

Mit Unterstützung durch



# 4. ÖVA Technologieworkshop

## "Permeable / Reaktive Wände"

**am: 27. und 28. März 2014**

**Ort: Linz, Promenade 39**

***Mit Unterstützung durch:***

***AIT Austrian Institute of Technology GmbH***

***Umweltbundesamt (Österreich)***

## Vorwort

Um dem in Österreich über die Umweltqualitätsziele (2005) und das im "Leitbild Altlastenmanagement" (2009) definierte, langfristige Ziel der Bewältigung der Altlastenproblematik in Österreich bis 2050 näherzukommen, ist es notwendig auch die Anwendungspotenziale neuer bzw. innovativer Sanierungstechnologien umfassend auszuschöpfen. Internationale Beispiele bestätigen, dass diese Technologien einen wichtigen Beitrag zur kosten- und leistungseffizienten Sanierung von kontaminierten Standorten und der Schonung natürlicher Ressourcen liefern können.

Um den Einsatz und die Akzeptanz innovativer Sanierungstechnologien zu unterstützen hat sich der ÖVA zum Ziel gemacht, ausgewählte Technologien, welche bis dato in Österreich nur sehr untergeordnet in Anwendung sind, in einer Reihe von ÖVA-Technologiewerkshops vorzustellen. Jeder Workshop gibt einen Überblick über eine ausgewählte Schlüsseltechnologie und hat seinen Schwerpunkt auf der Vorstellung und Diskussion ausgewählter Anwendungen aus der österreichischen und internationalen Praxis.

Workshops zum Thema "Air Sparging", "Thermisch unterstützte In-Situ Verfahren" oder "In-situ-Aerobisierung" fanden in den letzten Jahren statt. Der jetzige 4. Technologieworkshop widmet sich dem Thema „Passive / Reaktive Wände“, zu dem wir Sie herzlichst einladen.

## **PROGRAMM**

### **27. März – 13:00 bis 18:30**

#### **Einführung**

- 13:00 -13:05 **Begrüßung**  
Präsident des ÖVA  
(REICHENAUER Thomas, AIT Austrian Institute of Technology, Tulln)
- 13:05 -13:15 **Begrüßung**  
Land Oberösterreich  
(LANTSCHBAUER Wolfgang, Amt der OÖ Landesregierung, Abt. Umweltschutz)
- 13:15 – 13:45 **Durchströmte Reinigungswände zur Grundwassersanierung – Ergebnisse des BMBF-Forschungsverbundes RUBIN (2000 – 2012)**  
(BIRKE Volker - Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften, Suderburg)
- 13:45 – 14:05 **Rechtliche Rahmenbedingungen für die Anwendung**  
(MÜLLER-GRABHERR Dietmar – Umweltbundesamt GmbH, Wien)

#### **Block 1: Funnel and Gate – Fallstudie Sicherung der Kokerei Linz**

- 14:05 – 14:25 **Das Gesamtsicherungskonzept – Fallbeispiel Kokerei Linz**  
(ANGERMAYER Christoph – voestalpine Stahl GmbH, Linz)
- 14:25 – 14:50 **Technische Auslegung und erste Ergebnisse – Fallbeispiel Kokerei Linz**  
(HIRSCH Günter / GNJEZDA Gregor – voestalpine Stahl GmbH, Linz / SV-Büro für Boden + Wasser GmbH, Gallneukirchen)
- 14:50 – 15:15 **Diskussion**
- 15:15 **Abfahrt Exkursion Altlast O76 „Kokerei Linz“ (Rückkehr ca. 18:30)**  
(HIRSCH Günter - voestalpine Stahl GmbH, Linz)

*Ab 19:00 abendliches Treffen im Gasthaus „Alte Welt“, Hauptplatz 4, Linz*

### **28. März – 9:00 bis 12:30**

#### **Block 2: Reaktive Wand – Fallstudie Sicherung der ehemaligen Teerfabrik Lang in Offenbach**

- 09:00 – 09:25 **Rahmenbedingungen zur Sicherung & Bauliche Umsetzung**  
(WEINGRAN Christian, HIM-ASG)
- 09:25 – 09:50 **Voruntersuchungen, Technische Auslegung & Anlauf-Phase**  
(MÜLLER Axel – DVGW-Technologiezentrum Wasser – TZW)
- 09:50 – 10:15 **Betriebserfahrungen**  
(BARTELSEN Tobias – CDM Smith Consult GmbH, Alsbach)
- 10:15 – 10:30 **Diskussion**

**10:30 – 11:00 Kaffeepause**

**Block 3: Langzeiterfahrungen und Ausblick für Österreich**

- 11:00 -11:25     **Funnel-and-Gate Gaswerk München – 10 Jahre Betriebserfahrung**  
(WEINDL Jörg – bfm Umwelt GmbH, München)
- 11:25 – 11:50     **15 Jahre Funnel and Gate "Brunn am Gebirge" – Langzeiterfahrungen**  
(NIEDERBACHER Peter, ZT Büro Dr. Peter Niederbacher, Klosterneuburg)
- 11:50 – 12:15     **Forschungsvorhaben HALOCRETE**  
(FREITAG Peter – Keller Grundbau, Wien)
- 12:15 – 12:40     **Potenzial und Voraussetzungen für die Anwendung von Passiven / Reaktiven  
Wänden in Österreich**  
(DÖRRIE Timo – Umweltbundesamt, Wien)
- 12:40 – 13:00     **Abschlussdiskussion**

***Ende der Veranstaltung***

---

**Organisatorisches**

**Kostenbeitrag Tagung:**     Euro 45,-

**Anmeldung unter:**         [office@altlastenmanagement.at](mailto:office@altlastenmanagement.at)

Bitte bei der Anmeldung angeben:

- Ich nehme an der Exkursion teil und reserviere \_\_\_ Busplätze.
- Ich/Wir nehmen mit \_\_\_ Personen am abendlichen Treffen teil.

**Veranstaltungsort:**         Promenade 39 (nach dem Eingang links)

**Hotels in der Nähe:**         **Austria Classic Hotel Wolfinger** (drei Stern)  
Hauptplatz 19, A-4020 Linz  
Tel.: [0043 732 7732910](tel:00437327732910)  
Email: [office@hotelwolfinger.at](mailto:office@hotelwolfinger.at)

**Hotel Zum Schwarzen Bären** (vier Stern)  
[Herrenstraße 11 4020 Linz](http://HerrenstraÙe11.4020Linz)  
0732 7724770, [linz-hotel.com](http://linz-hotel.com)

**Hotel Mühlviertlerhof** (drei Stern)  
Graben 26, 4020 Linz, Österreich  
Tel.: +43 (732) 77 22 68 0  
E-Mail: [office@hotel-muehlviertlerhof.at](mailto:office@hotel-muehlviertlerhof.at)  
WWW: <http://www.hotel-muehlviertlerhof.at>

## ***Inhalt***

1. Durchströmte Reinigungswände – Ergebnisse des BMBF-Forschungsverbundes RUBIN (2000 – 2012).....	6
Dr. Volker Birke, Prof. Dipl.-Ing. Harald Burmeier, Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften, Campus Suderburg .....	6
2. Potenziale und Voraussetzungen für die Anwendung von Passiven / Reaktiven Wänden in Österreich.....	27
Timo Dörrie, Dietmar Müller-Grabherr (Umweltbundesamt, Wien).....	27
3. Das Gesamtsicherungskonzept – Fallbeispiel Kokerei Linz.....	37
Christoph Angermayer, voestalpine Stahl GmbH, Linz.....	37
4. Technische Auslegung und erste Ergebnisse – Fallbeispiel Kokerei Linz –.....	44
HIRSCH Günter / GNJEZDA Gregor – voestalpine Stahl GmbH, Linz / SV-Büro für Boden + Wasser GmbH, Gallneukirchen.....	44
5. Reaktive Wand – Fallstudie Sicherung der ehemaligen Teerfabrik Lang in Offenbach ..	55
Christian Weingran (HIM-ASG), Deutschland; Axel Müller (TZW), Deutschland; Andreas Tiehm (TZW), Deutschland; Tobias Bartelsen (CDM Smith), Deutschland .....	55
6. Funnel-and Gate Gaswerk München – 10 Jahre Betriebserfahrung .....	70
Jörg Weindl, Siri Romboy, BFM Umwelt GmbH Beratung-Forschung-Management, München .....	70
7. 15 Jahre Funnel and Gate "Brunn am Gebirge" – Langzeiterfahrungen .....	77
Niederbacher Peter, Österreich.....	77
8. Forschungsvorhaben Halocrete .....	81
Peter Freitag, Österreich .....	81

## 1. Durchströmte Reinigungswände – Ergebnisse des BMBF-Forschungsverbundes RUBIN (2000 – 2012)

*Dr. Volker Birke, Prof. Dipl.-Ing. Harald Burmeier, Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften, Campus Suderburg*

### Einleitung

Durchströmte Reinigungswände oder Reaktive Wände, international als „Permeable Reactive Barriers“ (PRB) bekannt, bieten gegenüber herkömmlichen aktiven Sanierungsverfahren deutliche Vorteile. Die Behandlung des kontaminierten Grundwassers vollzieht sich unterirdisch und erfordert keine oder nur geringe Energiezufuhr. Die Sanierung schränkt die Nutzung des Standorts nicht oder nur geringfügig ein.

Vor allem bei langen Betriebszeiten sind Reinigungswände dem konventionellen Abpumpen des kontaminierten Grundwassers und der anschließenden Behandlung in einer Anlage vor Ort (Pump & Treat) finanziell überlegen. Voraussetzung ist die langfristige Funktionsfähigkeit. Die prinzipielle Machbarkeit und Wirksamkeit stand auch international außer Frage. Die vergleichsweise jungen Technologien boten gute Perspektiven, aber kaum Erkenntnisse zum Langzeitverhalten und damit zur Wirtschaftlichkeit. Ihrem Einsatz stand die fehlende Kosten- und Planungssicherheit entgegen.

Im Mai 2000 initiierte das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) den Forschungsverbund RUBIN (Reaktionswände und -barrieren im Netzwerkverbund). Ziele waren Nachweis und Bewertung von Eignung und Leistungsfähigkeit des innovativen Verfahrens und die Ermittlung der Einsatzfelder.

Der Verbund RUBIN ist im Zusammenhang mit zwei weiteren Förderschwerpunkten zu sehen, mit denen das BMBF die Bedeutung der Forschung und Entwicklung im Bereich der passiven Grundwassersanierung unterstrich. KORA („Kontrollierter natürlicher Rückhalt und Abbau von Schadstoffen bei der Sanierung kontaminierter Grundwässer und Böden“) prüfte von 2002 bis 2008 die Wirksamkeit der biologischen Reinigungsprozesse vor Ort, um das natürliche Potenzial besser auszuschöpfen. Die Untersuchungen bezogen sich auf 24 branchentypisch belastete Referenzstandorte, die wertvolle Informationen zur sinnvollen Sanierung einer Vielzahl vergleichbarer Schadensfälle boten. SAFIRA fasst die „Sanierungsforschung in regional kontaminierten Grundwasseraquiferen“ zusammen. Seit 1999 betreibt das Umweltforschungszentrum Leipzig die gleichnamige Großversuchseinrichtung in Bitterfeld, die der Erprobung neuer passiver In-situ-Methoden zur Behandlung komplexer Schadstoffgemische im Grundwasser dient. Projektträger des BMBF war das Karlsruher Institut für Technologie (KIT, PTKA-WTE). Die fachliche Koordination oblag der Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften in Suderburg. Das Handbuch zur „Anwendung von durchströmten Reinigungswänden zur Sanierung von Altlasten“ wurde in 2006 veröffentlicht. Das Grundlagenwerk dokumentiert die Projekterfahrungen und liefert parallel dazu einen Leitfaden für Planung, Entwicklung, Genehmigung, Bau, Betrieb und Überwachung von Reinigungswänden in Deutschland. Die

Veröffentlichung des Handbuchs setzte einen besonderen Akzent und beschloss die erste Forschungsphase. Die Untersuchungen im Labor und im Feld hatten neben zuverlässigen Eignungsnachweisen auch abweichende Befunde und zusätzlichen Forschungsbedarf mit hoher Praxisrelevanz erbracht. Um die Ursachen für Einschränkungen der Wirksamkeit zu klären und die Wirkungsbeziehungen der komplexen Systeme nachzuvollziehen, wurden weitergehende Untersuchungen in einer zweiten Phase durchgeführt. Bereits realisierte und geplante Reinigungswände boten die erforderlichen Bedingungen, um die prinzipiell bewährten Systeme an den Anforderungen der Praxis zu messen.

### **Stand des Wissens und der Technik**

Reinigungswände gehören zu den passiven Sanierungsverfahren. Die Sanierung wird direkt im Untergrund (in situ) im kontaminierten Grundwasserleiter durchgeführt. Das schadstoffbelastete Grundwasser bewegt sich ohne Fremdeinfluss durch die Reinigungswand. Die reaktive Zone sorbiert die Schadstoffe oder baut sie ab. Das Prinzip funktioniert ohne die Zufuhr von Energie.

Die wichtigsten Vorteile von Reinigungswänden sind:

- geringe Betriebskosten,
- uneingeschränkte Standortnutzung,
- keine Schadstoffemissionen in die Atmosphäre,
- keine Grundwasserentnahme,
- weitgehend ungestörte Grundwasserströmungsverhältnisse.

Durchströmte Reinigungswände sind zwischenzeitlich eine weltweit etablierte Technologie zur In-situ-Sanierung von kontaminierten Grundwässern. Die Gesamtzahl aller Feldprojekte (Pilot- oder Full-scale-Maßstab) beläuft sich 2012 auf ca. 300.

### **Ausgangssituation**

Durchströmte Reinigungswände wurden als neues Konzept zur passiven In-situ-Grundwassersanierung in den frühen neunziger Jahren in Nordamerika eingeführt. Der Einsatz von elementarem Eisen Fe(0) („Zero Valent Iron“, ZVI) zur Dechlorierung von leichtflüchtigen chlorierten Kohlenwasserstoffen (LCKW, zumeist chlorierte Ethene) erfolgte zunächst in Nordamerika: Die ersten Pioniervorhaben setzte man in den Jahren 1991 und 1995 an den Standorten Borden (Ontario, Kanada, Pilotmaßstab) bzw. Sunnyvale (Kalifornien, USA), um. Ab 1996 setzte in den USA infolge starker Förderung durch die Umweltbundesbehörde US-EPA und auf Initiative der Wirtschaft eine vermehrte Feldimplementierung ein. Die Entwicklung von durchströmten Reinigungswänden begann mit zwei generellen Konstruktionsweisen:

- Das Continuous-Reactive-Barrier-Prinzip (CRB): Die vollflächig durchströmte Reinigungswand besteht nur aus durchlässigem reaktivem Material.

- Das Funnel & Gate-Prinzip (F&G): Schwer durchlässige Leitwände (Dichtwände) fassen den kontaminierten Grundwasserstrom und leiten ihn zu einer die Leitwände durchstoßenden, für das Grundwasser durchlässigen reaktiven Zone. Diese perforierte Kammer ist mit reaktivem Material in einer losen, durchlässigen Schüttung befüllt. Das konventionelle F&G-System sollte, einmal im Untergrund eingebaut, über mehrere Jahrzehnte sich selbst überlassen, einwandfrei funktionieren und daher keine Eingriffsmöglichkeit erfordern.

Modifikationen führten zu neuen Konstruktionen, wie z. B. Drain & Gate-Systemen. Das Grundwasser wird hier nicht durch Dichtwände, sondern durch Filterkiesdrainagen zu Kammern mit durchlässigem reaktivem Material geleitet. Dabei kann es sich um Brunnenschächte mit Reaktorgefäßen handeln. Das Grundwasser durchströmt das eingefüllte reaktive Material. So wurden Schachtreaktoren beispielsweise bei dem seit 1999 erfolgreich arbeitenden Reinigungswand-System in Brunn am Gebirge, Österreich, oder gleichermaßen erfolgreich in Denkendorf (2000) realisiert.

Um Funktionsdefizite auszugleichen, erhielten die ursprünglich passiven Systeme bauliche und technische Ergänzungen, die die verfahrensbegleitende Überwachung und Optimierung erlaubten. Die Entwicklung führte damit zu effizient kontrollierbaren Reinigungswänden mit zusätzlichen Eingriffsmöglichkeiten (Efficiently Controllable Permeable Reactive Barrier – EC-PRB). Der bedarfsgerechte Austausch der reaktiven Materialien, die Regulierung des Grundwassergradienten, die Steuerung des Durchflusses, die gezielte Zufuhr von Reaktanden oder der Abzug der Reaktionsprodukte unterstützen die Wirkungsweise.

Als reaktive Materialien kamen zunächst ausschließlich Fe(0) (ZVI) zur reduktiven Dehalogenierung von LCKW und Aktivkohle zur adsorptiven Entfernung von PAK und BTEX aber auch LCKW im Feld zum Einsatz.

In Nordamerika galt bereits um 2000 zumindest die Anwendung von technischem Eisen in Reinigungswänden als etablierte Sanierungstechnik. So lagen bereits mehrere umfassende Handbücher des „Interstate Technology & Regulatory Councils“ (ITRC), einer Vereinigung der Umweltbehörden der US-Bundesstaaten, vor, ferner Leitfäden und ein Abschlussbericht eines größeren übergreifenden Projekts zur Langzeitbewertung („Tri-Agency-Initiative“), die sich der Anwendung von Eisen-Reinigungswänden in Theorie und Praxis widmeten. Technisches Eisen war das in über der Hälfte aller Projekte eingesetzte reaktive Material. Die überwiegende Zahl der Projekte belegte prinzipiell die Anwendbarkeit und Durchführbarkeit.

In Deutschland setzte sich auch Aktivkohle als zuverlässiges Einsatzmittel durch, das sich in der Abwassertechnik bereits lange etabliert hatte. Es lässt sich vorteilhaft mit anderen reaktiven Materialien, wie etwa Eisen, kombinieren, und es kann eine größere Zahl unterschiedlicher organischer Grundwasserkontaminanten behandeln als Eisen (z. B. PAK, chlorierte Aromaten, aber auch solche LCKW, die einer Dechlorierung durch Eisen nicht zugänglich sind), und selbst dann, wenn diese in komplexen Mischungen und bei schwierigen Grundwasserverhältnissen (große Härte, hoher Sulfatgehalt usw.) angetroffen werden. In solchen Fällen muss speziell konditionierte Kohle eingesetzt werden.

In Deutschland deuteten erste Pilotprojekte Effizienz und Wirtschaftlichkeit der Reinigungswände an. Vielversprechende Ergebnisse boten z. B. die Standorte in Rheine (LCKW), Karlsruhe (PAK) und Denkendorf (LCKW).

### **Erfahrungen (Lessons Learned) aus RUBIN Phase I (2000–2006)**

Die ersten Projekte des Forschungsverbunds dienten der Ermittlung und Validierung von Kriterien zur technisch, ökologisch und ökonomisch begründeten Auslegung, Errichtung und dem Betrieb von Reinigungswänden. Dieser übergeordnete Auftrag umfasste:

- Ermittlung der Einsatzmöglichkeiten und -grenzen,
- Untersuchung der Effizienz, Langzeitwirksamkeit und Wirtschaftlichkeit,
- Analyse und Bilanzierung des maximal möglichen Schadstoffabbaus und der Schadstoffrückhaltung pro Zeiteinheit,
- Erprobung technologischer Ansätze zum Bau von Reinigungswänden,
- Bewertung der Umweltverträglichkeit und Wirtschaftlichkeit,
- Ableitung wissenschaftlich begründeter Qualitätskriterien,
- Entwicklung und Erprobung von Problemlösungen bei Betriebsstörungen,
- Erarbeitung eines Leitfadens für Planung, Umsetzung und Überwachung.

Die von 2000 bis 2006 geleisteten Arbeiten lieferten entscheidende Ergebnisse und Erkenntnisse zum Entwicklungs- und Leistungsstand an Reinigungswandstandorten in Deutschland, Österreich und der Schweiz bei einer Laufzeit von zwei bis acht Jahren. Die Mehrzahl der Anwendungen zeigte, dass Reinigungswände grundsätzlich eine wirksame Behandlung kontaminierten Grundwassers sicherstellen. Reinigungswände mit Aktivkohle als reaktivem Material sowohl zur Behandlung von PAK- als auch LCKW-Schäden lieferten im Vergleich zu reaktivem Eisen häufig sehr gute Abbauleistungen.

Mit dem Projektfortschritt zeichnete sich eine Anpassung der Systeme ab. Die Entwicklung war gekennzeichnet durch die Optimierung der Konstruktionsformen und den Einsatz neuer zusätzlicher Reaktionsmittel, um den jeweiligen standörtlichen Erfordernissen besser zu entsprechen. Gegenüber einfachen F&G-Systemen gewannen kontrollierbare und lenkbare EC-PRB-Systeme zunehmend an Bedeutung. Reinigungswände mit modifizierten Filtermaterialien stellten ihre Eignung jetzt auch bei komplexen Kontaminationen unter Beweis.

In der Zusammenschau mit internationalen Ergebnissen ergaben sich wichtige Schlüsse für die Sanierungspraxis in Deutschland:

- Befunde an einigen Standorten mit vollflächig durchströmten Reinigungswänden, beispielsweise in Rheine, deuteten darauf hin, dass Systeme ohne Grundwasserlenkung und ohne Möglichkeit des Eingriffes in die Reaktionswand funktionieren können. Die Eisen-Pilot-CRB in Rheine, bei der erstmals ein poröses technisches Eisen, Eisenschwamm (Re-Sponge, geschützte Marke der Mull und Partner Ingenieurgesellschaft), zur Dechlorierung von Perchlorethen (PCE) zum Einsatz kam,

steht für eine sehr gute Abreinigungsleistung von über 99 % seit der Inbetriebnahme 1998. Den Erfolg begünstigen unproblematische Untergrundverhältnisse und ein Grundwasserbiogeochemismus, dessen Interaktionen mit dem reaktiven Material nicht zu Ausfällungen und damit Verblockungen führen.

- Auch F&G-Systeme erzielten an einigen Standorten eine wirksame Sanierung. Die konventionelle Ausführung verlor aber teilweise z. B. wegen Teilverblockung des reaktiven Materials oder Baumängel an Bedeutung. Bei Fehlfunktionen sind die erforderlichen Untersuchungen zur Aufklärung der Ursache relativ aufwendig. Nach systematischer Ursachenforschung konnten aber beispielsweise die Probleme in Karlsruhe durch die Beseitigung konstruktiver Fehler ab 2004 vollständig behoben werden, so dass sich der Standort inzwischen durch eine erfolgreiche Anwendung auszeichnet.
- Reinigungswände mit speziell gelenktem Grundwasserfluss, wie beispielsweise „Drain & Gate“ oder „Trench & Gate“ zeigten vielversprechende positive Ergebnisse, weil sich hydraulische Probleme in der Regel nicht einstellen. Ihre Funktionsweise ist in Bezug auf die Strömung zum und durch den Reaktor gut verstanden, vorhersagbar und kontrollierbar (Birke et al., 2004).
- Reinigungswände mit In-situ-Reaktoren in zugänglichen Schächten erwiesen sich als besonders erfolgversprechend, weil eine Kontrolle und Wartung der Reaktorgefäße sowie eine Regenerierung des reaktiven Materials möglich ist (EC-PRB). Das Adsorptiver-Reaktor-und-Barriere-System (AR&B) in Brunn am Gebirge, Österreich, gebaut 1999, steht stellvertretend für eine erfolgreiche EC-PRB, die mit Aktivkohle polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK), Phenole und niedrigsiedende chlorierte Kohlenwasserstoffe (LCKW) erfolgreich unter die analytischen Nachweisgrenzen abreinigt. Auch andere EC-PRB, wie z. B. in Bernau, zeigten bereits 2006 konstant gute bis hervorragende Abreinigungsleistungen über Betriebszeiten bis zu fünf Jahren. Hauptsächlich ergaben sich drei Gründe für diese positiven Befunde: EC-PRB erlauben zugleich Kontrollmaßnahmen über die Hydraulik und das reaktive Material. Sie gestatten den Zugang zum reaktiven Material bei Fehlfunktionen, z. B. Verblockungen oder präferenziellen Fließpfaden, und sie gewährleisten eine dauerhaft homogene An- und Durchströmung des reaktiven Materials – ein aus reaktionstechnischer Sicht wichtiges Moment, das bislang in Wissenschaft und Praxis nicht immer angemessen berücksichtigt wurde.

Die Ergebnisse verdeutlichten die grundlegenden Voraussetzungen für den Sanierungserfolg:

- eine umfassende Erkundung des Standorts in Hinsicht auf die hydrogeologischen und geochemischen Bedingungen, einschließlich numerischer Simulationen zur Reduzierung der Unsicherheiten,
- zusätzliche bewährte Laboruntersuchungen, um die Reinigungswand dem Standort entsprechend zu dimensionieren,

- Untersuchungsprogramme, Probenahmestrategien und Analyseprotokolle, die sicherstellen, dass das Monitoring die hydraulische Situation und die geochemischen Wechselwirkungen umfasst.

Ausführliche Darstellungen und den Überblick mit Daten und Abbildungen zu allen Standorten enthält das Handbuch für durchströmte Reinigungswände (Burmeier et al., 2006).

Die prinzipielle Eignung von Reinigungswänden bei der Behandlung einer Vielzahl von Schadstoffen im Grundwasser stand außer Frage. Die Erfahrungen zeigten aber auch, dass weitaus mehr Faktoren die langfristige Wirksamkeit von Reinigungswänden beeinflussen als zunächst angenommen. Die Einschränkungen konnten identifiziert werden, aber die Ursachen und die Wirkungszusammenhänge waren nicht bei jedem Befund bekannt. Vor diesem Hintergrund wurde der Forschungsverbund auf eine zweite Bearbeitungsphase zur Vertiefung der durchgeführten Forschungsarbeiten erweitert, um die noch offenen Fragen von grundlegender Bedeutung für die erfolgreiche Einführung der Technologie zu beantworten.

#### **Fortführung von RUBIN zwischen 2006 und 2012**

Die weitergehenden Vorhaben griffen die Erkenntnisse der Grundlagenermittlung von 2000 bis 2006 auf und untersuchten insbesondere die limitierenden Einflüsse für den Sanierungserfolg. Die Projekte (siehe Tabelle 1) konzentrierten sich von 2006 bis 2012 auf die Aspekte, die für die langfristige Wirksamkeit von Reinigungswänden von ausschlaggebender Bedeutung sind:

- die Langzeitstabilität der Reaktormaterialien in Abhängigkeit von den hydraulischen und hydrochemischen Einflüssen,
- Ursachen für die Einschränkung der Durchlässigkeit,
- der mögliche Austrag grundwassergefährdender Abbau- und Umsatzprodukte aus den Reaktoren.

Weitere zentrale Ziele waren die Erweiterung der Behandlungsoptionen auf ein größeres Schadstoff-Spektrum und die technische Optimierung erprobter Konfigurationen. Großtechnische Anlagen wurden für umfassende Untersuchungen genutzt. Die ausgewählten Projekte repräsentierten die führenden Konstruktionstypen und die am häufigsten eingesetzten reaktiven Materialarten. Das bautechnische Spektrum umfasste unterschiedliche Ausführungen von der vollflächig durchströmten Reinigungswand bis zum gelenkten kontrollierbaren System.

Konkret ergaben sich die folgenden Aufgaben von grundlegender Bedeutung für die Akzeptanz Reaktiver Wände:

- Beurteilung der Eignung technischer Eisensorten,
- Ermittlung der Ursachen und Folgen der Gasbildung in Eisenschüttungen,
- Untersuchung des Rückhaltevermögens in Aktivkohle-Reinigungswänden an ehemaligen Gaswerksstandorten,

- Entwicklung und Erprobung eines F&G-Systems mit Biosorptionsreaktor,
- Eignungsprüfung einer Reinigungswand für den Gewässerschutz in Bergbaufolgelandschaften,
- Optimierung der katalytischen Dehalogenierung mit palladiumdotierten Zeolithen.

**Tabelle 1:**

Struktur des Verbundprojekts Anwendung von Reinigungswänden RUBIN II (2006–2012),  
Projektförderung: Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)  
Projekträger: Karlsruher Institut für Technologie (KIT, PTKA-WTE)

Teilvorhaben		Laufzeit
<b>1 Entwicklung einer schnellen Methode zur Beurteilung und Auswahl technischer Eisensorten</b>		
02WR0828	Ostfalia Braunschweig/ Wolfenbüttel, Campus Suderburg	Teilprojekt 1: Chemische, analytische und prozesschemische Untersuchungen an technischen Eisensorten
02WR0829	VKTA – Verein für Kernverfahrenstechnik und Analytik	Teilprojekt 2: Elektrochemische, korrosionschemische und oberflächenanalytische Untersuchungen
<b>2 Gasbildung in Eisen(0)-Reaktionswänden (GaFeR)</b>		
02WR0751	Christian-Albrechts-Universität zu Kiel	Teilprojekt 1: System. Untersuchung des Einflusses variierender Einträge verschiedener Grundwasserinhaltsstoffe auf die Gasbildung in Eisenschüttungen und deren Wirkung auf die Durchströmung, Mineralpräzipitation und Reaktivität
02WR0752	Technische Universität Berlin	Teilprojekt 2: Einfluss von Gasentwicklung und Präzipitatbildung auf die Dechlorierungsleistung und Hydraulik von Fe(0)-Systemen mit komplex zusammengestellten Standortwässern
02WR0753	DVGW Technologiezentrum Wasser (TZW)	Teilprojekt 3: Analyse und mögliche Steuerung der mikrobiologischen Prozesse zur Ertüchtigung von Fe(0)-Reaktionswänden
02WR0754	Dresdner Grundwasserforschungszentrum (DGFZ)	Teilprojekt 4: Entwicklung eines prozessbeschreibenden Modells für permeable reaktive Barrieren als Gas-Wasser-Feststoff-Reaktoren – Werkzeug für ihre optimale Gestaltung, Betrieb und Wartung
<b>3 Standortübergreifende Untersuchungen zur Langzeit-Retardation von BTEX, PAK, Hetero-PAK und Cyaniden in Aktivkohle-Reinigungswänden an ehemaligen Gaswerksstandorten</b>		
02WR0763	Leuphana Universität Lüneburg	
<b>4 Entwicklung und Erprobung eines Funnel &amp; Gate-Systems mit Biosorptionsreaktor zur Fassung und Abreinigung von Grundwasserkontaminationen mit BTEX-Aromaten und PAK</b>		
02WR0293	HIM GmbH	
<b>5 Stärkung des Entwicklungspotenzials von Bergbaufolgelandschaften durch den Schutz von Oberflächengewässern vor schwefelsauren Grundwasserzuflüssen mittels reaktiver Reinigungswände</b>		
02WR0527	Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft (LMBV)	
<b>6 Weitergehende Untersuchungen zur Entwicklung des Verfahrens der katalytischen Dehalogenierung in wässriger Phase mittels palladiumdotierter Zeolithe</b>		
02WR0548	IMES Gesellschaft für innovative Meß-, Erkundungs- und Sanierungstechnologien	

### Forschungsbedarf und Verbundstruktur

#### *Fokus 1: Reaktivitäten technischer Eisensorten*

An zwei Eisenwand-Standorten (Bernau und Rheine) hatten sich über Jahre deutlich unterschiedliche Reaktivitäten bei den jeweils eingesetzten, technischen Eisensorten unterschiedlicher Herkunft und Zusammensetzung (Eisenschwamm und Graugussgranulat) gegenüber LCKW gezeigt. Die Gründe für diese auffälligen Befunde waren unbekannt. Verblockungen durch Ausfällungen ließen sich nicht feststellen, und Gasverblockung („Gasplugging“, die Verblockung der wasserdurchlässigen Eisenschüttung durch

Gasbläschen) konnte zumindest im Falle der Piloteisenwand in Rheine ausgeschlossen werden.

