



VEGAS – Statuskolloquium 2004

05. Oktober 2004

Ort:

**Universität Stuttgart, Bereich Vaihingen
Ingenieurwissenschaftliches Zentrum IWZ
Pfaffenwaldring 9, Hörsaal V 9.02**

VEGAS - Statuskolloquium 2004

9.00 Eröffnung und Einführung

*Jürgen Heidborn, Ministerium für Bildung und Forschung (BMBF),
Vorsitzender des VEGAS-Beirats
Rainer Helmig, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart*

9.10 Natürlicher Abbau und Rückhalt von Schadstoffen

Sitzungsleiter: Frank-Dieter Kopinke, Umweltforschungszentrum (UFZ) Leipzig-Halle

9.10 Überblick über den BMBF-Förderschwerpunkt KORA

*Jochen Michels, DECHEMA, Frankfurt
Gisela Wachinger, Baldur Barczewski, VEGAS, Universität Stuttgart*

9.30 Enhanced Natural Attenuation zum In-Situ-Abbau von heterozyklischen Kohlenwasserstoffen: Versuche im Labor-, Technikum- und Feld-Maßstab

*Matthias Piepenbrink, Thomas Ptak, Peter Grathwohl,
Zentrum für Angewandte Geowissenschaften (ZAG),
Universität Tübingen
Oliver Trötschler, Thomas Haslwimmer, Hans-Peter
Koschitzky, VEGAS, Universität Stuttgart*

9.50 Mikrobieller Abbau von heterozyklischen Kohlenwasserstoffen: Einfluss der Redoxbedingungen

*Anne Sagner, Andreas Tiehm, Technologiezentrum
Wasser (TZW), Karlsruhe*

10.10 Entscheidungsgrundlagen für die Anwendung von Natural Attenuation am Beispiel *Stürmlinger Sandgrube*

*Baldur Barczewski, Norbert Klaas, Ralf Wege, VEGAS,
Universität Stuttgart
Michael Birkle, Fraunhofer Gesellschaft, Karlsruhe
Andreas Tiehm, Susanne Schulze, TZW, Karlsruhe
Rolf Ebner, Michael C. Birkle, G.M.F. Karlsruhe*

10.30 Kaffeepause

11.00 Innovative Mess-, Erkundungs- und Überwachungsmethoden

*Sitzungsleiter: Rolf Hahn, Landesanstalt für Umweltschutz
Baden-Württemberg (LfU), Karlsruhe*

11.00 DBU-Verbundprojekt *High-Tech-Methoden zur Untergrundsondierung*: Integration von Messtechniken in handgehaltene Rammkernsonden

Johannes Flachowsky, Gast im UFZ Leipzig-Halle

- 11.20 Optimierung der Standorterkundung durch Vor-Ort-Mess-technik: Technische Entwicklungen und Praxisbeispiele**
Martin Müller, Katrin Batereau, Norbert Klaas, Ralf Philippin, Baldur Barczewski, VEGAS, Universität Stuttgart
- 11.40 Referenzstandort VEGAS: Möglichkeiten zur Validierung von Vor-Ort-Messtechniken**
Norbert Klaas, VEGAS, Universität Stuttgart
- 12.00 Bodenprobennahme im Vergleich: Vorgehensweise und Ergebnisse eines Bodenringversuches**
Axel Baermann, Dr. Baermann und Partner, Hamburg
- 12.20** Mittagspause mit Imbiss
- 13.30 In-Situ-Sanierungsverfahren in der Praxis**
Sitzungsleiter: *Rolf Gerhardt, Deutsche Bahn AG*
Dieter Stupp, Dr. Stupp Consulting GmbH
- 13.30 Einsatz von In-Situ-Sanierungsverfahren: Voraussetzungen und Hemmnisse in der Sanierungspraxis**
Thomas Keijzer, Marcus van Zutphen, TAUW, Deventer, Niederlande
- 14.00 Dampf-Luft-Injektion zur In-Situ-Sanierung der gesättigten Bodenzone: Anwendungsmöglichkeiten und Erfahrungen aus einer PCE-Sanierung in Albstadt**
Arne Färber, Holger Class, Ding Jie, Hans-Peter Koschitzky, Claudia Müller, Steffen Ochs, Oliver Trötschler, Universität Stuttgart
Simon Steidinger, Filter- und Wassertechnik (FWS), Dunningen
- 14.30 THERIS: Effizienzsteigerung der Bodenluftabsaugung durch feste Wärmequellen - Entwicklungspotentiale neuer Einsatzbereiche**
Uwe Hiester, Hans-Peter Koschitzky, Arne Färber, VEGAS, Universität Stuttgart
- 14.50 In-Situ-Sanierung von DNAPL-Schäden mittels Mikroemulsionen**
Günter Subklew, Forschungszentrum Jülich
Baldur Barczewski, VEGAS, Universität Stuttgart
Andreas Tiehm, TZW, Karlsruhe
Eberhard Kohlmeier, IBL GmbH, Heidelberg
- 15.10 Alkoholspülung - Bestimmung der Parameter für ein numerisches Modell**
Philipp Greiner, Jürgen Braun, Johannes Schnieders, Hans-Peter Koschitzky, VEGAS, Universität Stuttgart

