



BMBF-Verbundvorhaben
„Anwendungen von Reinigungswänden“
„Reinigungswände und -barrieren im Netzwerkverbund“
„RUBIN Phase 2“

**Verbundprojekt: RUBIN – Entwicklung einer schnellen Methode zur
Beurteilung und Auswahl technischer Eisensorten, Teilprojekt 1:
Koordination des Förderschwerpunktes und chemische, analytische und
prozesschemische Untersuchungen an technischen Eisensorten**

Schlussbericht

der Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften,
Fakultät Bau-Wasser-Boden, Campus Suderburg
(vormals Leuphana Universität Lüneburg,
seit 01.09.2009 Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften)
Prof. Dipl.-Ing. H. Burmeier, Dr. V. Birke

für die Laufzeit 01. November 2006 bis 31. August 2012

Förderkennzeichen: 02WR0828

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 02WR0828 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

I. Kurzdarstellung

Vorbemerkung

Das Projekt der Ostfalia Hochschule gliederte sich in 2 Themenbereiche und damit in 2 Hauptbearbeitungslinien:

1. die Fortführung der Gesamtkoordination des Forschungsverbundes von November 2006 bis August 2012 (Vorgängerprojekt von März 2000 bis Oktober 2006) bzw.
2. die Durchführung eines Forschungsvorhabens im Labormaßstab zur Reaktivität technischer Eisensorten, gemeinsam mit dem Partner VKTA in Rossendorf, mit dem ein Kleinverbund innerhalb von RUBIN zu diesem Thema bestand.

Dieser Schlussbericht beinhaltet die Beschreibung und Resultate beider Teilprojekte. Sämtliche Arbeiten mündeten in die Erstellung des Ergänzungsbandes zum Handbuch für durchströmte Reinigungswände, der im Anhang enthalten ist. Nachfolgend werden Planung und Ablauf des Vorhabens in Bezug auf die jeweiligen Arbeitspakete aufgeführt; die Arbeitspakete 100 bis 500 umfassten den Koordinierungsteil des Vorhabens, die Arbeitspakete 600 und 900 das Forschungsprojekt zur Reaktivität technischer Eisensorten.

1. Aufgabenstellung

Reinigungswände, 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 and Treat, P&T) 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 der Nachweis und die Bewertung von Eignung und Leistungsfähigkeit des innovativen Verfahrens und die Ermittlung der Einsatzfelder.

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.

Ab 2006 griffen weitergehende Vorhaben die Erkenntnisse der Grundlagenermittlung von 2000 bis 2006 auf und untersuchten insbesondere die limitierenden Einflüsse für den Sanie-

rungserfolg. Die für die Phase 2 initiierten Projekte (siehe Tab. 1) konzentrierten sich folglich von 2006 bis 2011 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 durchströmter Reinigungswände:

- 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 Funnel & Gate-Systems (F&G) mit Biosorptionsreaktor,
- Eignungsprüfung einer Reinigungswand für den Gewässerschutz in Bergbaufolgelandschaften,
- Optimierung der katalytischen Dehalogenierung mit palladiumdotierten Zeolithen.

Aufgabenschwerpunkt 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 chlorierten Ethenen gezeigt. Die Gründe für diese auffälligen Befunde waren unbekannt. Verblockungen durch Ausfällungen ließen sich nicht feststellen, und Gaslogging 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 Verein für Kernverfahrenstechnik und Analytik, Dresden / Rossendorf (VKTA), untersuchte die jeweilige Reaktivität unterschiedlicher Produktionschargen einer technischen Eisensorte. Das Projekt umfasste neben der Identifikation von Schlüsselparametern zur Materialzusammensetzung, elektrochemischer Eigenschaften, der Oberflächenbeschaffenheit und der Porosität die Entwicklung einer schnellen Methode zur prognostischen Beurteilung der Leistungsfähigkeit von technischem Eisen beim Abbau von chlorierten Ethenen und die Definition von Qualitätsanforderungen für die Auswahl des Eisens vor dem Einbau in eine Reinigungswand.

Tabelle 1. Zusammenstellung der RUBIN-Projekte Phase 2 (2006-2012)

Teilvorhaben			Laufzeit
1	Entwicklung einer schnellen Methode zur Beurteilung und Auswahl technischer Eisensorten		
02WR0828	Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften, Campus Suderburg	Teilprojekt 1: Chemische, analytische und prozesschemische Untersuchungen an technischen Eisensorten	1. Nov. 2006 bis 31. August 2012
02WR0829	VKTA – Verein für Kernverfahrenstechnik und Analytik	Teilprojekt 2: Elektrochemische, korrosionschemische und oberflächenanalytische Untersuchungen	1. Okt. 2006 bis 31. Dez. 2010
2	Gasbildung in Eisen(0)-Reinigungswänden (GaFeR)		
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	1. Juli 2006 bis 31. Okt. 2010
02WR0752	Technische Universität Berlin	Teilprojekt 2: Einfluss von Gasentwicklung und Präzipitatbildung auf die Dechlorierungsleistung und Hydraulik von Fe(0)-Systemen mit komplex zusammengestellten Standortwässern	1. Juli 2006 bis 31. März 2010
02WR0753	DVGW Technologiezentrum Wasser (TZW), Karlsruhe	Teilprojekt 3: Analyse und mögliche Steuerung der mikrobiologischen Prozesse zur Ertüchtigung von Fe(0)-Reaktionswänden	1. Juli 2006 bis 31. März 2010
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	1. Juli 2006 bis 31. März 2010
3	Standortübergreifende Untersuchungen zur Langzeit-Retardation von BTEX, PAK, Hetero-PAK und Cyaniden in Aktivkohle-Reinigungswänden an ehemaligen Gaswerksstandorten		1. Aug. 2006 bis 31. Dez. 2010
02WR0763	Leuphana Universität Lüneburg		
4	Entwicklung und Erprobung eines F&G-Systems mit Biosorptionsreaktor zur Fassung und Abreinigung von Grundwasserkontaminationen mit BTEX-Aromaten und PAK		1. Mai 2002 bis 30. Sept. 2009
02WR0293	HIM GmbH		
5	Stärkung des Entwicklungspotenzials von Bergbaufolgelandschaften durch den Schutz von Oberflächengewässern vor schwefelsauren Grundwasserzuflüssen mittels reaktiver Reinigungswände		1. April 2005 bis 30. Sept. 2007
02WR0527	Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft (LMBV)		
6	Weitergehende Untersuchungen zur Entwicklung des Verfahrens der katalytischen Dehalogenierung in wässriger Phase mittels palladiumdotierter Zeolithe		1. Mai 2005 bis 30. Sept. 2008
02WR0548	I.M.E.S. Gesellschaft für innovative Meß-, Erkundungs- und Sanierungstechnologien, Amtzell		

Aufgabenschwerpunkt 2: Gasbildung und Gaslogging 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 Fe(0)-Reaktionswand am Markt anzusehen.

Die Gasbildung in Eisenwänden und das darauf zurückzuführende, an einigen deutschen Standorten in erheblichem Ausmaß beobachtete Gaslogging (die Verblockung der wasser-durchlässigen Eisenschüttung durch Gasbläschen) 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 Grundwasserforschungszentrum (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 Gasentwicklung im Feldeinsatz beherrschbar zu machen.

Aufgabenschwerpunkt 3: Rückhaltevermögen von Aktivkohle

Die Adsorption polarer hetero-polycyclischer aromatischer Kohlenwasserstoffe (hetero-PAK, 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 2 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.

Aufgabenschwerpunkt 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. GmbH, 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.

Aufgabenschwerpunkt 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 Lehr-

stuhl für Wassertechnik und Siedlungswasserbau der Brandenburgisch Technischen Universität Cottbus.

Aufgabenschwerpunkt 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 der I.M.E.S. GmbH. 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 Aufgabenschwerpunkte erfolgte in zehn Teilvorhaben. Jeweils zwei (sogenannter Eisenverbund) und vier (sogenannter Gasverbund) fanden sich zu fachlichen Clustern zusammen. Tabelle 1 verdeutlicht die Verbundstruktur, die Kooperationen und die beteiligten Forschungsstellen und Unternehmen. Der Ergänzungsband zum Handbuch fasst in Kapitel 2 die Ergebnisse aller Projekte in Einzelberichten zusammen.

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde Erfahrungen (Lessons Learned) aus RUBIN Phase I (2000-2006)

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 „Efficiently Controllable“-PRB (EC-PRB) 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 (ReSponge, 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 re-

aktiven 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“ (D&G) 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.
- 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 nach bis zu fünf Jahren (siehe Handbuch 2006, Kap. 4.5). 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.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt der Ostfalia Hochschule umfasste, wie bereits zuvor erwähnt, 2 thematisch abgegrenzte Bereiche innerhalb des Förderschwerpunktes RUBIN in der Phase 2, d.h. die Fortführung der Gesamtkoordination des Forschungsverbundes von November 2006 bis August 2012 (Vorgängerprojekt von März 2000 bis Oktober 2006), und, darüber hinaus, die Durchführung eines Forschungsvorhabens im Labormaßstab zur Reaktivität technischer Eisensorten, gemeinsam mit dem Partner VKTA in Rossendorf, mit dem ein Kleinverbund innerhalb von RUBIN zu diesem Thema bestand. Sämtliche Arbeiten mündeten in die Erstellung des Ergänzungsbandes zum Handbuch für durchströmte Reinigungswände ein, der im Anhang enthalten ist. Nachfolgend werden Planung und Ablauf des Vorhabens in Bezug auf die Arbeitspakete aufgeführt; die Arbeitspakete 100 bis 500 umfassten den Koordinierungsteil des Vorhabens, das Arbeitspaket 600 das Forschungsprojekt zur Reaktivität technischer Eisensorten.

Planung und Ablauf des Koordinierungsteils des Vorhabens in den Jahren 2006-2012

Arbeitspaket 100 (zur Gesamtkoordination gehörig): Fachübergreifende Organisation der Vorbereitung und Realisierung der Projekte, Organisation von Statusseminaren

- Von Ende 2006 bis in das Jahr 2007 hinein erfolgte die Vorbereitung und Beratung von Kooperationsverträgen mit den neuen RUBIN-Partnern, d.h. Universität Kiel (PD Dr. habil. Ebert), TU Berlin (Dr.-Ing. Steiof), TZW Karlsruhe (Dr. Tiehm), DGFZ e.V. Dresden (Prof. Luckner), LMBV Senftenberg (Herr Theil), HIM GmbH Wiesbaden / Biebesheim (Dipl.-Ing. Schmitt-Biegel) sowie mit der Mull-und-Partner-Ingenieurgesellschaft mbH Hannover (Dr. Wegner) in Bezug auf die Nutzung von Eisenschwamm zu Untersuchungszwecken, die im Jahr 2007 abgeschlossen werden konnten.
- Es wurde die Projektliste der neuen RUBIN-Vorhaben mit wichtigen Eckdaten fortgeschrieben, weitere Detailinformationen über die Projekte (Projekthalte, -ziele, Zeitachsen usw.) gesammelt und in die Projektliste eingefügt sowie auf dem Statusseminar präsentiert.
- Das Projekt Lünen / Victoria, ehemaliger Antragsteller Harpen AG, dann GfV GmbH, wurde in der Planungsphase der Aktivkohle-Reinigungswand intensiv begleitet und beraten. Im Frühjahr 2007 wurde die GfV GmbH an die RWE AG verkauft, die kurz darauf mitteilte, dass man das Projekt einstelle. Daher war es an diesem Standort nicht mehr, wie ursprünglich geplant, im Herbst 2007 zum Bau einer Full-scale-Aktivkohlewand gekommen.

