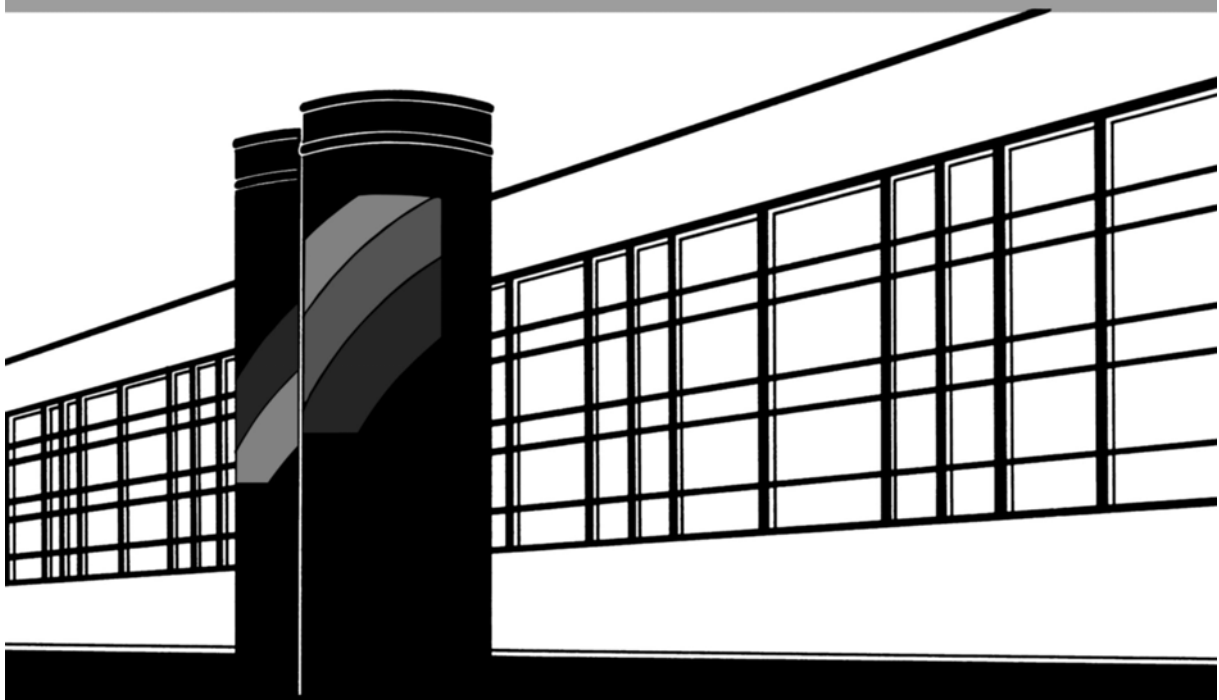


Institut für Wasserbau · Universität Stuttgart

Mitteilungen



Heft 165 Hrsg.: J. Braun, H.-P. Koschitzky,
M. Stuhmann

VEGAS – Kolloquium 2007
26. September 2007

Heft 165 *VEGAS* – Kolloquium 2007

26. September 2007

Herausgeber:

Jürgen Braun

Hans-Peter Koschitzky

Matthias Stuhrmann

Titelaufnahme der Deutschen Bibliothek

Braun, Jürgen; Koschitzky, Hans-Peter; Stuhmann, Matthias (Hrsg.):
VEGAS-Kolloquium 2007, 26.September 2007
von Jürgen Braun et al. (Hrsg.), Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart.
Stuttgart: Inst. für Wasserbau, 2007

(Mitteilungen / Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart: H. 165)
ISBN 3-933761-69-7

Gegen Vervielfältigung und Übersetzung bestehen keine Einwände, es wird lediglich um
Quellenangabe gebeten.

Herausgegeben 2007 vom Eigenverlag des Instituts für Wasserbau
Druck: DCC Kästl, Ostfildern

VORWORT

Im Rahmen des diesjährigen VEGAS-Kolloquiums werden neueste Ergebnisse von Forschungs- und Entwicklungsvorhaben aus den Bereichen innovative In-situ-Sanierungsverfahren, Vor-Ort-Messtechnik sowie (Brach-) Flächenmanagement der Fachöffentlichkeit vorgestellt und diskutiert. Den aktuellen Entwicklungen auf dem Gebiet der Nanotechnologie („Nano-Eisen“, „Carbo-Iron“) wird eine eigene Sitzung gewidmet.

Die Vorträge umfassen Grundlagenuntersuchungen, Ergebnisse aus Labor- und Technikumsversuchen sowie Erfahrungen aus Pilotanwendungen im Feldmaßstab. Der Einsatz neuester Techniken und Verfahren bei Pilotanwendungen im Rahmen von Sanierungsprojekten zeigt die Möglichkeiten und Chancen neuer Techniken für die Ingenieurpraxis unter Berücksichtigung von Anwendungsmöglichkeiten und ökonomischen Aspekten auf. Ziel ist es hierbei auch, die Marktchancen innovativer Verfahren für die Altlastensanierungspraxis aufzuzeigen.

Eine wichtige Funktion des jährlich stattfindenden Kolloquiums ist der Know-How-Transfer von der Wissenschaft in die Praxis durch die Diskussion zwischen Wissenschaftlern, Vertretern von Industriefirmen und Kommunen als Eigentümer von kontaminierten Flächen, Ingenieurbüros, Analytiklabors und Vertretern der Umweltverwaltung. Aus der Diskussion werden auch Anregungen bezüglich der Anforderungen der Sanierungspraxis an zukünftige Forschungs- und Entwicklungsprojekte erwartet.

Stuttgart, im September 2007

Jürgen Braun
Hans-Peter Koschitzky
Matthias Stuhmann



VEGAS
Kolloquium
2007

26. September 2007

Ort:

Universität Stuttgart
Campus Stuttgart-Vaihingen
Informatikgebäude, Universitätsstraße 38,
Hörsaal V 38.04

VEGAS-Kolloquium 2007

Mittwoch, 26. September

Hörsaal 38.04, Universitätsstraße 38, Campus Stuttgart-Vaihingen

9:00 Eröffnung und Einführung

*Stefan Gloger, Vorsitzender des VEGAS-Beirats
(Umweltministerium Baden-Württemberg)*

Flächenmanagement / REFINA

Sitzungsleiter: Rolf Gerhardt (Deutsche Bahn AG)

9:10 Flächen managen und recyceln – praxisorientierte Forschung bei VEGAS

Volker Schrenk (VEGAS, Universität Stuttgart)

9:30 Kleine und mittlere Unternehmen entwickeln kleine und mittlere Flächen

Hermann Kirchholtes (Amt für Umweltschutz, Landeshauptstadt Stuttgart)

9:50 Kostenoptimierte Sanierung und Bewirtschaftung von Reserveflächen - KOSAR

Stephan Redlich, Kersten Roselt und Andreas Schaub (Jena-Geos GmbH, Jena)

10:10 Kaffeepause

In-situ-Sanierungsverfahren: Aktuelle Entwicklungen

Sitzungsleiter: Frank-Dieter Kopinke (UFZ Leipzig)

10:40 H₂O₂-Zugabe zur Stimulierung des aeroben biologischen Abbaus von teerölstämmigen Schadstoffen am KORA-Standort Testfeld Süd

Oliver Trötschler et al. (VEGAS, Universität Stuttgart)

11:10 THERIS-Verfahren zur Reinigung von Aquitarden – Einflussfaktoren und Betriebsparameter

Uwe Hiester et al. (VEGAS, Universität Stuttgart)

11:40 Pilotanwendung DLI Zeitz: Erste Ergebnisse der thermischen Sanierung des Kernbereichs eines Benzolschadens mittels Dampf-Luft-Injektion

Hans-Peter Koschitzky, Oliver Trötschler (VEGAS, Universität Stuttgart)

12:10 Mittagspause mit Imbiss

In-situ-Sanierungsverfahren: Nano-Eisen

Sitzungsleiter: Dieter Stupp (Dr. Stupp Consulting GmbH)

13:30 Injektion von Nano-Eisen zur LHKW-Sanierung – Ergebnisse aus VEGAS-Laboruntersuchungen

Jürgen Braun, Cjestmir de Boer (VEGAS, Universität Stuttgart)

14:00 Carbo-Iron – ein neues In-situ-Reduktionsmittel

Frank-Dieter Kopinke, Katrin Mackenzie (UFZ Leipzig)

14:30 Erste full-scale Anwendung der Nano-Eisen Sanierungstechnologie in Deutschland – Projektplanung und Durchführung

Claudia Müller, Peter Rissing (Alenco Environmental Consult GmbH, Stuttgart)

15:00 Kaffeepause

Vor-Ort-Messtechnik: Erkundung / Langzeitmonitoring

Sitzungsleiter: Rolf Hahn (LUBW)

15:30 Neue Messtechniken: Der lange Weg in den Markt

Norbert Klaas, Tobias Heitmann (VEGAS, Universität Stuttgart)

16:00 Innovative Mess- und Probenahmetechnik

Hansjörg Weiß (imv, Tübingen)

16:30 Abschlussdiskussion

17:30 Eröffnung des 3. BMBF-Statusseminars KORA

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	VII
1 Flächen managen und recyceln - praxisorientierte Forschung bei VEGAS	1
1.1 Einleitung	1
1.2 Aktivitäten von VEGAS im Bereich Flächenrecycling und Flächenmanagement	2
1.2.1 Arbeitsgruppe FIGURA und BWPLUS	2
1.2.2 Öffentlichkeitsarbeit und Arbeitsgruppen	5
1.2.3 Deutsch-amerikanische Zusammenarbeit	5
1.2.4 Wissenstransfer und REFINA	6
1.3 Flächenrecycling und Altlastensanierung	9
1.4 Ausblick	9
1.5 Danksagung	10
1.6 Literatur	10
2 Kleine und mittlere Unternehmen entwickeln kleine und mittlere Flächen („KMU entwickeln KMF“)	12
2.1 Stadtinnenentwicklung	12
2.2 REFINA	13
2.3 Das Verbundvorhaben „KMU entwickeln KMF“	13
2.4 Projektpartner	14
2.5 Projekthinhalte und Vorgehen	14
2.6 Modellstandorte	15
2.7 Erste Erfahrungen	18
2.8 Literatur	19
3 Kostenoptimierte Sanierung und Bewirtschaftung von Reserveflächen – KOSAR Definition und Anforderungen an Reserveflächen	20
3.1 Zusammenfassung	20
3.2 Ausgangssituation und Ansatz von KOSAR	21
3.3 Definition und Anforderung von Reserveflächen	22
3.3.1 Inanspruchnahmerisiko	23
3.3.2 Investitionsrisiken	24
3.3.3 Risikovorsorge	25
3.3.4 Städtebau- und Landschaftsplanung	25
3.3.5 Investitionsvorbereitung	26
3.3.6 Verwaltung	26
3.3.7 Kostenstruktur	27
3.4 Typisierung von Reserveflächen	27

4	H₂O₂-Zugabe zur Stimulierung des aeroben biologischen Abbaus von teerölstämmigen Schadstoffen am KORA-Standort „Testfeld Süd“	28
4.1	Einleitung	28
4.2	Vorarbeiten	29
4.3	Ergebnisse	29
4.3.1	Entwicklung einer MPN-Methode	29
4.3.2	Untersuchungen zur Stimulation des natürlichen und geförderten Abbaus unter unterschiedlichen Redoxbedingungen	30
4.3.3	Pilotanwendung TFS	31
4.3.4	ENA-Maßnahme: Stichtagsmessung und GZB-Installation	31
4.3.5	Tracertests	33
4.3.6	Sauerstoffzugabe und Verockerung des GZB	34
4.3.7	Zugabe von Wasserstoffperoxid mit Änderung des hydraulischen Systems	34
4.3.8	Entwicklung der Keimzahlen	37
4.3.9	Kostenbetrachtung	38
4.4	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	38
4.5	Danksagung	39
4.6	Literatur	39
5	THERIS-Verfahren zur Reinigung von Aquitarden – Einflussfaktoren und Betriebsparameter –	41
5.1	Motivation	41
5.2	Einführung	42
5.2.1	Grundlagen	42
5.2.2	Motivation und Umfang der Untersuchung	42
5.2.3	Zielsetzung	43
5.3	Methoden	43
5.3.1	2D-Versuche in Laborküvetten	43
5.3.2	3D-Untersuchungen im VEGAS-Großbehälter	44
5.3.3	Begleitende numerische Simulationen	46
5.4	Ergebnisse der Experimente und Diskussion	46
5.4.1	2D-Küvetten-Experiment	46
5.4.2	3D-Großbehälter-Experiment	48
5.5	Zusammenfassung und Ausblick	50
5.6	Danksagung	50
5.7	Literatur	51
6	Pilotanwendung DLI Zeit: Erste Ergebnisse der thermischen Sanierung des Kernbereichs eines Benzolschadens mittels Dampf-Luft-Injektion	52
6.1	Einleitung	52
6.2	Standortbeschreibung	53
6.3	Sanierungskonzept am Pilotstandort	54
6.4	Durchführung der Pilotinjektion	55
6.4.1	Erschließung des Sanierungsfelds	55
6.4.2	Versuchsdurchführung und Versuchsphasen	58
6.5	Erste Ergebnisse der Pilotinjektion	59
6.6	Zusammenfassung und Ausblick	62

6.7	Danksagung	62
6.8	Literatur	62
7	Injektion von Nano-Eisen zur LHKW-Sanierung – Ergebnisse aus VEGAS-Laboruntersuchungen	64
7.1	Einleitung	64
7.2	Motivation (Vorversuche)	64
7.3	Untersuchungen (1-D) zur Mobilität von Kolloiden	66
7.3.1	Einfluss der Vorbehandlung von Kolloiden	66
7.3.2	Entwicklung einer Messtechnik zum zerstörungsfreien Nachweis von Nano-Eisen im Boden	68
7.3.3	Einfluss von Fluid- und Aquifereigenschaften	69
7.4	Ausblick	71
7.4.1	Großskalige Injektionsversuche mit Radialströmung	71
7.4.2	Planung und Durchführung pilothafter Feldanwendungen	73
7.5	Danksagung	73
7.6	Literatur	73
8	Carbo-Iron – ein neues <i>In-situ</i>-Reduktionsmittel	75
8.1	Einleitung	75
8.2	Methoden	76
8.3	Ergebnisse und Diskussion	78
8.4	Zusammenfassung	83
8.5	Literatur	83
9	Erste full-scale Anwendung der Nano-Eisen Sanierungstechnologie in Deutschland - Projektplanung und Durchführung	85
9.1	Hintergrundinformation zum Projekt	85
9.2	Das Nano-Eisen Sanierungsverfahren	86
9.3	Die Verfahrensauslegung	86
9.4	Die Injektionstechnik	87
9.5	Die Injektionsanlage	87
9.6	Ausblick	89
10	Neue Messtechniken: Der lange Weg in den Markt	90
10.1	Einleitung	90
10.2	Verschiedene Sichten bei der Geräteentwicklung	90
10.2.1	Entwicklungsschritte	90
10.2.2	Sichtweisen der Beteiligten	91
10.3	Positive Beispiele	92
10.3.1	Faseroptisches Fluorometer	92
10.3.2	Thermoflow - System	94
10.4	Fazit	96
11	Innovative Mess- und Probennahmetechnik	97
11.1	Einleitung	97
11.2	Direct-Push Technologien	97
11.2.1	Sensorsonden in der Direct-Push Technologie:	98
11.2.2	Grundwasserprobennahmesysteme in der Direct-Push Technologie:	99
11.3	Tiefenorientierte Probennahmetechnologien	99

11.3.1 Tiefenorientierte Probennahme in bestehenden Brunnen:	100
11.3.2 Tiefenorientierte Probennahme in neuen Brunnen:	102
11.4 Passive Probennahmetechnologien	103
11.4.1 PDB (Polyethylen-Diffusions-Beutel) Sammler:	104
11.4.2 Keramik-Dosimeter:	104
11.5 Perspektiven für den zukünftigen Einsatz von Passivsammlern	106

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1: Die Entwicklung der Flächeninanspruchnahme seit dem Jahr 2000 in Baden-Württemberg	1
Abb. 1.2: Forschungsprojekte aus der Arbeitsgruppe FIGURA, die im Rahmen von BWPLUS gefördert wurden	4
Abb. 2.1: Arbeitsprogramm des Vorhabens KMU entwickeln KMF	15
Abb. 2.2: Einfahrt zur ehemaligen Firma Gebr. Schoch Hartchrom GmbH.....	16
Abb. 2.3: Schrägaufnahme des EnBW-Areals in Stuttgart-Stöckach.....	17
Abb. 2.4: Schrägaufnahme des Stephan-Areals in Stuttgart Bad Cannstatt.....	17
Abb. 3.1: Anforderungen an Reserveflächen	23
Abb. 3.2: Verpflichtungsgefüge des Inanspruchnahmerisikos für Reserveflächen	24
Abb. 4.1: Konzentrationsverteilung NSO-HET vor Zugabe von H_2O_2	32
Abb. 4.2: Wirkungsweise des GZB und Anlagencontainer auf dem Testfeld.....	33
Abb. 4.3: numerische Simulation des GZB nach Umstellung des hydraulischen Systems.....	35
Abb. 4.4: Entwicklung des Sauerstoffgehalts im Nahbereich des GZB.....	36
Abb. 4.5: Entwicklung der NSO-HET Konzentrationen bei Zugabe H_2O_2	36
Abb. 5.1: Aufbau eines kleinskaligen Sanierungsexperiments (links),	44
Abb. 5.2: Aufsicht und Schnitt durch einen VEGAS-Großbehälter	45
Abb. 5.3: Temperatursausbreitung (links) und Schadstoffverteilung (rechts) beim Sanierungsexperiment (© Yang)	47
Abb. 5.4: Zeitlicher Verlauf der Summenkurve des Schadstoffaustrags (oben) und der Schadstofffracht (unten)	48
Abb. 5.5: Stationäre Temperaturverteilung bei unterschiedlichen Randbedingungen im Mittelpunkt zwischen den HE (Profil j) und 0,5 m	49
Abb. 5.6: Zusammenhang zw. stationärer Temperaturverteilung und Grundwasserzustrom im Mittelpunkt zwischen den HE (Profil j),	49
Abb. 6.1: Bohrprofil und Brunnenausbau Injektionsbrunnen I3.....	53
Abb. 6.2: Prinzipskizze DLI & THERIS, Standort Zeitz	54
Abb. 6.3: Lageplan des Pilotierungsfeldes.....	56
Abb. 6.4: MOSAM (oben) und Ausstattung Sanierungsfeld.....	57
Abb. 6.5: Verlauf Benzolkonzentrationen und Massenbilanz Phase 1 - 3.1	60
Abb. 6.6: Erwärmung des Sanierungsfelds und Energieeinsatz	61
Abb. 6.7: Dampfausbreitung 24 h und 6 Tage nach Start Injektion in I1u.....	61
Abb. 7.1: Versuchsaufbau des 2D-Küvettenexperiments	65
Abb. 7.2: Ausbreitung einer Nano-Eisen-Suspension und eines konservativen Tracers	65
Abb. 7.3: Vergleich der Reaktivität von dispergierten (+) und unbehandelten (x) Kolloiden	67
Abb. 7.4: Aufbau der Messeinrichtung	68
Abb. 7.5: Retardation beim Transport von Nano-Eisen	69

Abb. 7.6: Einfluss der Injektionskonzentration auf die Transportentfernung	70
Abb. 7.7: Einfluss der Korngrößenverteilung auf die Transportentfernung	70
Abb. 7.8: Einfluss der Injektionsgeschwindigkeit auf die Transportentfernung	71
Abb. 7.9: Skizze des geplanten Großversuchs	72
Abb. 7.10: Heterogener Versuchsaufbau Großversuch	73
Abb. 8.1: Mobilität von Carbo-Iron beim Durchfließen von Aquifermaterial (0,25 - 1 mm).....	79
Abb. 8.2: Transmissionselektronenmikroskopische Aufnahme von Carbo-Iron (20 Ma-% Fe ⁰)	79
Abb. 8.3: Thermogramm der Reduktion von mit Eisen(III)nitrat imprägnierter Aktivkohle im H ₂ -Strom	80
Abb. 8.4: Beobachtete Reaktionskinetik für die Dechlorierung von TCE zu Ethan + Ethen mit verschiedenen Carbo-Iron-Konzentrationen (20 Ma % Fe ⁰).....	81
Abb. 8.5: Mikroskopische Aufnahme der Phasengrenze zwischen einer Chloroformphase und Carbo-Iron in Leitungswasser (ungeschüttelt)	82
Abb. 9.1: Dominierender Abbauweg des PCE zu Ethen	86
Abb. 9.2: Manschettenrohr-Verfahren für die Injektion	87
Abb. 9.3: Injektionsgut.....	88
Abb. 9.4: Membranpumpen.....	88
Abb. 10.1: Schritte bei der Geräteentwicklung	91
Abb. 10.2: Handlungsgrundsätze der Beteiligten	92
Abb. 10.3: Aufbau des faseroptischen Fluorometers	93
Abb. 10.4: Faseroptisches Fluorometer als kommerziell erhältliches System	94
Abb. 10.5: Erster Testaufbau der Winde zum Ablassen der Sonde im Feldeinsatz.....	94
Abb. 10.6: Entwicklungsstadien der Thermoflow - Sonde.....	95
Abb. 10.7: Entwicklungsstadien der Winde.....	95
Abb. 10.8: Komplette Messanordnung im Feldeinsatz.....	96
Abb. 11.1: Prinzipdarstellung der Direct-Push-Technologien mit in-situ Messungen vor Ort und der Möglichkeit einer gezielten Probennahme.....	98
Abb. 11.2: Direct-Push Erkundung auf einem 120m langen Profil; Sondierung alle 20m:	99
Abb. 11.3: Scheibenpacker- (links) und Schlauchpackersysteme	100
Abb. 11.4: Scheiben-Packersystem: Ergebnisse	101
Abb. 11.5: Vergleich: Doppel-, Scheiben- und Schlauchpacker	101
Abb. 11.6: Continuous Multichannel Tubing System	102
Abb. 11.7: Ergebnisvergleich einer tiefenorientierten Beprobung und einer Passiven Beprobung mit PDB-Sammlern	104
Abb. 11.8: Ergebnis Keramik-Dosimeter: 4-monatiger Feldversuch	105
Abb. 11.9: Ergebnis Keramik-Dosimeter: 3-monatiger Feldversuch	105

Tabellenverzeichnis

Tab. 1.1: Von der Arbeitsgruppe FIGURA identifizierte Probleme	3
Tab. 4.1: Kostenschätzung der ENA-Maßnahme „Testfeld Süd“	38
Tab. 11.1: Auswahl kommerziell erhältlicher Passivsampler	103

1 Flächen managen und recyceln - praxisorientierte Forschung bei VEGAS

Volker Schrenk, VEGAS, Universität Stuttgart

1.1 Einleitung

Nach wie vor ein bedeutendes Umweltproblem ist die anhaltend hohe Inanspruchnahme von hauptsächlich landwirtschaftlicher Fläche und deren Umnutzung in Siedlungs- und Verkehrsflächen - der Flächenverbrauch. Mit 114 ha/Tag (STATISTISCHES BUNDESAMT 2006) bewegt sich die Flächeninanspruchnahme weiterhin auf einem hohen Niveau. Dies zeigt sich auch in Baden-Württemberg. Hier stieg die Flächeninanspruchnahme auf 9,4 ha/Tag (UM BW 2007), während sie in den Jahren davor rückläufig war (Abb. 1.1).

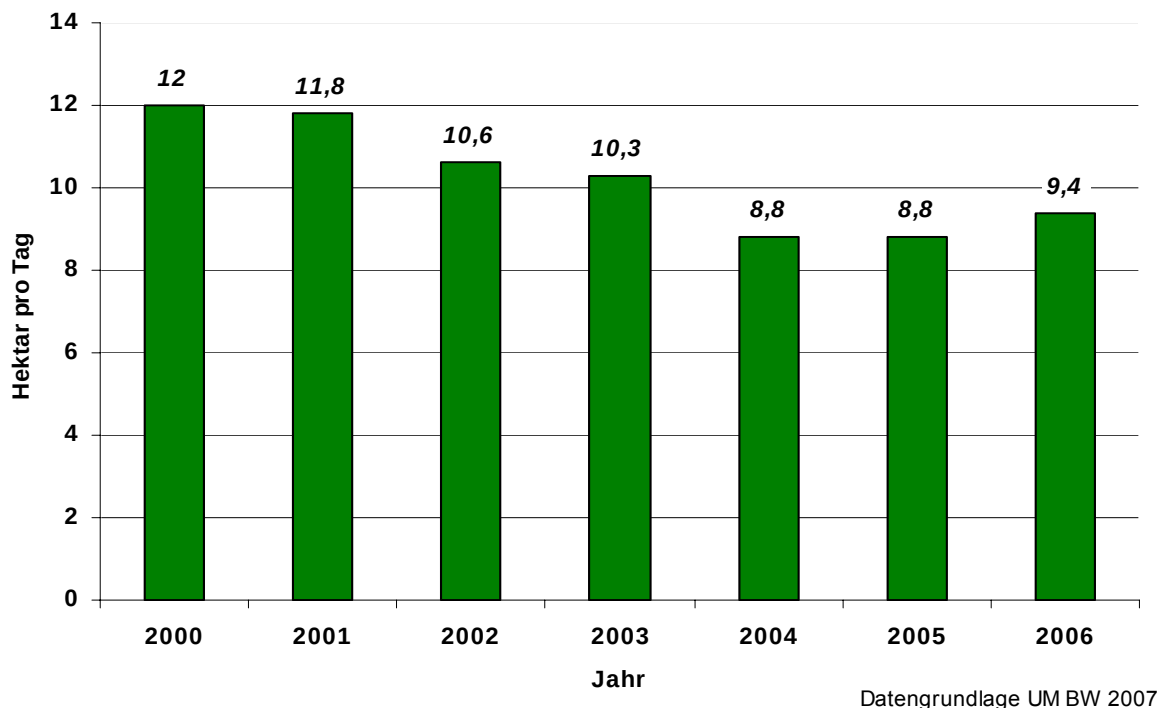


Abb. 1.1: Die Entwicklung der Flächeninanspruchnahme seit dem Jahr 2000 in Baden-Württemberg

Die Zahlen zeigen deutlich, dass man vom Ziel der Reduzierung der Flächeninanspruchnahme auf 30 ha/Tag bis 2020 auf Bundesebene (RfNE 2004) oder gar einem Nullwachstum in Baden-Württemberg noch weit entfernt ist. Für das Land Baden-Württemberg formulierte Ministerpräsident Oettinger in seiner Regierungserklärung am 21. Juni 2006 noch ein anspruchsvolleres Ziel im Vergleich zum 30-ha-Ziel:

„Mein konkretes Ziel lautet: Wenn Baden-Württemberg im nächsten Jahrzehnt keinen Einwohnerzuwachs mehr haben wird – bei uns wird die Zahl der Einwohner noch etwa 10 bis 15 Jahre steigen und dann stagnieren –, dann muss auch das Ziel der Politik die „Nettonull“ beim Flächenverbrauch sein. Wenn das Wachstum der Einwohnerzahl zu Ende geht, muss auch die Fläche, die wir haben, für alle gewerblichen und Wohnungsflächen in Baden-Württemberg ausreichend sein.“ (LANDTAG VON BADEN-WÜRTTEMBERG 2006)

Die Entwicklung von Werkzeugen und Empfehlungen zur Verminderung der Flächeninanspruchnahme ist einer der Forschungsschwerpunkte von VEGAS.

Der vorliegende Beitrag stellt die in den vergangenen Jahren bei VEGAS im Themenfeld Flächenmanagement abgeschlossenen Forschungsvorhaben, aber auch die laufenden Aktivitäten vor und lenkt noch einmal den Fokus auf die wichtigsten Erkenntnisse.

1.2 Aktivitäten von VEGAS im Bereich Flächenrecycling und Flächenmanagement

1.2.1 Arbeitsgruppe FIGURA und BWPLUS

Das Thema Flächenrecycling beschäftigt VEGAS seit fast einem Jahrzehnt. Gegen Ende der 1990er Jahre ist im Zusammenhang mit der Altlastenbearbeitung zunehmend das Thema Flächenrecycling in den Blickpunkt gerückt. Bei der Revitalisierung von brachgefallenen Militär-, Gewerbe- und Industrieflächen waren in vielen Fällen Sanierungen von Untergrundkontaminationen erforderlich. Dies war mit einer der Gründe, weshalb sich VEGAS diesem Thema widmete und schnell eine Vorreiterrolle übernahm.

Konsequent begann die Beschäftigung mit dem Thema durch die Gründung der interdisziplinären Arbeitsgruppe FIGURA (Flächenrecycling, Industriebrachen, Grundwasserschutz - Umweltgerechte Revitalisierung von Altstandorten), die auf Initiative von PD Dr.-Ing. B. Barczewski und des jetzigen Staatssekretärs im Wirtschaftsministerium in Thüringen Prof. Dr. C. C. Juckenack zurück ging. FIGURA war zum damaligen Zeitpunkt als eine in Deutschland einzigartige Gruppe zu bewerten: Nahezu alle bei Flächenrecyclingvorhaben relevanten Akteure (u. a. Grundstücksbesitzer, Kommunen, Investoren, Ingenieurbüros, Umweltverwaltung) in Baden-Württemberg trafen sich regelmäßig zu Diskussionen und einem fachlichen Austausch (JUCKENACK et al. 1999). Auf Grundlage einer umfangreichen Problemanalyse erfolgte durch Mitglieder der Arbeitsgruppe die Beantragung von praxisorientierten Forschungsvorhaben im Landesforschungsprogramm BWPLUS (Baden-Württembergisches Programm Lebensgrundlage Umwelt und deren Sicherung). Die damals identifizierten Probleme und Lösungsansätze sind in Tab. 1.1 dargestellt.

Tab. 1.1: Von der Arbeitsgruppe FIGURA identifizierte Probleme und Optimierungsansätze beim Flächenrecycling (vgl. SCHRENK 1999)

Themenfelder	Probleme	Optimierungsansätze
Standortkriterien Bewertung	▣ Wertminderung durch Schadstoffe ▣ Wertermittlung ohne Folgenutzung ▣ subjektive Kriterien (Standortimage)	○ Strategien zur Wertermittlung, Berücksichtigung der Folgenutzung ○ optimierter Datenbestand für Leitplanung
Baureifmachung (Altlasten - Abfälle - Rückbau)	▣ Altlastenerkundung und -behandlung ▣ Risikopotenzial Restbelastungen, Folgenutzung	○ Defizitanalyse bisheriges Vorgehen ○ folgenutzungsbezogene Maßnahmen ○ zeit- / kostenoptimierte Erkundung, Bewertung
Denkmalschutz	▣ behördliche Vorgaben ▣ Nutzungsbeschränkungen	○ vereinfachter rechtlicher Rahmen
Rechtslage Haftungsfragen	▣ unklare Rechts- und Haftungslage ▣ Vertragsgestaltung bei Eigentümerwechsel	○ erhöhte Rechts-, Haftungssicherheit ○ Versicherungsschutz ○ juristische Grundlagen, z. B. Vertragsmuster
Kostenfrage	▣ mögliche Folgekosten ▣ fehlende Fördermodelle	○ Förderhilfen, Finanzierungsmodelle
Planung Genehmigung	▣ Planungsunsicherheit ▣ Vielzahl von Verordnungen und Behörden	○ vereinfachtes Genehmigungsrecht ○ flexible Rahmenplanung ○ verbindliche Schadstoffgrenzwerte
Projektentwicklung Organigramm	▣ uneinheitliche Vorgehensweise ▣ Vielzahl beteiligter Institutionen/Personen ▣ Bearbeitungsdauer	○ Landesentwicklungsgesellschaften ○ dezentrale Entwicklungsgesellschaften
Kommunikation	▣ unzureichende Kommunikation der Projektbeteiligten	○ Beratungsgremium, Lotsenteam ○ allg. verbesserter Dialog Stadt - Umland
Vermarktung	▣ „Image“ der Fläche ▣ limit. innerst. Entwicklungsmöglichkeiten	○ neue Medien (GIS, Internet)

Es wird bei dieser Zusammenstellung der Probleme und möglicher Optimierungsansätze deutlich, dass die wenigsten Probleme die Fragen der Altlastenerkundung und -sanierung betrafen. Vielmehr waren die offenen Fragestellungen eher im administrativen und planerischen Bereich angesiedelt. Die Konsequenz für VEGAS war, dass sich die Versuchseinrichtung nun mit Themen des Flächenrecyclings beschäftigte, die nichts mehr mit der reinen Altlastensanierung bzw. Entwicklung von Sanierungstechnologien zu tun hatten. Dies spiegelt aber durchaus nur die Entwicklung in der Altlastenbranche wider, die weg von der reinen Altlastenbearbeitung hin zur Baureifmachung und Standortentwicklung geht.

Mit dem Landesforschungsprogramm BWPLUS und dessen Schwerpunkt „Flächenressourcenmanagement in Ballungsräumen“ hatte das Land Baden-Württemberg bundesweit eine Vorreiterrolle übernommen, Instrumente zur Verbesserung des Flächenrecyclings zu erarbeiten. Die über FIGURA eingebrachten und von BWPLUS geförderten Vorhaben zeichneten sich allesamt durch einen großen Praxisbezug aus. Eine Übersicht dieser Vorhaben zeigt Abb. 1.2. Die Ergebnisse der Vorhaben sind auf der Homepage von BWPLUS (<http://www.bwplus.fzk.de>) dokumentiert.



Abb. 1.2: Forschungsprojekte aus der Arbeitsgruppe FIGURA, die im Rahmen von BWPLUS gefördert wurden

Die aktive Arbeit von FIGURA bestand bis 2004. Die Arbeitsgruppe FIGURA hatte zu ihren bedeutendsten Zeiten mehr als siebzig verschiedene Institutionen auf Ihrem Verteiler und war ein interdisziplinäres Netzwerk, das weit über Baden-Württemberg hinaus reichte.

VEGAS hatte im Rahmen seines BWPLUS-Vorhabens „Entwicklung einer EDV-gestützten Bewertungs-Matrix und Datenbank zur Ableitung übertragbarer Kriterien für ein systematisiertes Flächenrecycling in Baden-Württemberg“ die vorhandenen Erfahrungen von kommunaler Seite in Baden-Württemberg zusammengetragen und ausgewertet. Als Ergebnis entstand eine umfassende Datenbank, die sich in die folgenden Teile gliedert:

- Teil I:** Informationen zu flächenrelevanten Rahmenbedingungen sowie zu ca. 50 konkreten Fallbeispielen - davon acht sehr detailliert recherchiert. Ergebnisse einer postalischen Umfrage bei weiteren Kommunen sowie Expertengespräche.
- Teil II:** Analysewerkzeuge zum benutzerspezifischen Suchen bzw. Filtern der Daten aus Teil I (Schlagwortsuche), Bewertungen zu den Daten sowie ein umfassendes Flächenrecycling-Lexikon.
- Teil III:** Praxisrelevante Werkzeuge für künftige Flächenrecyclingprojekte: Individuell generierbare To-Do-Listen (Merklisten), Archivierungs-Datenbanken (für Dokumentationen, Abschlussberichte, Kataster), eine Referenzprojekt-Suchmaschine (nach "passenden" Projekten aus Teil I) sowie eine Zusammenstel-

lung potenzieller, allgemeingültiger Kriterien/ Maßnahmenbausteine des Flächenrecyclings.

Die Auswertung der in den Kommunen gemachten Erfahrungen führte zu umfangreichen Empfehlungen im Hinblick auf ein kommunales Flächenmanagement. Darüber hinaus wurden im Rahmen des Vorhabens auch sieben ausgewählte Flächenrecyclingprojekte hinsichtlich der durch die Maßnahmen der Altlastensanierung und z. T. des Gebäuderückbaus verursachten Umweltauswirkungen bilanziert. Die gängige Praxis des Auskofferns und des Abtransports von kontaminiertem Material bei diesen Projekten zeigt sich in deutlichen Umweltauswirkungen durch die Vielzahl von Transporten. Auf Basis der Ergebnisse sind Handlungsempfehlungen für eine umweltoptimierte Sanierung formuliert worden (SCHRENK & SCHLICHER 2004).

Die praxisorientierte Forschung im Bereich Flächeninanspruchnahme hat schnell gezeigt, dass nicht nur das Thema Flächenrecycling von Bedeutung ist, sondern dass ein größerer Ansatz - das Flächenmanagement - zu betrachten ist.

Im weiteren Verlauf der Entwicklungen hat das Land Baden-Württemberg mit einem eigenen umweltpolitischen Schwerpunkt „Flächenressourcen-Management“ verschiedene Strategien und Empfehlungen im Hinblick auf eine Reduzierung der Flächeninanspruchnahme und eine Stärkung der Innenentwicklung erarbeitet (GLOGER & LEHLE 2002).

1.2.2 Öffentlichkeitsarbeit und Arbeitsgruppen

Mit den Aktivitäten im Bereich Flächenmanagement war eine intensive Öffentlichkeitsarbeit verbunden, die dazu führte, dass das Problem der hohen Flächeninanspruchnahme zunehmend in Fachkreisen wahrgenommen wurde. Die Aktivitäten von VEGAS, die neben der Bearbeitung von Forschungsvorhaben in großem Umfang auch in der Teilnahme an verschiedenen Arbeitsgruppen bestand, und damit einen engen Kontakt zu Ingenieurbüros, Verbänden und Behörden bedeutete, weiteten sich in den folgenden Jahren vom Land zum Bund hin auf. Zu nennen ist u.a. die „Initiative Umweltoptimierung“ des Umweltbundesamtes, deren Ergebnisse in den Förderschwerpunkt REFINA des Bundes eingeflossen sind (UMWELTBUNDESAMT 2005).

1.2.3 Deutsch-amerikanische Zusammenarbeit

VEGAS übernahm eine wesentliche Rolle bei der Phase III der deutsch-amerikanischen Zusammenarbeit zwischen der US-EPA und dem BMBF. Ziel der Phase III „Nachhaltige Flächenrevitalisierung“ (2001-2006) war der intensive Erfahrungsaustausch mit den amerikanischen Projektpartnern und die Erarbeitung einer Arbeitshilfe zur Erstellung von Start-Up-Plänen für Brachflächen. Ein Start-Up-Plan für Brachflächen stellt eine Art Status-quo-Bericht über die für eine Fläche vorhandenen planerischen, ökonomischen, sozialen und umweltorientierten Informationen dar. Der Plan

führt die bereits erarbeiteten Erkenntnisse in kompakter Form zusammen, präsentiert die möglichen Entwicklungsideen und zeigt die nächsten Bewertungsschritte auf. Im Endprodukt werden auf in der Regel weniger als 20 Seiten alle wichtigen Informationen zu einer Fläche präsentiert.

Im Rahmen der Phase III wurde die erstellte Arbeitshilfe bereits an mehreren Standorten durch Ingenieurbüros getestet und entsprechend der Erfahrungen bei der Erstellung der Start-Up-Pläne verbessert. Bei diesem Test wurde die Arbeitshilfe von den ausführenden Büros grundsätzlich als sehr positiv bewertet. Das Produkt „Start-Up-Plan“ wird mittlerweile von verschiedenen Ingenieurbüros angeboten, was wiederum für die Marktängigkeit des Start-Up-Plans spricht.

Die auf deutscher und amerikanischer Seite durchgeführten Workshops haben deutlich gemacht, dass sich der Umgang mit Brachflächen in den USA von dem in Deutschland unterscheidet. Insgesamt betrachtet besteht in den USA, insbesondere bei den ökonomischen Möglichkeiten, eine hohe Flexibilität der Kommunen beim Einsatz von steuerlichen Anreizen für eine Branchenreaktivierung und der Vergabe von Krediten. Die dort vorhandenen Instrumente können Impulse für neue Instrumente in Deutschland sein. In den USA sind auf kommunaler Ebene eine ganze Reihe von Möglichkeiten vorhanden, über das Steuersystem die Wiedernutzung von Brachflächen zu fördern. Darüber hinaus stehen Fördermittel zur finanziellen Unterstützung von Maßnahmen zur Verfügung. Auch gibt es Fonds durch die Wirtschaft: Ein Beispiel stellt der *Dry Cleaners Fund* dar: In einigen Bundesstaaten wird für die Reinigung von Kleidungsstücken eine Sonderabgabe erhoben. Das eingenommene Geld kommt einem Fund zugute, mit dem kontaminierte Grundstücke saniert werden (SCHRENK & FERBER 2005).

Alle Workshops und die Abschlusskonferenz in Berlin sind ausführlich in der Schriftenreihe des Deutschen Instituts für Urbanistik (difu) dokumentiert (vgl. <http://www.difu.de/publikationen>).

1.2.4 Wissenstransfer und REFINA

Ein grundsätzliches, bei Forschungsvorhaben bestehendes Problem, ist der in vielen Fällen kaum vorhandene Transfer von Ergebnissen in die praktische Anwendung. Viele Ergebnisse aus universitärer Forschung erreichen nicht den Nutzer. Ursachen dafür sind die häufig fehlende Implementierung der Ergebnisse durch einen entsprechenden Wissenstransfer, aber auch die Darstellungsform der Ergebnisse eines Vorhabens: Die einfache Veröffentlichung eines Abschlussberichtes, der möglicherweise mehrere 100 Seiten umfasst, reicht bei weitem nicht aus, damit es zu einer Anwendung von Ergebnissen in der Praxis kommt. Befragungen in Kommunen haben gezeigt, dass ein Großteil vorhandener Empfehlungen gänzlich unbekannt und höchstens in Fachkreisen bekannt sind (SCHRENK & SCHLICHER 2004). Hinzu kommt, dass im Bereich Flächenmanagement eine große Anzahl unterschiedlicher Akteure engagiert sind, die aus ver-

schiedenen Fachdisziplinen kommen, in verschiedenen Arbeitsgebieten tätig sind und unterschiedlich angesprochen werden wollen.

Einen Beitrag zur Verbreitung von Ergebnissen in der Praxis stellt die Datenbank „Flächenmanagement“ dar. Im Rahmen eines BMBF-Vorhabens hat VEGAS Publikationen zum Flächenmanagement/Flächenrecycling gesammelt, ausgewertet und in einer Datenbank (<http://www.flaecheninfo.de>) im Internet verfügbar gemacht. Die Recherchen haben gezeigt, dass in Deutschland eine große Anzahl von Handlungsempfehlungen, Studien und Berichten zum Themenkomplex Flächenmanagement und Flächenrecycling veröffentlicht sind. Für die Überführung in die Datenbank [flaecheninfo.de](http://www.flaecheninfo.de) wurden die Veröffentlichungen auf wenigen Seiten zusammengefasst, die wesentlichen Handlungsempfehlungen herausgearbeitet und eine nähere Charakterisierung der Veröffentlichungen im Hinblick auf die behandelten Themenbereiche und die Zielgruppen durchgeführt. Über Suchfunktionen ist eine gezielte Recherche nach Literatur unter verschiedenen Kriterien in der Datenbank möglich.

Im Zuge der Literaturzusammenstellung wurden mehr als 140 verschiedene Veröffentlichungen zum Flächenmanagement recherchiert. Die vorhandenen Arbeiten decken nahezu alle Themen des Flächenmanagements ab. Behandelte Themen sind u. a. Bodenentsiegelung, Gebäuderückbau, Finanzierung, Brachflächenkataster, Konversion von Militärbrachen und die Dokumentation von Projektbeispielen. Zahlreiche Publikationen sind oftmals im Auftrag verschiedener Ministerien bzw. Landesbehörden entstanden und stehen im Internet zum Download bereit. Auffallend ist, dass die Zahl der Veröffentlichungen mit wirklich verwertbaren, praxisorientierten Empfehlungen begrenzt ist. Grundsätzlich ist eine Einteilung der Publikationen in Motivationsbroschüren (die für das Thema Interesse wecken sollen), Berichte (Dokumentation von Forschungsvorhaben) und Arbeitshilfen / Handlungsempfehlungen möglich (SCHRENK & SAMTLEBEN 2005).

Bei der Erstellung der Datenbank wurde die Voraussetzung geschaffen, dass Autoren ihre neuen Publikationen selbst in die Datenbank eintragen können. Leider wird diese Funktion nur in seltenen Fällen genutzt. Dies hat zur Konsequenz, dass die Datenbank nicht mehr den aktuellen Stand hat, der eigentlich erforderlich wäre. Hinzu kommen die vielfältigen, aktuellen Forschungsaktivitäten zum Thema Flächenmanagement: Als Ergebnis werden zahlreiche neue Publikationen entstehen und auf den Markt gelangen.

Der kaum vorhandene Transfer von Ergebnissen in die Praxis war letztlich einer der Gründe für das Vorhaben „WissTrans: Wissenstransfer durch innovative Fortbildungskonzepte beim Flächenrecycling/Flächenmanagement“, das VEGAS zusammen mit dem Geographischen Institut der Ruhr-Universität Bochum erfolgreich beim BMBF im Programm REFINA und dem Umweltministerium Baden-Württemberg beantragt hat. Ziel des Vorhabens ist die Entwicklung von praxisorientierten Fortbildungsmodulen im Bereich Flächenmanagement und speziell dem Flächenrecycling. Diese Fortbildungen

sollen einerseits konventionell in Form von Seminaren oder Workshops stattfinden, andererseits werden auch sogenannte E-Learning-Module entwickelt, die eine Fortbildung via Internet am Arbeitsplatz-PC ermöglicht (FRANZ et al. 2007). Innerhalb des Projektes werden für die auch finanziell beteiligten Bundesländer Baden-Württemberg, Nordrhein-Westfalen und voraussichtlich Sachsen für die Fortbildung relevante Themenfelder identifiziert und entsprechende Veranstaltungskonzepte entwickelt. Das im Sommer 2007 gestartete Projekt beginnt mit einer detaillierten Angebots- und Bedarfsanalyse zum Thema Fortbildung beim Flächenmanagement / Flächenrecycling, um basierend auf diesen Erkenntnissen die Weiterbildungsmodule zu entwickeln. Die ersten Fortbildungsveranstaltungen werden ab 2008 durchgeführt werden.

Neben diesem Vorhaben werden von VEGAS noch zwei weitere im Rahmen von REFINA geförderte Projekte bearbeitet, die den unterschiedlichen Randbedingungen beim Flächenmanagement in den neuen und den alten Bundesländern Rechnung tragen.

Bei dem in Stuttgart angesiedelten Vorhaben „KMU entwickeln KMF - Kleine und mittlere Unternehmen entwickeln kleine und mittlere Flächen“ steht die Entwicklung anwendungsorientierter Werkzeuge im Mittelpunkt, mit denen die Nutzung von innerstädtischen Brachflächen < 5 ha Größe verbessert werden kann. Hierzu werden insbesondere Strategien und Werkzeuge einerseits für die Kommunen und andererseits für kleine und mittlere Unternehmen entwickelt, für die der Bereich der Flächenrevitalisierung ein zunehmendes Betätigungsfeld werden kann. Maßnahmen zur Nutzung der KMF-Potenziale sind besonders in Gebieten mit großer Flächennachfrage von Bedeutung. An diesem Vorhaben sind neben VEGAS und der Landeshauptstadt Stuttgart, die Hochschule Biberach und mehrere Ingenieurbüros beteiligt. Ausführliche Informationen finden sich im Beitrag von KIRCHHOLTES in diesem Band und auf der Projekthomepage <http://www.kmu-kmf.de>.

