Jahre., Stuttgart, Inst. für Wasserbau, 1999, S.106 – 110, ISBN 3-933761-01-8

## Danksagung

Das Verbundprojekt wurde im Rahmen des Förderschwerpunktes ‚KORA‘ vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert, FKZ: 02WN0361 - 02WN0363.

## Ergänzende Hinweise aus dem KORA-Themenverbund TV2: Gaswerke, Kokereien, Teerverarbeitung, (Holz)Imprägnierung:

***Kurzfassung (Poster) zum DECHEMA, 9. Symposium Natural Attenuation, 22.11.2007: ENA zum in-situ Bioabbau von heterozyklischen Kohlenwasserstoffen im Grundwasser, Optimierung der Injektionstechnik zur Zugabe von Elektronenakzeptoren***

O. Trötschler, B. Limburg, H.-P. Koschitzky, VEGAS, Universität Stuttgart  
T. Wendel, P. Grathwohl, ZAG, Universität Tübingen  
A. Sagner, A. Tiehm, TZW Karlsruhe  
T. Ptak, M. Herold, GZG, Universität Göttingen

Heterozyklische Kohlenwasserstoffe (NSO-HET) sind toxische und zum Teil kanzerogene Verbindungen, die bei Teerkontaminationen des Untergrundes im Grundwasser auftreten (z.B. Zamfirescu & Grathwohl, 2001, M. Piepenbrink et al. 2005). Die natürlichen Abbau- und Rückhalteprozesse für eine Elimination der NSO-HET sind nicht ausreichend zur Verringerung der Schadstofffrachten. In Labor- und Technikumsversuchen (Trötschler et al., 2005) wurde ein effektives Verfahren zur Stimulation des aeroben mikrobiellen In-situ-Abbaus entwickelt.

Umfangreiche Batch- und Säulenversuche wurden von Sagner et al. (z.B. Sagner & Tiehm, 2004; Sagner et al., 2005) zur Bioabbaubarkeit von NSO-HET durchgeführt. Das Wachstum der Population der NSO-HET Verwerter von 2- und 3-kernigen NSO-HET während ENA erfolgte über eine adaptierte MPN-Methode.

Im Langzeitversuch in der „Großen Rinne“ von VEGAS konnte der Nachweis für eine effektive biologische aerobe In-Situ-Behandlung (ENA) von heterozyklischen Kohlenwasserstoffen

durch die Zugabe von Wasserstoffperoxid bzw. deren Abbau durch Luft(sauerstoff) über einen Grundwasserzirkulationsbrunnen (GZB) erbracht werden.

In den Ende Juli 2007 abgeschlossenen Arbeiten erfolgte die Umsetzung dieser Methode im Rahmen eines Pilotversuchs an einem ehemaligen Gaswerksstandort mit dem einjährigen Einsatz und Betrieb eines GZB. Über die Dauer von 7 Monate erfolgte die Zugabe von Wasserstoffperoxid. Zur Quantifizierung des Abbaus wurden neben Integralen Pumpversuchen (IPV) klassische Kontrollmessungen an hochauflösenden Kontrollebenen: Rammpegel 1,5“ (Centerline und Wirkungsbereich des GZB) und Grundwassermessstellen (unterstromig des GZB) eingesetzt. Die Ergebnisse der Kontrollmessungen zeigen einen Abbau der NSO-HET zwischen 55 – 80 % und in Folge die Unterschreitung der  $E_{\max}$ -Werte am Standort.

Problematisch für den Einsatz des GZB bzw. aller Injektionsmethoden von Wasserstoffperoxid (Sauerstoff) ist ein hoher Eisengehalt im Grundwasser. Die einhergehende Verockerung des Filternahbereichs führt zu einem starken Rückgang des infiltrierbaren, mit Wasserstoffperoxid versetzten Grundwassers. Die auf Dauer infiltrierbare Grundwassermenge sank im Testfeld um einen Faktor 5 – 10 ab. Als praktikable Methode zur Steigerung und Aufrechterhaltung der erforderlichen Mindestfördermenge (Erfassungsbereich 12 – 15 m) hat sich die Installation bzw. Nutzung von kleinskaligen Infiltrationsbrunnen im unterstromigen Bereich der Zirkulationswalze des GZB erwiesen.

### **Literatur**

- Piepenbrink, M., Krüger, M., Ptak, T., Grathwohl, P. (2005): Natural attenuation of N-S-O heteroaromatic compounds in groundwater: chemical analyses, reactive transport experiments and field studies. in: Groundwater Quality 2004: Bringing Groundwater Quality Research to the Watershed Scale, IAHS Publication 297, 338-345, ISBN 1-901502-18-X.
- Zamfirescu, D., Grathwohl, P. (2001): Occurrence and attenuation of specific organic compounds in the groundwater plume at a former gasworks site. Journal of Contaminant Hydrology 53 (3-4), 407-427.
- Trötschler, O., Haslwimmer, T., Sagner, A., Tiehm, A., Koschitzky, H.-P. (2005): ENA of heterocyclic hydrocarbons by adding hydrogen peroxide in groundwater circulation wells -A field based study on a large physical model scale-. In: Uhlmann, O., Annokée, G., Arendt, F. (Hrsg.) Proceedings (CD) of the 9th international FZK/TNO conference on soil-water systems, Bordeaux, 3-7 Oct. 2005: pp. 1452 – 1462
- Sagner, A., Tiehm, A. (2004): Mikrobieller Abbau von Heterozyklischen Kohlenwasserstoffen: Einfluss der Redoxbedingungen. In: Barczewski et. al. (Hrsg.), VEGAS-Statuskolloquium 2004. Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, Heft 131: 18 – 27 ISSN 0343-1150
- Sagner, A., Tiehm, A., Trötschler, O., Haselwimmer, T., Koschitzky, H.-P. (2005): Enhanced Natural Attenuation zum In-situ-Abbau von heterozyklischen Kohlenwasserstoffen. In: Braun et. al. (Hrsg.), VEGAS-Statuskolloquium 2005. Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, Heft 145: 131 –140 ISSN 0343-1150