- 15.30 In-Situ-Grundwassersanierung durch gezielte Alkoholinjektion mittels Grundwasser-Zirkulations-Brunnen (GZB): Ergebnisse aus Laborexperimenten**
Ulf Mohrlock, Klaas Heinrich, Institut für Hydromechanik, Universität Karlsruhe
- 15.50** Kaffeepause
- 16.20 Flächenmanagement**
Sitzungsleiter: *Stefan Gloger, Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg (UVM), Stuttgart*
- 16.20 Sickerwasserprognose: Ermittlung von Schadstoffverfügbarkeit und -freisetzungsraten**
Claus Nitsche, Dietrich Swaboda, Ronald Giese, DGFZ - Dresdener Grundwasserforschungszentrum e.V., Dresden
Sylvia Mackenberg, Norbert Klaas, Baldur Barczewski, VEGAS, Universität Stuttgart
- 16.40 SMART Plan: ein Werkzeug zur Stimulierung des Flächenrecyclings; BMBF-US EPA Kooperation**
Uwe Ferber, Projektgruppe Stadt + Entwicklung, Leipzig
Karolin Weber, Baldur Barczewski, VEGAS, Universität Stuttgart
Kai Steffens, Probiotec, Düren
- 17.00 Flächenrecycling: Kenntnisstand und Erfahrungen in Deutschland**
Volker Schrenk, VEGAS, Universität Stuttgart
- 17.20 Diskussion und Schlusswort**
Baldur Barczewski, VEGAS, Universität Stuttgart
- 17.30 Ende der Veranstaltung**

2 „ENHANCED NATURAL ATTENUATION“ ZUM IN-SITU- ABBAU VON HETEROZYKLISCHEN KOHLENWASSER- STOFFEN: VERSUCHE IM LABOR-, TECHNIKUM- UND FELD-MASSSTAB

M. Piepenbrink, M. Krüger, T. Ptak, P. Grathwohl, ZAG, Universität Tübingen
O. Trötschler, T. Haslwimmer, H.-P. Koschitzky, VEGAS, Universität Stuttgart
e-mail: matthias.piepenbrink@uni-tuebingen.de

Heterozyklische Kohlenwasserstoffe (HET) sind toxische und zum Teil kanzerogene Verbindungen, die bei Teerkontaminationen des Untergrundes im Grundwasser auftreten, aber noch nicht routinemäßig untersucht werden. Die bisherigen Feldbeobachtungen (z.B. Zamfirescu & Grathwohl, 2001) deuten auf eine relative Persistenz bei gleichzeitig hoher Mobilität, so dass lange Schadstofffahnen im Grundwasser entstehen.

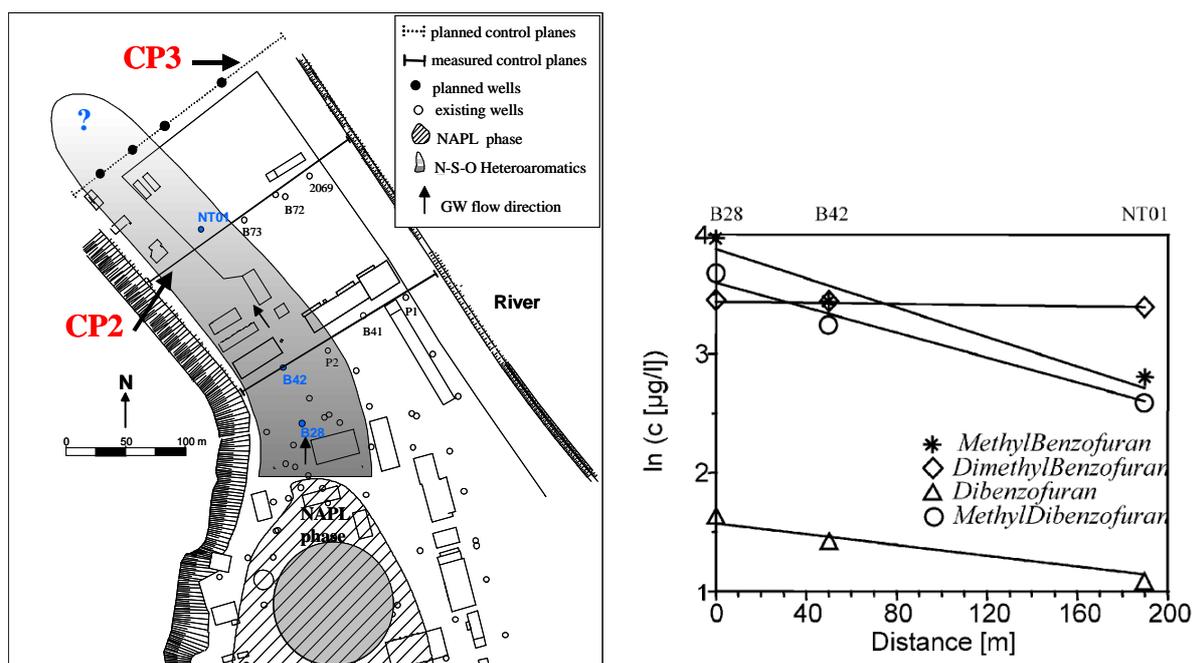


Abb. 2.1: Schadstofffahne im Abstrom des Gaswerksstandorts 'Testfeld Süd' (TFS). Links: die Lage der Schadstofffahne und die Anordnung der 'plume-centerline' (B28, B42, NT01) sowie der Kontrollebenen. Rechts: die Persistenz einzelner Kontaminanten entlang des Fließwegs (aus Zamfirescu & Grathwohl, 2001), insbesondere des zu den HET zählenden Dimethylbenzofurans.

