

1 Das Projekt SAFIRA und der Einsatz reaktiver Zonen zur *in situ*-Grundwassersanierung

H. WEIß

UFZ-Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH, Projektbereich Industrie- und Bergbaufolgelandschaften, Permoserstraße 15, 04318 Leipzig

G. TEUTSCH

Eberhard-Karls-Universität, Geologisches Institut, Sigwartstraße 10, 72076 Tübingen

Dieser Band stellt eine Fortsetzung des Berichtes "Sanierungsforschung in regional kontaminierten Aquiferen (SAFIRA) - Bericht zur Machbarkeitsstudie am Modellstandort Bitterfeld" [1] dar. Während in jenem ersten Bericht die Standorterkundung hinsichtlich auf dessen Eignung und die Laborarbeiten zu den Sanierungstechnologien im Mittelpunkt standen, widmet sich dieser Bericht vorwiegend den Ergebnissen aus den Untersuchungen der mobilen Testeinheit und der vertieften Standorterkundung sowie der Planung und dem Bau der Pilotanlage.

Das Projekt SAFIRA

Das Projekt SAFIRA (**S**Anierungs-**F**orschung **I**n **R**eional kontaminierten **A**quiferen) wurde 1995/96 konzipiert. Ziel des SAFIRA-Projektes ist es, die notwendigen Technologien und Methoden zu entwickeln und bereitzustellen, um modellhaft an einem realen Standort wie dem Bitterfelder Raum, in dem eine großflächige Grundwasserbelastung mit einem komplexen Schadstoffgemisch vorliegt, den Einsatz von *in situ*-Reaktionsverfahren zu demonstrieren. Dabei sollen neben der naturwissenschaftlich-technischen Realisierung insbesondere auch die ökonomischen und die mit einer eingeschränkten Flächenfolgenutzung verbundenen umweltplanerischen bzw. umweltrechtlichen Aspekte Berücksichtigung finden.

Als erster Schritt zur Umsetzung des SAFIRA-Verbundvorhabens wurde im Zeitraum zwischen September 1996 und Oktober 1997 ein Vorprojekt durchgeführt. An diesen Untersuchungen waren insgesamt 19 Arbeitsgruppen des UFZ sowie der Universitäten Tübingen, Stuttgart, Dresden, Halle, Leipzig und Berlin beteiligt.

Im Rahmen des Vorprojektes wurde die grundsätzliche technische Machbarkeit der Projektidee auf der Grundlage einer detaillierten Untersuchung der hydraulisch-hydrochemisch-mikrobiologischen Standortbedingungen und daraus abgeleiteter Laborexperimente nachgewiesen. Es wurden in diesem Zusammenhang mehrere Technologien identifiziert, die geeignet erscheinen, in einer *in situ*-Reaktionszone einsetzbar zu sein und

die das Potential besitzen, die am Standort vorhandenen Grundwasser-Schadstoffe entweder vollständig abzubauen oder zumindest sehr wesentlich abzureinigen.

Nach der Vorstudie wurde im März 1998 eine mobile Testeinheit in Betrieb genommen. Parallel dazu wurde nach umfangreichen Planungs- und Erkundungsarbeiten mit dem Bau der Pilotanlage am Modellstandort begonnen.

Internationaler Stand von Forschung und Technik

In situ-Reaktionswände sind bisher vor allem in zwei Bauarten zur Anwendung gekommen. Es handelt sich dabei um die permeable Reaktionswand und das "Funnel-and-Gate"-System.

Die sogenannte **Permeable Reaktionswand** ist dadurch gekennzeichnet, daß praktisch über die gesamte Länge der Wand eine reaktive Zone (Reaktor) ausgebildet ist. Eine solche *in situ*-Reaktionszone kann z.B. durch Erstellen und Wiederverfüllen eines Grabens oder durch Einbringen von Fremdmaterial zwischen Spundwänden, durch Bohrpfähle etc. errichtet werden.