Die Koordinierungsstelle hat in dieser Situation umfangreiche Beratungen aller Projektbeteiligten durchgeführt; insbesondere mussten Lösungen für das beteiligte Forschungsinstitut (Umweltchemie, Leuphana Universität Lüneburg, Prof. Ruck) gefunden werden, um einen zielführenden, vorgezogenen Abschluss der im Feld bereits seit mehr als einem halben Jahr angelaufenen Forschungsarbeiten aufzuzeigen und im Einvernehmen aller Beteiligten zu organisieren.

Für das Handbuch lagen der Koordinierungsstelle trotz der beschriebenen Situation wertvolle umfangreiche Protokolle und Unterlagen sowie Daten aus der Planungsphase vor. Das Projekt „Senftenberger See“ wurde im Berichtszeitraum beendet; die übermittelten Abschlussberichte wurden für die Fortschreibung des Handbuches verwertet.

- Der Projektträger sowie potentielle Antragsteller wurden bei der Begutachtung von weiteren Vorschlägen für potentiell neue RUBIN Projekte unterstützt (u.a. einen Projektvorschlag zu einer vollflächig durchströmten Aktivkohlewand in Baden-Württemberg betreffend).
- Das erste Statusseminar am 06. und 07.09.2007 bei der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) in Hannover wurde organisiert, geleitet und ausgewertet.
- In 2008 wurde die Projektliste der RUBIN-Vorhaben aktualisiert, d.h. während der Laufzeit geänderte Detailinformationen über die Projekte (Projekthinhalte, -ziele, Zeitachsen, laufender Arbeitsstand usw.) wurden erfasst.
- Das zweite, zweitägige Statusseminar in Kiel am 14. und 15.10.2008 wurde organisiert, geleitet und ausgewertet.
- Das dritte, eintägige Statusseminar in Karlsruhe am 14. und 15.10.2009 wurde organisiert, geleitet und ausgewertet. Im Wesentlichen erfolgte die Berichterstattung über den Arbeits- und Erkenntnisstand in den einzelnen Verbundprojekten (Zwischenergebnisse nach ca. 3 Jahren Laufzeit bei der überwiegenden Zahl der Projekte, die im Herbst 2006 mit einer dreijährigen Laufzeit gestartet worden waren) und der Planung der Art und Weise der Fortschreibung des Handbuchs (Ergänzungsband) ab 2010.
- In den Jahren 2010 – 2011 fanden keine Statusseminare mehr statt, da eine größere Zahl der Projekte bereits beendet worden war und der Schwerpunkt der Arbeiten auf der Auswertung ihrer Abschlussberichte für die Erstellung des Handbuchergänzungsbandes lag.

Arbeitspaket 200 (zur Gesamtkoordination gehörig): Förderung der Arbeit der Verbundvorhaben, Koordinierung der Arbeit mit den Behörden sowie Kommunikation mit relevanten Fachgruppierungen, Kommunikations- und Imagestrategie, Vorbereitung der Markteinführung, Öffentlichkeitsarbeit

- Es wurde die erste Fachveranstaltung zur Präsentation des Handbuchs bei der LUBW in Karlsruhe am 19. März 2007 gemeinsam mit dem Beiratsmitglied Dr. Kohler (LUBW) organisiert und durchgeführt. Es nahmen ca. 100 Fachleute, vorwiegend aus Süddeutschland und dem Rhein-Main-Gebiet, teil.
- Im Juli folgte die zweite Fachveranstaltung zur Präsentation des Handbuchs in Dresden, gemeinsam mit dem Sächsischen Umweltministerium. Es nahmen ca. 40 Fachleute, vorwiegend aus Ostdeutschland, teil.
- Im November wurde die dritte Fachveranstaltung bei der BGR in Hannover durchgeführt; es nahmen ca. 50 Fachleute, vornehmlich aus Norddeutschland, teil.
- Im Juni erfolgten Fachgespräche mit den Beiratsmitgliedern Dr. Kohler in Karlsruhe und Dipl.-Ing. Odensaß in Essen, d.h. ausführlich jeweils vor Ort, zur aktuellen Einschätzung der Technologie „Reinigungswände“ nach Herausgabe des Handbuchs und Abschluss von RUBIN Phase 1 aus der Sicht des behördlichen Vollzuges sowie Empfehlungen für die Bearbeitungsphase 2 von RUBIN.
- Die RUBIN-Webseite (www.rubin-online.de) wurde überarbeitet, d.h. es wurden teilweise Erweiterungen und eine Neugestaltung der Einstiegsseite sowie teilweise der Navigation vorgenommen, veraltete Informationen (Adressen etc.) wurden aktualisiert sowie Projektkurzbeschreibungen eingestellt.
- Im Dezember 2007 wurden Fachgespräche mit Fachleuten des ITVA, u.a. Dr. Peter Dreschmann, Leiter des ITVA-Fachausschusses H1 (Sanierungsverfahren, zur Vorbereitung einer gezielten Imagestrategie mittels spezieller Medienoffensiven, z.B. Fern-

sehreportagen, -berichte im WDR über die Reinigungswand in Rheine, durchgeführt. Die Gespräche wurden auf Empfehlung des Projektträgers unterbrochen, da erste Gespräche zwischen der Koordinierungsstelle und der vom BMBF neu bewilligten Initiative „TASK“ (UfZ Leipzig-Halle, Projektleiter Dipl.-Chem. M. Bittens, Dr. Rügner), abgewartet werden sollten, die für Anfang 2008 geplant waren.

- Nach der intensiven Öffentlichkeitsarbeit zur bundesweiten Präsentation des Handbuchs zur Sanierungstechnik der durchströmten Reinigungswände in 2007 sollten die neuen Ergebnisse der Mitgliedsprojekte aus RUBIN Phase 2 abgewartet werden, die sich erst nach deren Validierung und Zustimmung der Mitgliedsprojekte in eine koordinierte Öffentlichkeitsarbeit einbinden ließen.
- In 2008 wurden mehrere bilaterale Gespräche mit den Leitern der Verbundvorhaben insbesondere zu Fragen möglicher kostenneutraler Laufzeitverlängerungen, in Absprache mit dem Projektträger, geführt.
- Bezüglich der internationalen Öffentlichkeitsarbeit wurde der Austausch mit internationalen Fachleuten fortgesetzt.
- In 2008 wurde eine Kooperationsvereinbarung mit dem australischen Umweltforschungszentrum CRC CARE Pty in Adelaide (AN-Institut der University of South Australia) abgeschlossen. Das in 2008 gestartete Projekt zur Sanierung eines Trichlorenchlorid-belasteten (TCE) Aquifers auf einem Grundstück in der Nähe von Adelaide mittels einer durchströmten Reinigungswand wurde bis zum erfolgreichen Abschluss in 2010 umfassend begleitet. Ein Besuch der australischen Kollegen im März 2008, im Juni und Juli 2009 sowie im Juni 2010 in Deutschland wurde organisiert und gemeinsam mit der Mull-und-Partner Ing. Ges. mbH, Hannover, der HIM GmbH, Wiesbaden und der BBG sowie der ISTEV GmbH (Berlin) durchgeführt. U.a. erfolgten Besuche und Besichtigungen der RUBIN-Standorte Rheine, Bernau und Offenbach.
- Allgemein war in 2008 festzustellen, dass die Arbeiten des RUBIN-Verbundes seit 2000 weltweit unter Fachleuten große Resonanz gefunden hatten, d.h. vor allem durch die Webseite wie auch die zahlreichen internationalen Publikationen. RUBIN-Experten wurden mittlerweile u.a. gezielt für Kooperationen bei Planung und Bau von Reinigungswänden weltweit angefragt. Das zeigte sich auch in Kooperationen der Universitäten Kiel und Tübingen mit italienischen Universitäten und Unternehmen.
- Dr. Robert Puls und Dr. Arun Gavaskar konnten für die CleanUp 09-Konferenz im September 2009 in Adelaide durch Prof. Burmeier und Dr. Birke als Key-Note-Speakers für die PRB-Session, die durch die Koordinierungsstelle in Zusammenarbeit mit den australischen Kollegen organisiert und durchgeführt wurde, gewonnen werden. Details wichtiger Fachgespräche mit beiden Experten fanden Eingang bei der Ausarbeitung des Ergänzungsbandes zum Handbuch (vor allem in Bezug auf die seit 2006 international neu gesammelten Erfahrungen zu Reinigungswandprojekten).
- Ferner gelang es – aufgrund der in Australien und den in den U.S.A. am Rande der Battelle-Konferenzen 2008 und 2010 geführten Fachgespräche – eine Zusage zu erhalten, dass die in 2010 in den U.S.A. noch in Arbeit befindliche Neuauflage des wichtigen „Interstate Technology Research Council“-Guidance (ITRC) für PRB noch vor dem geplanten Erscheinen in 2011 in einem Rohentwurf der Koordinierungsstelle ausnahmsweise (als einzigen ausländischen Fachkollegen) zur Verfügung gestellt würde.
- Aufgrund der Kontakte der Koordinierungsstelle zu den Projektbeteiligten des Schweizer Projektes Willisau (Eisenwand zur Behandlung eines Chromatschadens) konnten wichtige Daten zur Langzeitwirksamkeit nach fast vierjähriger Betriebszeit

eingesehen und gemeinsam mit den Projektbeteiligten diskutiert werden. Ferner wurde eine Doktorarbeit zu diesem Thema an der Universität Bern (Frau Bettina Flury) mit betreut. Die Daten und Erkenntnisse wurden bei der Erstellung des Ergänzungsbandes genutzt und ergänzten den Kenntnisstand erheblich, da in RUBIN und auch in Deutschland allgemein bislang eine derartige Reinigungswand Full-scale nicht zur Anwendung gelangte und daher nicht untersucht werden konnte.

- Am 22.06.2010 fand ein Expertengespräch von RUBIN- und TASK-Vertretern (Dipl.-Chem. M. Bittens, S. Leschik, UFZ Leipzig) sowie einem externen Berater (Prof. H. Biester, TU Braunschweig), eingeladen durch TASK, statt. Es wurde diskutiert, wie Projekte aus RUBIN und deren Ergebnisse in die Öffentlichkeits- und Marketingstrategie von TASK integriert werden könnten.