Das Ziel dieses KORA-Verbundprojektes ist es: (a) die bestehenden Analyseverfahren für die heterozyklische Kohlenwasserstoffe zu optimieren, (b) deren Selbstreinigungspotenzial im Feldmaßstab in-situ zu quantifizieren, (c) die gezielte Stimulation des mikrobiellen Abbaus von HET zu untersuchen und (d) parallel dazu Verfahren zu entwickeln, die es erlauben zur Stimulation des Bioabbaus geeignete Lösungen so in den Untergrund zu injizieren, dass eine optimale Vermischung mit der HET-Schadstofffahne gewährleistet wird.

Im Rahmen der ersten Projektphase konnten effiziente Analysenverfahren (LLE bzw. SPE mit anschließender Messung per GC-MS) für heterozyklische Kohlenwasserstoffe entwickelt und implementiert, die Substanzen (H_2O_2) zur gezielten Stimulation des mikrobiellen Abbaus selektiert und die geeigneten Injektionstechniken (Grundwasserzirkulationsbrunnen, GZB) in Küvettenexperimenten, Technikumsversuchen („Große Rinne“) und numerischen Modellen getestet, sowie die HET-Frachten und ihre Änderung mit der Transportrichtung mittels innovativer, integraler Erkundungsverfahren (Immissionspumpversuche, IPV) quantifiziert werden.

Eine Grundvoraussetzung für die erfolgreiche Durchführung der Feldarbeiten war die Optimierung von Labor-Analyseverfahren zur Quantifizierung der am Feldstandort ‚Testfeld-Süd‘ relevanten heterozyklischen Kohlenwasserstoffe (HET). Bereits vor dem eigentlichen Projektstart durchgeführte Arbeiten ergaben, dass ein auf Mikrofestphasen (SPME) basierendes Analysensystem ausgeprägte kinetische und nichtlineare Sorptionseigenschaften zeigt und daher leider nicht wie geplant zur routinemäßigen Quantifizierung der HET eingesetzt werden kann. Ein durchgeführter Vergleich zwischen der Aufbereitung der GW-Proben mittels Festphasenextraktion (SPE) und der Aufbereitung der GW-Proben per Flüssigextraktion (LLE) zeigte die Überlegenheit der SPE insbesondere bei polareren HET (z.B. Acridinon). Somit kam bei sämtlichen durchgeführten Feldarbeiten das nachfolgend beschriebene, optimierte HET-Analyseverfahren zur Untersuchung von Grundwasserproben zum Einsatz: in einem ersten Arbeitsschritt wurde die zu untersuchende (Grund)-Wasserprobe per Festphase, d.h. mit SPE-Säulen (Varian, PPL-Bondelute 100 mg/3 ml) extrahiert. Die nun mit den sorbierten heterozyklischen Kohlenwasserstoffen beladene SPE-Säule wurde durch Durchströmen mit Luft getrocknet und anschließend mit Ethylacetat eluiert. Das Eluat wurde nach der Zugabe des internen Standards (Mirex 5 mg/ml) im Stickstoffstrom eingengt und anschließend zur Messung per GC-MS auf einen Autosampler überführt. Dieser injizierte dann jeweils ein Probenvolumen von 1 μ l in die 30 m lange Trennsäule (J&W Agilent, DB-5MS). Es wurde ein Temperatur-Programm eingesetzt, welches zur Trennung der 26 im TFS identifizierten HET (Anzahl der auftretenden Isomere in Klammern: Benzofuran, Methylbenzofuran (2), Benzo-b-thiophen, Dimethylbenzofuran (5), Iso-Chinolin, Chinolin, Methylbenzo-b-thiophen (4), 2-Methyl-Chinolin, Dibenzofuran, Methylidibenzofuran (3), Xanthen, Dibenzothiophen, Acridin, Carbazol, Phenantridinon und Acridinon) geeignet ist. Die hierbei im Massenspektrometer (HP 5972A) per SCAN-Modus registrierten Flächenwerte konnten durch den Einsatz eines externen Standards aus 17 HET

(Benzofuran, 2-Methylbenzofuran, Benzo-b-thiophen, 2,3-Dimethylbenzofuran, Iso-Chinolin, Chinolin, 2-Methylbenzo-b-thiophen, 5-Methylbenzo-b-thiophen, 3-Methylbenzo-b-thiophen Methyl-Chinolin, Dibenzofuran, Xanthen, Dibenzothiophen, Acridin, Carbazol, Phenanthridinon Acridinon) in die tatsächlichen Substanzmassen überführt werden.

Parallel dazu wurde das Transport/Sorptionsverhalten von 4 ausgewählten heterozyklischen Kohlenwasserstoffen (2-Methyl-Benzofuran, 2,3-Dimethyl-Benzofuran, Benzothiophen und Chinolin) und einem PAK (Acenaphthen) anhand von Batch- und Säulenversuchen untersucht. Entscheidend für die Auswahl war die Relevanz in realen Teeröl-Schadensfällen, welche basierend auf aktuellen Daten aus dem TFS ermittelt wurde. Um einen generellen Überblick über das Verhalten der verschiedenen Gruppen der Heteroaromaten zu bekommen, wurde noch je ein Vertreter der Stickstoff-Heterozyklen und der Schwefel-Heterozyklen ausgewählt. Ergänzend wurden vergleichende Versuche mit Acenaphthen durchgeführt, welches zu den 16 EPA-PAKs zählt und im Gegensatz zu den HET in Routineuntersuchungen bestimmt wird. Innerhalb der polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK) ist Acenaphthen ein gut löslicher und relativ persistenter Stoff, was zur Ausbildung von langen Fahnen im Abstrom von Teeröl-Schadensherden führt.

