

Titelaufnahme der Deutschen Bibliothek

Braun, Jürgen; Koschitzky, Hans-Peter; Müller, Martin (Hrsg.):  
Ressource Untergrund, 10 Jahre VEGAS: Forschung und  
Technologieentwicklung zum Schutz von Grundwasser und Boden  
von Jürgen Braun et al. (Hrsg.), Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart.  
Stuttgart: Inst. für Wasserbau, 2005

(Mitteilungen / Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart: H. 145)  
ISBN 3-933761-48-4

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

Herausgegeben 2005 vom Eigenverlag des Instituts für Wasserbau

Druck: Sprint Digital Druck, Stuttgart

## VORWORT

Auch zehn Jahre nach der Inbetriebnahme der Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung – VEGAS – sind die Fragestellungen zur Altlastenproblematik bei weitem nicht gelöst. Im Gegenteil, ein Flächenverbrauch von über 100 ha pro Tag in der Bundesrepublik zeigt deutlich, dass Altstandorte meist nicht saniert und der Wiedernutzung zugeführt, sondern statt dessen neue Flächen erschlossen werden.

Das vorliegende Mitteilungsheft des Instituts für Wasserbau erscheint anlässlich der Veranstaltung „Ressource Untergrund – 10 Jahre VEGAS: Forschung und Technologieentwicklung zum Schutz von Grundwasser und Boden“ am 28. und 29. September 2005. Die darin enthaltenen Beiträge beleuchten einerseits Forschungskonzepte und Perspektiven, andererseits werden Ergebnisse aktueller Forschungsvorhaben vorgestellt.

Im Rahmen einer Festveranstaltung in der VEGAS-Versuchshalle werden von der baden-württembergischen Umweltministerin Tanja Gönner sowie von Ministerialdirektor Reinhard Junker als Vertreter des Bundesministeriums für Bildung und Forschung Perspektiven für eine zukünftige nachhaltige Umweltforschung aufgezeigt. Einen kurzen Abriss zur Entstehungsgeschichte von VEGAS gibt dessen Initiator Professor Helmut Kobus. Weitere Vorträge von nationalen und internationalen Wissenschaftlern zeigen Forschungstrends in Deutschland, der EU und den USA auf.

Herr Dr. Barczewski, der langjährige wissenschaftliche Leiter der Versuchseinrichtung, sollte einen Übersichtsvortrag über zehn Jahre erfolgreiche VEGAS-Forschung halten. Durch seinen unerwarteten Tod konnte er diese Aufgabe, die auch eine Dokumentation seiner erfolgreichen Tätigkeit gewesen wäre, leider nicht mehr wahrnehmen. Der von Professor Kobus verfasste und in verschiedenen Fachzeitschriften erschienene Nachruf für Herrn Dr. Barczewski ist in Würdigung seines Wirkens im Anhang dieses Heftes abgedruckt.

Beim bereits traditionellen VEGAS-Statuskolloquium bekommen Wissenschaftler, Vertreter von Industriefirmen und Kommunen als Eigentümer von kontaminierten Flächen, Ingenieurbüros, Analytiklabors, Vertreter der Umweltverwaltung und Studierende die aktuellen Ergebnisse der VEGAS-Forschungs- und Entwicklungsvorhaben vorgestellt mit der Möglichkeit zur ausgiebigen Diskussion. Somit wird einerseits der Technologietransfer von der Hochschule in die Praxis gewährleistet und intensiviert, und andererseits werden auch Fragen und Anforderungen der Sanierungspraxis in die zukünftigen Forschungs- und Entwicklungsprojekte eingebracht. Die Beiträge umfassen neben

Grundlagenuntersuchungen zu den im Untergrund ablaufenden Prozessen der Schadstoffausbreitung und des Schadstoffverhaltens Ergebnisse aus Versuchen im Labor- und Technikumsmaßstab. Wichtiger Bestandteil der VEGAS-Forschung sind auch Erfahrungen im „Feldmaßstab“. Anhand des Einsatzes neuer Techniken und Verfahren im Rahmen von Pilotstudien und Sanierungsprojekten werden die Anwendungsmöglichkeiten neuer Techniken gegenüber herkömmlichen Verfahren sowie die Marktchancen innovativer Verfahren in der Praxis der Altlastenbearbeitung aufgezeigt.

Die Unterzeichner hoffen, dass die Veranstaltung und das Mitteilungsheft Anregungen zur zukünftigen Forschung und zur Entwicklung neuer, effizienter Sanierungstechnologien liefern und somit mittelfristig auch einen Beitrag zur Reduzierung des Flächenverbrauchs leisten.

Stuttgart, im September 2005

Jürgen Braun  
Hans-Peter Koschitzky



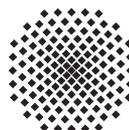
## **Ressource Untergrund**

**10 Jahre VEGAS: Forschung  
und Technologieentwicklung  
zum Schutz von Grundwasser  
und Boden**

**28. und 29. September 2005  
Universität Stuttgart  
Campus Stuttgart-Vaihingen**



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung



**Universität Stuttgart**



**Baden-Württemberg**

UMWELTMINISTERIUM



# Festveranstaltung

**Mittwoch, 28. September**

**VEGAS-Halle, Pfaffenwaldring 61**

**Campus der Universität in Stuttgart-Vaihingen**

**13:00 Begrüßung**

*Wolfgang Ehlers, Prorektor der Universität Stuttgart*

**VEGAS steht auf drei Säulen: BMBF, UVM und Universität Stuttgart**

- **Ziele und Langzeitperspektiven in der Umweltforschung aus Sicht des Landes Baden-Württemberg**