Aus den Diskussionen zeichneten sich mehrere, für die Zukunft zu planende Maßnahmen ab:

1. Aufbau eines Demonstrationsstandortes für reaktive Wände in einfacher Herstellungsweise

- Anwendung von einfachen Bauverfahren
- Einfache Geologie und keine komplexen Schadstoffgemische am Standort
- Kriterien für den Standort sollten sich am RUBIN-Handbuch orientieren
- Beteiligung eines Sanierungsunternehmens und Hochschulpartnern aus RUBIN
- Eventuell Vergleich verschiedener Methoden an dem entsprechenden Standort

2. Wirtschaftlichkeitsuntersuchung für reaktive Wände

- Erfassung von Kosten bereits hergestellter reaktiver Wände und klassischer P&T-Maßnahmen
- Kostenvergleichsbetrachtung an einem Standort validieren (Techniken nebeneinander betreiben)

3. Vermarktung von RUBIN-Ergebnissen

- Hauptzielgruppen für das Marketing: Grundstückseigentümer, Ingenieurbüros und Behörden
- Erstellung eines Reviews über die Ergebnisse der Forschungsprojekte RUBIN I und II (RUBIN / TASK)
- RUBIN-Abschlusstreffen (Beteiligung von TASK)
- Präsentation der RUBIN-Ergebnisse in Zeitschriften und Sonderbänden (RUBIN)
- Übersetzung des Handbuchs in Englisch und/oder Spanisch (TASK)
- Erstellung einer interaktiven und grafisch ansprechenden Version des Handbuchs (TASK / RUBIN)
- Erstellung eines Werbebandes für die RUBIN-Akteure mit kurzen Artikeln von den beteiligten Partnern (TASK / RUBIN)

Infolge der später erfolgten Einstellung des TASK-Projektes und dem Auslaufen des RUBIN-Förderschwerpunktes konnten keine Planungen umgesetzt werden.

- Für die „CleanUp 11“-Altlastenkonferenz, die in Adelaide, Australien, im September 2011 stattfand (ca. 800 Teilnehmer aus der ganzen Welt, vorwiegend Australien, Neuseeland, Asien), wurde eine ganztägige Session zu durchströmten Reinigungswänden organisiert und durchgeführt (Dr. Birke fungierte als Session-Chair und Vortragender,

Vortrag zur Testung von Eisensorten). Der Einladung der Koordinierungsstelle folgten namhafte Fachleute. Es nahmen unter anderem teil: Dr. Palm (Leuphana Universität Lüneburg, Vortrag zur NSO-PAK-Retardation in Aktivkohlewänden, Ergebnisse des RUBIN-Projektes), Prof. Simon (BAM, Berlin, Beiratsmitglied RUBIN, Vortrag zu Eisenwänden zur Uranretardation), Dr. Rick Wilkin, Dr. Ralph Ludwig (US-EPA, weltweite Experten für Eisenwände, insbesondere zur Retardation von Chrom und Arsen), Scott Warner (Oakland, U.S.A., Planer der ersten Full-scale-Reinigungswand der Welt in Sunnyvale, Kalifornien).

- Die Ergebnisse des Förderschwerpunktes RUBIN Phase 2 wurden in einem umfassenden Übersichtsartikel im Dezemberheft des Altlastenspektrums der Fachöffentlichkeit zugänglich gemacht. Der Ergänzungsband wurde als PDF-Dokument zum Download über mehrere Webseiten (KIT Karlsruhe, AAV Nordrhein-Westfalen etc.) ab Dezember 2012 der breiten Fachöffentlichkeit zur Verfügung gestellt.

Arbeitspaket 300 (zur Gesamtkoordination gehörig): Gewinnung verallgemeinerungsfähiger Aussagen aus der Durchführung der Projekte

Die Ergebnisse des Arbeitspakets finden sich in der eingehenden Darstellung der erzielten Ergebnisse (siehe unten) sowie im Ergänzungsband zum Handbuch ausführlich zusammengefasst.

Arbeitspaket 400 (zur Gesamtkoordination gehörig): Analyse und fachübergreifende Auswertung der gewonnenen Aussagen unter Berücksichtigung internationaler Entwicklungstendenzen

In 2006 / 2007 erfolgte ein intensiver Austausch vor allem mit US-amerikanischen Kollegen durch E-Mail-Korrespondenz und Telefonate. Reinigungswände galten in den U.S.A. mittlerweile als etablierte Sanierungstechnik; bis 2007 waren ca. 170 – 200 Standortprojekte in Nordamerika implementiert worden. Im Oktober 2007 fand zusätzlich direkt vor Ort beim Battelle-Institut in Columbus, Ohio, durch den Vertreter der RUBIN-Koordinierungsstelle, Dr. Volker Birke, ein mehrstündiger Meinungs-austausch mit Dr. Arun Gavaskar und Dr. Bruce Sass (bei beiden handelt es sich um hochrangige, renommierte PRB-Experten) statt. Details dieser Fachgespräche, die in 2008 am Rande der nächsten Battelle-Konferenz in Monterey, Kalifornien, fortgesetzt wurden, fanden direkten Eingang bei der Zusammenstellung des Ergänzungsbandes zum Handbuch.

Wie bereits erwähnt, konnten wichtige Daten zum Schweizer Projekt Willisau nach fast vierjähriger Betriebszeit (Eisenwand zur Behandlung eines Chromatschadens) eingesehen und gemeinsam mit den Projektbeteiligten diskutiert werden.

Von 2008 bis 2010 wurden bei der Mitarbeit an dem australischen PRB-Projekt in Adelaide wertvolle Erkenntnisse zur Errichtung einer hängenden Reinigungswand in einem ariden Aquifer gesammelt.

In 2009 fand wiederum ein intensiver Austausch vor allem mit den beiden US-amerikanischen Kollegen Dr. Robert Puls (US-EPA, Ada, Oklahoma) und Dr. Arun Gavaskar (US-Navy, vormals Battelle-Memorial-Institute, Columbus, OH, während der CleanUp 09-Konferenz im September 2009 in Adelaide statt, die als Key-Note-Speakers für die PRB-Session gewonnen werden konnten (Organisation der Session durch die Koordinierungsstelle in Zusammenarbeit mit den australischen Kollegen. Dr. Puls ist seit den neunziger Jahren Leiter des RTDF-PRB-Action-Teams und Dr. Gavaskar ist der Hauptautor des US-Handbuches für durchströmte Reinigungswände. Details dieser sehr wichtigen Fachgespräche fanden Eingang bei der Ausarbeitung des Ergänzungsbandes zum Handbuch.

Arbeitspaket 500 (zur Gesamtkoordination gehörig): Handbuch/Leitfaden, 2. Auflage: Erstellung einer Lesefassung, Organisation von Fachgesprächen hinsichtlich Redigierung, danach Fertigstellung, Endredaktion, Erstellen einer Druckvorlage, Korrektur von Druckfahnen

Die zu diesem AP vorgesehenen Arbeiten wurden im Jahr 2008 gestartet, d.h. auf dem Statusseminar in Karlsruhe wurde am 05.11.08 die Planung der Arbeiten ausführlich diskutiert:

1. Es wurde beschlossen, einen Fragebogen zur Handbuch-Bearbeitung durch die Koordinierung erstellen zu lassen. Der Fragebogen wurde Anfang 2009 von der Koordinierung an einen relevanten Empfängerkreis (RUBIN-Beirat, laufende RUBIN-Projekte usw., in Absprache mit Dr. Knobel) versandt. Der Rücklauf wurde durch die Koordinierung ausgewertet; die diesbezüglichen Resultate wurden als Anhang zur Einladung für das Statusseminar versandt. Danach wünschte die Mehrheit einen Ergänzungsband und keine Überarbeitung / 2. Auflage des bestehenden Handbuches.
2. Der Ergänzungsband sollte den gleichen Einband sowie die gleiche Erscheinungsform haben wie das Handbuch.
 - Kapitel 1: In einer Präambel sollte erläutert werden, warum dieser Band erstellt wurde, d.h. es sollten Bezüge zum 1. Band hergestellt werden.
 - Kapitel 2: In einem Lessons-Learned-Kapitel sollten die seit 2006 neu gesammelten nationalen und internationalen Erfahrungen zusammengefasst werden, vor allem bzgl. Eisen-, Aktivkohle- und Bio-Reinigungswände, allerdings nicht auf die RUBIN 2-Projekte bezogen / fokussiert.
 - Kapitel 3: In einem gesonderten Kapitel sollten die in RUBIN II gesammelten neuen Erkenntnisse stark komprimiert (schlaglichtartig, Essentials) zusammengestellt werden.
 - Kapitel 4: In einem weiteren Kapitel sollten ausführliche Projektberichte aus RUBIN II folgen, allerdings als Summary, d.h. die eigentlichen für das BMBF gefertigten Abschlussberichte sollen als CD-ROM dem Ergänzungsband beigelegt werden.
 - Kapitel 5: aktualisierte Patentrecherche
 - Kapitel 6: signifikante Literatur (neu)
3. Das Lessons-Learned-Kapitel sollte einen umfassenden generalisierten Abriss der neuen Erfahrungen geben, d.h. neueste internationale Erfahrungen, Erfahrungen aus RUBIN Phase 2 und externen nationalen Projekten, die jedoch nicht projektbezogen diskutiert werden sollten. Die Koordinierung sollte eine Gliederung vorgeben. Die Koordinierung sollte ebenfalls Vorschläge zur Präambel und zum Lessons-Learned-Kapitel machen.

Im Sommer 2011, nach Abschluss der Arbeiten in den Verbundprojekten, Erhalt und Auswertung der Abschlussberichte wurde dem Projektträger eine erste Lesefassung zur Verfügung gestellt, die, nach intensiver Diskussion in einem Fachgespräch mit dem Projektträger im September 2011, bis Februar 2012 überarbeitet wurde (unter Einbeziehung neuester, sehr wichtiger internationaler Ergebnisse, wie die Neuauflage des offiziell erschienen ITRC-Handbuches (Guidance) zu PRB). Die zweite Lesefassung wurde daraufhin durch Beiratsmitglieder sowie RUBIN-Projekte begutachtet und eine Druckfassung zum Juli 2012 erstellt, die die Anmerkungen und Ergänzungen der Gutachter berücksichtigte. Druck und Versand des Ergänzungsbandes zum Handbuch an diverse Hochschulbibliotheken, Fachämter, Fachunternehmen usw. fanden schließlich im August 2012 statt.