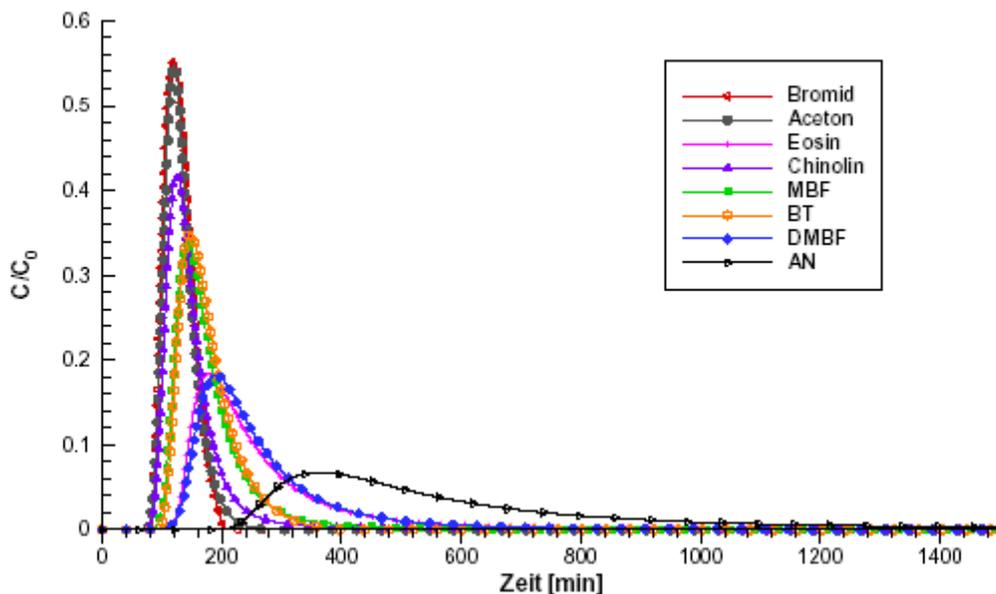


Abb. 2.2: Durchbruchkurven von Bromid, Aceton, Eosin, Chinolin, Methylbenzofuran (MBF), Benzothiophen (BT), Dimethylbenzofuran (DMBF) und Acenaphthen (AN) für die Säule mit einer Materialzusammensetzung analog zum Feldstandort TFS.

Da hier zunächst nur Einzelstoffe untersucht wurden, erfolgte die Quantifizierung per UV- oder Fluoreszenz-Detektion und war daher unabhängig von der zuvor beschriebenen Entwicklung und Optimierung der Analytik für komplexe Feldproben. Für die Säulen-

lenversuche konnte somit ein Aufbau mit ‚online-monitoring‘ der Durchbruchkurven realisiert werden, in welchem nun das Transportverhalten der o.g. 5 Analyten gegenüber konservativen Tracern (Bromid, Eosin, Aceton) bei der Durchströmung von verschiedenen Aquifermaterialien gemessen werden konnte (Abb. 2.2 zeigt ein exemplarisches Beispiel der gemessenen Durchbruchkurven).

Der Schwerpunkt der laufenden Arbeiten liegt in der Quantifizierung des Selbstreinigungspotenzials für heterozyklische Kohlenwasserstoffe in der von einem Gaswerksstandort in Süddeutschland („Testfeld-Süd“, TFS) ausgehenden Schadstofffahne. Hierzu wurden integrale Erkundungsverfahren (Immissionspumpversuche, Ptak & Teutsch, 2000) an zwei definierten, in Grundwasserabstromrichtung hintereinander angeordneten Kontrollquerschnitten (Abstand ca. 200 m) eingesetzt. Nach der Messung von Konzentrations-Zeit-Serien während einer kontrollierten Pumpmaßnahme können mit dieser Methode sowohl die Frachten der am Standort relevanten Kontaminanten (BTEX, PAK, HET) und Elektronenakzeptoren (O₂, NO₃, SO₄ etc.) als auch deren Änderungen mit der Transportrichtung (durch den Vergleich zweier Kontrollebenen in Grundwasserabstromrichtung) bestimmt, sowie die grobe räumliche Verteilung der Schadstofffrachten ermittelt werden. Mittels geeigneter Modellwerkzeuge z.B. SMART (Finkel et al. 1997) oder MT3D-IPD (Liedl & Ptak 2003) erfolgt dann die gezielte Bestimmung der Frachtabnahme durch NA-Prozesse bzw. die Quantifizierung der stoffspezifischen In-Situ Bioabbau-Ratenkonstanten (Konzept siehe Abb. 2.3)