*Tanja Gönner, Umweltministerin des Landes Baden-Württemberg*

- **Forschung für den nachhaltigen Schutz von Grundwasser und Boden**

*Reinhard Junker, Min.Dir.,*

*Bundesministerium für Bildung und Forschung, BMBF*

- **Das VEGAS-Konzept: Ein Brückenschlag zwischen Forschung und Praxis**

*Helmut Kobus, Universität Stuttgart*

**10 Jahre VEGAS-Forschung: Entwicklung und Tendenzen**

*Baldur Barczewski, Jürgen Braun, Hans-Peter Koschitzky*

*VEGAS, Universität Stuttgart*

15:00 Kaffeepause, VEGAS-Besichtigung

**16:00 Perspectives on Groundwater Remediation**

*Walter W. Kovalick, Linda D. Fiedler, U.S. Environmental Protection Agency*

**The Groundwater Daughter Directive: Its Influence on Research Needs**

*Andrea Tilche, EU, DG Research*

**Ausbreitung von Schadstoffen im Untergrund – Prozesse und die Rolle der Variabilität**

*András Bárdossy, Rainer Helmig, Universität Stuttgart*

18:00 Kurzer Spaziergang zum neuen Internationalen Zentrum der Universität Stuttgart

**ab 18:30 Stehempfang im Internationalen Zentrum IZ der Universität Stuttgart**

# VEGAS-Statuskolloquium 2005

**Donnerstag, 29. September,**

**Hörsaal 7.02, Pfaffenwaldring 7, Campus der Universität in Stuttgart-Vaihingen**

**8:30 Begrüßung** durch den Vorsitzenden des VEGAS-Beirats

*Jürgen Heidborn (Bundesministerium für Bildung und Forschung, BMBF)*

8:40 Sitzungsleiter: Dieter Stupp (Dr. Stupp Consulting GmbH)

**Anwendung von Mikroemulsionen bei einer In-situ-Sanierung von DNAPL-Schadensfällen – Ergebnisse aus dem BMBF-Verbundprojekt und Ausblick**

*Günter Subklew, Franz-Hubert Haegel (FZ Jülich), Baldur Barczewski, Matthias Stuhmann, Birgit Memminger (VEGAS, Universität Stuttgart), Frank Seitz, Eberhard Kohlmeier (IBL, Heidelberg), Heico Schell, Michael Stieber, Andreas Tiehm (TZW, Karlsruhe)*

**In-situ-Grundwassersanierung durch gezielte Alkoholinjektion mittels vertikaler Zirkulationsströmung eines GZB**

*Ulf Mohrlök (IfH Universität Karlsruhe)*

**Numerische Modellierung der Mehrphasen-/ Mehrkomponenten-Hydraulik bei der Alkohol-Spülung**

*Philipp Greiner, Jürgen Braun, Hans-Peter Koschitzky (VEGAS, Universität Stuttgart), Holger Class, Leopold Stadler (IWS, Universität Stuttgart), Johannes Schnieders*

**Ein Konzept zur Kopplung numerischer Module für die Simulation von Schadstoffversickerung, -ausbreitung und thermischer Sanierung**

*Holger Class, Steffen Ochs (IWS, Universität Stuttgart)*

10:45 Kaffeepause

11:05 Sitzungsleiter: Frank-Dieter Kopinke (UFZ, Umweltforschungszentrum Leipzig/Halle)

**Altlasten und Altlastensanierung in Baden-Württemberg aus Sicht der LfU**

*Helmut Krug (LfU, Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg)*

**Forschungsarbeiten am Deutsch-Französischen Institut für Umweltforschung zum Transfer und Verbleib von LCKW in Porengrundwasserleitern**

*Gerhard Schäfer (IFARE, Straßbourg)*

**Numerische und experimentelle Untersuchungen zur Dampfinjektion in die gesättigte Zone**

*Steffen Ochs, Holger Class, Arne Färber (IWS, Universität Stuttgart)*

- Feste Wärmequellen zur In-situ-Grundwassersanierung bei DNAPL-Schäden - Erste Ergebnisse einer U.S.-geförderten Forschungs Kooperation**  
*Uwe Hiester, Hans-Peter Koschitzky, Oliver Trötschler, (VEGAS, Universität Stuttgart), Arne Färber (IWS, Universität Stuttgart), Ralph Baker, Gorm Heron, John LaChance (TerraTherm, Inc., USA), Myron Kuhlman (MK Tech Solutions Inc., USA)*
- 12:50 Mittagspause
- 14:00 Sitzungsleiter: Rolf Hahn (LfU, Landesanstalt für Umweltschutz, Baden-Württemberg)
- Machbarkeitsstudie zum Einsatz von chemischer Oxidation zur Sanierung von CKW-Kontaminationen (Quellensanierung)**  
*Norbert Klaas, Oliver Trötschler (VEGAS, Universität Stuttgart)*
- In-Situ-Immobilisierung von Schwermetallen im Grundwasser**  
*Ralf Crocoll (Crocoll Consult, Bretten), Norbert Klaas (VEGAS, Universität Stuttgart), Michael Reinhard (Arcadis, Karlsruhe)*
- Enhanced Natural Attenuation zum In-situ-Abbau von heterozyklischen Kohlenwasserstoffen**  
*Anne Sagner, Andreas Tiehm (TZW, Karlsruhe), Oliver Trötschler, Thomas Haslwimmer, Hans-Peter Koschitzky (VEGAS, Universität Stuttgart)*
- Experimentelle Untersuchungen von langsamer DNAPL Infiltration in heterogene poröse Medien mit definierter Struktur**  
*Insa Neuweiler, Zhu Wei, Arne Färber (IWS, Universität Stuttgart)*
- Chemische Aspekte der Anwendung von Eisenkolloiden bei der Sanierung von CKW-Kontaminationen**  
*Rainer Köster (FZK, Karlsruhe), Norbert Klaas (VEGAS, Universität Stuttgart)*
- 16:00 Kaffeepause
- 16:20 Sitzungsleiter: Rolf Gerhard (Deutsche Bahn AG)
- BMBF - US EPA Projekt: Start-Up-Plan zur Stimulierung des nachhaltigen Flächenrecyclings**  
*Volker Schrenk, Jürgen Braun, Jantje Samtleben, Baldur Barczewski (VEGAS, Universität Stuttgart), Uwe Ferber (Projektgruppe Stadt und Entwicklung, Leipzig)*
- Transfer von Forschungsergebnissen zum Flächenmanagement in die Praxis**  
*Volker Schrenk, Jantje Samtleben (VEGAS, Universität Stuttgart)*
- Aktuelle Ergebnisse und Entwicklungen beim Einsatz von Vor-Ort-Analytik**  
*Johannes Flachowsky (Gast am UFZ, Leipzig/Halle), Katrin Batereau, Norbert Klaas, Martin Müller, Baldur Barczewski, (VEGAS, Universität Stuttgart)*
- Indikatoren für nachhaltige Entwicklung – Praxistest Stuttgart**  
*Hermann Josef Kirchholtes (Landeshauptstadt Stuttgart, Amt für Umweltschutz)*
- 18:00 **Schlusswort**  
*Stefan Gloger (Umweltministerium Baden-Württemberg, UM)*