Eine gänzlich andere Richtung verfolgt das Vorhaben „KOSAR - Kostenoptimierte Sanierung und Aufbereitung von Reserveflächen“. Dieses Projekt hat zum Ziel, aktuell nicht mehr marktgängige, brach gefallene Grundstücke so aufzubereiten, dass von ihnen keine Umweltgefährdung ausgeht, sie keinen Schandfleck darstellen und die Unterhaltungskosten möglichst niedrig sind. Hinzu kommt, dass diese Flächen einem potenziellen Investor möglichst schnell wieder zur Verfügung stehen sollen. Eine große Anzahl solcher Flächen finden sich in den neuen Bundesländern. Spezielle Ziele von VEGAS und seinem Auftragnehmer reconsite - TTI GmbH sind bei diesem Vorhaben die Evaluierung von geeigneten, kosteneffizienten Verfahren („low-cost-Verfahren“) zur Sanierung und Sicherung dieser nicht marktfähigen Brachflächen sowie die Erstellung eines Katalogs von kostengünstigen Pflege- und Unterhaltungskonzepten für Reserveflächen. Dabei sollen Konzepte zur Refinanzierung des Pflegeaufwands, beispielsweise durch die Gewinnung von Biomasse für die Energieerzeugung, berücksichtigt werden. Im Rahmen des Vorhabens werden auch die grundsätzlichen Einsatzmöglichkeiten von Phytoremediation zur Sanierung von kontaminierten Standorten anhand einer

Auswertung publizierter Beispiele untersucht. Die Ergebnisse der Untersuchungen und Empfehlungen sollen exemplarisch an einer konkreten Untersuchungsfläche in Sachsen auf ihre Praxistauglichkeit hin überprüft werden. REDLICH stellt das Projekt ausführlich in diesem Band dar. Die Projekthomepage findet sich unter <http://www.refina-kosar.de>.

1.3 Flächenrecycling und Altlastensanierung

Die Frage der Altlastensanierung bei Flächenrecyclingvorhaben spielt aktuell in den Forschungsaktivitäten im Zusammenhang mit dem Thema „Flächenmanagement/Flächenrecycling“ kaum eine Rolle: In der Praxis wird bei vielen Projekten nach wie vor kontaminiertes Material ausgekoffert und entsorgt. In-situ-Sanierungsverfahren kommen in den wenigsten Fällen zum Einsatz. Ein verstärkter Einsatz von Alternativen zu Auskoffern und Entsorgen wird in Deutschland voraussichtlich erst stattfinden, wenn der heute bevorzugte Entsorgungsweg einer deponietechnischen Verwertung bzw. Beseitigung nicht mehr gegeben ist. Dies zeigt die aktuelle Situation in Großbritannien, wo die Landfill Directive eine Schließung zahlreicher Deponien bewirkte. Dies hatte zur Konsequenz, dass nur noch wenige Deponien zur Verfügung stehen und die Deponiegebühren entsprechend gestiegen sind. Als Folge dieser Entwicklungen kommen in Großbritannien mittlerweile eine große Anzahl unterschiedlicher Sanierungsverfahren zum Einsatz.

Grundsätzlich müssten für einen Einsatz von Alternativen zu Auskoffern und Entsorgen Sanierungsverfahren kosteneffizient sein. Das heißt sie müssen hinsichtlich Kosten und Leistung zu den Standardverfahren mindestens gleichwertig, besser und günstiger als diese sein. Die Verfahren sollten das Sanierungsziel in gut kalkulierbaren Zeiträumen sicher erreichen können, damit sie mit einer hinreichenden Sicherheit in Bauzeitenpläne integriert und Schnittstellen zu nachfolgenden Gewerken gut definiert werden können. In der Regel werden daher bei Flächenrecyclingprojekten vornehmlich Sanierungszeiten im Bereich von Wochen bis wenigen Monaten von Interesse sein (SCHRENK et al. 2007).

1.4 Ausblick

In den vergangenen Jahren hat VEGAS erfolgreich Landes- und Bundesvorhaben zum Flächenmanagement bearbeitet und seinen Beitrag zur Reduzierung der Flächeninanspruchnahme geleistet. Die aktuell bearbeiteten REFINA-Vorhaben basieren vielfach auf den bisher gewonnenen Erkenntnissen und werden nochmals deutliche Impulse und Hilfestellungen für die Praxis bieten.

Grundsätzlich gilt es die Ergebnisse der Vorhaben durch eine intensive Öffentlichkeitsarbeit und Weiterbildung zur Anwendung in die Praxis zu bringen. Dabei ist der Unterschied zwischen Forschung und Anwendung fließend. Einen deutlichen Beitrag bei der

Anwendung neuer Erkenntnisse in der Praxis wird sicherlich die VEGAS-Ausgründung reconsite - TTI GmbH leisten, durch die es möglich wird, neue Werkzeuge beim Flächenmanagement rasch zu einer praktischen Anwendung und Umsetzung zu führen.

Noch wichtiger wird zukünftig die Information und Aufklärung der breiten Öffentlichkeit und politischen Entscheidungsträger in den Kommunen zum Thema Flächeninanspruchnahme sowie deren Umwelt- und Kostenfolgen, werden. Wenn hier das Problem erkannt ist, werden viele Forschungsaktivitäten überflüssig.

1.5 Danksagung

Wir danken dem Land Baden-Württemberg und der Bundesministerium für Bildung und Forschung für die Förderung der Projekte im Bereich Flächenmanagement bei VEGAS.

1.6 Literatur

FRANZ, M., OKUNIEK, N., BUTZIN, B., SAMTLEBEN, J., SCHUG, B., BRAUN, J. & SCHRENK, V. (2007): E-learning for the dissemination of research results. S. 621 - 628. In: BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG (Hrsg.): 2nd International Conference on Managing Urban Land. Towards more effective and sustainable brownfield revitalisation policies. Saxonia, ISBN 978-3-934409-33-4; ISBN 0-9547474-4-5 Freiburg.

GLOGER, S. & LEHLE, M. (2002): Flächenressourcen-Management - ein umweltpolitischer Schwerpunkt im Land Baden-Württemberg. - altlasten spektum 1/2002, S. 14 - 19.

JUCKENACK, CH. C., BARCZEWSKI, B. & SCHRENK, V. (1999): Flächenrecycling und Flächenmanagement in Ballungsräumen. Ein Ansatz zur Strukturierung: der Projektverbund „FIGURA“ in Baden-Württemberg. – TerraTech 5/1999, S. 50 - 53.

LANDTAG VON BADEN-WÜRTTEMBERG (2006): Plenarprotokoll 14 / 4, 4. Sitzung am 21.06.2006, 14. Wahlperiode. http://www2.landtag-bw.de/wp14/plp/14_0004_21062006.pdf (09.08.2007).

RfNE - RAT FÜR NACHHALTIGE ENTWICKLUNG (2004): Mehr Wert für die Fläche: Das „Ziel 30-ha“ für die Nachhaltigkeit bei der Entwicklung von Stadt und Land. Entwurf für Empfehlungen des Rates für Nachhaltige Entwicklung zur öffentlichen Diskussion. Stand: 01. April 2004. - http://www.nachhaltigkeitsrat.de/service/download/dialog-flaeche/Empfehlungen_Flaechenpolitik_01-04-04.pdf, 10. Mai 2004.

SCHRENK, V. (1999): Leitthema Boden- und Flächenressourcenmanagement in Ballungsräumen. Vorstudie zum Leitprojekt „Technologieorientierter Projektbeitrag: Industrieflächenrecycling, Flächenmanagement und Grundwasserschutz“. – Wis-

- senschaftlicher Bericht Nr. 99/10 (HG 265), Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart.
- SCHRENK, V. & FERBER, U. (2005): Neue Instrumente für ein nachhaltiges Flächenrecycling in Deutschland und den USA. S. 23 - 34. - In: EGLOFFSTEIN, T., BURKHARDT, G., CZURDA, K. (Hrsg.): Altlasten 2005. Trends und neue Entwicklungen in der Altlastenbearbeitung - Monitored Natural Attenuation als Beispiel für den zukünftigen Umgang mit Altlasten? - ICP Eigenverlag Bauen und Umwelt, Band 10. 2005, ISBN 3 -9806840-7-5, Karlsruhe.
- SCHRENK, V., HIESTER, U., KIRCHHOLTES, H. J. & BÄRLIN, M. (2007): The use of innovative remediation technologies in brownfield redevelopment projects. S. 67 - 77. - In: BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG (Hrsg.): 2nd International Conference on Managing Urban Land. Towards more effective and sustainable brownfield revitalisation policies. Saxonia, ISBN 978-3-934409-33-4; ISBN 0-9547474-4-5 Freiberg.
- SCHRENK, V. & SAMTLEBEN, J. (2006): Zusammenstellung und Auswertung von Forschungs- und Entwicklungsergebnissen aus dem Bereich Flächenrecycling / Flächenmanagement für die Praxis. – Wissenschaftlicher Bericht Nr. 2006/03 (VEG 18), VEGAS - Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart.
- SCHRENK, V. & SCHLICHER, T. (2004): Entwicklung einer EDV-gestützten Bewertungsmatrix und Datenbank zur Ableitung übertragbarer Kriterien für ein systematisiertes Flächenrecycling in Baden-Württemberg. – Wissenschaftlicher Bericht Nr. 02/2004 (VEG 07), VEGAS - Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart.
- STATISTISCHES BUNDESAMT (2006): Zunahme der Siedlungs- und Verkehrsfläche: 114 ha/Tag - Pressemitteilung Nr. 492 vom 23.11.2006. http://www.destatis.de/jetspeed/portal/cms/Sites/destatis/Internet/DE/Presse/pm/2006/11/PD06_492_85,templateId=renderPrint.psmI (27.08.2007)
- UMWELTBUNDESAMT (2005): Workshop Kommunales Flächenressourcenmanagement - Visionen für Politik und Forschung Dokumentation des Fachgespräches der Initiative Flächenoptimierung vom 9. und 10. Februar 2004 im Umweltbundesamt Berlin. <http://www.ecologic.de/download/projekte/1800-1> (21.08.2007)
- UMWELTMINISTERIUM BADEN-WÜRTTEMBERG (2007): Ergänzende Daten zum Flächenverbrauch: http://www.um.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/33045/Flaechenverbrauch_im_Land.pdf?command=downloadContent&filename=Flaechenverbrauch_im_Land.pdf (21.08.2007)

2 Kleine und mittlere Unternehmen entwickeln kleine und mittlere Flächen („KMU entwickeln KMF“)

Hermann Josef Kirchholtes,
Michael Schweiker, Nils Krieger, Regine Zinz, Nicolas Leyva, Sandra Baumholz,
Landeshauptstadt Stuttgart, Amt für Umweltschutz,
Amt für Stadtplanung und Stadterneuerung, Wirtschaftsförderung

2.1 Stadtinnenentwicklung

Angesichts der aktuellen wirtschaftlichen, demografischen und räumlichen Entwicklung wird der städtebaulichen Innenentwicklung in den kommenden Jahren eine wachsende Bedeutung zukommen. Da die Innenentwicklung im Vergleich zur Außenentwicklung wesentlich komplexer und aufwändiger ist, sind Planungsprozesse, Informationsmanagement und Projektsteuerung zu optimieren. Die notwendige bessere Zusammenarbeit zwischen Kommunen und den unterschiedlichen Projektbeteiligten erfordert auf beiden Seiten höhere fachliche und organisatorische Kompetenzen.

Mit dem Flächennutzungsplan FNP Stuttgart 2010 hat die Landeshauptstadt im Jahr 2000 den Willen bekräftigt, bei der künftigen Stadtentwicklung der Innenentwicklung den Vorrang zu geben. Das Motto lautet: „Stuttgart – kompakt, urban und grün“. Um dieses hochgesteckte Ziel zu erreichen, hat die Stadtverwaltung unterschiedliche Lösungsansätze erarbeitet: Die Lokale Agenda steuerte das Zukunftskonzept „Flächenmanagement Stuttgart“ bei, das Amt für Stadtplanung und Stadterneuerung die Informationsplattform „Nachhaltiges Bauflächenmanagement Stuttgart (NBS)“, das Amt für Umweltschutz das „Bodenschutzkonzept Stuttgart (BOKS)“ und die Wirtschaftsförderung das Konzept der „Zukunftsoffensiven“.

Mit ihrer Informationsplattform NBS hat die Landeshauptstadt seit 2003 ihr Bauflächenpotenzial baulicher Brachflächen (d.h. Flächen, die zuvor baulich genutzt waren und einer neuen baulichen Nutzung zugeführt werden sollen) systematisch erfasst. Dabei stellte sich heraus, dass diese Potenziale trotz ständig ausscheidender (da neu bebauter) Flächen nicht abnehmen. Denn im gleichen Umfang fallen andere Flächen brach, es wachsen neue Potenziale nach. Eine weitere Erkenntnis aus dem Betrieb von NBS ist, dass kleine und mittlere Flächen (0,2 bis 5 Hektar) insgesamt 364,8 Hektar, das sind rund 70 % der erfassten Bauflächenpotenziale, ausmachen. [1]

Gerade die kleinen und mittleren Flächen können in vielen Fällen nur mit einem unverhältnismäßig hohen Aufwand entwickelt werden. Kleine und mittlere Unternehmen, für solche Flächenentwicklungen eigentlich prädestiniert, scheitern an dieser Aufgabe. Für große und finanzstarke Investoren hingegen sind solche Flächen uninteressant. Um die

Blockadesituation aufzulösen, konzentriert sich das Verbundvorhaben „KMU entwickeln KMF“ speziell auf die Entwicklung kleiner und mittlerer Flächen durch mittelständische Unternehmen.

2.2 REFINA

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) unterstützt die Reduzierung der Inanspruchnahme von Böden für neue Siedlungs- und Verkehrsflächen durch Vorhaben für eine effiziente Flächennutzung mit dem Förderprogramm "Forschung für die Reduzierung der Flächeninanspruchnahme und ein nachhaltiges Flächenmanagement (REFINA)" [2]. Basierend auf bereits vorliegenden Forschungsergebnissen und unter Berücksichtigung der unterschiedlichen regionalen Rahmenbedingungen sollen innovative Lösungsansätze und Strategien erarbeitet und anhand von Demonstrationsvorhaben umgesetzt und geprüft werden. Der Förderschwerpunkt REFINA ist Teil der Nationalen Nachhaltigkeitsstrategie der Bundesregierung.

2.3 Das Verbundvorhaben „KMU entwickeln KMF“

Erklärtes Ziel des Verbundvorhabens ist es, innovative Strategien und Methoden der Projektentwicklung zusammenzustellen, zu testen und zu optimieren um „Kleine und Mittlere Unternehmen (KMU)“ in die Lage zu versetzen, in Zusammenarbeit mit den Kommunen „Kleine und Mittlere Flächen (KMF)“ zu entwickeln. Insbesondere folgende Strategien und Methoden werden eingesetzt:

- Optimierte Informations- und Kommunikationsstrategien,
- Beteiligungsverfahren,
- Kooperative Planungsverfahren,
- Wissensbasierte Datenbanken und Berechnungsverfahren
- Kommunale Förderung und Gebietsmanagement.

Ein Schwerpunkt des kommunalen Beitrags liegt auf der Optimierung der zentralen Achse der unternehmensorientierten Wirtschaftsförderung (in Stuttgart als Stab im Geschäftskreis des Oberbürgermeisters angesiedelt) und der gemeinwohlorientierten Stadt- und Umweltplanung durch Amt für Stadtplanung und Stadterneuerung und Amt für Umweltschutz (im Referat Städtebau und Umwelt angesiedelt). Die Kooperation dieser zentralen Achse der kommunalen Stadtentwicklung soll im Verbundvorhaben „KMU entwickeln KMF“ optimiert werden.

Folgende Ergebnisse sollen erzielt werden:

- Managementkonzept für Kommunen
- Managementkonzept für kleine und mittlere Unternehmen (KMU)

- Kommunikations- und Koordinationskonzepte
- Weiterbildungskonzepte
- Empfehlungen für die Politik.

Als weiteres wichtiges Ergebnis im Sinne eines Demonstrationsvorhabens soll schließlich die nachhaltige Entwicklung dreier innerstädtischer Standorte mit bedeutsamen Bauflächenpotentialen begleitet, gefördert, untersucht und beschrieben werden.

2.4 Projektpartner

An dem Verbundvorhaben beteiligen sich folgende Institutionen, die den interdisziplinären Ansatz und die starke Praxisorientierung des Vorhabens abbilden:

- Versuchseinrichtung für Grundwasser- und Altlastensanierung am Institut für Wasserbau der Universität Stuttgart – Koordinator des Verbundvorhabens (VEGAS)
- Reconsite TTI GmbH, Stuttgart,
- Unternehmensgruppe Dr. Eisele, Stuttgart/Rottenburg,
- KOMMA.PLAN, Kommunikationsmanagement in der raumbezogenen Planung, München,
- Hochschule Biberach, Studiengang Projektmanagement Bau,
- Beck-Consult.de, Ingenieurbüro für Raumentwicklung, Planung und Kommunikation, Berghausen,
- Landeshauptstadt Stuttgart mit Amt für Stadtplanung und Stadterneuerung, Amt für Umweltschutz, Stabsabteilung Wirtschaftsförderung.

2.5 Projektinhalte und Vorgehen

Das Verbundvorhaben wird im Zeitraum September 2006 bis März 2009 durchgeführt. Es gliedert sich in vier Phasen mit 17 Maßnahmen, die in Abb. 2.1 zusammengestellt sind. Phase I ist bereits abgeschlossen. Die Phasen II und III werden teilweise zeitlich parallel bzw. iterativ ausgeführt.

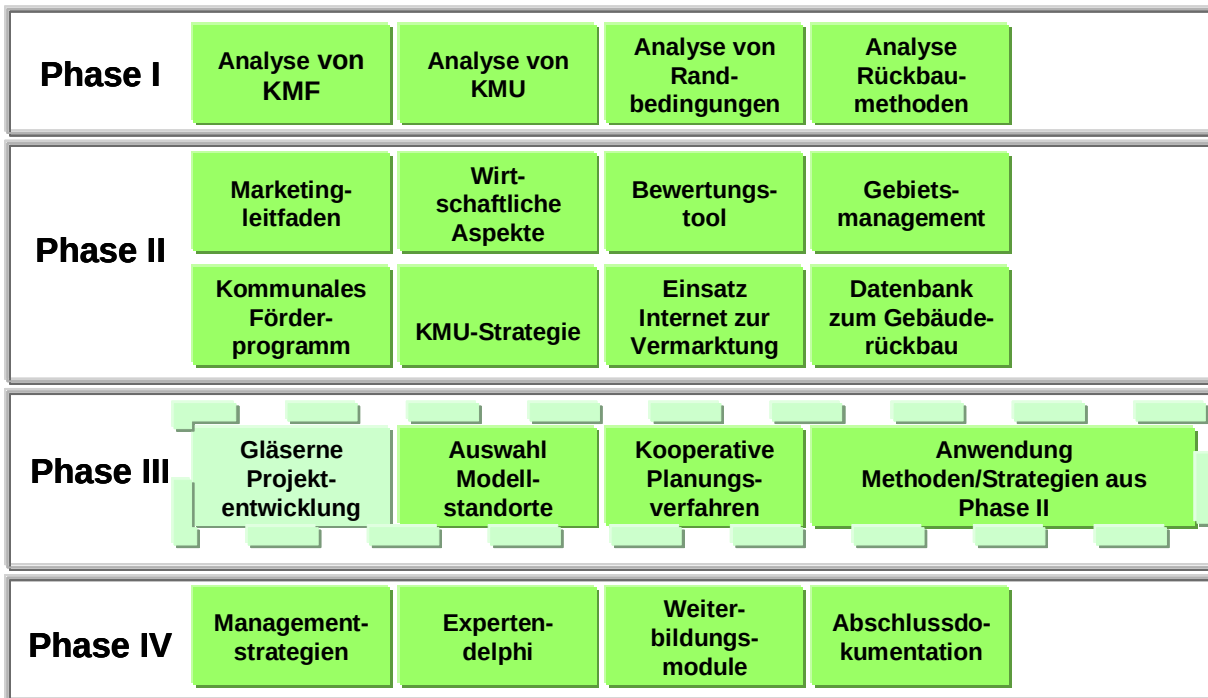


Abb. 2.1: Arbeitsprogramm des Vorhabens KMU entwickeln KMF

In Phase I erfolgte eine interdisziplinäre Analyse abgeschlossener Projekte. Dabei wurden die Stärken und Schwächen der jeweils eingesetzten Strategien und Methoden untersucht. Die Auswertung liefert ein Anforderungsprofil an die in Phase II zu entwickelnden Methoden und Strategien. Die Frage „Welche Voraussetzungen benötigen kleine und mittlere Unternehmen, damit eine Investition in kleine und mittlere Brachflächen zustande kommt?“ steht im Mittelpunkt der Analyse.

Die Phase I diente auch dazu, die Entscheidung des Gemeinderats über eine qualifizierte Auswahl von drei Modellstandorten in Stuttgart vorzubereiten. Der Gemeinderat traf diese Auswahl am 22. Mai 2007 aus einem Pool von 20 Standorten mit hinreichendem Potenzial und Bedarf für eine Revitalisierung [3].

In Phase II (Januar bis Dezember 2007) entwickeln die Projektpartner neue Strategien und Methoden für Kommunen und Unternehmen, welche in Phase III (ab Herbst 2007) an den ausgewählten Modellstandorten konkret angewandt und umgesetzt werden (siehe Abb. 2.1).

In Phase IV schließlich soll auf der Basis der Arbeitsergebnisse ein Handlungs- und Steuerungskonzept für die Kommunen und Unternehmen abgeleitet und die Abschlussdokumentation erstellt werden.

2.6 Modellstandorte

Die drei ausgewählten Modellstandorte weisen sehr unterschiedliche Eigenschaften und Problemstellungen auf. Sie repräsentieren damit die große Vielfalt der möglichen Aufga-

benstellung im gewünschten Maße. Gleichzeitig verbinden sich mit den Modellstandorten unterschiedliche Bedarfslagen im Hinblick auf die künftige städtebauliche Entwicklung.

Eine kurze Beschreibung der Modellstandorte soll die unterschiedlichen Aufgabenstellungen aufzeigen.

- **Feuerbach: Bahnhof Feuerbach / Schoch-Areal**

Der Bahnhofsbereich Feuerbach besitzt aufgrund der interessanten städtebaulichen Lage als Tor zum Zentrum Feuerbachs ein großes Entwicklungspotenzial sowohl für Gewerbe als auch für urbanes Wohnen. Aktuelle Umstrukturierungsprozesse und Pläne zur Änderung der Verkehrsführung eröffnen neue Entwicklungsperspektiven, bergen aber auch erhebliche Risiken hinsichtlich möglicher Fehlentwicklungen. Die Vielzahl der Beteiligten, divergierende Interessenlagen, die langjährige Blockadesituation sowie die Altlastenproblematik des Areals bilden eine repräsentative Fallkonstellation.



Abb. 2.2: Einfahrt zur ehemaligen Firma Gebr. Schoch Hartchrom GmbH

- **EnBW-Areal Stöckach / Hackstraße in Stuttgart-Ost**

Die EnBW plant, ihr ca. 4,2 Hektar großes Gelände infolge von Umstrukturierungen teilweise freizumachen. Die Stadt erhofft sich positive Impulse für das Umfeld, das durch Baumaßnahmen und weitere Entwicklungsvorhaben bereits in Bewegung ist. Anhand dieses Modellstandortes kann der Einfluss einer bevorstehenden Entwicklung auf eine mögliche Umfeldförderung untersucht werden.

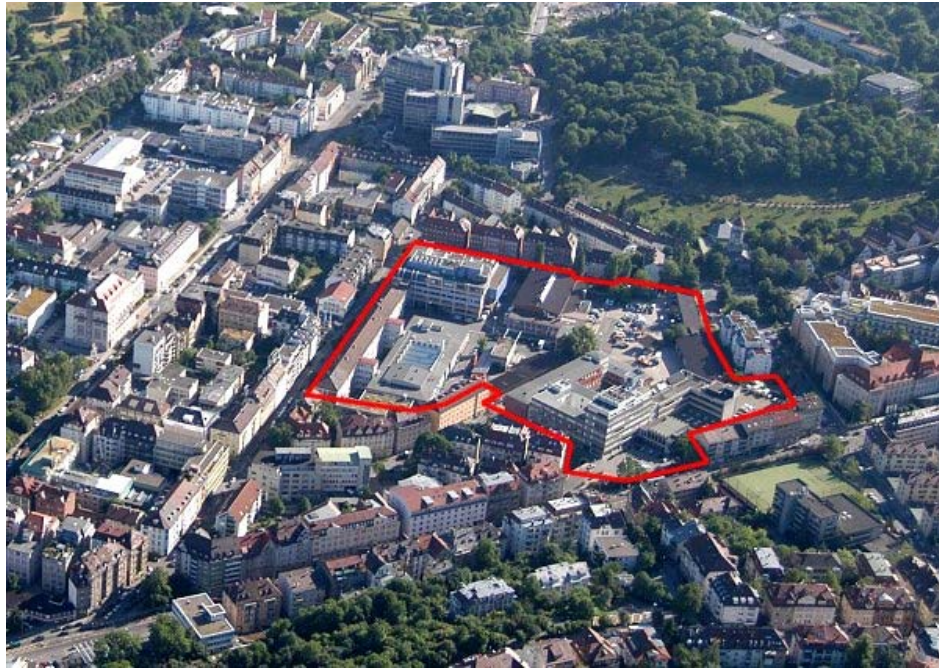


Abb. 2.3: Schrägaufnahme des EnBW-Areals in Stuttgart-Stöckach

- **Stephanareal in Stuttgart-Bad Cannstatt**

Die stark divergierende Interessenslage der Beteiligten hat auch auf diesem Modellstandort seit vielen Jahren jede Entwicklung blockiert. Die bestehenden Konflikte gilt es zu überwinden. Dadurch könnte auf dem Standort ein Projekt für eine gemischte Nutzung mit Büronutzung und Gewerbe auf den Weg gebracht werden.



Abb. 2.4: Schrägaufnahme des Stephan-Areals in Stuttgart Bad Cannstatt

Auf allen drei Modellstandorten wird in Gesprächen mit allen Beteiligten sondiert, welche der im Verbundvorhaben „KMU entwickeln KMF“ vorgesehenen Strategien und Methoden zum Einsatz kommen können.

- Durchführung eines Auftaktworkshops mit allen relevanten Akteuren (Grundstückseigentümer, Verwaltung, Bürger, Investoren),
- Kooperative Planungsverfahren mit ausgewählten Planerteams,
- Ergänzende Untersuchungen und Planungen, z.B. Altlastenuntersuchungen und Gebäudesubstanzuntersuchungen,
- Erstellung eines Vermarktungskonzepts,
- aktives Gebietsmanagement über 2 Jahre,
- Kommunale Fördermöglichkeiten,
- Mediation bei divergierender Interessenlage.

2.7 Erste Erfahrungen

Die Phase I des Verbundvorhabens ist abgeschlossen. Alle Erfahrungen und Ergebnisse werden in kurzen Berichten zusammengestellt, die in Kürze veröffentlicht werden. [4]

Zusammenfassend zeigte es sich erneut, dass ein gemeinsames Problemverständnis aller Beteiligten von großer Bedeutung ist.

Als Voraussetzung für die gemeinsame Erarbeitung von Lösungsansätzen gilt es, die unterschiedlichen Perspektiven der verschiedenen Fachleute (Disziplinen) und Organisationen, die verschiedenen Aufgabenstellungen, Arbeitsweisen und Denkmuster auszutauschen und zusammenzuführen. Ein Verbundvorhaben bildet dazu den geeigneten Rahmen. Die vorgesehenen KMU/KMF-Weiterbildungskonzepte sollen diese Erkenntnisse weitervermitteln.

Erste Maßnahmen an den Modellstandorten haben begonnen. Die große Bedeutung einer städtischen Projektkoordination, das im Modellvorhaben erstmals umzusetzende Gebietsmanagement, (hier beim Amt für Stadtplanung und Stadterneuerung angesiedelt) hat sich erneut gezeigt.

Das Verbundvorhaben „KMU entwickeln KMF“ bietet die große Chance, städtebauliche und wirtschaftliche Problemgrundstücke einer Wiedernutzung zuzuführen und gleichzeitig allgemeingültige und praxistaugliche Strategien und Methoden abzuleiten. Diese werden den beteiligten Partnerstädten Hannover, Osnabrück, Köln und Darmstadt, nach Abschluss des Projektes aber auch allen anderen deutschen Kommunen dabei helfen, eine Konzentration der städtebaulichen Entwicklung gerade auf die vielen kleinen und mittleren baulichen Brachflächen mit Hilfe kleiner und mittlerer Unternehmen zu erreichen.



Förderinitiative REFINA des BMBF:

Forschung und Reduzierung der
Flächeninanspruchnahme und ein nachhaltiges
Flächenmanagement

2.8 Literatur

- [1] Landeshauptstadt Stuttgart, Amt für Stadtplanung und Stadterneuerung: NBS-Lagebericht 2005 (Stuttgart, Juni 2005)
- [2] REFINA-Homepage: www.refina-info.de, 28.06.2007
- [3] Landeshauptstadt Stuttgart, GRDRs 263/2007: REFINA-Verbundvorhaben „KMU entwickeln KMF“ (kleinere und mittlere Unternehmen entwickeln kleinere und mittlere Flächen) – Auswahl der Modellstandorte
- [4] Homepage www.kmu-kmf.de

3 Kostenoptimierte Sanierung und Bewirtschaftung von Reserveflächen – KOSAR

Definition und Anforderungen an Reserveflächen

Stephan Redlich, Andreas Schaub, Kersten Roselt,
JENA-GEOS®-Ingenieurbüro GmbH

3.1 Zusammenfassung

Im REFINA-Forschungsprojekt „Kostenoptimierte Sanierung und Bewirtschaftung von Reserveflächen - KOSAR“ werden Strategien zur systematischen Überführung von nicht marktgängigen Brachflächen in Reserveflächen untersucht und entwickelt. Durch eine verhältnismäßige Sanierung bzw. Aufbereitung werden problematische Brachflächen in Reserveflächen überführt und ein „Reserveflächenportfolio“ aufgebaut. Das Ziel ist, bei steigendem Flächenbedarf die aufbereiteten Reserveflächen wieder in den Flächenkreislauf zurückzuführen und damit zur langfristigen Reduzierung der Flächeninanspruchnahme beizutragen. Von besonderer Bedeutung ist die dabei möglich werdende Abkoppelung der Brachflächensanierung von der Folgenutzungsentscheidung.

Zur Umsetzung der Projektziele wurde eine spezifische Definition für Reserveflächen erarbeitet. Reserveflächen im Sinne von KOSAR sind Brachflächen, für die mit geeigneten Maßnahmen ihre zukünftige Marktgängigkeit und damit die Wiedereingliederung in den Flächenkreislauf erhöht werden.

Die Definition fußt auf flächenspezifischen Anforderungen an die Reservefläche, die sich maßgeblich aus den rechtlichen Inanspruchnahmerisiken für den Eigentümer sowie monetären Risiken für Investoren ableiten. Weitere Anforderungen erwachsen aus städtebaulichen und landschaftsplanerischen Regelungen und den technischen und finanziellen Aufwendungen für die Grundstückspflege und –bewirtschaftung sowie Verwaltungsaufgaben.

Um der Vielfalt möglicher Reserveflächen gerecht werden zu können, ist im Rahmen der Projektbearbeitung eine Typisierung der Reserveflächen angedacht. Die Typisierung soll eine Aussage über die Wertigkeit einer Reservefläche unter Vermarktungssichtspunkten geben.

3.2 Ausgangssituation und Ansatz von KOSAR

Die Brachflächenrevitalisierung ist im zunehmenden Maße ein Schwerpunkt der Strukturpolitik. Dennoch stoßen die derzeit verfügbaren rechtlichen, planerischen und finanziellen Instrumente in schrumpfenden Regionen an ihre Grenzen.

Fehlende Anreize für die Brachflächenrevitalisierung und Nutzungsperspektiven tragen dazu bei, dass kurz- und mittelfristig keine eigendynamische Nutzung dieser Flächen zu erwarten ist. Der Zustand von zugänglichen verwahrlosten Freiflächen sowie ungenutzten Gebäuden und Anlagen verschlechtert sich durch illegale Abfallablagerungen und Vandalismus zunehmend. Sicherheitsrisiken und soziale Spannungsfelder im urbanen Umfeld sind oftmals die Folge. Zugleich können durch die „ungesteuerte Renaturierung“ Baurechte verloren gehen: Bei längerfristig nicht mehr genutzten Brachflächen kommt es in der Regel zur Rückeroberung durch die Natur und der Ansiedlung von Fauna und Flora. Flächen mit einem derartigen „Makel“ sind oft nur mit großem Aufwand wieder in den Grundstücksverkehr zurückzuführen.

Allein der Freistaat Sachsen verweist auf einen Bestand von ca. 7.000 ha innerstädtischer Industriebrachen. Im Ruhrgebiet beträgt der seit Jahren konstante Brachflächenbestand ca. 6.000 ha. Der Gesamtbestand an Brachflächen lässt sich im Verhältnis zwischen Bodenwert (nach Aufbereitung) und Aufbereitungskosten in Typen unterschiedlicher Mobilisierungsgrade unterscheiden. Es zeigt sich, daß insbesondere für die Brachflächen mit hohen Aufbereitungskosten und geringem Bodenwert erhebliche Mobilisierungshemmnisse bestehen.

Um dieser Entwicklung entgegen zuwirken wird das REFINA-Forschungsprojekt „Kostenoptimierte Sanierung und Bewirtschaftung von Reserveflächen - KOSAR“ einen Beitrag zur Reduzierung der Flächeninanspruchnahme durch Wiedereinbindung von Brachflächen aus einem Reserveflächenpool in den Flächenkreislauf leisten.

Ziel von KOSAR ist es, derzeit nicht marktgängige Brachflächen durch verhältnismäßige Maßnahmen in Reserveflächen zu überführen. Bei wieder steigender Flächennachfrage könnte durch die schnelle Aktivierung der Reserveflächen der Flächeninanspruchnahme neuer Flächen („grüne Wiese“) entgegengewirkt werden.

Mit der systematischen Überführung besonders problematischer Brachflächen in Reserveflächen ist eine langfristige Reduzierung der Flächeninanspruchnahme vorgesehen. Dieses Ziel soll durch eine kostenreduzierte Sanierung bzw. kostenreduzierte Aufbereitung von Brachflächen zu Reserveflächen und der Aufbau eines „Reserveflä-

chenportfolios“ erreicht werden. Von besonderer Bedeutung ist die dabei möglich werdende Abkoppelung der Brachflächensanierung von der Folgenutzungsentscheidung.

3.3 Definition und Anforderung von Reserveflächen

„Eine Fläche ist dann im planerischen oder städtebaulichem Sinne eine Brache, wenn sie nach Aufgabe der vorhergehenden Nutzung über einen längeren Zeitraum ungenutzt und – unter ökonomischen Gesichtspunkten – funktionslos geworden ist, für die sich aus unterschiedlichen Gründen keine Folgenutzung über den Markt findet und für die folglich aus städtebaulichen Gründen Handlungsbedarf gegeben ist.“¹

Reserveflächen im Sinne von KOSAR sind Brachflächen, für die mit geeigneten Maßnahmen ihre zukünftige Marktgängigkeit und damit die Wiedereingliederung in den Flächenkreislauf erhöht werden.

Reserveflächen sind im allgemeinen Flächen, die:

- derzeit nicht genutzt bzw. durch eine Interimsbewirtschaftung genutzt werden,
- derzeit nicht marktgängig sind und für die keine dauerhafte Folgenutzung absehbar ist,
- für eine spätere bzw. zukünftige Nutzung vorgehalten werden
- deren Zustand eine schnelle Marktverfügbarkeit und Nutzungsaufnahme ermöglicht.

Um diesen allgemeinen Beschreibungen bzw. Eigenschaften gerecht zu werden, ergeben sich zahlreiche Anforderungen für potenzielle Reserveflächen, die durch Maßnahmen wie Bodensanierung, Gefahrenabwehr, Abbruch der Bausubstanz etc. erfüllt werden müssen.

Die Anforderungen an eine Reservefläche gliedern sich wie in der Abb. 3.1 dargestellt.

¹ Quelle: Winkler, Bärbel; Kriebel, Lutz; u.a.: Strategien zur Vermeidung zukünftiger Gewerbebrachen. Materialien zur Raumentwicklung, Heft. 48 Hrsg. Bundesforschungsanstalt für Landeskunde und Raumordnung, Bonn 1992.

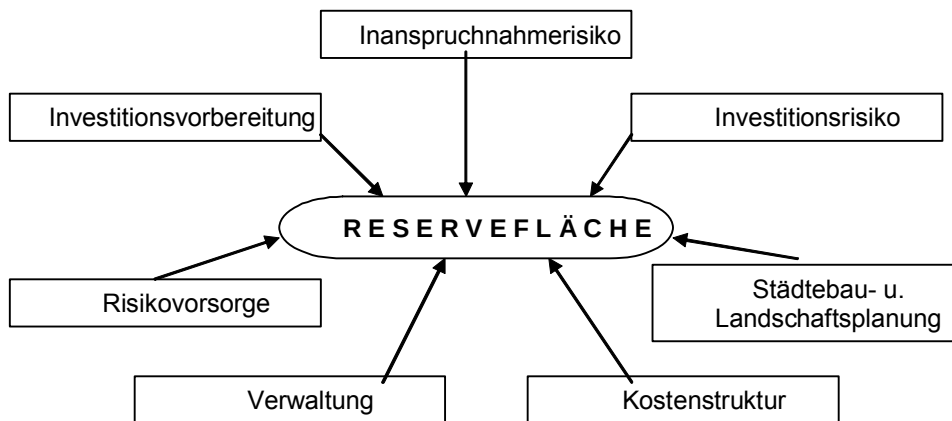


Abb. 3.1: Anforderungen an Reserveflächen

3.3.1 Inanspruchnahmerisiko

Unter dem ‚Inanspruchnahme-‘, oder auch ‚Haftungsrisiko‘ wird die unmittelbare Verpflichtung durch ordnungs-, umwelt- und / oder zivilrechtliche Tatbestände verstanden. Grundlage für eine Inanspruchnahme ist die jeweilige Rechtslage.

Grundstückseigentümer tragen die Verantwortung für die aus dem Grundstück erwachsenden Verpflichtungen.

Für Flächen, die sich auf Grund fehlenden Flächenbedarfes aus ihrer planungsrechtlich zulässigen Nutzung für mittelfristige Zeiträume ausgliedern und als Reserveflächen zu Verfügung stehen sollen, ist die Risikofreiheit der Inanspruchnahme eine verbindliche Voraussetzung.

Reserveflächen werden demnach als „risikofrei“ hinsichtlich Inanspruchnahme bzw. Haftung definiert.

Die Identifizierung der Risikofreiheit für eine Fläche erfolgt durch die Prüfung der Sachlage auf die einzelnen, rechtsbezogen möglichen Verpflichtungstypen. Für die Feststellung gilt der Kenntnisstand zum Stichtag der Bewertung.

Flächen mit Inanspruchnahmerisiken sind zur Überführung in Reserveflächen so aufzubereiten, dass eine Risikofreiheit hergestellt wird.²

² Methoden zur Identifizierung von Inanspruchnahmerisiken sowie zur Verhältnismäßigkeitsprüfung ggf. erforderlicher Sanierungsmaßnahmen sind beispielsweise Bestandteil des REFINA-Projektes OPTIRISK.

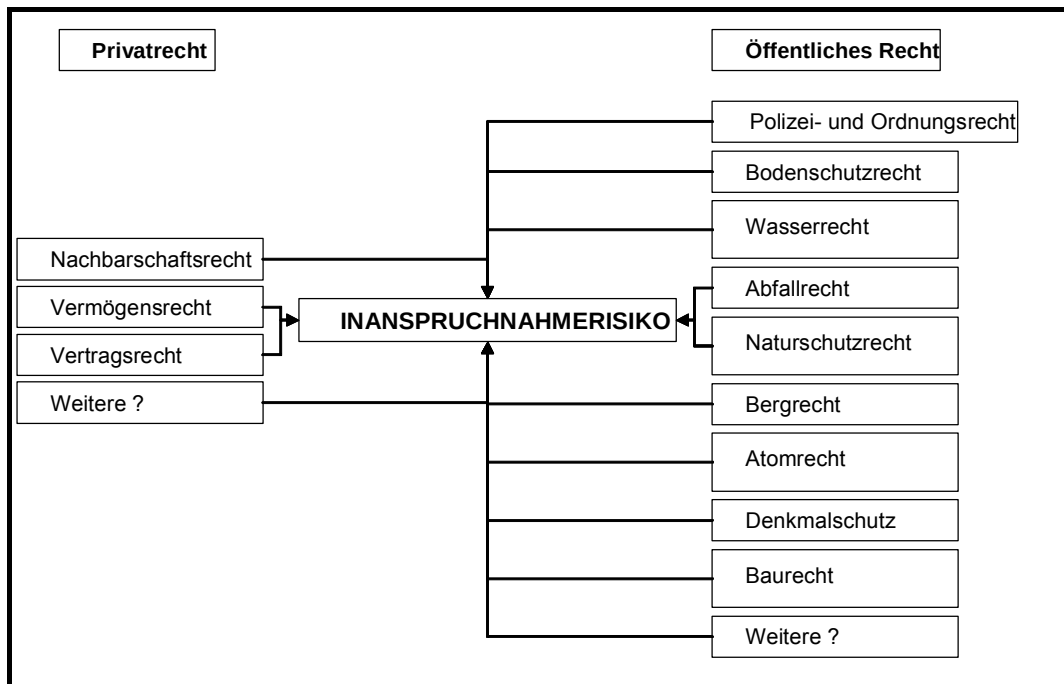


Abb. 3.2: Verpflichtungsgefüge des Inanspruchnahmerrisikos für Reserveflächen

3.3.2 Investitionsrisiken

Unter dem Investitionsrisiko werden Kosten verstanden, die sich im Zusammenhang mit der künftigen Nutzung u.a. ergeben aus:

- Umweltschutzverpflichtungen
- Baugrundbeschaffenheit (natürliche Baugrundbeschaffenheit, baurechtliche Genehmigungsaspekte)
- Erschließungszustand (bauliche Anlagen, Versiegelung, Medien)

Das Inanspruchnahmerrisiko bleibt davon unberührt.

Einfachstes Beispiel ist der so genannte *‚kontaminationsbedingte Mehraufwand‘*, der sich aus abfallrechtlichen Verpflichtungen - nicht aus gefahrenrelevanten Tatbeständen - ergibt. Darunter werden Bodenkontaminationen verstanden, die keine haftungsrechtliche Relevanz inne haben, jedoch im Falle von Baumaßnahmen bei Eingriffen in den Boden zu deutlichen Kostenerhöhungen aufgrund der Entsorgungspflichtigkeit führen können.

Für Reserveflächen ist eine praktische Beseitigung der Investitionsrisiken auf Grund der unbekannten Anforderungen an die zukünftige Nutzung sowie der Finanzierungsgrundlage nicht möglich. Jedoch sollten die standortspezifischen Investitionsrisiken für

Reserveflächen bekannt sein, dass heißt sie sollten monetarisiert³ sein und für den Investor bzw. Grundstücksmakler zur Verfügung stehen und die entsprechende Sicherheit schaffen.

3.3.3 Risikovorsorge

Im Rahmen der Risikovorsorge soll für die Reserveflächen u.a. der aus der Vornutzung bestehende Rechtsstatus erhalten werden, um eine schnelle und unproblematische Wiedereingliederung der Reservefläche in den Flächennutzungskreislauf zu gewährleisten. Aus der Vornutzung resultierende planungsrechtlich zulässige Nutzungsansprüche wie z.B. Baurechte, die mit dem vollständigen Rückbau baulicher Anlagen erlöschen würden, könnten dadurch erhalten werden.

Weiterhin soll die Risikovorsorge für Reserveflächen die aus der Nichtnutzung möglicherweise entstehenden Investitionsrisiken oder gar Inanspruchnahmerisiken reduzieren bzw. unterbinden.

Dazu gehören u.a. die Vermeidung von Vermüllung der Flächen oder Vandalismus an noch vorhandenen baulichen Anlagen etc..

Aus der Praxis häufig bekannt, ist die Problematik um das Herausbilden von naturschutzrechtlich geschützten Flächen wie Biotope. Diese können u.a. durch natürliche Sukzession aber auch durch gezielte Begrünung im Rahmen einer Zwischennutzung oder Pflegemaßnahmen entstehen. In Abstimmung mit den zuständigen Naturschutzbehörden können standortspezifische Regelungen getroffen werden, die naturschutzrechtlichen Konsequenzen vorbeugen. Dies können z.B. Pflegemaßnahmen sein, die das Entstehen von Biotopen verhindern. Weiterhin sind vertragsrechtliche Regelungen wie z.B. „Natur auf Zeit“ möglich, die die investitionsbedingte Beseitigung von sonst naturschutzrechtlich geschützten Arealen erlaubt.

3.3.4 Städtebau- und Landschaftsplanung

Die Erfüllung der Anforderungen im Sinne der Städtebau- und Landschaftsplanung beinhaltet:

- die Einpassung der Reservefläche in das Stadt- und Landschaftsbild
- die Unterbindung und Beseitigung von Missständen (optischer Eindruck)

³ Anleitung zur Monetarisierung von Investitionsrisiken bieten die Ergebnisse des REFINA-Projektes Optirisk, das patentierte Gebrauchsmuster KOBALT der JENA-GEOS®-Ingenieurbüro GmbH sowie die Arbeitshilfe C5-3 der ITVA: Monetäre Bewertung ökologischer Lasten auf Grundstücken und deren Einbeziehung in die Verkehrswertermittlung.

- der Erhalt wertvoller (denkmalgeschützter) Bausubstanz
- Vorbereitung für „Interimsbewirtschaftung“

Die Hauptanforderung dieses Punktes ist die Beseitigung des häufig von verwahrlosten Fläche und verfallender Bausubstanz ausgehenden unästhetischen Erscheinungsbildes. Die Beseitigung dieser Missstände und Einpassung in das Stadt- und Landschaftsbild erhöht die Attraktivität der Fläche und der Umgebung, was insbesondere im innerstädtischen Bereich von großer Bedeutung ist. Weiterhin wird dadurch oft der zunehmenden Vermüllung und dem Vandalismus vorgebeugt und steigert ggf. die Vermarktungschancen.

3.3.5 Investitionsvorbereitung

Reserveflächen sollen so konzipiert bzw. aufbereitet werden, dass eine Nutzungsverfügbarkeit für Investitionsmaßnahmen zeitlich kalkulierbar ist. Dem Eigentümer ist bei Anfrage durch einen potenziellen Investor die zeitliche Verfügbarkeit der infragekommenden Flächen bekannt und eine Investitionsmaßnahme wird damit zeitlich planbar. Dies zielt auf die Möglichkeit der Interimsbewirtschaftung zur Senkung der Unterhalts- und Instandhaltungskosten für die Reservefläche ab.

Die Investitionsvorbereitungen sollen auch eine im Rahmen der planungsrechtlich zulässigen Nutzung mögliche Flexibilität für den Investor herstellen bzw. offen halten.