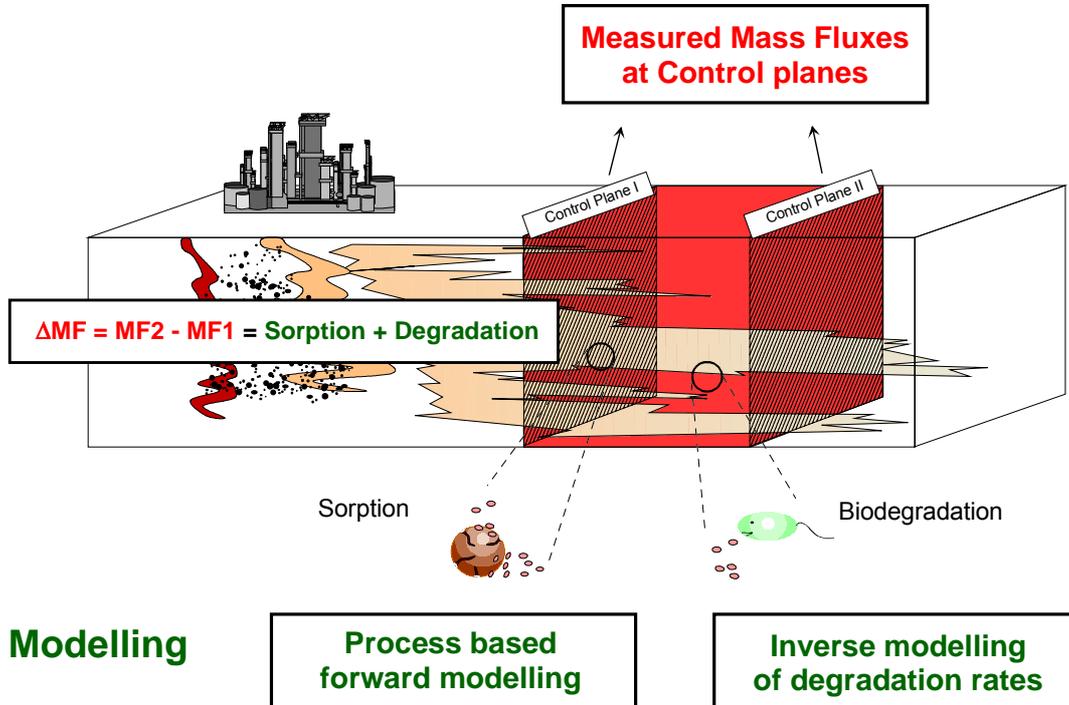


Abb. 2.3: Konzept zur feldmaßstäblichen Quantifizierung von NA-Ratenkonstanten mittels zweier Kontrollebenen

Die Historie des Standorts ‚Testfeld Süd‘, sowie die wichtigsten hydraulischen Kennwerte sind nachfolgend zusammengefasst: Betrieb des Gaswerks von 1875 - 1969.

Primär erfolgte die Stadtgasgewinnung durch Steinkohleentgasung später dann auch durch Gasgewinnung aus Schweröl und leichtem Mineralöl; ab 1969 erfolgte die Umstellung auf Erdgas. Die massive Teeröl-Kontamination des circa 3 m mächtigen, heterogenen, quartären Neckar-Kies-Grundwasserleiters stammt aus den Rohteergruben, sowie aus zahlreichen Leckagen der ehemaligen Produktionsanlagen (Teerdestillation, Benzoldestillation, Gaswäsche etc.). Der durchschnittliche kf-Wert der Neckarkiese beträgt 9×10^{-4} m/s, die mittlere Transportgeschwindigkeit liegt bei 2m/d. Im Schadensherd enthält das festgestellte Schadstoffspektrum alle gaswerkstypischen organischen Verunreinigungen (BTEX, PAK, Heterozyklen). Laut bisherigen Untersuchungen erstreckt sich die distale Schadstoffahne auf ca. 250m Länge und wird von Acenaphthen dominiert (Bockelmann et al. 2001; Zamfirescu & Grathwohl, 2001).

Eine Stichtagsbeprobung (Januar 2001), bei der an sämtlichen vorhandenen Pegeln die Wasserstände sowie die Konzentrationen von PAK, BTEX und heterozyklischen Kohlenwasserstoffen erhoben wurden, ergab, dass die aktuelle Fahnenlänge durch den Rückbau der letzten Kontrollebene (Pegel: NT01, B72, B73, B2069; siehe Abb. 2.1) nur schwer zu beurteilen war, die Ausbreitungsrichtung der Fahne jedoch weitgehend unverändert geblieben ist.

Die Auswahl der Kontrollquerschnitte im weiteren Abstrom und damit die Positionierung und der Bau der neuen Messstellen geschah basierend auf den Ergebnissen der o.g. Stichtagsbeprobung. Die endgültige Lage der neuen Messstellen an den neuen Kontrollebenen CP 2 Ersatz (Messstellen B86, B87, B88, B89 und B90) und CP 3 (Messstellen GWM 11, B95, B94, B93 und B92) ist in Abb. 2.4 dargestellt.

Die ersten Ergebnisse der 2004 durchgeführten Immissionspumpversuche (siehe Abb. 2.4) bestätigen die dominierende Rolle der heterozyklische Kohlenwasserstoffe als signifikante Kontaminanten im distalen Abstrom des untersuchten Gaswerkstandorts, sowie deren vorausgesagten weiträumigen Transport.

Jedoch lassen sich aus den im Labor durchgeführten Abbauversuchen (Teilprojekt unter der Leitung des TZW, Karlsruhe; siehe separater Beitrag A. Sagner & A. Tiehm) unter aeroben Bedingungen und der sich im Feld andeutenden Frachtabnahme an der abstromigen Kontrollebene (CP3, siehe Abb. 2.4) gute Chancen für die nachfolgend ausführlich beschriebene Enhanced-Natural-Attenuation (ENA) - Maßnahme (in Form der Einmischung von H_2O_2 zur gezielten Stimulation des mikrobiellen Abbaus per Grundwasserzirkulationsbrunnen) als kostengünstige Sanierungsalternative ableiten.