Planung und Ablauf des Forschungsvorhabens zur Reaktivität technischer Eisensorten in den Jahren 2006-2012

Ziele und Aufgabenstellung

Hauptziel des Vorhabens war die Entwicklung einer schnellen Testmethode zur Beurteilung der Eignung von technischen Eisensorten, insbesondere unterschiedlicher Produktionschargen derselben Eisensorte, in durchströmten Reinigungswänden für die reduktive Dechlorierung von leichtflüchtigen chlorierten Kohlenwasserstoffen (LCKW) am Beispiel von Perchlorethen (PCE) im Grundwasser. Die Aufgabenstellung wurde in einem Kleinverbund mit dem Verein für Kernverfahrenstechnik und Analytik Rossendorf (VKTA) bearbeitet. Nachfolgend wird eine Übersicht zu den Arbeitspaketen gegeben (Abbildung 1 enthält eine vollständige Übersicht zu allen Arbeiten des Kleinverbundes und der Zusammenarbeit):

Arbeitspaket 600 und 900 (Laborprojekt, Untersuchungen zu technischen Eisensorten)

Federführung / Bearbeitung: Ostfalia Hochschule, Spezialanalytik: VKTA

- *AP 600.1: Koordinierung der FuE-Arbeiten*
- *AP 600.2: Bewertung der Herstellungsprozesse technischer Eisenwerkstoffe bzgl. Chargentreue, Identifikation von repräsentativen Testchargen/-proben für das gesamte Teilprojekt*
- *AP 600.3: Säulenversuche mit technischen Eisenwerkstoffen zum PCE-Abbau, Korrelation mit Ergebnissen der Korrosionsversuche aus AP 700 zur Validierung der Leitparameter*
- *AP 600.4: Säulenversuche zur Verifizierung der Ergebnisse der Batch-Versuche*
- *AP 600.5: Charakterisierung und Isolierung von Oberflächensorbaten*
- *AP 900: Beschreibung der Testmethode*

Wissenschaftlich-technischer Stand vor Projektbeginn

Im RUBIN-Vorhaben in der Phase I (2000-2006) hatte man an zwei Eisenwand-Standorten (Bernau, Rheine) deutlich unterschiedliche Reaktivitäten bei den jeweils eingesetzten, technischen Eisensorten unterschiedlicher Herkunft und Zusammensetzung über einen Betriebszeitraum von fünf bzw. acht Jahren festgestellt. Eingesetzt waren Eisenschwamm (ES, Mittal Steel, Hamburg, Responge, Marke der Mull und Partner Ingenieurgesellschaft, Hannover), und Graugussgranulat-Eisenspäne (GGG, Gotthart-Maier Metallpulver GmbH, Rheinfelden) bei LCKW (PCE bzw. Trichlorethen, TCE). Die Gründe für diese auffälligen Befunde waren weitgehend unbekannt, zumal sich Verblockungen durch ausgefallte Feststoffe oder Gase im Falle der Pilotisenwand in Rheine (vollflächig durchströmte Wand), bei der 1998 je eine Produktionscharge ES und GGG in zwei je 12,5 m langen, voneinander getrennten Segmenten zum direkten Vergleich eingesetzt worden waren, sicher ausschließen ließen. Während in Rheine seit der Errichtung der Pilotwand im Jahre 1998 das ES-Segment eine bessere PCE-Abreinigung (um 99 % und besser) zeigte als das GGG-Segment (ca. 70 bis 95 %), stellte man in Bernau umgekehrt geringere Abreinigungsleistungen für TCE mit ES fest, dagegen sehr gute mit GGG.

Basis relativ einfach zu erfassender repräsentativer chemisch-analytischer, elektrochemischer oder metallurgischer Parameter innerhalb vergleichsweise kurzer Zeiträume (Stunden bis wenige Tage) eine Aussage bezüglich der Eignung einer Materialcharge für die LCKW-Reduktion treffen zu können.

Bei der Methodenentwicklung, die hinsichtlich der Identifikation von Leitparametern auch als Ursachenforschung angesehen werden konnte, musste besonders berücksichtigt werden, dass bis 2006 national wie auch weltweit keine der in Reinigungswandprojekten eingesetzten technischen Eisensorten maßgeschneidert für die LCKW-Dechlorierung im Grundwasser, sondern stets für völlig andere Einsatz- und Weiterverarbeitungszwecke, zumeist in der Stahlindustrie, produziert worden war. Dabei konnte es sich auch um Altmetall, also Abfallmetall, handeln. Speziell entwickelte, optimierte oder gar genormte Herstellungsprozesse und Zusammensetzungen für technisches Eisen hinsichtlich seines Einsatzes in Reinigungswänden gab es nicht. Damit bestand Unsicherheit in Bezug auf die Chargentreue solcher technischer Eisensorten beim Einsatz zur Grundwasserdekontaminierung. Als besonders wichtige Praxisanforderung für die Langzeitstabilität und -leistung einer Eisen-Reinigungswand ist eine möglichst konstante Reaktivität in Abhängigkeit der produzierten Einzelcharge an technischem Eisen zu gewährleisten (Chargentreue). Dazu bestanden bis 2006 weltweit keine oder nur völlig ungenügende Erkenntnisse.

Methoden zur schnellen Bewertung bei der Materialauswahl vor dem unmittelbaren Einbau einer Eisencharge in eine Reinigungswand waren bis dahin nicht bekannt. Stattdessen gab es konkrete Anhaltspunkte zumindest für einige internationale Reinigungswandprojekte, bei denen die im Feld eingesetzte Produktionscharge eine signifikant geringere Reaktivität als eine ältere, in einem ein bis zwei Jahre zuvor durchgeführten Säulenversuch eingesetzte zeigte, so dass sich der Eisenproduzent Schadensersatzansprüchen des Anwenders / Sanierungspflichtigen ausgesetzt sah.

Durchführung des Vorhabens

Die Bearbeitungsstufen gliederten sich wie in Abbildung 1 gezeigt. Es wurden Untersuchungen an technischen Eisensorten unter vereinfachten, aber identischen Bedingungen, in Batch- und Säulenversuchen (Laufzeit letzterer ein bis drei Jahre) mit künstlich hergestelltem und originärem Grundwasser vom Standort der Reinigungswand in Rheine durchgeführt, die klären sollten, ob Chargentreue bei ein und derselben Eisensorte gegeben ist und auch, wie stark die verschiedenen Eisensorten untereinander in ihrer Reaktivität gegenüber einem kontaminierten Grundwasser unter Fließbedingungen differieren. Es wurden die drei bis 2006 in Deutschland in Reinigungswänden eingesetzten Eisenwerkstoffe untersucht: Eisenschwamm (ES, Response), Graugussgranulat (GGG) und Hartgussstrahlmittel (SM).

In weiteren Bearbeitungslinien wurden unterschiedliche Reaktivitäten mittels elektrochemischer und materialwissenschaftlicher Untersuchungen mit dem Einfluss von Begleitelementen sowie Legierungsbildnern und daraus gebildeten Lokalelementen zur Ableitung von Leitparametern für die Methodenentwicklung korreliert (diese Arbeiten erfolgten ausschließlich beim Partner VKTA).

Bis März 2010 wurden folgende Säulenversuche (1 m lang, 10 cm Durchmesser, 18 Probenahmeports, siehe Abbildung 2) durchgeführt:

1. Würth-Eisen-Säule, S1, Betriebsbeginn Juli 2007, künstliches Rheine-Wasser, zunächst ohne Silikat, ab Dezember 2007 zusätzlich mit Silikat-Zusatz
2. Eisenschwamm-Säule, S2, erste (intern zum Test gelangende) Produktionscharge vom April 2007, Betriebsbeginn Juli 2007, zunächst ohne Silikat, ab Dezember 2007 zusätzlich mit Silikat-Zusatz

3. Eisenschwamm-Säule, S3, zweite Produktionscharge vom November 2007 (1. Charge in , Betriebsbeginn Januar 2008, künstliches Rheine-Wasser mit Silikat
4. Gotthart-Maier-Säule (GGG, ohne Kiesverdünnung), S4, zweite (intern zum Test gelangende) Produktionscharge vom April 2008, Betriebsbeginn Mai 2008, künstliches Rheine-Wasser mit Silikat
5. Gotthart-Maier-Säule (mit 50 % Kiesverdünnung, „feiner“ Kies, wie in Rheine eingesetzt), S5, zweite Produktionscharge vom April 2008, Betriebsbeginn Mai 2008, künstliches Rheine-Wasser mit Silikat
6. Gotthart-Maier-Säule (mit 30 % Kiesverdünnung, „grober“ Kies, nicht wie in Rheine eingesetzt), zur Simulation einer stärkeren Verdünnung des Eisens, S6, erste Produktionscharge vom November 2007, Betriebsbeginn Februar 2008, künstliches Rheine-Wasser mit Silikat
7. Gotthart-Maier-Säule (mit 50 % Kiesverdünnung, „feiner“ Kies, wie in Rheine eingesetzt), S7, erste Produktionscharge vom November 2007, Betriebsbeginn Januar 2008, künstliches Rheinewasser mit Silikat
8. Gotthart-Maier-Säule (ohne Kiesverdünnung), S8, zweite Produktionscharge vom April 2008, Betriebsbeginn Mai 2008, künstliches Rheine-Wasser mit Silikat, aber ohne PCE, um die Produktion von Kohlenwasserstoffen, die aus dem Eisen stammen könnten, zu charakterisieren; später wurde mit PCE beaufschlagt, um ein durch Wasser allein korrodiertes Eisen auf seine Wirksamkeit zur PCE-Dechlorierung zu überprüfen
9. Eisenschwamm-Säule, S9, Produktionscharge vom November 2007, Betriebsbeginn Mai 2008, künstliches Rheine-Wasser mit Silikat, aber ohne PCE, um die Produktion von Kohlenwasserstoffen, die aus dem Eisen stammen könnten, zu charakterisieren; später wurde mit PCE beaufschlagt, um ein durch Wasser allein korrodiertes Eisen auf seine Wirksamkeit zur PCE-Dechlorierung zu überprüfen
10. Gotthart-Maier-Säule (mit 50 % Kiesverdünnung, „feiner“ Kies, wie in Rheine eingesetzt), S10, erste Produktionscharge vom November 2007, Betriebsbeginn Mai 2008, originäres Rheine-Wasser aus dem Anstrombrunnen vor dem GGG-Wandsegment im März 2008 entnommen, mit PCE beaufschlagt, um den Abbau im künstlichen Grundwasser mit dem im originären zu vergleichen
11. Eisenschwamm-Säule, S11, erste Produktionscharge vom Mai 2007, Betriebsbeginn Mai 2008, originäres Rheine-Wasser aus dem Anstrombrunnen vor dem Schwamm-Wandsegment im März 2008 entnommen, mit PCE beaufschlagt, um den Abbau im künstlichen Grundwasser mit dem im originären zu vergleichen
12. Eisenschwamm-Säule, S12, dritte Produktionscharge vom April 2008, Betriebsbeginn Mai 2008, künstliches Rheine-Wasser mit Silikat
13. Gotthart-Maier-Säule (mit 50 % Kiesverdünnung, „feiner“ Kies, wie in Rheine eingesetzt), S13, Produktionscharge vom Oktober 2008, Betriebsbeginn Januar 2009, künstliches Rheine-Wasser

Alle Säulenversuche wurden bei konstant 10 °C in einer Kühlkammer und mit einer knapp zweifachen Anströmgeschwindigkeit betrieben, wie sie an der Reinigungswand in Rheine durchschnittlich über viele Jahre festgestellt worden ist. Die Fließgeschwindigkeit betrug in allen Säulen ca. das zweifache der realen, also im Feld bestimmten, durchschnittlichen Anströmgeschwindigkeit, um eine homogene und aussagefähige Fließsituation zu schaffen.