In die Investitionsvorbereitung zählen auch die für eine Vermarktung erforderlichen Vorbereitungen. Dazu zu gehören neben Informationen zu Flächengröße, -lage und infrastrukturelle Anbindung vor allem auch Informationen zu den Investitionsrisiken, rechtlichen Randbedingungen und der zeitlichen Verfügbarkeit.

3.3.6 Verwaltung

Reserveflächen sollten aus praktischen Gründen einen geringen Verwaltungsaufwand fordern. Sie sollten dementsprechend wenige Verwaltungsakte, geringe Verwaltungskosten und ein einfaches Liegenschaftsmanagement aufweisen.

Die Verwaltung ermöglicht und unterstützt jedoch auch eine Interimsbewirtschaftung. Im Rahmen der Grundstücksverwaltung ist auch Sorge zu tragen, dass die für das Grundstück relevanten infrastrukturellen Anbindungen und Grundstücksrechte gewahrt bleiben.

3.3.7 Kostenstruktur

Unter Berücksichtigung marktwirtschaftlicher Gesichtspunkte muss die Aufbereitung einer Brachfläche zu einer Reservefläche sowie deren Bewirtschaftung, Verwaltung und Unterhaltung kostenoptimiert erfolgen. Dazu sind Aufbereitungs- und Bewirtschaftungsstrategien zu entwickeln, die in der Kosten-Nutzen-Betrachtungen dem Verhältnismäßigkeitsgrundsatz entsprechen.

3.4 Typisierung von Reserveflächen

Um der Vielfalt möglicher Reserveflächen gerecht werden zu können, ist eine Typisierung der Reserveflächen angedacht. Die Typisierung soll eine Aussage über die Wertigkeit einer Reservefläche unter Vermarktungsgesichtspunkten geben.

Vorstellbar ist eine Typisierung nach der Verhältnismäßigkeit zwischen Flächenwert und der erforderlichen Investitionsrisiken im Erwerbs- bzw. Verkaufsfall in Anlehnung an das ABC-Modell der Mobilisierbarkeit von Brachflächen.

4 H₂O₂-Zugabe zur Stimulierung des aeroben biologischen Abbaus von teerölstämmigen Schadstoffen am KORA-Standort „Testfeld Süd“

Oliver Trötschler, Berit Limburg, Thomas Haslwimmer, Hans-Peter Koschitzky,
VEGAS, Universität Stuttgart

Anne Sagner, Andreas Tiehm, TZW Karlsruhe

4.1 Einleitung

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

Zu Beginn des Projekts wurden von Sagner et al. (z.B. Sagner & Tiehm, 2004; Sagner et al., 2005) umfangreiche Batch- und Säulenversuche zur Bioabbaubarkeit von NSO-HET durchgeführt. Zur Bestimmung des Populationswachstums der NSO-HET Verwerter von 2- und 3-kernigen NSO-HET in den Säulen- und Felduntersuchungen während ENA wurde eine adaptierte MPN-Methode eingesetzt.

Im feldnahen Langzeitversuch in der „Großen Rinne“ von VEGAS konnte der Nachweis für die erfolgreiche biologische aerobe In-Situ-Behandlung (ENA) von heterozyklischen Kohlenwasserstoffen durch die Zugabe von Wasserstoffperoxid, bzw. deren Abbau durch Luft(sauerstoff) über einen Grundwasserzirkulationsbrunnen (GZB) erbracht werden.

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

4.2 Vorarbeiten

Zur Klärung der natürlichen biologischen Abbauprozesse (NA) auf dem Testfeld Süd, sowie Auswahl und Auswirkung des einzusetzenden Elektronenakzeptors zur Unterstützung des aeroben biologischen Abbaus (ENA) der NSO-HET, wurden umfangreiche Labor-, Technikums- und Felduntersuchungen am TZW, Karlsruhe durchgeführt. In Batchversuchen zur Stimulation des natürlichen und geförderten Abbaus unter unterschiedlichen Redoxbedingungen im Feld entlang der Schadstoffahne wurde als wirkungsvoller Elektronenakzeptor H₂O₂ zur Stimulation des Abbaus ausgewählt. Zeitgleich konnte der von der Mikroflora tolerierte H₂O₂-Konzentrationsbereich (max. 110 mg/L) zur Bemessung der Einsatzkonzentration mit einem Optimum um 50 mg/L bestimmt werden. In den Untersuchungen zeigte sich, dass zur Adaption der Biozönose an die aeroben Verhältnisse eine initiale (Luft)sauerstoffzugabe anzuraten ist.

Die Wirksamkeit von ENA hängt entscheidend von der homogenen und weit reichenden Einmischung der Elektronenakzeptoren (Sauerstoff, H₂O₂) in das Grundwasser ab. Nach einer Vorauswahl über eine Literaturstudie und basierend auf dem Einsatz numerischer Strömungsmodelle konnte die Effektivität des Grundwasserzirkulationsbrunnens (GZB) und der vollständige aerobe biologische Abbau der NSO-HET im Technikum (Große Rinne VEGAS) nachgewiesen werden (M. Piepenbrink et al., 2006). Gleichzeitig erfolgte der Aufbau eines numerischen Modells zur Berechnung des Erfassungsbereichs des GZB zur standortbezogenen Dimensionierung (Durchfluss, Abstand Förderbereiche, Dimension Strömungswalze).

4.3 Ergebnisse

4.3.1 Entwicklung einer MPN-Methode

Um die Anzahl der aerob NSO-HET-verwertenden Mikroorganismen erfassen zu können, wurde eine neue MPN-Methode (most probable number) etabliert. Grundlage war ein bereits bewährtes Verfahren zur Keimzahlbestimmung von PAK-Verwertern (Stieber et al., 1994). Im neu entwickelten Verfahren werden die Mikroorganismen in abgedeckten Glasbehältern mit NSO-HET über die Gasphase versorgt. Die Anzahl der Mikroorganismen kann nach 35 Tagen durch das MPN-Verfahren auf Basis der direkt sichtbaren Trübung und der temporären Färbung bestimmt werden. Da hierüber jedoch nicht alle NSO-HET-Verwerter erfasst werden, wurde eine Methode mit MTT ((3-[4,5-dimethyldiazol-2-yl]-2,5-diphenyltetrazoliumbromid), der Tetrazoliumsalz-Methode getestet, deren Empfindlichkeit durch Zugabe von leicht verwertbarem Kohlenstoff kurz vor der Auswertung verbessert werden kann.

4.3.2 Untersuchungen zur Stimulation des natürlichen und geförderten Abbaus unter unterschiedlichen Redoxbedingungen

In anaeroben Mikrokosmen konnte gezeigt werden, dass die im Abstrom vorhandenen NSO-HET nur begrenzt und nur sehr langsam abgebaut werden. Hierfür wurde zu Beginn des Projektes Grundwasser vom Standort Stürmlinger Sandgrube (Karlsruhe) eingesetzt, da hier die Redoxzonierung bereits bekannt war (Schulze und Tiehm, 2004; Tiehm und Schulze, 2003).

Es zeigte sich, dass unter sulfatreduzierenden Bedingungen nur ein Abbau von Benzofuran zu beobachten war, während alle anderen NSO-HET nicht abgebaut wurden. Nach der Zugabe eines Fe(II)/Fe(III)-Gemischs konnte auch bei Benzothiophen und Dibenzothiophen ein Abbau beobachtet werden. Für einen Abbau von mehr als 50% war jedoch eine Zugabe von weiteren Nährstoffen von Nöten. Bei Zugabe von Nitrat wurden alle vorhandenen Schadstoffe außer Carbazol abgebaut. Es zeigte sich jedoch auch hier, dass eine zusätzliche Gabe von Nährstoffen notwendig war.

Unter aeroben Bedingungen (Sauerstoff) wurden alle Stoffe ohne Nährstoffzugabe abgebaut. Als möglicher Sauerstoffträger kam aufgrund der zur Stimulation des biologischen Abbaus freisetzbaren Menge an Sauerstoff (Konzentrationen über 20 mg/L O₂) Wasserstoffperoxid in Frage. Da H₂O₂ jedoch in höheren Mengen toxisch auf die Mikroorganismen wirkt, wurden im Vergleich mit dem Elektronenakzeptor Nitrat (20 mg/L) vier Ansätze mit unterschiedlichen H₂O₂-Konzentrationen (1, 5, 20, 50 mg/L) inkubiert. Bei Dosierung von H₂O₂ im Überschuss (einmalig 50 mg/L H₂O₂ zu Versuchsstart) wurden die am Standort dominierenden Substanzen innerhalb von 120 Tagen abgebaut. Bei geringeren Einzeldosierungen wurden ebenfalls alle Substanzen vollständig abgebaut, es wurde jedoch eine verzögerte Abbaukinetik beobachtet. Eine toxische Wirkung des eingesetzten H₂O₂ (50 mg/L) konnte nicht beobachtet werden. In weiteren Versuchen konnte gezeigt werden, dass sich die Organismen aus unterschiedlichen Tiefen-Horizonten mit unterschiedlichen Redoxbedingungen (nitratreduzierende, bzw. eisen/sulfatreduzierende Bedingungen) erheblich schneller an Sauerstoff adaptieren konnten, als an H₂O₂.

Auf Grund dieser Ergebnisse wurde sowohl in den Versuchen im Technikum (Große Rinne VEGAS), als auch während der ENA-Maßnahme im Testfeld Süd mit einer Zugabe von Luftsauerstoff begonnen, um die Adaption der Mikroorganismen an aerobe Verhältnisse und die Bildung von Katalase (ein Enzym, das zur Entgiftung und damit zum Zerfall des H₂O₂s führt) zu beschleunigen (Sagner et al., 2005).

In zwei parallelen Säulenversuchen mit Boden und Grundwasser vom Testfeld Süd wurde unter aeroben und anaeroben Bedingungen der Abbau der im Abstrom vorhandenen NSO-HET untersucht. Es wurden unterschiedliche Konzentrationen an Wasserstoffperoxid zugegeben (ENA) und der Abbau mit anaeroben Kontrollsäulen verglichen. Eine Zudosierung von 35 mg/L H₂O₂ war nicht ausreichend, um die Schadstoffe vollständig abzureinigen. Zwar fand eine Konzentrationsabnahme statt, alle Substan-

zen waren aber im Ablauf noch nachweisbar. Erst bei einer Erhöhung der Dosierung auf 107 mg/L H₂O₂ war nahezu keiner der NSO-HET mehr im Ablauf zu messen. In der anaeroben Kontrollsäule fand selbst nach 187 Tagen Versuchsdauer keine Konzentrationsabnahme statt.

In Bezug auf die betrachteten PAK war der Einfluss der H₂O₂-Dosierung auf die Abbaubarkeit der Schadstoffe noch deutlicher als bei den NSO-HET sichtbar. Bei einer Zudosierung von 35 mg/L H₂O₂ fand fast keine Abnahme der Schadstoffkonzentration statt, nur Inden und Naphthalin wurden über die Säulendistanz zu 50 % abgereinigt. Mit Erhöhung der H₂O₂-Dosierung erfolgte aerob eine vollständige Abreinigung der PAK über die Säulendistanz.

4.3.3 Pilotanwendung TFS

Mit Nachweis der hydraulischen Wirksamkeit und Effektivität des stimulierten aeroben biologischen Abbaus durch Zugabe von Wasserstoffperoxid im Technikumsversuch „Große Rinne“ (Trötschler et al., 2005) in VEGAS wurde das Verfahren ab Sommer 2006 auf dem Testfeld Süd (TFS) angewendet.

Die Pilotanwendung gliederte sich in 6 Versuchsabschnitte:

- Ermittlung der Schadstofffrachten und räumlichen Konzentrationsverteilung
- Adaption der Standortorganismen an aerobe Verhältnisse (3 Wochen): Inbetriebnahme des GZB mit Zugabe von (Luft)sauerstoff in die Zirkulationsströmung
- Reichweitenbestimmung des GZB über Tracertests, intermittierender Betrieb ENA (3 Monate): GZB ohne Dosierung von Elektronenakzeptoren
- Initialisierung und Steigerung des aeroben biologischen Abbaus (6 Wochen): GZB mit hoher Förderleistung und Dosierung von Wasserstoffperoxid
- Steigerung und Konstanz des aeroben biologischen Abbaus im hydraulisch kontrollierten Reaktionsraum (5 Monate Betrieb). GZB mit reduzierter Förderleistung und Dosierung von Wasserstoffperoxid mit zusätzlichem Infiltrationsbrunnen im unterstromigen Bereich der Zirkulationswalze
- abschließende Ermittlung der Schadstofffrachten über Immissionspumpversuche (IPV) und räumliche Konzentrationsverteilung

4.3.4 ENA-Maßnahme: Stichtagsmessung und GZB-Installation

Zur Eingrenzung der Schadstofffahne wurde nach Durchführung der Immissionspumpversuche und Betrieb des GZB ohne Zugabe von Elektronenakzeptoren eine Stichtagsmessung an den Kontrollebenen CP1, CP2 und CP2-3 und an 30 Rammpegeln (RP) im Wirkungsbereich des GZB durchgeführt, s. Abb. 4.1. Deutlich erkennbar ist die Erfassung eines Teilabschnitts der Schadstofffahne durch den GZB mit Konzentratio-

nen um 100 µg/L, sowie der natürliche Rückhalt entlang der Centerline der Fahne auf Werte um 80 µg/L im Abstand von ca. 80 m unterstromig des GZB.

In der vorhandenen 6“-Messstelle B86 wurde ein GZB im westlichen Teilstrom der Schadstofffahne installiert und einschließlich der erforderlichen Verfahrenstechnik in Betrieb genommen.

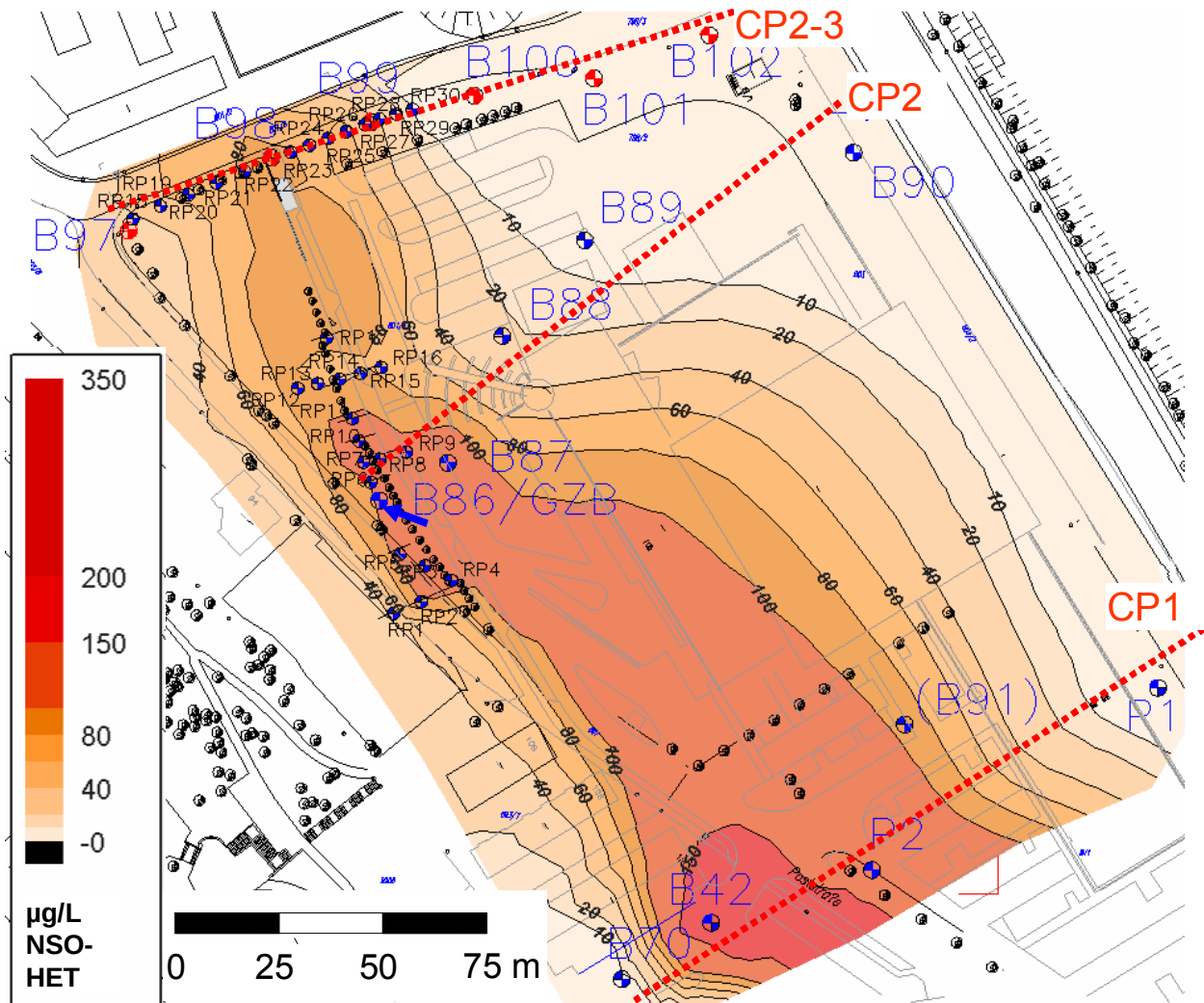


Abb. 4.1: Konzentrationsverteilung NSO-HET vor Zugabe von H_2O_2

Der Grundwasserzirkulationsbrunnen wurde auf dem Testfeld mit einem unten gelegenen Entnahmefilter und einem mittels Packer (l ~ 1 m) abgetrennten oberen Zugabefilter im ca. 4 m mächtigen quartären Aquifer installiert. Die Funktion des GZB beruht auf der Ausbildung einer Zirkulationsströmung zwischen Zugabe- und Entnahmefilter. Generell gilt die Regel: je mächtiger der Aquifer und je weiter im Abstand die abgepackerten Filterelemente liegen und umso höher der Volumenstrom, umso weiträumiger ist die Reichweite. Das zudosierte H_2O_2 wird über die Zirkulationsströmung in den Aquifer eingemischt, s. Abb. 4.2. Die numerischen Berechnungen zur hydraulischen Auslegung

ergaben einen Volumenstrom von ca. 12 m³/h, um eine Erfassungsbreite von ca. 10 m zu erzielen.

Die Anlage zur Zugabe von H₂O₂, bzw. Luftsauerstoff ist sowohl zulauf-, wie ablaufseitig mit Sandfiltern ausgestattet, um den Eintrag von Fe (III)- und Mn(IV)-Verbindungen in den Aquifer zu minimieren. Mittels einer Injektorpumpe (Wasserstrahlprinzip) kann Luftsauerstoff, bzw. über Membrandosierpumpen H₂O₂ der Zirkulationsströmung des GZB zugegeben werden.

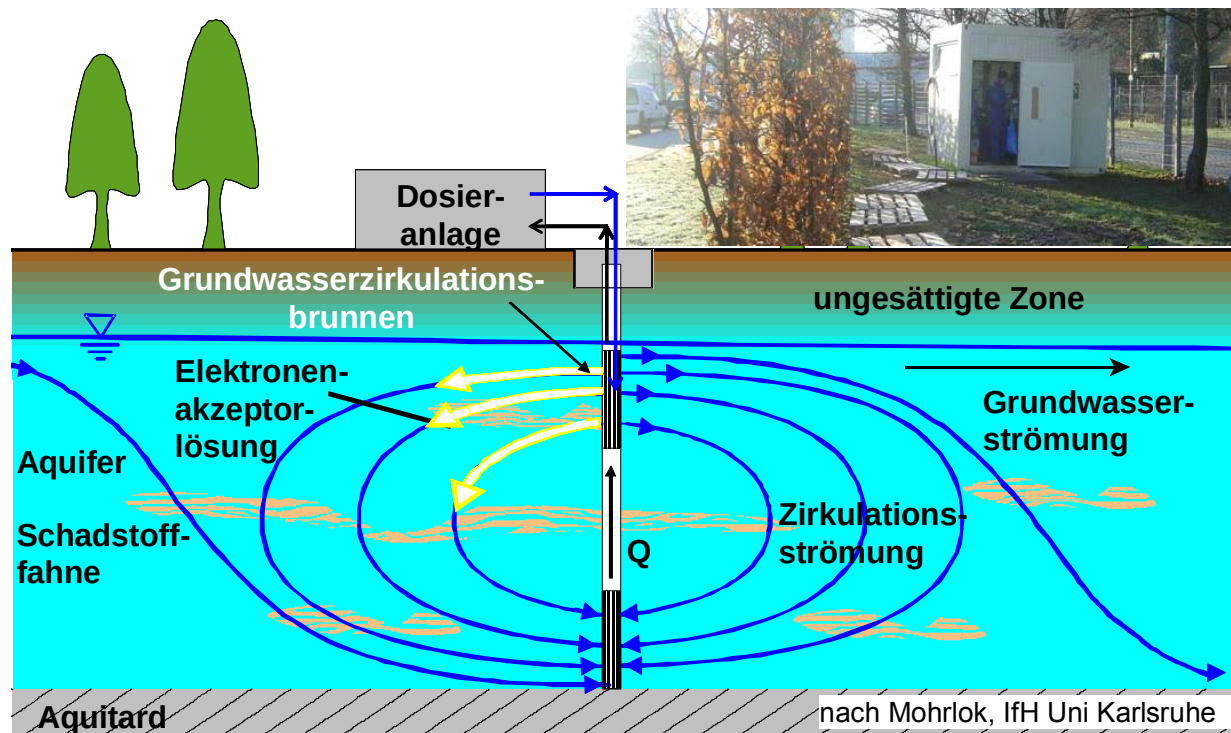


Abb. 4.2: Wirkungsweise des GZB und Anlagencontainers auf dem Testfeld

4.3.5 Tracertests

Im ersten Schritt der Pilotanwendung wurden 3 Tracerversuche zur Bestimmung der Erfassungsbreite des GZB, sowie der unterstromigen Ausbreitung des angereicherten Grundwassers durchgeführt. Die Tracertests zeigten, dass selbst mit einer Förderrate des GZB von ca. 4 m³/h eine oberstromige Erfassungsbreite um 18 - 20 m erzielt wird. Das Strömungsmodell wurde entsprechend den Durchbruchzeiten über Veränderung der Anisotropie ($K_{\text{hor}}/K_{\text{ver}}$) des Aquifers ($1 \rightarrow 6$) und der Porosität ($0,25 \rightarrow 0,15$) angepasst. Die unterstromige Ausbreitung des konservativen Tracers (Uranin) entsprach der Hauptströmungsrichtung (NNO) entlang einer Linie GZB-B98. Der Tracerdurchbruch entlang der Grundwasserströmung auf der „Centerline“ erfolgte nach ca. 55 Tagen Versuchszeit mit einer mittleren Abstandsgeschwindigkeit von: 1,6 m/d. Die Breite des Tracerdurchbruchs an der Kontrollebene CP2-3 im Abstand von 80 m zum GZB lag um 60 m und bestätigt die Erhöhung der transversalen Dispersion durch den GZB.

4.3.6 Sauerstoffzugabe und Verockerung des GZB

Die initiale Belüftung des Aquifers erfolgte über Einmischung von Luftsauerstoff in den umgewälzten Grundwasserstrom des GZB. Die Konzentrationen lagen um 4,5 mg/L, es wurden ca. 0,8 kg/d Sauerstoff eingeleitet. Nach einer Woche konnte eine Erhöhung des Sauerstoffgehalts nur im Nahbereich des GZB festgestellt werden: 1,5 – 4,4 mg/L O₂. Zeitgleich konnte ein deutlicher Abbau der NSO-HET im Nahbereich des GZB mit einem Rückgang der Konzentrationen von 30 – 90 µg/L auf Werte zwischen 0,3 und 7 µg/L beobachtet werden.

Während der Zugabe von Luftsauerstoff konnte ein kontinuierlicher Anstieg des Grundwasserstands im Filterbereich des GZB festgestellt werden. Nach 9 Tagen Betrieb stand Grundwasser im Bereich des GZB auf dem Gelände an. Ursache war die massive Verockerung des oberen Filternahbereichs durch oxidiertes Fe(II) (Eisenhydroxid). Vor Beginn der nachfolgenden H₂O₂-Zugabe wurde zusätzlich eine Feinfilteranlage (500-200-50 µm Filter) installiert. Dies führte zur Abtrennung von ca. 80 % der Eisenfracht (15 mg/L → 3 mg/L).

Die Luftzugabe wurde in Folge der Verockerung ausgeschaltet und der Brunnennahbereich wurde mit Schwefelsäure zur Lösung und Entnahme der ausgefallenen Eisenhydroxide gespült. Danach konnte der GZB mit Förderraten um 4 m³/h problemlos betrieben werden. Innerhalb von zwei Monaten ohne Dosierung von O₂ oder H₂O₂ konnte ein Rückgang des biologischen Abbaus der NSO-HET und PAK auf Werte im Bereich der Konzentrationen vor Beginn der Sauerstoffzugabe bestimmt werden.

4.3.7 Zugabe von Wasserstoffperoxid mit Änderung des hydraulischen Systems

Mit Beginn der Zugabe von Wasserstoffperoxid im Dezember 2006 wurde massiv Eisenhydroxid in der Filteranlage abgeschieden. Aufgrund der sich stark ändernden Druckverhältnisse, schwankten die Grundwasserförderraten erheblich, was zu Problemen bei der Zugabe von Wasserstoffperoxid führte. Erst die Aufteilung des Zugabestroms Anfang Februar 2007 führte zu einem stabilen Betrieb. Etwa 50% des Volumenstroms wurde über einen zusätzlichen Infiltrationsbrunnen (RP6, 1 1/2“, vollverfiltert) im unterstromigen Bereich der Zirkulationsströmung des GZB zugegeben. Die auf Dauer realisierbare Förderrate des GZB lag um 1,2 m³/h. Das Strömungsmodell des GZB berechnete für die geänderte Betriebsweise des GZB einen Erfassungsbereich von ca. 12 m und eine Abgabebreite von ca. 14 m, s. Abb. 4.3.

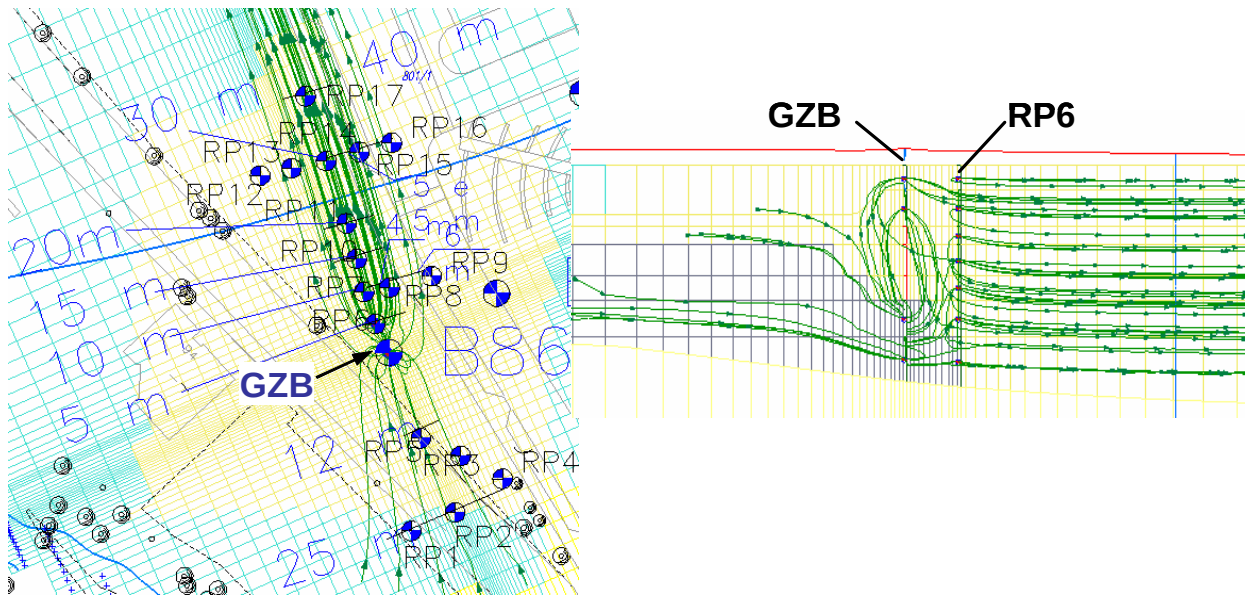


Abb. 4.3: numerische Simulation des GZB nach Umstellung des hydraulischen Systems

Die H₂O₂-Konzentration des eingeleiteten Grundwassers wurde aufgrund des hohen geogenen Sauerstoffbedarfs durch Fe(II) im Grundwasser und im Boden auf 50 mg/L eingestellt. Die angelegte Dosierleistung lag zwischen 0,1 – 0,25 kg/h Wasserstoffperoxid, dies entspricht einer Sauerstoffzugabe zwischen 1,1 – 2,8 kg/d. Nach Umstellung des hydraulischen Systems (GZB mit Infiltrationsbrunnen) wurde die Zugabemenge infolge der erzielten Ausbreitung des Sauerstoffs (s. Abb. 4.4) auf 0,15 kg/h, bzw. 1,7 kg/d Sauerstoff reduziert.

Erhöhte Sauerstoffkonzentrationen konnten im Nahbereich des GZB und unterstromig in einem Abstand bis 25 m mit Werten zwischen 1,5 – 16 mg/L gemessen werden. An der Kontrollebene RP12 – 16 (Abstand zu GZB ca. 30 m) konnten keine aeroben Verhältnisse festgestellt werden (O₂-Gehalt < 1,5 mg/L), wohl aber eine verstärkte Ausfällung von Eisen in den Brunnenrohren. Dies lässt den Schluss einer sich ausbildenden Fe(III)-Zone im Aquifer zu.

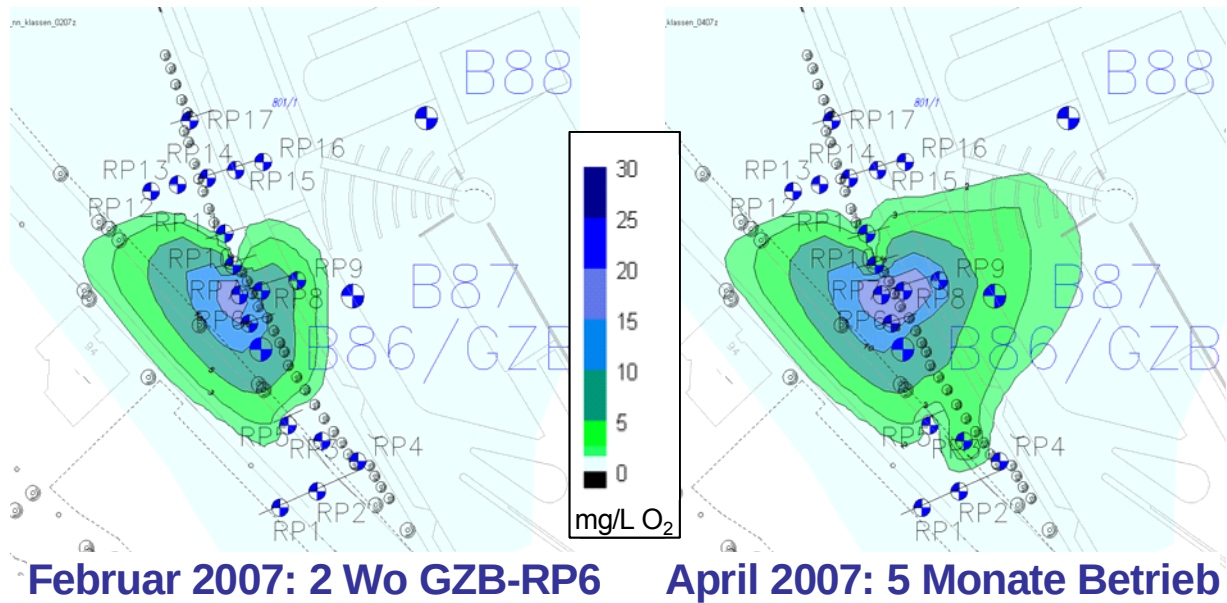


Abb. 4.4: Entwicklung des Sauerstoffgehalts im Nahbereich des GZB

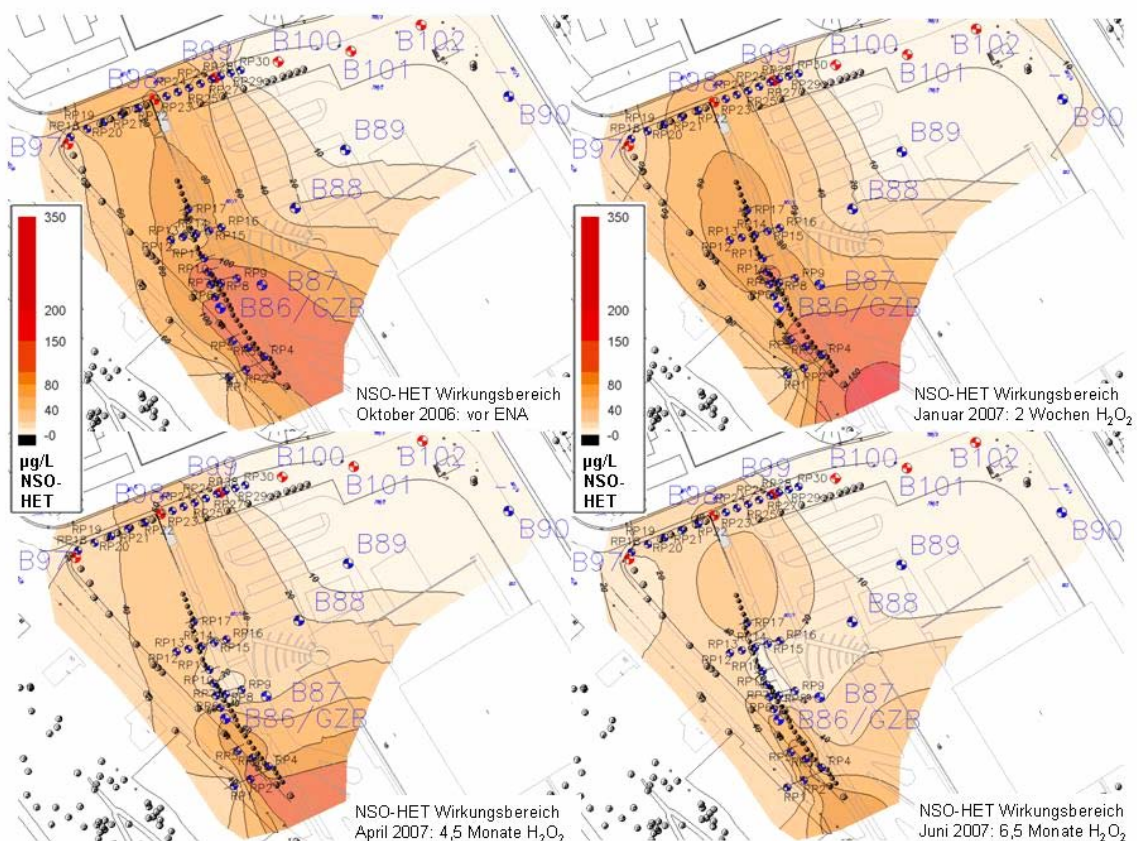


Abb. 4.5: Entwicklung der NSO-HET Konzentrationen bei Zugabe H_2O_2

Bereits nach 2 Wochen H_2O_2 -Zugabe konnten im Nahbereich des GZB (RP6-RP11) verringerte NSO-HET-Gehalte bestimmt werden: 12 – 61 $\mu g/L$, im Mittel (Mittelwert aus

RP6-RP11) bei 34 µg/L. Vor Beginn der Zugabe lagen diese Werte zwischen 94 – 117 µg/L, im Mittel bei 106 µg/L. Im weiteren Abstrom (RP12 – RP17) betrugen die Werte 26 – 67 µg/L, im Mittel 47 µg/L (Abb. 4.5, oben rechts) im Vergleich zu Werten vor Beginn der Zugabe zwischen 50 – 117 µg/L (Abb. 4.5, oben links), im Mittel bei 75 µg/L. Nach Umstellung des hydraulischen Systems lagen die Konzentrationen im Nahbereich des GZB zwischen 5 – 59 µg/L, im Mittel bei 25 µg/L (Abb. 4.5, unten links). Der Abbau steigerte sich im weiteren Verlauf der Anwendung. Nach 6 Monaten Zugabe von Wasserstoffperoxid lagen die NSO-HET-Konzentrationen um 60 -100 µg/L entnahmeseitig des GZB und zwischen 1,5 - 50 µg/L, im Mittel um 23 µg/L im Bereich des Wirkungsraums des GZB (RP6 – RP11, RP12 – 16 und RP17), sowie zwischen 25 – 43 µg/L, im Mittel 31 µg/L an der Kontrollebene CP2-3, also ca. 80 m unterstromig des GZB, s. Abb. 4.5 unten rechts.

Ein ähnliches Abbauverhalten konnte für die PAK mit dem dominierenden Schadstoff Acenaphthen beobachtet werden. Die Konzentrationen lagen nach ca. 4 Monaten Zugabe im Nahbereich des GZB zwischen 0,2 – 37 µg/L, im Mittel bei 11,5 µg/L, während die Konzentrationen am GZB bei 134 µg/L lagen. Unterstromig (RP12-17) lagen die Konzentrationen zwischen 49 – 84 µg/L, im Mittel bei 70 µg/L. Nach 6 Monaten H₂O₂-Zugabe fielen auch die Konzentrationen in diesem Bereich auf Werte zwischen 0,8 – 71 µg/L, im Mittel 43 µg/L. Die Konzentrationen am GZB lagen zwischen 110 – 135 µg/L, an der Kontrollebene CP2-3 zwischen 15 – 55 µg/L, im Mittel um 30 µg/L.

4.3.8 Entwicklung der Keimzahlen

Im Rahmen der Überwachung der Maßnahme wurden in regelmäßigen Abständen auch die im Feld vorhandenen Bakterien (MPN-Verfahren) bestimmt. Neben den aeroben Gesamtkeimzahlen (GKZ) wurden auch die Schadstoffverwerter und die denitrifizierenden und eisenreduzierenden Bakterien untersucht.

Nach Beginn der H₂O₂-Dosierung war im GZB Zu- und Ablauf keiner der Organismengruppen in höheren Konzentrationen mehr vorhanden. Dies ist auf die toxische Wirkung des Wasserstoffperoxids zurückzuführen. Es zeigte sich jedoch, dass im direkten Abstrom (RP 7), wo die höchsten Sauerstoffkonzentrationen gefunden wurden, die aeroben GKZ innerhalb des untersuchten Zeitraums von $5,62 \times 10^3$ auf $6,62 \times 10^5$ anstiegen.

In ähnlichem Verhältnis stiegen in diesem Bereich auch die Schadstoffverwerter an. In den Bereichen, in denen nach Einleitung von Sauerstoff oder H₂O₂ frisch gefälltes Fe(III) vorlag, konnte eine Zunahme der Eisenreduzierer von fast zwei Zehnerpotenzen ermittelt werden (RP11 –RP17, Abb. 4.5). Dies weist auf eine Zehrung des organischen Kohlenstoffs und einer Verwertung der Schadstoffe unter eisenreduzierenden Bedingungen hin. Diese Tatsache stellt einen interessanten Aspekt in Bezug auf einen intermittierenden Betrieb der Zugabe von Sauerstoff unter Nutzung des frisch gefällten Eisenhydroxids und der anaeroben Abbau-Prozesse dar.

4.3.9 Kostenbetrachtung

Der Betrieb des Grundwasserzirkulationsbrunnens war in der ursprünglichen Implementierung in Folge der hohen Konzentrationen an Eisen im Bereich des Brunnens B86 und den hierdurch erforderlichen Wartungsintervallen (2 – 3 Mal wöchentlich) personal- und kostenintensiv. Anfängliche Probleme wie die Dosierung des H_2O_2 , die Fällung und Entfernung von Eisen sowie in der Konfiguration der Zirkulationsbrunnen konnten überwunden werden. Es ist geplant, die Anlage im Auftrag des Standortbesitzers zu optimieren, damit sie im Pilotmaßstab wartungsarm und automatisiert betrieben werden kann.

Basierend auf den Kosten der ersten Implementierung lassen sich jedoch die standortspezifischen Kosten einer Umsetzung der Technologie am Standort abschätzen.

Tab. 4.1: Kostenschätzung der ENA-Maßnahme „Testfeld Süd“

Kosten [EUR] netto	Pilotanwendung [EUR / Monat]	Einsparpotenzial bei Dauerbetrieb [%]
Personalkosten: Überwachung, Betrieb und Wartung der Dosieranlage	2.800	40
Betriebskosten: Chemikalien	450	10
Betriebskosten: Strom	220	-
Investitionskosten: (auf 5 Jahre abgeschrieben)	520	-
Summe EUR netto	3.990	2.825

4.4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

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

Es ist beabsichtigt, im Rahmen eines Demonstrationsprojektes den Wirkungsbereich zu verdoppeln und der offenen Frage des Einflusses der sich in Folge der Sauerstoffzugabe ausbildenden Fe(III)-Zone auf den Schadstoffabbau nachzugehen.

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

Der standortspezifische Kosteneinsatz für den Aufbau und Betrieb der Anlage, einschließlich der Verbrauchskosten liegt bei ca. 36.000 EUR jährlich. Ob das ausgefallte Eisen gegebenenfalls von Nutzen für die Sanierungsstrategie sein könnte, soll ebenfalls im Rahmen des Demonstrationsbetriebs geklärt werden.

4.5 Danksagung

Dieses Verbundprojekt wird im Rahmen des Förderschwerpunktes ‚KORA‘ vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert, Fkz: 02WN0361 - 02WN0363.

4.6 Literatur

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

- Statuskolloquium 2004. Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, Heft 131: 18 – 27 ISSN 0343-1150
- Sagner, A., Tiehm, A., Trötschler, O., Haselwimmer, T., Koschitzky, H.-P. (2005): Enhanced Natural Attenuation zum In-situ-Abbau von heterozyklischen Kohlenwasserstoffen. In: Braun et. al. (Hrsg.), *VEGAS-Statuskolloquium 2005*. Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, Heft 145: 131 –140 ISSN 0343-1150
- Piepenbrink, M., De Biase, C., Dietze, M., Grathwohl, P., Herold, M., Ptak, T., Trötschler, O., Haslwimmer, T., Koschitzky, H.-P., (2006): Enhanced Natural Attenuation (ENA) zur In-situ-Sanierung von NSO-Heterozyklen im Grundwasser: Verfahrensentwicklung im Technikums-Maßstab sowie Pilotanwendung an einem ehemaligen Gaswerksstandort. In: Braun et. al.. (Hrsg.) *VEGAS-Statuskolloquium 2006*. Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, Heft 150: 1 – 10, ISBN 3-933761-53-0
- Schulze, S., Tiehm, A. (2004): Assessment of microbial natural attenuation in groundwater polluted with gasworks residues. *Water Science & Technology* 50(5): 347-353
- Tiehm, A., Schulze, S. (2003): Intrinsic aromatic hydrocarbon biodegradation for groundwater remediation. *Oil & Gas Science and Technology* 58 (4): 449-462
- Stieber, M., Haeseler, F., Werner, P., Frimmel, F. H. (1994): A rapid screening method for micro-organisms degrading polycyclic aromatic hydrocarbons in microplates. *Applied Microbiology Biotechnology* 40: 753-755

5 THERIS-Verfahren zur Reinigung von Aquitarden – Einflussfaktoren und Betriebsparameter –

Uwe Hiester, Hans-Peter Koschitzky, Oliver Trötschler, Martina Müller
VEGAS, Universität Stuttgart

Arne Färber, Li Yang, IWS, Universität Stuttgart

Ralph Baker, Gorm Heron, John LaChance, TerraTherm Inc., USA,

Myron Kuhlman, MK Tech Solutions Inc., USA

5.1 Motivation

Bei der Sanierung von DNAPL⁴-Schadensherden in Boden und Grundwasser erlangen thermische In-situ-Sanierungstechnologien zunehmend Bedeutung. Für die standort-spezifische Verfahrensauswahl zur effizienten Reinigung von DNAPL-Schäden ist ein weitreichendes Verständnis der sanierungsrelevanten Prozesse entscheidend. Zur vornehmlich konduktiven Erwärmung von Böden mit geringer Durchlässigkeit als auch heterogenen Formationen werden beim THERIS-Verfahren elektrisch betriebene feste Wärmequellen in den Bodenkörper eingebaut und umschließen üblicherweise den Sanierungsbereich (Schadensherd).

Die aktuelle Forschung im Rahmen eines deutsch-amerikanischen Forschungsvorhabens bei VEGAS dient der Verbesserung des Prozessverständnisses beim THERIS-Einsatz in der gesättigten Bodenzone anhand von Labor- und Großversuchen (2D & 3D). Hierzu wurden u.a. in zwei VEGAS-Großbehältern (75 und 150 m³) eine geologischen Struktur (Aquitarde als gering durchlässige Feinschicht⁵) in einem künstlichen Aquifer eingebaut. Ziel der Anwendung fester Wärmequellen im Grundwasser ist vornehmlich die Reinigung dieser Aquitarde. Zur Verbesserung des Prozessverständnisses werden im Untergrund u. a. Temperaturen und Wassersättigungen in verschiedenen Profilen und Höhen gemessen, die sich infolge der Verdampfung von Wasser beim gezielte Aufheizen ändern. Basierend auf den Experimentaldaten werden die sanierungsrelevanten Prozesse mit Hilfe numerischer Simulationen analysiert, die Prognosefähigkeit des numerischen Modells kontinuierlich verbessert und die Randbedingungen für Sanierungsexperimente auf technischer Skala festgelegt.

⁴ Denser than Water Non Aqueous Phase Liquids

⁵ FS: Mischung aus Feinsand & Quarzmehl, einem Schluff vergleichbar [HIESTER ET AL., 2002]

5.2 Einführung

5.2.1 Grundlagen

Die Sanierung von DNAPL-Schadensherden im Grundwasser stellt insbesondere bei Heterogenitäten eine besondere Herausforderung dar, da große lokale Unterschiede in der hydraulischen Durchlässigkeit und gering durchlässige Schichten im Sanierungsbereich die Effizienz hydraulischer Sanierungsverfahren signifikant limitieren können. Schadstoffe befinden sich jedoch meist sowohl in Schichten geringer als auch höherer Permeabilität, so dass bei hydraulischen Maßnahmen üblicherweise die Schadstoffentnahme aufgrund des Umströmens der gering durchlässigen Schichten in präferenziellen Fließwegen in diesen Schichten unzureichend ist.

Thermische In-situ-Sanierungen können diese Limitierungen überwinden, da gegenüber konventionellen In-situ-Sanierungen der Schadstoffaustrag beschleunigt und die Sanierungszeit verkürzt wird [DAVIS, 1997]. Während Dampf-(Luft-) Injektionen (TUBA-Verfahren) auch im Grundwasser nur in einem Spektrum hinreichender Bodendurchlässigkeiten eingesetzt werden können, finden feste Wärmequellen (THERIS-Verfahren) vornehmlich in gering bis schlecht durchlässigen Böden bzw. Bodenschichten Anwendung. Die festen Wärmequellen werden üblicherweise auf mehreren hundert Grad Celsius betrieben, so dass unterschiedlich durchlässige Böden durch eine Kombination von thermischer Konduktion und Konvektion erwärmt werden [UDELL, 1985]. Zudem können feste Wärmequellen, falls nötig, einen Boden über den Siedepunkt von Wasser erhitzen, was zur Reinigung von Schadstoffen mit mittleren bis hohen Siedepunkten hilfreich sein kann. Die verdampften Schadstoffe werden vornehmlich über eine Bodenluftabsaugung (BLA) entnommen (Abb. 5.2). Üblicherweise werden mehrere Heizelemente (HE) und BLA-Brunnen parallel betrieben. Die abgesaugte Bodenluft wird konventionell gereinigt (z.B. Aktivkohlefilter).