# INHALTSVERZEICHNIS

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>I</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>VII</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>XI</b>
<b>1 Ziele und Langzeitperspektiven in der Umweltforschung aus Sicht des Landes Baden-Württemberg</b>	<b>1</b>
1.1 Begrüßung	1
1.2 Anspruch der Politik an die Umweltforschung	1
1.3 Anfänge der Umweltforschung	2
1.4 Umweltforschung in Baden-Württemberg	2
1.5 VEGAS	3
1.6 Altlasten	3
1.7 Vorsorge statt Sanierung	4
1.8 Zukünftige Ausrichtung der Umweltforschung	4
1.9 Förderschwerpunkte BWPLUS	4
1.10 Schluss	6
<b>2 Forschung für den nachhaltigen Schutz von Grundwasser und Boden</b>	<b>7</b>
<b>3 Das VEGAS-Konzept: Ein Brückenschlag zwischen Forschung und Praxis</b>	<b>13</b>
3.1 Die Wahrnehmung von Belastungen des Grundwassers mit Schadstoffen	13
3.2 Die Altlastenproblematik	14
3.3 Das VEGAS-Konzept	15
3.4 Der Weg zu einer gemeinsamen Förderung	16
3.5 VEGAS – Bau und Einrichtung	17
3.6 VEGAS – Forschungsprogramm	18
3.7 Schlussbemerkung	19
3.8 Literaturhinweise	20
<b>4 10 Jahre VEGAS-Forschung: Entwicklung und Tendenzen</b>	<b>21</b>
4.1 Herausforderungen und Ziele	21
4.2 Schwerpunkte der VEGAS Aktivitäten	22
4.3 Grundlagenforschung	22
4.4 Technologieentwicklung	23
4.4.1 Thermische Sanierungstechnologien	23
4.4.2 Der Dichtwand-Heber-Reaktor	23
4.5 Numerische Modellentwicklung	25
4.6 Messtechnik	26
4.7 Technologie- und Wissenstransfer	27
4.8 Die Brücke und das Fundament	27
4.9 Ausblick und Tendenzen	28

<b>5</b>	<b>Perspectives on Groundwater Remediation</b>	<b>30</b>
5.1	Introduction	30
5.2	The Groundwater Cleanup Challenge	31
5.3	Groundwater Characterization	32
5.4	Advancing Use of Sensors in Monitoring Systems	33
5.5	Increasing Use of In Situ Approaches to Groundwater Treatment	34
5.5.1	Permeable Reactive Barriers	34
5.5.2	Bioremediation	35
5.5.3	Phytoremediation	36
5.5.4	In Situ Chemical Oxidation	37
5.5.5	In Situ Thermal Treatment	37
5.5.6	In Situ Surfactant/Co-Solvent Flushing	38
5.6	Pump-and-Treat and Groundwater Monitoring Optimization	39
5.7	New Frontiers	39
5.8	Conclusions	40
5.9	Additional Information	40
5.10	References	41
<b>6</b>	<b>Anwendung von Mikroemulsionen zur In-situ-Sanierung organischer Untergrundkontaminationen</b>	<b>44</b>
6.1	Einleitung	44
6.2	Ergebnisse	44
6.2.1	Feldexperiment	45
6.2.2	Großskaliges Rinnenexperiment mit vier Schräg-Infiltrationsbrunnen	48
6.3	Zusammenfassung	50
6.4	Danksagung	51
<b>7</b>	<b>In-situ-Grundwassersanierung durch gezielte Alkoholinjektion mittels vertikaler Zirkulationsströmung eines GZB</b>	<b>52</b>
7.1	Einführung	52
7.2	Grundprinzipien der Alkoholspülung mittels GZB	53
7.2.1	Solubilisierung und Mobilisierung eines DNAPL	53
7.2.2	Hydraulische Steuerung der Alkoholinjektion	53
7.3	Laborexperimente	55
7.3.1	2D-Experimente in der Versuchsrinne am IfH	55
7.3.2	3D-Experimente im VEGAS Blockaquifer	57
7.4	Diskussion und Schlussfolgerungen für die Praxis	59
7.5	Danksagung	60
7.6	Literatur	60
<b>8</b>	<b>Numerische Modellierung der Mehrphasen-/Mehrkomponenten-Hydraulik bei der Alkoholspülung</b>	<b>62</b>
8.1	Einführung	62
8.2	Zusammensetzung des Alkoholcocktails und Prinzip der Alkoholspülung	63
8.3	Numerische Modellierung	65
8.3.1	Konstitutive Beziehungen	65
8.3.2	Modellkonzept	66