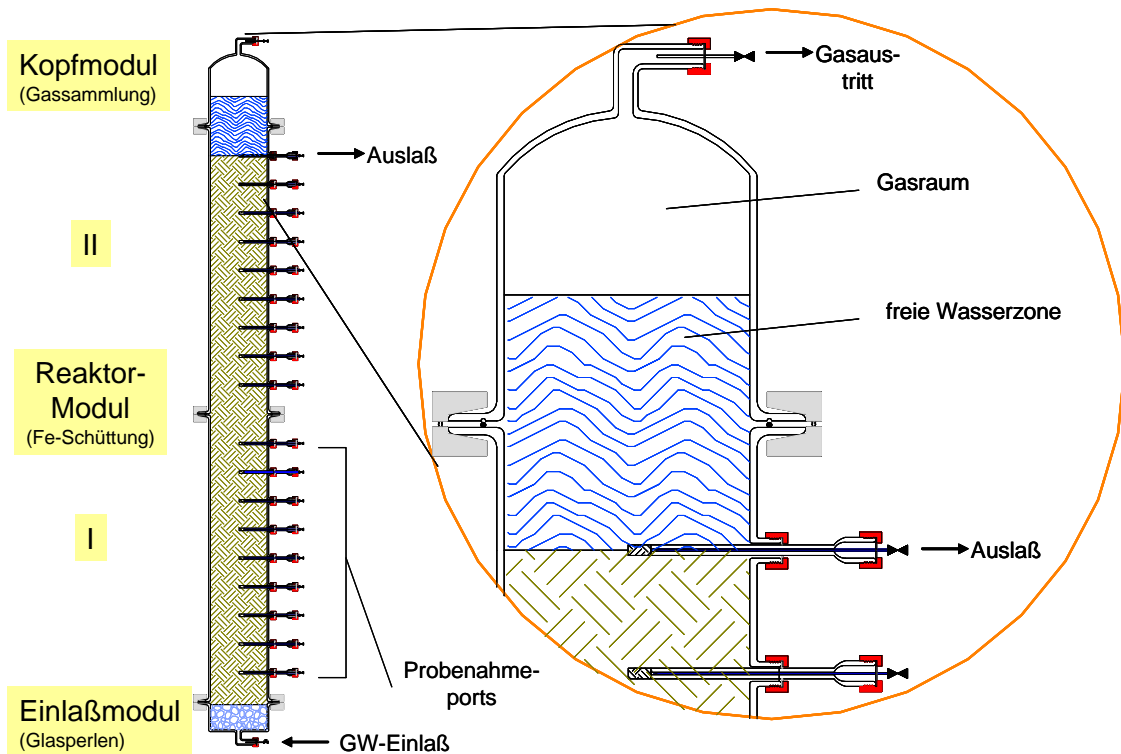


Abb. 2. Skizze zur Säulenkonstruktion

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Eine ausführliche Darstellung enthält der Ergänzungsband zum Handbuch für durchströmte Reinigungswände nebst Literaturliste, der im Anhang beigelegt ist.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Eine entscheidende Grundlage zur erfolgreichen Bewältigung der Aufgaben im Rahmen der Koordinierungstätigkeit bildete die enge Zusammenarbeit mit den RUBIN-Verbundprojekten.

Darüber hinaus führte ein enger und kontinuierlicher Informations- und Meinungs austausch mit externen Projekten und führenden Experten national wie international, insbesondere mit Fachkollegen in den U.S.A., teilweise durch Telefonate, E-Mail-Austausch, aber auch durch persönliche Gespräche während Konferenzen oder bei Besuchen einiger Standorte in Nordamerika vor Ort, zu einem erheblichen zusätzlichen und sehr zeitnahen Daten- und Kenntniszuwachs. Er lieferte bei der Erstellung des Handbuches, insbesondere bei der korrekten Darstellung und Bewertung des internationalen Standes der Technologie, wertvolle und grundlegende Zusatzinformationen zu Veröffentlichungen, Monographien, Handbüchern, U.S.-EPA-Berichten usw.

Nachfolgend werden stichpunktartig die wichtigsten Projekte/Ansprechpartner genannt:

RUBIN-Projekte und RUBIN-Beirat

RUBIN-Beirat:

- Prof. Dr. Knackmus, Universität Stuttgart
- Dr.-Ing. Peter Dreschmann, Ingenieurtechnischer Verband Altlasten e.V. (ITVA), Berlin, Aachen
- Dipl.-Ing. Bernhard Engeser, Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG), Hannover
- Prof. Dr.-Ing. Volker Franzius, Umweltbundesamt (UBA), Dessau
- Dr.-Ing. Wolfgang Kohler, Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz (LUBW), Karlsruhe
- Prof. Dr.-Ing. habil. Ludwig Luckner, Dresdner Grundwasserforschungszentrum e.V. (DGFZ), Dresden
- Dipl.-Ing. Michael Odensaß, Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen (LUA), Düsseldorf
- Prof. Dr. rer. nat. Franz-Georg Simon, Bundesanstalt für Materialforschung (BAM), Berlin

Externe nationale Fachleute/Projekte und Institutionen sowie Unternehmen:

- Dipl.-Ing. Weindl, München
- Stadtwerke Karlsruhe (Dipl.-Geoökol. Kühlers), I.M.E.S. GmbH (Dr. Schad),

Externe internationale Fachleute/Projekte und Institutionen sowie Unternehmen:

- Battelle, Columbus, OH, U.S.A., Dr. Arun Gavaskar, Dr. Neeraj Gupta, Dr. Sandip Chattopadhyay
- U.S. EPA, Dr. Robert Puls, Dr. Rick Wilkin, Dr. Ralph Ludwig
- U.S. Department of Defense (DoD), Mr. Chuck Reeter
- University of Central Florida, Orlando, Prof. Dr. Cherie Geiger
- Mr. Scott Warner, Geomatrix, Oakland, CA, U.S.A.
- Stephanie O'Hanessin, John Vogan, ETI, Kanada
- Prof. Stephan Jefferis, Prof. Bob Kalin, Prof. Dr. Paul Bardos, UK
- Dr. Peter Niederbacher, Österreich
- Mrs. Annette Esnault Filet, Soletanche Bachy, Paris, Frankreich
- BRGM, Mr. Herve Gaboriau, Orleans, Frankreich
- Dr. Franz Schenker, Dr. Bettina Flury, Schweiz
- Dr. Laura D'Aprile, APAT, Rom, Italien
- Prof. Irene Lo, Hongkong
- Dr. Yvonne Spira, Dr. Dietmar Müller, Umweltbundesamt, Wien, Österreich

II. Eingehende Darstellung

1a. Erzielte Ergebnisse – Teilvorhaben Koordinierung des Forschungsverbunds

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 Response - ein neues Schwammeisenprodukt - zum Einsatz. Aus der Anwendung von EC-PRB-Technologien resultierten die neuen Dichtwand-Heber-Reaktoren DHR und die D&G-Technologie GFIadags. 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 2 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 D&G-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 bzw. 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. „Nullwertiges“, also chemisch reines Eisen, hat sich als Aktivmasse für die reduktive In-situ-Umsetzung halogenierter Kohlenwasserstoffe nicht bewährt. Eisen dient bei der In-situ-Reduktion chlorierter Kohlenwasserstoffe zwar als Reduktionsmittel und wird im Zuge der Reduktionsreaktion selbst zu Fe^{2+} 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 bzw. 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} m s^{-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 $\text{Fe}(0)$ -Schüttungen bei komplexen Grundwässern ermöglichte eine Bewertung der Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit von $\text{Fe}(0)$ -Schüttungen im kurz- und langfristigen Betrieb.

Passivierende Korrosionsprodukte führen zu einem erheblichen Rückgang der Reaktivität, sowohl im 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 Hinsicht 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 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 Ein-

fluss 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 Abbaurate ist 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_2 als Elektronendonator für die autotrophe Sulfatreduktion und wird in geschlossenen technischen Reaktoren durchgeführt, die in Tiefschächten nach dem D&G-Prinzip betrieben werden. Ziel ist die vollständige Metallabtrennung und die Verminderung der Sulfatkonzentration am Ablauf auf 2 bis 4 mmol SO_4/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 Gewässerqualitäts-Verschlechterung. Mit der Feld-Pilotanlage soll zunächst in einem Teilbereich des Grundwasserzuströms zu einem Restsee eine signifikante Verbesserung der Grundwasserqualität erreicht werden. Es soll gezeigt werden, dass die im Technikums-Maßstab 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 aufrecht erhalten 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.

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 m³ 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 cDCE.

Seit dem Beginn der Standortsanierung im Februar 2007 reinigte die Anlage bis zum Herbst 2011 ca. 80.000 m³ 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 cDCE. Diese ist im Laufe des Sanierungsbetriebs deutlich angestiegen, was auf einen zunehmend konkurrierenden mikrobiologischen Abbau von TCE hindeutet. Da cDCE 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.

D&G-System am Standort Denkendorf

In Denkendorf entstand 2000 ein D&G-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 m³ kontaminiertes Grundwasser abgereinigt. Die Schadstoffkonzentrationen schwanken über ca. zwei Größenordnungen, d.h. das angewandte Sorptionsverfahren ist für den Standort deutlich besser geeignet als ein kinetik-limitiertes Abbauverfahren. Die Aktivkohlefüllung musste im Laufe der bisher zehn Betriebsjahre 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 Differenzen der Grundwasserstände im Zu- und Abstrom der Gates sind niedrig.

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 F&G-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 F&G-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.

1b. Erzielte Ergebnisse – Teilvorhaben Entwicklung einer schnellen Methode zur Beurteilung und Auswahl technischer Eisensorten – Teilprojekt 1: Chemische, analytische und prozesschemische Untersuchungen an technischen Eisensorten

Wesentliche Gesamtergebnisse

Wie sich bereits bei den ersten in Betrieb befindlichen Säulen mit Hartgussstrahlmittel (SM) und Eisenschwamm (Response) zeigte, war der Abbau von ursprünglich 10.000 µg/l PCE, vorgelegt in einem künstlichen Grundwasser Typ „Rheine“, über eine Fließstrecke von 1 m nur unvollständig, d.h. es wurde ein Restgehalt an PCE am Auslauf von ca. 2.000 bis 4.000 µg/l ermittelt (siehe Abb. 3). Da der ideale Strömungspfad in Rheine eine maximale Länge von 80 cm besitzt (maximaler Durchmesser der überlappenden Bohrpfahlreihe), kann das über viele Jahre konstant gute Abreinigungsergebnis des Eisenschwammsegments in Rheine

im Feld auf unter 10 µg/l PCE im Vergleich dazu damit erklärt werden, dass die tatsächliche Abstandsgeschwindigkeit im Feld noch deutlich niedriger liegen muss als bisher angenommen und / oder die in diesem Vorhaben eingesetzten Eisenschwammchargen schlechter mit PCE reagieren als die im Jahr 1998 im Feld eingesetzte und / oder im Feld zusätzlich eingesetzte mikrobiologische Abbauprozesse für die dort beobachtete, sehr gute Abreinigung verantwortlich sein könnten.