Die Befunde unterschiedlicher Reaktivitäten deckten sich mit den Ergebnissen internationaler Studien, ohne dass sich eine eindeutige Erklärung fand. Für die Langzeitstabilität und -leistung einer Eisen-Reinigungswand ist aber eine möglichst konstante Reaktivität zu gewährleisten. Ein Kleinverbund, bestehend aus der Ostfalia-Hochschule und dem VKTA Rossendorf, untersuchte die jeweilige Reaktivität unterschiedlicher Produktionschargen einer technischen Eisensorte. Das Projekt umfasste neben der Identifikation von Schlüsselparametern zur Materialzusammensetzung, elektrochemischer Eigenschaften, Oberflächenbeschaffenheit und Porosität die Entwicklung einer schnellen Methode zur prognostischen Beurteilung der Leistungsfähigkeit von technischem Eisen beim LCKW-Abbau und die Definition von Qualitätsanforderungen für die Auswahl des Eisens vor dem Einbau in eine Reinigungswand.

### *Fokus 2: Gasbildung und Gasclogging in Eisenwänden*

Um das Langzeitverhalten einer Reinigungswand beurteilen zu können, hatten sich die Untersuchungen zunächst auf die Präzipitation von Mineralphasen konzentriert. Jüngere Ergebnisse wiesen aber darauf hin, dass insbesondere die Akkumulation von Gasen die hydraulische Durchlässigkeit stark vermindern kann. Die Kontrolle und Steuerung der Gasbildung ist als Voraussetzung für die Akzeptanz der Eisen-Reinigungswand am Markt anzusehen.

Die Gasbildung in Eisenwänden und das darauf zurückzuführende, an einigen deutschen Standorten in erheblichem Ausmaß beobachtete Gasplugging hatte man in Bernau und Edenkoben verifiziert, in Tübingen bestanden starke Hinweise.

Ein Verbundprojekt der Universität Kiel, der Technischen Universität Berlin, des Technologie-Zentrums Wasser (TZW) Karlsruhe und des Dresdner Grundwasserforschungszentrums (DGFZ) widmete sich der systematischen Untersuchung von Menge, Art und Ort der entstehenden Gase, der zeitlichen Entwicklung, der Entgasungsdynamik sowie dem Einfluss auf die Permeabilität im Mehrphasensystem Gas-Wasser-Feststoff. Übergeordnetes Ziel war eine möglichst umfassende quantifizierende Beschreibung des Mehrphasensystems Eisen-Gas-Wasser, um die mit der Gasentwicklung verknüpften Effekte im Feldeinsatz nachzuvollziehen und beherrschbar zu machen.

Die Christian-August-Universität in Kiel koordinierte den Kleinverbund und zeichnete für das erste Teilprojekt verantwortlich: Die Quantifizierung des Einflusses einzelner Grundwasserinhaltsstoffe auf die anaerobe Korrosion und Gasfreisetzung im Strömungsfeld sowie die Bestimmung der Auswirkungen von Gasbildung, Gasfreisetzung und Mineralpräzipitation auf die Durchströmung von Eisenschüttungen. Die dazu erforderliche Entwicklung von wartungsarmen Säulenversuchssystemen unterlag dem Anspruch, eine permanente Erfassung von Daten zum Durchfluss, der Gasfreisetzung und der Potenzialdifferenzen zu ermöglichen.

Das zweite Teilprojekt des sogenannten Gasverbunds übernahm das Institut für technischen Umweltschutz an der TU Berlin. Ziel war die Quantifizierung von Gasbildung, Gesamtkorrosion und Präzipitatbildung in Fe(0)-Schüttungen bei komplexen Grundwässern, um die Einflüsse auf die kurz- und langfristige Leistungsfähigkeit zu ermitteln.

Untersuchungsschwerpunkte waren die Entwicklung der Gasmengen und ihre Bedeutung für Abbauleistung und Permeabilität, die Einsatzmöglichkeiten von Eisen-Kies-Mischungen, die

Auswirkungen von Hydrogencarbonat auf Gasentwicklung, Reaktivität, Mineralpräzipitation und Hydraulik sowie die Sulfatreduktion und Folgen für Hydraulik und Reaktivität von Reinigungswänden. Wesentliche Ursache für das Gaslogging ist Wasserstoff, der bei der anaeroben Fe(0)-Korrosion entsteht. Gleichzeitig erhöht sich der pH des durchströmenden Grundwassers auf Werte um pH 9 – 11. Wasserstoff kann Mikroorganismen als Elektronendonoren dienen und so metabolisch umgesetzt werden. Die sich ansiedelnden hydrogenotrophen – d. h. Wasserstoff verwertenden – Organismen wirken also als Wasserstoffsinken. Ihre Stoffwechselaktivität beeinflusst sowohl die auftretenden Gasmengen als auch deren Zusammensetzung. Das TZW (Technologiezentrum Wasser) untersuchte mit dem dritten Teilprojekt die biologischen Prozesse in den Fe(0)-Reaktionswänden und im Abstrombereich. Die Untersuchungen schlossen Verfahrensvarianten zur Stimulation des mikrobiologischen H<sub>2</sub>-Verbrauchs und zur Optimierung der Dechlorierung ein. Ziel war die Optimierung der Fe(0)-Wände durch gezielte Steuerung und Stimulation der mikrobiologischen Prozesse.

Das vierte Teilprojekt des DGFZ im sogenannten Gasverbund diente der Entwicklung eines prozessbeschreibenden Modells für PRB als Gas-Wasser-Feststoffreaktoren. Die umfassende quantifizierende modellgestützte Beschreibung des Mehrphasensystems Feststoff (Fe(0))-Gas-Wasser sollte zukünftigen Anwendungen von Reinigungswänden eine systematische Entscheidungshilfe liefern. Ausgangspunkt waren die unzureichend validierten Wirkungen reaktiver Gasphasen auf Hydraulik und Stofftransformationen sowie auf Zonierungseffekte in durchströmten Fe(0)-Schüttungen.

#### *Fokus 3: Rückhaltevermögen von Aktivkohle*

Die Adsorption polarer NSO-heterocyclischer Verbindungen, wie sie neben PAK in Teerölen, Schadstoffgemischen aus ehemaligen Gaswerken usw. vorliegen, an Aktivkohle in einer Reinigungswand war zu Beginn der Arbeiten für RUBIN Phase II unbekannt. Die Leuphana-Universität Lüneburg führte zur Aufklärung der Vorgänge ein Projekt durch, in dessen Verlauf umfassende neue Erkenntnisse zur Langzeitleistung von zwei erfolgreichen Aktivkohlewänden (Karlsruhe und Brunn am Gebirge) gewonnen werden konnten. Die standortübergreifenden Untersuchungen prüften die Effizienz kommerziell erhältlicher Aktivkohlefüllungen bezüglich der Abreinigung von NSO-Hetero-PAK und einer Vielzahl ihrer Metaboliten in Reinigungswänden.

#### *Fokus 4: Erprobung eines Bio-Sorptionsreaktors*

Für die erfolgreiche Errichtung und Inbetriebnahme einer Pilot-Bio-Reinigungswand am Standort Offenbach zeichnete die HIM, Wiesbaden, mit den Partnern I.M.E.S., CDM und TZW Karlsruhe, verantwortlich. Die ehemalige Teerölfabrik ist durch eine Kontamination mit PAK und NSO-PAK gekennzeichnet, an der sich die Wirksamkeit der biologischen Abbauprozesse nachweisen ließ.

Die Anwendung kombinierte den mikrobiologischen Abbau mit der Sorption auf Aktivkohle, um das bisher behandelbare Spektrum der organischen Schadstoffgruppen auf komplexere organische Mischkontaminationen auszuweiten. Das Reaktorkonzept folgte damit der allgemeinen Entwicklung weg von passiven, schlecht kontrollierbaren Systemen hin zu Systemen, die Eingriffe und eine Steuerung erlauben. Eine Erweiterung umfasste technische Sicherungsvarianten, die sich einer Prüfung ihrer hydraulischen und technischen Umsetzbarkeit und Eignung unterzogen.

#### *Fokus 5: Einsatz einer Reinigungswand in der Bergbaufolgelandschaft*

Zu den Folgen des Braunkohlenbergbaus gehören die bergbaulich beeinflussten Grundwässer, die mit hohen Sulfat- und Eisenfrachten aus den Quellgebieten der Lausitz und Mitteldeutschlands abströmen. Bisher fehlte es an praxisreifen Verfahren zum Schwefel- und Metallrückhalt, um die abstromig gelegenen Tagebaurestseen und Vorfluter vor schwefelsaurem Grundwasserzufluss zu schützen. Unter Berücksichtigung der bergbaulichen Wasserwirtschaft ließ die Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft (LMBV) die technische Umsetzbarkeit einer Reinigungswand zur Behandlung des anoxischen Grundwassers prüfen. Bei der Bearbeitung des Projekts kooperierten die GFI GmbH Dresden und der Lehrstuhl für Wassertechnik und Siedlungswasserbau der Brandenburgisch Technischen Universität Cottbus.

#### *Fokus 6: Verfahrensoptimierung der katalytischen Dehalogenierung*

Grundlegende Untersuchungen zur Abstromsanierung auf dem Gelände des Gewerbeparks Denkendorf hatten in der ersten Bearbeitungsphase die Funktion der katalytischen Dehalogenierung in wässriger Phase mit palladiumdotierten Zeolithen nachgewiesen. Dieser Abbau chlorierter Ethene versprach entscheidende wirtschaftliche Vorteile, wenn sich die Abbauraten mindestens verdoppeln ließen. Diesem Anspruch stellte sich das Folgeprojekt von IMES. Ziel war die ausreichende Wasserstoffversorgung des Katalysators zur Beschleunigung des Abbaus. Neben der Optimierung des Verfahrens zielte das Projekt auf den Nachweis der Langzeitbeständigkeit der palladiumdotierten Zeolithe.

#### *Verbundstruktur*

Die Bearbeitung der vorgenannten Schwerpunkte erfolgte in zehn Teilvorhaben. Jeweils zwei (sogenannter Eisenverbund) und vier (sogenannter Gasverbund) fanden sich zu fachlichen Clustern zusammen. Die Tabelle 1 verdeutlicht die Verbundstruktur, die Kooperationen und die beteiligten Forschungsstellen und Unternehmen. Die Projektberichte in Kapitel 2 des Ergänzungsbandes fassen die Ergebnisse zusammen.

#### *Ergebnisse aus RUBIN II (2006–2012) im Überblick*

Die erste Projektphase hatte offenbart, dass die Wirksamkeit von Reinigungswänden von zahlreichen Standortfaktoren beeinflusst wird, die bis dahin weder in ihrer Bedeutung noch in ihrer Steuerbarkeit näher bestimmt waren. Diese Einflussgrößen variieren standortspezifisch. Jede Reinigungswand unterliegt einem mehrdimensionalen Wirkungsgeflecht mit wechselseitigen Beziehungen. Zu den bestimmenden Faktoren zählen die Zusammensetzung des Grundwassers, die Schadstofffahne, die hydraulischen Bedingungen und das reaktive Material. Ihre systematische Untersuchung und Bewertung bestimmte auch die zehn Projekte der zweiten Verbundphase. Die wichtigsten Erkenntnisse ergaben sich aus der Erprobung und Überwachung beispielhafter Anwendungen, sowie aus der Modifikation der technischen Konfigurationen und der Einsatzmittel.

Generell hat sich bestätigt, dass bauliche Mängel oder starke Mineralakkumulationen bei Eisenwänden, insbesondere im Anstrombereich, zu einer verminderten Durchlässigkeit des „Filters“ und zu präferenziellen Fließwegen innerhalb des „Filters“ führen können. Dadurch kann sich die hydraulische und/oder reaktive Leistungsfähigkeit vorzeitig signifikant

verringern. Auch eine unzureichende Masse an Eisen und/oder eine ungleichmäßige Verteilung kann sowohl zu kurz- als auch langfristigen Funktionseinbußen führen. Die sorgfältige qualitätsgesicherte Herstellung einer Reinigungswand und eine frühe Überwachung der hydraulischen Leistung helfen dabei, Störungen zu vermeiden oder frühzeitig zu erkennen und Gegenmaßnahmen vorzunehmen. Laboruntersuchungen sind unerlässlich für das Verständnis der grundlegenden Mechanismen, sie können aber nicht alle relevanten Prozesse, die unter In-situ-Bedingungen die Effektivität einer Reinigungswand beeinflussen, abbilden. Daher ist die detaillierte langfristige Überwachung für die Beurteilung der nachhaltigen reaktiven und hydraulischen Leistung über die Zeit unerlässlich. Die Überwachung der Grundwasserchemie innerhalb der Reinigungswand ist auf kurze Sicht nützlich zur Beurteilung der Leistung, die aber langfristig durch die Überwachung der Grundwasserchemie und Grundwasserströmungsverhältnisse außerhalb und in zeitlichen Intervallen ergänzt werden muss. RUBIN dokumentiert auch den technologischen Fortschritt in Deutschland. Die Forschungsförderung hat wesentliche zusätzliche Innovationen initiiert: Deutsche Unternehmen haben sich für ihre projektbezogenen Entwicklungen europäische bzw. deutsche Schutzrechte gesichert. Bei den reaktiven Feststoffen kam Responge – ein neues Schwammeisenprodukt – zum Einsatz. Aus der Anwendung von EC-PRB-Technologien resultierten die neuen Dichtwand-Heber-Reaktoren DHR und die Drain & Gate-Technologie. Bei den Gas-PRB-Technologien zählt die BIOXWAND zu den neuen Entwicklungen. Mit diesen geschützten Innovationen unterstützen deutsche Unternehmen die wirtschaftliche Nutzung von Reinigungswänden in Europa.

Die Ergebnisse des Förderschwerpunkts RUBIN in der Phase II lassen die folgenden Schlüsse für die Sanierungspraxis in Deutschland zu.

### **Bauart und Konfiguration**

Unter den Reinigungswänden in Deutschland dominieren gelenkte Systeme. Von elf Reinigungswänden sind neun entweder als F&G-Konstruktionen oder als EC-PRB ausgeführt. Nur an zwei Standorten entstanden vollflächig durchströmte Reinigungswände (CRB). Damit unterscheidet sich die Entwicklung hierzulande von der nordamerikanischen, wo CRB und reaktive Injektionszonen im Vergleich zu konventionellen F&G-Systemen vermehrt zum Einsatz kommen. Reinigungswände mit In-situ-Reaktoren, die in zugängliche Schächte eingebaut werden, sind betriebssichere Reinigungswandssysteme, weil eine Kontrolle und Wartung der Reaktorgefäße oder eine Regenerierung des reaktiven Materials einfach möglich ist. Aktuelle Langzeituntersuchungen, vor allem in Denkendorf (Aktivkohle oder Palladium zur Abreinigung von LCKW) und Brunn am Gebirge (Aktivkohle zur Abreinigung von PAK) zeigen sehr gute Abreinigungswerte über jeweils rund zehn Jahre. Reinigungswände mit speziell passiv gelenktem Grundwasserfluss, wie beispielsweise das Drain & Gate-System in Denkendorf, besitzen ein erhebliches Potenzial. Das durch ein Drainagesystem gefasste Wasser gelangt in ein Schachtbauwerk. Die passive Durchströmung der hier platzierten Aktivkohleeinheit nutzt den hydraulischen Gradienten zwischen dem Grundwasserspiegel im Anstrom und dem Ablaufniveau.

Bei konventionellen F&G-Systemen sind besonders sorgfältige Voruntersuchungen zur Hydraulik durchzuführen, da sie den Grundwasserfluss nicht unerheblich beeinflussen

können. Modellierungen der Grundwasserströmung bieten somit im Vorfeld eine höhere Planungssicherheit.

Umfangreiche Langzeitbefunde zwischen 2000 und 2010 vom Pilot-CRB-Standort in Rheine belegen, dass vollflächig durchströmte Reinigungswände verlässliche Abreinigungsleistungen bieten. Zum erfolgreichen Betrieb tragen hier offensichtlich auch die unproblematischen Untergrundverhältnisse und ein Grundwasserbiogeochemismus bei, der nur geringen Anlass zu stärkeren Nebenreaktionen mit dem reaktiven Material gibt und daher nicht zu stärkeren Ausfällungen und/oder Gasentwicklung und damit Verblockungen der durchlässigen Barriere führt.

### **„Filter“ und ihr Leistungsspektrum**

#### *Reinigungswände mit Aktivkohle*

Reinigungswände mit Aktivkohle als reaktivem Material sowohl zur Behandlung von PAK- als auch LCKW-Schäden liefern vielversprechende, positive Resultate, auch im Falle der Abreinigung von NSO-PAK (Standorte Karlsruhe und Brunn am Gebirge). Messkampagnen wiesen eine Abreinigung von mehr als 99 % nach, insbesondere auch für die polaren Phenole und die Heterocyclen. Die Abreinigungsleistung hielt sich auch nach jahrelangem Betrieb. Eine Reinigungswand mit Aktivkohle als Adsorbens erscheint also geeignet zur Abreinigung unpolarer, und aufgrund der Einführung von Heteroatomen polarer polyaromatischer Kohlenwasserstoffe und entsprechender Aromaten und Phenole. Gesicherte Erkenntnisse über Bildung, Abbau und Verfrachtung von Hetero-PAK und polaren PAK in Reinigungswänden gab es zu Beginn der zweiten Forschungsphase nicht. Gerade für die in der Regel polareren Transformationsprodukte der PAK war eine geringere Adsorbierbarkeit auf Aktivkohle und damit gegebenenfalls ein vorzeitiger Durchbruch in Reinigungswänden anzunehmen. Auch das Rückhaltevermögen von Reinigungswänden bezüglich der Gruppe der Hetero-PAK und den Metaboliten der gesamten Gruppe der PAK war nicht untersucht worden.

Eine bisher einzigartige Analytik von mehr als 60 Verbindungen war Ausgangspunkt für ein experimentelles Ranking, das die Adsorbierbarkeit aller untersuchten Verbindungen dokumentiert. Die Ergebnisse ermöglichen die Einschätzung des Adsorptionsverhaltens im Besonderen der Hetero-PAK unter realen Bedingungen. Das Projekt lieferte den Vergleich von sechs kommerziell erhältlichen Aktivkohlen und quantifizierte ihre Adsorptionskapazität. Mit den Ergebnissen kann der experimentelle Aufwand zur Bestimmung von Einzel-Adsorptionsisothermen drastisch reduziert werden.

Messungen belegten eine starke örtliche und zeitliche Variabilität der Konzentrationen und der damit verbundenen Frachten der untersuchten Verbindungen. Damit verbunden ist für unterschiedliche Positionen der Aktivkohlereaktoren eine unterschiedliche Belastung, die in der Konzipierung einer Reinigungswand berücksichtigt werden sollte. Unumgänglich ist zur Beurteilung der Kapazität einer Reinigungswand die Kenntnis der Konzentrationen oder Frachten am geplanten Ort. Eine Extrapolation aus Konzentrationsmessungen z. B. aus lokalisierten Schadensherden kann nicht empfohlen werden. Stattdessen ermöglichen Säulenversuche mit dem Realwasser an Positionen einer geplanten Reinigungswand eine Quantifizierung der Beladung für eine angedachte Standzeit.

### *Reinigungswände mit Eisen*

Eisen ist als reaktives Material zur Behandlung von LCKW-Schäden geeignet, jedoch sind Voruntersuchungen (Säulenversuche) zum Reaktionspotenzial und zur Ermittlung von potenziellen Verblockungen durch Ausfällungen und gasförmige Verbindungen kaum verzichtbar.

Die Reaktivität von Eisen hängt u. a. entscheidend von der Art und Menge von Spurenstoffen und deren Verteilung in technischem Eisen ab. Fe(0) hat sich als Aktivmasse für die reduktive In-situ-Umsetzung halogenierter Kohlenwasserstoffe allein nicht bewährt. Eisen dient bei der In-situ-Reduktion chlorierter Kohlenwasserstoffe zwar als Reduktionsmittel und wird im Zuge der Reduktionsreaktion selbst zu Fe<sup>2+</sup> oxidiert, die Reduktion der halogenierten Verbindungen benötigt jedoch spezielle katalytisch aktive Zentren.

Nach umfangreichen methodischen Vorarbeiten war es erstmals möglich, experimentell einen Zusammenhang zwischen Werkstoffzusammensetzung und Abbauleistung für PCE nachzuweisen. Die Untersuchungen ergaben, welche Legierungsbestandteile für die Reaktivität des technischen Eisens verantwortlich und welche dafür unerheblich sind oder diese sogar vermindern. Für letztere konnten Näherungswerte für die maximal zulässige Konzentration in technischem Eisen angegeben werden.

Die entwickelte Schnellmethode erlaubt es, innerhalb relativ kurzer Zeiträume und auf der Grundlage einer überschaubaren Anzahl von Materialparametern die Eignung eines gegebenen technischen Eisenwerkstoffs hinreichend genau zu bestimmen. Parallel zu einem Säulenversuch zur Auswahl des Eisens und zur Dimensionierung einer Reinigungswand, sollen künftig Batchversuche die Eignung der Produktionschargen nachweisen, bevor sie ausgeliefert und in der Reinigungswand eingesetzt werden können. Zur Gasentwicklung in Eisen-Reinigungswänden ist Folgendes zu beachten:

Beim Einsatz von Graugusseisengranulat ist für die Dimensionierung einer Reinigungswand keinesfalls die aus der Korngrößenverteilung abzuschätzende hydraulische Durchlässigkeit anzusetzen. Hier sind deutlich kleinere  $k_f$ -Werte von bis zu  $10^{-5} \text{ ms}^{-1}$  oder kleiner anzunehmen. Sobald es zu einer Akkumulation von Gas in den Porenräumen kommt, sind signifikante Abnahmen der Durchlässigkeit zu erwarten. Wirken andere Prozesse, wie die Wasserstoffzehrung, im Zuge der Sulfatreduktion (oder anderer mikrobieller Prozesse) der Gasblasenbildung entgegen, können höhere  $k_f$ -Werte erreicht werden, wobei mittel- bis langfristig die Durchlässigkeit aufgrund der Bildung von Mineralpräzipitaten ebenfalls signifikant abnehmen wird.

Bei der Verwendung von Graugusseisengranulat in gut durchlässigen Aquiferen oder in F&G-Systemen ist dagegen von einer erhöhten Gefahr der Umströmung des reaktiven Materials auszugehen.

Auch für Eisenschwamm kann man  $k_f$ -Wert-Abnahmen um mehr als eine Größenordnung erwarten, kurzfristig (im Bereich von Stunden) können sogar Durchlässigkeitsverluste von mehr als zwei bis drei Größenordnungen auftreten. Aufgrund der insgesamt deutlich

besseren hydraulischen Leitfähigkeit der grobkörnigen Schüttung wird aber für die meisten Anwendungen eine genügend hohe Durchlässigkeit erhalten bleiben.

Die Quantifizierung von Gasbildung, Gesamtkorrosion und Präzipitatbildung in Fe(0)-Schüttungen bei komplexen Grundwässern ermöglichte eine Bewertung der Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit von Fe(0)-Schüttungen im kurz- und langfristigen Betrieb. Passivierende Korrosionsprodukte führen zu einem erheblichen Rückgang der Reaktivität, sowohl in Bezug auf Schadstoffabbau als auch auf Gasentwicklung. Tendenziell wurde die Reaktivität hinsichtlich der Wasserstoff-Entwicklung stärker durch die Bildung passivierender Deckschichten beeinträchtigt als dies für die Schadstoffreduktion der Fall war. Die zeitliche Differenz war allerdings nicht so groß, dass ein signifikantes Zeitfenster für eine noch befriedigende Schadstoffreduktion bei Abwesenheit jeglicher Wasserstoff-Entwicklung zu erwarten wäre. Als problematisches Korrosionsprodukt mit erheblicher passivierender Wirkung wurde Eisenhydroxidcarbonat identifiziert.

Der Einsatz von Eisen-Kies-Mischschüttungen ist angesichts der Ergebnisse als eher unvorteilhaft einzustufen. So lässt sich durch die Beimischung von Kies, als inerte Mischungskomponente, die Deckschichtbildung auf dem reaktiven Eisen durch konkurrierenden Aufwuchs nicht verzögern. Niedrige Korrosionseffizienzen, gepaart mit großen Porositätsverlusten, sind als Ausschlusskriterium für die Verwendung im Feld zu nennen. Die überproportionale Akkumulation von Sekundärmineralen wirkt sich negativ auf die Lebensdauer von Mischschüttungen aus. Die beobachtete erhöhte biologische Aktivität ist vermutlich auf die bevorzugte Besiedelung nicht reaktiver Oberflächen zurückzuführen. Dagegen erleichtert die Beimischung von Kies jedoch durch einen geringeren Zementierungsgrad die physikalische Regeneration des reaktiven Materials.

Der Anströmbereich einer reaktiven Schüttung ist weiterhin die sensibelste Region für eine potenzielle Verblockung. So kann Sauerstoff zu einer Oxidation des Eisens zu dreiwertigen Ionen führen, die als voluminöse Hydroxide ausfallen und innerhalb weniger Millimeter eine kompakte Deckschicht bilden. Für praktische Anwendungen ist daher zu empfehlen, eine Reaktionswand aus Schichten mit unterschiedlichen Korngrößenfraktionen aufzubauen. Im Anströmbereich sollte eine höchstmögliche Porosität mit großen Poren vorliegen, um die Gefahr einer Verblockung (wie z. B. in Bernau) zu minimieren. Eine erhöhte Porosität ist durch den Einsatz einer grobkörnigen Korngrößenfraktion der gelieferten Mischung möglich.

Mikrobiologische Prozesse können den im Überschuss entstehenden Wasserstoff im Langzeitbetrieb von Fe(0)-reaktiven Wänden vollständig zehren und verringern das Risiko eines Gasloggings in hohem Maße. Die Acetogenese und Sulfatreduktion verbrauchen Wasserstoff, ohne gasförmige Produkte zu bilden. Eine Prüfung der Standorttauglichkeit für den Einsatz von Reinigungswänden mit Fe(0)-Schüttungen sollte neben der Analyse von gelösten Mineralfrachten ebenso eine Untersuchung der Rahmenbedingungen für biologische Prozesse beinhalten. Als günstig sind unter diesem Aspekt pH-Werte > 8,5 bis 9,5 in Fe(0)-Wänden zu werten, bei denen die Acetogenese bevorzugt abläuft. Eine in Hinblick auf das Gaslogging ungünstige Randbedingung ist ein hoher Nitratgehalt im kontaminierten Grundwasser (Denitrifikation). Batchversuche, Säulenversuche und Versuche an Feldproben wiesen die mikrobiologischen Vorgänge in Eisenwänden nach und

bestimmten den Einfluss unterschiedlicher pH-Werte und Wasserstoff-Gehalte auf die hydrogenotrophen Stoffwechselgruppen. Aus den Untersuchungen resultierten Verfahrensvarianten zur gezielte Steuerung und Stimulation der mikrobiologischen Prozesse in Fe(0)-Wänden.

Mit dem sog. (Gas-Wasser-Eisen-Reaktions-) GaWaFeR-Modell lieferte der Forschungsverbund ein Instrument, das die komplexen Reaktionen in Eisen-Reinigungswänden prognostizieren kann. Das Modell wurde an einem kontrollierten Säulenexperiment und an den in RUBIN I gebauten Eisen-Reinigungsreaktoren in Bernau validiert. Das Modellwerkzeug ist in der Lage, Prozessabläufe in komplexen kontrollierten Systemen sachgerecht zu interpretieren und Steueroptionen für einen wartungsarmen Betrieb bereitzustellen. Die Anwendung des Modells auf das „offene“ System der Feldreaktoren in Bernau demonstrierte, dass zentrale Fragestellungen wie die Gasbildungsdynamik bei geeignetem Monitoring sinnvoll abschätzbar sind. Damit wurde ein erster Schritt hin zu Betriebsplanung, Prozesskontrolle und Steuerung für Eisen-Reinigungswände mit Einfluss von reaktiven Gasphasen gemacht. Allerdings ist das Modellwerkzeug GaWaFeR noch sehr komplex in seinem Parametrisierungsaufwand, der unter Standortbedingungen betrieben werden sollte.

#### *Reinigungswände mit Bio-Reaktoren*

Bio-Reinigungswände, wie z. B. in Offenbach zur Abreinigung eines Teerölschadens, besitzen große Zukunftspotenziale. Die kombinierte Anwendung von mikrobiologischem Abbau und Sorption auf Aktivkohle erweitert das bisher behandelbare Spektrum der organischen Schadstoffgruppen auf komplexere organische Mischkontaminationen. Das Reaktorkonzept folgt damit der allgemeinen Entwicklung weg von rein passiven, schlecht kontrollierbaren Systemen hin zu Systemen, die Eingriffe und eine Steuerung erlauben. Vor allem dann, wenn zur Stimulierung von chemischen oder biologischen Prozessen die Zugabe von Reagenzien erforderlich ist, bietet das im Forschungsvorhaben entwickelte Reaktorsystem gegenüber anderen In-situ- oder Ex-situ-Verfahren entscheidende Vorteile. Der leicht zu wartende Reaktortyp gewährleistet eine gleichmäßige Durchmischung des anströmenden Wassers, bietet optimierte Dosiermöglichkeiten und vereinfacht das Monitoring der relevanten Betriebsparameter.

- Innerhalb der reaktiven Zonen lassen sich optimale Milieubedingungen für die Ansiedlung und Nutzung von Mikroorganismen zum Abbau von organischen Schadstoffen schaffen und steuern.
- Ein flexibles Monitoring-Programm ermöglicht die Überprüfung der Reinigungsleistung und des Langzeitverhaltens aller Komponenten.
- Die integrale Fassung des kontaminierten Grundwassers in Kombination mit der Strömungsbündelung auf kleine Querschnitte in den Rohrleitungen zwischen den einzelnen Reaktorkompartimenten sorgt für eine optimale und vollständige Vermischung der zugegebenen Reagenzien mit dem zu behandelnden Wasser.
- Eine Zugabe von Reagenzien ist an mehreren Stellen möglich, dadurch können entweder verschiedene Reagenzien räumlich getrennt oder die gleichen Reagenzien wiederholt zugegeben werden.

- Sedimentationsräume verhindern, dass Ausfällungsreaktionen und Gasbildung langfristig den Porenraum in den Bioreaktoren bzw. im Aquifer verstopfen.

Eine essentielle Voraussetzung für den erfolgreichen Feldbetrieb einer Bio-Reinigungswand besteht darin, alle erforderlichen Vorversuchsstadien (Batch-, Säulenversuche im Labormaßstab, Pilotsäulen unter Standortbedingungen, Errichtung und Test einer Pilotwand vor Erweiterung auf den Full-scale-Maßstab) mit ausreichendem Zeit- und Mittelansatz Schritt für Schritt durchzuführen. Zur effizienten Abreinigung war auch während des Probetriebs der Pilotwand in Offenbach zwischen 2007 und 2009 die Anpassung einiger Parameter erforderlich.

#### *Reinigungswände mit palladiumdotierten Zeolithen*

Das Verfahren der katalytischen Dehalogenierung in wässriger Phase mit palladiumdotierten Zeolithen konnte mit der zweiten Projektphase in RUBIN entscheidend weiterentwickelt werden. Ein alternatives System gewährleistet die erforderliche Sättigung des Wassers mit Wasserstoff.

Die Vergrößerung der Oberfläche der Zeolithe und die Reduzierung der diffusiven Transportstrecken zu den Reaktionsplätzen verbesserten die Abbauratenkonstanten. Die Entwicklung einer Modulbauweise erlaubt den alternierenden Einsatz von Komponenten zur Zugabe von Wasserstoff und Katalysatorsegmenten je nach Wasserstoffbedarf.

Das Projekt wies die Langzeitbeständigkeit der palladiumdotierten Zeolithe über den Zeitraum des Probetriebs hinaus nach. Die wesentlichen Vorteile gegenüber konventionellen Technologien (Nassaktivkohlefiltration, Strippverfahren) haben auch nach Abschluss des Vorhabens Bestand:

- die Schadstoffe werden abgebaut und nicht auf andere Trägermedien transferiert;
- die Abbauraten sind bei ausreichender Versorgung mit Wasserstoff als Reduktionsmittel für die meisten LHKW praktisch gleich, d.h. die Anwendbarkeit des Verfahrens wird nicht durch das Auftreten von Substanzen mit stark unterschiedlicher Sorbierbarkeit bzw. Flüchtigkeit limitiert;
- der Abbau lässt sich als Prozess 1. Ordnung beschreiben, d.h. das Verfahren wird umso effektiver je höher die Schadstoffkonzentrationen sind. So entstehen bei einer Konzentrationsverdopplung von 10 auf 20 mg/L LCKW bei einem Sanierungsziel von 0,01 mg/L Mehrkosten von lediglich 10 %, bei der Nassaktivkohlefiltration verdoppeln sich die Aktivkohlekosten nahezu.