8.3.3	Verifizierung und Validierung	66
8.3.4	Zusammenfassung und Ausblick	67
8.4	Danksagung	67
8.5	Literatur	67
<b>9</b>	<b>Ein Konzept zur Kopplung numerischer Module für die Simulation von Schadstoffversickerung, -ausbreitung und thermischer Sanierung</b>	<b>69</b>
9.1	Motivation	69
9.2	Ablaufende Mehrphasenprozesse	70
9.2.1	Schadstoffversickerung und -ausbreitung als Phase	70
9.2.2	Ausbreitung von gelöstem und evaporiertem Schadstoff	71
9.2.3	Thermisch unterstützte Sanierung	72
9.3	Modellkopplung	73
9.4	Beispielanwendung	75
9.5	Zusammenfassung und Ausblick	77
9.6	Referenzen	78
<b>10</b>	<b>Altlasten und Altlastensanierung in Baden-Württemberg aus Sicht der LfU</b>	<b>79</b>
10.1	Einleitung	79
10.2	Rückblick	79
10.3	Flächendeckende historische Erhebung	81
10.4	Finanzierung und Förderung	81
10.5	Modellstandorte und Referenzstandorte	82
10.6	Vermittlung von Wissen und Erfahrung	83
10.7	Zukünftige Arbeitsschwerpunkte bei der Altlastensanierung	85
10.8	Ausblick	87
<b>11</b>	<b>Forschungsarbeiten am Deutsch-Französischen Institut für Umweltforschung zum Transfer und Verbleib von LCKW in Porengrundwasserleitern</b>	<b>89</b>
11.1	Kontext und Ziele	89
11.2	Experimentelle und numerische Untersuchungen zur Charakterisierung von LCKW-Schadensherden auf der Versuchseinrichtung SCERES	89
11.2.1	Test der Partitioning-Tracer-Methode	90
11.2.2	Untersuchungen zum Stofftransfer von chlorierten Kohlenwasserstoffgemischen im inhomogenen Modellaquifer	91
11.3	Mathematische Modellierung des biologischen Abbaus von LCKW	94
11.4	Untersuchungen auf Feldstandorten	94
11.4.1	Standort «Plaine des Bouchers»	95
11.4.2	Standort «Piémont vosgien»	95
11.5	Ausblick	95
11.6	Danksagung	96
11.7	Literaturangaben	96
<b>12</b>	<b>Numerische und experimentelle Untersuchungen zur Dampf-injektion in die gesättigte Bodenzone</b>	<b>98</b>
12.1	Motivation	98

12.2 Experimentelle Untersuchungen	99
12.2.1 Versuchsaufbau	99
12.2.2 Mess- und Verfahrenstechnik	100
12.2.3 Durchgeführte Experimente	101
12.3 Numerisches Modell	102
12.4 Numerische Untersuchungen	104
12.5 Fallbeispiel: Pilotsanierung KA-Durlach:	106
12.6 Zusammenfassung /Ausblick	107
12.7 Literatur:	107
<b>13 Feste Wärmequellen zur In-situ-Grundwasserreinigung bei DNAPL-Schäden – Erste Ergebnisse einer U.S.-geförderten Forschungskoope- ration</b>	<b>109</b>
13.1 Motivation	109
13.2 Wirkungsprinzip fester Wärmequellen im Grundwasser	110
13.3 Arbeitsprogramm	110
13.4 Literaturhinweise	112
<b>14 Machbarkeitsstudie zum Einsatz von chemischer Oxidation zur Sanierung von CKW-Kontaminationen (Quellensanierung)</b>	<b>113</b>
14.1 Einleitung	113
14.2 Zielstellung	113
14.3 Stand der Technik	114
14.3.1 Bisherige Probleme bei der Anwendung	115
14.4 Arbeitsprogramm	116
14.4.1 Untersuchungen zur Reaktionskinetik und Effizienz	117
14.4.2 Untersuchungen zum Einfluss der Ausfällung von Manganoxid und Oxidation organischen Kohlenstoffs auf den Stoffumsatz und die hydraulische Leitfähigkeit	117
14.4.3 Numerische Modellierung der Küvettenexperimente (Strömung-, Transport- und Reaktionsmodell MODFLOW 2000)	119
14.5 Literatur	120
<b>15 In-situ-Immobilisierung von Schwermetallen im Grundwasser</b>	<b>122</b>
15.1 Einleitung	122
15.2 Zielsetzung	122
15.3 Grundlagen	123
15.3.1 Metallsulfide	123
15.3.2 Redoxreaktionen im Grundwasser	123
15.3.3 Elektronenakzeptoren	125
15.4 Arbeitsprogramm	127
15.4.1 Voruntersuchungen im Labormaßstab	127
15.4.2 Untersuchungen im Technikumsmaßstab (Projektphase II)	127
15.4.3 Untersuchungen im Feldmaßstab (Projektphase III)	128
15.5 Literatur	128
<b>16 Enhanced Natural Attenuation zum In-situ-Abbau von Heterozyklischen Kohlenwasserstoffen</b>	<b>131</b>
16.1 Einleitung	131