5.2.2 Motivation und Umfang der Untersuchung

Zur Verbesserung des Prozessverständnisses beim THERIS-Einsatz im Grundwasser und zur Optimierung des Schadstoffaustrags untersucht VEGAS in Zusammenarbeit mit den amerikanischen Firmen TerraTherm, Inc. und MKTechSolutions, Inc. im Rahmen des Forschungsprogramms SERDP (Strategic Environmental Research & Development Program) diese Prozesse in Experimenten auf verschiedenen Skalen.

In kleinskaligen 2D-Laborversuchen wurde die Effizienz einer Sanierung beim Betrieb fester Wärmequellen im Grundwasser exemplarisch gezeigt. Basierend auf Fragestellungen, die sich aus verschiedenen numerischen Modellrechnungen ergaben, wurde zudem auf technischer Skala der Einfluss der Versuchsrandbedingungen *Energiezufuhr* und *Grundwasserströmung* auf die Untergrunderwärmung untersucht.

5.2.3 Zielsetzung

Ziel des Gesamtprojekts ist die Untersuchung verschiedener Einzelprozesse bei der Sanierung von Schadensherden mit festen Wärmequellen im Grundwasser (u.a. Verdampfung von Schadstoff, Wasserdampfdestillation). In Großversuchen wird, u.a. in Abhängigkeit von der Untergrundtemperatur und der Dauer des BLA-Betriebs, der Sanierungserfolg zu bewerten sein. Im Besonderen ist zu klären, ob im Sanierungsverlauf DNAPL-Phase im Untergrund so verfrachtet werden kann, dass eine Sanierung erschwert wird.

5.3 Methoden

5.3.1 2D-Versuche in Laborküvetten

Aufbauend auf Wärmetransportuntersuchungen [LI, 2004; HIESTER ET AL. 2006] wurden in kleinskaligen Küvettenversuchen (Volumen ca. 70 l) Sanierungsexperimente zur Quantifizierung des Schadstoffaustrags durchgeführt. In dem hier vorgestellten Experiment wurde auf einer Grobsandschicht eine Feinsand-Quarzmehl-Mischung „B“ als Aquitard eingebaut ($k_f = 2 \times 10^{-6}$ m/s, B-Mischung ist einem Schluff vergleichbar) [MARK, 2005] und der Grundwasserspiegel an der Oberkante dieser Schicht eingestellt (Abb. 5.1, links). Der Einbau von 324 g (200 ml) PCE (rot eingefärbt) erfolgte durch Versickerung in eine wassergesättigte Grobsandlinse (Abb. 5.1, rechts), die allseitig von der gering durchlässigen B-Schicht umschlossen war. Zwei vertikale HE (Länge 0,5 m) beheizten sowohl den Grobsand als auch die gering durchlässige Schicht. Der verdampfte Schadstoff wurde an der offenen Oberseite der Küvette entnommen und über ein Leitungssystem zu einem Aktivkohlefilter geleitet.

Die Pyrex-Glasscheibe an der Vorderseite der Küvette ermöglichte die Beobachtung der Migration des flüssigen Schadstoffs mittels Farbtracer. Die Wärmeausbreitung wurde u.a. integral mit einer Infrarotkamera in hoher Auflösung gemessen. Zur Reduktion der Wärmeverluste wurde die Küvette isoliert und diese Isolierung nur kurzzeitig für Fotodokumentationen (Farbtracer, Infrarotkamera) entfernt.

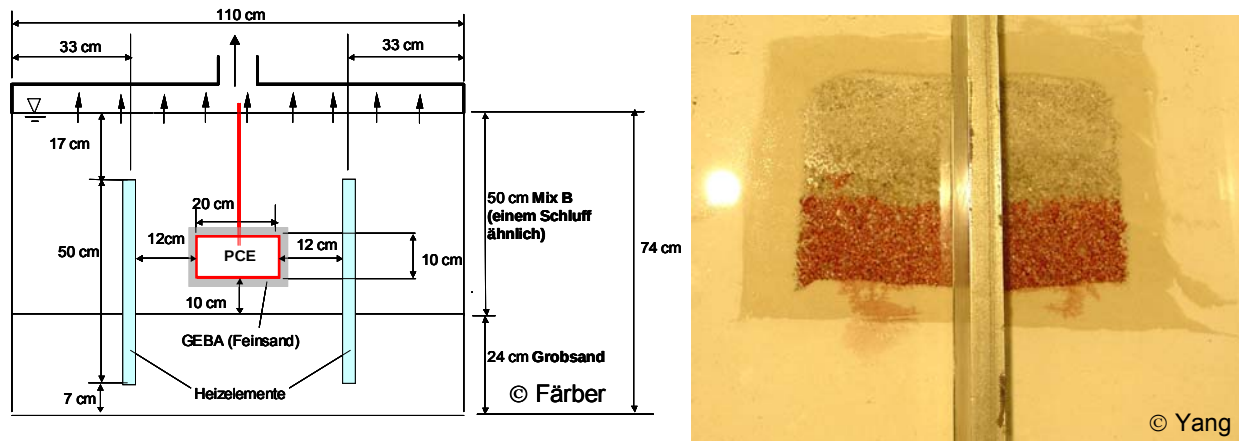


Abb. 5.1: Aufbau eines kleinskaligen Sanierungsexperiments (links), infiltriertes PCE (rot eingefärbt) in einer Grobsandlinse (rechts)

5.3.2 3D-Untersuchungen im VEGAS-Großbehälter

Für die aktuellen Untersuchungen im Technikumsmaßstab wurden zwei VEGAS-Großbehälter befüllt. Der Versuchsstand des hier vorgestellten Experiments hat eine Grundfläche von etwa 3 m x 6 m und eine Höhe von 4,5 m (Abb. 5.2). In Anlehnung an die früheren Untersuchungen in der ungesättigten und gesättigten Bodenzone [HIESTER ET AL, 2002, 2006] wurde eine gering durchlässige Schicht (Mischung „M2“, einem Schluff ähnlich, $k_f = 1-4 \times 10^{-7}$ m/s) zwischen zwei Sandschichten ($k_f = 1 \times 10^{-4}$ m/s) eingebettet.

Für Wärmetransportuntersuchungen in der gering durchlässigen M2-Schicht wurde der Grundwasserspiegel während des Experiments an der Oberkante dieser Schicht gehalten. In der M2-Schicht wurden vier Wärmequellen in einem quadratischen Grundriss von 1 m Kantenlänge betrieben. Parallel dazu erfolgte eine Bodenluftabsaugung (BLA) in der oberen Sandsicht mit einem konstanten Fluss von 10 Nm³/h.

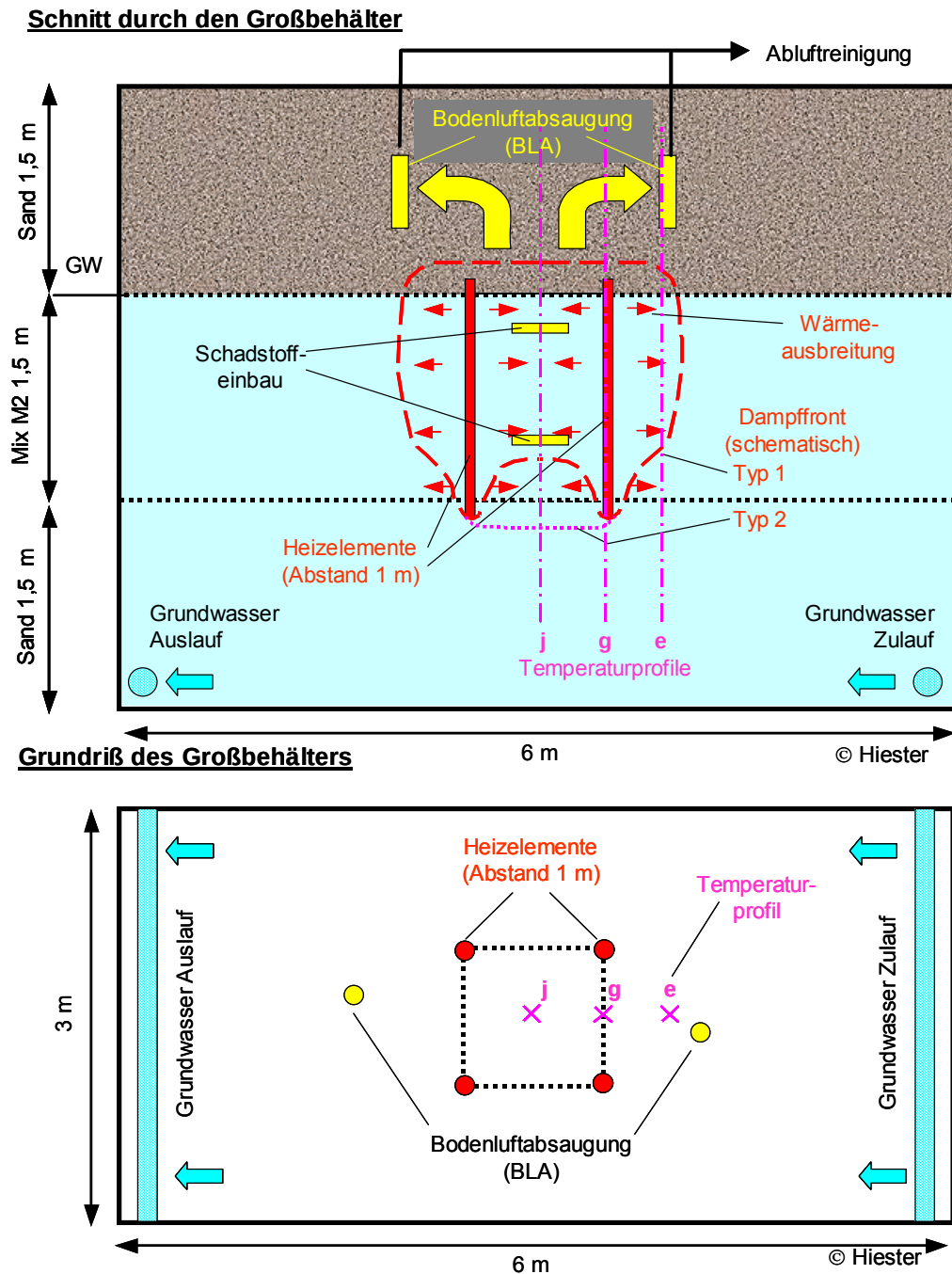


Abb. 5.2: Aufsicht und Schnitt durch einen VEGAS-Großbehälter

Über 150 Temperaturfühler und 36 korrosionsbeständige HTC-TDR-Sensoren⁶ ermöglichen die Erfassung von Temperatur und Wassersättigung im Untergrund. Ferner wurden die Grundwasserströmung, der Grundwasserspiegel, der Energieeintrag sowie die Durchflüsse der BLA kontrolliert.

⁶ high temperature and corrosion resistant – time domain reflectometry

Ziel dieses Experiments war die Quantifizierung der Untergrunderwärmung infolge unterschiedlicher Heizleistungen und Grundwasserzuflüsse. Hintergrund waren die Ergebnisse numerischer Simulationen (s.u.), die eine deutliche Interaktion zwischen diesen Versuchsrandbedingungen und dem prognostizierten Sanierungserfolg bei einem Schadstoffeinbau in späteren Versuchen erwarten ließen.

5.3.3 Begleitende numerische Simulationen

MK Tech Solutions, Inc. begleitet mit numerischen Modellierungen (Programm STARS) die experimentellen Arbeiten, um die physikalisch dominierenden, nicht-isothermen Prozesse in mathematischen Modellen abzubilden. Der von CMG, Ltd. of Calgary, Alberta, entwickelte und vertriebene Prozesssimulator STARS kann nicht-isotherme Prozesse in porösen Medien nachbilden und ist u.a. in der Erdölindustrie im Rahmen der Lagerstättenbewirtschaftung weit verbreitet.

Im laufenden Projekt dienen die Simulationen zur Planung der Versuchsstände und der Versuchsdurchführung. Die Simulationsergebnisse verdeutlichten beispielsweise den Einfluss einzelner Prozesse auf den zu erwartenden Sanierungserfolg. Im Zuge der Planung von Sanierungsexperimenten auf technischer Skala wurde u.a. ermittelt, dass verdampfter Schadstoff an der Dampffront kondensieren kann (Abb. 5.2, Schnitt). Im Sonderfall, dass die schadstoffbelastete Dampffront vom Aquitard in den darunter liegenden Aquifer eindringen würde (Abb. 5.2, Dampffront Typ 2) bestünde die Schwierigkeit, dass der hier kondensierende Schadstoff nicht mehr mit der BLA in der oberen Sandschicht extrahiert werden könnte. Abhängig von dem Einbauort des Schadstoffs (Abb. 5.2, obere / untere Schadstofflinse) und der verfrachteten Schadstoffmasse könnte sich hieraus u.U. ein unbefriedigendes Sanierungsergebnis ergeben. Abhängig vom Energieeintrag bzw. der Grundwasserströmung kann jedoch ein Dampfdurchbruch vom Aquitard in den Aquifer (Typ 2) im Versuchsstand unterbunden werden. Die genauen Randbedingungen waren experimentell zu untersuchen.

5.4 Ergebnisse der Experimente und Diskussion

5.4.1 2D-Küvetten-Experiment

Nach der PCE-Infiltration in eine Grobsandlinse zur Erzeugung einer Schadstoffquelle wurden das Injektionsrohr verschlossen und die Heizelemente (HE) in Betrieb genommen. Abb. 5.3 zeigt exemplarisch nach 1,0 und 1,5 Stunden Betriebszeit der HE die gemessene Temperaturverteilung (links) und die Visualisierung der Schadstoffverteilung (rechts). Deutlich ist zu erkennen, dass der flüssige Schadstoff in der Grobsandlinse (Abb. 5.3, oben rechts) beim Erreichen der Dampffront schnell in die Gasphase überführt wird. Nach 1,5 Stunden befand sich kein flüssiger Schadstoff mehr in der Grobsandlinse (Abb. 5.3, unten rechts). Ferner lassen sich Temperaturverteilung und Foto des Versuchsstandes gut mit einander vergleichen, da insbesondere im Grobsand

jeweils die Trocknung im direkten Umfeld der HE und die steilen Temperaturgradienten an der Dampffront gut sichtbar sind.

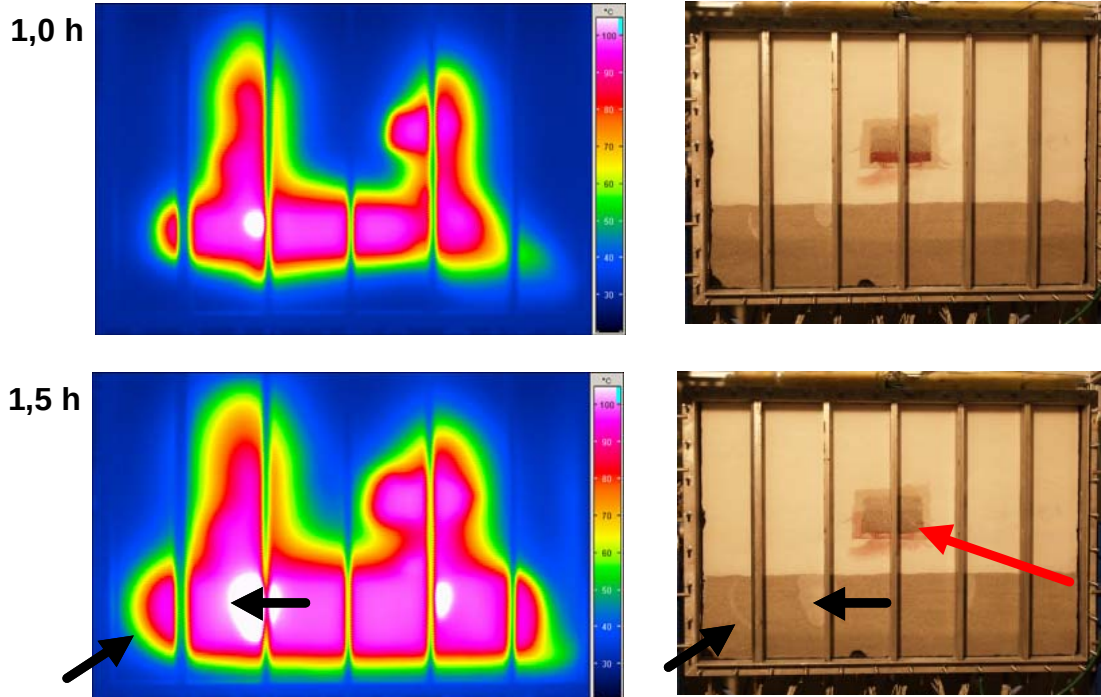


Abb. 5.3: Temperaturausbreitung (links) und Schadstoffverteilung (rechts) beim Sanierungsexperiment (© Yang)
 Die Schadstoffquelle wird beim Erreichen der Dampffront verdampft (Pfeil Mitte). Die Pfeile unten verdeutlichen die Dampffront (außen) und die Trocknung im direkten Umfeld eines Heizelements

Trotz der Verdampfung des Schadstoffs war in den ersten drei Stunden des Experiments kein Schadstoffaustrag messbar (Abb. 5.4) und anhand der Temperaturverteilung auch nicht zu erwarten, da der obere Bereich der Küvette weiterhin kühl war (Abb. 5.3, links). Der im Grundwasser infolge des HE-Betriebs erzeugte Dampfraum war hier isoliert, da allseitig von Grundwasser umschlossen. Es bestand kein Kontakt zur ungesättigten Bodenzone (UZ), weshalb der Schadstoff nicht ausgetragen werden konnte. Erst mit dem Erzeugen eines Kurzschlusses zwischen dem Dampfraum und der UZ infolge der weiteren Aufheizung konnte der Schadstoff aus dem Grundwasserbereich entweichen. Ab diesem Zeitpunkt entsprach das Austragsverhalten den Erfahrungen von THERIS-Sanierungen in der UZ [HIESTER ET AL., 2003].

Im Austrag wurden insgesamt über 92 % (298 g) des Schadstoffs wieder gefunden. Nach dem Abschluss des Experiments entnommene Bodenproben aus dem gesamten Versuchsbehälter enthielten jedoch insgesamt nur 0,06 % (0,2 g) der initialen Schadstoffmasse. Die Differenz in der Austragsbilanz ist daher auf Messungenauigkeiten zurück zu führen.

Das Experiment verdeutlicht, dass mit festen Wärmequellen eine effiziente Schadensherdsanierung auch im Grundwasser möglich ist. Essenziell ist hierbei, dass der im Grundwasser erzeugte Dampfraum von der Bodenluftabsaugung erfasst werden kann.

Üblicherweise wird dieses bei einem Kontakt zwischen Dampfraum und natürlicher ungesättigter Zone der Fall sein.

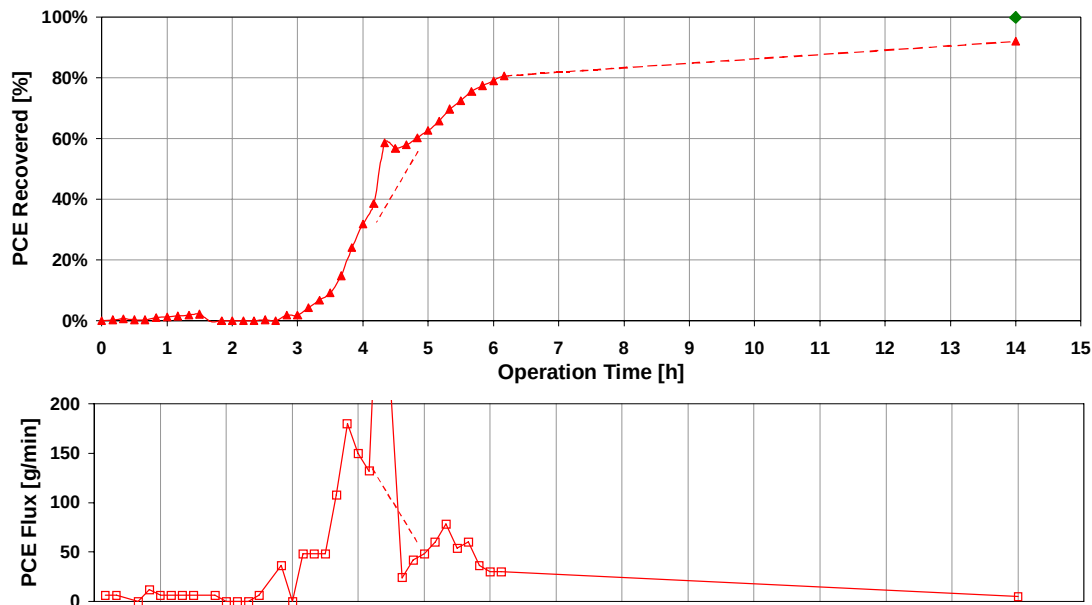


Abb. 5.4: Zeitlicher Verlauf der Summenkurve des Schadstoffaustrags (oben) und der Schadstofffracht (unten)

Die gekoppelten Strömungs- und Wärmetransportvorgängen in einem Mehrphasensystem sind komplex, zumal die Spanne der Einflussfaktoren groß ist. Diese Parameter werden daher in Modellrechnungen derzeit weiter untersucht, um die Prognosemodelle für die technische Skala zu verbessern.

5.4.2 3D-Großbehälter-Experiment

Auf technischer Skala wurde der Einfluss des Energieeintrags und des Grundwasserzustroms auf die Untergrunderwärmung und im Besonderen auf die Ausbreitung der Dampffront im unteren Bereich untersucht (Abb. 5.2, Dampffront Typ 1 / 2). In Abb. 5.5 sind exemplarisch die annähernd stationären Temperaturverteilungen zum Ende der jeweiligen Versuchsphase in zwei Profilen dargestellt.

Erwartungsgemäß machte sich eine Erhöhung des Energieeintrags von 2 kW auf 6 kW (Abb. 5.5, Phase 0 und 1a) vornehmlich im Bereich der Einbauhöhe der HE bemerkbar (hier also im gering durchlässigen M2-Material), während sich eine Änderung der Grundwasserströmung vornehmlich auf die Temperaturen im Aquifer (untere Sandschicht) und die angrenzenden wenigen Dezimeter im M2-Material auswirkte.

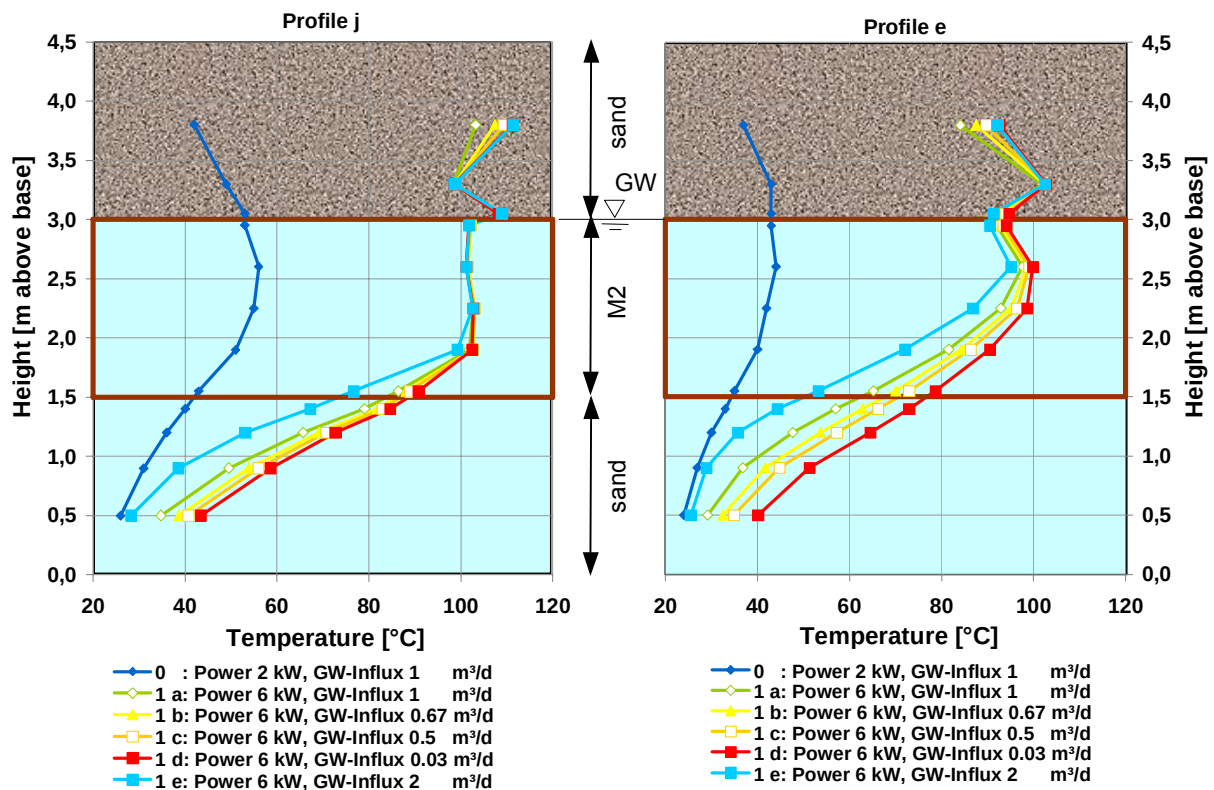


Abb. 5.5: Stationäre Temperaturverteilung bei unterschiedlichen Randbedingungen im Mittelpunkt zwischen den HE (Profil j) und 0,5 m außerhalb des späteren Sanierungsbereichs (Profil e) (vgl. Lagepläne in Abb. 5.2)

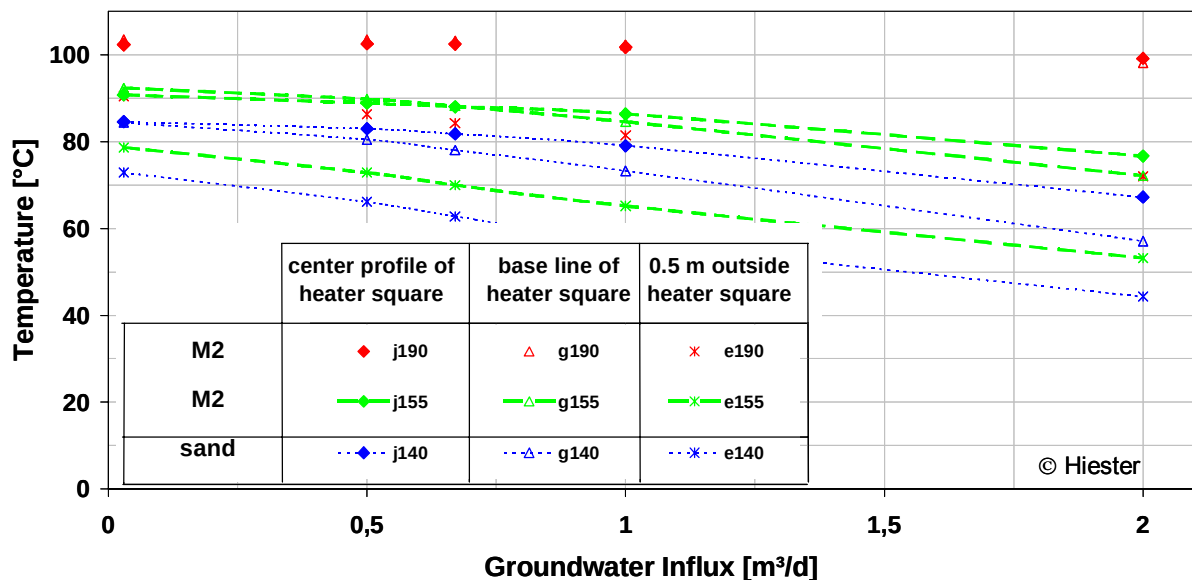


Abb. 5.6: Zusammenhang zw. stationärer Temperaturverteilung und Grundwasserzustrom im Mittelpunkt zwischen den HE (Profil j), zwischen zwei HE (Profil g) und 0,5 m außerhalb des späteren Sanierungsbereichs (Profil e) (vgl. Abb. 2). Profil-Nr. entspricht der Einbauhöhe (z.B. j190 = Profil j, Höhe 190 cm über d. Boden)

Die stationären Temperaturen je Versuchsphase sind in Abb. 5.6 über dem Grundwasserzustrom aufgetragen. Im Sand (Höhe 1,40 m, z.B. j140) und an der Unterseite der M2-Schicht (1,55 m) änderten sich die Temperaturen infolge der Grundwasserströmung sowohl außerhalb (Profil e) als auch zwischen der HE-Anordnung (Profile j & g). In der Höhe 1,90 m waren die Temperaturänderungen zwischen den HE (Profile j & g) nur noch gering, während sie sich außerhalb der HE-Anordnung (Abb. 5.5, Profil e) in der gesamten M2-Schicht änderten. Eine detaillierte Auswertung der Strömungs- und Wärmetransportprozesse bei diesem derzeit noch nicht abgeschlossenen Experiment erfolgt derzeit mit Hilfe verbesserter numerischer Simulationen.

5.5 Zusammenfassung und Ausblick

Wie die kleinskaligen Untersuchungen, von denen ein Experiment hier vorgestellt wurde, gezeigt haben, sind feste Wärmequellen prinzipiell dazu geeignet, ähnlich wie in der ungesättigten Bodenzone Schadensherde effizient auch in gering durchlässigen, wassergesättigten Schichten zu sanieren. Hierzu ist jedoch eine gute Kenntnis der Randbedingungen erforderlich, da sich diese deutlich auf die Erwärmung des Untergrundes und den Sanierungsverlauf auswirken können. Zur effizienten Sanierung muss der im Grundwasser erzeugte Dampfraum eine Verbindung zur BLA haben, damit die Schadstoffe in der Gasphase abgesaugt werden können. In den kleinskaligen Sanierungsexperimenten wurde keine Mobilisierung von flüssiger Schadstoffphase beobachtet. Allerdings kann im technischen Maßstab gegebenenfalls die Kondensation von schadstoffbelastetem Dampf im Bereich der Dampffront den Schadstoffaustrag vermindern oder verzögern. Dieses wird Gegenstand der weiteren Untersuchungen sein.

Unter den gewählten Randbedingungen wurde im technischen Maßstab eine Migration der Dampffront in den unteren Aquifer nur im direkten Nahfeld der HE beobachtet. Die Untersuchungen verdeutlichen, dass eine enge Vernetzung von numerischen und experimentellen Untersuchungen für ein umfassendes Prozessverständnis unerlässlich ist. Die Details werden derzeit ausgewertet, um im nächsten Schritt Sanierungsexperimente auf technischer Skala zu planen und umzusetzen.

5.6 Danksagung

Dem Strategic Environmental Research and Development Program (SERDP) sei herzlich für die Finanzierung dieser Forschung gedankt.

5.7 Literatur

- Davis, Eva L. 1997. "How Heat Can Enhance In-situ Soil and Aquifer Remediation: Important Chemical Properties and Guidance on Choosing the Appropriate Technique." USEPA/540/S-97/502. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, USA.
- Hiester, U., H.-P. Koschitzky, O. Trötschler, A. Färber, R. Baker, J.C. LaChance, G. Heron, and M. Kuhlman. 2006. "Thermal Well Operation in the Saturated Zone – New Options for DNAPL Remediation." J. Land Contamination and Reclamation. 14(2):615-619. Excerpts reprinted by permission of EPP Publications, Ltd., London.
- Hiester, U., Theurer, T., Winkler, A., Färber, A., H. Koschitzky H.-P. 2003: "THERIS: Sanierung der ungesättigten Bodenzone mittels fester Wärmequellen." Symposium Ressource Fläche und VEGAS - Statuskolloquium 2003, Universität Stuttgart, Institut für Wasserbau, Heft 124, pp. 173-183, Schrenk, V., Batera, K. Barczewski, B., Weber, K. & H.-P. Koschitzky, ISBN 3-933761-27-1
- Hiester, U., T. Theurer, A. Winkler, and H.-P. Koschitzky. 2002. "Large-scale Experiments to Develop a Thermally Enhanced Remediation Technology." Proceedings of the Third International Conference in Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds, Monterey, USA, May 22-26, 2002. Battelle, Columbus, OH.
- Li, J. 2004. Experimental Investigation on Thermally Induced Buoyancy Flow in Porous Media, Masters Thesis, University of Stuttgart, Institute of Hydraulic Research, Thesis-supervision Arne M. Färber, Olaf A. Cirpka, Stuttgart, Germany.
- Mark, J. 2005. Permeability and Grain Size Relationships, M.S. Thesis, Earth Science Department, Göteborg University, Sweden.
- Stegemeier, G.L., and H.J. Vinegar. 2001 "Thermal Conduction Heating for In-Situ Thermal Desorption of Soils." In C. Oh (Ed.), Hazardous and Radioactive Waste Treatment Technologies Handbook, pp. 1-37. CRC Press, Boca Raton, FL.
- Udell, K.S. 1985. "Heat transfer in porous media considering phase change and capillarity - the heat pipe effect." International Journal of Heat and Mass Transfer, 28: 485-494.

6 Pilotanwendung DLI Zeitz: Erste Ergebnisse der thermischen Sanierung des Kernbereichs eines Benzolschadens mittels Dampf-Luft-Injektion

Oliver Trötschler, Hans-Peter Koschitzky, Berit Limburg, VEGAS, Universität Stuttgart
Markus Hirsch, Holger Weiß, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ,
Leipzig

6.1 Einleitung

Im Rahmen des Forschungsprojektes SAFIRA II wird in einem Teilbereich des Benzolschadens auf dem Gelände des Ökologischen Großprojektes des Landes Sachsen – Anhalt *ehemaliges Hydrierwerk Zeitz* eine pilotmaßstäbliche thermische In-Situ-Sanierung mittels Dampf-Luft-Injektion (DLI) und Fester Wärmequellen (THERIS) bei gleichzeitiger Bodenluftabsaugung (BLA) durchgeführt.

Mit dem bei VEGAS entwickelten und zwischenzeitlich praxiserprobten thermischen In-Situ-Sanierungsverfahren der Dampf-Luft-Injektion in die gesättigte Zone können, im Falle mittlerer Durchlässigkeiten des Aquifers, simultan Schadensherde in der gesättigten und ungesättigten Bodenzone und im dazwischen liegende Kapillarsaum binnen weniger Monate in hohem Maße effektiv entfernt werden (KOSCHITZKY ET. AL. 2003).

Die primär verfolgte Zielsetzung der Pilotsanierung am Standort Zeitz ist die Verminderung der unterstromigen Schadstoffkonzentrationen im Grundwasser durch die Entfernung (Reinigung) eines Teilbereichs der Schadensquelle („Partial Source Removal“). Die thermische Sanierung erfolgt mit einer, für derartige Pilotsanierungen im Rahmen von übergreifenden F&E-Projekten konzipierten **mobilen** thermischen **Sanierungsanlage** in **Modulbauweise (MOSAM)**. Die von VEGAS konzipierte und gebaute Anlage ist Eigentum des UFZ und wird von VEGAS im Auftrage des UFZ betrieben. Zeitgleich werden im Rahmen von SAFIRA II, bzw. BEOQUE am Standort in Zeitz verschiedene In-situ-Technologien (RF-Heating, Air-Sparging) zur partiellen Herdsanierung vergleichend untersucht. Diese Untersuchungsergebnisse werden unmittelbar im Rahmen der engen Kooperation zwischen dem UFZ und der für die Altlastensanierung im ÖGP zuständigen Behörde, der Landesanstalt für Altlastenfreistellung des Landes Sachsen-Anhalt, in die weitere Entwicklung des Sanierungskonzeptes für das ÖGP integriert.

6.2 Standortbeschreibung

Das Schadenzentrum liegt im Bereich der ehemaligen Benzolfabrik mit angeschlossenen Betriebseinrichtungen, dem Tanklager und der Bahnverladung. Neben Schäden durch Kriegseinwirkung sind Leckagen und Havarien beim Betrieb der Benzolanlage als Ursache des Grundwasserschadens (Benzolkonzentrationen im Bereich der Löslichkeit) zu nennen. Im Rahmen des Rückbaus der Altanlage wurden die oberen Bodenschichten (2 – 3 m) ausgetauscht.

Am Standort steht daher zunächst eine ca. 2 – 2,5 m mächtige Auffüllung an. Darunter steht eine ca. 2,5 m mächtige fein- bis mittelsandige, leicht schluffige Schicht ($k_f \sim 0,5 \times 10^{-4}$ m/s) an (s. Abb. 6.1), die ab ca. 144,5 m NN von einer Schluffschicht begrenzt wird. Die Mächtigkeit der Schluffschicht beträgt ca. einen Meter. Darunter steht der eigentliche Grundwasserleiter aus sandigem Fein- bis Grobkies ($k_f \sim 5 \times 10^{-4}$ m/s) an, wobei feinklastische Lagen (Mittelsand, $k_f \sim 1 \times 10^{-4}$ m/s) in den Teufen 6,5 – 8,5 m u. GOK angetroffen werden. Die Unterkante des GWL liegt bei 11,5 – 12,5 m u. GOK. Der Wasserspiegel liegt etwa bei 8,5 m u. GOK.

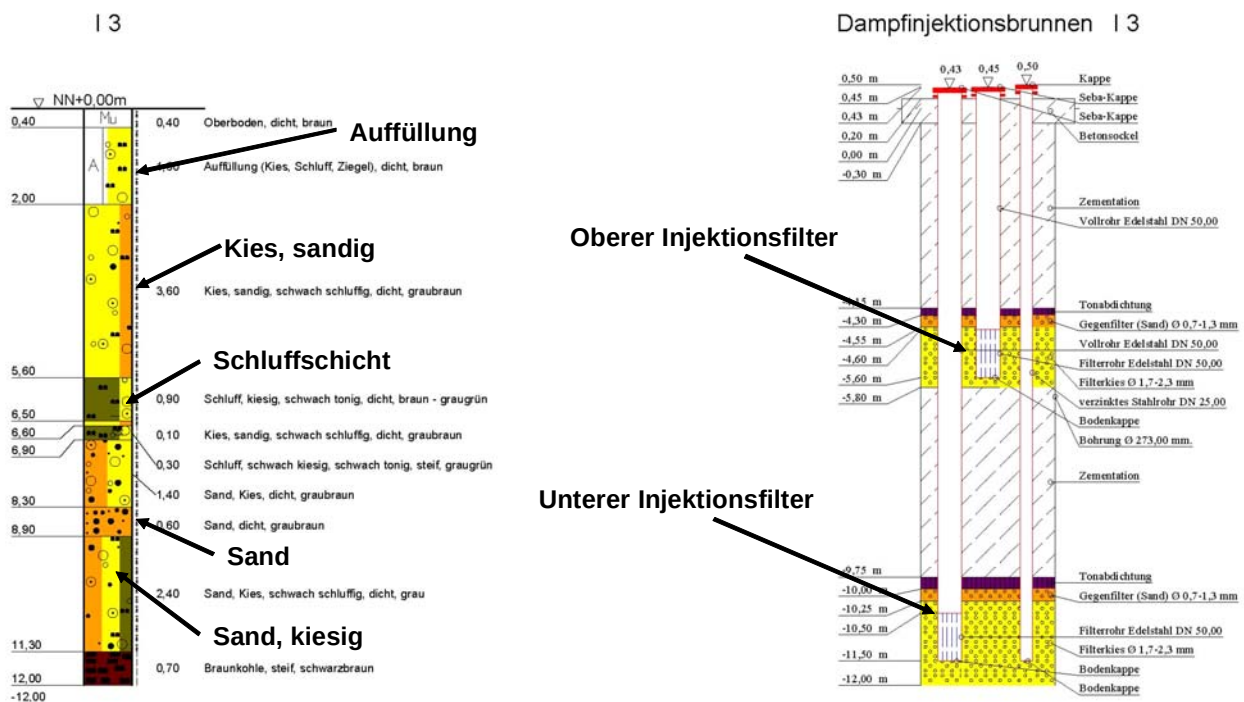


Abb. 6.1: Bohrprofil und Brunnenbau Injektionsbrunnen I3

Am Standort konnten Konzentrationen in der ungesättigten Bodenzone und im Grundwasserwechselbereich im g/kg-Bereich bestimmt werden. Während der Bohrmaßnahmen zur Erschließung des Pilotfelds wurden insgesamt 28 Bodenproben als Mischprobe aus unterschiedlichen Tiefenbereichen gewonnen. Es wurden hohe Konzentrationen im oberen Grundwasserbereich (9 – 10 m Tiefe) festgestellt. An den meisten Brunnenbohrstellen wurden erhöhte Werte im Bereich der Schluffschichten (5 – 7 m

Tiefe) bestimmt. Im Mittel lagen die Benzolkonzentrationen bei ca. 55 mg/kg Boden (BTEX: 61 mg/kg.) Angesichts der verlustbehafteten Probenahme kann die Schadstoffmasse auf ca. 1700 kg Benzol im Bereich der Pilotanwendung mit ca. 1500 m³ zu behandelndem Boden abgeschätzt werden.

Grundwasserproben aus den umliegenden Überwachungsbrunnen zeigen Benzolkonzentrationen zwischen 370 mg/L (oberstromig) und unterstromig der Pilotfläche im Bereich der maximalen Löslichkeit von Benzol von 1,3 g/L.

6.3 Sanierungskonzept am Pilotstandort

Zwei thermisch unterstützte Sanierungsverfahren: Dampf-Luft-Injektion (TUBA, DLI) und thermische In-Situ-Sanierung mit elektrischen Heizelementen (THERIS) werden zur Erwärmung des Bodens auf „Eutektische Temperatur“ des Benzols (75°C) mit zeitgleicher Bodenluft- und Grundwasserentnahme eingesetzt, s. Abb. 6.1.

Grundsätzlich werden die organischen Schadstoffe durch die Aufheizung im Boden und im Grundwasser verdampft und mittels der Bodenluftabsaugung gasförmig aus dem Boden entnommen.

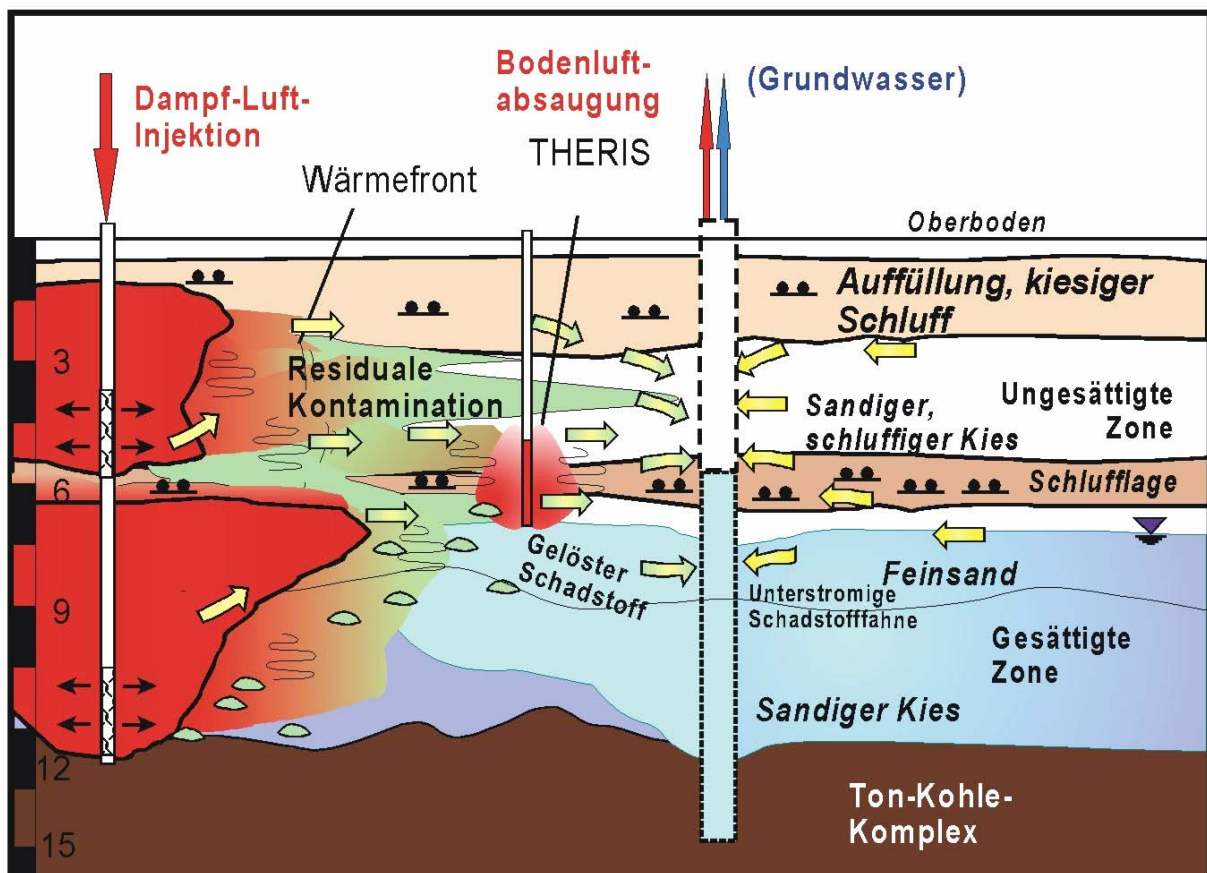


Abb. 6.2: Prinzipskizze DLI & THERIS, Standort Zeitz

Bei der DLI dient der in die mitteldurchlässigen Bodenschichten injizierte Dampf als Energieträger zur Erwärmung des ungesättigten oder gesättigten Untergrunds, während der Luftanteil als inertes Trägergas dem Transport der Schadstoffe in Richtung Bodenluftextraktionsbrunnen dient. Im Gegensatz zur Luftausbreitung bei der reinen Luftinjektion (Airsparging) im Grundwasser (fingering) entwickelt sich die Ausbreitungsfront des injizierten Dampf-Luft-Gemisches aufgrund der Wärmeabgabe des heißen Wasserdampfs an den Boden homogener und langsamer. THERIS wird in der ungesättigten Bodenzone in den schlecht durchlässigen Bodenschichten eingesetzt, um die Schadstoffe über konduktive Erwärmung des Bodens zu verdampfen.

Zur Unterscheidung der ausgetragenen Schadstoffmassen aus der ungesättigten und gesättigten Zone wird die Dampf-Luft-Mischung (90 – 110°C) im ersten Schritt in die ungesättigte Zone injiziert: oberer Filterbereich (Abb. 6.1, Abb. 6.2). Nach Dampfdurchbruch an den Extraktionsbrunnen und deutlichem Rückgang der Schadstoffkonzentrationen auf Werte $< 1 \text{ g/m}^3$ extrahierter Bodenluft wird die Dampf-Luft-Mischung in die gesättigte Zone injiziert.