Trotz einer wesentlich geringeren Membranoberfläche erwiesen sich Silikonschläuche unter realen Bedingungen als robuster zur Einbringung von Wasserstoff als Hohlfasermembranmodule. Ein modularer Aufbau ermöglicht eine nahezu gleichmäßige Verteilung von Wasserstoff im System. Kleinere Pelletgrößen können die Reaktionsraten weiter steigern.

#### *Einsatz von Reinigungswänden in der Bergbaufolgelandschaft*

Die Technologie der Lausitzer und Mitteldeutschen Bergbau-Verwaltungsgesellschaft LMBV, eine Bio-Reinigungswand als EC-PRB zur Sanierung von sauren und sulfatbelasteten Grundwasserströmen (AMD, Acid Mine Drainage) durch Eisen- und Sulfatabtrennung bei

Erzeugung hoher Alkalinitäten in den behandelten Wässern bereitzustellen, steht unmittelbar vor der Felderprobung. Das aus RUBIN weiterentwickelte Verfahren nutzt H<sub>2</sub> als Elektronendonator für die autotrophe Sulfatreduktion und wird in geschlossenen technischen Reaktoren durchgeführt, die in Tiefschächten nach dem Drain & Gate-Prinzip betrieben werden. Ziel ist die vollständige Metallabtrennung und die Verminderung der Sulfatkonzentration am Ablauf auf 2 bis 4 mmol Sulfat/L. Dabei wird die In-situ-Sulfatreduktion über das für die Metallfällung nötige Maß hinaus betrieben, um Schwefel aus der Wasserphase abzutrennen.

Das dreistufige Verfahren soll zum Schutz bzw. zur Verbesserung des Zustands von Oberflächengewässern in den Folgelandschaften des Braunkohlenbergbaus eingesetzt werden. Hintergrund ist die zunehmende Anbindung des steigenden Grundwassers an die öffentliche Vorflut. Hierdurch kommt es in fortschreitendem Maß zum Austritt bergbaubeeinflusster Wässer und so zu einer entsprechenden Gewässerqualitätsverschlechterung. Mit der Feld-Pilotanlage soll zunächst in einem Teilbereich des Grundwasserzustroms zu einem Restsee eine signifikante Verbesserung der Grundwasserqualität erreicht werden. Es soll gezeigt werden, dass die im Technikumsmaßstab erreichten Umsatzraten und Wirkungsgrade auch im Feld erreichbar und noch steigerbar sind.

### **Langzeiterfahrungen**

Die Fülle an Erfahrungen in den letzten Jahren erlaubt inzwischen auch eine Bewertung der Langzeitleistung von Reinigungswänden, die bisher der größte Unsicherheitsfaktor für die Planung und Installation von Reinigungswandanwendungen war. Die dauerhafte Wirksamkeit von Reinigungswänden ergibt sich aus den folgenden Anforderungen:

- Erfasst die Reinigungswand auch zukünftig die Schadstofffahne so weit, dass der Schutz abstromiger Rezeptoren gewährleistet ist?
- Besteht weiterhin eine hinreichende Aufenthaltszeit zum Schadstoffabbau?
- Ist die Reinigungswand länger reaktiv, als die Schadstofffahne existiert, ohne große Änderungen am Design/Bauwerk oder einen vollständigen Austausch des Materials zu erfordern?
- Kann die hydraulische und reaktive Funktion der Reinigungswand lange genug aufrechterhalten werden, um eine signifikante Verbesserung der Wasserqualität im Abstrom zu erzeugen?

Die folgenden fünf technischen Anlagen zeigten mit der Dauer des Forschungsvorhabens ihre anhaltende Funktionsfähigkeit. Die Beispiele wiesen in der Langzeitbetrachtung die kontinuierliche Verringerung der Schadstoffgehalte im Abstrom nach.

#### *Reaktionswand Rheine*

In Rheine (Nordrhein-Westfalen) wurde 1998 eine durchgehende Reinigungswand im Pilotmaßstab errichtet. Von Beginn an wurden hier im Rahmen von Forschungsprojekten unterschiedlichste Aspekte der Reinigungswandtechnologie untersucht. Das Handbuch zu Reaktionswänden (Burmeier et al. 2006) bzw. die dort aufgeführte Literatur geben einen Überblick der Arbeiten und auch eine Standortbeschreibung. In Phase 2 des RUBIN-

Verbundes setzte sich das Basismonitoring fort, um die Langzeitentwicklung zu beobachten. Darüber hinaus wurden Laborversuche mit dem Standortwasser bzw. einem nachempfundenen Standortwasser durchgeführt, und die mikrobiologische Besiedlung wurde anhand von Grundwasserproben erneut charakterisiert.

Die Ergebnisse des Basismonitorings bis 2009 zeigten, dass die Reinigungswand über einen Zeitraum von elf Jahren effektiv die Schadstoffe im Grundwasser abbaute. Dabei blieben die schon früh erkennbaren Unterschiede in der Effektivität zwischen den beiden Wandabschnitten (Eisenschwamm und Graugusseisengranulat-Kies-Gemisch) weiterhin erkennbar. So wurde im Segment mit Eisenschwamm kontinuierlich ein Abbau von PCE sowie von Trichlorethen (TCE) und cis-1,2-Dichlorethen (DCE) beobachtet und die Gesamtgehalte der CKW lagen im Abstrom z. T. deutlich unterhalb der Zielkonzentration von 100 µg/L.

Die vermutlich auf eine Entmischung von Eisen und Kies zurückzuführende geringere Effektivität des anderen Reinigungswandsegments konnte auch im Zeitraum bis 2009 weiterhin erkannt werden, wobei eine im Vergleich zu den Vorjahren leichte Verstärkung des PCE-Abbaus, begleitet von einer ebenfalls verstärkten Bildung der Metabolite TCE und cis-DCE auf den zunehmenden Einfluss mikrobieller Abbauprozesse hindeutet. Das Auftreten entsprechender Mikroorganismen konnte anhand von Grundwasserproben nachgewiesen werden. Darüber hinaus zeigten die Grundwasseranalysen sowie die mikrobielle Charakterisierung die Aktivität hydrogenotropher Nitrat- und Sulfatreduzenten an. Die anhaltende Bildung von Methan entsprach dem Befund einer Besiedlung mit methanogenen Organismen. Die Konzentrationsänderungen anderer Grundwasserinhaltsstoffe zeigten eine kontinuierliche Fortsetzung der bisherigen Monitoringergebnisse.

Hinsichtlich der Gasentwicklung muss weiterhin davon ausgegangen werden, dass im Segment mit Eisenschwamm eine separate Gasphase entsteht, während im Segment mit Graugusseisengranulat und Perlkies vermutlich keine Gasblasen mehr gebildet werden. Aufgrund der groben Körnung des eingesetzten Eisenschwammes kommt es aber am Standort nicht zu Clogging-Phänomenen, so dass die Reinigungswand weiterhin hinreichend durchströmt wurde. Insgesamt kann damit festgestellt werden, dass die Reinigungswand am Standort Rheine nicht nur ein erfolgreiches Pilotprojekt darstellt, sondern vielmehr deutlich aufzeigt, dass eine passive In-situ-Grundwassersanierung mit Hilfe von Fe(0)-Reaktionswänden über einen Zeitraum von mindestens elf Jahren effektiv funktionieren kann, wenn die Randbedingungen zur Anwendung, wie sie auch im Leitfaden beschrieben sind, eingehalten werden.

#### *Reaktoranlage am Standort Bernau*

Auf dem Standort einer ehemaligen Kaserne der Westgruppe der sowjetischen Truppen (WGT) in Bernau entstand 2000 eine modulare In-situ-Fe(0)-Reaktoranlage. Das System besteht aus zwölf zylindrischen Behältern von jeweils 8 m<sup>3</sup> Inhalt, die parallel durchströmt werden, und einer Aktivkohlenachreinigungsanlage. Die Anlagenmodifikation schloss sich 2007 an. Als reaktives Material kommt nullwertiges Eisen zur reduktiven Dechlorierung zum Einsatz. Das Eisen wurde mittlerweile drei Mal regeneriert. Aktivkohle übernimmt die Nachreinigung von cis-DCE.

Seit dem Beginn der Standortsanierung im Februar 2007 reinigte die Anlage bis zum Herbst 2011 ca. 80.000 m<sup>3</sup> kontaminiertes Grundwasser ab. Dabei wurden ca. 3,6 t LCKW aus dem Untergrund entfernt. Drei Regenerationen des nullwertigen Eisengranulats haben gezeigt, dass die ursprünglichen hydraulischen Eigenschaften des mit mehreren tausend ausgetauschten Porenvolumina beanspruchten nullwertigen Eisens durch eine mechanische Behandlung wiederhergestellt werden können. Die reaktiven Eigenschaften des Eisens ließen sich durch Regeneration zwar weitgehend, aber nicht vollständig wiederherstellen. Die Phasen des bisherigen Sanierungsbetriebs zeigen zwar eine ähnliche Abbaucharakteristik bezüglich des Hauptschadstoffs TCE, nachteilig ist jedoch die Zunahme der Transferrate von TCE zu cis-DCE. Diese ist im Laufe des Sanierungsbetriebs deutlich angestiegen, was auf einen zunehmend konkurrierenden mikrobiologischen Abbau von TCE hindeutet. Da cis-DCE nur in geringem Umfang durch das reaktive Eisen abgebaut wird, ist eine Aktivkohlenachreinigungsanlage notwendig.

Durch den Parallelbetrieb der Module wird das gesamte Eisen zur Dechlorierung genutzt, während im Reihenbetrieb beim Forschungsvorhaben die hinteren Module praktisch nicht beansprucht waren. Permeabilitätsverluste sind deutlich geringer als im Reihenbetrieb, da sich Präzipitatbildungen auf alle Module verteilen, während sie im Reihenbetrieb im Wesentlichen in den ersten beiden Modulen akkumulierten. Eine Durchströmung der einzelnen Module von unten nach oben hat sich als vorteilhaft erwiesen, vor allem hinsichtlich der Vermeidung von Gasclogging. Die Schadstoffkonzentrationen im Zulauf haben sich im Laufe des bisherigen Sanierungszeitraums in etwa halbiert.

#### *Drain & Gate-System am Standort Denkendorf*

In Denkendorf entstand 2000 ein Drain & Gate-System mit einem zugänglichen Schachtreaktor. Als reaktives Material kommt seitdem Aktivkohle zur Sorption von LCKW zum Einsatz. Das System funktioniert zuverlässig. Die Drainage erreicht zuverlässig eine wirksame Sicherung des kontaminierten Grundwasserabstroms. Seit 2001 wurden aus dem gering durchlässigen Aquifer ca. 9.000 m<sup>3</sup> kontaminiertes Grundwasser abgereinigt. Die Schadstoffkonzentrationen schwanken über ca. zwei Größenordnungen, d.h. das angewandte Sorptionsverfahren ist für den Standort deutlich besser geeignet als ein kinetiklimitiertes Abbauverfahren. Die Aktivkohlefüllung musste im Laufe von 10 Betriebsjahren zwei Mal getauscht werden.

#### *F&G-System am ehemaligen Gaswerk Ost in Karlsruhe*

Das F&G-System entstand 2000/2001 mit acht zylindrischen Gates, die zugänglich und austauschbar angelegt sind. Offene Kammern erlauben im Zu- und Abstrom die Strömungsvergleichmäßigung. Als reaktives Material kommt Aktivkohle zur Sorption von PAK sowie untergeordnet Benzol zum Einsatz.

Durch Wasserhaltungsmaßnahmen im Zuge von Tiefbauarbeiten, jeweils über mehrere Monate, wurde die Schadstofffahne zwei Mal nach Norden abgelenkt, so dass es zur sogenannten Nordumströmung des F&G-Systems kam. Nach Beendigung der Wasserhaltung schwenkte die Fahne wieder zurück und passiert seitdem die Gates. Eine Veränderung der Hydraulik im Bereich der Gates ist nicht zu erkennen. Die Grundwasserstände im Zu- und Abstrom sind praktisch identisch.

Die Schadstoffkonzentrationen im unmittelbaren Abstrom der Gates sowie im weiteren Abstrom des Systems liegen i. d. R. unter dem Sanierungszielwert. Die Gesamtabreinigung durch die Anlage beträgt ohne Fremdbeeinflussung durch seitliche Wasserhaltung kontinuierlich über 99 %. Bis dato (2012) war kein Aktivkohletausch erforderlich, alle Gates sind noch mit der Erstfüllung bestückt. Das System funktioniert zuverlässig, soweit es nicht durch externe Einflüsse im Seitstrom (Wasserhaltung) gestört wird.

#### *Bio(Sorptions)-Reaktor der Teerfabrik Offenbach*

Das EC-PRB-System mit Bio(Sorptions)Reaktor hat in einem mehrjährigen Betrieb seine Funktionsfähigkeit nachgewiesen und zuverlässig für die Sicherung des kontaminierten Grundwasserabstroms des Standorts gesorgt. Grundlage für diesen Erfolg waren sorgfältige Labor- und Feldversuche, die das innovative Reaktordesign sowie das aktive Betriebskonzept zum Ergebnis hatten.

Die Betriebserfahrungen haben zu einer Verbesserung des Prozessverständnisses beigetragen. Es konnten wesentliche Steuerungsparameter identifiziert und der Aufwand für den Betrieb des Reaktors optimiert werden. Die Umstellung auf die aktive Betriebsweise ermöglicht die effektive Steuerung des Reaktorbetriebs mit konstanten Förder- und Dosiermengen. Die Reinigungsleistung liegt stabil bei > 99 %, die geplante Aktivkohlestufe ist bis auf weiteres nicht erforderlich.

Die positiven Erfahrungen waren Voraussetzung für die Entscheidung zur Erweiterung des Systems zur Sicherung des Gesamtstandorts. Dazu sollen die Leitwände verlängert werden, auf den Bau eines zweiten Gates kann verzichtet werden.

Ein EC-PRB-System mit Bio(Sorptions)-Reaktor ist für Standorte mit vergleichbaren Randbedingungen (Geologie, Hydrogeologie, Schadstoffspektrum, Menge kontaminierter Böden) geeignet, es vermeidet Aushub und beeinträchtigt die Nutzung der Grundstücke nur in geringem Umfang.

Mit dem Ergänzungsband zur Anwendung von durchströmten Reinigungswänden ist der Förderschwerpunkt RUBIN (Reaktionswände und -barrieren im Netzwerkverbund) zum Abschluss gekommen. Auf Initiative des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) fasste das Verbundprojekt von 2000 bis 2012 in zwei Phasen insgesamt 19 Projekte zusammen, die die ökologischen und ökonomischen Potenziale von Reinigungswänden detailliert untersuchten. RUBIN entwickelte sich zu einem umfassenden Erfahrungspool für Reinigungswände.

#### **Literatur**

Birke, V., Burmeier, H., Niederbacher, P., Wegner, M., Maier, M., Kühlers, D., Eggers, J., Maier, D., Weindl, J. und Koch, M. 2004. Zur Abreinigungsleistung durchströmter Reinigungswände (PRB): Hinweise und Rückschlüsse für die Sanierungspraxis und weitere Entwicklung. Altlasten Spektrum, 6/2004, 301-317

Burmeier, H., Birke, V., Ebert, M., Finkel, M., Rosenau, D., and Schad, H., Universität Lüneburg (Edit.) 2006. „Anwendung von durchströmten Reinigungswänden zur Sanierung von Altlasten“, 471 Seiten, Anhänge (“Handbook of Permeable Reactive Barriers for Groundwater Cleanup“, 471 pp., 2 Appendices),  
<http://www.rubin-online.de/deutsch/bibliothek/downloads/index.htm>

**Anschrift der Autoren:**

Dr. Volker Birke

Prof. Dipl.-Ing. Harald Burmeier

Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften

Campus Suderburg

Herbert-Meyer-Straße 7

29556 Suderburg

## 2. Potenziale und Voraussetzungen für die Anwendung von Passiven / Reaktiven Wänden in Österreich

*Timo Dörrie, Dietmar Müller-Grabherr (Umweltbundesamt, Wien)*

### Status in Österreich

Die Studie "Altlastensanierung in Österreich – Effekte und Ausblick", welche 2007 vom Umweltbundesamt und der Kommunalkredit Public Consulting durchgeführt und vom Lebensministerium finanziert wurde, zeigte, dass in Österreich im Vergleich zu anderen europäischen Ländern generell nur sehr wenige Anwendungen von fortschrittlichen bzw. innovativen Sanierungstechnologien<sup>1</sup> zu verzeichnen sind (BMLFUW, 2007).

Bestätigt wurde dieses Ergebnis in einer 2009 vom Umweltbundesamt durchgeführten Umfrage unter 100 österreichischen Sanierungsfachleuten, die im Rahmen der Erstellung des ersten österreichischen Technologiequickskans zu In-situ-Sanierungstechnologien (ÖVA 2010) durchgeführt wurde. Die Ergebnisse der Umfrage zeigten, dass selbst 20 Jahre nach der Installation des ersten europäischen "Funnel & Gate" 1994 in Nordirland, in Österreich nur einzelne Altlasten mit Durchströmten Reinigungswänden abgesichert wurden. Insbesondere reaktive Materialien (z.B. nullwertiges Eisen, Ionenaustauscherharze, metallaktivierte Aktivkohlekatalysatoren) wurden dabei bisher noch nicht eingesetzt, so dass hierzu in Österreich bis dato keine praktischen Erfahrungen existieren. Zwei Planungsbüros gaben an, dass jeweils eine Anwendung mit nullwertigem Eisen geplant wurde, Näheres zur Umsetzung ist jedoch nicht bekannt.

Im Rahmen von UFG-geförderten Projekten wurden in Österreich bis 2014 insgesamt sechs Funnel & Gates mit Aktivkohle realisiert, von denen gem. Altlastenatlas-VO die ersten drei Altstandorte bereits als "gesichert" im Altlastenatlas ausgewiesen sind:

- Linoleumfabrik Brunn am Gebirge (PAK, Mineralöl – Start 1998/1999)
- Teerag-Asdag-Simmering (PAK, Phenol, 111-Trichlorethan – Start 2004/2007)
- Tuttendorfer Breite (KW, BTEX – Start 2008/2009)
- Holzimprägnierung Leitgeb (PAK – 2008/2009)
- Kokerei Linz (PAK, Benzol, Cyanid – Start 2012/2013)
- Spattgrube (KW, Phenol, PAK, Pestizide – Start 2013/2014)

Im Rahmen der UFG-Förderung wurde außerdem folgendes Projekt co-finanziert:

- EU-Projekt „MULTIBARDEM“ – Erforschung „Permeable reaktive Barriere (PRB)“ an einem Altstandort in Oberösterreich (CKW-Reduktion in Biogates und Melassedotation in Herd)

---

<sup>1</sup> I.S. von Dekontamination und Sicherung

Betreffend die Einbringung reaktiver Materialien (Nullwertiges Eisen) zur Quellensanierung oder zum Einsatz in Gates oder vollflächig durchströmten Wände wurden Grundlagen (Labormaßstab) im UFG-geförderten Projekt HALOCRETE erarbeitet.

## Langfristige umweltpolitische Ziele in Österreich

Mit der Veröffentlichung des "Leitbild Altlastenmanagement" (BMLFUW, 2009) haben ExpertInnen der Länder und des Bundes einen langfristig ausgerichteten umweltpolitischen Rahmen beschrieben, der seither – unabhängig von dem in Folge begonnenen legislativen Vorhaben eines „Altlastenverfahrensgesetzes“ – orientierenden Charakter hat und die Sanierung kontaminierter Standorte insbesondere mit folgenden Leitsätzen adressiert:

- Leitsatz 2: Durchführung von Maßnahmen (Dekontamination, Sicherung, Beobachtung, Nutzungseinschränkung) an erheblich kontaminierten Standorten („Altlasten“) innerhalb von zwei Generationen.
- Leitsatz 5: Sanierungsmaßnahmen (Dekontamination, Sicherung) sollen nachhaltig sein und den Umweltzustand dauerhaft verbessern.

Um bei erheblich kontaminierten Standorten bis in das Jahr 2050 einzelfallspezifisch maßgeschneiderte und nachhaltige Maßnahmen umzusetzen, ist aus Sicht des Umweltbundesamtes ein klarer Bedarf für Innovationen gegeben. Wie auch internationale Vergleiche zeigen, kann bei verbesserter Akzeptanz und verstärktem Einsatz von innovativen Sanierungsverfahren und -technologien ein wesentlicher Beitrag zur Reduktion von Projektkosten im Einzelfall bei gleichzeitiger Steigerung der Wirksamkeit erzielt werden.

Die Einsparung von Kosten bei Einzelprojekten wird auch eine wesentliche Voraussetzung darstellen, um die volkswirtschaftlichen Gesamtkosten der Altlastensanierung wie prognostiziert auf 5 – 6 Mrd. € zu begrenzen. Darüber hinaus stehen in Zusammenhang mit dem "Fahrplan für ein ressourcenschonendes Europa" (EK 2011), der generalisiert mittelfristig (bis zum Jahr 2020) eine Steigerung der Effizienz um den Faktor 4 und langfristig (bis zum Jahr 2050) um den Faktor 10 als gemeinsame europäische politische Ziele definiert, aber auch bereits jetzt real in Zusammenhang mit Auswirkungen der globalen Finanzkrise seit 2009, noch weitere Diskussionen zur Abschätzung der Gesamtkosten aus dem Jahr 2007, zur Aufbringung und möglichen Anpassungen bevor.

### Anwendung innovativer Technologien

Neben der Notwendigkeit zur Kosten- und Leistungseffizienz wird die Sicherstellung von Qualität und Nachhaltigkeit bei künftigen Sanierungsmaßnahmen gefordert. Betrachtet man bis dato in Österreich durchgeführte Sanierungsprojekte (z.B. pump & treat) zeigen Erfahrungen, dass sich sehr oft deutlich längere Sanierungszeiträume (>> 5 Jahre) als prognostiziert und damit wesentliche Kostensteigerungen ergeben. Die bei fortschreitender Dauer konventioneller hydraulischer und pneumatischer Maßnahmen stark abnehmende Verfügbarkeit und Mobilisierbarkeit von Schadstoffen wird selten ausreichend berücksichtigt und bildet sich dann meist in einer sehr langsamen, asymptotischen Annäherung an Sanierungszielwerte ab. Weitere Einschränkungen konventioneller In-situ-Verfahren ergeben sich, wenn Durchlässigkeiten oder die Heterogenität des Untergrundes unterschätzt werden, so dass

die Eignung der Technologien standortspezifisch über- oder auch manchmal falsch eingeschätzt wird. Damit stellt sich in weiterer Folge nicht nur erhöhte Unsicherheit in Bezug auf Kosten ein, sondern auch die grundsätzliche Frage, ob Sanierungsziele und -zielwerte mittel- bis langfristig (> 20 Jahre) erreicht werden können.

Sollen Sanierungsmaßnahmen daher nachhaltig sein, lässt sich zeigen, dass die Dauer von Maßnahmen in Hinblick auf Kosten und Ökoeffizienz oft ein entscheidender Faktor ist. Daher ist für einen verstärkten künftigen Einsatz von innovativen Sanierungsverfahren wesentlich, dass Eignung und Wirksamkeit (Effektivität) in Zusammenhang mit den konkreten Voraussetzungen am Standort im Einzelfall transparent und nachvollziehbar geprüft und dargestellt werden. Stellt sich bei einer derartigen Bewertung heraus, dass für Dekontaminationsverfahren die Eignung und Wirksamkeit nur eingeschränkt oder nicht gegeben ist, z.B. wenn

- die Bebauung eine Quellbehandlung nicht zulässt,
- Anwendungsrisiken nicht beherrschbar sind,
- allgemeine Angaben zur Anwendung des Verfahrens fehlen oder
- wenn das Verfahren keine langfristig ausreichende Effizienz besitzt, d.h. dass die Dekontamination in keinem vertretbaren Zeitraum abgeschlossen werden kann,

entstehen erhebliche Unsicherheiten in Bezug auf den "Sanierungserfolg", Wirtschaftlichkeit und Kosten-Wirksamkeitsbewertungen. Im Vergleich dazu kann dann auch unter dem Aspekt Nachhaltigkeit (ökologisch vorteilhaft, wirtschaftlich angemessen und sozial verträglich, d.h. zumindest genehmigungsrechtlich zulässig) eine langfristige Sicherung als beste Alternative qualifiziert werden.

Die bisher in Österreich überwiegend durchgeführten konventionellen Sicherungen (Einkapselungen mit Wasserhaltung, Sperrbrunnen) zeigen, dass diese zwar geeignet und wirksam sind, aber aufgrund ihrer sehr langen Laufzeit der Betriebskostenanteil gegenüber den Investitionskosten immer entscheidender wird und sich damit auch für Sicherungen zwangsläufig die Frage nach der Effizienz immer stärker stellt. Vor diesem Hintergrund sind innovative Ansätze auch bei der Sicherung kontaminierter Standorte gefragt.

## **Machbarkeit und Kosten - generelle Charakterisierung**

### Eignung und Wirksamkeit (Effektivität)

Insgesamt ist eine Nachvollziehbarkeit der physikalischen Grundlagen und Prinzipien für Filterwände mit adsorptiven Materialien sowie für ausgewählte reaktive Materialien bekannt und verstanden. Die Einsatzbereiche können ("Operating Windows") in Bezug auf Standortvoraussetzungen (z.B. Stauerlage, Redoxverhältnisse, hydraulische Fracht, Eisen- und Mangengehalte) und Schadstoffe (Art, Verfügbarkeit, geeignete Filter) generell beschrieben werden.

Die Anwendungsrisiken für Mensch und Umwelt sind i.A. gut beherrschbar. Der ITVA hat das Verfahren als "Stand der Technik" eingestuft (ITVA, 2010). Insbesondere für den Einsatz von Wänden mit Aktivkohlefiltern und elementarem Eisen liegen praktische Anwendungen vor. Für den Einsatz weiterer reaktiver Materialien liegen zum Teil Referenzanwendungen sowie wissenschaftlich begleitete Pilot-Anwendungen vor (s. z.B. RUBIN 2006). Wie allge-

mei bei Sicherungen sind die langfristig notwendigen Kontroll- und Wartungsmaßnahmen zu beachten. Darüber hinaus können sich bei Einsatz bestimmter reaktiver Materialien mit fortschreitender Betriebsdauer bei unzureichender Prozesskontrolle z.B. durch Gaslogging oder Biofouling wesentliche Einschränkungen der Langzeitstabilität und Wirksamkeit der Filter ergeben.

Im Technologiequickscan des ÖVA wurden Adsorptive Wände 2010 als "anwendungsreife Technologien mit erhöhtem Marktpotenzial für Österreich" eingestuft. Die Technologie ist am Markt verfügbar. Reaktive und Katalytische Wände wurden seitens des ÖVA als "Technologien mit Entwicklungsbedarf und -Potenzial" eingestuft. Für diese Technologien wurde eine weiterführende Forschung, die von der Absicherung von Grundlagenwissen bis zu Pilotanwendungen im Feld reicht, als notwendig vor dem Markteintritt angesehen bzw. empfohlen.

#### Wirkungsgrad (Effizienz) und langfristige Kostenentwicklung

Praktische Anwendungen von Durchströmten Reinigungswänden haben gezeigt, dass bei guter Kenntnis des Standortes und genereller Eignung bisher rasch ein guter Sanierungserfolg, d.h. wirksame Sicherung erreicht werden. Insbesondere Funnel & Gates mit Aktivkohle können bei geeigneter Auslegung als sehr zuverlässige Technologie eingestuft werden, mit denen unter Beachtung der Rahmenbedingungen, das Ziel der Maßnahme nicht nur schnell und zuverlässig erreicht sondern auch langfristig effizient eingehalten werden kann.

Aufgrund der vergleichsweise hohen Investitionskosten ist gegenüber Sperrbrunnen aber die Wirtschaftlichkeit erst bei langen Laufzeiten gegeben. Der bauliche Aufwand gegenüber einer konventionellen Absicherung mittels Umschließung (z.B. Kammersysteme) ist als untergeordnet zu beurteilen. Die Betriebskosten passiv Durchströmter Wände sind im Vergleich mit der üblichen Wasserspiegelabsenkung innerhalb einer Umschließung deutlich geringer.

Ein kurzer oder verkürzter Sanierungszeitraum ist mit dieser Technologie definitionsgemäß nicht erreichbar. Durchströmte Wände sind bei langer Dauer, d.h. bei Sicherung eine kosteneffiziente Methode, insbesondere auch bei großflächigen Altlasten. Sie werden tendenziell mit zunehmender Betriebszeit – aufgrund ihres passiven Charakters – immer effizienter. Vorteile im Vergleich mit hydraulischen Maßnahmen und Umschließungen ergeben sich weiters durch die i.A. geringen Auswirkungen auf die Strömungsverhältnisse und den Grundwasserhaushalt, die verminderte Inanspruchnahme von Flächen und sowie einen verringerten Aufwand bei Einstellung der Maßnahme und Rückbau.

#### Machbarkeit und Kosten - Zusammenfassung

Betrachtet man Durchströmte Reinigungswände nach Eignung, Wirksamkeit, Wirkungsgrad und langfristige Kostenentwicklung, lässt sich auf Basis des derzeitigen Erfahrungsstandes in Österreich (Funnel & Gate mit Aktivkohle) sowie aus dem internationalen Raum (Adsorptive und Reaktive Wände) für diese eine insgesamt positive Beurteilung zusammenfassen.

## **Abschätzung zum Anwendungspotenzial in Österreich**

Im Jahr 2007 hat das Umweltbundesamt abgeschätzt, dass unter verstärkter Berücksichtigung und Abwägung von Aufwand und Nutzen sowie der Umsetzung einer standort- und nutzungsbezogenen Vorgangsweise noch an rund 1.800 Altstandorten und 150 Altablagerungen Sanierungsmaßnahmen notwendig sind. Weiters wurden diese Flächen mit erheblicher Verunreinigung in sechs Hauptschadensarten (s. Abb. 1) kategorisiert und die Gesamtverteilung der Schadensarten prognostiziert. Zur Abschätzung der Anzahl erheblich kontaminierter Flächen in Österreich, die sich potenziell für eine durchströmte Reinigungswand eignen, wird diese Prognose als Basis herangezogen, um die Eignung des Verfahren je Schadensart, die spezifische Standorteignung bzw. die Größe des Standortes und mögliche Alternativ- bzw. Konkurrenzverfahren erweitert.

### Generelle Voraussetzungen und Annahmen

Betrachtet man die Eignung durchströmter Reinigungswand nach Schadenstyp, kann prinzipiell angenommen werden, dass diese für die meisten Schadenstypen, d.h. sowohl bei Grundwasserverunreinigungen durch organische als auch anorganische Schadstoffe als geeignet einzustufen sind. Der Einsatz durchströmter Reinigungswände bei Schäden aus der Abfalldeponierung (typische Hausmülldeponien) wird zur Zeit als untergeordnet angenommen. Betreffend Schwermetallschäden sowie Sonstige Schäden wird angenommen, dass sich der Einsatz auf ausgewählte wenige Einzel- bzw. Spezialfälle beschränken wird.

Aufgrund der Tatsachen, dass sich ein Großteil der relevanten Schadenstypen entweder in bebauten Gebieten oder in der Nähe zu Vorfluter befinden – die sich überwiegend im Bereich vergleichsweise durchlässiger quartärer Tal- und Beckenfüllungen liegen, dass die Wirkung möglicher unerwünschter und sekundärer Effekte Durchströmter Reinigungswände als gut beschreibbar qualifiziert wurden und damit unter der Voraussetzung entsprechender Standortverhältnisse als gut kontrollierbar beurteilt werden, werden insgesamt 80 % der Flächen – die bereits auf Basis des Schadenart als gut beherrschbar beurteilten wurden – weiter betrachtet.