16.2 Stimulation des Abbaus durch H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> in Batchansätzen	132
16.2.1 Stimulation des Abbaus durch H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> in Mikrokosmen des Testfeld Süd	132
16.2.2 Vergleich der H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> -Nutzung in Mikrokosmen aus dem Grundwasser-schwankungsbereich und tieferen Zonen	133
16.3 Aerober biologischer Abbau im Technikum: „Große Rinne“, VEGAS	136
16.4 Zusammenfassung und Schlussfolgerung	139
16.5 Literatur	139
<b>17 Experimentelle Untersuchungen von langsamer DNAPL Infiltration in heterogene poröse Medien mit definierter Struktur</b>	<b>141</b>
17.1 Motivation	141
17.2 Fragestellungen	142
17.2.1 Modelle und Methoden zum upscaling von Zweiphasenströmung	142
17.2.2 Grundsätzliche Anforderungen an experimentelle Untersuchungen	144
17.3 Experiment zu langsamer DNAPL Infiltration	144
17.3.1 Randbedingungen und dimensionslose Größen	145
17.3.2 Sättigungsmessung	146
17.3.3 Poröses Material – Packung	148
17.4 Zusammenfassung	149
17.5 Literatur	149
<b>18 Chemische Aspekte der Anwendung von Eisenkolloiden zur Sanierung von CKW-Kontaminationen</b>	<b>151</b>
18.1 Einleitung	151
18.2 Zielstellung	152
18.2.1 Ziel: Entwicklung einer innovativen Sanierungstechnik	152
18.2.2 Ziel: Entwicklung und Optimierung neuartiger Fe-Kolloide	152
18.3 Stand der Technik, erster Ergebnisse	153
18.3.1 Anwendung von elementarem Eisen bei CKW-Altlasten	153
18.3.2 Stabilität und Reaktivität (chemisch und hydraulisch) der Kolloide, bisherige Probleme	154
18.3.3 Hydraulische Betriebsweise, bisherige Probleme	156
18.3.4 Theoretische Betrachtungen, Effizienzprognosen	158
18.4 Weitere Arbeiten	158
18.4.1 Schritte zur Entwicklung chemisch und hydraulisch optimierter Kolloide	158
18.4.2 Schritte zur Entwicklung der hydraulischen Betriebsweise	159
18.5 Literatur	159
<b>19 BMBF – US EPA Projekt: Start-Up-Plan zur Stimulierung des nachhaltigen Flächenrecyclings</b>	<b>161</b>
19.1 Einleitung	161
19.2 Erfahrungen aus den Workshops	162
19.3 Die Arbeitshilfe zur Erstellung eines Start-Up-Plans „Brachfläche“	164
19.4 Der Aufbau der Arbeitshilfe	166
19.5 Ausblick	168
19.6 Danksagung	169
19.7 Literatur	169

<b>20 Transfer von Forschungsergebnissen zum Flächenmanagement in die Praxis</b>	<b>171</b>
20.1 Einleitung	171
20.2 Vorgehensweise	172
20.3 Ergebnisse des Vorhabens	173
20.3.1 Überblick	173
20.3.2 Datenbankanwendung	174
20.3.3 Auswertung der Veröffentlichungen	176
20.3.4 Defizite	178
20.4 Ausblick	179
20.5 Danksagung	179
20.6 Literaturverzeichnis	179
<b>21 Aktuelle Ergebnisse und Entwicklungen beim Einsatz von Vor-Ort-Analytik</b>	<b>182</b>
21.1 Einleitung	182
21.2 Aufgaben und Möglichkeiten der Vor-Ort-Analytik	182
21.3 Entwicklungstrends und aktuelle Ergebnisse	184
21.4 Zusammenfassung	193
21.5 Literatur	193
<b>22 Indikatoren für nachhaltige Entwicklung – Praxistest Stuttgart</b>	<b>195</b>
22.1 Einsatz von Indikatoren	195
22.2 Erfahrungen mit Indikatoren für nachhaltige Entwicklung	195
22.2.1 CSD-Indikatoren für nachhaltige Entwicklung (UN)	196
22.2.2 Indikatoren der „Städte der Zukunft“ (DE)	197
22.2.3 SEEDA-Checkliste (GB)	198
22.2.4 RESCUE-SAT (EU)	198
22.2.5 Zwischenbilanz	199
22.3 INTERREG III B-Projekt REVIT	200
22.4 Praxistest in Stuttgart	201
22.5 Schlussfolgerungen	202
22.6 Literatur, Quellen	203
<b>Nachruf für Privatdozent Dr.-Ing. Baldur Barzcewski</b>	<b>205</b>