Aufgrund der meist nicht unerheblichen Längen, die zur Abstomsanierung ganzer Standorte notwendig sind (oft >100 m), muß aus wirtschaftlichen Gründen bei der heute verfügbaren Tiefbautechnik davon ausgegangen werden, daß die Füllung der reaktiven Zone **nicht** zu einem späteren Zeitpunkt ausgetauscht werden kann. Falls eine Regenerierung der reaktiven Zone während der veranschlagten Sanierungszeit erforderlich erscheint, so müssen entsprechende Einbauten (z.B. Lanzen, Brunnen, Gräben etc.) vorgesehen werden. Es besteht grundsätzlich die Möglichkeit, mehrere reaktive Zonen (Reaktortypen) in Reihe zu schalten und so entweder eine gewünschte Abfolge des Schadstoffabbaus bzw. der -immobilisierung zu erreichen oder aber mehrere Schadstoffgruppen gemeinsam zu behandeln. Aufgrund der nur einmaligen Reaktorfüllung muß bei der Permeablen Reaktionswand vor allem die Langzeitfunktion des Systems sichergestellt werden. Eine Alternative zu den Permeablen Reaktionswänden ist das Prinzip des sogenannten **Funnel-and-Gate-Systems** (vgl. Abb. 1). Es beruht darauf, daß nur ein kleiner Teil der *in situ*-Wand als permeable reaktive Zone (gate) verwendet wird, während der überwiegende Teil der Wand als geringdurchlässiger sogenannter Trichter (funnel), z.B. in Form von Spund- oder Schlitzwänden, ausgebaut wird. Ein wesentlicher Vorteil des Funnel-and-Gate-Prinzips besteht darin, daß grundsätzlich die Möglichkeit gegeben ist, die Reaktorfüllung auszutauschen. Jedoch ist im allgemeinen davon auszugehen, daß die hierfür erforderliche Reaktorkonstruktion, vor allem für Tiefen größer als 10 m, aufgrund der einzusetzenden Spezial-Tiefbautechnik einen wesentlichen Kostenfaktor darstellt.

Das Funnel-and-Gate-Prinzip hat vor allem dort Vorteile, wo entweder der Reaktor in regelmäßigen Zeitabständen auszutauschen ist (z.B. bei Sorptionsreaktoren) oder die Reaktorfüllung relativ teuer ist und nur ein kleines Reaktorvolumen benötigt wird (z.B. schnelle Katalysereaktoren). Darüber hinaus ermöglicht es in stark heterogenen Aquifersystemen eine effizientere Nutzung der Reaktorfüllung.