Entscheidend für die Umsetzung von Sicherungsmaßnahmen und auch die Anwendung von In-situ-Maßnahmen sind Vergleiche mit technisch geeigneten Verfahren zur Beseitigung der Kontamination und ob ein kontaminierter Standort mit wirtschaftlich angemessenem Aufwand dekontaminiert werden kann. Insbesondere für große Flächen (>10.000 m<sup>2</sup>) ist oftmals eine Dekontamination ökonomisch kaum möglich. Für diese Flächen ist der Einsatz einer durchströmten Filterwand prädestiniert. Aber auch für kleinere Flächen wird dann ein Potenzial gesehen, wenn keine direkte Möglichkeit (Zugänglichkeit) zur Quelle besteht oder der Erfolg einer Sanierung nicht ausreichend wahrscheinlich ist. In diesen Fällen wird ein Funnel & Gate bzw. eine kleinräumig ausgeführte, vollflächig durchströmte Reinigungswand unter den besten Varianten bestehen können. Voraussetzung hierbei ist, dass die Errichtung des Wandbauwerkes im oftmals stark verbauten Raum realisierbar ist.

### Spezifische Voraussetzungen und Annahmen für ausgewählte Schadenstypen

Betreffend Teerölschäden kann abgeschätzt werden, dass von den verbliebenen Standorten rund 20 auf größere Gaswerke, Kokereien und teerverarbeitende Standorte entfallen, sowie rund 35 auf kleinere Gaswerke. Der Rest der erheblich mit teerölkontaminierten Standorte

werden mittlere bis kleinere teerölverarbeitende Standorte sein. Für nahezu allen großen sowie rund 60 % der mittleren bis kleinen Standorte wird ein Potenzial für eine durchströmte Filterwand gesehen, sodass bei 60 Teerölschäden der Einsatz zweckmäßig sein kann.

Betreffend Mineralölschäden kann abgeschätzt werden, dass von den verbliebenen Standorten ca. 120 auf Standorte > 10.000 m<sup>2</sup> entfallen. Es handelt sich v.a. um Standorte auf denen Anlagen der Mineralölgewinnung und -verarbeitung situiert waren. Weitere 150 Standorte entfallen auf Mineralöllager > 10.000 m<sup>2</sup>. 100 weitere Standorte liegen in einer Größenordnung von 1.000 bis 10.000 m<sup>2</sup>, die restlichen darunter. Der Anteil der Standorte > 10.000 m<sup>2</sup>, die nicht dekontaminiert werden können, für die aber eine Beobachtung nicht ausreichen wird, kann mit rund 50 % abgeschätzt werden. In Bezug auf kleinere Standorte ist es insbesondere auch in Zusammenhang mit der relativ guten Abbaubarkeit der Schadstoffe wahrscheinlich, dass eine über Beobachtung hinausgehende Maßnahme höchstens in Einzelfällen erforderlich und die Ausführung als passive Sicherung zweckmäßig ist. Insgesamt könnten daher rund 150 Mineralölstandorte eine plausible Größenordnung darstellen, für die eine Errichtung und der Betrieb Durchströmter Filterwände zweckmäßig sein kann.

Rund 50 Standorte der Lösungsmittelschäden entfallen auf Großreinigungen und metallverarbeitende Großbetriebe die größer als 10.000 m<sup>2</sup> sind. Den weitaus größten Anteil machen aber kleinere bis mittelgroße Betriebsstandorte aus. Wird in Bezug auf große Standorte angenommen, dass in 25 % der Fälle – d.h. bei rund 10 Altstandorten – Durchströmte Filterwände unter den besten Varianten verbleiben würden. In den meisten Fällen ist eine Dekontamination zu erwarten. Betreffend die kleineren Standorte wird angenommen, dass in den eher wenigen Sicherungsfällen, die Sicherung – aufgrund der hohen Verbauungsdichten – mit Sperrbrunnen stattfinden wird. Für rund 40 kleine CKW-Flächen wird ein Potenzial für kleine, vollflächig durchströmte Wände gesehen.

#### Anwendungspotenzial in Österreich - Zusammenfassung

Als Ergebnis einer derart überschlägigen Abschätzung ergibt sich, dass bei rund 260 kontaminierten Standorten (insbes. MKW-, CKW und Teerölstandorte) die Errichtung einer durchströmten Filterwand eine zweckmäßige und angemessene Anwendung darstellen kann. Allgemein wird davon ausgegangen, dass sich insbesondere bei der Sicherung großflächiger kontaminierter Standorte Vorteile für die Technologie ergeben. In städtischen und dicht verbauten Gebieten kann eine Filterwand auch bei kleineren Altstandorten eine gute Alternative darstellen. Ob in Bezug auf Kosten und Praktikabilität Vorteile im Vergleich mit einer aktiven hydraulischen Maßnahme bestehen, kann zuletzt nur die konkrete Planung in der Praxis zeigen.

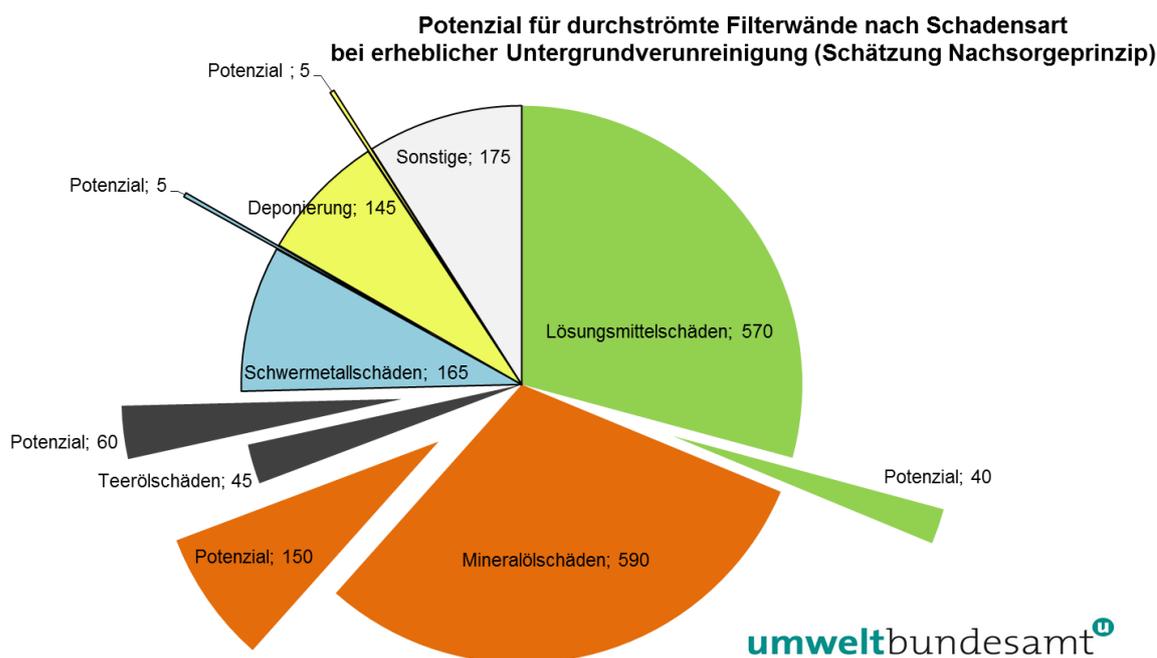


Abbildung: Potenzial (Anzahl Standorte) für durchströmte Reinigungswände in Österreich

### Voraussetzungen und Maßnahmen bei der Anwendung

In Österreich liegen zur Errichtung und Betrieb von Durchströmten Reinigungswänden Erfahrungen aus wenigen Einzelprojekten vor. Betreffend der Filter beschränken sich diese auf Aktivkohle. Großtechnische Erfahrungen zum Einsatz von Reaktiven Materialien gibt es in Österreich nicht. Es wird daher generell empfohlen, dieses Verfahren mit einem vergleichsweise umfassenden Beweissicherungsprogramm durchzuführen.

Bereits in der Variantenstudie bzw. im Einreichprojekt ist die Erreichung der standortspezifischen Ziele der Maßnahmen (Wirksamkeit der Sicherung) sowie zur Effizienz und Nachhaltigkeit der Maßnahme darzustellen. Neben verpflichtenden, genehmigungsrechtlichen Auflagen des Bescheid, wird angeraten im Rahmen des späteren Betriebs, abgestimmt auf die lange Gesamtlaufzeit – ausreichend früh und regelmäßig – Maßnahmenaudits durchzuführen und die Wirksamkeit der Sicherung zu überprüfen, um auch im Sinne einer laufenden Optimierung der Maßnahmen, ausreichend früh steuernd eingreifen zu können.

### Planungsaspekte und rechtliche Rahmenbedingungen

Im Zuge der Planung, Errichtung und des Betriebs einer Filterwand müssen mögliche Auswirkungen auf Beschaffenheit und Qualität des Grundwassers sowie Veränderungen der Strömungsverhältnisse berücksichtigt und beschrieben werden.

Im Vergleich mit allgemein üblichen Maßnahmen zur Sicherung durch Umschließungen und/oder hydraulische Maßnahmen sind im Allgemeinen nur geringe Auswirkungen in Bezug auf quantitative Aspekte, d.h. auf Strömungsverhältnisse und Grundwasserspiegellage zu erwarten. Damit ist allgemein die Wahrscheinlichkeit einer Beeinflussung bestehender Wasser-

rechte oder ein Konflikt in Zusammenhang mit natürlichen oder baulichen Gegebenheiten im Umfeld des Projektstandortes geringer. Die nachvollziehbare Beschreibung im Einreichprojekt und eine laufende Dokumentation und Auswertung von Beweissicherungsmaßnahmen entsprechen damit allgemein bisher gängigen Anforderungen bei Sicherungsmaßnahmen.

Auswirkungen auf die Qualität des Grundwassers können sich prinzipiell in Zusammenhang mit den Materialien des Wandbauwerkes oder den Filtermaterialien ergeben. Dem Stand der Technik entsprechenden Baustoffen zur Errichtung der Dichtwand und der Filterelemente, sowie auch adsorptiv wirkenden Filtermaterialien können weitgehend inerte Eigenschaften unterstellt werden, die keinen mehr als geringfügigen Auswirkungen auf die Grundwasserqualität verursachen.

Bei der Anwendung reaktiver Filtermaterialien müssen die induzierten Reaktionsprozesse und mögliche Auswirkungen auf die Qualität im Grundwasserabstrom charakterisiert und quantifiziert werden. Neben den allgemeinen wasserrechtlichen Bestimmungen zu bewilligungspflichtigen Maßnahmen (§ 32 WRG) und zur Reinhaltung von Gewässern (§ 31 WRG) sind dabei auch Verbote und Beschränkungen für die Einbringung von Schadstoffen in das Grundwasser (§§ 6 und 7 QZV Chemie GW; BGBl. II Nr. 461/2010) zu beachten.

Auch Betrieb und Rückbau stellen einen wesentlichen Planungsaspekt dar. Für den Betrieb durchströmter Reinigungswände sind neben praktischen Aspekten zur Erneuerung des Filtermaterials vor allem die langfristige Erhaltung und Zugänglichkeit der Filterelemente sowie der zur Beweissicherung notwendigen Probenahmestellen wesentlich. Auf Grund der im Allgemeinen nur geringen Auswirkungen auf die Strömungsverhältnisse ergeben sich Notwendigkeit und Umfang von Rückbaumaßnahmen im Allgemeinen insbesondere in Zusammenhang mit Nachnutzungsaspekten. Auf Grund der langen Betriebszeiträume werden sich dabei oft Änderungen von Nutzungsabsichten ergeben.

#### Voraussetzungen vor der Anwendung einer durchströmten Filterwand

Grundvoraussetzung für die Auslegung und Durchführung einer wirksamen Sicherung ist ein gutes System- und Prozessverständnis für einen konkreten kontaminierten Standort. Bei durchströmten Reinigungswänden ist neben der guten Kenntnis des Standortes insbesondere das Verständnis der am Standort in der wassergesättigten Zone stattfindenden Prozesse. Die Hydrogeologie, die hydro- und geochemischen Verhältnisse sowie die dreidimensionale Ausbreitung der Schadstoffe (z.B. Fahnengeometrie) sind vorab ausreichend gut zu untersuchen und zu beschreiben.

Für die Auslegung der Sicherung ist in der Regel ein numerisches Grundwasserströmungsmodell zur Simulation unterschiedlicher Sicherungsszenarien (z.B. unterschiedliche Konfigurationen der Filterwand/-elemente und/oder charakteristische Wechsel der Strömungsverhältnisse) unentbehrlich. Die Auswirkungen auf den Wasserhaushalt oder die Eignung und die Auslegung einer durchströmten Filterwand (z.B. Filtermaterialien, Grundwassermodellierung) für den Standort sind vorab, i.d.R. im wasserrechtlichen Einreichprojekt, umfassend darzustellen.

Einzelfallspezifisch ist zu entscheiden, ob weitere Untersuchungen durchzuführen oder Pilotversuche für den konkreten Standort notwendig sind. So ist zum Beispiel mit Grundwasser vom Standort im Labor oder im Technikumsversuch das Verhalten gegenüber den vorge-

sehenen Reaktor- und Dichtwandmaterialien zu untersuchen, oder die Eignung von Filtermaterialien in Bezug auf die relevanten Schadstoffe im konkreten Einzelfall zu überprüfen. Ohne diese Kenntnisse ist weder die Auslegung des Verfahrens noch die begleitende und abschließende Beurteilung möglich. Einschränkungen der Wirksamkeit der Maßnahmen (z.B. Verlust der Filterdurchlässigkeit) und unzureichende oder auch negative Auswirkungen auf die Umwelt (z.B. keine ausreichende Reinigungsleistung der Filter, toxische Metaboliten) müssen vermieden werden.

Weiters sind vorab Parameter und Auswerteregeln für das notwendige Monitoring der Prozesse, für die Prognose und Beurteilung der Maßnahmen während der Betriebsphase (sh. Maßnahmenaudits) und zur Beschreibung des Erfolges der Maßnahme (Bewertung des „Sanierungserfolges“ bei Abschluss der Maßnahme) zu definieren. Korrespondierend zu den Auswerteregeln, Sanierungszielwerten und sonstigen Parametern ist darauf zu achten, dass während der Errichtungs- und Betriebsphase der Maßnahmen die Qualität und Dichte der Ermittlung von Kenndaten im erforderlichen Umfang eingeplant wird.

#### Empfehlungen zur Betriebsphase

Während der gesamten Sicherungslaufzeit sollten in definierten, wiederkehrenden Abständen Maßnahmenaudits durchgeführt werden. Diese Audits sollten zu Beginn in entsprechend kürzeren Abständen erfolgen, um die generelle Wirksamkeit der Wand und der Filter nachzuweisen. Wesentlich als Ausgangspunkt der Beurteilung sind dabei der Vergleich mit Prognosen und Modellen (z.B. zeitliche Abnahme der Filterleistung, Änderung des Grundwasserströmungsfeld) aus der Planungsphase. Diese Prognosen sind anhand von Kontrollmessungen zyklisch wiederkehrend zu überprüfen. Der Nachweis zur zeitlichen Entwicklung der Wirkung der Maßnahme ist anhand der Auswertung der Monitoringdaten z.B. durch Trendkurven darzustellen. Als Kennzahlen für die im Einzelfall relevanten Schadstoffe sind vor allem absolute und relative Reduktionen von Konzentrationen und Frachten zu ermitteln. Die Darstellung der Reduktion kann dabei sowohl im Vergleich mit der Ausgangssituation vor Durchführung der Maßnahme als auch z.B. alle 2 Jahre vergleichend über den Betriebszeitraum (z.B. als Gradient einer Konzentrationsab- bzw. -zunahme) erfolgen. Darüber hinaus sind auch alle notwendigen Betriebsparameter (allgemeiner Grundwasserchemismus, Schadstoffbelastung der Filter, Erneuerung des Filtermaterials, usw.) zu dokumentieren.

Im Rahmen der Maßnahmenaudits kann die Prüfung der Wirksamkeit (und des Wirkungsgrades) als Abweichung der tatsächlich eingetretenen Effekte (z.B. Schadstoffreduktion im Abstrom) im Vergleich mit den prognostizierten Trends und Kennwerten dargestellt werden. Damit kann die erreichte Verminderung der Schadstoffausbreitung quantifiziert dargestellt werden oder auch eine unzureichende oder abnehmende Filterleistung rechtzeitig erkannt werden. Veränderungen von Trends, ungewöhnliche Messwerte, Betriebsdaten (z.B. spezifischer Verbrauch an Filtermaterial) sind besonders zu beachten. Wenn erforderlich sind die Notwendigkeit der Aktualisierung von Prognosen oder etwaige betriebliche Anpassungen (z.B. andere Filtermaterialien, Zudotationen, Monitoring) zu prüfen.

#### Abschluss der Maßnahmen

Grundsätzlich werden Durchströmte Reinigungswände errichtet, um bei kontaminierten Standorten eine Ausbreitung von Schadstoffen mit dem Grundwasser zu verhindern bzw. auf ein tolerierbares Ausmaß zu vermindern. Bei entsprechender Beweissicherung der

Qualität des Grundwassers im Zustrom der Filter einer Reinigungswand kann auch kontrolliert werden, ob mittel- oder langfristig ein Rückgang der Verunreinigungen zu beobachten ist und bei entsprechender statistischer Signifikanz die konkrete Dauer der Maßnahme abgeschätzt werden. Da im Allgemeinen von der langfristigen Durchführung einer entsprechenden Maßnahme auszugehen ist, sollte aber wiederkehrend auch geprüft werden, ob inzwischen alternative, insbesondere aber ergänzende Sanierungstechnologien am Markt verfügbar sind, die eine wirksame und effiziente Dekontamination der Schadstoffquelle (im Schutz einer durchströmten Filterwand) und damit eine zeitliche Verkürzung der Sicherung möglich machen.

### **Vom Potenzial zur Routineanwendung - dokumentierte Erfolge und Vorteile**

Zur Erhöhung der Akzeptanz könnten die bisher in Österreich errichteten Durchströmten Reinigungswände und in Zukunft anstehende Anwendung an konkreten Standorten zentral erfasst und als Demonstrationsprojekte einheitlich dokumentiert werden. Hierbei sollte der Fokus auf die Darstellung der Effektivität, Effizienz und Nachhaltigkeit in Abhängigkeit der Betrachtung von spezifischen Kosten und Energieeinsatz gelegt werden. Die Dokumentation sollte über das Internet öffentlich zugänglich sein. Auswertungen und Berichte zu einzelnen Projekten (z.B. Maßnahmenreports des ÖVA) könnten einen weiteren wesentlichen Beitrag leisten, die Vorteile der Technologie glaubwürdig darzustellen, Erfolge und das Anwendungspotenzial besser greifbar zu machen. Auf Grund der Sammlung der Erfahrungen könnten dann schließlich auch der vorliegende Beitrag zur Abschätzung zu Potenzialen und Voraussetzungen für die Routineanwendungen konkretisiert werden und ein weiterer Schritt zur Beschreibung des Standes der Technik umgesetzt werden.

### **Literatur**

BMLFUW (2007): Altlastensanierung in Österreich – Effekte und Ausblick. Hrsg.: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Abteilung VI/3, Abfallbehandlung und Altlastensanierung, Wien, Oktober 2007. Download unter: <http://umwelt.lebensministerium.at/article/articleview/61109/1/7008/>

BMLFUW (2009): Leitbild Altlastenmanagement – Sechs Leitsätze zur Neuausrichtung der Beurteilung und Sanierung von kontaminierten Standorten. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Abteilung VI/3, Abfallbehandlung und Altlastensanierung, Wien, Mai 2009. Download unter: <http://umwelt.lebensministerium.at/article/articleview/80289/1/7008>

EK (2011): Fahrplan für ein ressourcenschonendes Europa – Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen; Brüssel, September 2011. Download unter: [http://ec.europa.eu/resource-efficient-europe/index\\_de.htm](http://ec.europa.eu/resource-efficient-europe/index_de.htm)

ÖVA (2010): Technologiequickscan - In-situ-Technologien". ÖVA – Österreichischer Verein für Altlastenmanagement, Wien, Mai 2010: Download unter: [http://cms.altlastenmanagement.at/documents/publikationen/oeva\\_quickscan\\_juni2010.pdf](http://cms.altlastenmanagement.at/documents/publikationen/oeva_quickscan_juni2010.pdf)

ITVA (2010): Arbeitshilfe – H1-13: Innovative In-situ-Sanierungsverfahren. ITVA – Ingenieurtechnischer Verband für Altlastenmanagement und Flächenrecycling e.V., Berlin, Juni 2010. Download: <http://www.itv-altlasten.de/262.0.html>

RUBIN (2006): Anwendung von durchströmten Reinigungswänden zur Sanierung von Altlasten. bmbf Vorhaben 0271241, Hrsg.: Universität Lüneburg, Dresden, Juli 2006: <http://www.rubin-online.de/>

### 3. Das Gesamtsicherungskonzept – Fallbeispiel Kokerei Linz

*Christoph Angermayer, voestalpine Stahl GmbH, Linz*

#### Zusammenfassung

In den nächsten mindestens zehn Jahren wird die Altlast O76 „Kokerei Linz“ auf dem Gelände der voestalpine in Linz gesichert bzw. saniert. Durch die Zerstörungen im Zweiten Weltkrieg wurde der Untergrund stark kontaminiert. Das zeigt auch das Ergebnis umfangreicher Untersuchungen. Die Kosten des Gesamtprojektes belaufen sich auf rund 154 Mio. EUR. Der offizielle Startschuss für die Sanierung der Altlast O76 „Kokerei Linz“ erfolgte im Herbst 2012.

#### Hintergrund Kriegseinwirkung

Im Jahr 1939 entstanden die damaligen „Hermann Göring-Werke“ in Linz. Nach drei Jahren Bauzeit wurde der erste Hochofen angeblasen. Damals wurden rund 1,5 Mio. Tonnen Roheisen jährlich von 1941 bis 1944 für die Erzeugung von Panzerblechen produziert. Die Kokerei wurde nach den weitgehenden Zerstörungen gegen Ende des Zweiten Weltkriegs wieder aufgebaut und in Betrieb genommen. Neben Benzol wurde damals auch Teer als Nebenprodukte der Kokserzeugung vor Ort destilliert. Durch die Kriegseinwirkungen (siehe Abbildung 1) liegen im Untergrund des Altstandortes daher massive Kontaminationen vor. Ausgehend von diesen Untergrundverunreinigungen im Boden findet ein erheblicher Schadstoffeintrag in das Grundwasser statt. Dabei hat sich im Grundwasser eine Schadstofffahne von mehreren hundert Metern Länge ausgebildet.



Abbildung 1 - Rohbenzolanlage nach dem Fliegerangriff am 25. 7.1945 (linkes Bild) und zerstörte Waschölleitungen beim Sortenbunker 31.3.1945 (rechtes Bild) [Quelle: voestalpine Archiv]

#### Altlastenausweisung und Prioritätenklassifizierung

In den Jahren 2003 bis 2008 wurden vom Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft und dem Landeshauptmann von Oberösterreich ergänzende Untersuchungen an der Verdachtsfläche „Kokerei Linz“ veranlasst. Darauf aufbauend wurde seitens der Umweltbundesamt GmbH eine Gefährdungsabschätzung für die damalige Verdachtsfläche durchgeführt.



179/1, 324/4, 366, 1063/3, 1063/4 (alle KG St. Peter, Stadtgemeinde Linz) eine Fläche von rd. 35,1 ha.

Mit der Notifikation der Förderung durch die Wettbewerbsbehörde der EU im Jahr 2010 wurde die Einzelbeihilfe durch den Bund für die Altlastensicherung und -sanierung des Standortes in Höhe von 146,3 Mio. Euro genehmigt. Die Differenz von mehr als sieben Millionen Euro auf die Gesamtsumme von rund 154 Mio. EUR. übernimmt die voestalpine. Zudem wurde belegt, dass gegenüber dem Wettbewerb weder Vor- noch Nachteile entstehen. Die Altlast liegt im Linzer Becken im Bereich quartärer Kies- und Sandablagerungen mit einer Mächtigkeit von rd. 12 m auf einer Seehöhe von etwa 256 m ü. A. Darunter befindet sich tertiärer Schlier (siehe Abbildung 3). Die Mächtigkeit künstlicher Anschüttungen („Bombenschutt“, etc.) beträgt durchschnittlich mehrere Meter. Die ehemaligen Donauarme wurden bis zu einer Mächtigkeit von 8 m aufgefüllt.

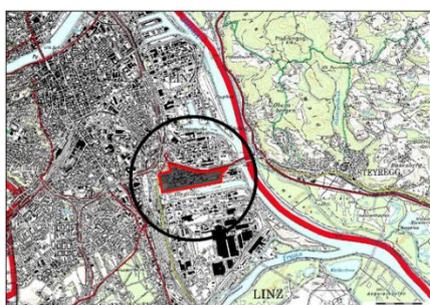


Abbildung 3 - Lage der Altlast O76 [Quelle: Gefährdungsabschätzung 2009]

### Das Gesamtkonzept zur Sanierung / Sicherung - Maßnahmenmix

Die Sicherung bzw. Sanierung der Altlast O76 „Kokerei Linz“ muss aufgrund ihrer Größenordnung und aufgrund des aufrecht zu erhaltenden Produktionsbetriebs des integrierten Hüttenwerks in Teilmaßnahmen über einen Zeitraum von rd. 10 bis 12 Jahren erfolgen. In der Sanierungsvariantenstudie von 2009 wird daher unter Berücksichtigung ökologischer und ökonomischer Gesichtspunkte folgende Maßnahmenkombination zur nachhaltigen Sicherung und Sanierung der Altlast O76 „Kokerei Linz“ vorgeschlagen:

- *Funnel&Gate-System zur Grundwasserabstromsicherung*  
Sicherung der wassergesättigten Bodenzone mittels Funnel & Gate-System (Dichtwand mit reaktiven Fenstern entlang der nordöstlichen Grenze der Altlast bis zur Donau) und einer damit verbunden Grundwasserhaltung.
- *Teilräumung der ungesättigten Bodenzone, Bodenwäsche und Wiederverfüllung*  
Aushub und Behandlung von kontaminierten Bodenmaterialien (Hot-Spot Bereichen auf Basis von Sanierungszielwerten) in der Nasstrenn- und Bodenverwertungsanlage am Standort und anschließende Wiederverfüllung am Standort bzw. Entsorgung der Schadstoffsenken (z.B. thermische Verwertung).
- *Bodenluftabsaugung in der ungesättigten Bodenzone*  
Dekontamination der ungesättigten Bodenzone von leichtflüchtigen Kohlenwasserstoffen in einigen Bereichen (z.B. ehemals Benzolanlage).
- *Schadstoffphasenabschöpfung in der gesättigten Bodenzone*  
Im Rahmen der Teilmaßnahme Phasenschöpfung ist der Aufschluss des oberflächennahen, grundwasserführenden Horizontes mit einer Mächtigkeit von rd. 10 m

durch Vertikal- (Erfassung LNAPL) und Horizontalfilterbrunnen (Erfassung DNAPL) vorgesehen. Das Ziel liegt in der Fassung (Drainagierung, Förderung) der auf dem Stauer aufsitzenden schweren Phase (DNAPL) im Übergangsbereich des quartären Aquifers zum tertiären Stauer / Schlier sowie der auf dem Grundwasserkörper aufschwimmenden leichten Phase (LNAPL).

Durch die Entfernung der Kriegsschäden im Untergrund und Sanierung des Altlastenareals, soll die Umweltsituation vor allem in Bezug auf das Schutzgrund Grundwasser erheblich verbessert werden. Für die laufende Produktion ergibt sich nach Abschluss der Sanierung neben dem Umwelteffekt auch der Vorteil, dass das saubere Grundwasser als Nutzwasser zur Verfügung steht. Der Einsatz des nahezu konstant temperierten Grundwasserreservoirs bringt aus energetischer Sicht Vorteile, da v.a. in den Sommermonaten auf eine zusätzliche Vorkühlung des bisher verwendeten Donauwassers verzichtet werden kann. Das sanierte Areal wird auch wieder als Betriebsfläche nutzbar gemacht, wobei aber aus heutiger Sicht freilich noch nicht gesagt werden, welche Anlagen dort künftig betrieben werden.

### **Aktueller Stand der Umsetzung**

Die o.a. Maßnahmen sind auf Basis von Einreichplanungen im Wesentlichen bereits von der lokalen UVP-Behörde, dem Amt der oberösterreichischen Landesregierung, bescheidmäßig bewilligt. Für die Phasenschöpfung ist vorerst ein Versuchsbetrieb genehmigt, der ab ca. Herbst 2014 zur Festlegung des wirksamsten Systems (Absaugung von aufschwimmenden und aufsitzenden Teerölphasen, Phasentrennung und Entsorgung) durchgeführt wird. Für die Räumung der Hot-Spot Bereiche der einzelnen Sanierungsteilflächen ist jeweils ein sogenanntes „projektspezifisches Entsorgungskonzept“ (Sanierungskonzept) der Behörde vorzulegen. Die Behörde hat dem projektspezifischen Entsorgungskonzept für die STF2a im Jänner 2013 und für die STF1 im November 2013 per Bescheid zugestimmt.

Mit dem Bau des Funnel & Gate-Systems wurde im Juni 2012 begonnen. Die rd. 1.650 m lange und 13 m tiefe Schlitzwand (beginnt bei Stauerunterkante von rd. - 17 m bis - 4 m unterhalb GOK) wurde im Dezember 2012 fertiggestellt. Die Herstellung von drei im Grundwasserzuströmung situierten Entnahmehäupten zur Regulierung des Grundwasserspiegels aufgrund des Aufstaus durch die Dichtwand (Schlitzwand) wurde im Mai 2013 fertiggestellt. Mit dem Bau der 12 Gates (reaktive, mit Aktivkohle befüllte Fenster aus Betonfertigteilelementen) wurde im März 2013 begonnen (siehe Abbildung 4 und 5). Die bauliche Fertigstellung des gesamten Funnel & Gate-Systems war im Jänner 2014. Derzeit laufen die Arbeiten zur Feinabstimmung des Gesamtsystems um bis spätestens Mitte des Jahres 2014 die vollständige Funktionsfähigkeit herzustellen.

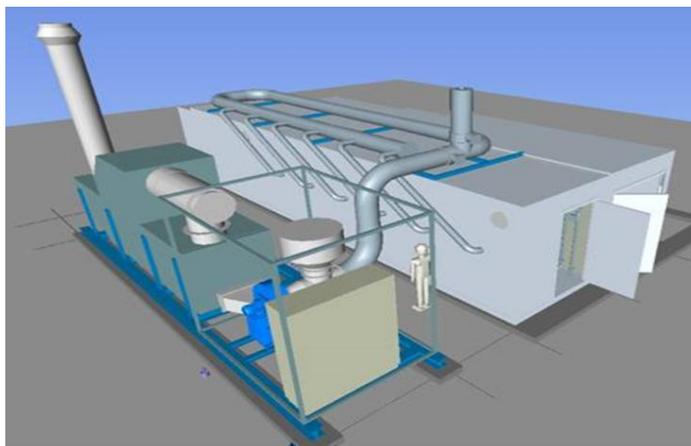


**Abbildung 4 - Maßnahmen zum ArbeitnehmerInnenschutz während der Errichtungsphase der Gates (linkes Bild) u. durchströmbare Betonfertigteile der Gates (rechtes Bild) [Quelle: Projektdokumentation]**



**Abbildung 5 - Aushubarbeiten im Bereich Gate 12 (linkes Bild) und Einbau Filterkorb in das Gate (rechtes Bild) [Quelle: Projektdokumentation]**

Für die Sanierungsmaßnahme Phasenschöpfung wurden mittels Bohrlochgeophysik und flächenhaften, geophysikalischen 3D-Stauerkartierung die Muldenzonen am Schlierrelief detektiert um darauf basierend die potentiellen Lokaltäten von DNAPL-Phasen zu ermitteln (Phase siehe Abbildung 6). Auf Grundlage einer Simulation des Schadstoffaustrages für DNAPL und LNAPL wurden weiters wesentliche Einflussfaktoren auf die Austragsrate (z.B. Wärmeeintrag zur Erhöhung der Mobilität) ermittelt, sowie die Entnahmebrunnen in Anordnung und Form variiert (vertikal, horizontal). Auf Basis der Simulationsergebnisse wurde eine optimale Schadstoffabschöpfungsvariante für LNAPL (=Vertikalfilterbrunnen) und DNAPL (=Horizontaldrainage in der Übergangszone) festgelegt. Die bauliche Umsetzung dieser Varianten soll bis Herbst 2014 erfolgen, sodass es danach möglich ist die Modellierungsergebnisse mit den Ergebnissen aus den Betriebsdaten zu verifizieren bzw. zu verfeinern. Mit den gewonnenen Erkenntnissen kann in Folge die weitere Vorgehensweise, Anordnung und Auslegung der Phasenabschöpfung in großem Maßstabe technisch spezifiziert und optimiert werden. Zudem sollen daraus optimale Entsorgungswege für die Phasenmaterialien am Standort ermittelt werden um Transportwege zu minimieren.