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 3.1: VEGAS: Brücke vom Labor zum Feld .....	15
Abb. 3.2: VEGAS: Zeitliche Entwicklung.....	17
Abb. 3.3: VEGAS – Beitrag zu Forschung, Praxis und Lehre .....	19
Abb. 6.1: Aufbau der Versuchssäule am Feldstandort Eppelheim.....	46
Abb. 6.2: Versuchsplan des großskaligen Schrägbrunnen-Experimentes .....	48
Abb. 6.3: Konzentrationen in der Spüllösung.....	49
Abb. 7.1: Gezielte Alkoholspülung zur Abreinigung eines PCE-Schadensherds in der 2D-Versuchsrinne am IfH (schematisch).....	54
Abb. 7.2: Ergebnisse des zweiten Sanierungsexperiments S2 in der 2D-Versuchsrinne am IfH, Austräge der Alkohole und von PCE sowie Durchbruchkurven aus den beiden PTTs an der Messstelle J5 im Abstrom des Schadensherds (s. Abb. 7.1).....	56
Abb. 7.3: Lage der Messstellen und berechneten Bahnlinien im Blockaquifer sowie Durchbruchkurven des Uranin (Uranintracerexperiment) und der Alkohole (zweite Alkoholspülung A2) im zentralen Messquerschnitt D .....	58
Abb. 8.1: Ternäres Phasendiagramm von Wasser, 2-Propanol und 1-Hexanol bei 20°C .....	64
Abb. 8.2: Schematische Darstellung des quarternären Phasendiagramms für Wasser, 1 Hexanol, 2 Propanol und PCE.....	66
Abb. 9.1: Versickerung und Ausbreitung der flüssigen Phase .....	71
Abb. 9.2: Ausbreitung von gelöstem und evaporiertem Schadstoff in Wasser und Bodenluft .....	72
Abb. 9.3: Thermisch unterstützte Sanierung mit Dampf-/Luftinjektion .....	73
Abb. 9.4: LNAPL-Versickerung und anschließende Ausbreitung der Phase nach 50 Tagen Simulationszeit , gerechnet mit MUFTE-Modul 3p .....	75
Abb. 9.5: Diffusive Ausbreitung von evaporiertem Schadstoff in der Bodenluft .....	76
Abb. 9.6: Fortschreiten der Dampffront nach 18 Stunden Simulationszeit.....	77
Abb. 11.1: Längsschnitt durch SCERES : inhomogene Aquiferstruktur mit zwei (auf der Längsachse von SCERES) eingelagerten geringdurchlässigen Blöcken.....	92
Abb. 11.2: Vergleich der PCE- und TCE-Konzentrationen in der Gas- und Wasserphase (Messstelle befindet sich in 0.4 m Tiefe) .....	93
Abb. 11.3: Vergleich gemessener TCE- und PCE- Konzentrationen in der gesättigten Zone: VEGAS-Probennehmer und lokale Beprobung im porösen Medium.....	93

Abb. 12.1: Schema einer Dampfinkjektion in die gesättigte und ungesättigte Bodenzone .....	99
Abb. 12.2: Versuchsaufbau Küvette 2D .....	100
Abb. 12.3: Mess- und Verfahrenstechnische Peripherie .....	101
Abb. 12.4: Infrarot-Bilder a) hohe Injektionsrate; b) mittlere Injektionsrate .....	102
Abb. 12.5: Derzeit in MUFTE_UG implementiert in Module .....	103
Abb. 12.6: Konzeptionelles 2-Phasen / 1-Komponenten (2p1c) Modell .....	104
Abb. 12.7: Ergebnisse Simulation: a) hohe Injektionsrate; b) mittlere Injektionsrate ..	105
Abb. 12.8: Typkurven für unterschiedliche Injektionsraten .....	106
Abb. 12.9: Dampffront für: a) hoch permeable Variante b) nieder permeable Variante .....	107
Abb. 13.1: Prinzipskizze der Anwendung fester Wärmequellen im Grundwasser .....	109
Abb. 13.2: Aufsicht und Grundriss des THERIS-Großbehälters .....	111
Abb. 14.1: Versuchsaufbau Küvettenexperimente ISCO .....	118
Abb. 15.1: Viskosität von Molasse und Molashine .....	125
Abb. 16.1: Abbau der methylierten Benzofurane im Testfeld Süd nach Zugabe von 20 mg/L H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> .....	133
Abb. 16.2: Katalysierte Reaktionen der Enzyme Katalase, Peroxidase und Superoxid-Dismutase. Nach Pelic-Sabo, 1991 .....	134
Abb. 16.3: Redoxzonierung entlang der Centerline und Lage der Probenahmestelle E4/19 .....	134
Abb. 16.4: Abnahme der NSO-HET (Summe) in den Versuchsansätzen bei Raumtemperatur aus dem A- und B-Horizont (linkes Bild) und Verbrauch an H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> im A- und im B-Horizont (rechtes Bild) .....	135
Abb. 16.5: Abbau der NSO-HET nach Zugabe von Sauerstoff bzw. H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> in Mikrokosmen aus dem A- bzw. B-Horizont bei Grundwassertemperatur ..	136
Abb. 16.6: Schematischer Aufbau der Großen Rinne mit Lage der Probenahmestellen (ME2, 2b, 3, 3b, 4 und 5), Maße in cm .....	137
Abb. 16.7: Massenströme an NSO-HET in der Großen Rinne (Initiale Zugabe Luftsauerstoff, Zugabe H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , Aussetzen der Zugabe, Zugabe Luftsauerstoff) .....	138
Abb. 17.1: Zweiphasenströmung in einem heterogenen und einem äquivalenten homogenen Medium mit effektiven Parametern .....	141
Abb. 17.2: Randbedingungen .....	146
Abb. 17.3: Aufbau der Küvette, Lichtquelle und Kamera .....	147
Abb. 17.4: Randläufigkeiten während der Infiltration. Dunkler Grauwert: DNAPL, hellerer Grauwert: Wasser. Sehr heller Grauwert: Wasser in einem	