Als Sanierungszeitraum kann aufgrund der Energiebilanz und der gesonderten Behandlung der ungesättigten und gesättigten Zone ein Zeitraum von vier Monaten Dampf-Luft-Injektion angesetzt werden.

6.4 Durchführung der Pilotinjektion

6.4.1 Erschließung des Sanierungsfelds

Die Pilotanwendung erfolgt auf einem Sanierungsfeld mit einer Grundfläche von ca. 15 x 9 m und einer Tiefe von ca. 11,5 m, s. Abb. 6.3.

Das Sanierungsgebiet ist in drei etwa gleichgroße Parzellen unterteilt, die nacheinander thermisch behandelt werden, beginnend im Nordosten (I1), dann ein Wechsel nach Südwesten (I2) und abschließend in der Mitte (I3).

Das Sanierungsfeld ist erschlossen durch:

- 3 Injektionsbrunnen mit je 2 Injektionsfilter zwischen 4,5 – 6 m und 10 – 11,5 m u. GOK
- 6 Bodenluftbrunnen, teilweise mit leichter Grundwasserhaltung, vollverfiltert 1 – 10 (11) m. u. GOK
- 8 elektrische Heizelemente mit je 1,5 kW-Leistung, beheizte Teufe: 4,5 – 6 m u. GOK.
- 20 Temperaturmesslanzen (Pt100), radialsymmetrisch um Injektionsbrunnen und im Ringraum der Extraktionsbrunnen zur Temperaturüberwachung (121 Messstellen)

- Zusätzlich sind 20 kleinskalige Überwachungsbrunnen um das Sanierungsfeld zur Kontrolle der Emissionen angeordnet.



Als innovative und kostengünstige Alternative zur Messung der Temperaturverteilung über Temperaturmesslanzen (Pt100) wird ein geophysikalisches Verfahren als essentielles Werkzeug zur Überwachung und Steuerung der Dampfausbreitung angewendet. Mittels elektrischen Widerstandsmessungen wird der Einflussbereich des injizierten Dampfes festgestellt. Da eine Temperaturänderung eine direkte Änderung des elektrischen Widerstandes zur Folge hat, ist es möglich die Bereiche, die von aktiver Sanierung betroffen sind von Bereichen abzugrenzen die keine Dampf-Luft-Durchströmung erfahren. Vergleiche von elektrischen Widerstandsmessungen mit Temperatur- und geologischen Profilen zeigen, dass mit Hilfe der Messung des elektrischen Widerstands wasserdampfgesättigte Bereiche, und somit die Bereiche der Wirksamkeit des Dampf-Injektionsverfahrens lokalisiert werden können. Eine deutliche Abnahme des elektrischen Widerstandes in den von Wasserdampf erhitzen Bereichen ist durch Kondensation von Wasserdampf an den Kornoberflächen des Bodenmaterials zu erklären. Ein zweiter, die Widerstandsverteilung bestimmender Faktor, ist die durch den Dampf-

eintrag hervorgerufene Temperaturänderung, die sich mit der elektrischen Widerstandsverteilung korrelieren lässt.

Einen innovativen Messansatz an diesem Standort stellt die Verwendung von versenkten Elektroden (Bohrlochelektroden) dar, denn hierdurch wird eine deutlich verbesserte Auflösung der Untergrundes gegenüber der Verwendung von reinen Oberflächenelektroden erreicht.



Abb. 6.4: MOSAM (oben) und Ausstattung Sanierungsfeld

Die Sanierungsanlage (Abb. 6.4) ist mit einem Datenerfassungssystem mit Funkmodem ausgestattet, das eine Online-Überwachung aller kritischen Anlagenparameter (Drücke, Temperaturen, Volumenströme (Dampf, Luft, Wasser)) und Schadstoffkonzentrationen erlaubt. Zusätzliche Sicherheitsmaßnahmen wurden infolge der Explosionsgefahr bei der Förderung explosibler Gase (benzolhaltige Bodenluft) entsprechend ATEX getroffen. Die Schadstoffkonzentrationen werden online mittels PID (Ex-Schutz), sowie im Stundentakt über einen Prozess-GC bestimmt.

Fachkundiges Personal betreut und steuert die Anlage 3 x wöchentlich vor Ort. Der Betrieb erfolgt automatisch, die Anlage wird täglich durch die Online-Überwachung sei-

tens VEGAS kontrolliert. Die Anlage wird im zweiwöchigen Rhythmus gewartet und die messtechnische Ausrüstung kalibriert. Neben der Beprobung der einzelnen Bodenluftbrunnen werden repräsentative Wasserproben des geförderten Grundwassers und an der Übergabestelle zur Kanalisation (Wasseraktivkohle) genommen und analysiert. Kontrollmessungen der gasförmigen Proben (Abluftbehandlung) erfolgen im zweiwöchentlichen Turnus.

6.4.2 Versuchsdurchführung und Versuchsphasen

Die In-situ-Sanierung untergliedert sich in mehrere Phasen:

- Phase 1:** Bodenluftabsaugung und Grundwasserhaltung,
Dauer: 3 Wochen
Ungesättigte Bodenzone über Bodenluftabsaugung (50 – 200 kg/h),
Grundwasser über unterstromige GW-Entnahme an GWL1 und EK5.
Die Bodenluft wird mittels einer thermischen Nachverbrennungsanlage (s. Abb. 6.4) behandelt.
- Phase 2:** Bodenluftabsaugung, Grundwasserhaltung und Air-Sparging,
Dauer: 3 Wochen
Gesättigte Bodenzone mittels Air-Sparging: 20 Nm³/h, Pulsgabe 10/30 min, über die unteren Injektionsebenen in den Aquifer injiziert.
- Phase 3:** Dampf-Luft-Injektion und THERIS,
Dauer: ca. 16 Wochen
- Phase 3.1:** 6 Wochen:
 ungesättigte Bodenzone mit Injektionsraten zwischen 80 – 150 kg/h Dampf (max. 120 kW) und 40 – 70 m³/h Luft.
 Ziel: mittlere Temperatur im Sanierungsfeld > 75 °C
- Phase 3.2:** 10 – 12 Wochen:
 gesättigte Bodenzone und Schlufflagen mit maximalen Injektionsraten (120 kW und 70 m³/h Luft):
 Ziel: mittlere Temperatur im Sanierungsfeld > 60°C,
 radiale Ausbreitung der Dampffront in gesättigter Zone > 2,5 m
 Rückgang der Benzolkonzentrationen < 450 mg/m³ Bodenluft
- Phase 4:** Abkühlungsphase,
Dauer: ca. 6 Wochen

Infolge der sequentiellen Behandlung der Sanierungsfläche erfolgt die Abkühlung des Sanierungsfelds quasi kontinuierlich mit Fortschreiten der Sanierung. Zur Intensivierung der Abkühlung wird weiterhin Druckluft für die Dauer von 3 – 4 Wochen injiziert werden (Air-Sparging) mit 50 – 70 m³/h. Die Abkühlphase ist beendet, wenn Temperaturen < 35 °C erreicht sind.

6.5 Erste Ergebnisse der Pilotinjektion

Die Pilotsanierung wurde Anfang Mai mit dem Betrieb der kalten Bodenluftabsaugung begonnen. Aus Ex-Schutz-Gründen wurde der Anteil an Bodenluft aus dem Pilotierungsfeld an der Gesamtförderrate zunächst sehr gering gehalten (max. 10%), jedoch sukzessive erhöht. Bedingt durch die Verdünnung lag die maximale tägliche Austragsrate bei 110 kg Benzol. Während Phase 2 fiel die Extraktionsleistung auf ca. 80 kg/d. Nach 3 Wochen Dampf-Luft-Injektion konnten noch ca. 70 kg/d extrahiert werden.

Bereits zu Beginn der Pilotierung innerhalb der dreiwöchigen Bodenluftabsaugungsphase konnte ein hoher Anteil Benzol entfernt werden: 2130 kg. Dies ist erheblich mehr Masse als durch die Bodenproben im Sanierungsfeld erwartet wurde und liegt in der Reichweite der Bodenluftabsaugung begründet.

Das für eine „kalte“ Bodenluftabsaugung (Phase 1) typische logarithmische Abklingverhalten der Bodenluftkonzentrationen konnte mit Anfangswerten um 70 g/m^3 Benzol fallend auf ca. 25 g/m^3 festgestellt werden, s., gestrichelte Linie Abb. 6.5.

Der Rückgang der Brunnenluftkonzentrationen setzte sich während Phase 2, dem Air-Sparging fort. Bei intervallweiser Luftinjektion in Feld 1 und 2 fielen die Konzentrationen mit einem logarithmischen Verlauf ab und lagen vor Umschaltung auf Feld 3 bei ca. $16 \text{ g Benzol / m}^3$ Bodenluft. Mit Beginn des Air-Spargings in Feld 3 stiegen die Konzentrationen der Brunnenluft auf Werte um 25 g/m^3 für die Dauer von mehreren Tagen an. Zum Ende von Phase 2 lagen die Werte um 15 g/m^3 . Insgesamt konnten in 3 Wochen 1890 kg Benzol extrahiert werden. Das dreiwöchige Air-Sparging zeigte sich hinsichtlich einer Steigerung des Schadstoffaustrags als weniger effizient als erwartet.

Während Phase 3.1 konnte stets zu Beginn der Injektion der Dampf-Luft-Mischung in das jeweilige Sanierungsfeld ein Anstieg der Konzentrationen, teilweise über mehrere Tage festgestellt werden. Prinzipiell fielen die Konzentrationen der Bodenluft weiterhin ab, jedoch wesentlich langsamer als die Extrapolation der logarithmischen Abklingkurve der Phase 1 ergab, siehe Abb. 6.5. Eine deutliche Erhöhung des Austrags ergab die Erhöhung der Luftinjektionsrate am 02.07.07 (60,5 Tage). Bis zum Ende der Injektion in die ungesättigte Bodenzone am 02.08.07 (6 Wochen Dampfinjektion) konnten ca. 2290 kg Benzol ausgetragen werden. Die Benzolkonzentrationen in der Bodenluft lagen bei Umstellung auf die Injektion in die gesättigte Zone kleiner 1 g/m^3 .

Abgeschätzt aus dem „typischen Abklingverhalten“ und der tatsächlich extrahierten Masse ergibt sich seit Beginn der Dampf-Luft-Injektion in die ungesättigte Zone bis zum Schnittpunkt der beiden Kurven am 25.07.07 eine theoretisch extrahierbare Masse mittels kalter Bodenluftabsaugung von ca. 1550 kg Benzol. Dies sind ca. 630 kg weniger als tatsächlich ausgetragen wurden. Aufgrund der Lage des Pilotfelds kann diese Masse der ungesättigten Zone des thermisch sanierten Pilotfelds zugeordnet werden.

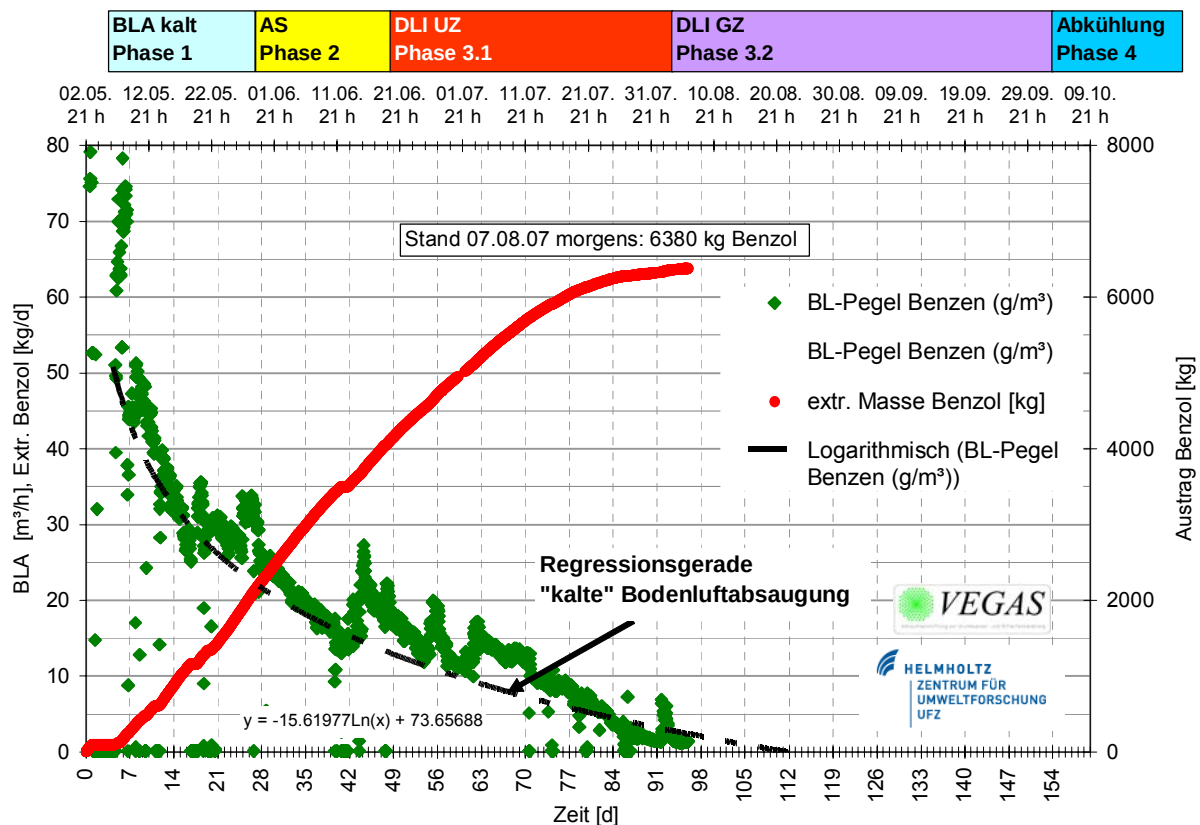


Abb. 6.5: Verlauf Benzolkonzentrationen und Massenbilanz Phase 1 - 3.1

Die Dampfausbreitung in der ungesättigten Zone erfolgte homogen (radial symmetrisch) im Bereich von I2 und I3. Um I1 strömte der Dampf bevorzugt in Richtung EK2, EK2 und GWL1. Durch Injektion eines Teils der Dampfmenge in EK3 konnte dieser Bereich gezielt auf die angestrebte Temperatur in der ungesättigten Zone von 85°C erwärmt werden, s. Abb. 6.6. Entsprechend der Zuschaltung der Brunnen I1o → I2o → I3o wurde Dampf mit einer Leistung von 50 → 100 → 120 kW injiziert. An I2 musste die Injektionsrate aufgrund hoher Injektionsdrücke (> 2 bar) auf 20 kW begrenzt werden.

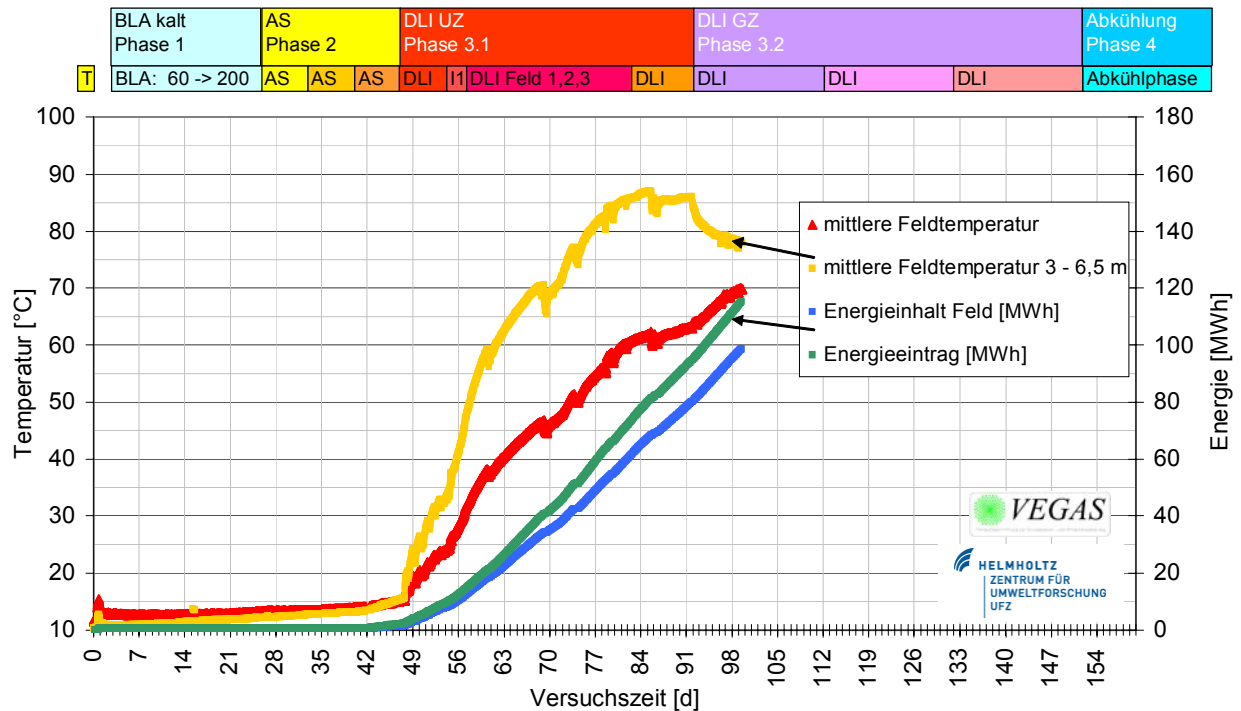


Abb. 6.6: Erwärmung des Sanierungsfelds und Energieeinsatz

Zum Ende der Dampf-Luft-Injektion in die ungesättigte Zone wurden ca. 90 MWh an thermischer Energie (ca. 7 ct./kWh) eingesetzt, über die Bodenluftabsaugung wurden ca. 10 MWh dem Sanierungsfeld entzogen (Abb. 6.6).

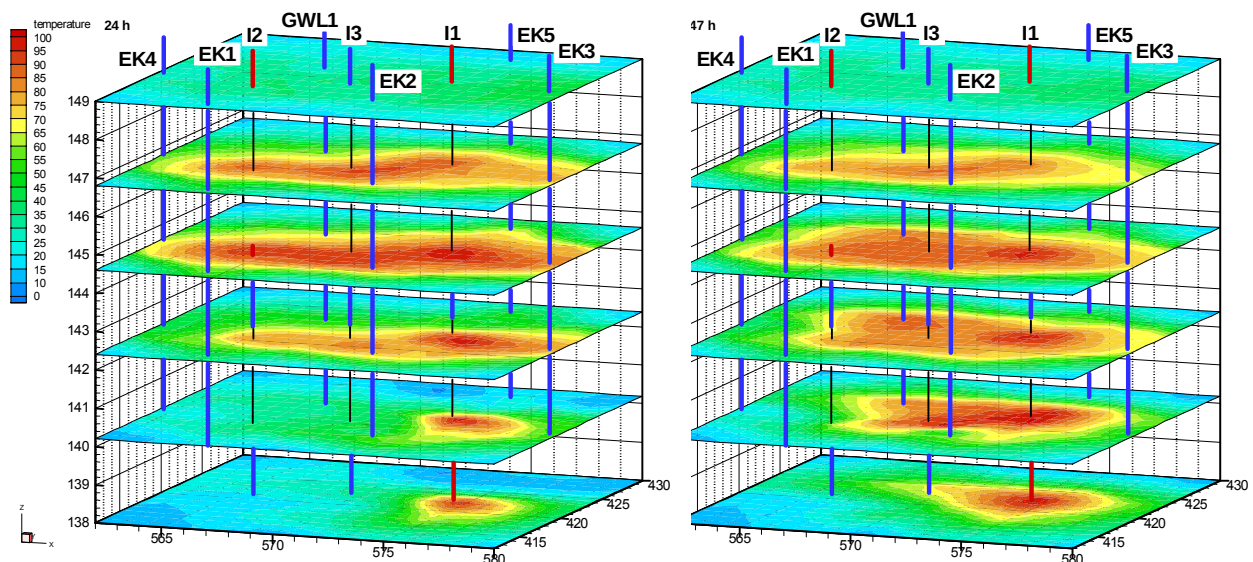


Abb. 6.7: Dampfausbreitung 24 h und 6 Tage nach Start Injektion in I1u

Zurzeit wird das Dampf-Luft-Gemisch (150 kg/h Dampf + 80 kg/h Luft) über I1u in die gesättigte Zone auf Höhe des anstehenden Ton-Kohle-Komplexes (9,5 – 10,5 m u.

GOK) injiziert. Bereits nach 6 Tagen konnte der Dampfdurchbruch auf einer Tiefe zwischen 8 – 10 m u. GOK an den Extraktionsbrunnen GWL1, EK2 und EK5 bestimmt werden, Abb. 6.7, rechts. Die „thermische“ Reichweite liegt am Standort größer 5,5 m. Die Wärmeverteilung nach Ende der Injektion in die ungesättigte Zone, 24 h nach Start der Injektion in die gesättigte Zone ist in Abb. 6.7 links dargestellt.

6.6 Zusammenfassung und Ausblick

Auf dem Gelände einer ehemaligen Benzolfabrik wird im Rahmen des Forschungsvorhabens SAFIRA II eine thermische Pilotsanierung durchgeführt. Es soll die Auswirkung einer teilweisen Sanierung des Schadensherds („Partial Source Removal“) auf die Schadstoffemission untersucht werden. Das Schadstoffinventar im Pilotfeld (ca. 1500 m³) wurde zu Beginn der Sanierung auf 1700 kg Benzol abgeschätzt. Eine erste große Schadstoffmenge konnte bereits während Phase 1 (kalte Bodenluftabsaugung: 2100 kg) entfernt werden. Während Phase 2 (Air-Sparging) konnte eine geringe Steigerung des Austrags erzielt werden (insgesamt 1900 kg). Während der Injektion der Dampf-Luft-Mischung in die ungesättigte Zone wurden weitere 2300 kg Benzol entfernt. Die Benzol-Konzentrationen in der Bodenluft nahmen kontinuierlich ab: von ca. 70 g/m³ auf Werte unter 1 g/m³ zu Beginn der derzeit betriebenen Injektion in die gesättigte Zone. Aufgrund erhöhter Benzolkonzentrationen im Bereich des oberen Aquifers und des Kapillarsaums ist mit einem nochmaligen Anstieg der Austragsraten zu rechnen. Die „thermische“ Reichweite (horizontale, radiale Dampfausbreitung) in der gesättigten Zone liegt derzeit bei 5,5 m, mit einer Injektionsrate von ca. 220 kg/h Dampf-Luft. Die Injektion in die gesättigte Zone wird abschnittsweise weiter geführt. Mit einem Ende der Sanierung (mittlere Temperatur im Pilotfeld > 75 °C) ist im September 2007 zu rechnen. Die Pilotsanierung soll nach der Abkühlphase im November 2007 abgeschlossen werden.

6.7 Danksagung

Die Forschungsarbeiten zur pilothaften thermischer Sanierung werden im Rahmen des Forschungsvorhabens SAFIRA II mit finanzieller Unterstützung durch das Helmholtz Zentrum für Umweltforschung UFZ, Leipzig durchgeführt.

6.8 Literatur

KOSCHITZKY, H.-P., FÄRBER A., TRÖTSCHLER O., STEIDINGER S., 2003: Thermisch unterstützte In-situ-Sanierung der Untergrundverunreinigung durch Perchlorethylen (PCE) auf dem ehemaligen Betriebsgelände "Werk III" der Mettler-Toledo (Albstadt) GmbH in Albstadt-Ebingen, Zollernalbkreis 12/2003. –

Abschlußbericht, Technischer Bericht TB 2004/16, Universität Stuttgart, Institut für Wasserbau, VEGAS

Ein besonderer Dank gilt Thomas Haslwimmer für die Unterstützung beim Bau von MOSAM und der Inbetriebnahme in Zeitz.

7 Injektion von Nano-Eisen zur LHKW-Sanierung – Ergebnisse aus VEGAS-Laboruntersuchungen

Cjestmir de Boer, Norbert Klaas, Jürgen Braun, VEGAS, Universität Stuttgart

7.1 Einleitung

Der Aufbau reaktiver Wände ist häufig aufwändig und beschränkt sich auf nicht tief liegende und gut erreichbare Fahren. In großer Tiefe oder schlecht erreichbaren Fällen wird nach wie vor auf Pump-and-Treat Sanierungsverfahren gesetzt. Diese Methode muss aber auf unbestimmte Zeit (oft viele Jahrzehnte) aktiv betrieben werden, was erhebliche Unterhalts- und Betriebskosten verursacht.

Eine noch relativ junge Variante ist die Injektion von elementarem Eisen als Nano-Partikel. Auf dem Markt gibt es inzwischen Nano-Eisen in Größen von 30 bis 100 nm. Ein großer Vorteil ist, dass diese Partikel eine sehr große spezifische Oberfläche haben ($\sim 30 \text{ m}^2/\text{g}$), wodurch diese Partikel sehr reaktiv sind (im Vergleich: granulares Eisen hat eine spezifische Oberfläche von $\sim 0,04 \text{ m}^2/\text{g}$) [Müller et. al., 2006a]. Ein weiterer Vorteil ist, dass diese Form des Eisens als wässrige Suspension in den Untergrund gepumpt werden kann. Dies kann über vorhandene oder relativ kostengünstig anzulegende Grundwassermessstellen erfolgen, wodurch die Kosten erheblich gesenkt werden können. Darüber hinaus können mit Nano-Eisen auch andere Schadstoffe, wie z.B. Schwermetalle, anorganische Anionen (z.B. Chromat, Arsenit) und Stoffe wie Nitrotoluole sowie einige Pestizide, aus dem Grundwasser entfernt werden [Müller et. al., 2006a].

Bis jetzt ist wenig bekannt über die Transportfähigkeit von Nano-Eisen in porösen Medien. Insbesondere beim Injizieren der Nano-Eisen-Suspension gibt es unterschiedliche Angaben zur Ausbreitung. Einige Autoren berichten, dass das Nano-Eisen mehrere Meter transportiert werden kann [Gavaskar, 2005] oder sogar mit der Grundwasserströmung mitströmt [Elliott & Zhang, 2001], während in anderen Literaturstellen die Reichweite mit nur einem halben Meter angegeben wird [Müller et. al. 2006b].

7.2 Motivation (Vorversuche)

Bereits in den Jahren 2002 und 2005 wurden bei VEGAS zweidimensionale Küvettenexperimente zur Untersuchung der Ausbreitung von Nano-Eisen im Boden durchgeführt. Dazu wurde eine VEGAS-Küvette ($L \times B \times H = 100 \times 8 \times 80 \text{ cm}$) mit Sand befüllt und wassergesättigt. Die Frontseite der Küvette bestand aus einer Glasscheibe zur

visuellen Überwachung der Experimente. Auf der hinteren Seite wurden durch die Edelstahlrückwand Injektions- und Extraktionsbrunnen sowie Piezometer geführt. Über Festpotentiale am linken bzw. rechten Rand wurde eine Grundströmung von ca. 2 m/d angelegt (Abb. 7.1).

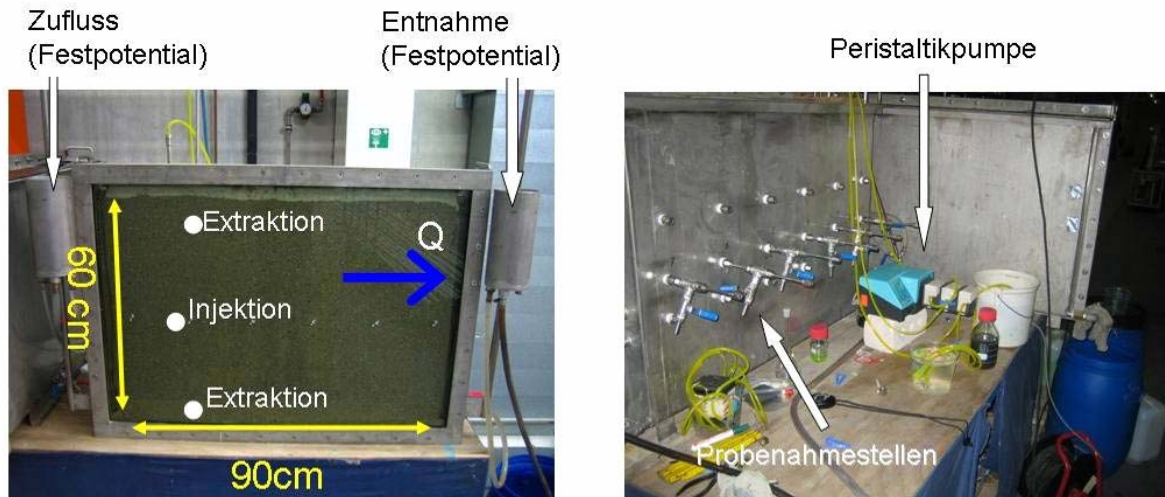


Abb. 7.1: Versuchsaufbau des 2D-Küvettenexperiments

Es konnte gezeigt werden (Abb. 7.2), dass die Injektionsweite des Nano-Eisens gegenüber einem konservativen Tracer (Uranin) sehr stark reduziert war. Diese ersten Untersuchungen legten den Schluss nahe, dass die Ausbreitungsdistanz nicht nur retardiert war, sondern dass es eine, unter anderem von der Agglomeratbildung, abhängige maximale Transportentfernung des Nano-Eisens im Boden gibt.

t = 3 Minuten

t = 12 Minuten



Abb. 7.2: Ausbreitung einer Nano-Eisen-Suspension und eines konservativen Tracers

Weiterhin konnte gezeigt werden, dass die maximale Ausbreitungsdistanz auch eine Funktion der Zusammenstellung der Nano-Eisen-Suspension ist, was wiederum auf unterschiedliche Konglomeratbildung deutet.

Ein zerstörungsfreier Nachweis der Transportentfernung der Nano-Eisen-Suspension war bei diesen Experimenten nicht möglich. Vielmehr musste auf visuelle Beobachtungen zurückgegriffen werden.

7.3 Untersuchungen (1-D) zur Mobilität von Kolloiden

Die Angaben in der Literatur bezüglich der Injektionsreichweite von Nano-Partikeln divergieren stark. Während teilweise von Reichweiten von mehreren bis zig Metern berichtet wird, konnten bei vielen Untersuchungen lediglich Reichweiten im Zentimeter- bis Dezimeterbereich nachgewiesen werden. Im Rahmen der Machbarkeitsstudie wurden in VEGAS Methoden zur systematischen Untersuchung der Reichweiten einer Nano-Eisen-Suspensionen entwickelt. Die Untersuchung basieren auf den Annahmen, dass die Mobilität und somit die Reichweite einer Injektion von Nano-Partikeln von folgenden Faktoren abhängig ist:

- Abstandsgeschwindigkeit der Injektionsströmung
- Größe der Nano-Teilchen, bzw. der Nano-Eisen-Agglomerate
- Spezifische Dichte der „Nano-Teilchen“ (z.B. bei Aktivkohle-Nano-Eisen-Composit-Partikeln)
- Elektrische Ladung der Teilchen (Zetapotential)
- Konzentration der Suspension
- Formulierung der Suspension / Beimengung von Hilfsstoffen (z.B. Tensiden)
- Alter der Suspension
- Adsorption
- Ionenstärke, Chloridkonzentration

7.3.1 Einfluss der Vorbehandlung von Kolloiden

Transportverhalten

Die Transportfähigkeit von Nano-Eisen ist nach derzeitiger Erkenntnis von vielen Faktoren abhängig. So erscheint zum Beispiel das Alter von angelieferten Suspensionen sehr wichtig zu sein. Wenn die Suspension alt ist (einige Monate) dann sind viele Partikel aggregiert und haben Konglomerate gebildet, die nicht durch Schütteln oder Rühren aufzubrechen sind.

Eine so genannte Dispergiermaschine scheint in der Lage zu sein die Agglomerate auseinander zu brechen in dem sie die Suspension bei sehr hohen Geschwindigkeiten durch enge Spalten drückt und durch die dabei wirksam werdenden Scherkräfte die Konglomerate aufbricht.

In Batch-Versuchen konnte nachgewiesen werden, dass die Sedimentationszeit nicht dispergierter Nano-Eisen-Suspensionen ungefähr ein Achtel der von dispergierten Sus-

pensionen beträgt. Die Sedimentation wurde in diesem Versuch über eine Dichtemesung verfolgt. Auch die Resultate von Säulenexperimenten zeigen, dass sich die Suspension deutlich anders verhält, nachdem sie dispergiert wurde. Hieraus kann geschlossen werden, dass die dispergierte Suspension sich beim Transport ähnlich wie eine frische Suspension verhält, d.h. dass sich die Alterung der Suspension durch eine mechanische Behandlung zumindest teilweise rückgängig machen lässt. Dies ist ein wichtiger Befund im Hinblick auf einen Einsatz dieser Technik in Feldfällen, wo nicht garantiert werden kann, dass ausschließlich frisch hergestellte Suspensionen eingesetzt werden.

Ein Batch-Experiment wurde durchgeführt, um den Einfluss der Dispergierung auf die Reaktivität der Kolloide zu untersuchen. Erste Ergebnisse dieses Tests zeigen keinen nennenswerten Einfluss der mechanischen Behandlung auf die Reaktivität. Allerdings muss dieser Befund durch weitere Untersuchungen noch erhärtet werden; diese Untersuchungen waren im Rahmen des vorliegenden Projekts nicht durchführbar.

Reaktivität

Um einen ersten Eindruck vom Einfluss der Dispergierung auf die Reaktivität der Partikel zu erhalten wurde eine mit dem Dispergiergerät behandelte und eine unbehandelte Kolloid-Suspension mit einer PCE-Lösung versetzt und Zeitreihen der Konzentrationsabnahme aufgenommen. Abb. 7.3 zeigt den Verlauf für Zeiten bis zu zwei Tagen. Die Ausgangskonzentration an PCE betrug ca. 800 mg/l.

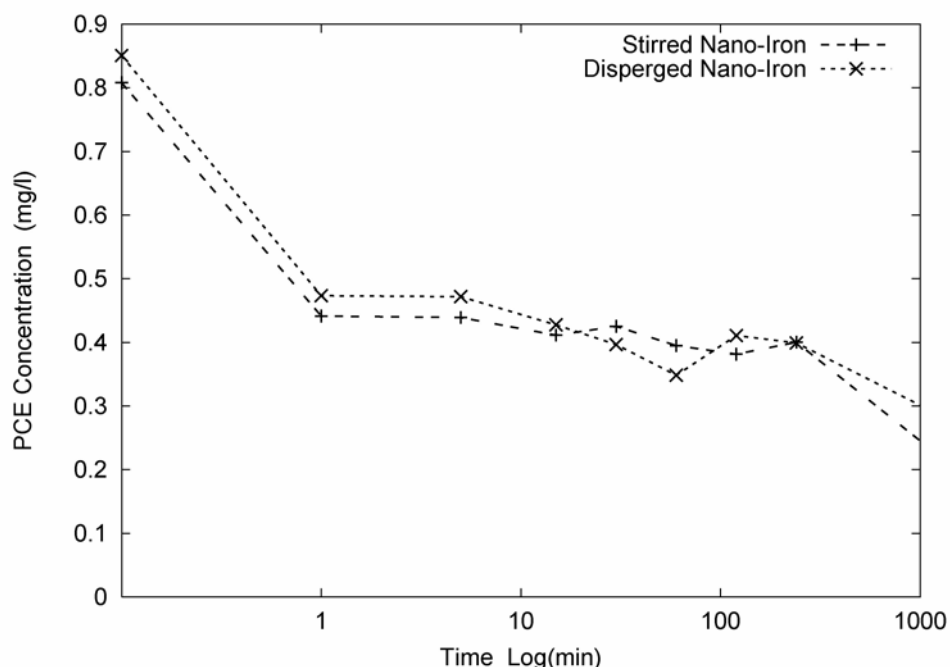


Abb. 7.3: Vergleich der Reaktivität von dispergierten (+) und unbehandelten (x) Kolloiden

7.3.2 Entwicklung einer Messtechnik zum zerstörungsfreien Nachweis von Nano-Eisen im Boden

Der Wunsch nach quantitativen Aussagen in Bezug auf das Transportverhalten der Kolloide brachte schnell das Problem zu Tage, dass hierzu eine Bestimmung des Eisengehalts im verwendeten Aquifermaterial erforderlich war. Mit chemisch-analytischen Methoden ist es allerdings unmöglich, geringe Kolloidgehalte vor einem geogenen Hintergrund, der um ein Vielfaches höher ist, zu quantifizieren. Eisen als vierthäufigstes Element kommt in der Erdkruste mit einem mittleren Gehalt von 3,4% oder 34 g/kg vor. Auch in eisenarmen Materialien (z.B. Quarzsanden) sind noch bis zu 100 mg/kg an Eisen als Eisen(II)- und Eisen(III)-Verbindungen enthalten.

Vor diesem Hintergrund wurde ein Messverfahren entwickelt, mit dem es möglich ist die Ausbreitung zerstörungsfrei zu verfolgen. Dieses basiert auf der Weiterentwicklung einer Induktionsmessung (Minensuchgerät), bei der die Anwesenheit von Eisen in der Säule die Induktivität einer Messspule ändert. Bei den Versuchen mit der horizontalen Säule wurde vor der Injektion mit der Nano-Eisen-Suspension die ganze Säule mit dem hochempfindlichen Metallsuchgerät abgefahren, wobei das Gerät pro mm 25 Aufnahmen der magnetischen Suszeptibilität μ_r macht.

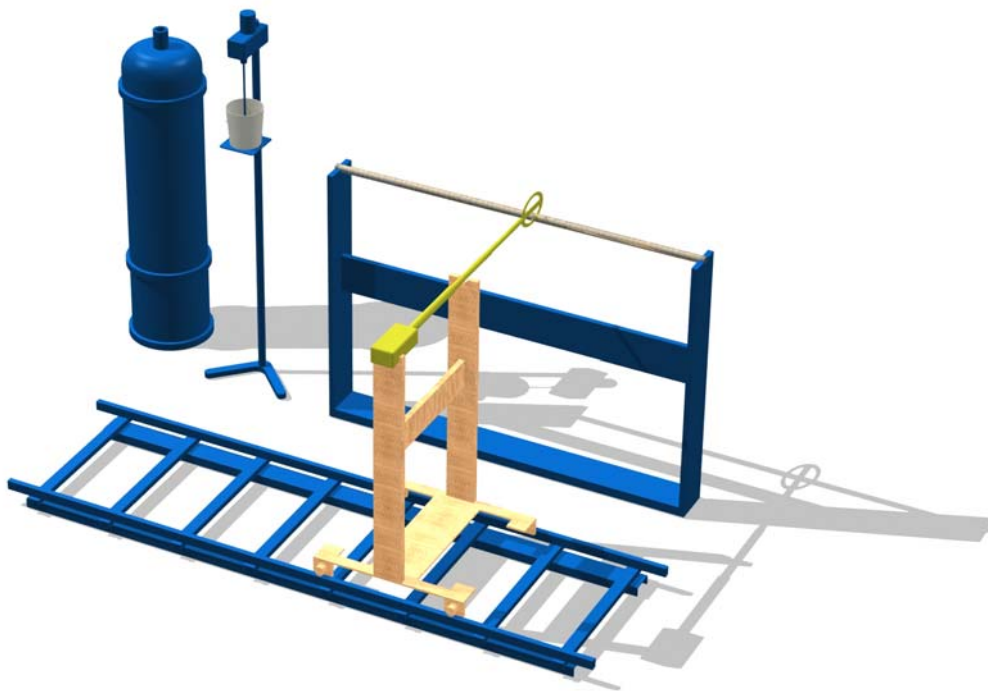


Abb. 7.4: Aufbau der Messeinrichtung

Nach der Injektion des Nano-Eisens wird die Säule erneut vermessen, wobei sich eine Differenz der beiden Messungen ergibt. Auf diese Weise kann eine sehr hohe Genauigkeit bei der Eisenbestimmung erreicht werden.

7.3.3 Einfluss von Fluid- und Aquifereigenschaften

Plexiglassäulen ($D = 3,6 \text{ cm}$, $L = 2 \text{ m}$) wurden mit Sanden verschiedener Kornfraktion jeweils homogen gepackt, mit Wasser gesättigt und dann in horizontaler Lage mit der Nano-Eisen-Suspension durchströmt. Systematisch werden dabei verschiedene Parameter (z.B. die Kornfraktionen, die Eisenkonzentration, die Injektionsgeschwindigkeit, ...) verändert und die Ausbreitungsdistanz der Eisenpartikel sowohl visuell als auch messtechnisch verfolgt. Die Partikel zeigten eine erhebliche Retardation im Vergleich zum eingesetzten konservativen Tracer (Abb. 7.5). Dabei ändert sich die maximale Reichweite der Kolloide deutlich mit der Fließgeschwindigkeit.



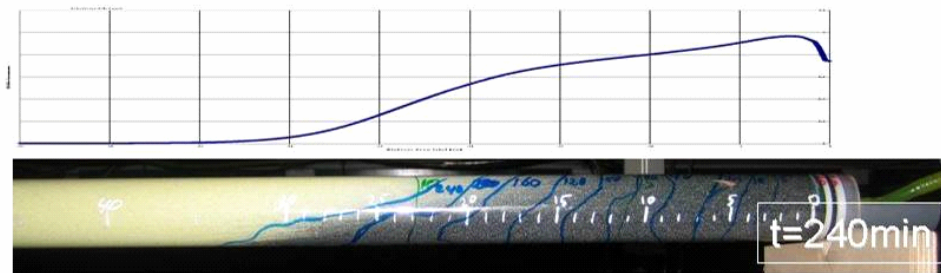
Abb. 7.5: Retardation beim Transport von Nano-Eisen

Einfluss der Injektionskonzentration auf die Eisenverteilung im Boden

Abb. 7.6 zeigt zwei identisch gepackte Säulen, in die eine Nano-Eisen-Suspension unterschiedlicher Konzentration injiziert wurde sowie die zugehörige Eisenverteilung in den Säulen nach einer Injektionsdauer von 4 Stunden. Es konnte nachgewiesen werden, dass sich z. B. bei einer zehnfach höheren Konzentration, aber gleicher Injektionsgeschwindigkeit die Transportentfernung des Nano-Eisens in der Säule ungefähr verdoppelt.

Dies ist insofern von großer Bedeutung, als dadurch bewiesen wird, dass die Retardation des Eisens nicht (primär) durch Dichteeffekte (Sedimentation) kontrolliert wird. Die Retardierung im Vergleich zum Wasser der injizierten Suspension (dieses wurde mit Uranin markiert) nimmt deutlich mit der Konzentration ab.

Geba Weiss 1/8 0.3-0.8mm, $C_{Fe} = 1 \text{ g/l}$



Geba Weiss 1/8 0.3-0.8mm, $C_{Fe} = 10 \text{ g/l}$

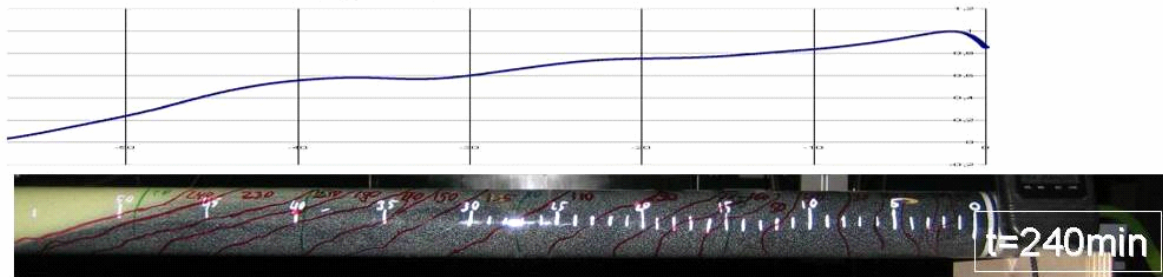


Abb. 7.6: Einfluss der Injektionskonzentration auf die Transportentfernung

Einfluss der Korngrößenverteilung des Aquifermaterials auf die Transportentfernung

Abb. 7.7 zeigt, dass die Durchlässigkeit, bzw. das Porenvolumen einen deutlichen Einfluss auf die Ausbreitung von Nano-Eisen hat. Je grober das Aquifermaterial und je größer das relative Porenvolumen, desto größer ist die Reichweite der Teilchen.

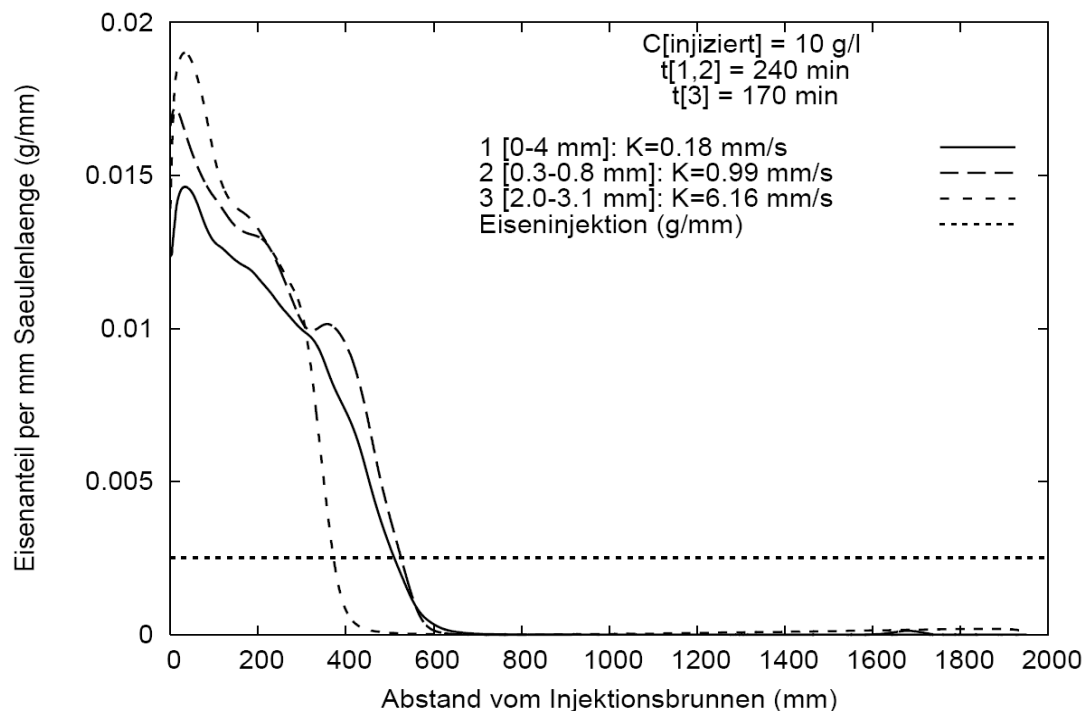


Abb. 7.7: Einfluss der Korngrößenverteilung auf die Transportentfernung

Einfluss der Injektionsgeschwindigkeit auf Transportentfernung

In Abb. 7.8 ist die Abhängigkeit der Reichweite von der Injektionsgeschwindigkeit dargestellt. Demnach nimmt die Reichweite der Partikel mit der Injektionsgeschwindigkeit zu. Diese kann wegen des in der Praxis begrenzten Injektionsdrucks im Feldfall allerdings nicht beliebig gesteigert werden und nimmt außerdem mit steigendem Abstand vom Injektionsbrunnen hyperbolisch ab.