**Abbildung 6 - DNAPL Phase (linkes Bild) und 3D Darstellung Bodenluftabsaugungsanlage (rechtes Bild)**  
[Quelle: Projektdokumentation]

Für die Bodenluftabsaugung wird derzeit das Absaugfeld mittels Bodenluftmessungen und einer Bodenluftmodellierung definiert und darauf basierend die entsprechenden Absaugpegel und Unterdruckmessstellen errichtet. Parallel dazu wird die mobile Containeranlage mit dem erforderlichen Equipment (Verdichter, Messtechnik, Wärmetauscher, katalytische Nachverbrennung, etc.) innerhalb des Einzugsbereiches der Absaugpegel aufgestellt (siehe Abbildung 6). Der Betrieb der Bodenluftabsaugungsanlage ist ab Mitte 2014 vorgesehen.

Auf der Sanierungsteilfläche 2 (STF2) im Norden des Werksgeländes wurde bereits eine Lagerhalle für die Zwischenlagerung von kontaminiertem Aushubmaterial errichtet (siehe Abbildung 7). Davor befindet sich eine entsprechend ausgestattete Freilagerfläche. Die Arbeiten zur Errichtung der zugehörigen Abluftreinigungsanlage (Aktivkohlefilter) für die Lagerhalle laufen derzeit. Es ist vorgesehen, dass diese Anlage ca. Mitte 2014 in Betrieb gehen wird.



**Abbildung 7 - Lagerhalle mit davor liegendem Freilager und in Bau befindlicher Abluftreinigungsanlage (linkes Bild) und Kontamination der ungesättigten Bodenzone in einem Hot-Spot auf der STF2a (rechtes Bild) [Quelle: Projektdokumentation]**

Mit der Räumung von Hot-Spot Bereichen der ungesättigten Bodenzone (siehe Abbildung 7), Bodenwäsche und Wiederverfüllung wurde Anfang 2013 auf der Sanierungsteilfläche 2a (Fläche rd. 60.000 m<sup>2</sup>) begonnen. Bis Herbst 2013 wurde auf dieser Fläche eine Menge von rd. 40.500 t selektiv Material ausgehoben, welches die festgelegten Sanierungsgrenzwerte überschritt. Mehr als die Hälfte dieses Materials (rd. 25.000 t) konnte vor Ort in der Nasstrenn- und Bodenverwertungsanlage behandelt werden. Die daraus gewonnenen Produkte wurden zur Wiederverfüllung der Aushubbereiche herangezogen und die Schadstoffsenken einer ordnungsgemäßen Entsorgungsschiene zugeführt. Ab April 2014 wird mit der Räumung der Hot-Spot Bereiche auf der Sanierungsteilfläche 1, dem westlichen Gebietsabschnitt mit einer Fläche von rd. 48.000 m<sup>2</sup> fortgesetzt. Hierbei geht man von einer gesamten Aushubmenge von rd. 90.000 t aus, wobei auf dieser Fläche vor allem die verbliebene Gebäudesubstanz (Fundamente der ehemaligen Koksofenbatterie) hoch belastete Bereiche aufweist.

Für die voestalpine ist die Sanierung der Altlast O76 „Kokerei Linz“ der Abschluss eines vor 25 Jahren begonnenen Prozesses im Umweltbereich, in den man circa 1 Mrd. Euro investiert hat. Auf jeden Fall ist es auch ein wesentlicher Beitrag zur Absicherung der nachhaltigen Produktion in Linz, zum Wohle der Menschen und der Umwelt.

## 4. Technische Auslegung und erste Ergebnisse – Fallbeispiel Kokerei Linz –

*HIRSCH Günter / GNJEZDA Gregor – voestalpine Stahl GmbH, Linz / SV-Büro für  
Boden + Wasser GmbH, Gallneukirchen*

### Technische Auslegung

#### Allgemein

Durch die gegenständliche Sicherungsmaßnahme in Zusammenhang mit der Sanierung der Altlast O76 „Kokerei Linz“ in Form einer teilweisen Umschließung des Standortes mittels einer Dichtwand („Funnel“) soll die Ausbreitung umweltrelevanter Emissionen wirksam unterbunden werden. Darüber hinaus wird mit sogenannten „reaktiven Filterelementen“, die in Teilabschnitten der Dichtwand integriert werden, das durchströmende Grundwasser von schädlichen Inhaltsstoffen aus der Altlast gereinigt.

Im Detail besteht die Absicherungsmaßnahme aus einer abstromseitig der Kontamination gelegenen linienförmigen Dichtwand, die in Abständen von 140 bis 150 m mit 12 reaktiven Filterelementen (Gates) ausgestattet ist. Die reaktiven Elemente sind im Gegensatz zur Dichtwand ( $k_f = 10^{-9}$  m/s) gut durchlässig ( $k_f = 10^{-2}$  m/s) und werden durch den hydraulischen Gradienten, der aus der nunmehr quer zum Grundwasserstrom situierten Dichtwand und der Abspundung zur Donau und dem Hafenbecken hin resultiert, selbsttätig durchströmt.

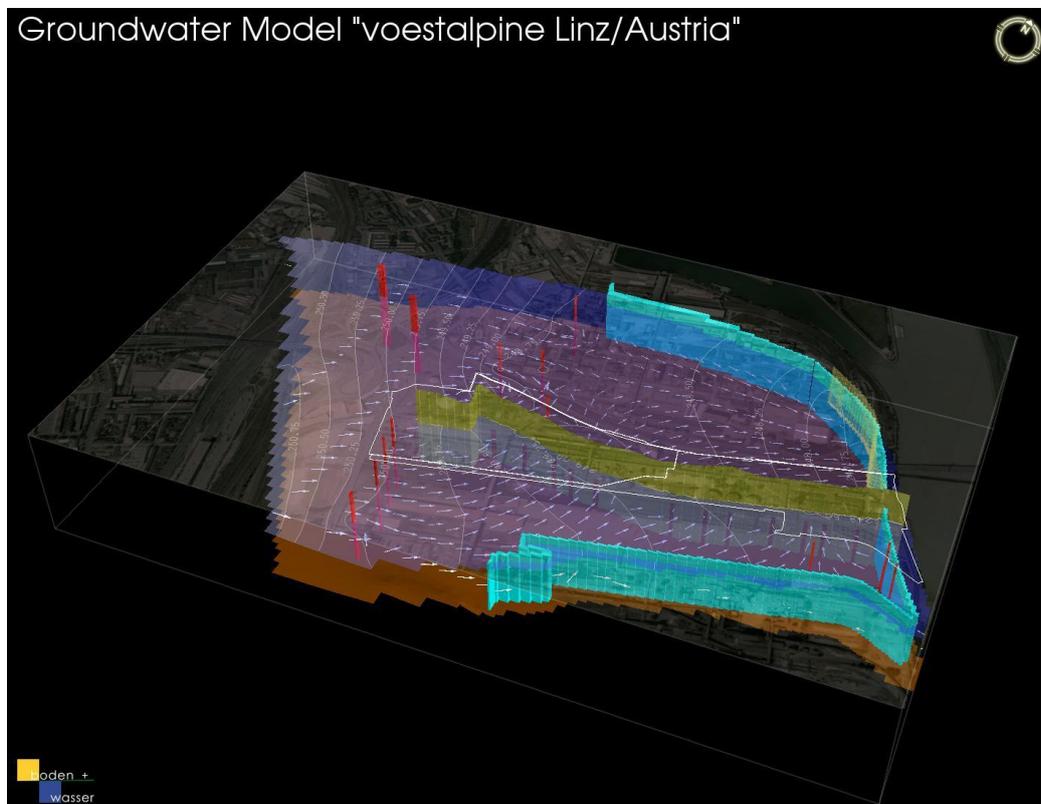


Abb. 1: Grundwassermodell

Im nicht kontaminierten Zustrombereich wirkt sich die Inbetriebnahme von 3 zusätzlichen Förderbrunnen positiv auf die Grundwasserströmungsrichtung (senkrecht zur Dichtwand) als auch auf den potentiellen Grundwasseraufstau aus. Das geförderte Grundwasser wird über eine Druckleitung in das kokereiinterne Nutzwassernetz eingespeist und zu Kühlzwecken genutzt.

### Dichtwandverlauf

Der Dichtwandverlauf beginnt im Westen beim St. Peterweg (Nähe Koksgasgasometer), verläuft entlang der ÖBB-Trasse Summerauerbahn zum Teil auf Grundstücken der ÖBB bis zum östlichsten Bereich der Anbindung an die bestehende Schmalwand der Austrian Hydro Power. Als terminliches Errichtungsfenster für den Verlauf musste eine seitens der ÖBB vorgesehene Gleissperre der Hauptverbindung Linz-Prag (Summereauerbahn) im Sommer 2012 eingehalten werden. Die Errichtung von rd. 660 lfm Schlitzwand auf Grundstücken der ÖBB wurde in diesem Zeitfenster durchgeführt.

Die Gesamtlänge der Dichtwand beträgt rd. 1.650 m, die mittlere Tiefe von Dichtwandkopf bis zur Stauereinbindung beträgt rd. 11,5 - 13,5 m. Die daraus resultierende Dichtwandfläche ohne Abzug der Gesamtfläche an Filterelementen unter Berücksichtigung einer Einbindetiefe von rd. 1,5 m in den Stauer beträgt rd. 21.700 m<sup>2</sup>. Bis auf die Bereiche diverser Einbautenquerungen der Dichtwand wurde diese als Schlitzwand ausgeführt. Die Schlitzwandstärke beträgt 0,6 - 0,8 m. Als Durchlässigkeitskriterium war ein kf-Wert von  $< 10^{-9}$  m/s einzuhalten. Sämtliche Querungen und der Anschluß an die bestehende Schmalwand (AHP) wurden mittels HDBV-Verfahren durchgeführt. Die erforderlichen Säulenausbreitungen wurden mittels thermischer Abbindesondierungen nachgewiesen.

Auf der Gesamtlänge der Dichtwand wurden insgesamt 12 Gates eingebaut (siehe Abb. 1 und 2). Sämtliche Filterelemente wurden innerhalb der Altlastengrenze bzw. Verdachtsflächengrenze „Kraftwerk voestalpine“ auf Grundstücken der voestalpine Stahl GmbH errichtet.

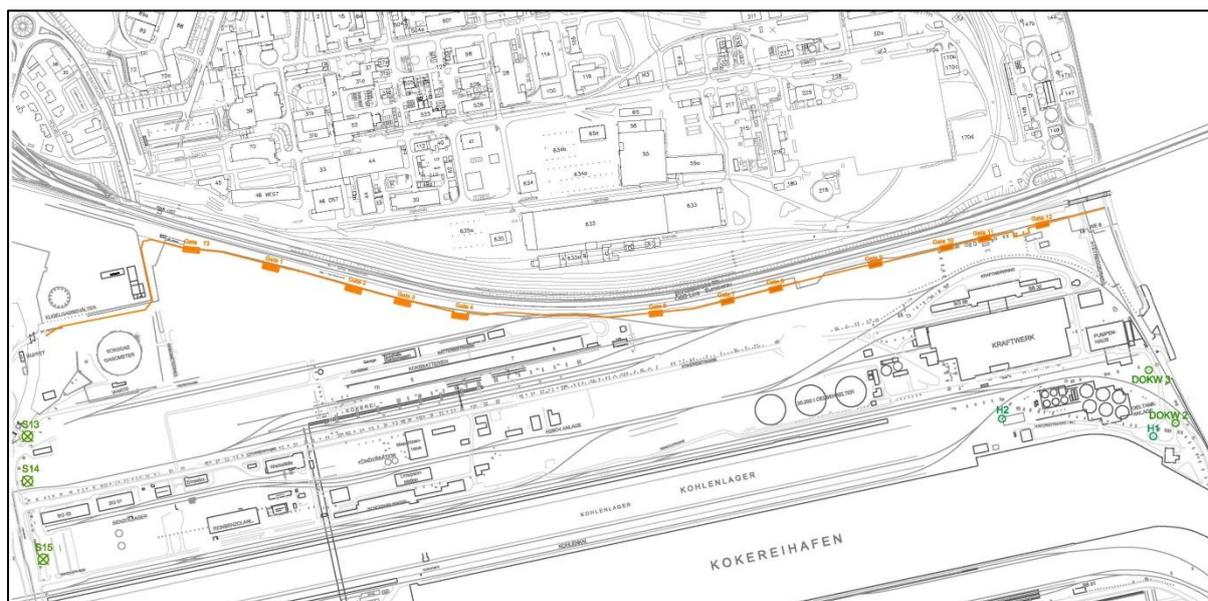


Abb. 2: Lageplan

## Gates

Der Aushub der Gates erfolgte in Spundwandbauweise mit fünf Aussteifungshorizonten. Ein Gate besteht aus 3 - 4 Fertigteil Baugruppen. Jede Baugruppe enthält 3 - 4 Filterelemente, so dass insgesamt 9 - 16 Filterelemente zum Einsatz kommen. Für die Größe eines Filterelements wurde die Fläche mit rd. 5 m<sup>2</sup> angesetzt, so dass sich je Gate eine Gesamtfilterfläche von rd. 45 m<sup>2</sup> bis 80 m<sup>2</sup> ergibt. Die Gesamtbreite eines Gates beträgt je nach Anzahl der Fertigteil Baugruppen zwischen 16,5 und 22,5 m (Siehe Abbildungen 2, 3 und 4).

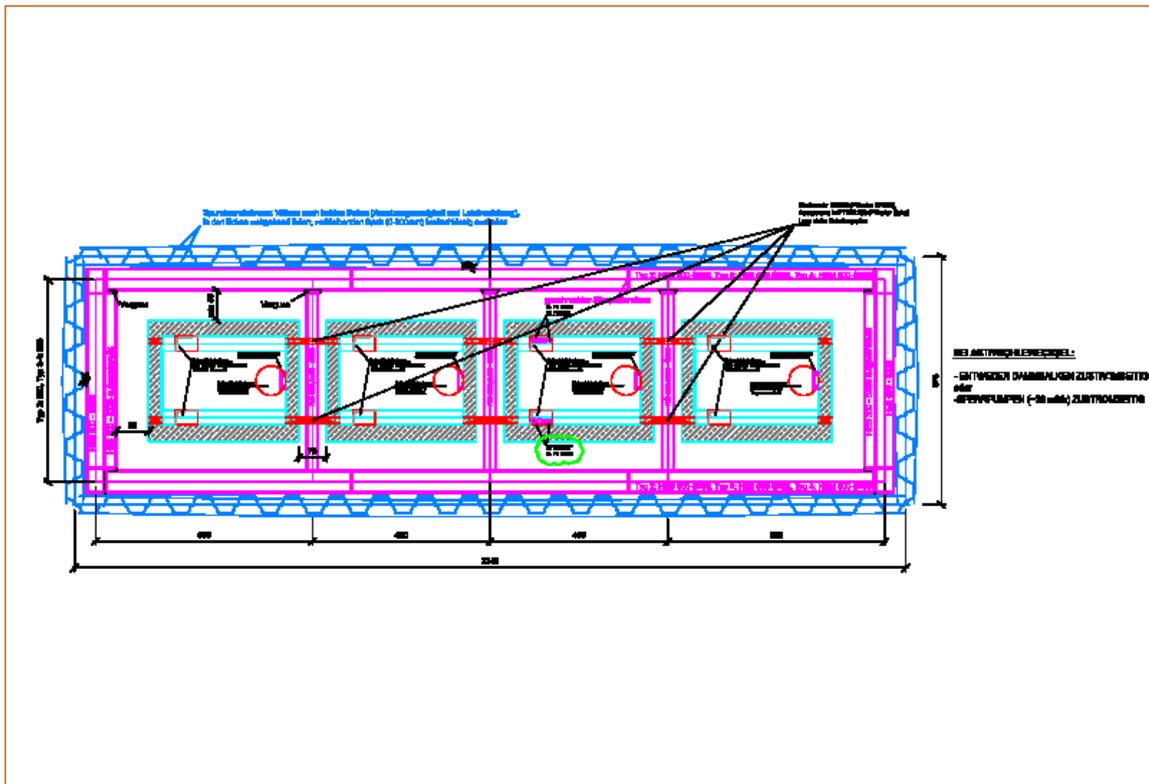


Abb. 3: Grundriss - Gate

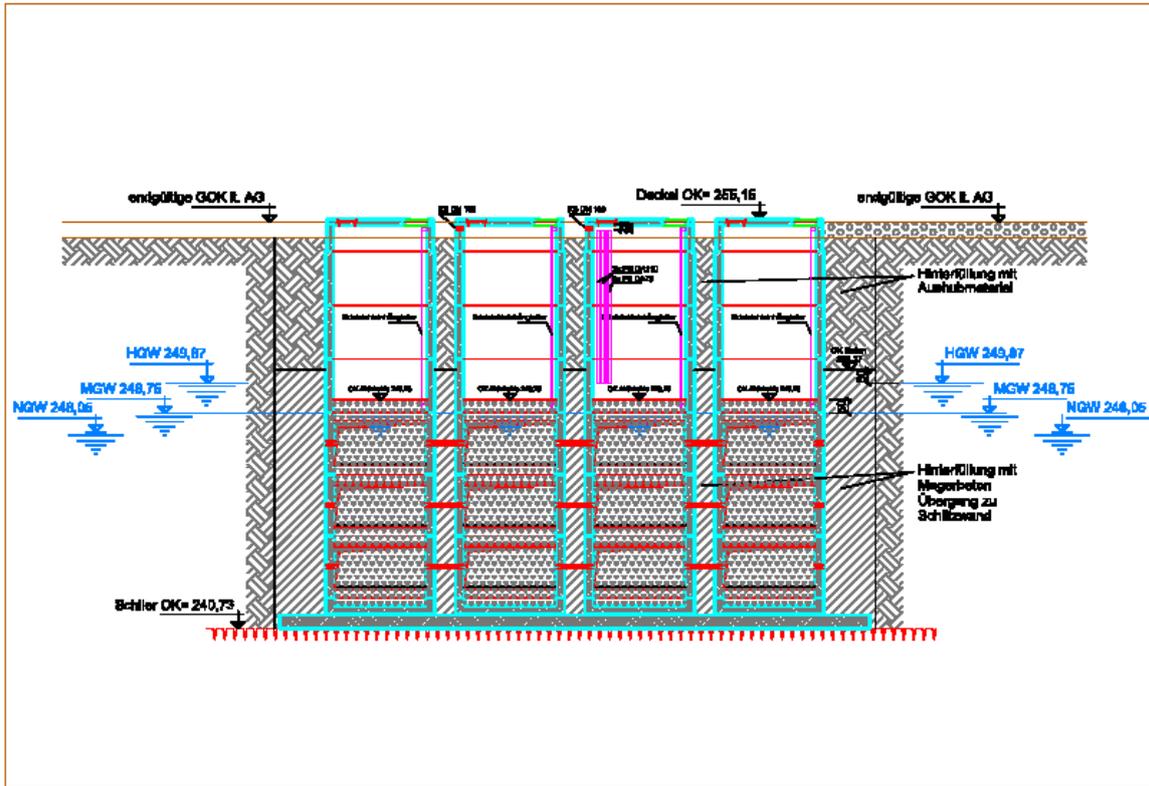


Abb. 4: Längsschnitt - Gate

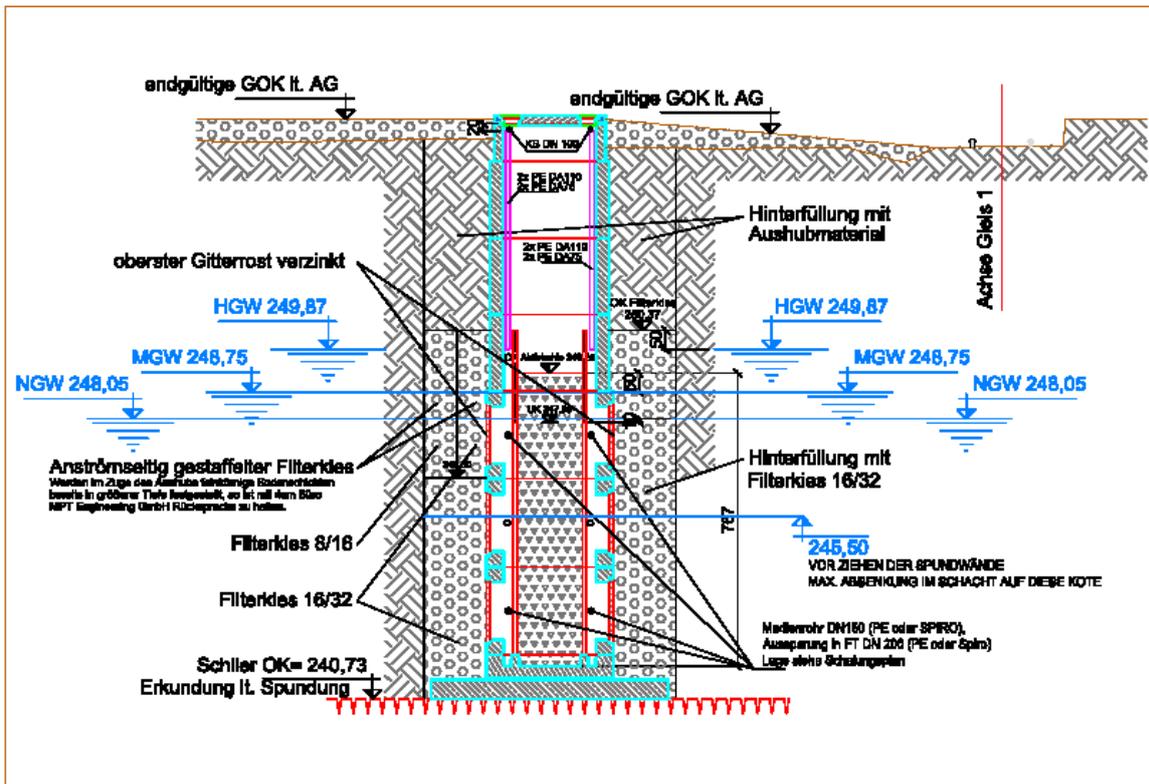


Abb. 5: Querschnitt - Gate

In nachstehender Tabelle 1 finden sich die entsprechenden hydraulischen Basisdaten zu den einzelnen Gates.

Gate Nr.	Rechts	Hoch	Aquiferbasis [müA]	GOK [müA]	GW Anstrom müA	WS Anstrom [m]	va Anstrom [m/d]	Q [m³/s]	Q [m³/d]
13	73568,8	350193,8	240,7	255,3	248,75	8,05	8,5	0,00395	341
1	73675	350175	240,6	255,2	248,77	8,08	15,4	0,00639	552,5
2	73812,5	350137,5	240,6	255,2	248,66	8,06	13,9	0,00604	521,7
3	73906,3	350112,5	240,8	254,9	248,67	7,87	10,8	0,00489	422,3
4	73987,5	350100	241,1	255,2	248,69	7,56	11,2	0,00501	433,1
5	74162,5	350093,8	239,7	255,3	248,6	8,9	13,4	0,00498	430,6
7	74343,8	350118,8	239,1	256	248,48	9,38	10	0,00384	332,2
8	74418,8	350137,5	239,1	256,5	248,43	9,33	8,4	0,00308	266,2
9	74543,5	350168,8	240,1	255,1	248,32	8,22	10	0,00327	282,8
10	74643,8	350193,8	239,3	255,1	248,24	8,94	11,1	0,00393	339,3
11	74700	350206,3	239,1	255	248,2	9,1	13,7	0,00492	425,1
12	74781,3	350225	239,1	255,1	248,18	9,08	23	0,00853	737,2

Tab. 1: Gates – Hydraulische Grundlagendaten

### Beweissicherung

Im Wesentlichen besteht das Beweissicherungsprogramm aus einer kontinuierlichen Messung der Grundwasserspiegel und regelmäßigen Analysen der Wasserqualität (Online Datensammler).

Das Beweissicherungssystem besteht aus:

- 24 Gatepegel innerhalb der 12 Gates (Freiwasserzone: Zu- und Abstrom)
- 1 neuer Pegeln am westlichen Ende der Dichtwand
- 3 neue Förderbrunnen
- 1 bestehender Brunnen (VAL3)
- 25 bestehenden Pegel, die ober- und unterstromig bzw. im Kontaminationsbereich der Altlast situiert sind

In sämtlichen Pegeln werden sowohl die Wasserspiegel als auch bestimmte chemische Parameter gemessen. Damit ist eine aussagekräftige Beurteilung der Entwicklung der Gesamtsituation möglich.

### *Quantität:*

- Erfassung des Wasserspiegels
- bei Brunnen zusätzlich Erfassung der Grundwasser Förderrate

*Feldparameter / Online Datensammler:*

- pH-Wert
- Leitfähigkeit
- Sauerstoffgehalt
- Temperatur
- Redoxpotential
- PAK

*Analytik:*

- DOC
- AOX
- aromatische Kohlenwasserstoffe (BTEX)
- aliphatische Kohlenwasserstoffe (Summe KW)
- PAK (16 Einzelsubstanzen nach US-EPA)
- Phenolindex
- Cyanid ges.
- SM (Blei, Zink, Chrom, Cadmium, Arsen, Quecksilber)

## **Erste Ergebnisse**

### Schlitzwand

Bei der Errichtung des Funnel & Gate – Systems wurde streckenweise sowohl eine aufschwimmende als auch eine aufsitzende Teerölphase festgestellt, die über das ausgewiesene Altlastenareal hinausreicht. Zur räumlichen Abgrenzung dieser Verunreinigungen wurden neben labortechnischen Untersuchungsergebnissen aus den Jahren 2002 – 2003, die im Zuge des 4-spurigen Ausbaus im Bereich der B3 „Steyregger Brücke“ gewonnen wurden, weiters in der Zeit vom 08.08.-15.08.2012 insgesamt 5 Trocken- und 7 Schneckenkernbohrungen bis auf max. 17,0 m unter Geländeoberkante hergestellt.

Anhand der Ergebnisse zeigt sich, dass in den untersuchten Bereichen vor allem bei „Gate 1“ und „Gate 2“ stellenweise massive Verunreinigungen, hauptsächlich bedingt durch den Parameter „Summe PAK“, in Tiefen bis zu 15,5 m unter Geländeoberkante vorliegen.

Da es daher nicht auszuschließen war, dass in unterschiedlichen Tiefen innerhalb des Aquifers an manchen Gates zumindest zeitweilig Teeröl in Phase in die Filterelemente eindringt, wurde eine Bauweise vorgesehen, welche die Implementierung einer Freiwasserzone vorsieht. Diese verhindert, dass Teerölphase sowohl als Leicht- bzw. auch als Schwerphase in die Aktivkohleschüttung eindringt. Eine horizontweise Beaufschlagung der Aktivkohle mit Teerölphase würde ansonsten einen raschen Schadstoffdurchbruch auf einem hohen Konzentrationsniveau bedeuten.

### Errichtung der Gates

Im Zuge der Errichtung der Gates kam es im Bereich des Gates 1 zu einem Grundbruch. Der Grundbruch im Gate 1 wurde im Wesentlichen durch eiszeitliche Blocklagen am tertiären Schlier hervorgerufen. Die Abdichtung in diesem Bereich erfolgte mittels Einpressen von Epoxydharz.



**Abb. 6: Trichterausbildung Grundbruch – Gate 1**



**Abb. 7: Grundbruch – Gate 1**



**Abb. 8: Grundbruch – Gate 1**

Durch Zerrungsklüfte im hangenden Bereich des tertiären Schliers kam es weiters im Bereich des Gates 8 zu massive Qualmwasserzutritten. In diesem Bereich erfolgte eine Gatehebung um rd. 0,75 m und anschließendes dichtes Abbinden der Sohle mittels HDBV.



**Abb. 9: Qualmwasserzutritte – Gate 8**

Aufgrund eines schwach chemischen Angriffs durch Sulfat ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) mit 200 – 600mg/l durch das anstehende Grundwasser musste der für die Herstellung der Gates verwendete Beton, die Expositionsklasse XA1T abdecken. Zur Ausführung wurde daher ein Beton mit  $\text{C}_3\text{A}$  reduziertem Zement verwendet.

Aufgrund von Loch- bzw. Muldenkorrosion wurde die Trägerkonstruktion für ein Filterelement nicht aus Kohlenstoffstahl angefertigt sondern in Betonausführung hergestellt.

Wie Versuche zeigten, kommt es durch das Ausspülen feiner Kornfraktionen von Aktivkohle zu einem unmittelbaren Kontakt der Aktivkohle mit dem Kohlenstoffstahl einer allfälligen Trägerkonstruktion, sodass in Folge eine galvanische Korrosion deutlich erhöht werden würde und Abtragsraten bei direktem Kontakt von weit über 1 mm/a zu verzeichnen wären. In einem solchen Falle wäre die Lebensdauer auf einige wenige Jahre reduziert.

Um allfällige Ausfällungen in der Neu-Kornaktivkohle aufgrund einer pH-Wert Erhöhung zu vermeiden, erfolgte der Einbau von vorbehandelter pH-neutraler (gewässert und gespülter) Kohle. Überprüft wurden Produktspezifikationen wie z.B. Schüttgewicht, pH-Wert, Kornform, Kornverteilung, spezifische Oberfläche nach BET, Jodzahl, hydraulischer Widerstand (Druckverlustkurven), Adsorptionsisothermen für Acenaphthen, Naphtalin und Benzol, Beladungskapazitäten für Acenaphthen, Naphtalin und Benzol.

Die Wässerung und pH-Wert Senkung der Neu-Kornaktivkohle wurde über eine Zeitdauer von mindestens 24 Stunden durchgeführt. Zur Wässerung wurde nur Leitungswasser (Trinkwasserqualität) verwendet, die Fließgeschwindigkeit des Spülwassers im Aktivkohlefilterbett musste zwischen 23 und 35 m/h liegen und die Aktivkohle ständig vollständig mit Wasser bedeckt sein. Die Spülung wurde so lange durchgeführt, bis das Spülwasser keine sichtbare Trübung mehr aufwies und der pH-Wert im Spülwasser  $\leq 7,5$  betrug.

Das Einspülen der vorbehandelten Neu-Kornaktivkohle von jeweils rd. 50 m<sup>3</sup>/d bis zur jeweiligen Füllhöhe, ca. 0,5 m über MGW erfolgte bei einer Fließgeschwindigkeit zwischen 2 und 3 m/s.

Der Einfüllschlauch wurde sukzessive, unter fortlaufender Lotung der Aktivkohlefüllhöhe, während des Einfüllens gezogen, so dass sich das Schlauchende beim Einfüllen der Aktivkohle maximal 1 Meter über der bereits eingefüllten Aktivkohle befand.

Hierbei musste der Einleitschlauch so fixiert werden, dass eine Beschädigung der Gates ausgeschlossen war. Nach der Befüllung erfolgte die Entfernung des Aktivkohleabriebs durch Klarspülen. Die Entnahme des Wassers aus dem Gate erfolgte unmittelbar über der bereits absedimentierten Aktivkohle.