Block aus größerem Material. Links: Präferentielle Fließpfade durch die Schichtung des porösen Mediums, rechts: Randläufigkeiten an der Glaswand .....	148
Abb. 17.5: Aufnahme der Küvette während des Fließprozesses von der Vorderseite (links) und von der Hinterseite (rechts). Das rechte Bild wurde gespiegelt.....	149
Abb. 18.1: Auswirkung von Tensiden auf die Partikelmorphologie .....	155
Abb. 18.2: Reduktion von PER mit kolloidalem Fe <sub>0</sub> : Vergleich der Reaktionskinetik .	155
Abb. 18.3: Versuchsaufbau Vorversuche .....	156
Abb. 18.4: Reichweite der Kolloide (Visualisierung beim Ausbau der Küvette) .....	157
Abb. 18.5: Visualisierung der Eindringtiefe von Kolloiden im Säulenversuch .....	157
Abb. 19.1: Mit dem Start-Up-Plan zum erfolgreichen Flächenrecyclingprojekt.....	165
Abb. 20.1: Kriterien zur Charakterisierung der Publikationen .....	172
Abb. 20.2: Layout der Datenbank mit der Oberfläche der Suchfunktion „Schlüsselworte“ .....	173
Abb. 20.3: Die erweiterte Suchfunktion der Datenbank .....	175
Abb. 20.4: Untergliederung der Themenbereiche.....	176
Abb. 21.1: Verbundstruktur des High-Tech-Verbundes zur sensorintegrierten Sondiertechnik (quo data Langebrück; B+P/ Dr. Baermann&Partner Hamburg; Neumann Baugrund Eckernförde; LIF/ optimare Wilhelmshaven, Laserlabor Göttingen, Uni Potsdam – Inst. f. physikal. Chemie; VEGAS-1/ Referenzstandort Uni Stuttgart VEGAS-2/ Sensorik Uni Stuttgart; FZK/ Forschungszentrum Karlsruhe, IFIA, FZK-1/ ELNARA-Sensor, FZK-2/ SAGAS-Sensor, FZK-3/ EFAS-Sensor; TU HH/ TU Hamburg-Harburg AB 2-02 Umweltmesstechnik; FhG/ Fraunhofer Inst. f. Physikal. Messtechnik Freiburg/Brsg.; Projektkoordination – Flachowsky c/o UFZ Leipzig).....	187
Abb. 21.2: Schematische Darstellung des Lösungsansatzes Sensorintegrierter Sondiertechnik im DBU-geförderten Projektverbund „High-Tech-Methoden zur Untergrundsondierung (Beispiel Gassensorik mit schnellem Ramm-GC – SRGC, Zeichnung Chr. Bracht – TU Hamburg-Harburg) .....	188
Abb. 21.3: Technische Strukturierung der Sondeneinbauten des GC-PID-Sensors (TU HH).....	189
Abb. 21.4: VEGAS - MOX-Sondeneinbau .....	189
Abb. 21.5: Mittels MOX-Sonde ermitteltes Tiefenprofil .....	190
Abb. 21.6: VEGAS PAK-Fluorometer (schematischer Aufbau und rammfeste Bausteine) .....	191

Abb. 21.7: Vergleichsmessung (Fluorometer – Laboranalytik) PAK-belasteter Grundwasserproben .....	191
Abb. 21.8: Ergebnisse des Ringversuches „Bodenprobennahme“ .....	192

## TABELLENVERZEICHNIS

Tab. 7.1: Vergleich der Effizienz der Sanierungen mittels reiner Wasserzirkulation und mittels Zirkulation mit Alkoholinjektion .....	59
Tab. 15.1: Löslichkeitsprodukte einiger Metallsulfide (bei 20°C) .....	123
Tab. 15.2: Ergebnisse eines Pilotversuchs zur mikrobiellen Schwermetallentfernung [Gammons et al. (2000)] .....	126



# 1 ZIELE UND LANGZEITPERSPEKTIVEN IN DER UMWELTFORSCHUNG AUS SICHT DES LANDES BADEN-WÜRTTEMBERG

Tanja Gönner, Umweltministerin des Landes Baden-Württemberg

Es gilt das gesprochene Wort

## 1.1 Begrüßung

Sehr geehrter Herr Professor Ehlers,

meine sehr geehrten Damen und Herren,

ich freue mich, heute im Rahmen dieser Festveranstaltung hier in der Universität Stuttgart sprechen zu dürfen. Bei der Frage, welche Ziele die Umweltforschung hat, bin ich der Auffassung, dass es die Aufgabe der Forschergemeinschaft selber ist, ihre Ziele zu definieren. Forschung – auch Umweltforschung – muss ihre eigenen Ziele verfolgen, nicht im so oft genannten Elfenbeinturm, sondern immer im Bezug zur Gesellschaft, auch zur Politik – aber unabhängig, sonst geht die Kreativität und die Kritikfähigkeit, die wir – und Sie als Forscher – immer brauchen, verloren.

Nicht die Ziele, sondern die Ansprüche und Erwartungen der Politik an die Umweltforschung will ich daher heute formulieren:

## 1.2 Anspruch der Politik an die Umweltforschung

Die Umweltforschung soll wissenschaftlich fundierte Grundlagen für umweltpolitische Entscheidungen liefern und soll Wege und Methoden zur Sicherung der ökologischen Lebensgrundlagen aufzeigen. Sie kann und soll damit ein wichtiges Instrument für die Umweltpolitik sein. Darüber hinaus kann sie auch wichtige Vorarbeit für die Arbeit von Verwaltung, Kommunen, Wirtschaft, Medien und anderen gesellschaftlichen Gruppen leisten.

### **Was aber ist nun die Umweltforschung?**

Umweltforschung ist keine eigene wissenschaftliche Disziplin im herkömmlichen Sinn. Denn die im Bereich der Umwelt aufgeworfenen Fragestellungen machen an den jeweils historisch gewachsenen Grenzziehungen der verschiedenen bekannten wissenschaftlichen Disziplinen nicht Halt. Zwar ist die spezialisierte disziplinäre Forschung für Probleme der Umweltforschung unverzichtbar, aber die Bearbeitung vieler Umweltthemen erfordert interdisziplinäre Konzepte und Lösungswege und damit auch die Zusammenarbeit von Wissenschaftlern unterschiedlicher fachlicher Herkunft. Umweltfor-

schung schließt heute Natur- und Ingenieurwissenschaften, aber auch Rechts-, Wirtschafts- und Sozialwissenschaften und teilweise auch Geisteswissenschaften ein.