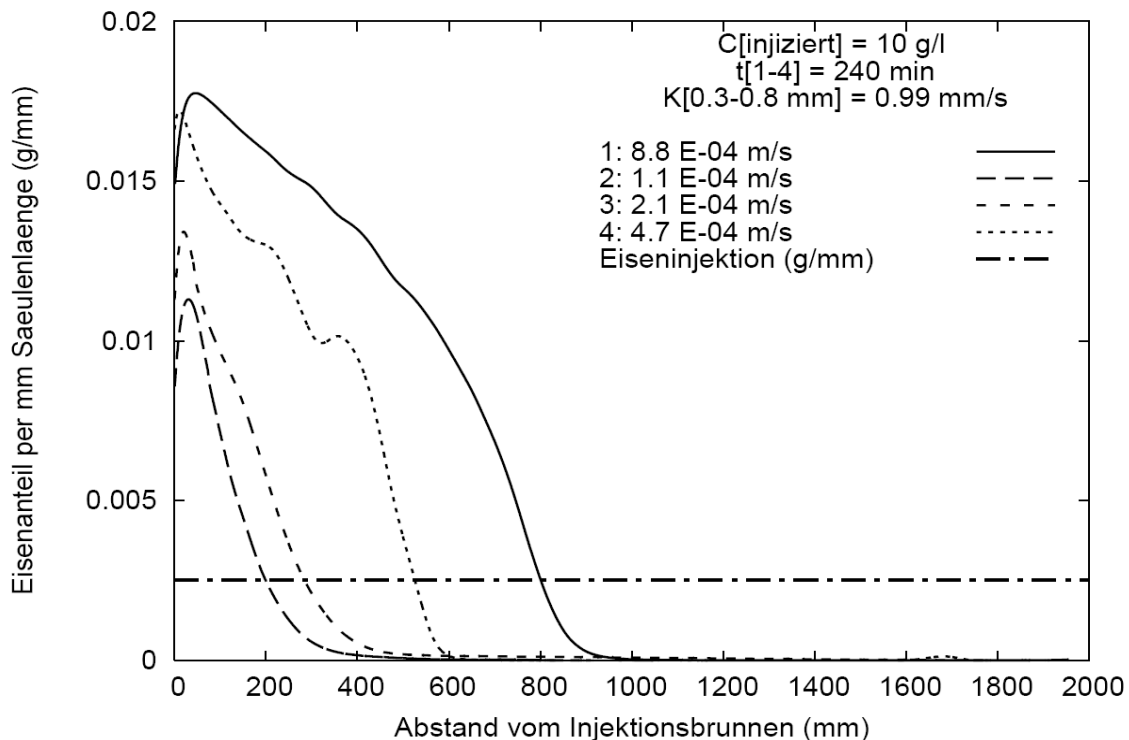


Abb. 7.8: Einfluss der Injektionsgeschwindigkeit auf die Transportentfernung

7.4 Ausblick

7.4.1 Großskalige Injektionsversuche mit Radialströmung

Bei einer Feldanwendung wird die Nano-Eisen-Suspension in einen Brunnen injiziert, der in einem natürlichen Aquifer eingebaut wurde. Dies bedeutet, dass sich die Strömung nicht eindimensional (konstante Fließgeschwindigkeit) sondern radial ausbilden wird. In Vorversuchen wurde gezeigt, dass das Ausbreitungsverhalten in sehr starkem Maße von der Strömungsgeschwindigkeit abhängt (De Boer, 2007). Daher muss vor einer Feldanwendung der Einfluss radial abnehmender Strömungsgeschwindigkeit auf das Transportverhalten quantitativ untersucht werden.

Diese Untersuchung wird in zwei Schritten geschehen:

Im ersten (quasi-dreidimensionalen) Versuch wird ein Großversuchsstand („Tortensektor“, $r = 200 \text{ cm}$, $m = 60 \text{ cm}$, $\alpha = 60^\circ$) mit Sand verschiedener Korngrößenverteilung homogen befüllt (gespannter Aquifer). Im Kreismittelpunkt wird ein Injektionsbrunnen

und entlang des Kreisbogens werden Entnahmebrunnen (Festpotential) installiert (Abb. 7.9). Ausbreitungsentfernung wird visuell (ein Dreiecksschenkel wird verglast) beobachtet und Eisenkonzentrationen werden messtechnisch (Suszeptibilitätsmessung) und analytisch (Bodenproben) nachgewiesen. Eine Beziehung zwischen Ausbreitungsdistanz und Injektionsdruck/Injektionsrate wird für eine Variation der oben genannten Parameter entwickelt.

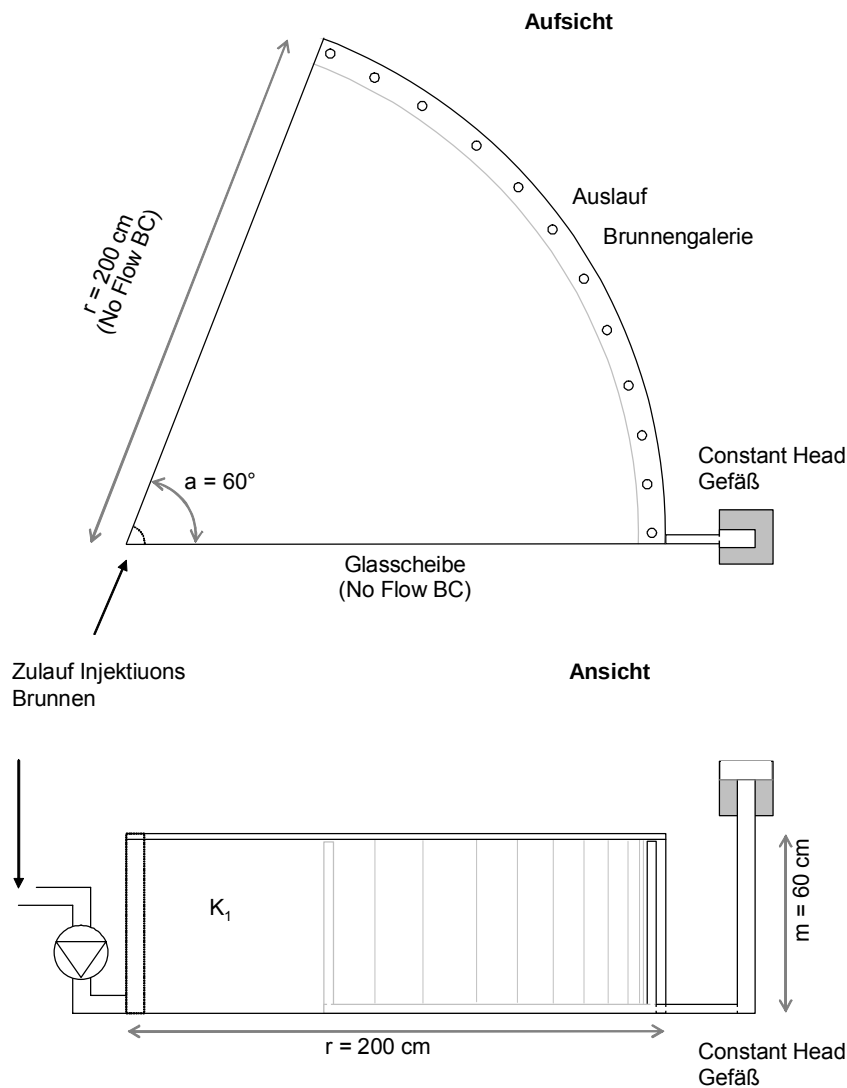


Abb. 7.9: Skizze des geplanten Großversuchs

Im darauf aufbauenden dreidimensionalen Versuch wird ein geschichteter Aquifer aufgebaut (Abb. 7.10), d.h. zwischen zwei relativ feinen Sandlagen wird eine Grobsandschicht eingebaut. Hiermit soll der Einfluss von Heterogenitäten auf das Strömungs-, Transport- und Retentionsverhalten der Nano-Eisen-Suspension untersucht werden. Nach erfolgreichem Abschluss dieser großskaligen Versuche stehen die Grundlagen zur wissenschaftlichen Begleitung einer Pilotanwendung zur Verfügung.

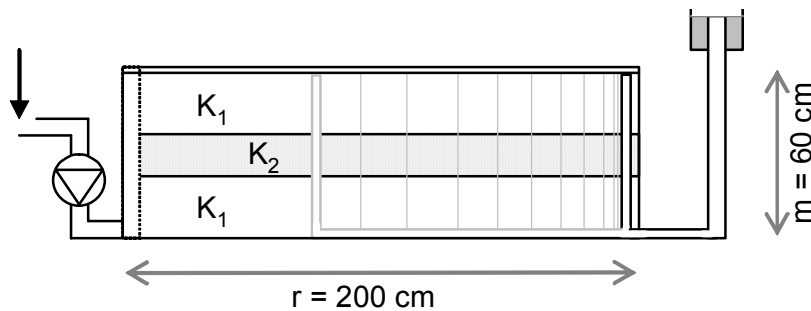


Abb. 7.10: Heterogener Versuchsaufbau Großversuch

7.4.2 Planung und Durchführung pilothafter Feldanwendungen

Die neu entwickelte Sanierungstechnologie muss im Feld im Rahmen von Pilotversuchen getestet und ihre Effizienz nachgewiesen werden. Nach der derzeitigen Planung soll die Pilotanlage auf einem CKW-belasteten Standort in Baden-Württemberg (Altlastenfond B.-W.) aufgestellt werden.

7.5 Danksagung

Die Autoren danken dem Umweltministerium Baden-Württemberg für die finanzielle Förderung im Rahmen des Förderprogramms BW-PLUS.

7.6 Literatur

- Braun, J., 2006: „Injektion von Nano-Eisen zur Sanierung von LCKW-Schadensfällen — Ergebnisse von Laboruntersuchungen in VEGAS“, in „Neue Sanierungsverfahren?“, Seminar 10/2006 des Fortbildungsverbundes Baden-Württemberg (05. Dezember 2006, Esslingen)
- de Boer, C.V., Klaas, N. und Braun, J., 2006: „Grundlagenuntersuchungen zum hydraulischen Verhalten von Nano-Eisen im Aquifer“, VEGAS-Statuskolloquium 2006, (28. - 28. September 2006, Stuttgart), Editor: Braun, J.; Koschitzky, H.-P. & M. Stuhmann, Institut für Wasserbau, 9/2006. - Seiten: 88-94
- de Boer, C.V., Klaas, N. und Braun, J., 2007: „Machbarkeitsstudie zum Einsatz von Eisenkolloiden zur Sanierung von CKW-Kontaminationen (Fahnensanierung)“, Wissenschaftlicher Bericht Nr. 2007 /3, (VEG 21), Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart
- de Boer, C.V., 2007, Characteristics and Mobility of Zero-Valent Nano-Iron in Porous Media – A Laboratory Assessment Study. Master Thesis an der Universität Stuttgart, Institut für Wasserbau, VEGAS, und der University of Utrecht, Department of Earth Sciences, Environmental Hydrogeology Group.

- Elliott, D.W., W-X. Zhang, 2001, Field Assessment of Nanoscale Bimetallic Particles for Groundwater Treatment, Environ. Sci. Technol. 2001, 35, 4922-4926
- Gavaskar A., L. Tatar, W. Condit, 2005, Cost And Performance Report, Nanoscale Zero-Valent Iron Technologies For Source Remediation, Naval Facilities Engineering Service Center
- Müller C., Eckhard, P. Rissing, 2006a, Sanierung mit Nano-Eisen - Stand der Technik, Altlasten Spektrum 2/2006
- Müller C., P. Rissing, F. Widmayer, M. Wischott, 2006b, Nano-Eisen Feldversuch: Strategie, Durchführung, Ergebnisse und Auswertung, Altlasten Spektrum 3/2006.

8 Carbo-Iron – ein neues *In-situ*-Reduktionsmittel

Frank-Dieter Kopinke, Katrin Mackenzie

Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ, Leipzig

Mit Carbo-Iron stellen wir ein neuartiges *in-situ*-geeignetes Reagenz zur Grundwasserreinigung vor. Die Kombination aus kolloidaler Aktivkohle und darauf geträgertem metallischen Eisen (10...25 Ma-% Fe) ergibt ein starkes und umweltfreundliches Reduktionsmittel. Es eröffnet neue Wege sowohl zur Quellensanierung als auch aufgrund seiner relativ hohen Mobilität zum Aufbau von *In-situ*-Sorptions-Reduktions-Barrieren in mit halogenorganischen Verbindungen kontaminierten Aquiferen.

Die Oberflächenladung und Hydrophobie des Trägerkolloids sind günstige Voraussetzungen für verbesserte Transporteigenschaften und eine bessere Benetzbarkeit durch DNAPL im Vergleich zu ungeträgertem nano-Eisen. Carbo-Iron ist in der Lage, in gleicher Weise wie nano-Eisen ein breites Spektrum an halogenorganischen Verbindungen zu reduzieren. Die Aktivkohle unterstützt den Reinigungsprozess durch ihre Sammlerfunktion. Das Kompositmaterial ist dabei in der Lage, den sorptiv angereicherten Schadstoff auch der Reduktion am Eisen zur Verfügung zu stellen.

8.1 Einleitung

Durchströmte Reinigungswände gelten als wirksame und kostengünstige Alternative zu Pump&Treat-Maßnahmen für die Sanierung kontaminierter Aquifere. Seit den 1990er Jahren wurden intensive Studien durchgeführt, geeignete Materialien für den Aufbau von Reinigungswänden zu entwickeln. Metallisches Eisen erwies sich als geeignet, halogenorganische Verbindungen (RX) effektiv zu zerstören. Eisen reagiert dabei als Reduktionsmittel nach: $R-X + Fe^0 + H_2O \rightarrow Fe^{2+} + R-H + OH^- + Cl^-$ [1]. Um Tiefbauarbeiten für die Errichtung von durchströmten Eisenwänden zu vermeiden, konzentrierten sich die Untersuchungen in den späten 1990er Jahren auf injizierbare Suspensionen. Die Injektion kolloidaler Fe^0 -Suspensionen (nano-Fe) in kontaminierte Aquifere wird als eine neue aussichtsreiche Methode zum *In-situ*-Aufbau von reaktiven Barrieren zur Grundwassersanierung betrachtet [2]. Suspensionen aus reinem nano-Eisen sind allerdings unter Aquiferbedingungen nicht in ausreichendem Maße mobil und damit nicht in der Lage, breite reaktive Zonen in den Fließwegen des Grundwasserleiters zu erzeugen. Die Hydrophilie der Eisenoberfläche lässt reines nano-Eisen auch für eine Quellensanierung nur bedingt geeignet erscheinen [3]. Bestrebungen in der Fachliteratur gehen dahin, die Eisenpartikel durch Zugabe von Emulsionsbildnern aus Tensiden und Ölen zu hydrophobieren und so den Übergang in die DNAPL-Phase zu erleichtern.

Dieses so genannte emulsified zero valent iron wurde bereits im Feldversuch getestet. Es konnte gezeigt werden, dass die Dehalogenierung auch direkt in DNAPL-Phasen erfolgen kann [4].

Alternativ zu den beschriebenen Bemühungen, die Anwendungseigenschaften von nano-Eisen zu verbessern, soll hier ein neues innovatives Verfahrenskonzept vorgestellt werden, das auf der Einspülung und ggf. Immobilisierung eines kolloidalen Verbundmaterials aus Aktivkohle und Eisen (Carbo-Iron) basiert. Das Reagenz ist sowohl zur Fah-nensanierung durch *In-situ*-Errichtung einer Sorptions-/Reaktionsbarriere in kontaminierten Aquiferen als auch zur direkten Quellensanierung geeignet. Aktivkohle (AK), das mit Abstand bedeutendste Sorbens im technischen Umweltschutz, ist gegenüber einem breiten Spektrum an organischen Verbindungen wirksam und ökotoxikologisch als unbedenklich einzustufen. Der innovative Grundgedanke der vorgestellten Arbeiten liegt darin, Aktivkohle in feinstkörniger, kolloidaler Form einzusetzen ($d_p \approx 0,5$ bis $2 \mu\text{m}$). Partikel dieser Größenordnung sind aus handelsüblicher AK durch Nassmahlung nach dem Stand der Technik zugänglich. Dadurch wird der Aktivkohle eine neue Eigenschaft verliehen: Sie wird in Wasser quasi „löslich“. Durch diesen Schritt ist es möglich, die exzellenten Sorptionseigenschaften von Aktivkohle mit den Vorteilen von einspülbaren Reagenzien oder Sorbenzien zu verknüpfen. Durch die hydrophoben Eigenschaften des Trägermaterials AK ist eine bessere Mischbarkeit des neuen Reagenz mit Schadstoffphasen aus Halogenkohlenwasserstoffen (HKW) im Vergleich zu konventionellem nano-Fe zu erwarten. Ziel der Arbeiten war es, die mit Eisen modifizierten kolloidalen AK-Partikel auf Reaktivität, Benetzbarkeit, Mobilität und Langlebigkeit hin zu untersuchen.

8.2 Methoden

Chemikalien:

Eisen(III)-nitrat ($\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) wurde 99%ig von der Fa. Merck, die HKW Trichlorethen (TCE), Tetrachlorethen (PCE), Tetrachlormethan (Tetra) und Vinylbromid (VBr) wurden in der jeweils höchsten angebotene Reinheit von Sigma-Aldrich bezogen. Als Referenzmaterial wurde kommerziell erhältliches reaktives nano-Eisen (RNIP) der Fa. Toda/Kogyo (50 Ma-% Fe^0 bestimmt) mit einer spezifischen Oberfläche von $38 \text{ m}^2/\text{g}$ (BET; laut Toda/Kogyo) eingesetzt.

Aktivkohle:

Die kommerziell erhältliche granuläre AK SA Super der Fa. Norit wurde mit Hilfe einer Horizontalmühle 200 AHM (Alpine Hosokawa) nass gemahlen. Die erreichte Partikelgrößenverteilung wird durch die Kennzahlen $d_{50} = 0,8 \mu\text{m}$ und $d_{90} = 1,6 \mu\text{m}$ (Metasizer, Malvern Instruments Ltd., UK) beschrieben. Der Point of Zero Charge der verwendeten

AK lag im pH-Wertbereich von 8,2 bis 9,0 (potentiometrische Titration und Immersionsmethode).

Carbo-Iron:

500 g AK und 1080 g $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (= 150 g Fe) wurden in einem Liter Wasser gemischt und einige Stunden geschüttelt. Bereits beim Mischen wurde ein Teil des Nitrats zersetzt, was an der Bildung nitroser Gase zu erkennen war. Das Rohprodukt wurde zunächst im Rotationsverdampfer getrocknet und danach in einem Rührkesselreaktor im N_2 -Strom bis 350 °C behandelt. Dabei wurde die Nitratzersetzung abgeschlossen. Das so erhaltene Eisenoxid/AK-Kompositmaterial wurde im Anschluss bei 450 bis 500°C im H_2 -Strom reduziert und unter Inertgas abgekühlt. Das frisch hergestellte Carbo-Iron ist pyrophor. Es wurde unter Inertgas gehandhabt und vor den Dehalogenierungs- und Mobilitätstests einem speziellen Desaktivierungsschritt unterzogen. Der Fe^0 -Gehalt des Carbo-Irons betrug 20 Ma-% (Quantifizierung als H_2 mit GC/WLD nach Säurebehandlung des Carbo-Irons). Dies entspricht ca. 87% des eingestzten Eisens.

Dehalogenierungsexperimente:

Die Untersuchungen zur Dehalogenierung wurden als Batch- und Säulenexperimente durchgeführt. Für die Batchuntersuchungen wurden braune 250-ml-Flaschen mit aufgeschraubtem Mininertventil[®] verwendet. 100 mg bis 7 g Carbo-Iron (entspr. 20 mg bis 1,4 g Fe^0) wurden zu 200 ml Reaktionslösung gegeben (dest. Wasser, Leitungswasser, 0,1 M $\text{NH}_3/\text{NH}_4\text{Cl}$ -Pufferlösung, 50 mg/l Lösung eines polyanionischen Stabilisators oder Grundwasser). Die Reaktionslösung wurde mit N_2 gespült und mit Carbo-Iron versetzt. Danach wurde der Reaktionsansatz kontinuierlich geschüttelt (60 min^{-1}). Den Reaktionsstart t_0 markiert die Zugabe des HKW (als methanolische Stammlösung). Die Kinetik der Reduktion wurde durch Analyse der Reaktionsprodukte verfolgt: Die dehalogenierten organischen Produkte wurden gaschromatographisch (GC/MS QP 5000, Shimadzu, DB1 Dickfilmkapillare) und die Halogenide ionenchromatographisch (IC25, Dionex, mit einer IonPac[®] AS15/AG15 Säulenkombination) bestimmt. Die Analyse der Produkte besitzt hier ggb. der der Edukte zwei wesentliche Vorteile: a) Geringe Umsetzungsgrade (<10%) können genauer bestimmt werden und b) die Produkte können durch einfache Headspace-Probenahme erfasst werden, während die Edukte nur durch Totalextraktion der AK zugänglich sind.

TEM:

Transmissionselektronenmikroskopie (TEM) der Carbo-Iron-Partikel erfolgte nach Einbetten in Harz (M-Bond 610), Anfertigen von Schnitten und Reinigen der Oberfläche durch Sputtern mit Argonionen. Für die TEM-Analysen stand ein Philips CM 200 STEM Transmissionselektronenmikroskop zur Verfügung.

Säulenexperimente und Mobilitätsuntersuchungen:

Säulenexperimente wurden mit Glassäulen verschiedener Länge und Durchmesser durchgeführt (typischerweise $l = 75 \text{ cm}$ $d_i = 2,6 \text{ cm}$). Als Säulenfüllung wurde eine Sandfraktion (0,25 - 1 mm) eines Aquifersediments (Standort Zeitz, Sachsen-Anhalt) ausgewählt. Die AK-Suspensionen (100 mg/l) wurden durch die Säule gepumpt, wobei jeweils der Anteil an AK-Partikeln als mobil bezeichnet wurde, der das Säulenende passierte (Analyse mit einem Kohlenstoffanalysator). Mobilitätsuntersuchungen erfolgten unter Variation des Eluenten (Ionenstärke, pH-Wert), dem unterschiedliche Arten und Konzentrationen an Polyelektrolyten zur Steuerung der Suspensionsstabilität und Kolloidmobilität zugesetzt wurden. Die mit Carbo-Iron beladenen Säulen konnten zu Dehalogenierungsuntersuchungen verwendet werden.

8.3 Ergebnisse und Diskussion

Die Mobilität im Aquifer kann man als eine Schlüsseleigenschaft eines *In-situ*-Reagens betrachten. Die Schwierigkeit liegt im Allgemeinen nicht darin, Partikel zu immobilisieren, sondern sie in Suspension zu halten und damit Transportstrecken von mehreren Metern zu erreichen. Durch optimale Anpassung der Transporteigenschaften können der Abstand und damit die Anzahl der notwendigen Injektionen zum Aufbau einer Barriere minimiert werden. Die Filtertheorie lehrt, dass natürlich im Aquifer vorkommende Kolloide wie Sedimentpartikel von der Größe weniger Mikrometer (1-2 μm) mobiler sind als nano-Partikel [5]. Die optimale Partikelgröße, die für Sedimentmaterial gilt, sollte auch für Carbo-Iron zutreffen. Deshalb wurden AK-Trägerkolloide mit einer Partikelgrößenverteilung um 1 μm ausgewählt. Hinzu kommt, dass diese Partikelgröße durch Feinmahlung viel leichter zu erreichen ist als ‚echte‘ nano-Partikel. Säulenexperimente mit Original-Aquifermaterial haben gezeigt, dass Carbo-Iron deutlich bessere Transporteigenschaften aufweist als nano-Eisen. Ein Zusatz von Huminsäure in den Eluenten hat sich dabei als günstig erwiesen, um die Agglomeration von Carbo-Iron zu minimieren und eine homogenere Sedimentation an Aquifermaterial zu erreichen.

Abb. 8.1 zeigt links unstabilisierte Kolloide, die bevorzugt im Anfangsbereich der Säule als Agglomerate sedimentieren. Auch unter diesen unvorteilhaften Bedingungen passieren immer noch 85% der Partikel die gesamte Säulenlänge von 75 cm. Im rechten Teil ist das Ergebnis eines Säulenversuches in Gegenwart von HA abgebildet. Die AK-Kolloide zeigen eine stark verringerte Agglomerationstendenz und lagern sich gleichmäßig über die gesamte Säulenlänge ab. Derzeit laufen Untersuchungen mit Carboxymethylcellulose (CMC) als Stabilisator, die noch deutlich bessere Ergebnisse versprechen. Die Stabilisatoren HA und CMC haben auch auf die chemische Reaktivität des Carbo-Irons eine förderliche Wirkung.



Abb. 8.1: Mobilität von Carbo-Iron beim Durchfließen von Aquifermaterial (0,25 - 1 mm).

Links: nicht stabilisierte Partikel mit $m_{\text{mobil, (l = 75 cm)}} = 85\%$ (basisches Medium),
Rechts: mit Huminsäure stabilisierte Partikel mit $m_{\text{mobil(l = 75 cm)}} = 90\%$ (neutral).

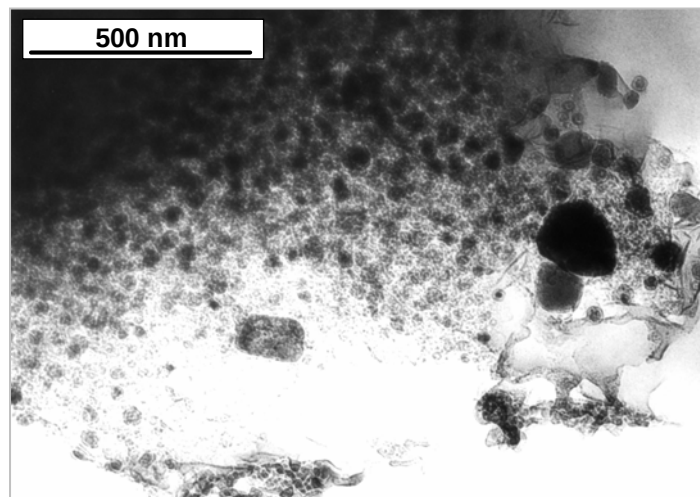


Abb. 8.2: Transmissionselektronenmikroskopische Aufnahme von Carbo-Iron (20 Ma-% Fe0)

Um die Wirksamkeit von nano-Eisen einschl. Carbo-Iron zu bewerten, sind nicht nur die Dehalogenierungsaktivität und die Langzeitstabilität entscheidend. Ebenso wichtig ist es, ob die Reaktivität im Aquifer tatsächlich genutzt wird, d.h. Schadstoff und Reagenz zueinander finden. AK wirkt bekanntlich als exzellenter Adsorber für organische Verbindungen. Die Effektivität der immobilisierten AK-Partikel als Barriere wurde im Laborversuch getestet, indem die Trägerkolloide in mit originalem Aquifermaterial gefüllten Säulen auf ihr Retardierungsverhalten gegenüber organischen Verbindungen hin überprüft wurden. Der dabei gefundene Retardierungsfaktor stimmte mit dem auf Basis von Sorptionsisothermen berechneten gut überein (Daten hier nicht gezeigt). Dies bedeutet, dass die eingespülte AK tatsächlich mit ihrem Sorptionspotenzial in den bevorzug-

ten Fließwegen verfügbar ist und diese nicht verstopft. Im Gegensatz dazu wird das Sorptionspotenzial von nativem organischem Material (NOM) im gleichen Test nur zu einem geringen Teil wirksam. Wir interpretieren diesen Befund so, dass NOM hauptsächlich in der Feinfraktion von Sedimentmaterial vorliegt und diese überwiegend im stagnanten Porenraum liegt.

Die Herstellung von Carbo-Iron beinhaltet drei Schritte: a) die Imprägnierung von AK mit einem Eisensalz, b) die Reduktion des Eisensalzes im Wasserstoffstrom bei erhöhten Temperaturen und c) die gezielte Desaktivierung des Reduktionsproduktes. Abb. 8.3 zeigt ein typisches Thermogramm der Reduktion von Eisen(III)nitrat auf AK. Die Identifizierung der DTG-Peaks wurde durch Kopplung der Thermowaage mit einem Massenspektrometer unterstützt.

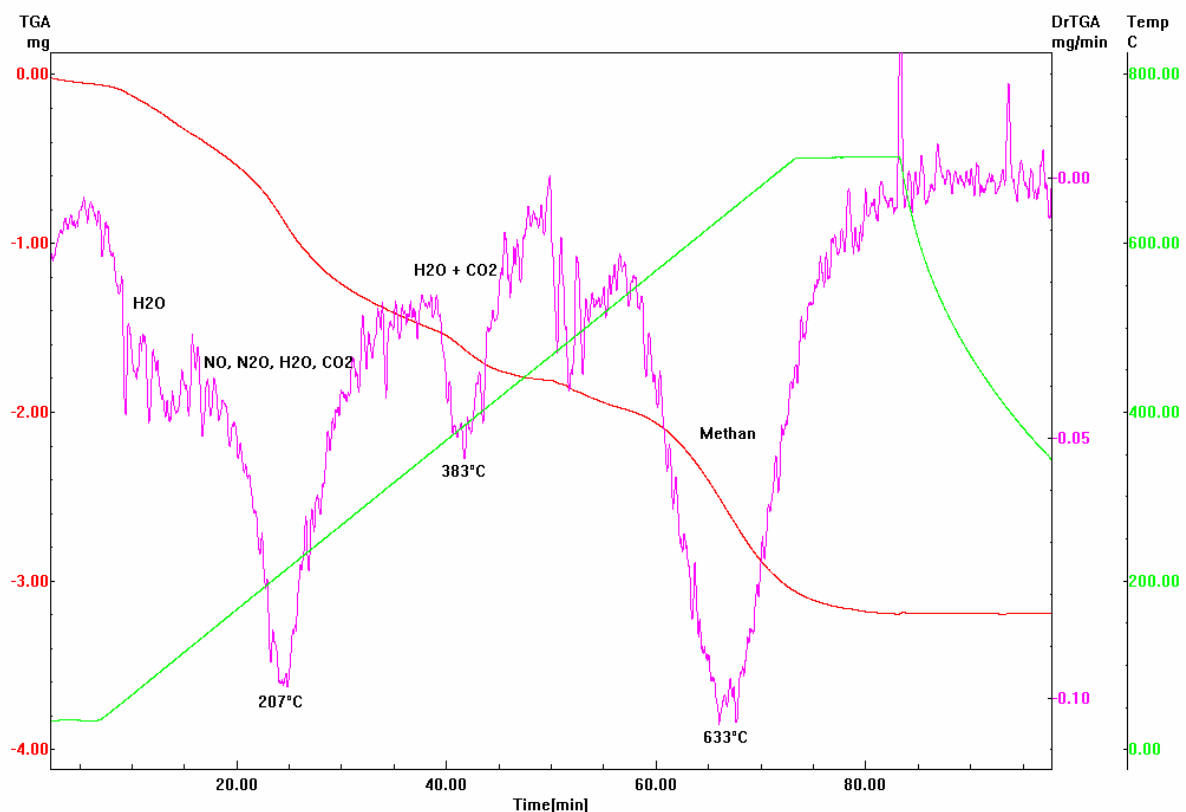


Abb. 8.3: Thermogramm der Reduktion von mit Eisen(III)nitrat imprägnierter Aktivkohle im H₂-Strom
(5 mg Probe, dT/dt = 5 K/min, Produktzuordnung aus TGA-MS-Kopplung)

Die Hauptpeaks bei 207°C und 383°C können der Nitratzersetzung und der Eisenreduktion zugeordnet werden. Ab 500°C wird die AK zu Methan hydriert. Diese Reaktion wird für undotierte AK nicht beobachtet. Sie begrenzt das für die Herstellung von Carbo-Iron nutzbare Temperaturfenster (<500°C). Sie macht gleichzeitig deutlich, dass die erzeugten Eisencluster feindispers und im engen Kontakt mit der AK vorliegen.

Eine ähnliche Schlussfolgerung kann man auch aus den Verbrennungstemperaturen (T_{Peak}) von unterschiedlichen Aktivkohlen im Luftstrom ziehen. Die Verbrennung startet

bei um so niedrigeren Temperaturen, je intensiver der Kontakt zwischen Kohlenstoff und Eisenkatalysator ist. So beträgt diese Peaktemperatur für native AK 560°C ggb. 360°C für Carbo-Iron. Eine mechanische Mischung von AK mit nano-Eisen (Fa. Toda) zeigt mit $T_{\text{Peak}} = 520^\circ\text{C}$ eine deutlich geringere katalytische Wirkung als die von Eisen im Carbo-Iron.

Wenn man über chemische Reaktivität spricht, ist es nützlich zu definieren, welche Reaktivität man damit meint: Reaktivität für die Fahren- oder die Quellensanierung. Partikel, die für Langzeitanwendungen in der Abstromsanierung angewendet werden, sollten vor allem hinreichend mobil und langlebig im Aquifer sein. Hier ist nicht unbedingt eine hohe Reaktivität gefragt, da das Wechselspiel Reaktivität-Langzeitstabilität im Wesentlichen durch die Korrosion als Konkurrenzreaktion bestimmt wird. Partikel, die zur Quellensanierung genutzt werden sollen, sollten hingegen eine höhere Kurzzeit-Aktivität und insbesondere ein gutes Benetzungsverhalten durch DNAPL-Phasen aufweisen. Im Vergleich zu reinem nano-Eisen weist Carbo-Iron Vorteile für beide Grundwasserreinigungsstrategien - Fahren- und Quellensanierung - auf. Abb. 8.2 zeigt, dass der AK-Träger und Fe^0 in engem Kontakt verbunden sind. Eisen bildet Cluster in der Größe von 20 - 50 nm, wobei auch größere Kristallite ($> 100 \text{ nm}$) gefunden werden. Im Verbundmaterial konnte auch nach Modifizierung mit Eisen annähernd die volle Sorptionsaktivität der AK nachgewiesen werden. Wichtig ist nun, dass die am Träger sorbierten Schadstoffe auch für das Reaktionszentrum Eisen verfügbar sind.

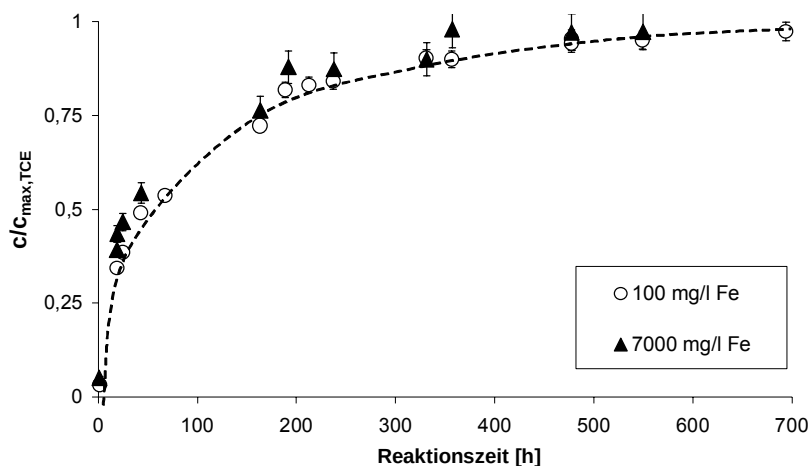


Abb. 8.4: Beobachtete Reaktionskinetik für die Dechlorierung von TCE zu Ethan + Ethen mit verschiedenen Carbo-Iron-Konzentrationen (20 Ma % Fe^0)
 ($c_{0,\text{TCE}} = 30 \text{ mg/l}$, $0,1 \text{ M NH}_3/\text{NH}_4^+$, Ausbeuten: $c/c_{\text{max,chloride}} = 100\%$,
 $c/c_{\text{max,C2-KW}} = 40\ldots 45\%$)

Abb. 8.4 zeigt den Abbau von TCE, der in einem weiten Konzentrationsbereich des Reduktionsmittels mit vergleichbaren Reaktionsgeschwindigkeiten erfolgt - dargestellt anhand der C_2 -Produktbildung. Die Dechlorierungsgeschwindigkeit scheint durch die

sorptive Anreicherung am Träger unterstützt zu werden und liegt höher als die kommerziell verfügbaren nano-Eisens. Die Reaktionsgeschwindigkeit ist unabhängig von der Eisenkonzentration in der wässrigen Suspension. Dieser Befund ist zunächst überraschend, kann aber durch ein kinetisches Modell, bei dem die *lokale* TCE-Konzentration, d.h. die Konzentration von TCE in unmittelbarer Nähe zum Eisencluster, in das Geschwindigkeitsgesetz eingeht, plausibel gemacht werden. Bestimmend für die Reaktionsgeschwindigkeit ist nicht, wie viel Eisen insgesamt zugesetzt wird, sondern wie viel Eisen die an der Aktivkohle adsorbierten CKW-Moleküle dort vorfinden. Aus dieser auf den ersten Blick ungewöhnlichen Reaktionskinetik können sich für die praktische Anwendung wesentliche Vorteile ergeben. Vereinfacht ausgedrückt: Wenig Carbo-Iron ist ähnlich wirksam wie viel Reagenz. Dahinter steht natürlich das Zusammenspiel zwischen adsorptiver Anreicherung und chemischer Reaktion.

Nano-Eisenpartikel können aufgrund ihrer eher hydrophilen Oberfläche nur schlecht von organischen Phasen benetzt werden, was eine effektive Reaktion mit DNAPL-Phasen behindert. Aus der Literatur ist das emulsified zero-valent iron bekannt [4]. Durch Zusätze von Tensid und Öl als Emulgatoren können die Partikel in die DNAPL-Phasen transportiert werden und dort reagieren. Die Dehalogenierungsaktivität in der organischen Phase muss allerdings durch den Zusatz von weiteren Chemikalien und andere ungünstige Gebrauchseigenschaften (z.B. höhere Viskosität) erkaufte werden. Für eine Quellensanierung ist daher generell eine gute Benetzbarkeit der Partikel durch organische Phasen anzustreben.

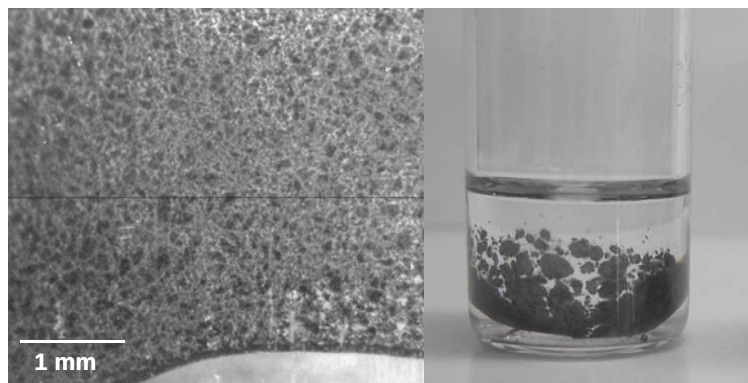


Abb. 8.5: Mikroskopische Aufnahme der Phasengrenze zwischen einer Chloroformphase und Carbo-Iron in Leitungswasser (ungeschüttelt)

Der Einsatz von Carbo-Iron vermeidet zusätzlichen Chemikalienaufwand. Die Oberfläche der AK-Trägerkolloide ist von vornherein hydrophob. Leicht geschüttelt, sammelt sich Carbo-Iron in der organischen Phase. Im ungeschüttelten System - was Aquiferbedingungen besser repräsentiert - sammeln sich die Carbo-Iron-Partikel an der Phasengrenze. Abb. 8.5 zeigt die Bildung eines dünnen Partikelfilms um die organische Phase, wo die Reaktionspartner optimale Reaktionsbedingungen vorfinden: Alle drei Reaktionspartner HKW, Wasser und Reduktionsmittel liegen in hohen Konzentrationen

vor. Eine weitere Auflösung der DNAPL-Phase wird durch die sich ausbildende Mikrobarriere verhindert. Die Reaktionsgeschwindigkeit für den TCE-Abbau lag für die getesteten Systeme im gleichen Bereich wie für die Dechlorierung von gelöstem TCE. Diese ersten Ergebnisse stimmen sehr optimistisch, dass Carbo-Iron ein geeignetes Material für die Quellensanierung von HKW-Schäden ist.

8.4 Zusammenfassung

Die Kombination der Aktivkohle-Eigenschaften mit den Reduktionseigenschaften von metallischem Eisen erweitert die Einsatzmöglichkeiten beider Einzelstoffe im Umweltbereich deutlich. Das entstehende neue Kompositmaterial - Carbo-Iron - besitzt neben der für Kolloide charakteristischen Mobilität weitere vorteilhafte Eigenschaften:

- a) Es wirkt reduzierend (Dechlorierung von CKW).
- b) Es besitzt die bekannten hervorragenden Adsorptionseigenschaften von AK. Daraus folgt eine Anreicherung der zu degradierenden hydrophoben Schadstoffe in unmittelbarer Nähe der reaktiven Zentren und eine Retardierung der Schadstoffe in der Reaktionszone. Die verfügbare Reaktionszeit in einer reaktiven Barriere aus Carbo-Iron steigt.
- c) Das Reagenz enthält nur umweltkonforme Elemente – Eisen und Kohlenstoff.
- d) Die Vorprodukte sind kostengünstig verfügbar.

Carbo-Iron sollte deshalb sowohl zur Quellensanierung als auch aufgrund seiner relativ hohen Mobilität zum *In-situ*-Aufbau von Sorptions-/ Reduktionsbarrieren geeignet sein.

Diesen Vorteilen des neuen Produktes stehen jedoch auch Nachteile und fortbestehende Grenzen gegenüber:

- a) Carbo-Iron enthält weniger reaktives Eisen pro Masseneinheit (typischerweise 15 bis 20 Ma-% Fe^0) als reines nano-Fe (typischerweise ≥ 50 Ma-%).
- b) Carbo-Iron überwindet nicht die Grenzen der chemischen Reaktivität von Fe^0 als Reduktionsmittel. Aromatische und viele gesättigte CKW (z.B. Methylenchlorid) können mit Fe^0 nicht erfolgreich behandelt werden.

8.5 Literatur

- [1] Gillham, R.W. and O'Hannessin, S.F. (1994) 'Enhanced Degradation of Halogenated Aliphatics by Zero-Valent Iron', *Groundwater*, 32, 958-967.
- [2] Zhang, W.-x., Elliot, D. W. (2006) 'Application of Iron Nanoparticles for Groundwater Remediation', *Remediation* 7-21.

- [3] Schrick, B., Hydutsky, B.W., Blough, J.L. and Mallouk, T.E. (2004) 'Delivery Vehicles for Zerovalent Metal Nanoparticles in Soil and Groundwater', *Chem. Mater.*, 16, 2187-2193.
- [4] Quinn, J., Geiger, C., Clausen, C., Brooks, K., Coon, C., O'Hara, S., Krug, T., Major, D., Yoon, W.-S., Gavaskar, A., Holdsworth, T. (2005) 'Field Demonstration of DNAPL Dehalogenation Using Emulsified Zero-Valent Iron', *Environ. Sci. Technol.*, 39, 1309-1318.
- [5] Tufenkji, N., Elimelech, M. (2004) 'Correlation Equation for Predicting Single-Collector Efficiency in Physicochemical Filtration in Saturated Porous Media', *Environ. Sci. Technol.* 38, 529-536.

9 Erste full-scale Anwendung der Nano-Eisen Sanierungstechnologie in Deutschland - Projektplanung und Durchführung

Claudia Müller, Eckhard Löbel, Peter Rissing
Alenco Environmental Consult GmbH, Stuttgart

9.1 Hintergrundinformation zum Projekt

An einem Standort im Rhein-Sieg-Kreis wird seit 1993 ein Perchlorethylen-Schaden (PCE) mittels Bodenluftabsaugung und Pump & Treat saniert. Verursacher des Schadens ist eine ehemalige Großwäscherei, die PCE als Lösungsmittel eingesetzt hat. Da auf den Verursacher kein Zugriff mehr besteht und der heutige Zustandsstörer nicht über entsprechende finanzielle Mittel verfügt, hat der Altlastensanierungsverband NRW (AAV) die Finanzierung der Sanierungsmaßnahme weitgehend übernommen. Den verbleibenden Anteil trägt der Rhein-Sieg Kreis.

Obwohl seit der Sanierung ca. 5.000 kg PCE aus Boden und Grundwasser entfernt werden konnten, liegen im Grundwasser im Schadensherd mit ca. 20.000 µg/l nach wie vor hohe Belastungen vor. Mit einfachen Modellen ist abschätzbar, dass bei Fortführung der derzeitigen Sanierungsmaßnahme weitere 50 – 100, oder mehr Jahre notwendig sein werden, um tolerierbare Grundwasserbelastungen zu erhalten. Dieser Zeithorizont ist aus mehreren Gründen nicht erwünscht. Die Projektträger haben sich deshalb entschieden, eine In-situ-Herdsanierung mit einem innovativen Verfahren durchzuführen. Aufgrund des Schadstoffes sowie der hydrogeologischen Randbedingungen wurde die Nano-Eisen Sanierungstechnologie ausgewählt. Die Eignung wurde im Labor an Abbau- und Säulenversuchen demonstriert.

Der zu behandelnde Schadensherd befindet sich am Rande der mittelhessischen Niederterrasse, die vorwiegend aus Kiesen und Sanden besteht. Die Fläche umfasst ca. 130 m². Die verunreinigte gesättigte Zone liegt zwischen 16 und 22 m u. GOK.

9.2 Das Nano-Eisen Sanierungsverfahren

Das Nano-Eisen Sanierungsverfahren gehört zur Gruppe der In-situ-chemischen Reduktions- (ISCR) Verfahren. Nullwertiges Eisen ist ein moderates Reduktionsmittel, das sich für die Behandlung einer Reihe von Schadstoffen im Grundwasser eignet. Besondere Eignung liegt aufgrund der Reaktionsgeschwindigkeit für PCE vor. Ein wesentlicher Vorteil des Verfahrens ist u.a., dass sich keine Nebenprodukte akkumulieren. Der dominierende Abbauweg überführt PCE direkt zu Ethen.