Eine Setzung der Aktivkohlefüllung musste innerhalb der ersten vier Monate nach der Erstbefüllung durch eine entsprechende Nachlieferung der gleichen Aktivkohle wie bei der Erstanlieferung ergänzt werden. Die Füllung des Gates erfolgte bis zur jeweils angegebenen Mindestfüllhöhe unter Gate-Oberkante. Die Aktivkohlenachbefüllung musste ebenfalls gewässert, gespült und pH neutralisiert werden.



**Abb. 10: Befüllung der Gates**



**Abb. 11: Detailansicht eines befüllten Filterelementes**

### Inbetriebnahme

Die Errichtungsdauer betrug in Summe 18 Monate. Die Inbetriebnahme startete am 31.01.2014 im Rahmen der Implementierung des Meß- bzw. Sondensystems, welches über eine photovoltaische Eigenstromversorgung verfügt. Erstmals wurden laserinduzierte Fluoreszemesssonden (LIF) zur Fernübertragung der PAK-Gehalte eingesetzt.

Es ist darauf hinzuweisen, dass die Meßgenauigkeit der LIF Sonden aufgrund relativ starker Verschmutzungen oder auch der Anwesenheit von Huminstoffen bereits innerhalb kurzer Zeiträume beeinträchtigt werden können und daher dementsprechend regelmäßig zu kontrollieren und im Bedarfsfall zu reinigen sind. Die Kalibrierung der Messsonden auf die Standortbedingungen läuft noch bis Mitte 2014.

Nachstehende Meßreihe zeigt exemplarisch die mittels Drucksonden erfassten Grundwasserstände vor bzw. nach Durchströmen der jeweiligen AK-Filter, wobei ein eindeutiger hydraulischer Gradient in Abstromrichtung festzustellen ist.

Abstichmessung 20.02.2014							
Gate	MPH Zustrom [müA]	MPH Abstrom [müA]	Abstich Zustrom [m]	Abstich Abstrom [m]	GWSP Zustrom [müA]	GWSP Abstrom [müA]	Diff Zu-Ab
13	255,323	255,379	6,140	6,200	249,183	249,179	● 0,004
1	255,331	255,333	6,195	6,200	249,136	249,133	● 0,003
2	255,358	255,362	6,367	6,371	248,991	248,991	● 0
3	254,897	254,946	6,100	6,150	248,797	248,796	● 0,001
4	255,367	255,385	6,620	6,642	248,747	248,743	● 0,004
5	254,952	254,935	6,455	6,439	248,497	248,496	● 0,001
7	255,675	255,676	7,288	7,299	248,387	248,377	● 0,010
8	256,274	256,261	7,897	7,886	248,377	248,375	● 0,002
9	254,651	254,654	6,405	6,410	248,246	248,244	● 0,002
10	255,498	255,439	7,304	7,246	248,194	248,193	● 0,001
11	255,777	255,818	7,601	7,643	248,176	248,175	● 0,001
12	255,096	255,065	6,939	6,909	248,157	248,156	● 0,001
MPH... Messpunkthöhe							
GWSP... Messpunkthöhe							

Tab. 2: Gates – Abstichmessungen 20.02.2014

Weiters zeigen die bisherigen Messungen, dass bei den Gates 04 und 05 die Wassertemperatur im Vergleich zu den übrigen Gates signifikant erhöht ist. Unter Berücksichtigung der zustromigen Grundwassertemperatur, die in den Absenkbrunnen (S13, S14 und S15) erfasst wurde und in einer Größenordnung von 13°C – 14°C lag, weichen die Messungen bei den Gates 04 und 05 (Mittelwert 20,11 °C) wesentlich von den übrigen Temperaturmessungen der restlichen Gates (Mittelwert 14,12 °C) nach oben hin ab.

Aufgrund der Grundwasserströmungsrichtung, der Grundwassermächtigkeit, der Tiefe der vorhandenen Einbauten (249,3 müA - Koksbatte und Düsenkeller) und der Bauwerkstemperaturen (Kellerboden von rd. 65°C) ist davon auszugehen, dass die Erwärmung des Grundwassers im unmittelbaren Zusammenhang mit den Bauwerksteilen steht.

Insbesondere unter dem Aspekt möglicher Ausfällungsprodukte oder dem Entstehen von Bakterienflocken, welche durch Zusetzen die Funktionsweise der Anlage reduzieren könnte, ist die zukünftige Beweissicherung des Temperaturverlaufs in den Gates von besonderer Bedeutung.

## 5. Reaktive Wand – Fallstudie Sicherung der ehemaligen Teerfabrik Lang in Offenbach

*Christian Weingran (HIM-ASG), Deutschland; Axel Müller (TZW), Deutschland;  
Andreas Tiehm (TZW), Deutschland; Tobias Bartelsen (CDM Smith), Deutschland*

### Zusammenfassung

Das Funnel&Gate-System mit Bioreaktor am ehemaligen Teerfabrikstandort in Offenbach hat in einem mehrjährigen Betrieb seine Funktionsfähigkeit nachgewiesen und zuverlässig für die Sicherung des kontaminierten Grundwasserabstroms des Standortes gesorgt. Die Reinigungsleistung des Bioreaktors liegt bei allen organischen Schadstoffparametern bei einer Reduktion von > 99 %. Grundlage hierfür waren sorgfältige Labor- und Feldversuche sowie das innovative Reaktordesign, das im Zuge der Planungsphase entwickelt wurde. In der Folge führten die Aktivierung der Wasserzuführung und die schrittweise Einstellung der Betriebsparameter zu einem optimal auf die ortsspezifischen Gegebenheiten angepassten Reaktorbetrieb.

Die Sanierung des ehemaligen Teerfabrikstandortes in Offenbach mittels Funnel&Gate steht heute für die Entwicklung und Umsetzung einer innovativen Sanierungstechnologie, die sich an vielen Standorten sowohl aus technischer wie auch wirtschaftlicher Sicht erfolgreich umsetzen lässt.

### Einführung

Im Jahr 1913 siedelte sich in Offenbach-Kaiserlei die Firma Gustav Lang, „Fabrik für Teerdestillation, Teerprodukte und Dachpappe“ an. Die Fläche des ehemaligen Betriebsgrundstücks betrug seinerzeit ca. 15.000 m<sup>2</sup>. Die Produktion wurde um 1930 eingestellt und der Gebäudebestand weitestgehend abgebrochen. Während und unmittelbar nach dem 2. Weltkrieg wurde der ehemalige Teerölstandort als Abladeplatz für Trümmerschutt genutzt, in dem auch hausmüllähnliche Abfälle abgelagert wurden.

### Historie der Altlastenbearbeitung

Im Jahr 1991 wurden erstmals orientierende Altlastenuntersuchungen durchgeführt. 1993 stellte das Regierungspräsidium Darmstadt den Bereich der ehemaligen Teerfabrik zur Altlast fest und übertrug das Verfahren an die HIM GmbH, Bereich Altlastensanierung (HIM-ASG). Der HIM-ASG wurde vom Land Hessen die Aufgabe übertragen, Altlasten oder schädliche Bodenverunreinigungen in der Funktion des Projektsteuerers zu untersuchen und zu sanieren, wenn der Sanierungsverantwortliche nicht oder nicht rechtzeitig herangezogen werden kann.

Seit 1994 wurden auf dem Standort umfangreiche Untersuchungen zur Erfassung und Abgrenzung von Boden- und Grundwasserkontaminationen durchgeführt und ein Grundwassermessstellennetz aus Quartär-, Tertiär- und Rotliegend-Messstellen aufgebaut. Wie die hierbei aufgenommenen Ergebnisse zeigen, liegen auf dem ehemaligen Betriebsgelände erhebliche Verunreinigungen des Untergrunds mit organischen Schadstoffen,

überwiegend PAK, BTEX-Aromaten und NSO-Heterozyklen vor, die als Bestandteile von Teeröl in Phase bis zur Basis des quartären Grundwasserleiters vorgedrungen sind. Die Teerölimprägnation ist heute im Bereich des Altstandortes flächenhaft innerhalb der wassergesättigten Zone vorhanden (vgl. Abbildung 1).

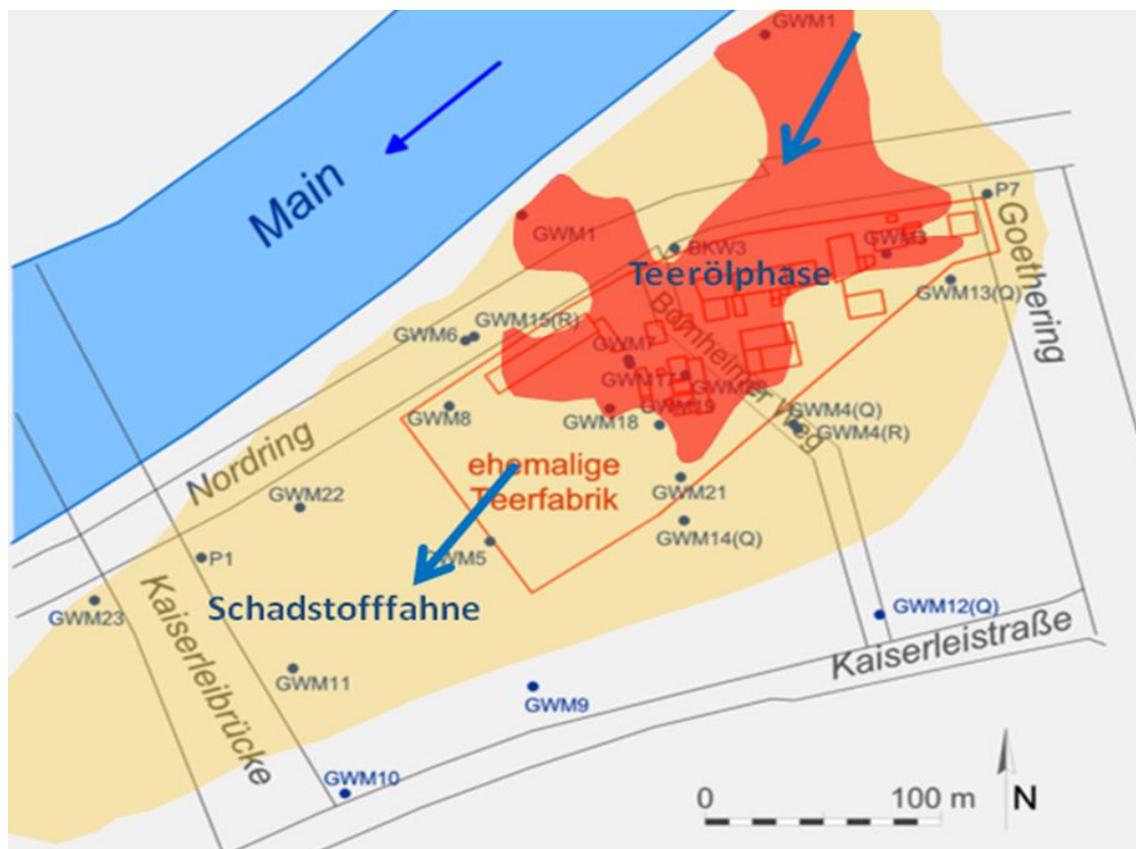


Abb. 1: Grundwasserschaden der ehemaligen Teerfabrik Lang in Offenbach

Ausgehend von diesen Teerölbelastungen ist im quartären Grundwasserleiter heute eine Schadstofffahne im Abstrom des Standorts nachweisbar. Die im Untergrund vorhandenen Verunreinigungen stellen damit ein hohes Gefährdungspotenzial für das Grundwasser außerhalb der mit Teeröl imprägnierten Bereiche dar.

In einer 1997 ausgearbeiteten Variantenstudie wurden verschiedene Optionen zur Standortsanierung bzw. -sicherung (Bodenaustausch, Einkapselung und Wasserhaltung, hydraulische Sanierung und Phasenaustrag) unter den Gesichtspunkten der technischen Machbarkeit und Wirksamkeit wie auch unter Berücksichtigung der Sanierungskosten betrachtet. Ergänzend hierzu wurde 1998 der Einsatz eines Funnel&Gate-System zur dauerhaften Sicherung des ehemaligen Teerfabrikgeländes mit in die Betrachtungen einbezogen.

Im Ergebnis ging das Funnel&Gate-System aus der Variantenstudie als Vorzugsvariante hervor. Vorteil der Sanierungsvariante waren die vergleichsweise geringen Investitionskosten gegenüber einer Bodensanierung sowie die niedrigeren Betriebskosten im Vergleich zu aktiven Grundwassersanierungsmaßnahmen (Pump&Treat).

Reaktive Wände, in diesem Fall in einem Funnel&Gate-System verbaut, sind neue Verfahren zur in-situ-Sanierung von kontaminierten Standorten. Sie unterbinden oder reduzieren die Ausbreitung von im Grundwasserstrom gelösten Schadstoffen ohne oder mit nur geringem permanenten Energieeintrag von außen und basieren auf einem Filtereffekt, der durch die Platzierung geeigneter, wasserdurchlässiger Filtermaterialien (allgemein als reaktive Materialien bezeichnet) im Strömungspfad des Grundwassers, d.h. in der Regel senkrecht zur mittleren Grundwasserfließrichtung, erzielt wird. Dieser Filtereffekt entsteht dadurch, dass die reaktiven Materialien die Schadstoffe physikalisch, chemisch und/oder biologisch zurückhalten oder chemisch bzw. biologisch abbauen. Funnel&Gate-Systeme sind dadurch gekennzeichnet, dass nur ein kleiner Teil der in-situ-Wand als permeable reaktive Wand (Gate = Durchlass) verwendet wird, während der überwiegende Teil als geringdurchlässige Strömungs-Leitwand (Funnel = Trichter), in Form von Dichtwänden ausgebaut wird (TEUTSCH ET AL., 1996, 1999).

### **Grundkonzept und Vorversuche zur Überprüfung der grundsätzlichen Machbarkeit**

Das Grundkonzept zur Umsetzung eines Funnel&Gate-Systems sah im Wesentlichen den mikrobiologischen Abbau der mono-, poly- und heterozyklischen Aromaten in einem im Gate zu installierenden Festbett-Bioreaktor vor. Zu beachten war hierbei aufgrund der hohen Eisengehalte im Grundwasser die Integration einer Enteisung sowie ggf. eine nachgeschaltete Aktivkohlestufe, sollte sich die mikrobielle Elimination als unzureichend erweisen.

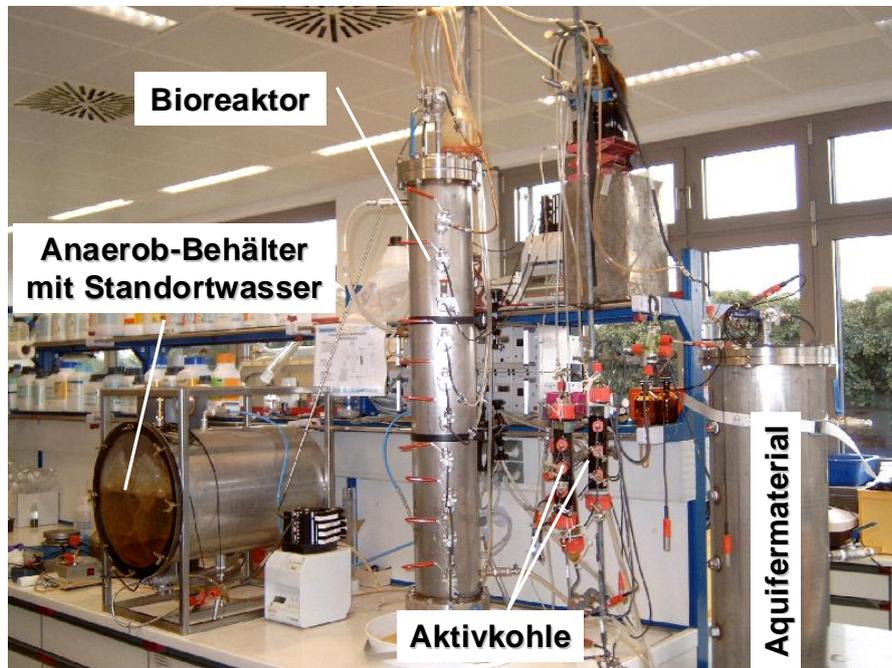
Im Zuge der konzeptionellen Planungen wurden zur Überprüfung der grundsätzlichen Machbarkeit Vorversuche durchgeführt, die schrittweise im Labor und auf dem Standort erfolgten. Im Verlauf dieser Machbarkeitsstudie wurden die Untersuchungssysteme zunehmend komplexer und näherten sich den in-situ Bedingungen an. Im Wesentlichen waren die folgenden Fragen zu beantworten:

- Existiert eine autochthone Mikroflora, die in der Lage ist, die Kontaminanten abzubauen?
- Welche Kontaminanten werden durch die autochthone Mikroflora abgebaut?
- Wie lange dauert der Abbau?
- Welche Mengen an Sauerstoff ( $H_2O_2$ ) und Nitrat werden benötigt?
- Wie entwickeln sich die Keimzahlen und die Toxizität des Grundwassers während des biologischen Abbaus?

Zunächst wurde der grundsätzliche Nachweis erbracht, dass der kontaminierte Grundwasserleiter mit Mikroorganismen besiedelt ist, die das Potential besitzen die Teerölbürtigen Schadstoffe unter stimulierten aeroben Bedingungen abzubauen. Ein Bakterien-Screening von Eluaten feldfrischer Bodenproben mittels Most-Probable-Number-(MPN-) Methode ergab ausreichende Bakterienzahlen aerober Verwerter für 2-3-kernige PAK, aerober Verwerter für 3-4-kernige PAK, aerober BTEX-Verwerter sowie Denitrifikanten.

Im nächsten Schritt wurden im Labormaßstab Batch- und Säulenversuche unter Verwendung von Standortgrundwasser unter aeroben, denitrifizierenden und aerob/denitrifizierenden Bedingungen durchgeführt. Im Laborsäulenversuch wurde die Bioreaktorstufe mit standort eigenem Aquifermaterial befüllt und im kontinuierlichen Betrieb dem Standortwasser zur Stimulierung der mikrobiellen Abbau-Aktivität Wasserstoffperoxid als Sauerstoffträger sowie Nitrat und Nährstoffe hinzugegeben. Das Standortgrundwasser wurde in Vorrats-Behältern

anaerob gelagert, um die die in-situ nahen Bedingungen zu bewahren. Die doppelwandige Laborsäule wurde bei Grundwassertemperatur betrieben und konnte über Ports auch während der Bodenpassage beprobt bzw. Dosierungsmittel hinzugegeben werden. Der Bioreaktorstufe wurde Aktivkohle sowie ein Säule mit Aquifermaterial nachgeschaltet (Abb. 2).



**Abb. 2: Aufbau des Laborsäulenversuchs**

Im Labor-Bioreaktor wurde die vollständige mikrobielle Schadstoffumsetzung insbesondere durch eine stufenweise Anpassung der  $H_2O_2$ -Dosierung erreicht, die der autochthonen Mikroflora Zeit zur Anpassung an die stimulierenden Bedingungen gab. Nach mehreren moderaten Steigerungen der  $H_2O_2$ -Dosierungen war der biologische Abbau der BTEX-Aromaten, der PAK sowie der NSO-HET bei einer Zugabe von insgesamt  $180\text{ mg/L } H_2O_2$  nahezu vollständig. Der Schadstoffabbau fand überwiegend im vorderen Teil des Reaktors statt. Durch eine zweite  $H_2O_2$ -Dosierung konnten auch im hinteren Teil der Säule aerobe Bedingungen geschaffen werden. Hier wurden die Restbelastungen eliminiert (Abb. 3).

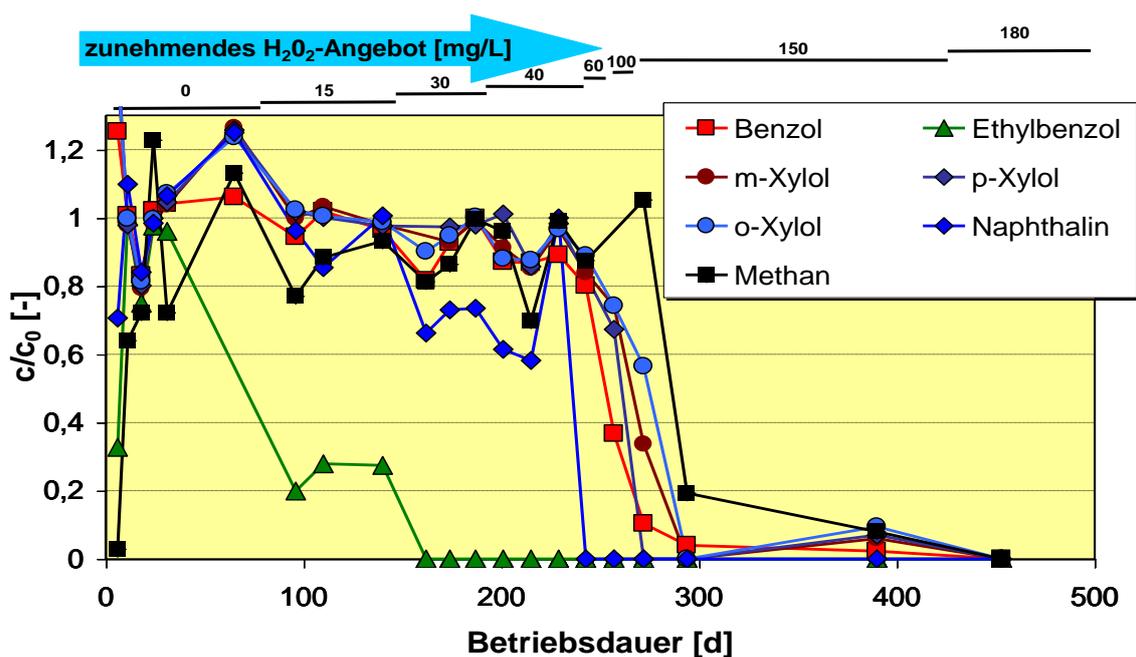


Abb. 3: Effekt der  $H_2O_2$ -Dosierung auf den mikrobiellen Schadstoffabbau im Laborsäulenversuch

Parallel wurden Laborversuche zur Auswahl einer geeigneten Aktivkohle unter Berücksichtigung von hydraulischen, sorptiven und wirtschaftlichen Gesichtspunkten verschiedener Aktivkohletypen vorgenommen.

Schließlich erfolgte in einem in-situ nahen halb-technischen Säulenversuch am Standort über neun Monate die Erprobung der wesentlichen Verfahrensschritte (Enteisung, Entgassung, mikrobiologischer Abbau, Zudosierung von Elektronenakzeptoren und Nährstoffen, Aktivkohlesorption) mit dem Ziel die relevanten Parameter zur Dimensionierung des Bioreaktors unter quasi in-situ Bedingungen zu ermitteln.

Um einen vollständigen mikrobiellen Abbau zu erreichen, stellte sich eine sequentielle Betriebsweise von zwei Bioreaktoren und zwei Dosierungseinrichtungen als notwendig heraus. (Abb. 4).

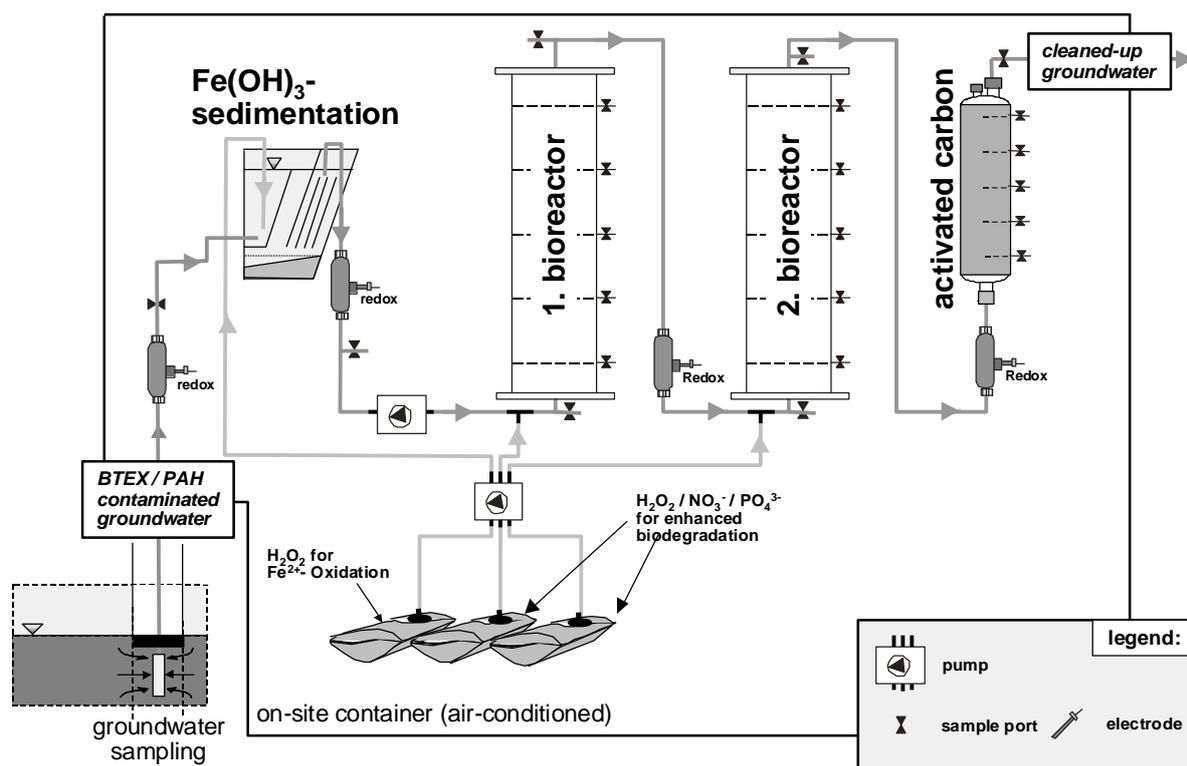


Abb. 4: Aufbauschema des On-Site-Säulenversuchs

Entsprechend der mikrobiellen Abbauleistung nahmen die aeroben Bakterienzahlen (Gesamtkeimzahlen, BTEX- Verwerter und PAK- Verwerter) in den Bioreaktoren gegenüber den Werten im Ablauf des Schrägklärers um 1 bis 2 Größenordnungen zu. Durch den aeroben Schadstoffabbau wurde auch eine deutliche Verminderung der Ökotoxizität im Leuchtbakterienhemmtest erreicht. Hinter Bioreaktor 2 wurde nur noch eine schwache Toxizität gemessen, die geringfügig über der Nachweisgrenze lag. Insgesamt erwiesen sich die adaptierten Mikroorganismen auch gegenüber Betriebsstörungen als widerstandsfähig. Beispielsweise führte ein kurzzeitiges „Trockenfallen“ der Bioreaktoren durch eine Leitungsleckage im Zulauf der Anlage nur zu einer kurzzeitigen Leistungsverminderung.

Aus den Vorversuchen ergaben sich die wesentlichen Konsequenzen für den Bau des Funnel&Gate-Systems:

- erforderliche Dosierung zur mikrobiellen Umsetzung der Schadstoffe von mind. 180 mg H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> pro Liter zu behandelnden Wassers
- stufenweise und moderate Steigerung der Dosierung in der Anlaufphase erforderlich
- Verweilzeit im Bioreaktor von 72 h ist ausreichend
- Notwendigkeit für Mehrfachdosierung (gegliederter sequentieller Reaktoraufbau)
- Zugänglichkeit der Dosierzonen (Entwicklung von Freiwasserzonen)
- Vermeidung von O<sub>2</sub>-Ausgasungen in den Bioreaktoren
  - Möglichkeit für die Entgasung übersättigter Substanzen wie Methan im Sedimentationsbecken des Schrägklärers
  - möglichst viele Dosierstellen
  - Einleitung des H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-angereicherten Wassers unten in die Freiwasserzonen

- mittelfristig Förderung denitrifizierender Mikroorganismen ggf. sinnvoll mit möglicher Ersparnis von Dosierungskosten
- nachgeschaltete Aktivkohlestufe aufgrund sehr guter Abbauergebnisse nur optional erforderlich

### Bau des Funnel&Gate-Systems

Aus den Ergebnissen der Vorversuche leitete sich ein stark gegliederter Reaktoraufbau ab, der sich aus einem vorgeschalteten Schrägklärer zur Enteisung, drei in Reihe geschalteten Bioreaktoren und einer optionalen Aktivkohlestufe zusammensetzt. Im Anstrom des Schrägklärers sowie vor allen drei Bioreaktoren wurden offene Wasserzonen (Freiwasserzonen) vorgesehen, die zur Fassung des anströmenden Grundwassers, zur Dosierung der Betriebsmittel (Zugabe von Sauerstoff und Nitrat zur Enteisung bzw. Stimulierung des biologischen Abbaus) und zur anschließenden Rückverteilung im Fließquerschnitt dienen. Die folgende Abbildung 5 zeigt schematisch den gegliederten Aufbau des Bioreaktors.

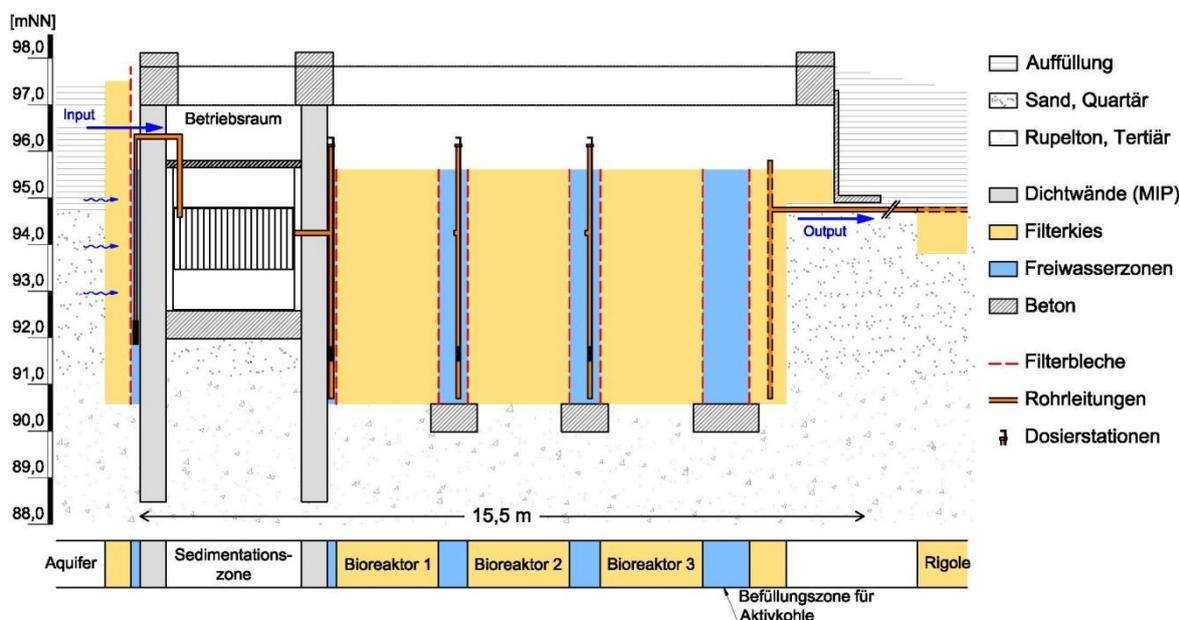


Abb. 5: Gegliederter Aufbau des Reaktors

Die bauliche Umsetzung des Funnel&Gate-Systems erfolgte von Oktober 2006 bis März 2007. Zur Reduzierung der Baukosten wurden die Leitwände (Funnel) abweichend von den ausgeschriebenen Stahlspundwänden in Mixed-in-Place-Bauweise (MiP) hergestellt (vgl. Abbildung 6). Unter dem MiP-Verfahren versteht man eine Insitu-Vermischung von Bindemitteln (Beton-Bentonit-Gemisch) und anstehendem Boden an Ort und Stelle mit Hilfe spezieller Bohrgeräte. Die insgesamt ca. 60 m langen Leitwände wurden als 550 mm starke MIP-Wand (kf-Werten  $\ll 1 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ ) ausgeführt und ca. 1 m in den unter dem quartären Aquifer anstehenden Rupelton (Grundwasserstauer) eingebunden.