Unterschiedliche Produktionschargen zeigten in Langzeitsäulenversuchen kaum Reaktivitätsunterschiede, wie dies bei ES und GGG für drei bzw. vier Produktionschargen, die über gut ein Jahr vom Produzenten Mittal-Steel in Hamburg bezogen wurden, nachweisbar war. Zusammenfassend ergaben sich folgende Befunde und Ergebnisse:

- Es war kein signifikanter Reaktivitätsunterschied bei unterschiedlichen Produktionschargen derselben Eisensorte erkennbar bzgl. Eisenschwamm d. h. drei Säulen, die mit drei unterschiedlichen Produktionschargen betrieben wurden, wiesen bei den organischen (PCE, TCE) und anorganischen Leitparametern (vor allem pH, Total Inorganic Carbon TIC, Ca usw.) keine signifikanten Unterschiede auf.
- Es bestand ein erheblicher Reaktivitätsunterschied zwischen Response und GGG bzgl. PCE; GGG war deutlich überlegen, selbst in Verdünnung mit größerem Kies (= stärkere Verdünnung des Eisens), der so nicht in Rheine zum Einsatz gelangte.
- In künstlichem Rheine-Wasser war praktisch ein gleich starker LCKW-Abbau mit der gleichen Eisensorte wie in natürlichem Standortwasser aus Rheine verifizierbar.
- Eine Auswertung nach einer Kinetik 1. Ordnung unter Berücksichtigung einer Arrhenius-Korrektur (10 °C auf 25 °C) ergab für Eisenschwamm Halbwertszeiten für den PCE-Abbau vergleichbar zu denjenigen, die aus Säulenversuchen in RUBIN I (CAU Kiel) abgeleitet wurden.
- Eine Änderung der anorganischen Grundwasserparameter auf der Fließstrecke war ebenfalls vergleichbar; allerdings lag in den aktuellen Säulenversuchen nur noch eine annähernd 2,5fache Fließgeschwindigkeit wie im Feld vor, d. h. fast realistische Feldfließbedingungen wurden eingestellt (frühere Versuche wurden mit ca. der fünffachen Feldfließgeschwindigkeit (Anströmgeschwindigkeit) gefahren. Es gab vergleichbare Trends in den Säulenversuchen des VKTA.
- Bis Ende 2008 (1,5 Jahre Betriebszeit) war keine Mikrobiologie erkennbar (kein Sulfatabbau, keine Acetatproduktion) in allen Säulen; seit Anfang 2009 zeigte sich, überraschend für das künstliche Rheine-Wasser, in der Mehrheit der Säulen eine deutliche mikrobiologische Sulfatreduktion, die mit einem deutlich verbesserten PCE-Abbau einherging. Mit Hilfe einer PCR-Analyse (Polymerase-Chain-Reaction), durchgeführt vom Technologiezentrum Wasser (TZW) Karlsruhe, konnten Sulfatreduzierer identifiziert werden. Möglicherweise dienten dadurch gebildete Eisen- und Spurenmethylsulfide als Katalysatoren / Promotoren für den beschleunigten PCE-Abbau. Den PCE-Abbau begleitete eine ebenfalls deutlich erhöhte intermediäre TCE- und cis-DCE-Produktion (Abb. 3). Beide Intermediate wurden aber ebenfalls auf der gesamten Fließstrecke praktisch wieder vollständig abgebaut.
- In Säulen ohne PCE-Beaufschlagungen konnte keine Entwicklung von Kohlenwasserstoffen nachgewiesen werden; mithin bilden sie sich nicht aus den Eisensorten. Bereits kurz nach einer Beaufschlagung mit PCE (nach ca. einem Jahr Betriebsdauer ohne PCE) konnte ein deutlich verlangsamter PCE-Abbau festgestellt werden, d. h. Eisen verliert allein durch die anaerobe Korrosion mit nicht-kontaminiertem Grundwasser an Reaktivität.

Die Arbeiten zur Aufklärung von oberflächlich festgelegten Reaktionsprodukten an GGG begannen 2009. Gemäß Befunden des VKTA-Partnerprojekts aus ¹⁴C-Säulenversuchen stand Ende 2009 / Anfang 2010 fest, dass Gotthart-Maier-Eisen ca. 75 % ¹⁴C aus PCE stark sor-

biert, d.h. die Radioaktivität ließ sich erst bei 500 bis 900 °C thermisch als Kohlenstoffdioxid desorbieren. An Eisenschwamm wurden dagegen ca. 20 % Radioaktivität sorbiert (Bericht des VKTA).

Daher wurden zwei mit Gotthart-Maier-Eisen befüllten Säulen nach Beendigung des Betriebs Proben (Eisenspäne) entnommen und mit Hilfe einer GC-MS-Pyrolyse-Kopplung analysiert. Es konnten ausschließlich erhebliche Mengen von stark sorbiertem PCE sowie geringere Mengen an TCE und cis-DCE, dagegen kein VC, an der Eisenoberfläche festgestellt werden (Pyrolyse bei 900 °C). Die an verschiedenen Ports (z.B. Säuleneinlauf, -mitte, -auslauf usw.) festgestellten prozentualen Massenkonzentrationen (bezogen auf die insgesamt im Säulenversuch jeweils durchgesetzte PCE-Masse) entsprechen recht genau der vom Partner VKTA mit ¹⁴C-markiertem PCE gefundenen prozentual retardierten Radioaktivität an den gleichen Ports (bezogen auf die insgesamt im Säulenversuch durchgesetzte Radioaktivität). Offensichtlich können technische Eisensorten chlorierte Ethene stärker sorbieren, als dass sie diese abbauen. Daher sind die bisherigen Modellvorstellungen zur reduktiven Dechlorierung von chlorierten Ethenen an Eisen in Reinigungswänden zu modifizieren. Bei Eisenwänden wäre zu prüfen, ob sie wie Aktivkohlewände nach Ende der Betriebszeit, wegen der am Eisen lediglich retardierten (sorbierten) signifikanten Mengen nicht umgesetzter Schadstoffe, entsorgt werden müssten.

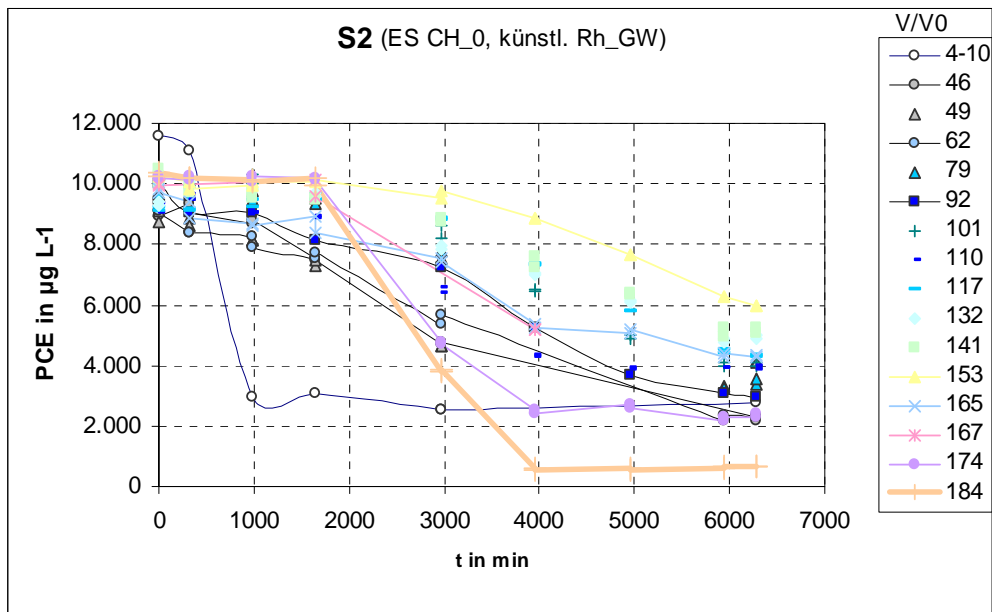


Abb. 3. Signifikante Verbesserung des PCE-Abbaus infolge einsetzender mikrobiologischer Sulfatreduktion in einer Eisenschwamm-Säule „S2“ (Betrieb mit künstlich hergestelltem Rheine-Grundwasser) nach ca. zwei Jahren ab Porenvolumen (PV, V/V_0) 165 Betriebsdauer. Bei PV 184 wird PCE praktisch vollständig abgebaut, d. h. signifikant besser als durch den rein abiotischen Abbau zu Beginn des Säulenversuchs und später. Der rein chemische Abbau am Eisen (abiotische reduktive Dechlorierung) war nach ca. zwei Jahren deutlich zurückgegangen (PV 153, gelbe Linie), d. h. es erfolgte nur noch ein Abbau von ca. 10 mg/l auf 6 mg/l im Vergleich zum Beginn des Säulenversuchs von ca. 10 mg/l auf 3 mg/l (ca. PV 20-100).

Ferner wurden einfache Batchversuche durchgeführt, um ggf. auf deren Basis und gemeinsam mit den vom VKTA entwickelten elektrochemischen Batchversuchen eine einfach einsetzbare und doppelt validierte Schnellmethode zum Test der Reaktivität von technischen Eisensorten ausarbeiten zu können. Abb. 4a und 4b zeigt die Ergebnisse für GGG.

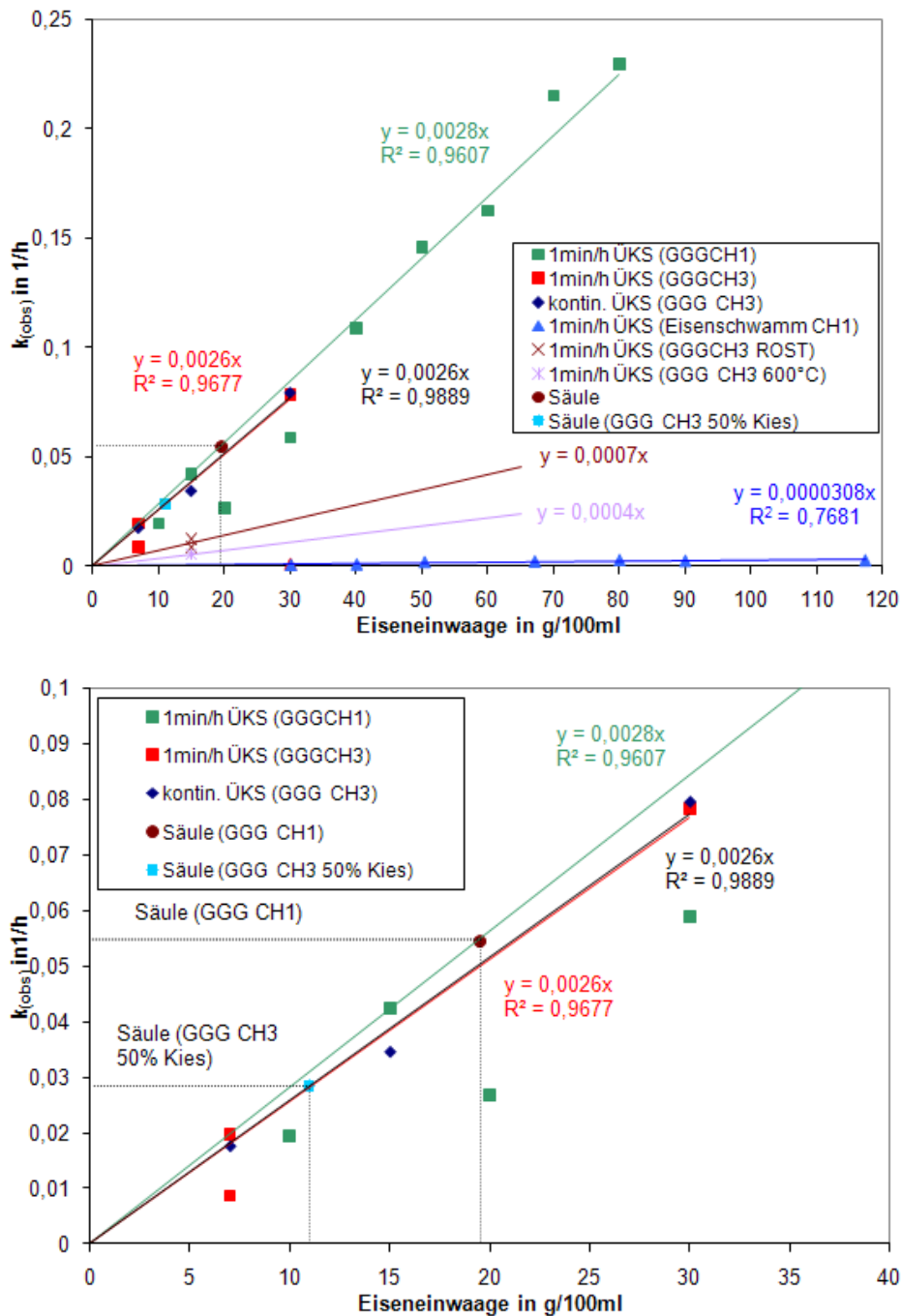


Abb. 4a. Korrelationen zwischen eingesetzter Eisenmasse, Rührintervall und Ratenkonstante 1. Ordnung für den Abbau von PCE in Rheine-Grundwasser in Batchversuchen. „GGG CH3 ROST“ und „GGG CH3 600 °C“ bezeichnen absichtlich in der Reaktivität reduzierte Gott-hart-Maier-Eisen-Chargen (Erhitzen, beschleunigte Oxidation usw.); man erkennt die Abwei-chung von den reaktiveren Produktionschargen. Ferner lässt sich eine (halbempirische) Korre-lation zu den aus den korrespondierenden Säulenversuchen abgeleiteten Ratenkonstanten her-stellen. ÜKS = Überkopfschüttler, gesamte Einsatzdauer variierte in den jeweiligen hier kom-priert dargestellten Einzelexperimenten, grundsätzlich ein Einsatz pro Stunde mit einer Umdrehung pro Minute; CH = Charge.