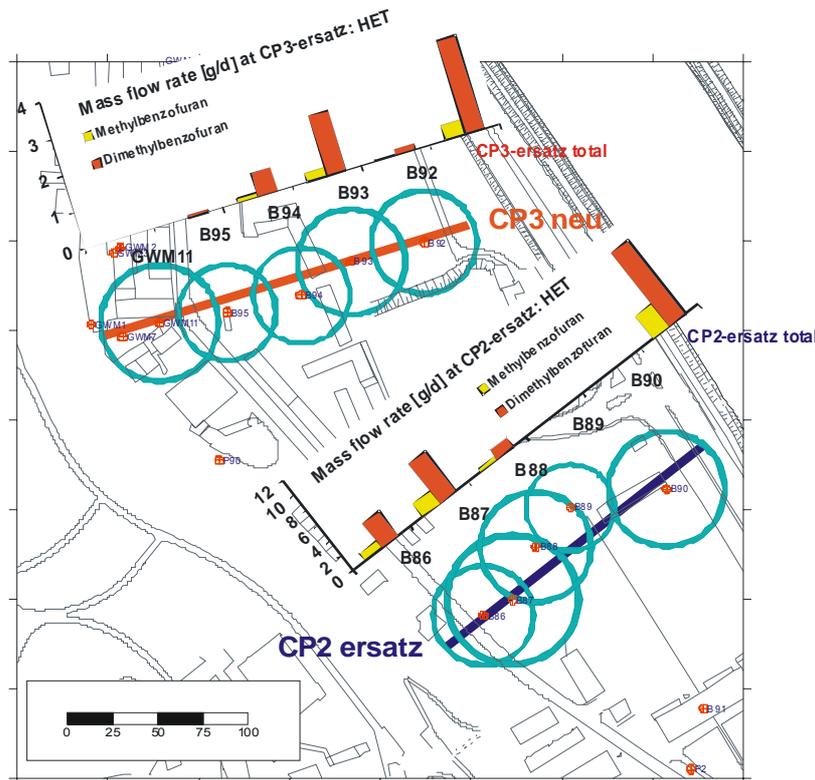


Abb. 2.4: Frachten der dominanten heterozyklischen Kohlenwasserstoffe (Methylbenzofuran und Dimethylbenzofuran) und deren räumliche Verteilung an den Kontrollebenen ‚CP2 ersatz‘ und ‚CP3 neu‘ (vorläufige Auswertung mittels analytischer Lösung, Schwarz, 2002). Die Kreise stellen die maximalen Einzugsgebiete (entsprechend Zylinderformel) der Immissionspumpversuche dar.

Die Auswahl und Optimierung einer Injektionstechnik zur homogenen, weitreichenden Einmischung von Elektronenakzeptoren während einer ENA-Maßnahme basiert auf den hydrogeologischen und stoffspezifischen Bedingungen am Feldstandort „Testfeld Süd“.

Zunächst wurde per Literatur- und Marktstudie eine Vorauswahl der am Standort anwendbaren Injektionstechniken getroffen. Danach erfolgte die Beurteilung der vorausgewählten Techniken in Küvettenexperimenten (2-D Tracertests) hinsichtlich der erzielten homogenen Einmischung von Elektronenakzeptoren. Nach erfolgreicher experimenteller Validierung wurde hierzu auch ein numerisches dreidimensionales Strömungs- und Transportmodell eingesetzt. Im derzeit noch in Bearbeitung befindlichen dritten Schritt wird die praktische Anwendbarkeit der Injektionstechnik unter ökonomischen, strömungstechnischen und werkstoffkundlichen Aspekten mit dem Betrieb eines Prototyps in einem Langzeitversuch im technischen Maßstab getestet. Während des Langzeitversuchs in der „Großen Rinne“ von VEGAS wird der biologische Abbau von heterozyklischen Kohlenwasserstoffen mit Zugabe ausgewählter Elektronenakzeptorlö-

sungen (H_2O_2 , 50 mg/l) stimuliert und der Nachweis der Abbausteigerung unter naturnahen Bedingungen erbracht. Ein über Tracertests in der „Großen Rinne“ parametrisiertes numerisches Modell dient der Auslegung der Pilotanwendung im Feld. Im geplanten vierten Schritt soll im Rahmen eines Folgeprojektes eine Pilotanwendung am Standort „Testfeld Süd“ erfolgen.

Folgende Injektionsverfahren kamen aufgrund der Standort- und Schadstoffcharakteristik grundsätzlich in Frage: (a) Grundwasserzirkulationsbrunnen (GZB) (Patente EU 0418570, EU 0418571), bei denen über abgepackte Filterelemente in einem Brunnen auf verschiedenen Teufen Grundwasser gefördert und auf anderen Teufen nach Zugabe von Elektronenakzeptoren (EA) wieder zugegeben wird. Hierdurch werden Zirkulationsströmungen senkrecht zur Grundwasserfließrichtung aufgebaut und somit die dreidimensionale Vermischung erhöht (Mohrlok et al., 1999). (b) Multilevelinjektionsbrunnen (MLB), bei welchen über abgepackte Filterelemente auf verschiedenen Teufen Elektronenakzeptoren zugegeben werden können. 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. (c) Injektion gasförmiger Nährstoffe (Hazen and Looney, 1993), bei der die Elektronenakzeptoren (EA) in gasförmiger Form ähnlich dem Bio-Sparging zugegeben werden. 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 nicht weiter verfolgt.