**Abb. 6: Herstellung der Leitwände in MiP-Bauweise**

Zur Abscheidung des Eisenschlammes wurde im Gate-Bereich ein Schrägklärer installiert. Im eigentlichen Reaktor wurden die Freiwasserzonen und die Aktivkohlezonen aus einer doppelten Reihe von Stahlträgern errichtet. Die verwendeten Doppel-T-Träger sind quergelocht, um Querströmungen innerhalb der Freiwasserzonen zu ermöglichen. Die Freiwasserzonen sind in sich durch eine quer zur Strömungsrichtung verlaufenden Wand aus HDPE in eine Zustrom- und eine Abstromkammer gegliedert. Durch einen Durchlass, der auch als Dosierstation dient, gelangt das Wasser aus der Zustromkammer in die jeweilige Abstromkammer. Auf die Träger der Freiwasserzonen wurden Schlitzbrückenfilterbleche montiert, die als Begrenzung zu den Bioreaktoren dienen (vgl. Abbildung 7).



**Abb. 7: Montage der Schlitzbrückenfilterbleche**

Die Zwischenräume zwischen den Freiwasserzonen wurden mit einem Kies der Körnung 2/8 aufgefüllt, der im Reinigungsbetrieb als Aufwuchskörper für die Mikroorganismen dient. Die Einhausung des Reaktorbauwerks wurde bautechnisch in der Weise gestaltet, dass alle Verfahrensstufen für Betriebs- und Wartungsvorgänge wie auch für Probenahmen und Anlagenkontrollen gut zugänglich sind.

## Betriebserfahrungen

### Inbetriebnahme und Aktivierung des Systems:

Im Sommer 2007 wurde das Funnel&Gate-System in Betrieb genommen. Die nachfolgende Abbildung 8 zeigt die Lage des Systems am Standort in Relation zu den vorhandenen Teerölbelastungen.

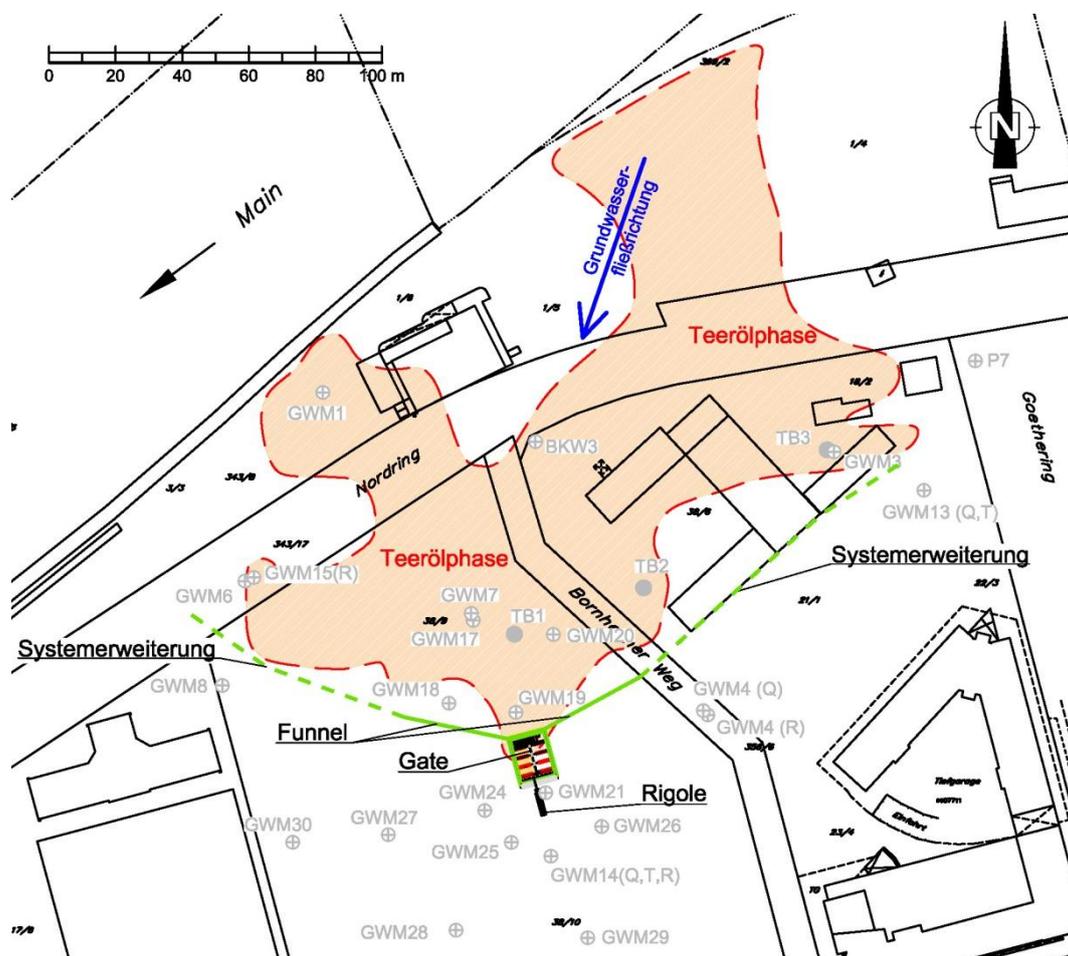


Abb. 8: Funnel&Gate-System in Relation zum Teerölschaden

Bereits kurz nach der Inbetriebnahme wurde deutlich, dass die im Vorfeld prognostizierte Durchflussrate von ca. 230 L/h bei passiver Durchströmung, d. h. unter Ausnutzung des natürlichen Grundwassergefälles, nicht erreicht wird. Um den Reaktor weiter betreiben zu können, wurde daraufhin der freie Durchlass vom Schrägklärer zur Freiwasserzone 1 (FWZ 1) abgesperrt und der Zustrom zum Reaktor durch eine Pumpe erzwungen.

Untersuchungen im zweiten Halbjahr 2007 ergaben, dass die Ursache für die reduzierte Durchflussrate mit einer verminderten Durchlässigkeit im abstromigen Aquiferbereich im Zusammenhang stand. Daraufhin wurden in der Kiesfilterzone im Ablauf des Bioreaktors vertikale Filterrohre eingebaut, über die das gereinigte Grundwasser gesammelt und über eine Druckrohrleitung einer außerhalb des Gates errichteten Versickerungsrigole zugeführt wird (vgl. Abbildung 8).

Nach der Herstellung des modifizierten Gateablaufs wurde der aktive Betrieb des Bioreaktors beibehalten. Das Reaktorkonzept folgt damit der allgemeinen Entwicklung weg von passiven, schlecht kontrollierbaren Systemen hin zu aktiven Systemen. Nur bei einem konstanten Durchfluss konnten auch konstante Dosiermengen und Abbaubedingungen realisiert werden. Gleichzeitig wurde damit auch eine Reduzierung des Betriebs- und Überwachungsaufwands erreicht. Weiterhin resultiert aus der Aktivierung des Systems eine bessere Steuerbarkeit und größere Flexibilität, wodurch zum Beispiel Anpassungen an veränderte hydraulische Randbedingungen (z.B. durch Grundwasserentnahmen im Umfeld) möglich sind. Im Übrigen bewegen sich die Stromkosten als Folge der Systemaktivierung im Vergleich zu herkömmlichen Pump&Treat-Maßnahmen auf einem erheblich niedrigeren Niveau und spielen bei den laufenden Betriebskosten eine untergeordnete Rolle.

#### Etablierung des Schadstoffabbaus:

Nach den Erfahrungen der Vorversuche erfolgte die Adaption des aerob/denitrifizierenden Schadstoffabbaus im Demo-Reaktor durch eine stufenweise und moderate Steigerung der Betriebsmittel. Zur Stimulierung des Abbaus werden dem Grundwasser Sauerstoff (in Form von  $\text{H}_2\text{O}_2$ -Lösung) und Nitrat (in Form von Natriumnitrat-Lösung) zu dosiert. Mit der Zugabe von Phosphat (als Gemisch aus  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  und  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$  in Lösung) wurde zu Betriebsbeginn eine Nährstofflimitierung durch Phosphor ausgeschlossen. Seit 2011 wird auf eine kontinuierliche Phosphatdosierung verzichtet, da sich das Phosphat im System akkumuliert hat und in ausreichenden Mengen zur Verfügung steht.

Die mikrobielle Etablierung der vier Gate-Module fand entsprechend der Beaufschlagung durch Schadstoffe und Mikroorganismen in Fließrichtung statt. Nach ca. 600 Tagen Betriebszeit wurde nach Etablierung des biologischen Abbaus im Schrägklärer und im Bioreaktor 1 (vgl. Abbildung 2) auch eine fortschreitende mikrobielle Etablierung in Bioreaktor 2 beobachtet (vgl. Abbildung 9). Ein stabiler Abbau der Restbelastungen in Bioreaktor 3 erfolgte erst nach einer deutlichen Erhöhung des Volumenstroms und damit auch der Fracht. Wie die Ergebnisse aus dem zurückliegenden Reaktorbetrieb zeigen, wurde eine vollständige Etablierung des mikrobiellen Schadstoffabbaus nach einem Zeitraum von etwa 2 Jahren erreicht.

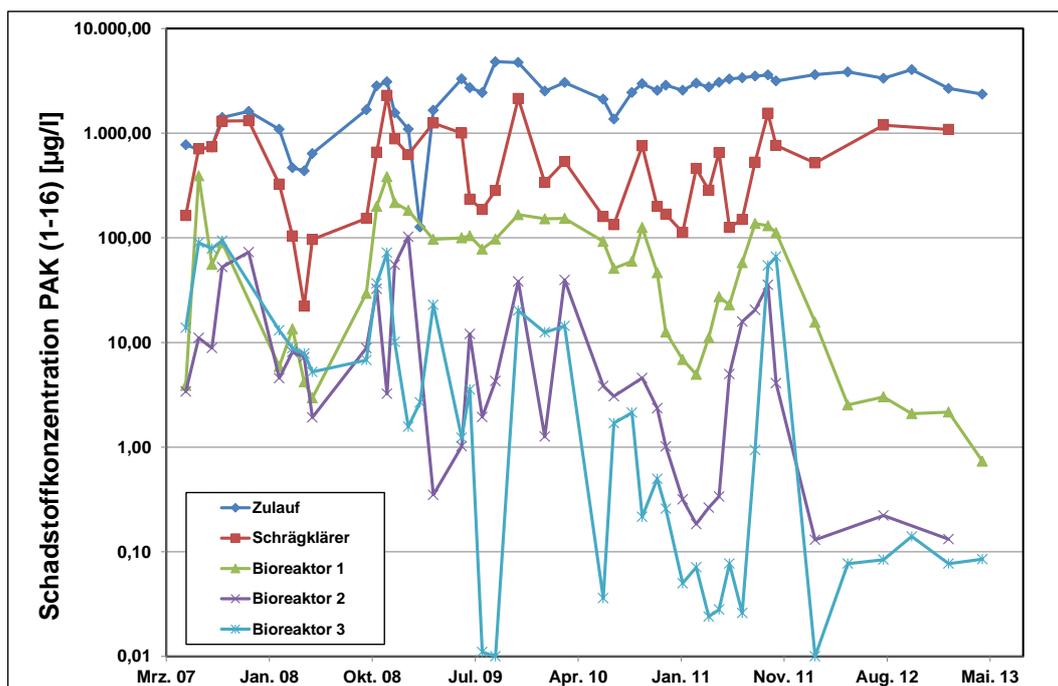


Abb. 9: Zeitreihe Schadstoffkonzentration PAK n. EPA nach den einzelnen Reaktorkomponenten

Abbauleistung nach mikrobieller Etablierung:

Ein Großteil der Schadstoffe wird bereits durch die aerobe Stimulierung im Schrägklärer abgebaut. Hier wird bereits eine Reduktion der BTEX-Aromaten und Naphthalin um rd. 60 % gegenüber dem Zulauf beobachtet. Die anderen teerölbürtigen Schadstoffe (NSO-HET, Phenole, PAK ohne Naphthalin) werden um 40-50 % reduziert (vgl. Abbildung 10). Im Schrägklärer wird zudem das in Konzentrationen bis 10 mg/l zugeführte Fe(II) durch die H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-Dosierung zu Fe(III) oxidiert und quantitativ als Fe(III)-Schlamm sedimentiert.

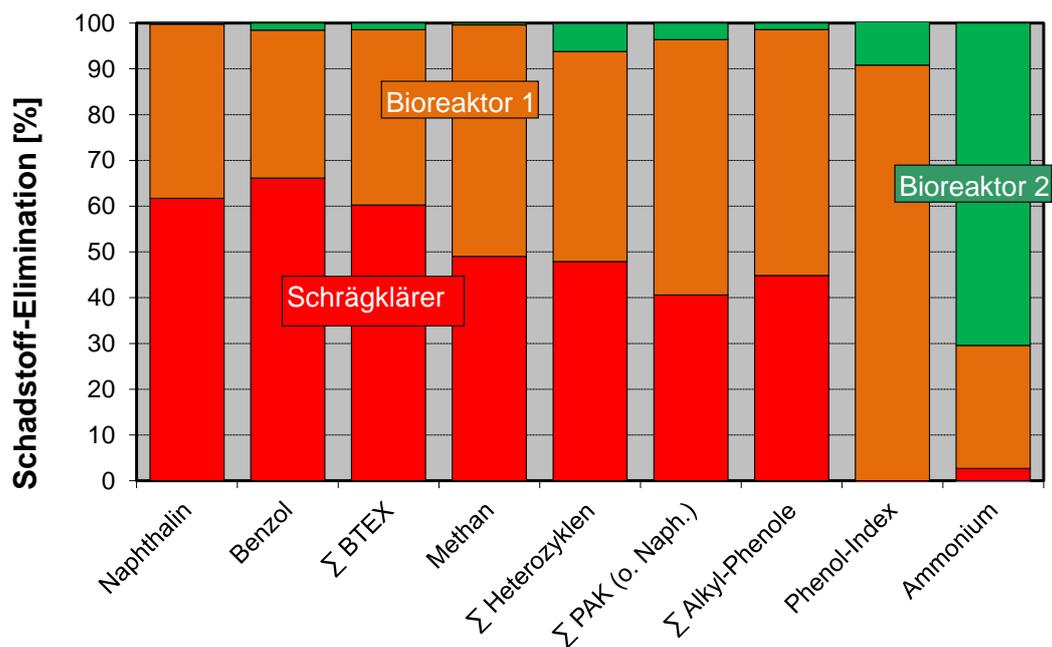


Abb. 10: Abbauleistung des Reaktors (Mittelwert 2013)

In anschließenden Bioreaktor 1 überwiegt durch aerobe und untergeordnet denitrifizierende Prozesse der Abbau der im Wasser verbliebenen organischen Schadstoffe bis auf 5 % der Zulaufkonzentrationen. Die aerob sehr gut abbaubaren Schadstoffparameter Naphthalin und BTEX sowie die Alkylphenole werden im Bioreaktor 1 bereits um mehr als 99 % abgebaut.

In Bioreaktor 2 und Bioreaktor 3 werden anschließend durch aerobe Abbauprozesse die noch vorhandenen Schadstoffe quasi vollständig entfernt. In Bioreaktor 2 sind dies noch etwa 1 - 5 % BTEX-Aromaten, PAK und NSO-HET, Phenole und in Bioreaktor 3 schließlich nur noch die verbliebenen Spurenkonzentrationen.

Methanotrophe und nitrifizierende Abbau-Prozesse führen darüber hinaus zu einer Umsetzung von Methan und Ammonium. Nitrifizierende Prozesse wurden nach etwa 700 Tagen beobachtet und erfolgten im Anschluss an die Umsetzungen der organischen Substanzen verlangsamt in den Bioreaktoren 2 und 3.

Zur Optimierung der Leistungsfähigkeit hinsichtlich Betriebssicherheit und Kosten wurden in 2011 vertiefende Untersuchungen auf dem Sanierungsstandort durchgeführt. Im Ergebnis dieser Untersuchungen konnte die Abbauleistung des Bioreaktors durch eine verbesserte Dosiermittelzugabe nochmals gesteigert werden, was sich insbesondere in sehr niedrigen Restbelastungen im gereinigten Grundwasser dokumentiert.

Weiterhin wurden Leitparameter (Sauerstoff und  $SAK_{254nm}$ ) zur schnellen und einfachen Überwachung des Reaktorbetriebs identifiziert und erprobt. In Zukunft können dadurch Störungen im Betrieb des Bioreaktorsystems, insbesondere was die Abbauleistung betrifft, schneller entdeckt und behoben werden. Neben einer Verbesserung der Betriebsleistung und der Betriebssicherheit haben die umgesetzten Maßnahmen zu einer deutlichen Kostenreduzierung geführt.

### **Fazit**

Die bisherigen Ergebnisse aus dem inzwischen fast 6-jährigen Betrieb zeigen, dass sich der biologische Abbau im System sehr gut etabliert hat und neben den Hauptkontaminanten auch höherkernige PAK sowie die NSO-Heterozyklen nahezu vollständig abgebaut werden. Die Abbauleistung liegt bei allen Schadstoffparametern bei über 99 %. Aufgrund der sehr guten Abbauleistung wird die Aktivkohlestufe, die ursprünglich zum Rückhalt von schlecht abbaubaren Kontaminanten vorgesehen war, nicht benötigt. Hierdurch entfallen sämtliche Kosten zur Bereitstellung von Wasseraktivkohle.

Die Schadstoffelimination im Bioreaktor resultiert vollständig aus den aerob/denitrifizierenden Abbauprozessen. Dies zeigt zum einen die beobachtete Eliminationsreihenfolge, zum Anderem wird der mikrobielle Abbau über die Nachweise der für den Schadstoffabbau verantwortlichen Mikroorganismen belegt. Andere mögliche Eliminationsprozesse wie Retardation oder Verflüchtigung spielen keine oder eine nur sehr untergeordnete Rolle. Die chemischen Analysen wurden durch regelmäßige Bestimmungen der Ökotoxizität mit Hilfe von Leuchtbakterienhemmtests ergänzt. Da eine Hemmwirkung des behandelten Wassers im Gateablauf auf die Leuchtbakterien im adaptierten System nicht mehr zu beobachten war, liegen keine Hinweise auf analytisch nicht identifizierte Substanzen (z.B. toxische Metabolite) vor.

Im Hinblick auf die hydraulische Durchlässigkeit des Bioreaktors zeigen sich bis heute keinerlei Einschränkungen. In Abhängigkeit von den jahreszeitlich bedingten Grundwasserschwankungen bewegen sich die Wasserstände in den einzelnen Reaktorstufen auf einem Niveau, wie sie auch zu Betriebsbeginn des Funnel&Gate-Systems festgestellt wurden.

Eine weitere wesentliche Erkenntnis aus dem Betrieb besteht darin, dass sich die im Grundwasserabstrom des Bioreaktors vorhandenen Schadstoffbelastungen - wie dies im Vorfeld der Maßnahme auch prognostiziert wurde - bereits deutlich reduziert haben. Dies liegt einerseits an der gekappten Schadstoffnachlieferung als Folge des Funnel&Gate-Systems und andererseits an natürlichen Abbauvorgängen, die durch den nährstoffreichen Reinwasserablauf des Bioreaktors hervorgerufen werden.

Zur Erfassung des gesamten Grundwasserabstroms vom Altstandort ist in 2014 vorgesehen, das Funnel&Gate-System im Pilotmaßstab mit zusätzlichen Leitwänden an beiden Enden zu erweitern. Aufgrund der sehr guten Abbauleistungen kann hierbei entgegen der ursprünglichen Planung auf ein zweites Gatebauwerk verzichtet werden, was sich natürlich positiv auf die Wirtschaftlichkeit des gesamten Sicherungssystems auswirkt.

Die Sanierung des ehemaligen Teerfabrikstandortes in Offenbach mittels Funnel&Gate steht heute für die Entwicklung und Umsetzung einer innovativen Sanierungstechnologie, die sich an vielen Standorten sowohl aus technischer wie auch wirtschaftlicher Sicht erfolgreich umsetzen lässt.

#### Literatur

- [1] Teutsch G, Gratwohl P., Schad. H., Werner, P. (1996): In-situ-Reaktionswände – ein neuer Ansatz zur passiven Sanierung von Boden- und Grundwasser-  
verunreinigungen, Grundwasser, 1/96.
- [2] Teutsch G., Schüth C., Melzer R. (1999): Statusbericht zum Thema Reaktive Wände,  
Arbeitskreis des Altlastenforums Baden-Württemberg, Innovative Erkundungs- und  
Überwachungsmethoden.
- [3] HIM GmbH - Bereich Altlastensanierung, CDM Consult GmbH, Bauer und Mourik  
Umwelttechnik GmbH, Quermedia Filmproduktion GmbH (2007): Projektfilm  
"Sanierung der ehemaligen Teerfabrik Offenbach – Bau eines Funnel-&-Gate-  
Systems mit Biosorptionsreaktor".
- [4] Müller A., Tiehm A., Alt S., Schad H., Weingran C. (2007): Funnel-and-gate  
biobarrier at a former tar factory site – pilot test and field construction in: 3rd  
European Conference on Natural Attenuation and in-situ Remediation (book of  
abstracts), Dechema, Frankfurt a. M., 19-21 Nov 2007: 40.
- [5] Tiehm A., Müller A., Alt S., Jacob H., Schad H., Weingran C. (2008): Development of  
a Groundwater Biobarrier for the Removal of PAH, BTEX, and Heterocyclic Hydro-  
carbons. In: Water Science & Technology – WST 58.7/ 2008, S. 1349-1355.
- [6] Weingran C., Jacob H., Feig R., Tiehm A., Müller A., Schad H. (2009): Full-Scale  
Construction and First Results of a Funnel-and-Gate Biobarrier at an Abandoned Tar

Factory Site. Vortrag beim Batelle-Symposium "In Situ and On-Site Bioremediation", Baltimore, USA, 5.-8. Mai 2009.

- [7] Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (2009): Abschlussbericht F+E-Vorhaben, Wiesbaden.
- [8] Schad H., Jacob H., Weiß J., Tiehm A., Müller A., Schmitt-Biegel B., Weingran C. (2009): Grundwassersanierung mittels Funnel-and-Gate zum mikrobiologischen Abbau von BTEX und PAK am Standort der ehemaligen Teerfabrik Lang in Offenbach - Teil 1: Vom Konzept zum Bauwerk, in: Franzius et al. (Hrsg.): Handbuch der Altlastensanierung, 58. Aktualisierung, 3. Aufl., Mai 2009.
- [9] Bartelsen T. (2012): Betrieb eines Funnel & Gate-Systems mit Bioreaktor am Standort einer ehemaligen Teerfabrik in Offenbach, Vortrag auf der Dechema 2012, November 2012.
- [10] Weingran C., Müller J., Bartelsen T., Thiem A., Müller A., Schad, H. (2013): Results of several years operation of a Funnel&Gate System with bio reactor at the site of a former tar plant in Offenbach, AquaConSoil conference 2013, April 2013

#### **Autorenanschriften**

Tobias Bartelsen  
CDM Smith Consult GmbH  
Fürther Straße 212  
90429 Nürnberg / Deutschland

Axel Müller  
DVGW-Technologiezentrum Wasser - TZW  
Abteilung Umweltbiotechnologie und Altlasten  
Karlsruher Straße 84  
76139 Karlsruhe / Deutschland

Dr. Andreas Tiehm  
DVGW-Technologiezentrum Wasser - TZW  
Abteilung Umweltbiotechnologie und Altlasten  
Karlsruher Straße 84  
76139 Karlsruhe / Deutschland

Christian Weingran  
HIM GmbH  
Bereich Altlastensanierung  
Plausdorfer Weg  
35260 Stadtallendorf / Deutschland

## 6. Funnel-and Gate Gaswerk München – 10 Jahre Betriebserfahrung

*Jörg Weindl, Siri Romboy, BFM Umwelt GmbH Beratung-Forschung-Management,  
München*

### 1 Ausgangssituation

#### Historie

Auf dem 32 ha großen Areal im Norden Münchens wurde im Zeitraum von 1907 bis 1967 Stadtgas durch die Ver- und Entgasung von Steinkohle gewonnen. In diesem Zeitraum wurden insgesamt ca. 20 Mio. t Steinkohle verarbeitet. Neben Gas und Koks fielen insgesamt ca. 500.000 t Teer und Teeröl als Sekundärprodukt sowie Schlacken als Abfallprodukt an.

Bedingt durch den damaligen technischen Standard sowie durch Kriegseinwirkungen wurden während der Betriebszeit erhebliche Mengen an Teer und Teeröl freigesetzt, welche bis heute eine erhebliche Kontamination von Boden und Grundwasser verursachen.

#### Geologie

Das Gaswerksgelände München liegt im Bereich der Münchener Schotterebene. Die anstehenden quartären Schotter bestehen vorwiegend aus schlecht sortierten, meist gut gerundeten Kiesen mit Sandbeimengungen. Ihre Mächtigkeit beträgt im Bereich des Gaswerksgeländes etwa sieben bis acht Meter. Die Ausgangsgesteine sind meist Karbonatgesteine.

Unterhalb der Quartärkiese liegen tertiäre Sedimente, zuoberst Mergel mit Mächtigkeiten von etwa zwei Metern. Sie sind in einigen Bereichen, den so genannten Tertiärfenstern, nicht vorhanden. In diesen Gebieten liegen die quartären Sedimente unmittelbar auf den folgenden Sanden. Letztere erreichen Mächtigkeiten von etwa zehn Metern. Ihr Liegendes bilden Tone und Schluffe.

Die Tertiäroberfläche weist im Allgemeinen ein ausgeprägtes Kleinrelief mit Rinnen und Hochflächen auf. Dies ist insofern problematisch, als sich Schwerphasen, hier insbesondere Teeröl, in Senken ansammeln können, die von dort leicht mobilisierbar sind.

Im betrachteten Bereich sind zwei Grundwasserstockwerke zu unterscheiden. Die Quartärkiese bilden einen ungespannten Grundwasserleiter mit einem Flurabstand von etwa 6 Metern und ca. 1,5 bis 2 Meter Mächtigkeit. Das zweite Stockwerk ist ein gespannter Grundwasserleiter in den tertiären Sanden, der erste tertiäre Hauptgrundwasserleiter. Sein Druckspiegel liegt um etwa einen halben Meter unter der Höhe der freien Grundwasseroberfläche des oberen Grundwasserstockwerks.

Die Grundwasseroberfläche des quartären Grundwasserleiters weist ein Gefälle von etwa 3,5 ‰ in nördliche Richtung auf. Im tieferen Grundwasserstockwerk schwankt die Fließrichtung zwischen Norden und Nordosten, das Gefälle variiert zwischen 2 ‰ und 9 ‰.

Als hemmende Schicht zwischen den beiden Grundwasserleitern wirken die gering durchlässigen Mergel. Ein nennenswerter Austausch von Wasser kann nur im Bereich der Tertiärfenster erfolgen. Er ist jedoch auch dort unter normalen Verhältnissen nur in geringem Umfang zu erwarten, da der Durchlässigkeitsbeiwert ( $k_f$ -Wert) des tertiären Grundwasserleiters um einige Größenordnungen kleiner ist als jener der Quartärkiese.

**Tabelle 1: Hydrogeologische Standortdaten**

Hydraulische Parameter	Quartär	Tertiär
$K_f$ -Wert	$10^{-2}$ m/s	$10^{-4}$ - $10^{-5}$ m/s
Hydraulisches Gefälle	2 - 3 ‰	2 - 4 ‰
Abstandsgeschwindigkeit	40 m/d	0,4 m/d
Effektive Porosität	26 %	10 %
Flurabstand (Druckwasserspiegel)	ca. 6 m	ca. 6 m

### Schadstoffsituation

Im Laufe der Betriebszeit des Gaswerks München Moosach wurden durch den technischen Standard der damaligen Zeit, durch Unachtsamkeit im Umgang mit Gefahrstoffen, durch unkontrollierte Abfall- und Reststoffentsorgung sowie durch Kriegseinwirkungen Schadstoffe in den Untergrund eingebracht.

Das Ergebnis der technischen Erkundungen und der laufenden Grundwasseruntersuchungen kann grundsätzlich wie folgt festgehalten werden:

- Die vorhandenen anorganischen Schadstoffe sind kaum eluierbar, sodass sie keine relevante Grundwassergefährdung darstellen, jedoch je nach Nutzung eine Gefahr für den Menschen.
- Leichtflüchtige Komponenten (z.B. LAKW) sind nicht mehr in nennenswerten Konzentrationen feststellbar (verfrachtet, abgebaut).
- Als Hauptkontaminanten sind Polycyclische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) anzuführen. Sie kommen zum Teil in Teer und Teerölen in Phase vor und sind dann sehr mobil.

Die Gehalte an Teer und Teeröl im Boden übersteigen teilweise dessen Sättigungsvermögen, woraus PAK-Gehalte von mehr als 30.000 mg/kg resultieren können. Insgesamt ist festzuhalten, dass die Verteilung der Schadstoffe äußerst heterogen ist, hoch belastete Bodenbereiche wechseln engräumig mit nahezu unbelasteten Bodenbereichen.

Aufgrund der langjährigen Beobachtung des Grundwassers am Gaswerksgelände München liegen gut abgesicherte Erkenntnisse über dessen Belastung sowie die Zusammensetzung des PAK-Spektrums vor. Die Summengehalte für PAK können partiell bis zu mehrere mg/l erreichen. Im Trassenbereich des Funnel-and-Gate-Systems an der abstromigen Grundstücksgrenze kann davon ausgegangen werden, dass PAK-Gehalte von 100 µg/l nicht überschritten werden.

## 2 Mögliche Sanierungsvarianten

Aufgrund der Größe des Standorts sowie der heterogenen Verteilung der Schadstoffe bis in eine Tiefe von 10 m unter GOK war die Dekontamination der Altlast keine realistische Sanierungsoption. Insofern fokussierten sich die Sanierungsplanungen bereits früh auf die Untersuchung von Sicherungsvarianten.

Die klassische hydraulische Sicherung mittels Pump-and-Treat schied unabhängig von den Kosten aus folgenden Gründen als Sanierungstechnologie für das Gesamtgelände aus:

- Der langjährige Betrieb einer Grundwasserreinigungsanlage auf einer Teilfläche des Areals ergab, dass durch die Eingriffe in die Grundwasserhydraulik Teeröle verlagert werden und diese die hydraulische Sicherung in der Folge als Schwerphasen durchbrechen können. Eine Sicherung der Altlast an der abstromigen Grundstücksgrenze war somit nicht möglich.
- Eine Sicherung des zweiten Grundwasserleiters war mittels Pump-and-Treat nicht möglich, ohne dass Schadstoffe in die Tiefe verfrachtet worden wären.

Als Sanierungsvariante wurde daher eine hydraulische Sicherung mittels Funnel-and-Gate gewählt.

## 3 Technische Ausführung Funnel-and-Gate-System

Aufbauend auf eine dreidimensionale, hydraulische Modellierung erfolgte die bau- und anlagentechnische Planung des Funnel-and-Gate-Systems. Mittels einer trichterförmigen Dichtwand, die sich bis in den Stauer des zweiten Grundwasserleiters in etwa 25 m Tiefe erstreckt und eine Gesamtlänge von etwa 1,2 km aufweist, wird der schadstoffbelastete Grundwasserstrom gefasst und vier unterirdischen Durchlaufbauwerken zugeführt. Eine Gesamtübersicht des Funnel-and-Gate-Systems ist aus Abbildung 1 ersichtlich.



Abbildung 1: Blick von Norden auf das ehemalige Gaswerksgelände mit Lage von Funnel (blau) und Gates (rot) sowie Grundwasser-Fließrichtung (Pfeil)

Ein Längsschnitt durch ein derartiges Gate ist in Abbildung 2 dargestellt. Bei den Gates handelt es sich um Schachtbauwerke mit einer Länge von bis zu 35 m, einer Breite von etwa 7 m und einer Tiefe von etwa 14 m. Die tragende Struktur der Gates bilden ausgesteifte Stahlspundwände, die Bodenplatte besteht aus Stahlbeton. Die Decke wird aus abnehmbaren Betonelementen gebildet. Im Endzustand wurde die gesamte Anlage mit etwa 2 m Erdreich überschüttet und kommt unter einem Biotopbereich zu liegen. Der Zugang zu den Gates ist über Schächte jederzeit möglich.