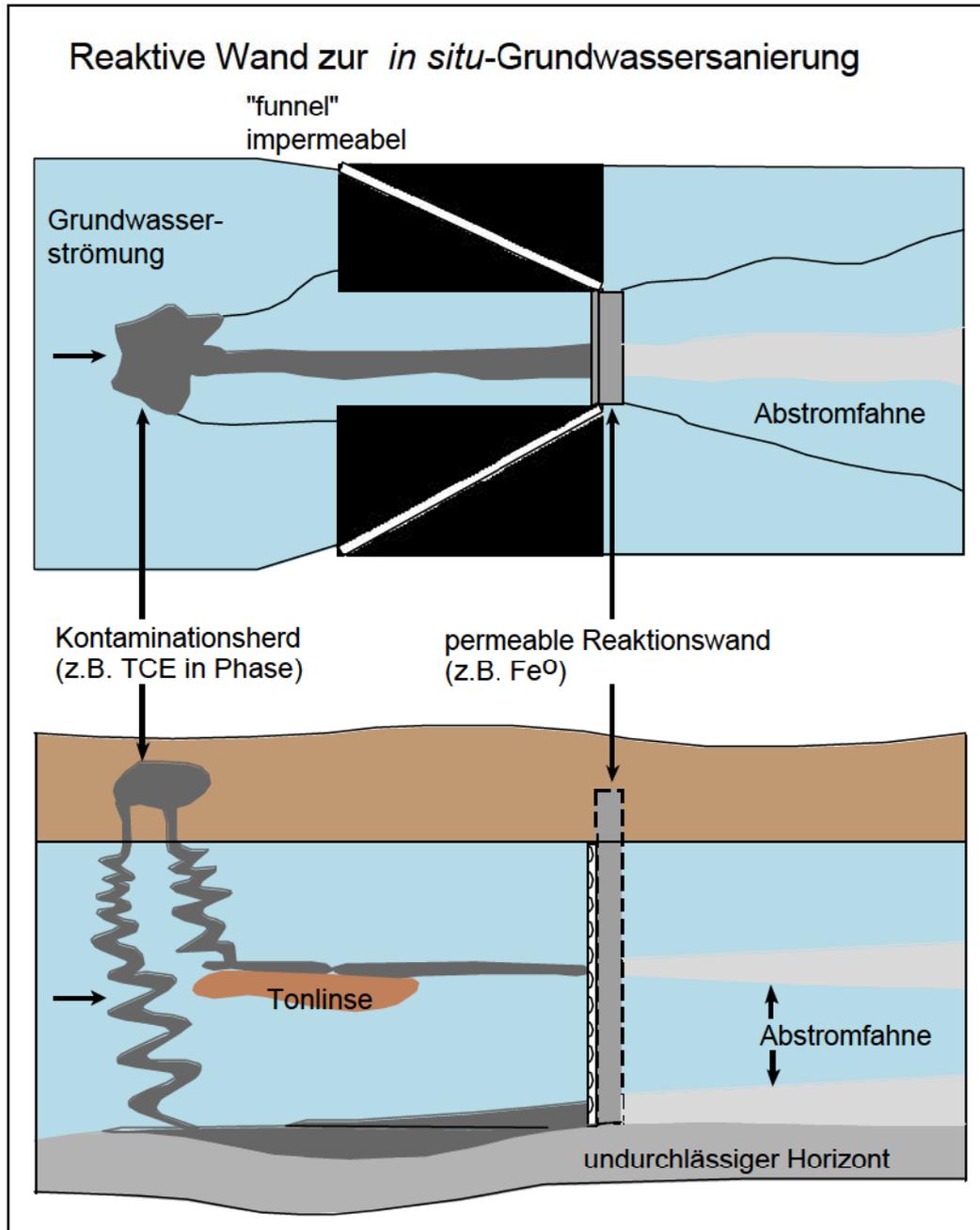


Abb. 1: *In situ*-Reaktionswand; Prinzipskizzen

Neben den Permeablen Reaktionswänden und den Funnel-and-Gate-Systemen werden auch andere Bauarten diskutiert. Beispielsweise können Bohrpfähle, Drainagegräben, Horizontalbohrungen etc. als Behältnisse für reaktive Zonen dienen [2]. Das erste Funnel-and-Gate-System wurde vor 7 Jahren im Testfeld der University of Waterloo auf dem

Luftwaffenstützpunkt Borden in Ontario, Kanada, installiert. Zum Einsatz kam eine sogenannte „Eisenwand“, die auf der von RW. GILLHAM 1989 in Waterloo (Kanada) entdeckten Möglichkeit der Nutzung von Fe^0 zur Dehalogenierung von aliphatischen Chlororganika beruhte. Erste vielbeachtete Veröffentlichungen erfolgten 1994 [3, 4]. Seit dieser Zeit sind viele verschiedene Methoden zur (passiven) *in situ*-Grundwassersanierung vorgeschlagen, allerdings nur wenige zur Anwendungsreife entwickelt worden. Derzeit hat lediglich die Verwendung von Fe^0 in *in situ*-Reaktionswänden ein kommerzielles Niveau erreicht und wird von der US-amerikanischen Umweltbehörde EPA als eine der aussichtsreichsten Sanierungstechnologien eingestuft [5].

Zahlreiche andere Methoden befinden sich in der Phase der Entwicklung, d.h. sie wurden bisher entweder im Pilotmaßstab oder gar nur im Labormaßstab erprobt [6]. Darüber hinaus existieren aus der klassischen Wasserbehandlung bekannte Methoden z.B. der Adsorption an Kohlen, Torf etc.. Diese bekannten Techniken müssen allerdings für einen möglichen Langzeiteinsatz unter *in situ*-Bedingungen teilweise oder ganz überarbeitet und angepaßt werden.