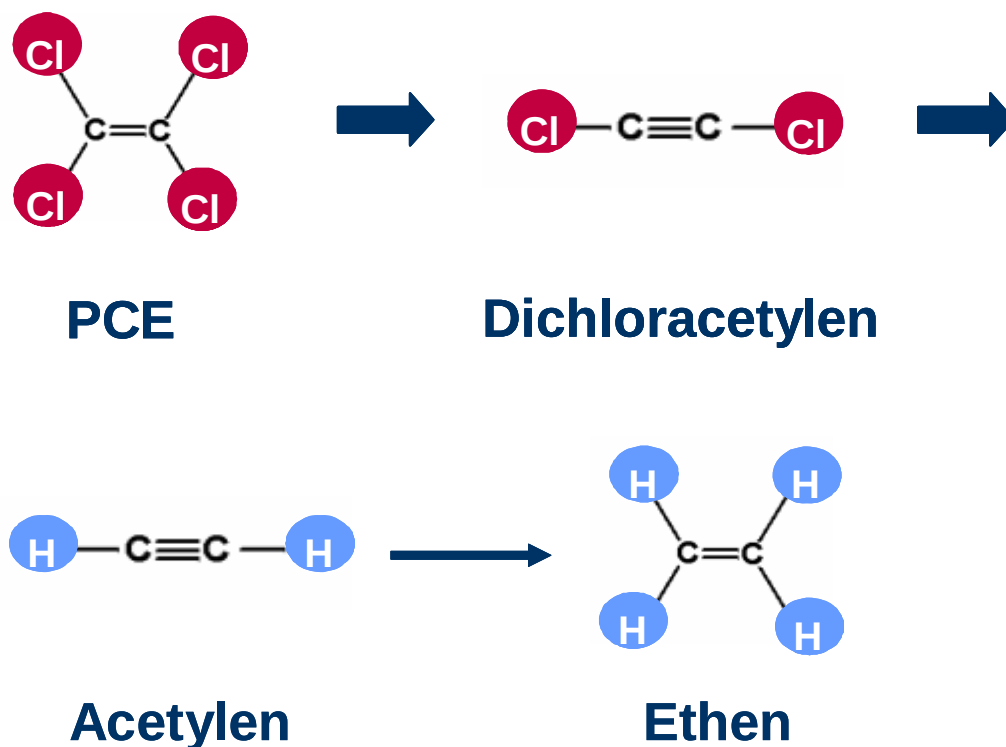


Abb. 9.1: Dominierender Abbauweg des PCE zu Ethen

Das Nano-Eisen wird als wässrige Suspension in den Untergrund injiziert. Die Ausbreitung der von Alenco eingesetzten Nano-Partikel der japanischen Firma Toda Kogyo ist begrenzt. Durch magnetische Kräfte bilden sich Agglomerate, die in Abhängigkeit der Stabilität der kolloidalen Lösung nach entsprechender Zeit sedimentieren. Nach der Reaktion mit dem Schadstoff bilden sich aus dem nullwertigen Eisen Eisenminerale entsprechend der chemischen Zusammensetzung des Grundwassers.

9.3 Die Verfahrensauslegung

Der Schadensherd wird über 10 Injektionspegel, die bis zu einer Tiefe von 22 m reichen, behandelt. Dabei wird von einer durchschnittlich radialen Ausbreitung des Nano-Eisens von 2 m ausgegangen.

Aus der vom Gutachter geschätzten verbliebenen Restmasse des Schadstoffes in Verbindung mit der Reaktionskinetik und dem geochemischen sowie hydrogeologischen Umfeld des Schadensherdes wurde die erforderliche Eisenmenge mit ca. 3.000 kg Eisen berechnet. Zur wirtschaftlichen Optimierung des Verfahrens wurde nach entsprechenden Laboruntersuchungen eine Mischung von Nano- und feinstem Mikro-Eisen ausgewählt. Nach Festlegung der Injektionsmasse und des Ausbreitungsradius lässt sich die Eisenkonzentration der Injektionsmischung mit ca. 90 g/l ableiten.

9.4 Die Injektionstechnik

Bei dem hier vorgestellten Projekt hat Alenco das Manschettenrohr-Verfahren für die Injektion eingesetzt. Das Verfahren ist aus dem Tiefbau bekannt. Es ermöglicht, Horizonte im Untergrund alle 33 cm individuell bei der Injektion anzusprechen. Damit kann der Einfluss von Heterogenitäten im Untergrund minimiert werden. Ein weiterer Vorteil dieser Technik ist, dass sich gezielt Nachinjektionen ohne erneute Bohrarbeiten durchführen lassen.

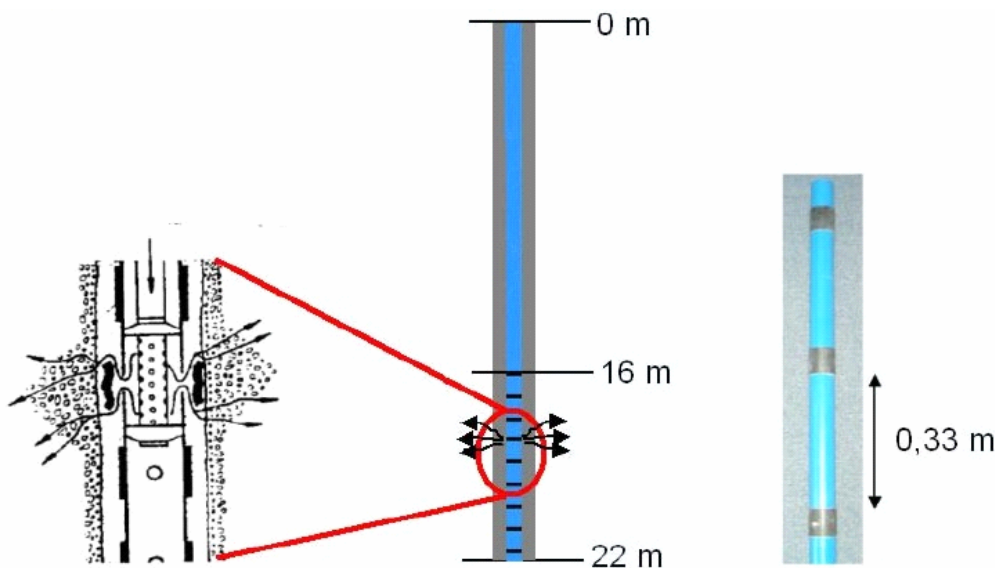


Abb. 9.2: Manschettenrohr-Verfahren für die Injektion

Jeder der 10 Injektionspegel ist mit 18 Manschetten ausgestattet, so dass insgesamt 180 Injektionspunkte existieren, die je nach ihrer Durchlässigkeit individuell angesteuert werden.

9.5 Die Injektionsanlage

Nano-Eisen wird vom Hersteller in 200 l Fässern als konzentrierte Suspension geliefert, die unmittelbar vor dem Einpressen in den Untergrund auf die ausgelegte Mischung und Konzentration eingestellt und entsprechend konditioniert wird. Die Qualitätskontrolle der angesetzten Mischung erfolgt über eine Redox- und pH-Wert-Messung.

Aus Sicherheitsgründen wird die Luft im Bereich der Mischbehälter abgesaugt, da sich im Falle von Anlagen-Störfällen im geschlossenen Raum explosive Gemische bilden können.



Abb. 9.3: Injektionsgut



Abb. 9.4: Membranpumpen

Das Injektionsgut wird chargenweise über 6 Membranpumpen in den Untergrund verpresst. Vor der Injektion an einer Manschette muss diese mit einer Hochdruckpumpe bei ca. 15 bar aufgesprengt werden. Anschließend werden ca. 185 l Suspension pro Manschette verpresst.

9.6 Ausblick

Die Injektion fand im August/September 2007 in einem Zeitraum von ca. 4 Wochen statt. Es wird erwartet, dass belastbare Ergebnisse aus dem Monitoring nach ca. 3 – 6 Monaten vorliegen.

Zielstellung bei der Anwendung des Verfahrens ist es, die Schadstoffmasse im Schadensherd deutlich zu reduzieren und damit die Schadstofffracht in die Fahne deutlich zu verringern. Damit verbunden ist die Erwartung, dass die unterstromig betriebenen Abstromsicherungen mittelfristig beendet werden können.

10 Neue Messtechniken: Der lange Weg in den Markt

Norbert Klaas, Tobias Heitmann, VEGAS, Universität Stuttgart,
Nikolaus Rombach, BERGHOF Analytik + Umweltengineering, Tübingen,
Hubert Hermes, Hermes Messtechnik, Stuttgart

10.1 Einleitung

Beim Schutz der Umwelt wurden in den letzten Jahrzehnten deutliche Fortschritte erzielt, die – neben der grundsätzlichen Einsicht um die Bedeutung des Umweltschutzes zum Schutz zukünftiger Generationen - maßgeblich durch Fortschritte im Bereich der Messtechnik vorangetrieben wurden. Dennoch bleiben hier vielfältige Herausforderungen bestehen, mit neuen messtechnischen Lösungen die Messaufgaben schneller, kostengünstiger und gezielter erledigen zu können. Dazu sind neben den reinen Messtechniken auch neue Strategien erforderlich. Ein viel versprechender Weg bei der effizienten Überführung neuer Technologien in marktfähige Produkte ist die enge Kooperation zwischen Firmen und Vertretern aus der universitären Forschung.

Im Institut für Wasserbau und der Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung (VEGAS) wurden seit mehr als 15 Jahren Messtechniken für die verschiedensten Bereiche des Messwesens im Grundwasser- und Altlastenbereich entwickelt. Viele dieser Entwicklungen sind nie über das Prototypenstadium hinausgekommen, obwohl durchaus jeweils breite potentielle Anwendungsfelder vorhanden sind.

Im Folgenden sollen die Probleme dargestellt werden, die sich im Zuge der Entwicklung von messtechnischen Systemen von der prinzipiellen Idee bis hin zu einem marktreifen Produkt ergeben.

10.2 Verschiedene Sichten bei der Geräteentwicklung

10.2.1 Entwicklungsschritte

Abb. 10.1 zeigt die Schritte, die im Zuge einer Entwicklung eines marktfähigen Geräts notwendig sind. Es sind zwei Säulen erkennbar – die ingenieurtechnische Seite und die kaufmännische Seite, die zum Teil gegenläufige Anforderungen und Wünsche haben. Um ein erfolgreiches Produkt entwickeln zu können, ist es wesentlich, diese beiden Seiten in Einklang zu bringen, was insbesondere bei der Zusammenarbeit von Univer-

sitäten oder Forschungseinrichtungen mit kommerziellen Firmen hohe Anforderungen an die Kooperationspartner stellen kann.

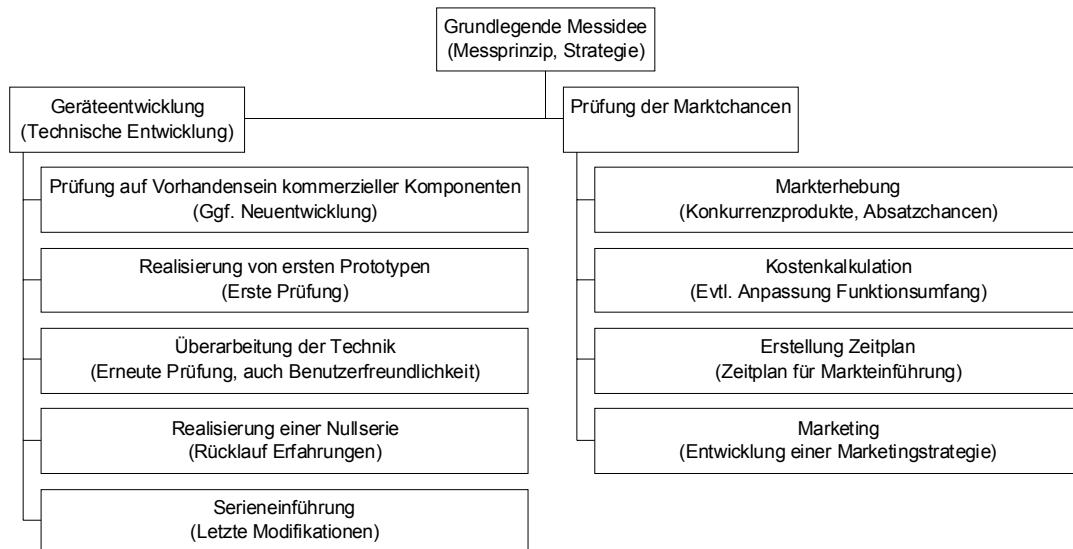


Abb. 10.1: Schritte bei der Geräteentwicklung

10.2.2 Sichtweisen der Beteiligten

Geht man davon aus, dass im Zuge einer Produktentwicklung drei Interessensgruppen involviert sind – Entwickler aus der Forschung, Ingenieure sowie Marketingspezialisten aus kommerziellen Firmen – ergeben sich sehr unterschiedliche Grundsätze, nach denen die Beteiligten Gruppen handeln. In Abb. 10.2 ist eine Übersicht dieser Grundsätze dargestellt, wobei die potentiellen Spannungsfelder zwischen den Beteiligten ersichtlich werden.

Insbesondere zwischen den Entwicklern aus der Hochschule und den Marketingexperten aus der Industrie ergeben sich vielfältige Konfliktpotentiale, da auf der einen Seite ein gewisser Spieltrieb und der Wunsch nach ständiger Verbesserung des Systems auf die zielgerichtete, rasche Markteinführung und damit die Erzielung von schnellem Profit prallt.

Aber auch zwischen den Entwicklern aus der Hochschule und den Entwicklern aus der Industrie gibt es unterschiedliche Vorgehensweisen, die ein hohes Maß an Kompromissfähigkeit verlangen. Der Entwickler aus der Hochschule möchte i.d.R. Systeme entwickeln, die ein Höchstmaß an Funktionalität besitzen, während der Entwickler aus der Industrie eher schlanke Systeme entwickeln möchte, die die Kundenanforderungen hinsichtlich einfacher Bedienbarkeit und Wartungsfreundlichkeit so gut wie möglich er-

füllen und deshalb in der Regel eine gegenüber dem Prototypen eingeschränkte Funktionalität besitzen. Der Industrieentwickler muss darüber hinaus auf die einfache und kostengünstige Fertigung des Systems achten, was in der universitären Entwicklung von Prototypen eine untergeordnete Rolle spielt.

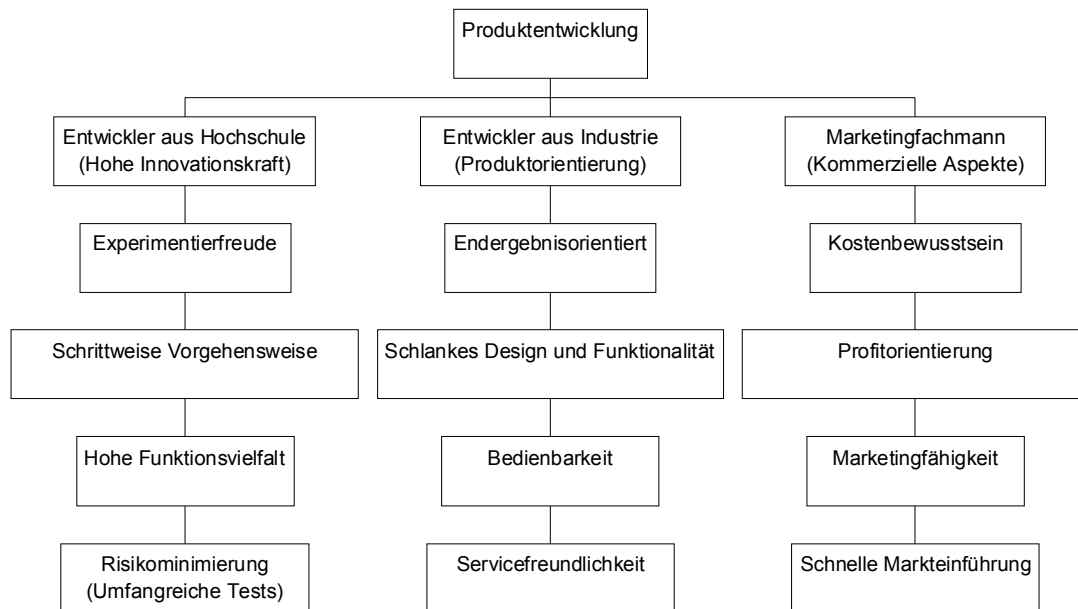


Abb. 10.2: Handlungsgrundsätze der Beteiligten

Zwischen diesen vielfältigen und sehr verschiedenen Interessen, von denen jedes vor dem jeweiligen Hintergrund durchaus gerechtfertigt ist, gilt es nun, die besten Kompromisse zu finden. Hierin mag ein Grund dafür liegen, dass effektive Kooperationen zwischen Hochschulen und der Industrie eher selten zustande kommen. Gerade vor diesem Hintergrund sollen im nächsten Abschnitt zwei positive Beispiele dargestellt werden, bei denen diese Kooperation gelungen ist.

10.3 Positive Beispiele

10.3.1 Faseroptisches Fluorometer

In VEGAS wurde ein faseroptisches Fluorometer entwickelt, das ursprünglich ausschließlich für Traceruntersuchungen im Grundwasser, eingesetzt werden sollte. Mit der Verfügbarkeit von UV-tauglichen optischen Komponenten (Quarzfasern, Lampen und Detektoren) wurde das System erweitert und kann mittlerweile auch zur Bestimmung der gelösten Konzentration von polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) in Grundwassermessstellen verwendet werden. Abb. 10.3 zeigt den schematischen Aufbau des Systems.

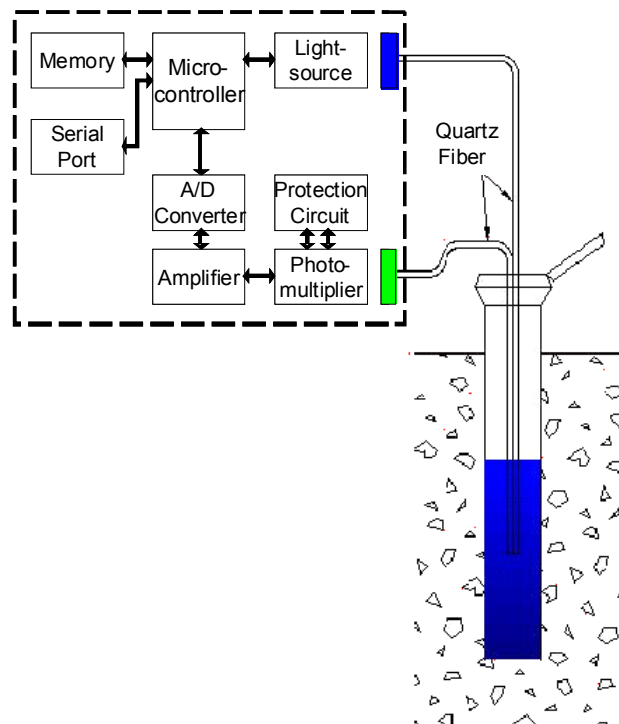


Abb. 10.3: Aufbau des faseroptischen Fluorometers

In Zusammenarbeit mit Hermes Messtechnik, Stuttgart, ist mittlerweile ein System kommerziell verfügbar, das es je nach Konfiguration sowohl erlaubt, Dauermessungen in Grundwassermessstellen (z.B. zur Aufnahme von Tracer - Durchbruchkurven oder zur Langzeitmessung von PAK) durchzuführen, als auch hoch aufgelöste Tiefenprofile in Messstellen aufzunehmen. Das System ist batteriebetrieben und verfügt über einen internen Speicher (siehe Abb. 10.4).



Abb. 10.4: Faseroptisches Fluorometer als kommerziell erhältliches System

10.3.2 Thermoflow - System

Ein System zur Messung von geringen Vertikalströmungen in Grundwassermessstellen, das ebenfalls in VEGAS entwickelt wurde, wird zur Zeit von der Firma Berghof, Tübingen, auf den Markt gebracht. Die Entwicklung dieses Messgeräts kann als Ideal-fall einer engen Kooperation zwischen Hochschule und Industrie betrachtet werden. Hier durchlief ein Messsystem auf dem Stand eines universitären Testaufbaus in relativ kurzer Zeit alle Entwicklungsstufen bis zum marktfähigen Produkt (siehe Abb. 10.5 bis Abb. 10.8).



Abb. 10.5: Erster Testaufbau der Winde zum Ablassen der Sonde im Feldeinsatz

Im Zuge der Entwicklung wurde das System in Zusammenarbeit mit den Entwicklungsingenieuren der Firma Berghof komplett überarbeitet und in ein marktreifes Gerät überführt.



Abb. 10.6: Entwicklungsstadien der Thermoflow - Sonde vom ersten Prototyp bis zur Vorserie (von links nach rechts)

Abb. 10.5 zeigt zum Beispiel die Winde des Testaufbaus, die im Feld nur mit schwerem Gerät zu transportieren war und nicht von einer Person betrieben werden konnte. Die überarbeitete Winde, mit der das Gerät rechnergesteuert in die Messstelle abgelassen wird, ist zusammen mit dem aktuellen Modell in Abb. 10.7 dargestellt, Abb. 10.8 zeigt das gesamte System, das von einer Person transportiert und betrieben werden kann.



Abb. 10.7: Entwicklungsstadien der Winde.
Der erste Prototyp ist in Abb. 10.5 zu sehen.

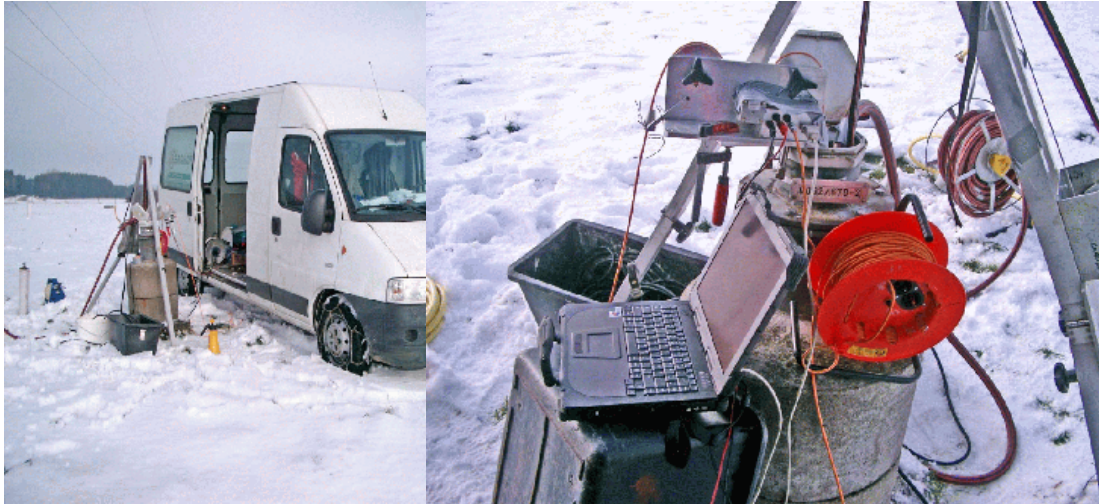


Abb. 10.8: Komplette Messanordnung im Feldeinsatz

10.4 Fazit

Um Innovationen im Bereich der Umweltmesstechnik in den Markt zu bekommen, kann die enge Kooperation von universitären Einrichtungen mit Industriepartnern ein vielversprechender Weg sein. Für den Erfolg einer derartigen Kooperation sind allerdings sehr unterschiedliche Interessen zusammenzuführen, was allen Beteiligten ein erhebliches Maß an Kompromissbereitschaft abverlangt.

Durch die intensive Zusammenarbeit zwischen Industrie und Hochschule entsteht ein bedeutendes Innovationspotential. Dieses muss dann aber auch im Bereich der Forschungsförderung seinen Niederschlag finden in Form von gezielter Unterstützung von universitären Einrichtungen bei Industriekooperationen. In den bestehenden Förderrichtlinien ist dies nur unzureichend vorgesehen, da die Förderprogramme eher auf langfristige Projekte ausgelegt sind. In diesem Zusammenhang sind auch gewisse infrastrukturelle Maßnahmen notwendig, die es für solche Kooperationen nutzbar zu machen gilt.

11 Innovative Mess- und Probennahmetechnik

Hansjörg Weiß, imw – Innovative Messtechnik Dr. Weiss, Tübingen

11.1 Einleitung

Der Einsatz neuer und innovativer Probennahmetechniken stößt zwar vielerorts auf Interesse, im Weiteren wird der Schritt zu einer konkreten Anwendung aber meist gescheut. Sowohl Behördenvertreter als auch Ingenieurbüros handeln hier gerne nach dem Grundsatz „das wurde bisher schon immer so gemacht und hat ausgereicht“ – was durchaus rechtens ist, da mit den konventionellen Methoden die notwendig(st)en Anforderungen an die Grundwasserprobennahme prinzipiell erfüllt werden. Mit dieser Einstellung wird jedoch der Spielraum und das Potenzial geltender Normen und Vorschriften nur eingeschränkt genutzt. Für ein fortschrittliches Umweltmonitoring sollte es jedoch ein ständiges Bestreben sein, die Qualität und Repräsentativität der Probenahme sowie den Informationsgewinn zu erhöhen und hierzu auch neue Methoden zu nutzen.

Im Folgenden sollen neue und innovative Probennahmetechniken für Grundwasser vorgestellt werden, wobei hierbei Methoden verstanden werden, die für die Probenahme Ergänzungen und Verbesserungen gegenüber der derzeitigen gängigen Praxis aufweisen. Neben den aktuellen Direct-Push Technologien wird eine Auswahl an tiefenorientierten und passiven Beprobungstechniken präsentiert.

11.2 Direct-Push Technologien

Gegenüber den konventionellen Bohrtechniken, bei denen Bodenmaterial und Grundwasser aus dem Untergrund entnommen und ex-situ analysiert wird, ermöglichen Direct-Push-Technologien die Messung und Auswertung bodenphysikalischer und chemischer Parameter des Untergrundes sowie des Grundwassers in-situ. Direct-Push-Technologien nutzen dabei das Eigengewicht des Fahrzeugs und hydraulische Komponenten, wie Druckzylinder (z.B. Fugro), Percussionhammer (z.B. Geoprobe) und hochtourige Hydromotoren (z.B. Sonic) um Stahlverrohrungen mit relativ geringem Durchmesser in den Untergrund zu drücken, zu stoßen oder einzuvibrieren. Die Verrohrungen können zusätzlich mit Probennahmegeräten und mit Sonden und Sensoren für die kontinuierliche, tiefenorientierte in-situ Messung geologischer, geophysikalischer und chemischer Daten ausgerüstet werden.

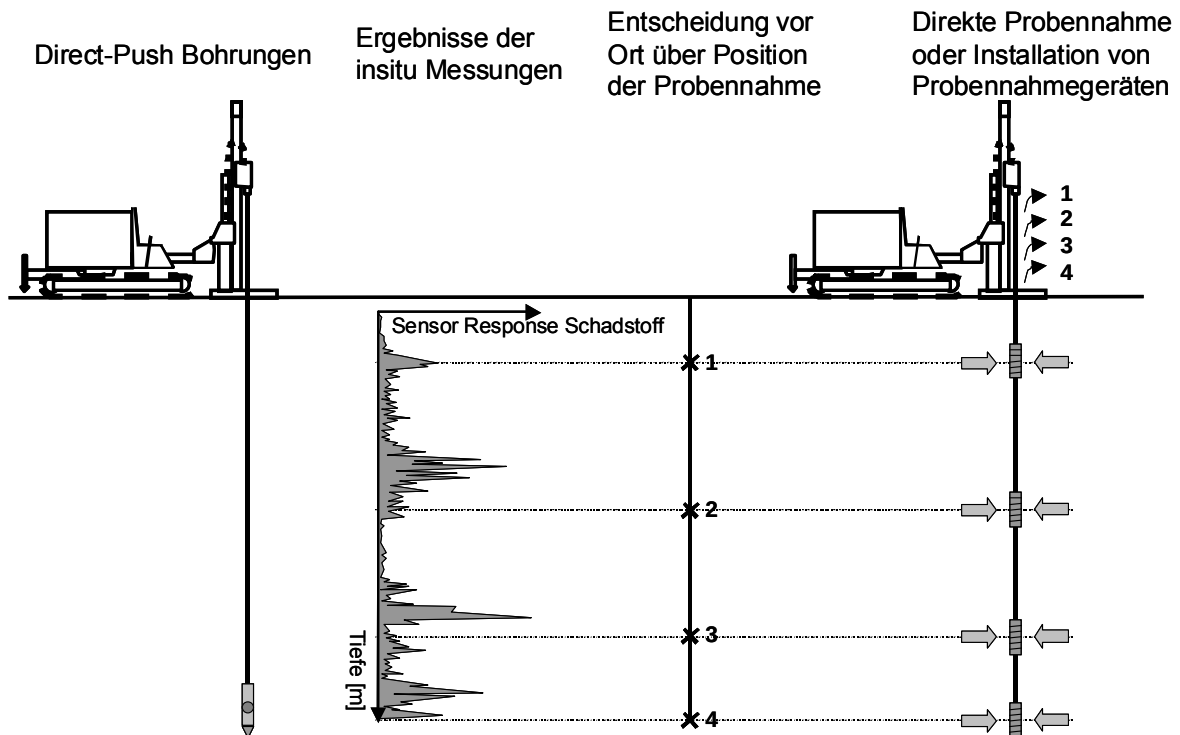


Abb. 11.1: Prinzipdarstellung der Direct-Push-Technologien mit in-situ Messungen vor Ort und der Möglichkeit einer gezielten Probennahme

11.2.1 Sensorsonden in der Direct-Push Technologie:

Aussagen über Lithologie bzw. geologischen Aufbau:

- CPT-Standard- bzw. Porenwasserdrucksonde: Messung von Spitzendruck und Mantelreibung
- Wennersonde: Messung der elektr. Leitfähigkeit:

Nachweis von Schadstoffen:

- Fluoreszenzsonde ROST/LIF: aromatische und Mineralöl-Kohlenwasserstoffe
- Membransonde MIP: VOC (LCKW, BTEX)

11.2.2 Grundwasserprobennahmesysteme in der Direct-Push Technologie:

- Bat-System
- Profiler und Screen-Point Sampler

Die tiefenorientierte Probennahme ist insbesondere bei Untersuchungen im Hinblick auf Natural-Attenuation sowie bei der horizontalen und vertikalen Eingrenzung von Schadensherden, den Schadstoffquellen und -fahnen im Untergrund von Bedeutung. Insbesondere für die Beschreibung und Simulation von Natural-Attenuation-Prozessen müssen Konzentrationsgradienten kleinräumig ermittelt werden. Hierzu muss besonders für leichtflüchtige Stoffe das Prinzip der sog. „sanften“ Probennahme (low-flow sampling) beachtet werden: Die Probennahme sollte mit möglichst geringem Volumen vorgenommen werden, um die Konzentrationsgradienten im Grundwasser zu erhalten und die Proben möglichst ohne eine Änderung der Konzentrationen der relevanten Wasserinhaltsstoffe an die Geländeoberfläche zu befördern. Die herkömmliche Probennahme wird dagegen meist mit hohen Pumpraten tiefenintegrierend vorgenommen,

was eine Störung der vorhandenen Konzentrationsgradienten bewirkt und meist nur schwer nachvollziehbare Mittelwerte der tatsächlichen Konzentrationen liefert.

Es existieren eine Reihe tiefenorientierter Probennahmetechnologien für bestehende und für neue Brunnen.

11.3.1 Tiefenorientierte Probennahme in bestehenden Brunnen:

Im Folgenden werden die Ergebnisse zweier Multilevel-Packersysteme vorgestellt, die durch eine parallele Beprobung mit niedrigen Förderraten in unterschiedlichen Tiefen eine repräsentative tiefenorientierte Grundwasserprobennahme – keine bis nicht relevante vertikale Gradienten im Kiesfilter vorausgesetzt - in konventionell ausgebauten Brunnen ermöglichen.

Scheiben- und Schlauchpackersysteme:

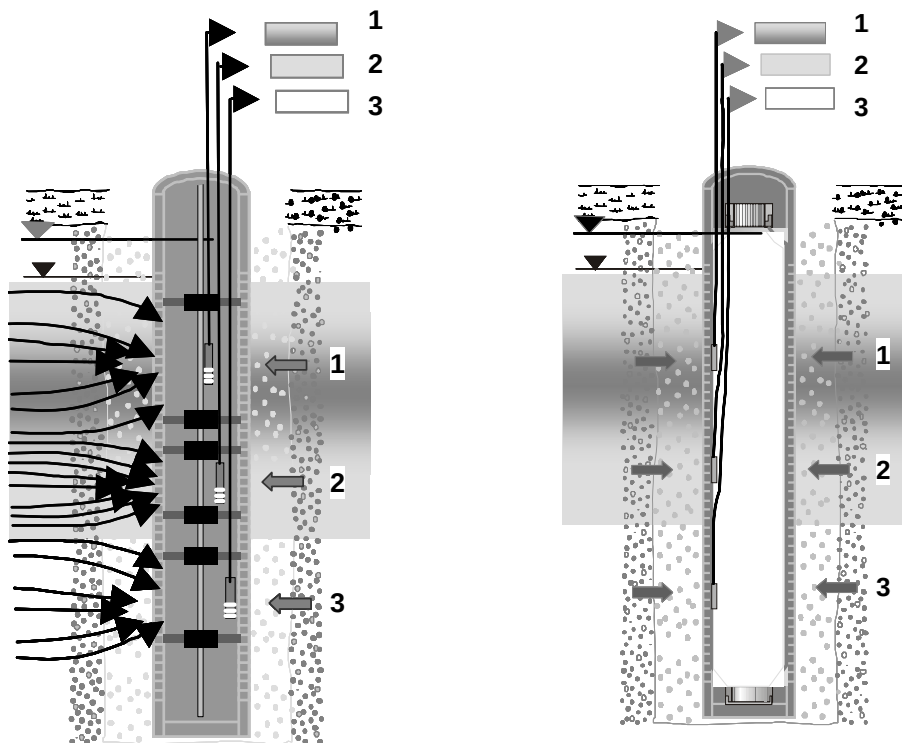


Abb. 11.3: Scheibenpacker- (links) und Schlauchpackersysteme

Beim Scheibenpackersystem werden die einzelnen Beprobungshorizonte durch Dichtungsscheiben, die an einem Zentralrohr befestigt sind, voneinander getrennt.

Beim Schlauchpackersystem handelt es sich um einen unten geschlossenen und oben offenen Schlauchpacker, der das gesamte Innere des Brunnenfilters einnimmt.

Mit beiden Packersystemen werden Vertikalströmungen und Belüftungseffekte im Brunnenfilter verhindert. Das simultane Pumpen mit Förderraten von 50 – 350 ml/min

wird bis zur mehrminütigen Konstanz der Standardparameter (O_2 , Redox, T, LF, pH) durchgeführt – dann erfolgt die Probennahme. Beide Packer können als mobile Systeme zur kurzfristigen Probennahme oder für ein Langzeitmonitoring verwendet werden. Nach dem Ausbau kann der Brunnen in seiner ursprünglichen Funktion weiter genutzt werden.

Ergebnisse:

Scheiben-Packer: 91m, 10 Horizonte

KORA: Ehestorf, Rosengarten

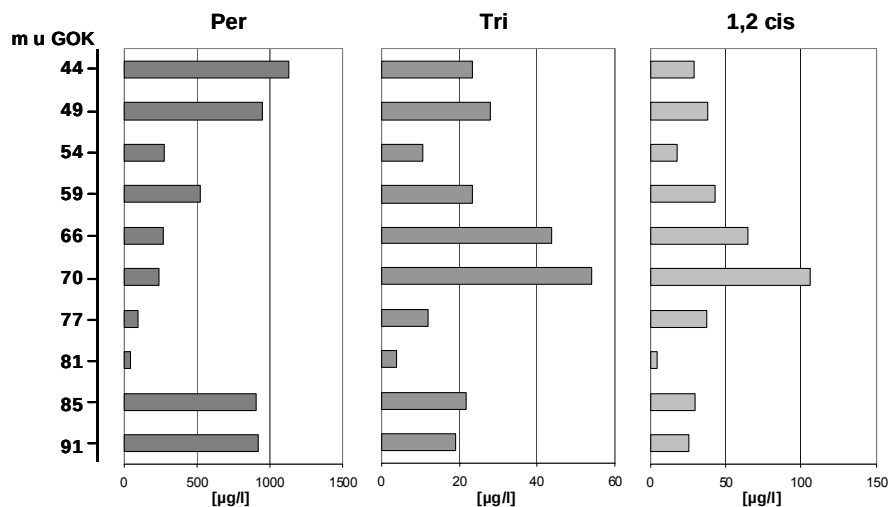


Abb. 11.4: Scheiben-Packersystem: Ergebnisse

Vergleich: Doppel-, Scheiben- und Schlauch-Packer

KORA: Karlsruhe-Ost / Killisfeld

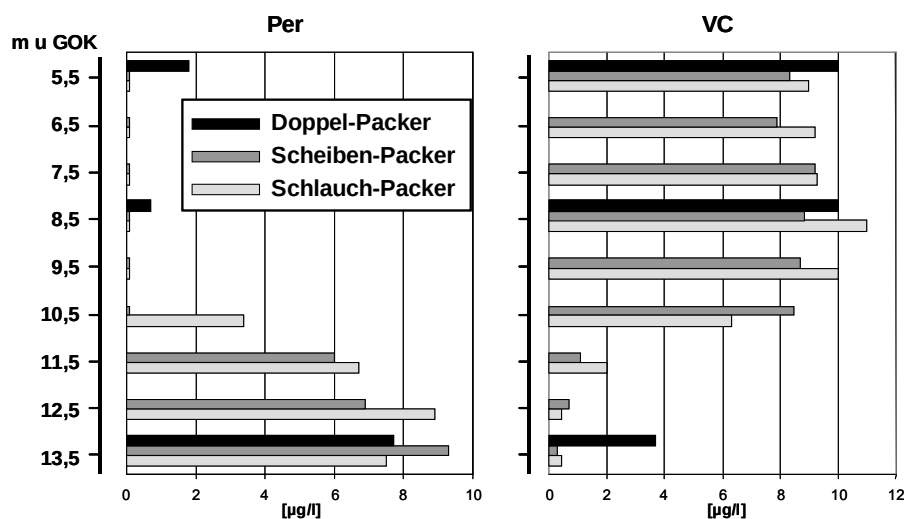


Abb. 11.5: Vergleich: Doppel-, Scheiben- und Schlauchpacker

Mit dem Scheiben-Packersystem konnten deutliche Konzentrationsunterschiede in den verschiedenen Beprobungshorizonten festgestellt werden (vgl. Abb. 11.4).

Im Vergleich zur konventionellen tiefenorientierten Beprobung mit dem Doppel-Packer können Konzentrationsprofile mit dem Scheiben- und Schlauchpacker wesentlich genauer erfasst werden (vgl. Abb. 11.5).

11.3.2 Tiefenorientierte Probennahme in neuen Brunnen:

CMT (Continuous Multichannel Tubing) System:

Beim CMT - Mehrkanalsystem handelt es sich um ein flexibles, durchgehend mehrkanaliges Röhrensystem, das direkt im Feld komplett mit Probennahmeöffnungen, -filtern, Abstandshaltern, etc. hergestellt wird. Der Einbau kann durch Direct-Push- oder herkömmliche Bohrverfahren mit Tonsperren und Kiesfilterschichten erfolgen. Mit dem CMT – Mehrkanalsystem können in verschiedenen Tiefen der Grundwasserspiegel festgestellt sowie Beprobungen durchgeführt werden.

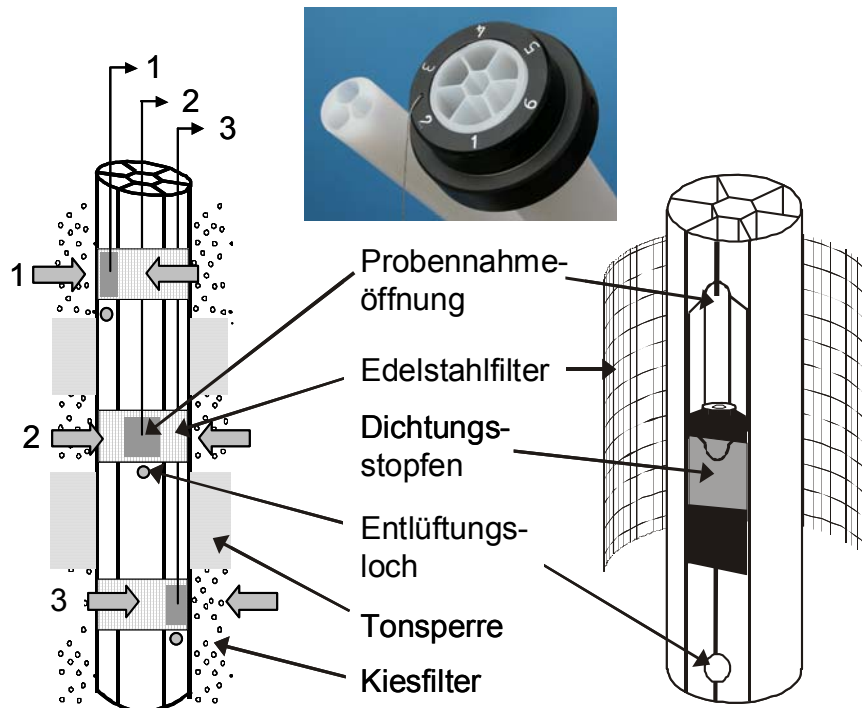


Abb. 11.6: Continuous Multichannel Tubing System

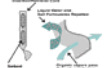
Das CMT – System ist aus parallel zueinander verlaufenden, voneinander getrennten Röhren aufgebaut und als 3-Kanal oder 7-Kanal Version erhältlich. Die Probennahmeports werden durch Aufschneiden der Kanäle von außen und einen darunter sitzenden Dichtungstopfen hergestellt. Unter dem Dichtungstopfen wird eine Entlüftungsbohrung gesetzt, damit beim Einbau die eingeschlossene Luft entweichen kann (Auftrieb!).

11.4 Passive Probennahmetechnologien

Die passive Probennahme basiert auf der Anreicherung von ausgewählten Wasserinhaltsstoffen in einem Adsorbersystem. Passive Probennahmesysteme sind bei uns bisher im Wesentlichen nur im Rahmen von Forschungsprojekten eingesetzt worden. Dabei hat die passive Anreicherung von Schadstoffen eine Reihe von Vorteilen gegenüber der aktiven Probennahme: Während bei der aktiven Grundwasserprobennahme eine Verfälschung der Probe durch das Mischen von schadstoffhaltigem und schadstofffreiem Wasser aus anderen Grundwasserhorizonten auftreten kann, beeinflussen die Passivsammler die Grundwasserströmung im Prinzip nicht. Außerdem entfällt die Entsorgung kontaminierten Grundwassers. Passivsammler benötigen keine Energiezufuhr und sind somit einfach in abgelegenen Gebieten ohne Infrastruktur anwendbar. Das Gewinnen, der Transport und die Lagerung großer Probenvolumina entfallen. Sorptionsverluste an Förderschläuchen und Probennahmegefäßen müssen nicht beachtet werden. Ebenso ist der Verlust leicht flüchtiger Substanzen, wie er vor allem beim Einsatz von Saug- und Tauchpumpen beobachtet werden kann, vernachlässigbar.

Passivsammler lassen sich grob in Gleichgewichts- und zeitintegrierende Passivsammler einteilen. Die nachfolgende Tabelle stellt eine Auswahl derzeit kommerziell erhältlicher Passivsammler dar:

Tab. 11.1: Auswahl kommerziell erhältlicher Passivsammler

Passivsammler	Substanzen	Typ	Sammelzeiten
Passiv-Diffusions-Beutel-Sammler (PDBS) 	Leichtflüchtige organische Substanzen: BTEX, CKW; Metalle, Spurenelemente	Gleichgewicht, quantitativ	7 – 14 Tage
Diffusions-Multi-Lagen-Sammler (DMLS) 	Hydrophile Substanzen: BTEX, Metalle, Sulfat, Nitrat, Chlorid	Gleichgewicht, quantitativ	2 – 4 Wochen
Semi-Permeable-Membran-Device (SPMD) 	Stark lipophile Substanzen: PCBs, Dioxine, Organochlor-Pestizide, PDBE	Zeitlich integrierend, für die meisten Substanzen, quantitativ	ca. 28 Tage
Keramik-Dosimeter & Toximeter 	PAK, BTEX, CKW	Zeitlich integrierend, quantitativ	mehrere Monate
Gore®-Sorber 	PAK, BTEX, MTBE, VOC, SVOC	Gleichgewicht, halbquantitativ	14 Tage
Gaiasafe-Sammler 	Organische Verbindungen, Metalle, Anionen, undissoziierte Substanzen	Zeitlich integrierend, halbquantitativ	2 Tage – 2 Monate
Solid-Phase-Micro-Extraction (SPME) 	PAK, BTEX, PCB, Pestizide, VOC	Gleichgewicht, quantitativ	30 Minuten

11.4.1 PDB (Polyethylen-Diffusions-Beutel) Sammler:

Der PDB-Sammler wird zum Kurzzeit-Monitoring (mind. 2 Wochen) leichtflüchtiger organischer Schadstoffe im Wasser eingesetzt. Ein mit deionisiertem Wasser befüllter Polyethylenfolienschlauch dient als Membran, die für bestimmte Schadstoffe durchlässig ist. Diese Schadstoffe diffundieren so lange durch die Membran, bis sich ein Gleichgewicht zwischen den Konzentrationen im umgebenden Wasser und den Konzentrationen im Sammler eingestellt hat. Die Zeit bis zur Gleichgewichtseinstellung ist dabei vom Schadstoff selbst, der Wassertemperatur und der Wiedereinstellung der Konzentrationsgradienten und Fließbedingungen in der Messstelle nach dem Einbau abhängig. Aus den Ergebnissen von Labor- und Feldstudien wird ein Expositionszeitraum von mindestens 2 Wochen angegeben. Der Sammler wird nach der Entnahme direkt im Gelände beprobt und anschließend entsorgt.