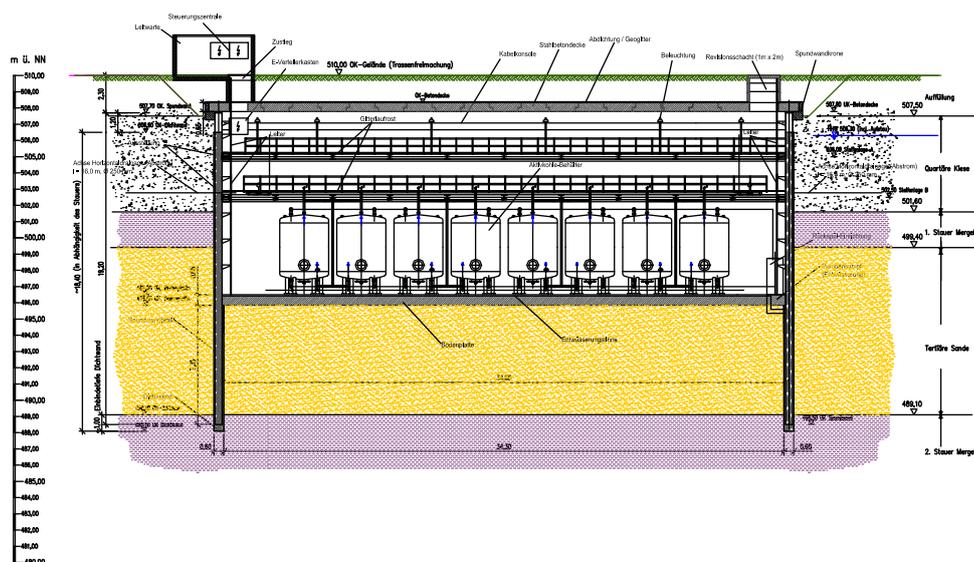


Abbildung 2: Längsschnitt durch ein Gatebauwerk

Wie im Querschnitt durch ein Gate aus Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. ersichtlich, wird das Grundwasser mittels 16 m langer Horizontalfilterbrunnen, die aus den Gates gebohrt wurden, gefasst, durch Aktivkohle-Filterbehälter geleitet und gereinigt wieder über Horizontalfilterbrunnen an den Aquifer abgegeben. Die Durchströmung erfolgt im natürlichen Gefälle, Pumpen oder sonstige Hilfseinrichtungen sind nicht erforderlich.





**Abbildung 4: Anlagentechnik Gate I**

Anlagentechnisch wurden die Gates zusätzlich so ausgerüstet, dass das gereinigte Grundwasser aus den Gates entnommen werden und zur Klimatisierung von Gewerbebauten auf dem Areal eingesetzt werden kann. Das dabei erwärmte Grundwasser wird außerhalb des Systems versickert. Durch diese thermische Nutzung des Grundwassers, die ohne Funnel-and-Gate-System nicht möglich gewesen wäre, kann eine Kälteleistung von bis zu 2 MW dargestellt werden.

### **3 Betriebserfahrungen**

Die Inbetriebnahme des Funnel-and-Gate-Systems erfolgte Ende 2004, die der Kältenutzung in 2008. Somit liegen bisher knapp 10 Jahre Betriebserfahrung zum System vor.

Als wichtigste Punkte lassen sich anführen:

- Die Anlagenverfügbarkeit lag bisher bei 100 %, es gab keinerlei Ausfallzeiten, die beispielsweise einen Bypassbetrieb erfordert hätten.
- Auch mehrfache Stromausfälle im Umfeld des Systems hatten keine Auswirkungen, da die Reinigungstechnik ohne jegliche Hilfsenergie arbeitet und die Messtechnik durch eine unterbrechungsfreie Stromversorgung gestützt wird.
- Die bisher höchsten Grundwasserdurchsätze wurden mit 110 l/s festgestellt. Höhere Durchsätze wären unproblematisch möglich, ergaben sich jedoch aufgrund der hydrogeologischen Randbedingungen bisher nicht.
- Der mittlere Durchsatz durch das System lag über den Betriebszeitraum bei 85 l/s, so dass bisher insgesamt ca. 27 Mio. m<sup>3</sup> Grundwasser durchgesetzt wurden.
- Der hydraulische Gradient am System liegt um ein mehrfaches unter den vorgegebenen Zielwerten (im Mittel ca. 20 cm), und zeigt sich bisher als stabil.

- Die bisher maximal festgestellte PAK-Belastung des Grundwassers lag bei 40 µg/l, im gereinigten Grundwasser konnten zu keinem Zeitpunkt Schadstoffe nachgewiesen werden.
- Durch die Systemauslegung konnte der Druckwasserspiegel im zweiten Grundwasserleiter derart erhöht werden, dass eine Schadstoffverfrachtung zur Tiefe ausgeschlossen ist.
- Das System ist über Fernwirktechnik auf eine Leitwarte aufgeschaltet und erfordert damit nur für Wartungsarbeiten den Einsatz von Personal.
- Die an das System angegliederte thermische Nutzung des Grundwassers ermöglicht die Darstellung einer Kälteleistung von bis zu 2 MW. Im Mittel wurden seit 2008 kontinuierlich 330 KW Kälteleistung ausgekoppelt.
- Die thermische Nutzung des Grundwassers bewirkt bei der Klimatisierung der umgebenden Gebäude Kosteneinsparungen, die die Betriebskosten des Systems etwa um den Faktor 2 bis 3 übersteigen.
- Aufgrund der umfassenden hydraulischen Sicherung war es möglich, das Areal nahezu ohne Einschränkungen einer baulichen Nachfolgenutzung zuzuführen.
- Durch die vollständig unterirdische Anordnung der Anlagentechnik konnte der Trassenbereich des Funnel-and-Gate-Systems als Biotop renaturiert werden. Die gesamte Fläche konnte damit als naturschutzfachlich erforderliche Ausgleichsfläche bei der Bauleitplanung des Areals angerechnet werden.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass durch die Auslegung des Funnel-and-Gate-Systems die vollständige Sicherung eines Grundwasserabstromquerschnitts von mehr als 1 ha Fläche erreicht werden konnte. Die vollständig passive Funktionsweise der Anlage sowie die durch das Sicherungssystem erst mögliche thermische Nutzung des Grundwassers ergaben in Summe bisher eine Einsparung elektrischer Energie von deutlich mehr als 10.000 MWh.

Für die Planung des Funnel-and-Gate-Systems wurde der BFM Umwelt GmbH im Jahr 2006 durch die Bayerische Landesstiftung der Bayerische Umweltpreis verliehen.

## **7. 15 Jahre Funnel and Gate "Brunn am Gebirge" – Langzeiterfahrungen**

*Niederbacher Peter, Österreich*

### **Einleitung**

Am Standort der ehemaligen Linoleumfabrik in Brunn am Gebirge wurden 1997 im Zuge von Aufschließungen zur Errichtung eines Businessparks Kontaminationen im Boden und Grundwasser durch Rückstände der Teerverarbeitung einer ca. 1878 – 1929 betriebenen Teerfabrik festgestellt. Nach umfangreichen umwelttechnischen Erkundungen wurde der Standort 1998 als Altlast N28 klassifiziert. Die Fläche des Altstandortes beträgt ca. 6 ha.

Im Zeitraum 10/1998 bis 06/1999 wurde auf dem Areal die Sanierung der ungesättigten Bodenzone (Sanierungsaushub der betriebsbedingten Kontamination) durchgeführt. Die vollständige Entfernung der Restkontamination (Schadstoffe: PAK's, Aromaten, Phenole, Kohlenwasserstoffe, Spuren CKW) in der Grundwasserschwankungs- und gesättigten Zone war auf Grund der Ausdehnung technisch und wirtschaftlich nicht möglich. Als Alternative wurde das Szenarium einer Grundwassersicherung untersucht, die auf die lokalen Gegebenheiten insbesondere auf den zu errichtenden Landschaftsteich im seitlichen Grundwasser oberstrom abgestimmt war.

### **Geologisch-hydrogeologische Standortcharakteristik**

Aufgrund der lokalen hydrogeologischen und umwelttechnischen Situation mit einer bevorzugten Wasserwegigkeit entlang der festgestellten, in den Grundwasserstauer (Pannon) eingesenkten quartären Tiefenrinne, der nachgewiesenen Grundwasserkontamination im südlichen Teilbereich und der geplanten Grundwasserabsenkung durch die Anlage des Teiches, waren die Realisierungsvoraussetzungen einer Grundwassersicherung unter Nutzung der durch den Landschaftsteich künstlich geschaffenen Vorflut gegeben.

### **Adaptierung des Funnel&Gate-Konzeptes**

Zur umwelttechnischen Sicherung des Altstandortes der "Ehemaligen Linoleumfabrik Brunn am Gebirge" wurde daher die Grundwassersicherungs- und Reinigungsanlage nach einer standortangepassten Adaptierung des Funnel&Gate Konzeptes geplant und im Zeitraum 02-07/1999 errichtet und im 09/1999 in Betrieb genommen. Der Anlage wird auf Grund der speziellen Bauart als "Adsorptive Reactor and Barrier" (AR&B) System bezeichnet. Sie dient der Verhinderung des Abstromes von kontaminiertem Grundwasser aus dem südlichen Bereich des Altstandortes, dem Schutz des nördlich gelegenen Landschaftsteiches und dessen Dotation durch das abgereinigte Grundwasser. Nach Brancheninformationen war das Projekt zum Errichtungszeitpunkt die erste im Industriemaßstab realisierte Anlage nach dem adaptierten Permeable Reactive Barrier Konzept in Europa.

## Anlagencharakteristik

Die Anlage ist zur Gänze unterflurig versenkt eingebaut und besteht aus der West → Ost verlaufenden Dichtbarriere nördlich der nachgewiesenen Grundwasserkontamination. Die Dichtbarriere bindet im Osten in die Hochzone des Grundwasserstauers (Tegel, Pannon) ein. Zur Grundwasserreinigung dienen vier im Untergrund abgesenkte In-Situ Großfiltereinheiten (DM 2 m, Aktivkohleinhalt je ca. 11 m<sup>3</sup>). Die Filterpassage und der Abfluß des gereinigten Grundwassers erfolgt durch den Gradientenunterschied zwischen dem Anstrombereich südlich der Dichtwand und dem Teich im Norden, der eine künstlich geschaffene Vorflut darstellt.

## Betrieb und Überwachung, Monitoring

Für die Erfassung der Grundwasserverhältnisse und zur Beprobung steht ein Messstellen-netz im Umfeld der Dichtwand sowie an den Großfiltereinheiten (Gates) und dessen Ablauf zur Verfügung. Das Monitoring der Anlage erfolgt durch ein System von Registriereinrichtungen zur Erfassung der Pegelstände, der Wassermenge des gereinigten Abstromes und hydrophysikalischer Parameter (am Ein- und Ablauf der Filtereinheiten) an ausgewählten Meßstellen. Die Daten werden teilweise fernübertragen und stehen zur Kontrolle der Anlage und Auswertung zur Verfügung.

## AR&B BRUNN am Gebirge

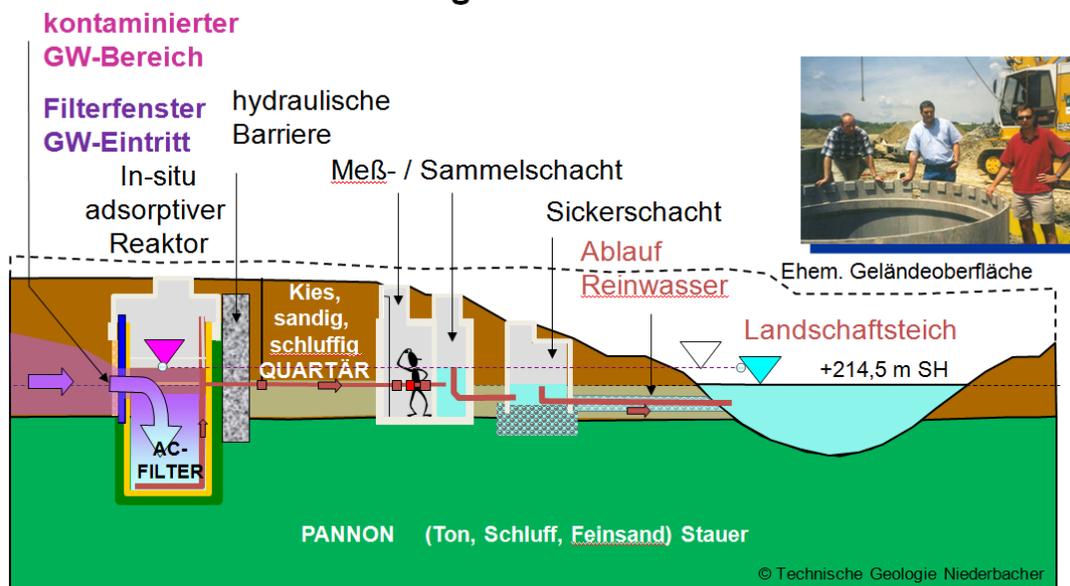


Abb.: Schema des Adsorptive Reaktor & Barrier (AR&B) Systems Brunns am Gebirge

Im erreichten Routinebetriebszustand der Anlage ist die umwelttechnische Sicherung der festgestellten Grundwasserkontamination am Altstandort der "Ehemaligen Linoleumfabrik Brunns a. G." am Areal des Businessparks "campus21" gewährleistet. Damit waren 2010 die Voraussetzungen für die Einstufung des Standortes als gesicherte Altlast gegeben.

### **Betriebserfahrungen und Ausblick**

Das AR&B System Brunn am Gebirge ist nunmehr seit fast 15 Jahren durchgehend im Betrieb. In diesem Zeitraum wurden über 210.000 m<sup>3</sup> PAK-kontaminiertes Grundwasser abgereinigt. Der Durchsatz beträgt durchschnittlich ca. 0,6 l/s (saisonal bis >2 l/s). Bei einer Schadstofffracht von bis zu 360 µg/l PAKs (z.B. in 2013) beträgt der Schadstoffrückhalt bis ca. 5 kg pro Jahr (ca. 40-50 kg seit Betriebsbeginn). Bedingt durch wechselnde klimatische Verhältnisse (langjährige mittlere Jahresniederschlagsmenge um 600 mm) wurden im Betriebsverlauf relativ große Schwankungen der Schadstoffführung (PAK) festgestellt.

Das System ist seit Ende 1999 durchgehend in Betrieb. Der Adaptierungsbedarf war bisher sehr gering. Nach ca. 2 Betriebsjahren wurde am Gate 2 eine Kolmatierung der Aktivkohleoberfläche des vertikal von oben nach unten durchströmten Großfilters durch einen Biofilm festgestellt, wodurch der Durchfluss behindert wurde. Nach Entfernung der oberen Aktivkohleschicht und dem Auffüllen des Filters mit Aktivkohle bis über das Niveau der Filterfenster konnte die Störung behoben werden. Des Weiteren wurde eine Adaptierung mit einer flotierenden Luftpolsterfolie vorgenommen, wodurch der direkte Luft-Wasser-Kontakt im Gate minimiert wird. Ein wiederkehrendes Problem betraf Einwurzelungen der Oberflächenvegetation am reinwasserseitigen Ablaufschacht und dem Anschluss des Überlaufes zum Landschaftseich, der den Vorfluter des Systems darstellt. Die Einwurzelungen und Verockerungen im Ablaufschacht wurden im Bedarfsfall entfernt. In der Folge werden gärtnerische Maßnahmen zur Verhinderung der Einwurzelungen gesetzt. Um den ungehinderten Überlauf zum Landschaftsteich dauerhaft zu gewährleisten wurde im vergangenen Betriebsjahr, in den teilweise als Filterrohr mit Drainagestrecke ausgebildeten Ablauf, ein Vollrohr eingezogen. In der kommenden Betriebsaison ist ein Teilaustausch der Filteraktivkohle vorgesehen.

### **Resumee**

Die Implementierung des AR&B-System Brunn am Gebirge zeigt die erfolgreiche Anpassung des Funnel&Gate-Konzeptes im Industriemaßstab an standortspezifische hydrogeologische und umwelttechnische Bedingungen. Durch die passive Durchströmung ohne jeglichen Pumpaufwand und die großzügige Anlagenauslegung passt sich das System selbsttätig an die saisonal wechselnden Grundwasserverhältnisse an. Die durchgeführten Adaptierungen betrafen punktuelle Maßnahmen zur Aufrechterhaltung des ungehinderten reinwasserseitigen Abflusses. Diese konnten mit geringem Aufwand durchgeführt werden. Die zur Grundwasserreinigung eingesetzte Formaktivkohle hat sich bewährt, die vollständige Reinigungsleistung wird durch das laufende Monitoring nachgewiesen. Die Anlage ist auf Langzeitbetrieb ausgelegt.

### **Literatur**

Birke, V., Burmeier, H., Niederbacher, P., Wegner, M., Maier, D., Eggers, J., Maier, M., Hofmann, B., Kühlers, D., Weindl, J. & Koch, M. (2004). Zur Abreinigung durchströmter Reinigungswände (PRB): Hinweise und Rückschlüsse für die Sanierungspraxis und weitere Entwicklung. Altlasten Spektrum. 06/2004, pp. 301-317.

Niederbacher, P. & Nahold, M. (2005) Installation and operation of an Adsorptive Reactor and Barrier (AR&B) system in Brunn am Gebirge, Austria. In: Roehl, K.E., Meggyes, T., Simon, F.-G. & Steward, D.I. (eds.): Long-term Performance of Permeable Reactive Barriers. Elsevier B.V. Vol. 7.

Niederbacher, P & Gregori, M. (2006) Operational Experience of the site adapted AR&B System Brunn a. G., Austria. Tagungsband Depotech 2006, S. 531-536.

### **Anschrift des Verfassers**

Dr. Peter Niederbacher, Ingenieurkonsulent für Technische Geologie  
Weidlinger Straße 14/3, 3400 Klosterneuburg. Web: [www.geol.at](http://www.geol.at)

## 8. Forschungsvorhaben Halocrete

*Peter Freitag, Österreich*

### **Einsatz von Eisen in reaktiven Wänden**

Der Einsatz von nullwertigem Eisen (ZVI) in der Altlastensanierung wird seit einigen Jahren untersucht und ist gut dokumentiert. Dieser Beitrag möchte einige neue, innovative Projekte aus Anwendung und Forschung näher darstellen.

### **Säulenversuche zur kombinierten Entfernung von TCE und Metallen aus dem Grundwasser**

Da chlorierte Kohlenwasserstoffe häufig im Bereich der Metallverarbeitung eingesetzt wurden, können in einigen Fällen an Altstandorten Mischkontaminationen von CKW und Metallen im Grundwasser vorgefunden werden. Theoretisch könnte in permeablen reaktiven Wänden ZVI nicht nur zur Reduktion von chlorierten Kohlenwasserstoffen, sondern auch zur Elimination von Schwer- und Halbmetallen durch Sorptions- und Reduktionsprozesse eingesetzt werden. Es gibt derzeit in der Fachliteratur allerdings kaum Hinweise, ob diese Reaktionen parallel zueinander ablaufen können und sich nicht gegenseitig beeinflussen. Um die prinzipielle Eignung von ZVI für den Einsatz bei Mischkontaminationen zu erbringen und um gleichzeitig Säulenversuche als Methode für weiterführende Untersuchungen zu etablieren, wurden am AIT in Tulln im Zuge zweier Diplomarbeiten Versuche durchgeführt. Glassäulen mit einer Höhe von 50 cm wurden mit einer Mischung aus ZVI und Quarzsand befüllt. In parallelen Versuchsansätzen mit jeweils drei Wiederholungen wurden einerseits die Elimination der Kontaminanten TCE, sowie der Metalle Nickel und Arsen bei Vorliegen als Einzelkontamination und andererseits bei Vorliegen als Mischkontamination untersucht. Beim Versuchsdesign wurde vor allem großes Augenmerk darauf gelegt, ungewollte gasförmige Verluste von TCE zu minimieren, da dies unserer Meinung nach, bislang bei vielen in der Literatur beschriebenen Experimenten, nicht ausreichend berücksichtigt wurde. Zum Einsatz kamen daher spezielle Vorratsbehälter, Schlauchkopplungen, Dichtungen und Leitungen [Abb. 1]. Auch die Probenahme-Methodik wurde optimiert.



Abb. 1: Vorbereitung der TCE-Lösung in Tedlar-Säcken. Im Insert ist eine Schlauchkopplung zu sehen.

Die Ergebnisse der Versuche zeigten, dass sich die Reaktionen gegenseitig nicht beeinflussen. Sowohl die Elimination der Metalle, als auch die reduktive Dechlorierung von TCE fanden erwartungsgemäß separat, als auch kombiniert in einem zufriedenstellenden Ausmaß statt [Abb. 2].

Weiters zeigten die Ergebnisse, dass sich bei entsprechender Sorgfalt auch im Säulenversuch mit TCE reproduzierbare Ergebnisse erzielen lassen.

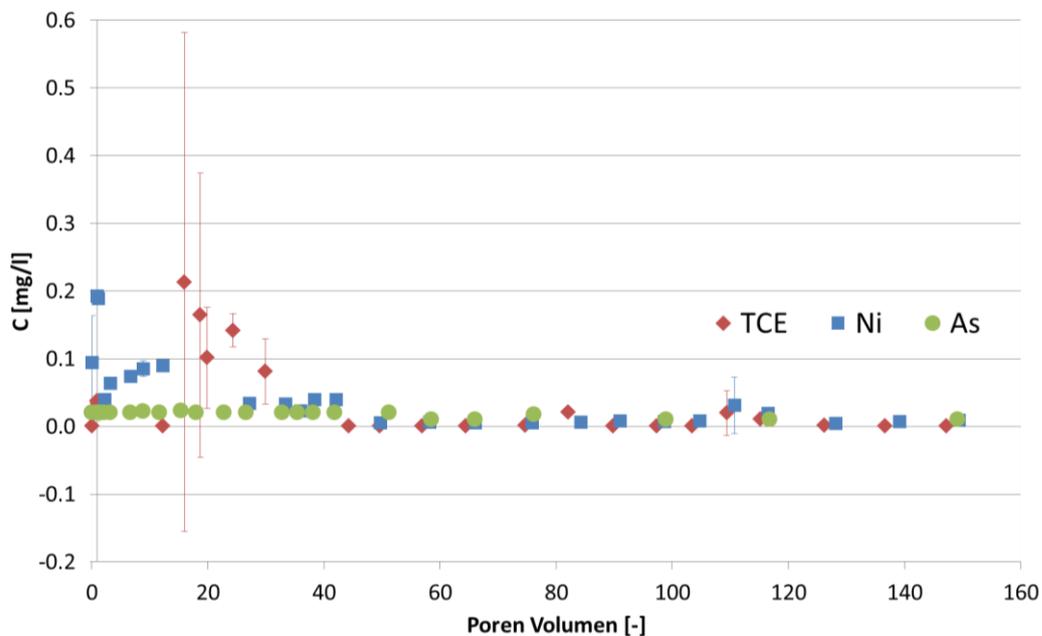


Abb. 2: Gehalte an Nickel, Arsen und TCE nach Passieren der Säule

### Herstellung von reaktiven Wänden im Düsenstrahlverfahren

Das Düsenstrahlverfahren (DSV) wird üblicherweise eingesetzt, um Verfestigungszonen im Untergrund herzustellen, die eine statische Funktion haben. Dazu wird zuerst eine Bohrung abgeteuft. Nach Erreichen der Zieltiefe wird über Kanäle im Gestänge unter hohem Druck, bis zu 400 bar, Suspension in den Boden eingebracht. Das Gestänge wird dabei unter drehender Bewegung wieder aus dem Boden gezogen. Dadurch entstehen zylinderförmige Säulen im Boden [Abb. 3].

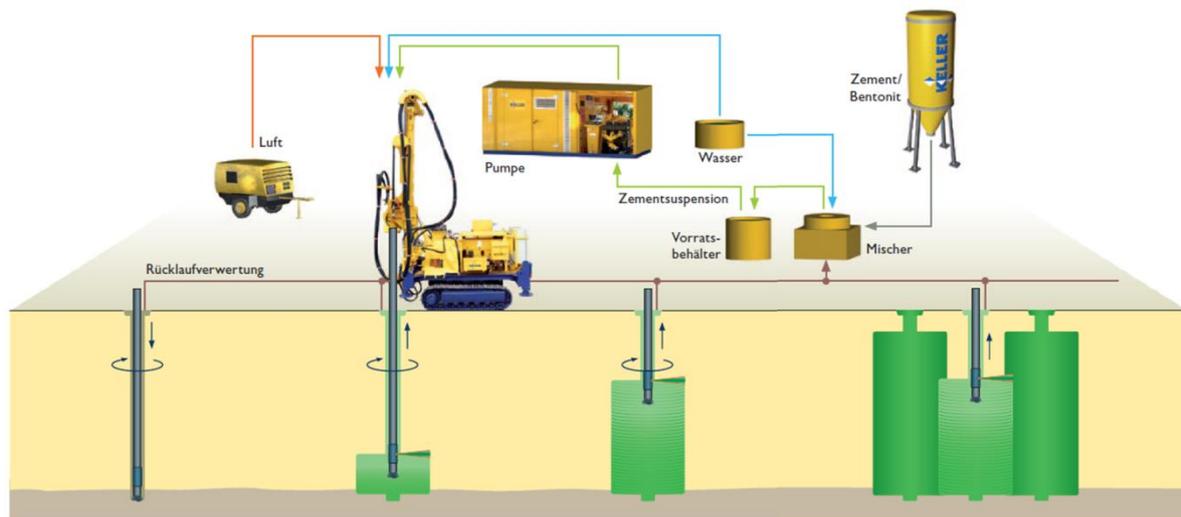


Abb. 3: Düsenstrahlverfahren

Um mit diesem Verfahren reaktive Wände herstellen zu können, sind Adaptierungen erforderlich. So kann z.B. Zement nicht eingesetzt werden, da dieser unweigerlich die Durchlässigkeit verringern würde.

Bei einem Projekt in Memphis, Tennessee (USA) hat Keller Grundbau erfolgreich mit dem DSV reaktive Wände hergestellt. Zwei wesentliche Punkte haben dabei zum Erfolg des Projekts beigetragen:

- Ersatz von Zement durch Guarkernmehl als Zuschlagstoff zur Suspension. Guarkernmehl zersetzt sich nach einigen Tagen, sodass die Durchlässigkeit der resultierenden Säule über die Menge an zugegebenem Guarkernmehl gesteuert werden kann [Abb. 4].
- Zweiphasige Herstellung der Säulen. Zuerst wurde der Boden im Bereich der reaktiven Wand nur erodiert, sodass beim zweiten Einsatz die Säulen wesentlich kontrollierter und mit geringeren Suspensionsverlusten hergestellt werden konnten.



Abb. 4: Guarkernmehl-Sand-Eisen-Suspension

### **Forschungsvorhaben Halocrete**

Halocrete stellt eine Weiterführung der Anwendung des Düsenstrahlverfahrens dar und zielt darauf ab, eine in situ Sanierung von Chlorkohlenwasserstoff (CKW) kontaminierten Standorten zu ermöglichen. Ziel ist die Injektion einer reaktiven Suspension von Eisenpartikeln, die mit den vorhandenen chlorierten Kohlenwasserstoffen reagiert indem das Chlor der CKW durch Elektronenübertragung vom Eisen abgespalten wird.

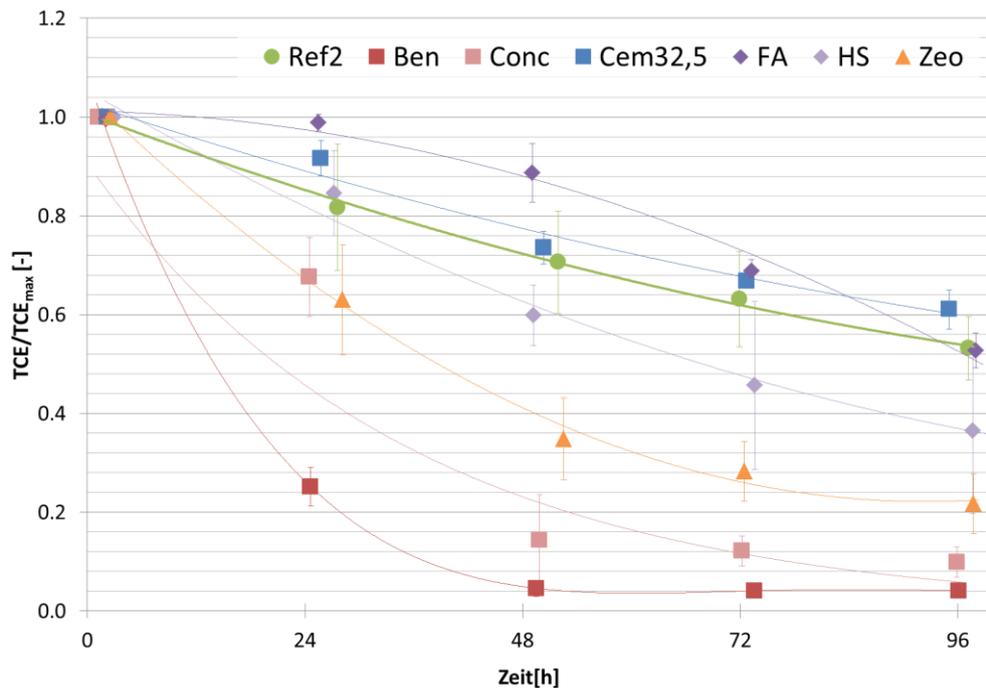
Eine Schwierigkeit die sich bei der praktischen Durchführung zwangsläufig ergibt sind die bodenmechanischen Vorgänge beim Erstellen der Säule, da der Boden durch die Behandlung kurzfristig seine Festigkeit verliert. Auf der „grünen Wiese“ stellt das sicher kein Problem dar, aber in verbauten Gebieten sind Setzungen und deren Folgen an Gebäuden tunlichst zu vermeiden. Daher wurde im Projekt Halocrete zunächst nach Bindemitteln und Kombinationen von Bindemitteln gesucht, die den reduktiven Abbau von CKW nicht verlangsamen.

Diese Untersuchungen wurden mit Hilfe von Batch-Versuchen durchgeführt. Dabei wurden 10 ml kontaminiertes Grundwasser mit 10 ml eisenhaltiger Suspension vermischt und die ablaufenden Reaktionen über Headspace-Gas-Messungen verfolgt. Als Zuschlagstoffe für die Untersuchungen wurden sechs Bindemittel (Zement, Flugasche, Hüttensand, Zeolith, Coneresol und Bentonit) eingesetzt, mit denen normalerweise jede geotechnische Anforderung abgedeckt werden kann.

Gemessen wurden die Mengen von TCE, sowie von Abbau- und Zwischenprodukten. Aus dem hohen Dampfdruck des TCE folgten dabei hohe Ansprüche an die Dichtigkeit, auch unter Überdruck.

Die Ergebnisse der Versuchsreihen [Abb. 5] lassen sich im Wesentlichen in drei Punkte zusammenfassen:

- Zement und hydraulische Bindemittel brachten die Reaktionen nicht zum Erliegen
- Tone hatten eine katalytische Wirkung auf den reduktiven Abbau von TCE durch nullwertiges Eisen
- Eine Kombination verschiedener Bindemittel erscheint gesamtheitlich als beste Lösung



**Abb. 5: Vergleich des TCE Abbaus unter Anwesenheit verschiedener Bindemittel**

Ref2...Referenz; Cem32,5...Zement I R32,5; Conc...Concresol; HS...Hüttensand; FA...Flugasche; Zeo...Zeolith;  
Ben...Bentonit

## Ausblick

Die vorgestellten Projekte haben einige Fragen beantwortet, viele Neue sind jedoch aufgeworfen worden. So laufen im Halocrete Projekt gerade Säulenversuche und die Vorbereitung für eine Großversuchsserie, womit die praktische Anwendung im Feld bzw. ein Pilotversuch vorbereitet werden soll.