Eine 1997 veröffentlichte Studie des Groundwater Remediation Technologies Analysis Centre faßt alle Demonstrationsobjekte in Nordamerika zusammen [5]. In diesem Bericht werden 61 Grundwassersanierungsprojekte betrachtet. 55 % dieser Demonstrationsprojekte (12 biologische Methoden und 24 physikalisch/chemische Methoden) befaßten sich mit innovativen *in situ*-Technologien, was das große Interesse an diesen Methoden in den letzten Jahren, vor allem in Nordamerika, widerspiegelt. Die behandelten Kontaminationen reichen von anorganischen Stoffen, wie z.B. Cr^{6+} , Uran oder Arsen, über ein breites Spektrum an organischen Stoffen (z.B. BTEX, PAK und aliphatische Chlororganika). Für die im SAFIRA-Projekt im Mittelpunkt stehenden chlororganischen Verbindungen liegen hingegen bisher keine Technologien vor. Konkret wurde der Abbau von TCE in 7 Projekten, von PCE in 5 Projekten und in einem Fall der von DCE in Demonstrationsversuchen verfolgt [5]. In Europa wurde in den letzten Jahren lediglich ein Pilotprojekt durchgeführt: an einem Standort der Elektronikindustrie in Belfast, der hauptsächlich durch Lösungsmittel (TCE, PCE, TCA) kontaminiert ist, wurde eine mit Eisenspänen gefüllte *in situ*-Reaktionssäule (12 m Länge und 1,2 m Durchmesser) eingesetzt [7]. Entwicklungen oder gar zur Anwendungsreife gelangte Technologien für aromatische Chlororganika bzw. komplex kontaminierte Grundwässer, wie sie u.a. am SAFIRA-Modellstandort in Bitterfeld zu finden sind, gibt es bislang nicht. Diese Schadstoffgruppe hat jedoch, insbesondere in Form komplexer „Cocktails“, eine weite Verbreitung an industriellen Standorten. Einige, ausgewählte Beispiele dafür sind Standorte der Chemieindustrie (Pestizidproduktion u.a.) [8-12], militärische Altlasten [13] oder Deponien [14-16]. Die meisten der beschriebenen Schadensfälle befinden sich in Nordamerika und in Westeuropa. Dies ist vor allem auf die hohe Industrieproduktion, aber

auch den hohen Stand der Erkundung in diesen Ländern zurückzuführen. Es ist allerdings mehr als wahrscheinlich, daß vor allem in Osteuropa und außereuropäischen Schwellenländern vergleichbare Standorte existieren, die großflächig das Grundwasser kontaminieren.

Eine Übersicht über die in Nordamerika installierten und die in Europa geplanten oder in der Erprobung befindlichen *in situ*-Reaktionswände gibt die nachstehende Tabelle.