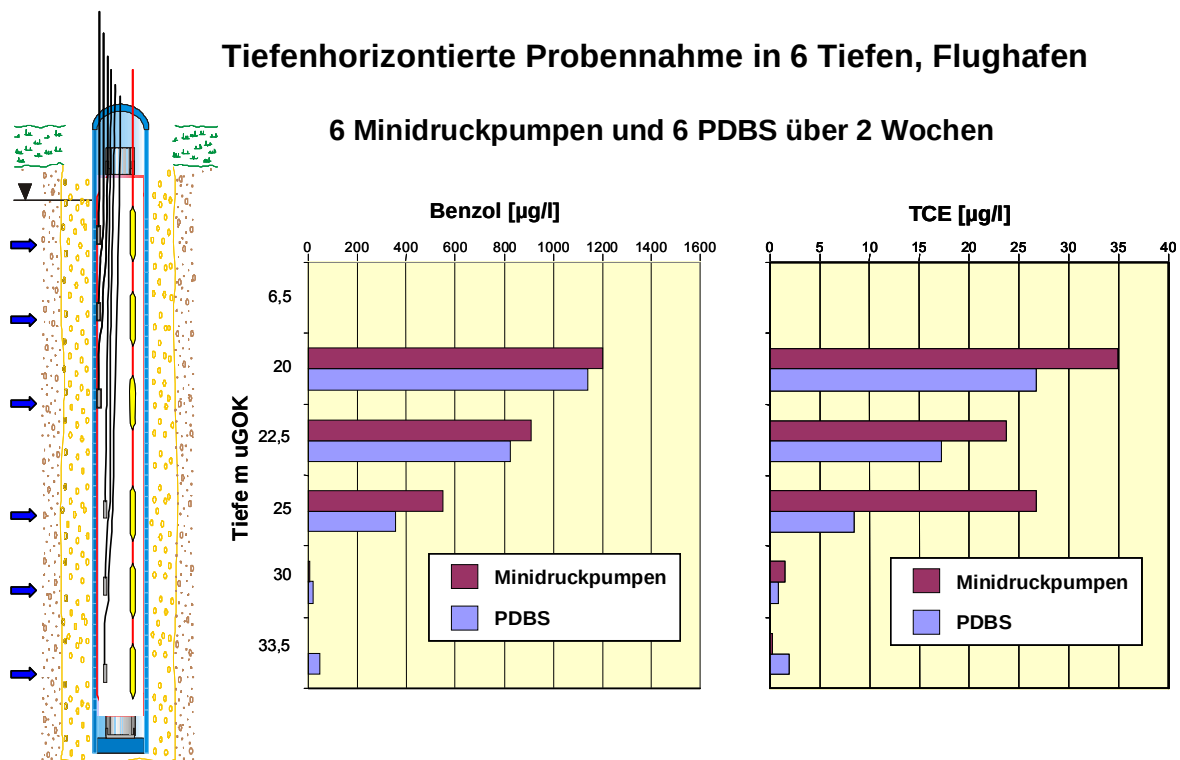
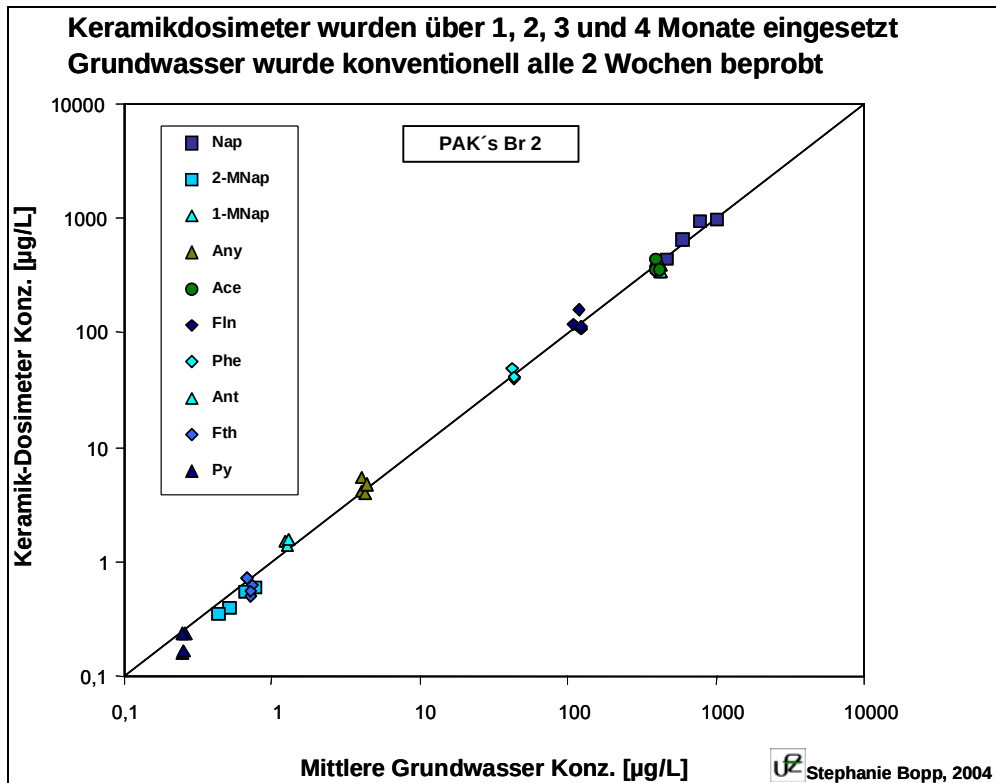


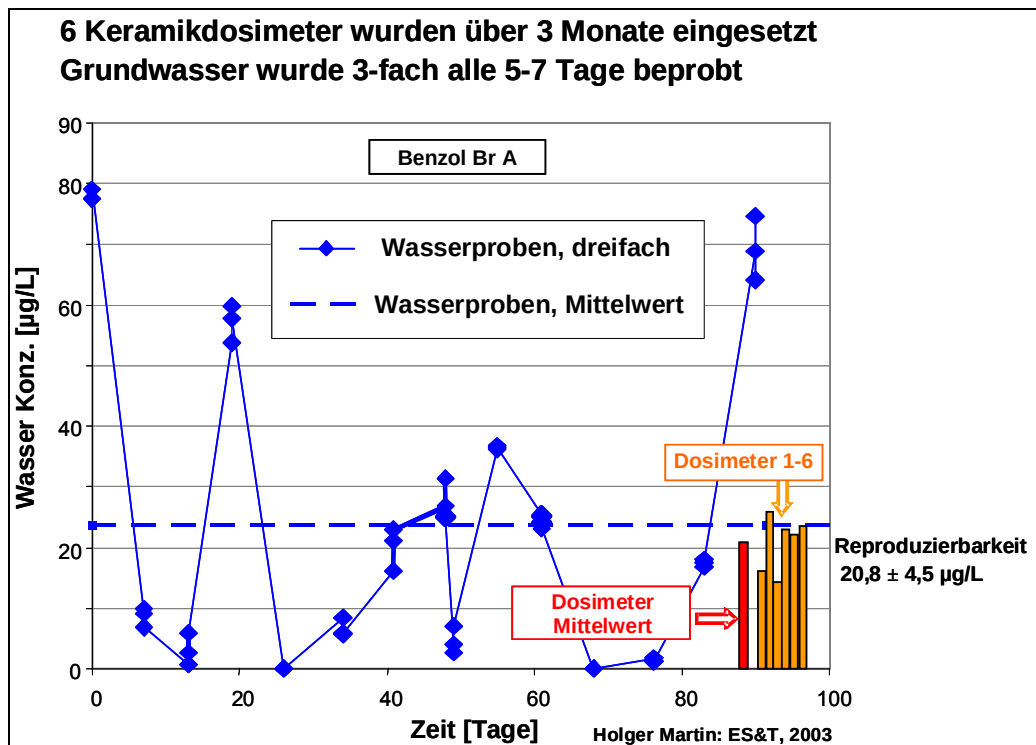
Abb. 11.7: Ergebnisvergleich einer tiefenorientierten Beprobung und einer Passiven Beprobung mit PDB-Sammlern

11.4.2 Keramik-Dosimeter:

Das Keramik-Dosimeter wird zum Langzeit-Monitoring (mehrere Monate) organischer Schadstoffe im Wasser eingesetzt. Ein beidseitig verschlossenes Keramikrohr dient sowohl als Behältnis für das Adsorbermaterial als auch inerte Membran. Die poröse Keramik wirkt dabei als konstante Materialbarriere, die von den im Kontaktwasser gelösten Substanzen diffusiv durchströmt wird. Die Schadstoffaufnahme wird daher - unabhängig von den außen anliegenden Fließgeschwindigkeiten - nur von den Diffusionseigenschaften der Stoffe durch die Keramik bestimmt.



**Abb. 11.8: Ergebnis Keramik-Dosimeter: 4-monatiger Feldversuch
im Grundwasser eines ehem. Gaswerksgeländes, Süddeutschland**



**Abb. 11.9: Ergebnis Keramik-Dosimeter: 3-monatiger Feldversuch
im Grundwasser nahe des Flusses mit stark schwankenden
Schadstoffkonzentrationen**

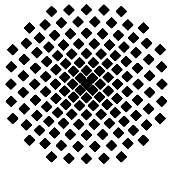
Die Adsorbermaterialien im Innern des Keramikrohrs besitzen sehr hohe Adsorptionskapazitäten und können somit ein maximales Konzentrationsgefälle zwischen außen und innen im Untersuchungszeitraum gewährleisten. Aus der adsorbierten Stoffmenge und dem Untersuchungszeitraum lässt sich die mittlere Konzentration der Stoffe im Kontaktwasser berechnen.

11.5 Perspektiven für den zukünftigen Einsatz von Passivsammlern

Die Perspektiven und Anwendungsmöglichkeiten der Passivsammlertechnologie im aquatischen Bereich sind vielseitig. So können im Fall einer Verunreinigung eines Grundwasserleiters oder Oberflächengewässers Passivsammler den anliegenden Industriebetrieben als entlastendes Beweismaterial gegenüber den ermittelnden Behörden dienen. Zeitlich integrierende Passivsammler zeigen auch dann ein Signal, wenn irgendwann während des Überwachungszeitraumes eine zeitlich limitierte Verunreinigung auftrat. Umgekehrt können Passivsammler von Vertretern der Behörden als Kontrollinstrument im Gewässerschutz genutzt werden. Passivsammler werden dann entsprechend den im jeweiligen Betrieb anfallenden Substanzgruppen konzipiert und in den Einleitungs- bzw. Ableitungsströmen installiert. Mögliche Positionierungen können Abflussrohre in die öffentliche Kanalisation, Einleitungsrohre in Flüsse und Seen sowie im Abstrom gelegene Grundwassermessstellen sein. Durch ihre zum Teil erheblichen Aufnahmekapazitäten haben viele Passivsammler das Potenzial, mehrere Monate bis Jahre am Einsatzort zu verbleiben und die Qualität des Wassers „rund um die Uhr“ zu überwachen. Dies bedeutet im Vergleich zu einer aktiven Kontrolle durch Stichtagsbeprobungen eine erhebliche Einsparung an Kosten für Personal, Geräte, Analytik und Zeit. Durch eine Verplombung der Passivsammlerhalterung können Manipulationen weitgehend ausgeschlossen werden. Gegenüber der lokal begrenzten Langzeitüberwachung wäre bei der Überwachung von ganzen Grundwasser- bzw. Oberflächenwassermessnetzen, alternativ oder in Kombination zur Stichtagsbeprobung, ein landes- oder sogar bundesweiter Einsatz von Passivsammlern denkbar. Durch ihre einfache Handhabung im Gelände – positionieren, abwarten, entnehmen, analysieren – können individuelle Fehler bei der Probennahme auf ein Minimum reduziert werden. Gleichzeitig werden Konzentrationsschwankungen, die infolge von z.B. starken Niederschlägen oder Änderungen im Fließregime bei Pumpversuchsmaßnahmen zu kurzfristigen Extremwerten führen können, über den Untersuchungszeitraum gemittelt und haben somit keine nennenswerten Auswirkungen auf den langfristigen Trend.

Die bisherigen Ergebnisse zeigen, welches Potenzial und vielfältige Einsatzmöglichkeiten Passivsammler in der Überwachung der Wasserqualität haben. Es ist sicherlich die Aufgabe der Forschung, die Passivsammler weiter zu verbessern, beispielsweise im Hinblick auf die Vermeidung störender Biofilme in Oberflächengewässern, die Eignung von Sammelmateriale für neue Stoffgruppen und die Kopplung von chemischer und toxikologischer Bewertung. Die Aufgabe von Behörden und Beratungs- bzw. Ingenieur-

büros aus dem Tätigkeitsfeld Wasser wird es jedoch sein, das große Potenzial der Passivsammler für ihre Zwecke bei der Überwachung der aquatischen Umwelt zu erschließen. Dabei zeigen die Erfahrungen von Kollegen vor allem aus dem Nordamerikanischen Raum, dass die passive Probennahme den wachsenden Ansprüchen an eine kontinuierliche, zeit- und raum-integrierende Erfassung potenziell schädlicher Substanzen im Wasser weit effektiver und kostengünstiger gerecht werden kann als dies bei der konventionellen Probennahme der Fall ist.



Institut für Wasserbau Universität Stuttgart

Pfaffenwaldring 61
70569 Stuttgart (Vaihingen)
Telefon (0711) 685 - 64717/64741/64752/64679
Telefax (0711) 685 - 67020 o. 64746 o. 64681
E-Mail: iws@iws.uni-stuttgart.de
<http://www.iws.uni-stuttgart.de>

Direktoren

Prof. Dr. rer. nat. Dr.-Ing. András Bárdossy
Prof. Dr.-Ing. Rainer Helmig
Prof. Dr.-Ing. Silke Wieprecht

Vorstand (Stand 31.08.2007)

Prof. Dr. rer. nat. Dr.-Ing. A. Bárdossy
Prof. Dr.-Ing. R. Helmig
Prof. Dr.-Ing. S. Wieprecht
Prof. Dr.-Ing. habil. B. Westrich
Jürgen Braun, PhD
Dr.-Ing. H. Class
Dr.-Ing. A. Färber
Dr.-Ing. H.-P. Koschitzky
PD Dr.-Ing. W. Marx

Emeriti

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Jürgen Giesecke
Prof. Dr.h.c. Dr.-Ing. E.h. Helmut Kobus, PhD

Lehrstuhl für Wasserbau und Wassermengenwirtschaft

Leiter: Prof. Dr.-Ing. Silke Wieprecht
Stellv.: PD Dr.-Ing. Walter Marx, AOR

Lehrstuhl für Hydrologie und Geohydrologie

Leiter: Prof. Dr. rer. nat. Dr.-Ing. András Bárdossy
Stellv.: Dr.-Ing. Arne Färber

Lehrstuhl für Hydromechanik und Hydrosystemmodellierung

Leiter: Prof. Dr.-Ing. Rainer Helmig
Stellv.: Dr.-Ing. Holger Class, AOR

VEGAS, Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung

Leitung: Jürgen Braun, PhD
Dr.-Ing. Hans-Peter Koschitzky, AD

Versuchsanstalt für Wasserbau

Leiter: apl. Prof. Dr.-Ing. Bernhard Westrich

Verzeichnis der Mitteilungshefte

- 1 Röhnisch, Arthur: *Die Bemühungen um eine Wasserbauliche Versuchsanstalt an der Technischen Hochschule Stuttgart*, und
Fattah Abouleid, Abdel: *Beitrag zur Berechnung einer in lockeren Sand gerammten, zweifach verankerten Spundwand*, 1963
- 2 Marotz, Günter: *Beitrag zur Frage der Standfestigkeit von dichten Asphaltbelägen im Großwasserbau*, 1964
- 3 Gurr, Siegfried: *Beitrag zur Berechnung zusammengesetzter ebener Flächen-tragwerke unter besonderer Berücksichtigung ebener Stauwände, mit Hilfe von Randwert- und Lastwertmatrizen*, 1965
- 4 Plica, Peter: *Ein Beitrag zur Anwendung von Schalenkonstruktionen im Stahlwasserbau*, und Petrikat, Kurt: *Möglichkeiten und Grenzen des wasserbaulichen Versuchswesens*, 1966

- 5 Plate, Erich: *Beitrag zur Bestimmung der Windgeschwindigkeitsverteilung in der durch eine Wand gestörten bodennahen Luftschicht*, und
Röhnisch, Arthur; Marotz, Günter: *Neue Baustoffe und Bauausführungen für den Schutz der Böschungen und der Sohle von Kanälen, Flüssen und Häfen; Gesteungskosten und jeweilige Vorteile*, sowie Unny, T.E.: *Schwingungsuntersuchungen am Kegelstrahlschieber*, 1967
- 6 Seiler, Erich: *Die Ermittlung des Anlagenwertes der bundeseigenen Binnenschiffahrtsstraßen und Talsperren und des Anteils der Binnenschifffahrt an diesem Wert*, 1967
- 7 *Sonderheft anlässlich des 65. Geburtstages von Prof. Arthur Röhnisch mit Beiträgen von* Benk, Dieter; Breitling, J.; Gurr, Siegfried; Haberhauer, Robert; Honekamp, Hermann; Kuz, Klaus Dieter; Marotz, Günter; Mayer-Vorfelder, Hans-Jörg; Miller, Rudolf; Plate, Erich J.; Radomski, Helge; Schwarz, Helmut; Vollmer, Ernst; Wildenhahn, Eberhard; 1967
- 8 Jumikis, Alfred: *Beitrag zur experimentellen Untersuchung des Wassernachschubs in einem gefrierenden Boden und die Beurteilung der Ergebnisse*, 1968
- 9 Marotz, Günter: *Technische Grundlagen einer Wasserspeicherung im natürlichen Untergrund*, 1968
- 10 Radomski, Helge: *Untersuchungen über den Einfluß der Querschnittsform wellenförmiger Spundwände auf die statischen und rammtechnischen Eigenschaften*, 1968
- 11 Schwarz, Helmut: *Die Grenztragfähigkeit des Baugrundes bei Einwirkung vertikal gezogener Ankerplatten als zweidimensionales Bruchproblem*, 1969
- 12 Erbel, Klaus: *Ein Beitrag zur Untersuchung der Metamorphose von Mittelgebirgsschneedecken unter besonderer Berücksichtigung eines Verfahrens zur Bestimmung der thermischen Schneequalität*, 1969
- 13 Westhaus, Karl-Heinz: *Der Strukturwandel in der Binnenschifffahrt und sein Einfluß auf den Ausbau der Binnenschiffskanäle*, 1969
- 14 Mayer-Vorfelder, Hans-Jörg: *Ein Beitrag zur Berechnung des Erdwiderstandes unter Ansatz der logarithmischen Spirale als Gleitflächenfunktion*, 1970
- 15 Schulz, Manfred: *Berechnung des räumlichen Erddruckes auf die Wandung kreiszylindrischer Körper*, 1970
- 16 Mobasser, Manoutschehr: *Die Rippenstützmauer. Konstruktion und Grenzen ihrer Standsicherheit*, 1970
- 17 Benk, Dieter: *Ein Beitrag zum Betrieb und zur Bemessung von Hochwasserrückhaltebecken*, 1970

- 18 Gál, Attila: *Bestimmung der mitschwingenden Wassermasse bei überströmten Fischbauchklappen mit kreiszylindrischem Staublech*, 1971, vergriffen
- 19 Kuz, Klaus Dieter: *Ein Beitrag zur Frage des Einsetzens von Kavitationserscheinungen in einer Düsenströmung bei Berücksichtigung der im Wasser gelösten Gase*, 1971, vergriffen
- 20 Schaak, Hartmut: *Verteilleitungen von Wasserkraftanlagen*, 1971
- 21 *Sonderheft zur Eröffnung der neuen Versuchsanstalt des Instituts für Wasserbau der Universität Stuttgart mit Beiträgen von* Brombach, Hansjörg; Dirksen, Wolfram; Gál, Attila; Gerlach, Reinhard; Giesecke, Jürgen; Holthoff, Franz-Josef; Kuz, Klaus Dieter; Marotz, Günter; Minor, Hans-Erwin; Petrikat, Kurt; Röhnisch, Arthur; Rueff, Helge; Schwarz, Helmut; Vollmer, Ernst; Wildenhahn, Eberhard; 1972
- 22 Wang, Chung-su: *Ein Beitrag zur Berechnung der Schwingungen an Kegelstrahlschiebern*, 1972
- 23 Mayer-Vorfelder, Hans-Jörg: *Erdwiderstandsbeiwerte nach dem Ohde-Variationsverfahren*, 1972
- 24 Minor, Hans-Erwin: *Beitrag zur Bestimmung der Schwingungsanfachungsfunktionen überströmter Stauklappen*, 1972, vergriffen
- 25 Brombach, Hansjörg: *Untersuchung strömungsmechanischer Elemente (Fluidik) und die Möglichkeit der Anwendung von Wirbelkammerelementen im Wasserbau*, 1972, vergriffen
- 26 Wildenhahn, Eberhard: *Beitrag zur Berechnung von Horizontalfilterbrunnen*, 1972
- 27 Steinlein, Helmut: *Die Eliminierung der Schwebstoffe aus Flußwasser zum Zweck der unterirdischen Wasserspeicherung, gezeigt am Beispiel der Iller*, 1972
- 28 Holthoff, Franz Josef: *Die Überwindung großer Hubhöhen in der Binnenschifffahrt durch Schwimmerhebwerke*, 1973
- 29 Röder, Karl: *Einwirkungen aus Baugrundbewegungen auf trog- und kastenförmige Konstruktionen des Wasser- und Tunnelbaues*, 1973
- 30 Kretschmer, Heinz: *Die Bemessung von Bogenstaumauern in Abhängigkeit von der Talform*, 1973
- 31 Honekamp, Hermann: *Beitrag zur Berechnung der Montage von Unterwasserpipelines*, 1973
- 32 Giesecke, Jürgen: *Die Wirbelkammertriode als neuartiges Steuerorgan im Wasserbau*, und Brombach, Hansjörg: *Entwicklung, Bauformen, Wirkungsweise und Steuereigenschaften von Wirbelkammerversärkern*, 1974
- 33 Rueff, Helge: *Untersuchung der schwingungserregenden Kräfte an zwei hintereinander angeordneten Tiefschützen unter besonderer Berücksichtigung von Kavitation*, 1974

- 34 Röhnisch, Arthur: *Einpreßversuche mit Zementmörtel für Spannbeton - Vergleich der Ergebnisse von Modellversuchen mit Ausführungen in Hüllwellrohren*, 1975
- 35 *Sonderheft anlässlich des 65. Geburtstages von Prof. Dr.-Ing. Kurt Petrikat mit Beiträgen von:* Brombach, Hansjörg; Erbel, Klaus; Flinspach, Dieter; Fischer jr., Richard; Gàl, Attila; Gerlach, Reinhard; Giesecke, Jürgen; Haberhauer, Robert; Hafner Edzard; Hausenblas, Bernhard; Horlacher, Hans-Burkhard; Hutarew, Andreas; Knoll, Manfred; Krummet, Ralph; Marotz, Günter; Merkle, Theodor; Miller, Christoph; Minor, Hans-Erwin; Neumayer, Hans; Rao, Syamala; Rath, Paul; Rueff, Helge; Ruppert, Jürgen; Schwarz, Wolfgang; Topal-Gökceli, Mehmet; Vollmer, Ernst; Wang, Chung-su; Weber, Hans-Georg; 1975
- 36 Berger, Jochum: *Beitrag zur Berechnung des Spannungszustandes in rotations-symmetrisch belasteten Kugelschalen veränderlicher Wandstärke unter Gas- und Flüssigkeitsdruck durch Integration schwach singulärer Differentialgleichungen*, 1975
- 37 Dirksen, Wolfram: *Berechnung instationärer Abflußvorgänge in gestauten Gerinnen mittels Differenzenverfahren und die Anwendung auf Hochwasserrückhaltebecken*, 1976
- 38 Horlacher, Hans-Burkhard: *Berechnung instationärer Temperatur- und Spannungsfelder in langen mehrschichtigen Hohlzylindern*, 1976
- 39 Hafner, Edzard: *Untersuchung der hydrodynamischen Kräfte auf Baukörper im Tiefwasserbereich des Meeres*, 1977, ISBN 3-921694-39-6
- 40 Ruppert, Jürgen: *Über den Axialwirbelkammerversärker für den Einsatz im Wasserbau*, 1977, ISBN 3-921694-40-X
- 41 Hutarew, Andreas: *Beitrag zur Beeinflußbarkeit des Sauerstoffgehalts in Fließgewässern an Abstürzen und Wehren*, 1977, ISBN 3-921694-41-8, vergriffen
- 42 Miller, Christoph: *Ein Beitrag zur Bestimmung der schwingungserregenden Kräfte an unterströmten Wehren*, 1977, ISBN 3-921694-42-6
- 43 Schwarz, Wolfgang: *Druckstoßberechnung unter Berücksichtigung der Radial- und Längsverschiebungen der Rohrwandung*, 1978, ISBN 3-921694-43-4
- 44 Kinzelbach, Wolfgang: *Numerische Untersuchungen über den optimalen Einsatz variabler Kühlsysteme einer Kraftwerkskette am Beispiel Oberrhein*, 1978, ISBN 3-921694-44-2
- 45 Barczewski, Baldur: *Neue Meßmethoden für Wasser-Luftgemische und deren Anwendung auf zweiphasige Auftriebsstrahlen*, 1979, ISBN 3-921694-45-0
- 46 Neumayer, Hans: *Untersuchung der Strömungsvorgänge in radialen Wirbelkammerversärkern*, 1979, ISBN 3-921694-46-9
- 47 Elalfy, Youssef-Elhassan: *Untersuchung der Strömungsvorgänge in Wirbelkammerdioden und -drosseln*, 1979, ISBN 3-921694-47-7

- 48 Brombach, Hansjörg: *Automatisierung der Bewirtschaftung von Wasserspeichern*, 1981, ISBN 3-921694-48-5
- 49 Geldner, Peter: *Deterministische und stochastische Methoden zur Bestimmung der Selbstdichtung von Gewässern*, 1981, ISBN 3-921694-49-3, vergriffen
- 50 Mehlhorn, Hans: *Temperaturveränderungen im Grundwasser durch Brauchwassereinleitungen*, 1982, ISBN 3-921694-50-7, vergriffen
- 51 Hafner, Edzard: *Rohrleitungen und Behälter im Meer*, 1983, ISBN 3-921694-51-5
- 52 Rinnert, Bernd: *Hydrodynamische Dispersion in porösen Medien: Einfluß von Dichteunterschieden auf die Vertikalvermischung in horizontaler Strömung*, 1983, ISBN 3-921694-52-3, vergriffen
- 53 Lindner, Wulf: *Steuerung von Grundwasserentnahmen unter Einhaltung ökologischer Kriterien*, 1983, ISBN 3-921694-53-1, vergriffen
- 54 Herr, Michael; Herzer, Jörg; Kinzelbach, Wolfgang; Kobus, Helmut; Rinnert, Bernd: *Methoden zur rechnerischen Erfassung und hydraulischen Sanierung von Grundwasserkontaminationen*, 1983, ISBN 3-921694-54-X
- 55 Schmitt, Paul: *Wege zur Automatisierung der Niederschlagsermittlung*, 1984, ISBN 3-921694-55-8, vergriffen
- 56 Müller, Peter: *Transport und selektive Sedimentation von Schwebstoffen bei gestautem Abfluß*, 1985, ISBN 3-921694-56-6
- 57 El-Qawasmeh, Fuad: *Möglichkeiten und Grenzen der Tropfbewässerung unter besonderer Berücksichtigung der Verstopfungsanfälligkeit der Tropfelemente*, 1985, ISBN 3-921694-57-4, vergriffen
- 58 Kirchenbaur, Klaus: *Mikroprozessorgesteuerte Erfassung instationärer Druckfelder am Beispiel seegangbelasteter Baukörper*, 1985, ISBN 3-921694-58-2
- 59 Kobus, Helmut (Hrsg.): *Modellierung des großräumigen Wärme- und Schadstofftransports im Grundwasser*, Tätigkeitsbericht 1984/85 (DFG-Forschergruppe an den Universitäten Hohenheim, Karlsruhe und Stuttgart), 1985, ISBN 3-921694-59-0, vergriffen
- 60 Spitz, Karlheinz: *Dispersion in porösen Medien: Einfluß von Inhomogenitäten und Dichteunterschieden*, 1985, ISBN 3-921694-60-4, vergriffen
- 61 Kobus, Helmut: *An Introduction to Air-Water Flows in Hydraulics*, 1985, ISBN 3-921694-61-2
- 62 Kaleris, Vassilios: *Erfassung des Austausches von Oberflächen- und Grundwasser in horizontalebenen Grundwassermodellen*, 1986, ISBN 3-921694-62-0
- 63 Herr, Michael: *Grundlagen der hydraulischen Sanierung verunreinigter Porengrundwasserleiter*, 1987, ISBN 3-921694-63-9

-
- 64 Marx, Walter: *Berechnung von Temperatur und Spannung in Massengbeton infolge Hydratation*, 1987, ISBN 3-921694-64-7
- 65 Koschitzky, Hans-Peter: *Dimensionierungskonzept für Sohlbelüfter in Schußrinnen zur Vermeidung von Kavitationsschäden*, 1987, ISBN 3-921694-65-5
- 66 Kobus, Helmut (Hrsg.): *Modellierung des großräumigen Wärme- und Schadstofftransports im Grundwasser*, Tätigkeitsbericht 1986/87 (DFG-Forschergruppe an den Universitäten Hohenheim, Karlsruhe und Stuttgart) 1987, ISBN 3-921694-66-3
- 67 Söll, Thomas: *Berechnungsverfahren zur Abschätzung anthropogener Temperaturanomalien im Grundwasser*, 1988, ISBN 3-921694-67-1
- 68 Dittrich, Andreas; Westrich, Bernd: *Bodenseeufenerosion, Bestandsaufnahme und Bewertung*, 1988, ISBN 3-921694-68-X, vergriffen
- 69 Huwe, Bernd; van der Ploeg, Rienk R.: *Modelle zur Simulation des Stickstoffhaushaltes von Standorten mit unterschiedlicher landwirtschaftlicher Nutzung*, 1988, ISBN 3-921694-69-8, vergriffen
- 70 Stephan, Karl: *Integration elliptischer Funktionen*, 1988, ISBN 3-921694-70-1
- 71 Kobus, Helmut; Zilliox, Lothaire (Hrsg.): *Nitratbelastung des Grundwassers, Auswirkungen der Landwirtschaft auf die Grundwasser- und Rohwasserbeschaffenheit und Maßnahmen zum Schutz des Grundwassers*. Vorträge des deutsch-französischen Kolloquiums am 6. Oktober 1988, Universitäten Stuttgart und Louis Pasteur Strasbourg (Vorträge in deutsch oder französisch, Kurzfassungen zweisprachig), 1988, ISBN 3-921694-71-X
- 72 Soyeaux, Renald: *Unterströmung von Stauanlagen auf klüftigem Untergrund unter Berücksichtigung laminarer und turbulenter Fließzustände*, 1991, ISBN 3-921694-72-8
- 73 Kohane, Roberto: *Berechnungsmethoden für Hochwasserabfluß in Fließgewässern mit überströmten Vorländern*, 1991, ISBN 3-921694-73-6
- 74 Hassinger, Reinhard: *Beitrag zur Hydraulik und Bemessung von Blocksteinrampen in flexibler Bauweise*, 1991, ISBN 3-921694-74-4, vergriffen
- 75 Schäfer, Gerhard: *Einfluß von Schichtenstrukturen und lokalen Einlagerungen auf die Längsdispersion in Porengrundwasserleitern*, 1991, ISBN 3-921694-75-2
- 76 Giesecke, Jürgen: *Vorträge, Wasserwirtschaft in stark besiedelten Regionen; Umweltforschung mit Schwerpunkt Wasserwirtschaft*, 1991, ISBN 3-921694-76-0
- 77 Huwe, Bernd: *Deterministische und stochastische Ansätze zur Modellierung des Stickstoffhaushalts landwirtschaftlich genutzter Flächen auf unterschiedlichem Skalenniveau*, 1992, ISBN 3-921694-77-9, vergriffen

- 78 Rommel, Michael: *Verwendung von Kluftdaten zur realitätsnahen Generierung von Kluftnetzen mit anschließender laminar-turbulenter Strömungsberechnung*, 1993, ISBN 3-92 1694-78-7
- 79 Marschall, Paul: *Die Ermittlung lokaler Stofffrachten im Grundwasser mit Hilfe von Einbohrloch-Meßverfahren*, 1993, ISBN 3-921694-79-5, vergriffen
- 80 Ptak, Thomas: *Stofftransport in heterogenen Porenaquiferen: Felduntersuchungen und stochastische Modellierung*, 1993, ISBN 3-921694-80-9, vergriffen
- 81 Haakh, Frieder: *Transientes Strömungsverhalten in Wirbelkammern*, 1993, ISBN 3-921694-81-7
- 82 Kobus, Helmut; Cirpka, Olaf; Barczewski, Baldur; Koschitzky, Hans-Peter: *Versuchseinrichtung zur Grundwasser und Altlastensanierung VEGAS, Konzeption und Programmrahmen*, 1993, ISBN 3-921694-82-5
- 83 Zang, Weidong: *Optimaler Echtzeit-Betrieb eines Speichers mit aktueller Abflußregenerierung*, 1994, ISBN 3-921694-83-3, vergriffen
- 84 Franke, Hans-Jörg: *Stochastische Modellierung eines flächenhaften Stoffeintrages und Transports in Grundwasser am Beispiel der Pflanzenschutzmittelproblematik*, 1995, ISBN 3-921694-84-1
- 85 Lang, Ulrich: *Simulation regionaler Strömungs- und Transportvorgänge in Karst-aquiferen mit Hilfe des Doppelkontinuum-Ansatzes: Methodenentwicklung und Parameteridentifikation*, 1995, ISBN 3-921694-85-X, vergriffen
- 86 Helmig, Rainer: *Einführung in die Numerischen Methoden der Hydromechanik*, 1996, ISBN 3-921694-86-8, vergriffen
- 87 Cirpka, Olaf: *CONTRACT: A Numerical Tool for Contaminant Transport and Chemical Transformations - Theory and Program Documentation -*, 1996, ISBN 3-921694-87-6
- 88 Haberlandt, Uwe: *Stochastische Synthese und Regionalisierung des Niederschlages für Schmutzfrachtberechnungen*, 1996, ISBN 3-921694-88-4
- 89 Croisé, Jean: *Extraktion von flüchtigen Chemikalien aus natürlichen Lockergesteinen mittels erzwungener Luftströmung*, 1996, ISBN 3-921694-89-2, vergriffen
- 90 Jorde, Klaus: *Ökologisch begründete, dynamische Mindestwasserregelungen bei Ausleitungskraftwerken*, 1997, ISBN 3-921694-90-6, vergriffen
- 91 Helmig, Rainer: *Gekoppelte Strömungs- und Transportprozesse im Untergrund - Ein Beitrag zur Hydrosystemmodellierung-*, 1998, ISBN 3-921694-91-4
- 92 Emmert, Martin: *Numerische Modellierung nichtisothermer Gas-Wasser Systeme in porösen Medien*, 1997, ISBN 3-921694-92-2
- 93 Kern, Ulrich: *Transport von Schweb- und Schadstoffen in staugeregelten Fließgewässern am Beispiel des Neckars*, 1997, ISBN 3-921694-93-0, vergriffen

- 94 Förster, Georg: *Druckstoßdämpfung durch große Luftblasen in Hochpunkten von Rohrleitungen* 1997, ISBN 3-921694-94-9
- 95 Cirpka, Olaf: *Numerische Methoden zur Simulation des reaktiven Mehrkomponententransports im Grundwasser*, 1997, ISBN 3-921694-95-7, vergriffen
- 96 Färber, Arne: *Wärmetransport in der ungesättigten Bodenzone: Entwicklung einer thermischen In-situ-Sanierungstechnologie*, 1997, ISBN 3-921694-96-5
- 97 Betz, Christoph: *Wasserdampfdestillation von Schadstoffen im porösen Medium: Entwicklung einer thermischen In-situ-Sanierungstechnologie*, 1998, ISBN 3-921694-97-3
- 98 Xu, Yichun: *Numerical Modeling of Suspended Sediment Transport in Rivers*, 1998, ISBN 3-921694-98-1, vergriffen
- 99 Wüst, Wolfgang: *Geochemische Untersuchungen zur Sanierung CKW-kontaminierter Aquifere mit Fe(0)-Reaktionswänden*, 2000, ISBN 3-933761-02-2
- 100 Sheta, Hussam: *Simulation von Mehrphasenvorgängen in porösen Medien unter Einbeziehung von Hysterese-Effekten*, 2000, ISBN 3-933761-03-4
- 101 Ayros, Edwin: *Regionalisierung extremer Abflüsse auf der Grundlage statistischer Verfahren*, 2000, ISBN 3-933761-04-2, vergriffen
- 102 Huber, Ralf: *Compositional Multiphase Flow and Transport in Heterogeneous Porous Media*, 2000, ISBN 3-933761-05-0
- 103 Braun, Christopherus: *Ein Upscaling-Verfahren für Mehrphasenströmungen in porösen Medien*, 2000, ISBN 3-933761-06-9
- 104 Hofmann, Bernd: *Entwicklung eines rechnergestützten Managementsystems zur Beurteilung von Grundwasserschadensfällen*, 2000, ISBN 3-933761-07-7
- 105 Class, Holger: *Theorie und numerische Modellierung nichtisothermer Mehrphasenprozesse in NAPL-kontaminierten porösen Medien*, 2001, ISBN 3-933761-08-5
- 106 Schmidt, Reinhard: *Wasserdampf- und Heißluftinjektion zur thermischen Sanierung kontaminierter Standorte*, 2001, ISBN 3-933761-09-3
- 107 Josef, Reinhold: *Schadstoffextraktion mit hydraulischen Sanierungsverfahren unter Anwendung von grenzflächenaktiven Stoffen*, 2001, ISBN 3-933761-10-7
- 108 Schneider, Matthias: *Habitat- und Abflussmodellierung für Fließgewässer mit unscharfen Berechnungsansätzen*, 2001, ISBN 3-933761-11-5
- 109 Rathgeb, Andreas: *Hydrodynamische Bemessungsgrundlagen für Lockerdeckwerke an überströmbaren Erddämmen*, 2001, ISBN 3-933761-12-3

- 110 Lang, Stefan: *Parallele numerische Simulation instationärer Probleme mit adaptiven Methoden auf unstrukturierten Gittern*, 2001, ISBN 3-933761-13-1
- 111 Appt, Jochen; Stumpp Simone: *Die Bodensee-Messkampagne 2001, IWS/CWR Lake Constance Measurement Program 2001*, 2002, ISBN 3-933761-14-X
- 112 Heimerl, Stephan: *Systematische Beurteilung von Wasserkraftprojekten*, 2002, ISBN 3-933761-15-8
- 113 Iqbal, Amin: *On the Management and Salinity Control of Drip Irrigation*, 2002, ISBN 3-933761-16-6
- 114 Silberhorn-Hemminger, Annette: *Modellierung von Kluftaquifersystemen: Geostatistische Analyse und deterministisch-stochastische Kluftgenerierung*, 2002, ISBN 3-933761-17-4
- 115 Winkler, Angela: *Prozesse des Wärme- und Stofftransports bei der In-situ-Sanierung mit festen Wärmequellen*, 2003, ISBN 3-933761-18-2
- 116 Marx, Walter: *Wasserkraft, Bewässerung, Umwelt - Planungs- und Bewertungsschwerpunkte der Wasserbewirtschaftung*, 2003, ISBN 3-933761-19-0
- 117 Hinkelmann, Reinhard: *Efficient Numerical Methods and Information-Processing Techniques in Environment Water*, 2003, ISBN 3-933761-20-4
- 118 Samaniego-Eguiguren, Luis Eduardo: *Hydrological Consequences of Land Use / Land Cover and Climatic Changes in Mesoscale Catchments*, 2003, ISBN 3-933761-21-2
- 119 Neunhäuserer, Lina: *Diskretisierungsansätze zur Modellierung von Strömungs- und Transportprozessen in geklüftet-porösen Medien*, 2003, ISBN 3-933761-22-0
- 120 Paul, Maren: *Simulation of Two-Phase Flow in Heterogeneous Porous Media with Adaptive Methods*, 2003, ISBN 3-933761-23-9
- 121 Ehret, Uwe: *Rainfall and Flood Nowcasting in Small Catchments using Weather Radar*, 2003, ISBN 3-933761-24-7
- 122 Haag, Ingo: *Der Sauerstoffhaushalt staugeregelter Flüsse am Beispiel des Neckars - Analysen, Experimente, Simulationen -*, 2003, ISBN 3-933761-25-5
- 123 Appt, Jochen: *Analysis of Basin-Scale Internal Waves in Upper Lake Constance*, 2003, ISBN 3-933761-26-3
- 124 Hrsg.: Schrenk, Volker; Batereau, Katrin; Barczewski, Baldur; Weber, Karolin und Koschitzky, Hans-Peter: *Symposium Ressource Fläche und VEGAS - Statuskolloquium 2003, 30. September und 1. Oktober 2003*, 2003, ISBN 3-933761-27-1
- 125 Omar Khalil Ouda: *Optimisation of Agricultural Water Use: A Decision Support System for the Gaza Strip*, 2003, ISBN 3-933761-28-0

- 126 Batereau, Katrin: *Sensorbasierte Bodenluftmessung zur Vor-Ort-Erkundung von Schadensherden im Untergrund*, 2004, ISBN 3-933761-29-8
- 127 Witt, Oliver: *Erosionsstabilität von Gewässersedimenten mit Auswirkung auf den Stofftransport bei Hochwasser am Beispiel ausgewählter Stauhaltungen des Oberrheins*, 2004, ISBN 3-933761-30-1
- 128 Jakobs, Hartmut: *Simulation nicht-isothermer Gas-Wasser-Prozesse in komplexen Kluft-Matrix-Systemen*, 2004, ISBN 3-933761-31-X
- 129 Li, Chen-Chien: *Deterministisch-stochastisches Berechnungskonzept zur Beurteilung der Auswirkungen erosiver Hochwasserereignisse in Flusstauhaltungen*, 2004, ISBN 3-933761-32-8
- 130 Reichenberger, Volker; Helmig, Rainer; Jakobs, Hartmut; Bastian, Peter; Niessner, Jennifer: *Complex Gas-Water Processes in Discrete Fracture-Matrix Systems: Up-scaling, Mass-Conservative Discretization and Efficient Multilevel Solution*, 2004, ISBN 3-933761-33-6
- 131 Hrsg.: Barczewski, Baldur; Koschitzky, Hans-Peter; Weber, Karolin; Wege, Ralf: *VEGAS - Statuskolloquium 2004*, Tagungsband zur Veranstaltung am 05. Oktober 2004 an der Universität Stuttgart, Campus Stuttgart-Vaihingen, 2004, ISBN 3-933761-34-4
- 132 Asie, Kemal Jabir: *Finite Volume Models for Multiphase Multicomponent Flow through Porous Media*. 2005, ISBN 3-933761-35-2
- 133 Jacoub, George: *Development of a 2-D Numerical Module for Particulate Contaminant Transport in Flood Retention Reservoirs and Impounded Rivers*, 2004, ISBN 3-933761-36-0
- 134 Nowak, Wolfgang: *Geostatistical Methods for the Identification of Flow and Transport Parameters in the Subsurface*, 2005, ISBN 3-933761-37-9
- 135 Süß, Mia: *Analysis of the influence of structures and boundaries on flow and transport processes in fractured porous media*, 2005, ISBN 3-933761-38-7
- 136 Jose, Surabhin Chackiath: *Experimental Investigations on Longitudinal Dispersive Mixing in Heterogeneous Aquifers*, 2005, ISBN: 3-933761-39-5
- 137 Filiz, Fulya: *Linking Large-Scale Meteorological Conditions to Floods in Mesoscale Catchments*, 2005, ISBN 3-933761-40-9
- 138 Qin, Minghao: *Wirklichkeitsnahe und recheneffiziente Ermittlung von Temperatur und Spannungen bei großen RCC-Staumauern*, 2005, ISBN 3-933761-41-7
- 139 Kobayashi, Kenichiro: *Optimization Methods for Multiphase Systems in the Subsurface - Application to Methane Migration in Coal Mining Areas*, 2005, ISBN 3-933761-42-5

- 140 Rahman, Md. Arifur: *Experimental Investigations on Transverse Dispersive Mixing in Heterogeneous Porous Media*, 2005, ISBN 3-933761-43-3
- 141 Schrenk, Volker: *Ökobilanzen zur Bewertung von Altlastensanierungsmaßnahmen*, 2005, ISBN 3-933761-44-1
- 142 Hundecha, Hirpa Yesheatesfa: *Regionalization of Parameters of a Conceptual Rainfall-Runoff Model*, 2005, ISBN: 3-933761-45-X
- 143 Wege, Ralf: *Untersuchungs- und Überwachungsmethoden für die Beurteilung natürlicher Selbstreinigungsprozesse im Grundwasser*, 2005, ISBN 3-933761-46-8
- 144 Breiting, Thomas: *Techniken und Methoden der Hydroinformatik - Modellierung von komplexen Hydrosystemen im Untergrund*, 2006, 3-933761-47-6
- 145 Hrsg.: Braun, Jürgen; Koschitzky, Hans-Peter; Müller, Martin: *Ressource Untergrund: 10 Jahre VEGAS: Forschung und Technologieentwicklung zum Schutz von Grundwasser und Boden*, Tagungsband zur Veranstaltung am 28. und 29. September 2005 an der Universität Stuttgart, Campus Stuttgart-Vaihingen, 2005, ISBN 3-933761-48-4
- 146 Rojanschi, Vlad: *Abflusskonzentration in mesoskaligen Einzugsgebieten unter Berücksichtigung des Sickerraumes*, 2006, ISBN 3-933761-49-2
- 147 Winkler, Nina Simone: *Optimierung der Steuerung von Hochwasserrückhaltebecken-systemen*, 2006, ISBN 3-933761-50-6
- 148 Wolf, Jens: *Räumlich differenzierte Modellierung der Grundwasserströmung alluvialer Aquifere für mesoskalige Einzugsgebiete*, 2006, ISBN: 3-933761-51-4
- 149 Kohler, Beate: *Externe Effekte der Laufwasserkraftnutzung*, 2006, ISBN 3-933761-52-2
- 150 Hrsg.: Braun, Jürgen; Koschitzky, Hans-Peter; Stuhmann, Matthias: *VEGAS-Statuskolloquium 2006*, Tagungsband zur Veranstaltung am 28. September 2006 an der Universität Stuttgart, Campus Stuttgart-Vaihingen, 2006, ISBN 3-933761-53-0
- 151 Niessner, Jennifer: *Multi-Scale Modeling of Multi-Phase - Multi-Component Processes in Heterogeneous Porous Media*, 2006, ISBN 3-933761-54-9
- 152 Fischer, Markus: *Beanspruchung eingeeerdeter Rohrleitungen infolge Austrocknung bindiger Böden*, 2006, ISBN 3-933761-55-7
- 153 Schneck, Alexander: *Optimierung der Grundwasserbewirtschaftung unter Berücksichtigung der Belange der Wasserversorgung, der Landwirtschaft und des Naturschutzes*, 2006, ISBN 3-933761-56-5
- 154 Das, Tapash: *The Impact of Spatial Variability of Precipitation on the Predictive Uncertainty of Hydrological Models*, 2006, ISBN 3-933761-57-3

- 155 Bielinski, Andreas: *Numerical Simulation of CO₂ sequestration in geological formations*, 2007, ISBN 3-933761-58-1
- 156 Mödinger, Jens: *Entwicklung eines Bewertungs- und Entscheidungsunterstützungssystems für eine nachhaltige regionale Grundwasserbewirtschaftung*, 2006, ISBN 3-933761-60-3
- 157 Manthey, Sabine: *Two-phase flow processes with dynamic effects in porous media - parameter estimation and simulation*, 2007, ISBN 3-933761-61-1
- 158 Pozos Estrada, Oscar: *Investigation on the Effects of Entrained Air in Pipelines*, 2007, ISBN 3-933761-62-X
- 159 Ochs, Steffen Oliver: *Steam injection into saturated porous media – process analysis including experimental and numerical investigations*, 2007, ISBN 3-933761-63-8
- 160 Marx, Andreas: *Einsatz gekoppelter Modelle und Wetterradar zur Abschätzung von Niederschlagsintensitäten und zur Abflussvorhersage*, 2007, ISBN 3-933761-64-6
- 161 Hartmann, Gabriele Maria: *Investigation of Evapotranspiration Concepts in Hydrological Modelling for Climate Change Impact Assessment*, 2007, ISBN 3-933761-65-4
- 162 Kebede Gurmessa, Tesfaye: *Numerical Investigation on Flow and Transport Characteristics to Improve Long-Term Simulation of Reservoir Sedimentation*, 2007, ISBN 3-933761-66-2
- 163 Trifković, Aleksandar: *Multi-objective and Risk-based Modelling Methodology for Planning, Design and Operation of Water Supply Systems*, 2007, ISBN 3-933761-67-0
- 164 Götzinger, Jens: *Distributed Conceptual Hydrological Modelling - Simulation of Climate, Land Use Change Impact and Uncertainty Analysis*, 2007, ISBN 3-933761-68-9
- 165 Hrsg.: Braun, Jürgen; Koschitzky, Hans-Peter; Stuhmann, Matthias: *VEGAS – Kolloquium 2007*, Tagungsband zur Veranstaltung am 26. September 2007 an der Universität Stuttgart, Campus Stuttgart-Vaihingen, 2007, ISBN 3-933761-69-7

Die Mitteilungshefte ab dem Jahr 2005 stehen als pdf-Datei über die Homepage des Instituts: www.iws.uni-stuttgart.de zur Verfügung.