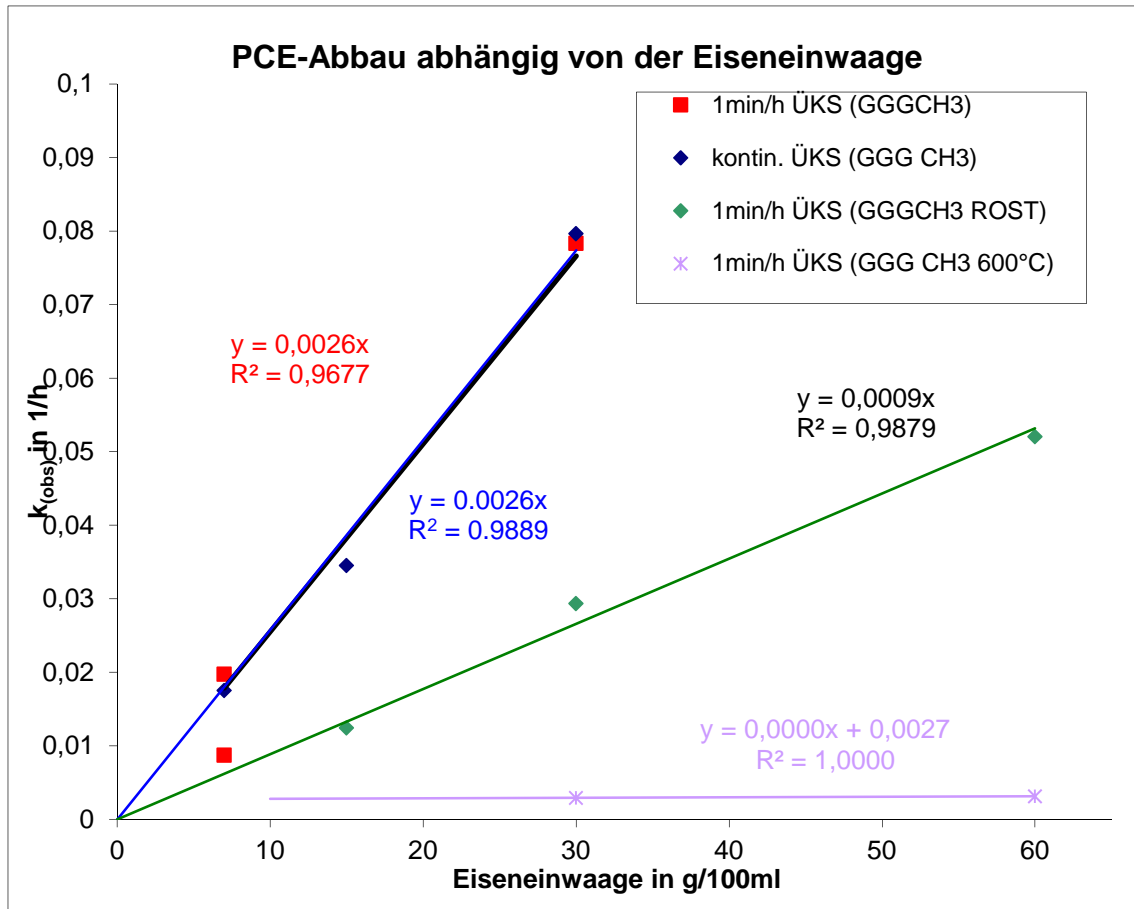


Abb. 4b. Vergleich von absichtlich in der Reaktivität reduziertem Graugussgranulat (GGG) zur Ursprungscharge. Ein bei 600 °C „totgebranntes“ (stark oxidiertes) GGG zeigt praktisch keine Reaktivität mehr. Eine Unterscheidung von der reaktiven Originalcharge ist leicht anhand der Steigungen der Geraden möglich. In einem solchen Fall dürfte eine solche Produktionscharge keinesfalls im Feld verwendet werden. Auch ein moderat verrostetes Material (ROST) zeigt deutlich geringere Reaktivität beim Abbau von PCE. Auch hier ist von einer Verwendung der Charge im Feld abzuraten.

Danach kann eine Schnellmethode zur Überprüfung der Reaktivität technischer Eisensorten anhand einfacher Batch-Versuche wie folgt beschrieben werden:

- Parallel zu einem Säulenversuch, der der Auswahl und der Dimensionierung einer Reinigungswand im Zuge der Sanierungsuntersuchung dient (zeitlich signifikant vor ihrer Errichtung im Feld, ca. ein bis zwei Jahre), sollen künftig Batchversuche mit vier bis sechs unterschiedlichen Einsatzmassen und bei zwei bis drei Rührintervallen parallel zu den Säulenversuchen durchgeführt werden.
- Die Geschwindigkeitskonstante des Reaktionssystems kommt als $k(\text{obs})$ (k observed) zum Ausdruck. Die durch Anpassung (Fit) erhaltenen (linearen oder ganzrationalen) Korrelationen zwischen $k(\text{obs})$ und $f(\text{Fe}(\text{Masse}))$ dienen als „Eichkurven“: Derjenige Punkt auf der Kurve, der mit dem im Säulenversuch nach ca. 30 bis 40 Porenvolumina gefundenen $k(\text{obs})$ -Wert korrespondiert, ergibt die Einsatzmasse an Eisen in einem späteren Batch-Wiederholungsversuch, der mit der Produktionscharge durchgeführt wird, die tatsächlich später im Feld zum Einsatz gelangen soll (kurz vor deren Auslieferung).

- Ergeben sich gute Übereinstimmungen für $k(\text{obs})$ (ca. innerhalb einer halben Zehnerpotenz) mit dem Ergebnis des ursprünglichen Batchversuchs, so kann die Produktionscharge für das Feldprojekt ausgeliefert werden. Ergeben sich größere Abweichungen (z.B. für die dritte Charge Graugrussgranulat „GGG CH3 ROST“ in Abb. 3), so müssen weitere Untersuchungen vorgenommen werden, bevor die Produktionscharge ausgeliefert und in der Reinigungswand eingesetzt werden kann. Möglicherweise ist eine neue Charge anzufordern, die dann erneut zu testen ist.
- Diese Batchversuche können in Kombination oder auch allein stehend bzgl. der vom VKTA ausgearbeiteten elektrochemischen Batch-Methode durchgeführt werden. Die elektrochemische Methode sollte insbesondere bei stark differierenden Werten für $k(\text{obs})$ im einfachen Batchversuch zur weiteren Ursachenklärung angewandt werden.

Zusammenfassung und Ergebnisnutzung

Die Erfassung der unterschiedlichen Reaktivität technischer Eisensorten mittels einer Schnellmethode und die Entwicklung von diesbezüglichen Qualitätsanforderungen sind in erster Linie für die Anwender der Technologie in Zukunft von herausragender Bedeutung, dagegen weniger für die Produzenten von technischem Eisen. Letztere gehören nicht zu den Verwertern der Technologie, denn sie werden auch in Zukunft weitaus größere Mengen an technischem Eisen für konventionelle Kunden, Verbraucher und Weiterverarbeitungsprozesse erzeugen, z.B. für die Stahlproduktion oder die metallverarbeitende Industrie. Erstere hingegen benötigen für den Einsatz von technischem Eisen in einer Reinigungswand eine hohe Prognosesicherheit zur Reaktivität in Bezug auf die abzureinigenden Schadstoffe. Die Reaktivität hängt u. a. entscheidend von der Art und Menge von Spurenstoffen und deren Verteilung in technischem Eisen ab; dazu können offenbar noch zusätzlich unterschiedliche Reaktivitäten bei unterschiedlichen Chargen gleicher Provenienz auftreten.

Unter den Anwendern der Technologie sind vor allem die Ingenieurbüros, i.d.R. kleine mittelständische Unternehmen herauszuheben, weil sie als Bindeglied zwischen Behörden (Genehmigung) und Pflichtigen (Anlagenanwender) fungieren. Die projektübergreifenden Ergebnisse sind auch von Bedeutung im Hinblick auf Rechtssicherheit, Transparenz und Anwendungssicherheit („gläserne“ Wand), unabhängige Beratungen und Empfehlungen (z.B. Consultants/Landesbehörden, Landesanstalten), Monitoring (Umweltlabors), Füllmaterialhersteller und den Technologietransfer ins Ausland (internationaler Markt / Export).

2. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit der Ergebnisse

Der Verbund fasste 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.

Mit dem Handbuch dokumentierte der Forschungsverbund in 2006 unter Einbeziehung internationaler Erfahrungen die Projektergebnisse und lieferte einen grundlegenden Leitfaden für Planung, Umsetzung und Überwachung von Reaktionswänden. Der jetzt vorliegende Ergänzungsband vertieft die Expertise und veröffentlicht weitreichende Erfahrungen aus Forschung und Praxis an repräsentativen Demonstrationsstandorten. Die hier realisierten Reinigungswände bieten verlässliche Informationsgrundlagen, die für die Bewältigung ähnlich gelagerter Schadensfälle von außergewöhnlichem Nutzen sind. Beide Bände ergänzen sich und sind in Kombination zu lesen. Zur Herstellung von Querbezügen wird auf das Stichwortverzeichnis im Handbuch von 2006 hingewiesen.

Die RUBIN-Projekte profitierten von der interdisziplinären Zusammenarbeit von Forschungseinrichtungen, Planern, ausführenden Unternehmen des Spezialtiefbaus und Fachbehörden.

RUBIN macht es möglich, den Einsatz von Reinigungswänden künftig auf zuverlässige Erkenntnisse zu den Anwendungsfeldern und zur Langzeitleistung zu stützen. Die Ergebnisse tragen dazu bei, das Vertrauen in die zukunftsfähige Technologie zu bestärken und die nötige Akzeptanz zu schaffen, um die ökologischen und ökonomischen Optionen auszuschöpfen. Es ist dabei wichtig, zu verdeutlichen, wer genau tatsächlich die Ergebnisse wie verwertet und wer diese Ergebnisse benötigt.