Reaktive Wände - Installiert

Standort	Kontamination	Reaktor	Status	Beginn
Borden Air Force Base, Canada	LCKW	Durchströmte Fe ⁰ -Wand	Pilotmaßstab	06/91
Industriestandort, New York, USA	LCKW	Fe ⁰ Funnel-and-Gate	Pilotmaßstab	05/95
Lowry Air Force Base, Denver, USA	LCKW	Fe ⁰ Funnel-and-Gate	Pilotmaßstab	12/95
U.S. Naval Air St., Moffett Field, CA, USA	LCKW	Fe ⁰ Funnel-and-Gate	Pilotmaßstab	04/96
Somersworth Sanitary Landfill, USA	LCKW	Fe ⁰ Funnel-and-Gate	Pilotmaßstab	11/96
U.S. Naval Air Station Alameda, USA	LCKW, BTEX	Fe ⁰ , ORC Funnel-and-Gate	Pilotmaßstab	12/96
U.S. DOE Savannah River Site, USA	LCKW	Fe ⁰ GeoSiphon	Pilotmaßstab	07/97
AFCEE Demonstration, Florida, USA	LCKW	Fe ⁰ Schmalwand	Pilotmaßstab	11/97
U.S. DOE ANL, Illinois, USA	LCKW	Fe ⁰ Bodenmixing	Pilotmaßstab	11/97
U.S. AFB Area 5 Dower, DE, USA	LCKW	Fe ⁰ Funnel-and-Gate	Pilotmaßstab	01/98
NASA Demonstration, Florida, USA	LCKW	Fe ⁰ Bodenmixing	Pilotmaßstab	02/98
Industriestandort, Edenkoben, BRD	LCKW	Fe ⁰ -Funnel-and-Gate	Pilotmaßstab	05/98
Industriestandort, Rheine, BRD	LCKW	Durchströmte Fe ⁰ -Wand	Pilotmaßstab	06/98
ANG Demonstration, Cape Cod, MS, USA	LCKW	Fe ⁰ Hydrofracturing	Pilotmaßstab	07/98
U.S. ACE, Maxwell, AL, USA	LCKW	Fe ⁰ Hydrofracturing	Pilotmaßstab	07/98
Industriestandort, Sunnyvale, CA, USA	LCKW	Durchströmte Fe ⁰ -Wand	"full-scale"	02/95
Nickel Rim, Sudbury, Canada,	Metalle	Durchströmte Kompostwand	"full-scale"	08/95
Industriestandort, Fort Bragg, CA, USA	MKW	Aktivkohle Funnel-and-Gate	"full-scale"	09/95
Industriestandort, Sunnyvale, CA, USA	LCKW	Durchströmte Fe ⁰ -Wand	"full-scale"	09/95
Industriestandort, Belfast, NIRL	LCKW	Fe ⁰ -Funnel-and-Gate	"full-scale"	12/95
Industriestandort, Coffeyville, KA, USA	LCKW	Fe ⁰ -Funnel-and-Gate	"full-scale"	01/96
USCG Facility, Elisab. City, NC, USA	LCKW, Cr(VI)	Durchströmte Fe ⁰ -Wand	"full-scale"	06/96
Government Facility, Lakewood, CO, USA	LCKW	Fe ⁰ Funnel-and-Gate	"full-scale"	10/96
Fry Canyon Site, Utah, USA	U	Funnel-and-Gate: Fe ⁰ , AFO, PO ₄	"full-scale"	12/96
Industriestandort, South Carolina, USA	LCKW	Durchströmte Fe ⁰ -Wand	"full-scale"	10/97
Industriestandort, Colorado, USA	LCKW	Fe ⁰ Funnel-and-Gate	"full-scale"	11/97
Industriestandort, New York, USA	LCKW	Durchströmte Fe ⁰ -Wand	"full-scale"	12/97
Y-12 Site, OAK Ridge NL, TN, USA	U, Tc, HNO ₃	Durchströmte Fe ⁰ -Wand	"full-scale"	12/97
Industriestandort, Oregon, USA	LCKW	Fe ⁰ Funnel-and-Gate	"full-scale"	03/98
Superfund Site, New Jersey, USA	LCKW	Durchströmte Fe ⁰ -Wand	"full-scale"	03/98
U.S. DOE Standort, Kansas City, USA	LCKW	Durchströmte Fe ⁰ -Wand	"full-scale"	04/98
U.S. DOE Standort, Rock Flats, CO, USA	LCKW	Fe ⁰ Gate und Drainage	"full-scale"	07/98
Industriestandort, New Jersey, USA	LCKW	Durchströmte Fe ⁰ -Wand	"full-scale"	08/98
Industriestandort, Vermont, USA	LCKW	Fe ⁰ Funnel-and-Gate	"full-scale"	08/98
Industriestandort, Tübingen, BRD	LCKW	Fe ⁰ Funnel-and-Gate	"full-scale"	11/98

Wie bereits erwähnt, fällt auf, daß in Nordamerika bisher praktisch ausschließlich die Fe^0 -Technologie für LCKW-Schäden zum Einsatz kam, während in Europa daneben auch Aktivkohle-Sorptionswände für PAK-Schäden im Gespräch sind.

Tiefbautechnische Aspekte

Die Herstellung von Dichtwänden bis 30 m Tiefe als Teil von Funnel-and-Gate-Systemen kann als Stand der Technik bezeichnet werden. Dabei genügen im Vergleich mit Dichtwänden für Komplettumschließungen geringere Anforderungen an die Dichtigkeit des „Funnel“. Ein Durchlässigkeitskontrast von drei bis vier Größen-ordnungen wird i.d.R. für eine effektive Umlenkung der Grundwasserströmung zu den „Gates“ völlig ausreichen.

Eine kostengünstige Herstellung vollflächig durchströmter Reaktionswände erscheint außer bei sehr kleinen Anlagen derzeit nur für geringmächtige und geringdurchlässige Aquifere möglich. Dann kann mit einer offenen Wasserhaltung operiert und somit auf teure Spund- und Schlitzwände verzichtet werden. Hier ist in naher Zukunft durch den Einsatz umgebauter Drainagemaschinen, die bis in 10 m Tiefe reichen, eine erhebliche Kostenersparnis in Sicht. Dabei bleibt allerdings die Frage offen, wie das reaktive Material *in situ* so verteilt werden kann, daß eine möglichst gleichmäßige Ausnutzung erfolgt.