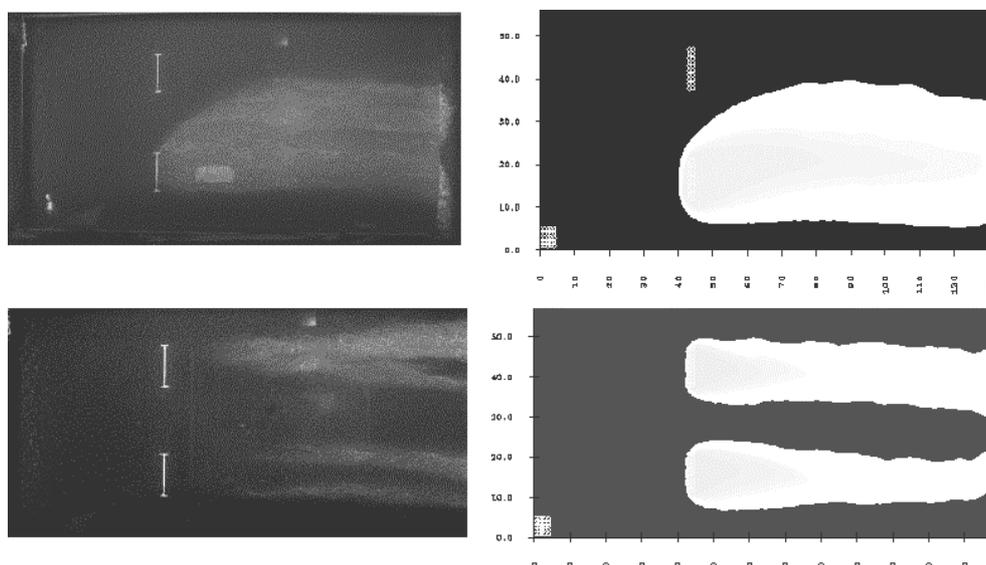


Abb. 2.5: Vergleich der Stoffausbreitung zwischen Experiment (links) und Numerik (rechts) für einen GZB (oben) und MLB

Die Effizienz der Injektionstechniken GZB und MLB wurde in zweidimensionalen Untersuchungen (Abb. 2.5) in einer Küvette (mit Glasfront) mit den Maßen: 1,46 m x 0,66 m x 0,08 m verglichen. In dem Aquifer der Küvette wurde ein vertikaler Brunnen mit 2 Filterelementen installiert, der als GZB, bzw. als MLB betrieben wurde. Über seitlich ein-

gebaute Filterkammern kann eine horizontal gerichtete Grundströmung erzeugt werden. Das Bodenmaterial entspricht der Sandmischung (1-2 mm-Körnung, kf-Wert: $3,5 \times 10^{-3}$ m/s) in der „Großen Rinne“, einem quartären Quarz-Sand.

Der direkte Vergleich des GZB (Grundwasserentnahme am oberen und Zugabe am unteren Filter: Abb. 2.5, oben links) mit dem MLB (Zugabe oben und unten: Abb. 2.5, unten links) zeigt bei gleichen Pumpraten die Erhöhung der Querdispersion durch den GZB. Der Tracer wird gleichmäßig im Modellaquifer verteilt, während die Trace-
rausbreitung beim MLB durch die horizontale Ausbreitung entsprechend der Lagerung des Modellaquifers dominiert wird. Die Spreizung der Tracerwolke erfolgt lediglich durch die anstehende Querdispersion. Für eine Feldanwendung bedeutet dies enge Brunnenabstände.

Infolge der sehr guten Übereinstimmung zwischen Experiment und numerischer Modellierung (Abb. 2.5: GZB oben links, MLB unten links) kann eine hydraulische Auslegung der Injektionstechnik mit numerischen Modellen entsprechend den hydrogeologischen Bedingungen am Standort erfolgen.

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.

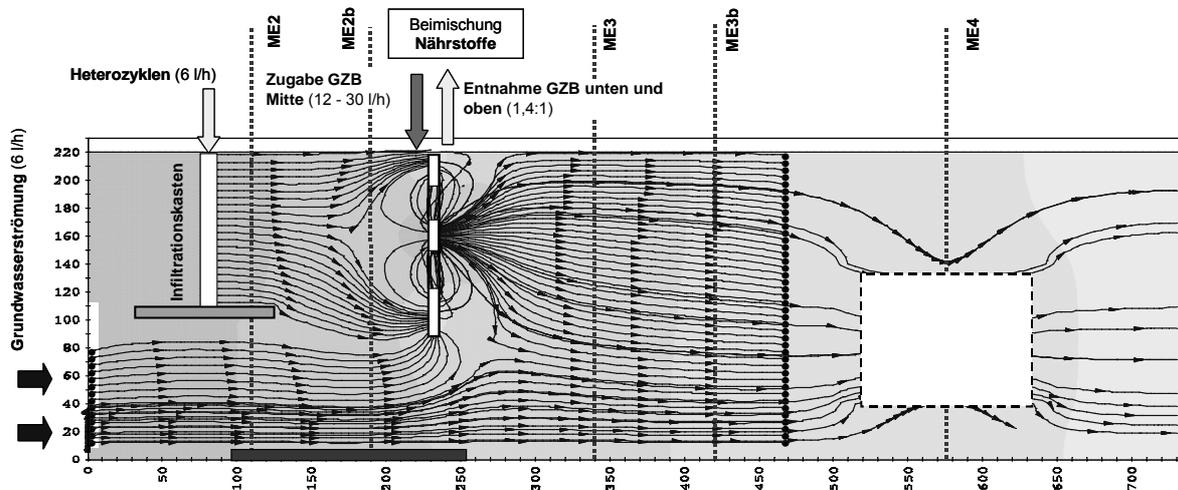


Abb. 2.6: Versuchsaufbau und Strömungsverhältnisse "Große Rinne"