An der Sanierung von Boden- und Grundwasserkontaminationen oder auch Maßnahmen des Flächenrecyclings sind im Wesentlichen vier Parteien mit sehr unterschiedlichen Aufgaben beteiligt, die wiederum von einer fünften Partei, der Öffentlichkeit, begleitet werden:

- Sanierungspflichtige,
- Sanierungsunternehmen,
- externe Fachleute (Planer) und
- zuständige Behörden,
- Öffentlichkeit.

Das Zusammenwirken der fünf Partner kann wie folgt beschrieben werden:

Die zuständige Behörde stellt eine schädliche Bodenveränderung oder Grundwasserverunreinigung fest und ermittelt den Störer dieser Verunreinigung (Pflichtigen). Sie fordert den Pflichtigen auf, das Ausmaß der Gefährdung zu ermitteln. Der Pflichtige bedient sich bei dieser Ermittlung externer Fachleute (Planer), die über das erforderliche Fachwissen für derartige Arbeiten verfügen und legt den zuständigen Behörden das Ergebnis ihrer Gefährdungsermittlung vor. Die zuständige Behörde prüft die Ergebnisse der Gefährdungsermittlung und entscheidet über das weitere Vorgehen, z. B. die Durchführung einer Sanierung (gibt jedoch nicht die Art der durchzuführenden Sanierungsmaßnahmen vor). Der Pflichtige bedient sich wiederum eines Planers oder auch eines ausführenden Unternehmens und erarbeitet Lösungsansätze zur Schadenssanierung. Diese werden wiederum der zuständigen Behörde zur Zustimmung vorgelegt. Im Abschluss dieses Vorganges steht eine Sanierungsplanung, die die Grundlage für die durchzuführenden Maßnahmen bildet.

Verwertungsinteresse der Beteiligten

- Sanierungspflichtige:

Die Sanierungspflichtigen sind im Regelfall unkundig, betrachten den Sanierungsfall als (ein eher störendes) Einzelereignis und verfügen deshalb auch häufig nicht über Stabsabteilungen, die die Planung und Sanierung von Schadensfällen durchführen. Deshalb bedienen sie sich externer Fachleute, die den Sanierungsprozess planen, steuern und durchführen.

Vor diesem Hintergrund haben die Pflichtigen kein Verwertungsinteresse an neuartigen Verfahren und Technologien, partizipieren aber gern an wirtschaftlichen Lösungen. Sie sind demnach eher Nutznießer von FuE-Ergebnissen. Eine direkte Verwertung erfolgt, wenn FuE-Vorhaben auf Standorten Sanierungspflichtiger durchgeführt werden, es handelt sich dann aber in der Regel um eine einmalige Verwertung.

- Zuständige Behörden:

Die zuständigen Behörden verfügen im Regelfall über sachkundiges Personal, welches in der Lage sein muss, Sanierungsverfahren hinsichtlich ihrer Machbarkeit zu prüfen (Plausibilitätsprüfung etc.). Sie dürfen keine Sanierungsvarianten in Anordnungen vorgeben.

Vor diesem Hintergrund sind die zuständigen Behörden keine Verwerter im Sinne der Förderrichtlinien des BMBF. Sie sind aber, wie die Pflichtigen, Nutznießer aus Forschungsvorhaben, insbesondere, wenn Arbeitshilfen, Checklisten, Handlungsempfehlungen etc. erarbeitet wurden, mittels derer die schlüssige Beurteilung der durchzuführenden Sanierungstechnologien möglich wird.

- Externe Fachleute (Planer):

Planungsbüros (Consultants) stehen als Dienstleister im Regelfall als Erfüllungsgehilfen des Pflichtigen, manchmal auch der Behörde zur Verfügung. Die Planer schlagen als Experten die durchzuführenden Sanierungsoptionen vor und diskutieren diese hinsichtlich ihrer technischen und ökonomischen Machbarkeit. Sie sind damit der Schlüssel für die Einführung der wirtschaftlichsten Lösung, stehen aber auch dabei in einer Planungsverantwortung mit entsprechenden Haftungskonsequenzen. Deshalb wählt der Planer gern den „sicheren Weg“, um die Restrisiken (Haftung!) so gering wie möglich zu halten. Von ihm wird verlangt, dass er den „Stand der Technik“ in seinen Planungen umsetzt.

Die Planer sind in der Regel Multiplikatoren der Ergebnisse aus FuE-Vorhaben und gleichwohl Nutznießer.

- Ausführende Firmen:

Die ausführenden Firmen, in der Regel Bauunternehmungen mit Umweltabteilungen oder auf Grundwasser- und Bodensanierung spezialisierte Anlagenbauer und Verfahreningenieure, setzen im Regelfall die Planungen Dritter um. Sie haben Wettbewerbsvorteile bei eigenen Entwicklungen, die entsprechend patentrechtlich geschützt sein müssen. Diese Vorteile bestehen zum einen im Alleinstellungsmerkmal, aber auch in der Möglichkeit, Sondervorschläge im Rahmen von Ausschreibungsverfahren einzubringen, die ihnen einen deutlichen Wettbewerbsvorteil verschaffen. Weiterhin wirken sich derartige Alleinstellungsmerkmale auch auf das Renommee aus. Die Marktsituation hingegen gibt bei knappen Preisen und einem außerordentlich harten Wettbewerb den Unternehmungen wenig Möglichkeiten, eigene Entwicklungen voranzutreiben.

Ein Verwertungsinteresse im Sinne der Förderrichtlinien des BMBF ist deshalb bei den ausführenden Unternehmen vorhanden.

30 Jahre Umweltforschung, gefördert durch das frühere BMFT und heutige BMBF, haben dazu beigetragen, dass wir heute wesentlich besser wissen, wie wir Altlasten ökologisch effektiv, aber auch ökonomisch realisierbar sanieren können. Gegenwärtig sind noch eine Vielzahl von Fragen offen, die es zu bearbeiten gilt und für deren Bearbeitung die Unterstützung des BMBF unerlässlich ist.

Sanierungspflichtige, Planer, Ausführende und Behörden haben eindeutig von den Forschungsergebnissen der vergangenen 30 Jahre Umweltforschung im angesprochenen Bereich durch den BMBF profitiert. Trotz einer insgesamt als mangelhaft zu bezeichnenden Verwertungssituation für die einzelnen Interessengruppen und Fördermittelempfänger hat es sehr viele Verwertungen von geförderten Techniken und Strategien an den einzelnen Sanierungsstandorten gegeben, die zwar gemäß den Förderrichtlinien nicht als die klassischen Verwer-

tungen identifiziert werden können, die aber dennoch dazu beigetragen haben, den Nutzen der jeweiligen Förderungen demonstrieren zu können.

Dies trifft für die Ergebnisse des Forschungsverbundes RUBIN, die übergeordnet durch das hier beschriebene Koordinierungsprojekt gesammelt, publiziert und im Handbuch zusammengefasst worden sind, und damit die neue Technologie der durchströmten Reinigungswände zur passiven in situ-Grundwassersanierung, ebenfalls zu.

Zu beachten ist, dass zu den Sanierungspflichtigen bzw. zu den Finanziers der Sanierungen und somit zu den Nutznießern der FuE-Vorhaben häufig Bund, Länder oder Kommunen gehören, die somit auch von den Ergebnissen profitiert haben. Letztlich ist somit deutsche Sanierungsforschung zu einem erheblichen Teil auch entlastend für den Steuerzahler gewesen, da es gelungen ist, neue kostengünstigere Sanierungsverfahren zu etablieren.

Die Altlastensanierung ist eine gesamtgesellschaftliche Aufgabe, für deren Bewältigung nach den wirtschaftlichsten Methoden zu suchen ist. Eine Forschungsförderung in diesem Zusammenhang ist zwingend erforderlich, wie auch die Beispiele in anderen Ländern zeigen. So wird Sanierungsforschung in den USA u.a. von den staatlichen Institutionen DOD (Department of Defense) und DOE (Department of Energy) unter Begleitung der Bundesumweltbehörde EPA seit gut zwei Jahrzehnten mit großem Erfolg durchgeführt.

3. Während der Durchführung bekannt gewordene Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Es sind keine Fortschritte dieser Art bekannt geworden.

4. Erfolgte Veröffentlichungen

Birke, V. (2006). "Permeable Reactive Barriers". In: Förstner, Ulrich / Grathwohl, Peter, "Ingenieurgeochemie, Technische Geochemie, Konzepte und Praxis", Springer-Verlag, Berlin, ISBN 978-3-540-3951

Birke, V., Burmeier, H., Jefferis, S., Gaboriau, H., Touzé, S., and Chartier, R. (2007). "Permeable reactive barriers (PRBs) in Europe: potentials and expectations". Italian Journal of Engineering Geology and Environment, Special Issue on TRANS-IT project, 31-38

Birke, V. und Burmeier H. (2007). „Vollflächig durchströmte Reinigungswände (Vollflächenwände) zur Sicherung kontaminierter Grundwässer: ‚Best Available Technologies‘ und Kenntnisstand nach über 10 Jahren Entwicklung“. Proceedings des Dresdner Grundwasserforschungszentrums e.V., Heft 31, 2007, Dresdner Grundwasserforschungszentrums e. V. (Hrsg.), Selbstverlag des Herausgebers, ISSN 1430-0176, 67-86

Birke, V., Schütt, Ch., Vigelahn, L., Naumann, E., Kundratek, A., Burmeier, H., and Friedrich, H.-J. (2010). "Impact of Trace Elements and Impurities When Technical-Grade Zero-Valent Iron Brands Are Used for Reductive Dechlorination of Chlorinated Ethenes in Groundwater". In: K.A. Fields and G.B. Wickramanayake (Chairs), Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds—2010. Seventh International Conference on Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds (Monterey, CA; May 2010). ISBN 978-0-9819730-2-9, Battelle Memorial Institute, Columbus, OH, www.battelle.org/chlorcon

Birke, V., Schuett, Ch., Burmeier, H., Weingran, Ch., Schmitt-Biegel, B., Müller, J., Feig, R., Tiehm, A., Müller, A., Maenz, S., Naumann, E., Palm, W.-U., and Ruck, W.K.L. (2010). "Permeable Reactive Barriers for Groundwater Remediation at Contaminated Former Manufactured Gasworks Plants and Related Sites: Design Features, Performances Achieved, and Outlook". In: K.A. Fields and G.B. Wickramanayake (Chairs), Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds—2010. Seventh International Conference on Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds (Monterey, CA; May 2010). ISBN 978-0-9819730-2-9, Battelle Memorial Institute, Columbus, OH, www.battelle.org/chlorcon

Birke, V., und Burmeier H. (2012). „Anwendung von durchströmten Reinigungswänden zur Sanierung von Altlasten – Ergänzungsband zum Handbuch“, Altlastenspektrum, 6, 249-261

Aufgestellt: Suderburg, 04.03.2013

Prof. Dipl.-Ing. Harald Burmeier

Dr. rer. nat. Volker Birke
(Verwaltungsprofessur für Chemie)

Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften, Fakultät Bau-Wasser-Boden, Campus Suderburg

Anlage

Ergänzungsband zum Handbuch „Anwendung von durchströmten Reinigungswänden zur Sanierung von Altlasten“ (CD ROM)