Bei der Herstellung von Funnel-and-Gate-Bauwerken geht es insbesondere um die Herstellung des Gate-Bauwerks, in dem das reaktive Material unterzubringen ist. Für mächtige Aquifere (>20 m), sind angepaßte, d.h. kostengünstige Bauverfahren gefragt. Von besonderer Bedeutung ist dabei die Sicherstellung einer ausreichenden Durchlässigkeit der Gate-Bauwerke einschließlich der reaktiven Füllung. Dabei ist zu beachten, daß für manche reaktive Medien ein periodischer Austausch bzw. eine regelmäßige Wartung, z.B. in Form einer Rückspülmöglichkeit, erforderlich ist.

Die Realisierung der SAFIRA-Pilotanlage wird in der Weise erfolgen, daß die verschiedenen Reaktoren vertikal durchströmt in Senkschächten eingebaut werden. Somit lassen sich einerseits für diejenigen Verfahren, die längere Verweilzeiten des Grundwassers voraussetzen, die erforderlichen Durchströmungslängen realisieren, andererseits für die „schnelleren“ Verfahren abstromseitig Aquifer-Säulen nachschalten, um die Auswirkungen der Reaktionen auf die Grundwasserleiter zu untersuchen. Vor allem bei heterogenen Aquiferen und/oder geschichteten Kontaminationen stellt auch für die Implementierung die vertikal durchströmte Reaktorsäule eine Alternative zum „klassischen“ gate-Prinzip dar (vgl. Abb. 2).