Das „Große Rinne Experiment“ dient dem Nachweis und der Optimierung des aeroben biologischen Abbaus der Heterozyklen. Ein Modellaquifer (s. Abb. 2.6) mit einer Länge von 7,5 m, einer Breite von 1,0 m und einer Höhe von 2,5 m ist mit einem Mittelsand (s. 2-D Untersuchungen) befüllt. Im Rahmen eines abgeschlossenen BMBF-Forschungsprojektes (Finkel et al., 2001) wurde der Aquifer im oberstromigen Drittel mit Teerölen kontaminiert (Eberhardt & Grathwohl, 2002). Die Heterozyklen aus diesen Teerölen sind infolge ihrer guten Wasserlöslichkeit nach mehrjährigem Betrieb ausgespült. Daher wurde eine neue „Schadstoffquelle“ in die Rinne eingebaut. Über einen verfilterten Brunnenkasten kann eine für den Standort repräsentative Lösung von Hete-

rozyklen infiltriert werden. Anaerobes Wasser durchströmt den Aquifer mit einer mittleren Fließgeschwindigkeit von 0,45 m/d. Der GZB ist abstromig der Heterozyklenquelle installiert und wird mit einem Förderverhältnis von 2,5 zwischen Grundströmung und Umwälzrate des GZB betrieben.

Nach 10 Tagen Tracerzugabe (Uranin) über den Infiltrationskasten ergab eine Stichtagsmessung an allen 64 Probenahmestellen der Messebenen ME2 bis ME4 eine inhomogene Tracerverteilung oberstromig des GZB und eine vergleichsweise homogene Verteilung unterstromig des GZB (Abb. 2.7).

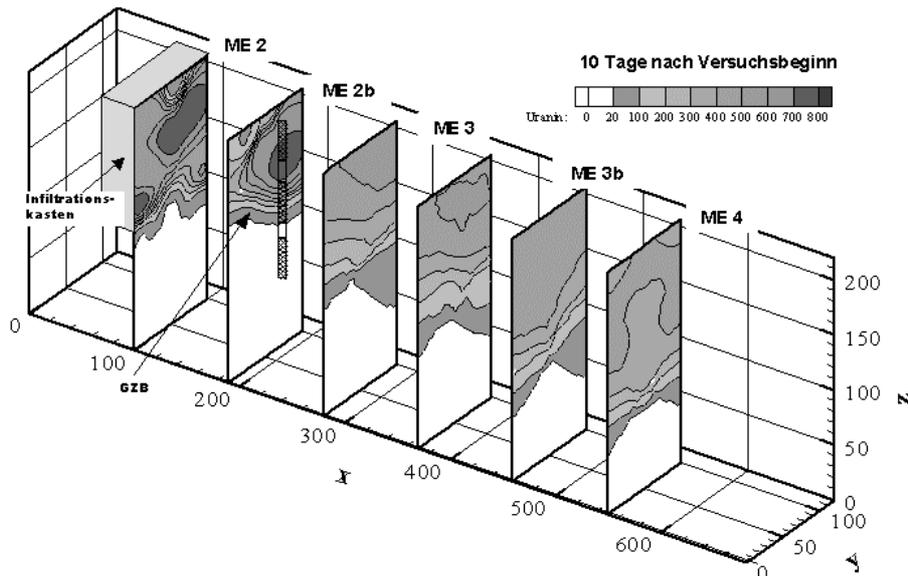


Abb. 2.7: Tracerverteilung bei Zugabe von Uranin über den Infiltrationskasten

Anhand der gemessenen Durchbruchkurven an den Messebenen ME3 bis ME4 wurden die Parameter für das numerische Modell ermittelt. Der Vergleich der gemessenen mit den numerisch berechneten Durchbruchkurven des Tracers zeigt eine sehr gute Übereinstimmung und bestätigt den Einsatz numerischer Modelle zur Auslegung der Feldanwendung.

Das robuste in der Sanierungspraxis bewährte System der Grundwasserzirkulation soll in der zweiten Projektphase (ENA-Pilotanwendung) zur Infiltration einer Elektronenakzeptorlösung (z. B. 50 mg/l Wasserstoffperoxid) am Feldstandort „Testfeld Süd“ eingesetzt werden. Weiterhin sind ergänzende Arbeiten (Erkundung und Modellierung) zur Vertiefung und Absicherung der bisherigen Ergebnisse geplant.

2.1 Literatur

Bockelmann, A., Ptak, T. and Teutsch, G. (2001): An analytical quantification of mass fluxes and natural attenuation rate constants at a former gasworks site. *J. Contam. Hydrol.*, 53(3-4), 429-453.

- 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
- Finkel, M., Liedl, R. and Teutsch, G. (1997): Modelling coupled reactive transport of PAH and surfactants. In: McDonald, A.D. and McAleer, M. (eds.): MODSIM97, International Congress on Modelling and Simulation, Proceedings, Vol. 2:566-571.
- Hazen and Looney (1993): In situ Bioremediation using Horizontal Wells, DOE Demonstration Site Program, WSRC, www.gnet.org/archive/4655.html
- Liedl, R. und Ptak, T. (2003): „Modelling of diffusion-limited retardation of contaminants in hydraulically and lithologically non-uniform aquifers”, J. Contam. Hydrol., 66(3-4), 239-259.
- Mohrlok 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
- Ptak, T. and Teutsch, G. (2000): “Development and application of an integral investigation method for the characterization of groundwater contamination”, in: Contaminated Soil 2000, Thomas Telford, London, ISBN 0 7277 2954 3, 198-205.
- Schwarz, R. (2002): Grundwasser-Gefährdungsabschätzung durch durch Emissions- und Immisionsmessungen an Deponien und Altlasten. Dissertation, Lehrstuhl für angewandte Geologie der Universität Tübingen, 100 S.
- 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.

Dieses Verbundprojekt wird im Rahmen des Förderschwerpunktes ‚KORA‘ vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert, Förderkennzeichen: 02WN0361, 02WN0362, 02WN0363.