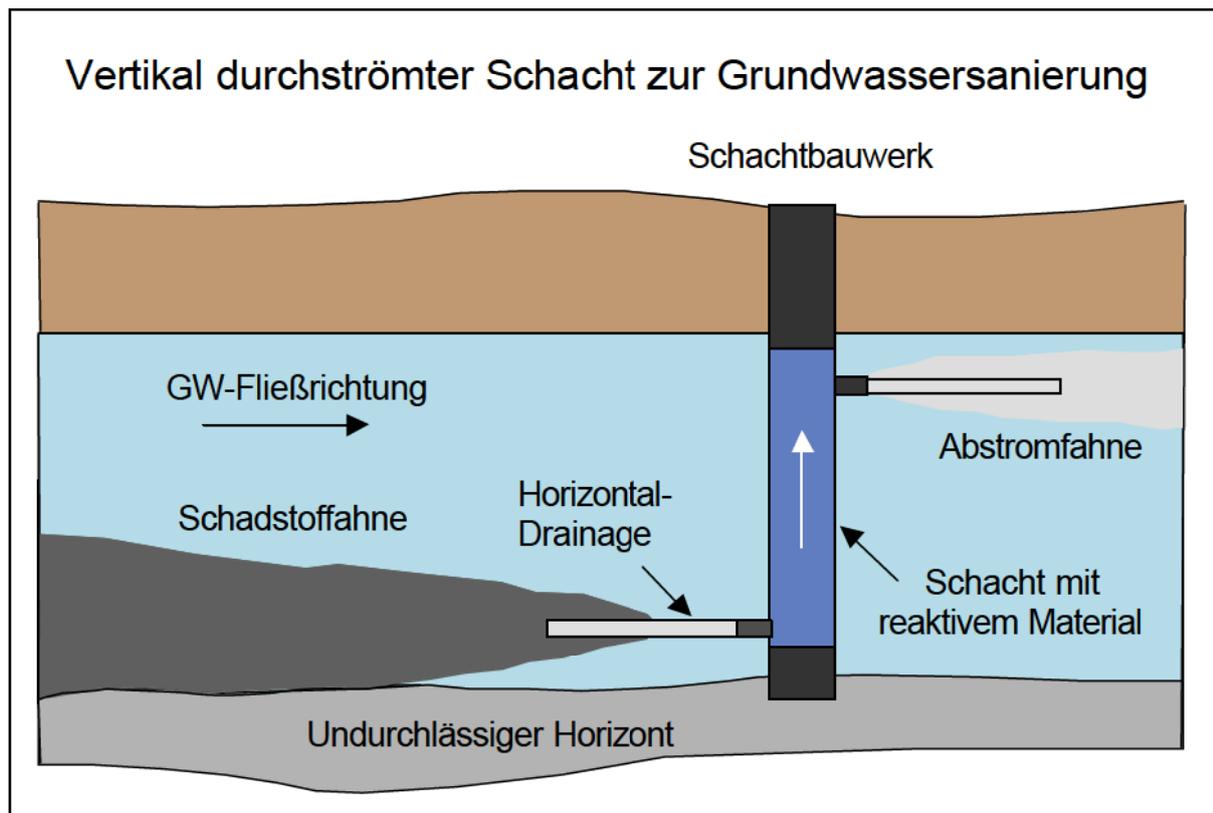
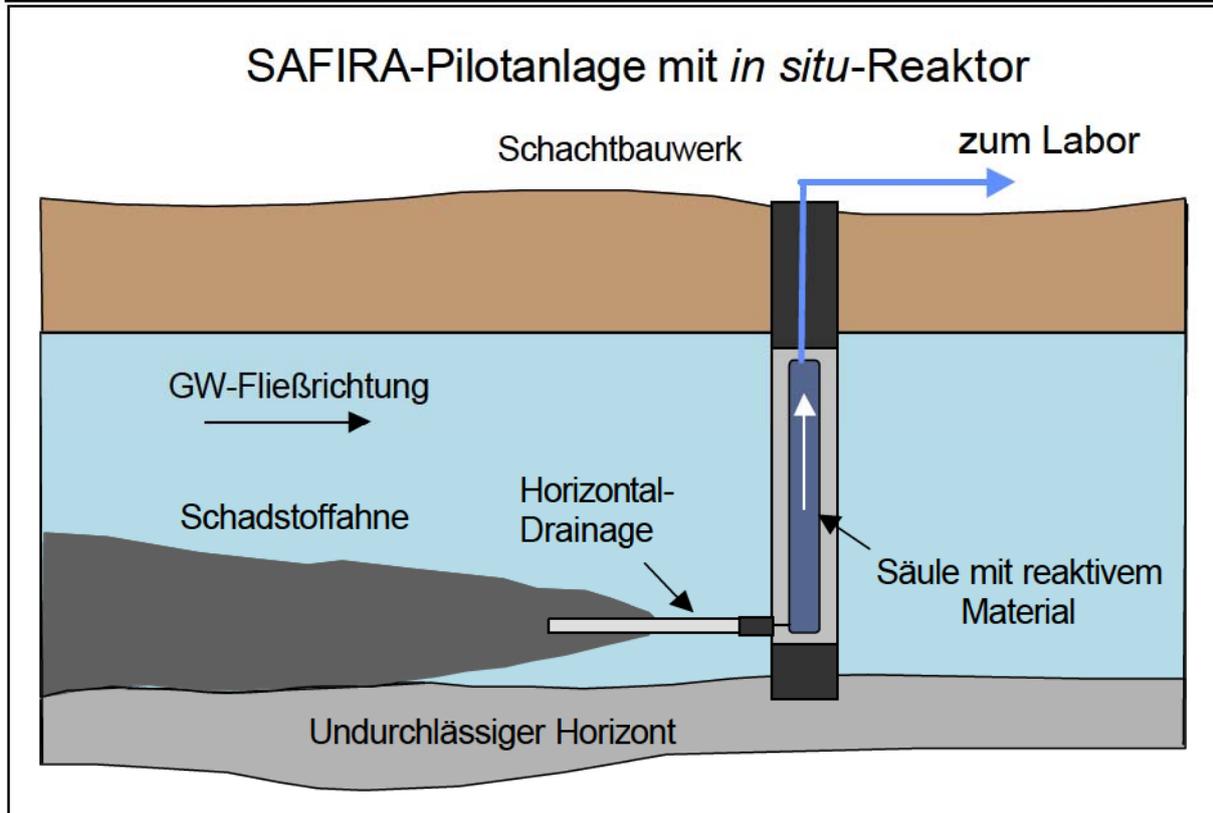


Abb. 2: Vertikal durchströmte Reaktoren; Prinzipskizze

Literatur

- [1] WEIß, H., TEUTSCH, G. & DAUS, B. (Hrsg.): Sanierungsforschung in regional kontaminierten Aquiferen (SAFIRA) - Bericht zur Machbarkeitsstudie für den Modellstandort Bitterfeld, UFZ-Bericht 27/1997, ISSN 0948-9452, Januar 1998, Leipzig
- [2] SCHAD, H. & TEUTSCH, G. (1998): Reaktive Wände - Aktueller Stand der Praxisanwendung.- Zeitschr. f. Geotechnik 21(2), 73-83
- [3] MATHESON, L.J. & TRATNYEK, P.G. (1994): Reductive dehalogenation of chlorinated methans by iron metal.- Environ. Sci. Technol. 28/12, 2045 - 2053
- [4] GILLHAM, R.W. & O'HANNESIN, S.F. (1994); Enhanced degradation of halogenated aliphatics by zero-valent iron.- Ground Water 32/6: 958-967
- [5] MILLER, R.A. (1997): Analysis of Information Contained in the Completed North America Innovative Remediation Technology Demonstration Projects.- Information Report, GWRTAC I-Series TL-97-01
- [6] RADISAV, D. & FREDERICK, G.P. (1996): Treatment Walls.- Technology Evaluation Report, GWETAC E-Series TE-96-01
- [7] JEFFERIS, S.A. & NORRIS, G.H. (1998): Reactive Treatment Zones: Concepts and a case History.- Proc. NATO/CCMS Pilot Study Meeting „Evaluation of Emerging and demonstrated Technologies for the Treatment of Contaminated Land and Groundwater“ (Phase III), Wien, 22. - 27.02.98; s.p.
- [8] NORRIS, J.E. (1992): Case study of a comprehensive approach to ground water contamination source identification.- Proc. Ann. Meet. - Air Waste Managem. Assoc. 85th (Vol 17), 92/3.03.15 pp
- [9] MUNFAH, A.A. & AIKEN, S.C. (1996): A success story - Superfund site cleanup the Bofors-Nobel, Muskegon, Michigan experience.- Proc. WEFTEC '96, Annu. Conf. Expo., 69th, Vol 3, 305-314
- [10] WILLIAMS, R.A., SHUTTLE, K.A., KUNKLER, J.L., MADSEN, E.L. & HOOPERS, S.W. (1997): Instinsic bioremediation in a solvent-contaminated alluvial ground water.- J. Ind. Microbiol. Biotechnol. 18 (2/3): 177-188
- [11] MUELLER, D., DOTT, W., KINZELBACH, W. & ROTH, R. (1991): The demonstrated tests for combined soil and groundwater cleanup of the previous Boehringer ground, Hamburg.- IWS-Schriftenr. 11: 255-270
- [12] KHOUREY, C.J., MOHR, E.T., GIFFORD, G. & STRAIN, W.H. (1984): Purgeable organic compounds in northeast Ohio groundwater.- Trace Subst. Environ. Health 18: 397-403
- [13] KLINK, L., CAMPBELL, M. & COHO, J. (1994): Treatability study of enhanced oxidation for groundwater contaminated with chlorinated organics.- Chem. Oxid. Volume Date 1992, 2: 377-95
- [14] Health Assessment for Stringfellow, Glen Avon, California, Region 9 (1989).- Report from Gov. Rep. Announce. Index (U.S.) 90(3), Abstract No. 005,013
- [15] DAVIS, B.D. & MORGAN, R.C. (1986): Hexachlorobenzene in hazardous waste sites.- IARC Sci. Publ. 77: 23-30
- [16] PANKOW, J.F., BABELLE, L.M., HEWETSON, J.P. & CHERRY, J.A. (1984): A syringe and cartridge method for down-hole sampling for trace organics in ground-water.- Ground Water 22(3): 330-339



2. Statusbericht

Modellstandort, Mobile Testeinheit, Pilotanlage

Holger Weiß¹⁾, Birgit Daus¹⁾, Georg Teutsch²⁾

¹⁾ UFZ-Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH
PB Industrie- und Bergbaufolgelandschaften
Permoserstraße 15, 04318 Leipzig

²⁾ Eberhard-Karls-Universität
Geologisches Institut
Sigwartstraße 10, 72076 Tübingen