### 1.3 Anfänge der Umweltforschung

Die Anfänge der Umweltforschung konnten wir in einer Zeit beobachten, in der massive Umweltprobleme durch Freisetzung von Chemikalien immer offensichtlicher wurden. Insbesondere DDT, aber auch radioaktive Stoffe aus Kernwaffenversuchen führten damals zu umfangreichen Forschungsprogrammen, die das Ziel hatten, die Verbreitung, die Wirkung und den Abbau in unserer Umwelt aufzuklären.

Heute will die Umweltforschung Umweltrisiken **frühzeitig** erkennen – bevor sich die Probleme in der Umwelt zeigen – und damit einen Beitrag für die Entwicklung und rationale Betrachtung neuer Technologien leisten. Allerdings dürfen wir die Augen nicht davor verschließen, dass wir nach wie vor auch Schadensminderung und -beseitigung betreiben müssen.

### 1.4 Umweltforschung in Baden-Württemberg

Schon sehr früh hat Baden-Württemberg zur Förderung der Umweltforschung und für eine landesübergreifende Zusammenarbeit der Forschungseinrichtungen wichtige Förderprogramme eingerichtet:

Im Rahmen des Projekts Europäisches Forschungszentrum für Maßnahmen zur Luftreinhaltung (PEF) sollten wissenschaftliche Grundlagen für eine stetige Weiterentwicklung von Luftreinhaltemaßnahmen im Land geschaffen werden.

Im Projekt Umwelt und Gesundheit (PUG) wurden Ursachen für umweltbedingte Erkrankungen des Menschen untersucht.

Fragen der Öko-Systemforschung und des Naturschutzes wurden im Projekt Angewandte Ökologie (PAÖ) bearbeitet.

Forschungs- und Untersuchungsvorhaben auf den Gebieten Grundwasserschutz, Abfallbehandlung und Bodenbelastung waren Teil des Projekts Wasser-Abfall-Boden (PWAB), in dessen Rahmen auch die Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung VEGAS finanziert wurde.

Alle diese Projekte wurden 1999 in dem heute noch aktuellen Programm Lebendgrundlage und ihre Sicherung – BWPLUS zusammengeführt. Insgesamt hat das Land Baden-Württemberg über 120 Mio. € in diesen Projekten der Umweltforschung zur Verfügung gestellt.

## 1.5 VEGAS

Das Umweltministerium hat einen besonderen Schwerpunkt auf die Unterstützung der Forschung zum Grundwasserschutz gesetzt. Im Rahmen des seit 1986 von mir bereits erwähnten Projekts Wasser-Abfall-Boden wurden frühzeitig wichtige Forschungsarbeiten im Land finanziert. Dazu gehörten vor allem die Untersuchungen auf dem Testfeld Horckheimer Insel bei Heilbronn, die das Verständnis von Grundwasserbelastungen, z. B. aus der Landwirtschaft, wesentlich vorangetrieben haben. Dazu gehörten auch die Entwicklung kombinierter Sanierungstechnologien an Gaswerksstandorten, verschiedene Beiträge der angewandten Geologie und natürlich die Großversuchseinrichtung VEGAS. Nachdem das Umweltministerium für diese bei weitem umfangreichste finanzielle Förderung mit 2,2 Mio. € den Impuls gegeben hatte, hat sich auch das Bundesforschungsministerium zum Einstieg in dieses wichtige Kompetenzzentrum entschlossen. Nach Jahren der Vorbereitung und Planung und intensiver Bautätigkeit konnte die Versuchseinrichtung am 25. September 1995 in Betrieb gehen. Seitdem sind die Versuchsbehälter und Anlagen gefüllt, die Labors besetzt und ausgestattet und die Forschung läuft. Schon meine Vorgänger hatten festgestellt, dass die aufgewendeten Gesamtkosten gut angelegtes Geld sind. Ich darf heute nach zehn Jahren Praxisforschung mit Befriedigung feststellen, dass sich VEGAS in mehrfacher Hinsicht zu einem wichtigen Bindeglied entwickelt hat:

- zu einem Bindeglied zwischen Untersuchungen im Labormaßstab, im Großtechnikum und im Feld
- zwischen mehreren wissenschaftlichen und technischen Disziplinen: Geologie, Hydrologie, Bodenkunde, Mikrobiologie und den Bau- und Vermessungsingenieuren
- sowie zwischen Wissenschaft, Wirtschaft und Verwaltung.

## 1.6 Altlasten

Auch das in VEGAS immer wichtigere Thema der Altlastenbearbeitung hat bis heute in der Umweltpolitik Baden-Württembergs einen außerordentlich hohen Stellenwert. Lassen Sie mich das an einer Zahl festmachen: Bis heute hat das Land fast 600 Mio. € aus dem kommunalen Umweltschutzfonds bereitgestellt, daneben für private Altlasten Landesmittel von etwa 25 Mio. €. Von dem Engagement privater Grundstücksbesitzer bzw. Firmen ganz zu schweigen – hier sind konkrete Zahlen schwer zu erheben, es dürfte aber geschätzt eine 1 Mrd. € sein. Im Rahmen der Erfassung möglicher altlastverdächtiger Flächen wurden in Baden-Württemberg insgesamt etwa 82.000 Fälle registriert. Davon konnten zahlreiche Fälle nach der ersten Überprüfung wieder ausgeschieden werden, viele wurden zwischenzeitlich auch saniert und einer neuen Verwendung zugeführt. Trotzdem ist derzeit noch eine beträchtliche Zahl von altlastverdächtigen Flä-

chen zu untersuchen und ggf. zu sanieren. Meine Fachleute gehen von einer weiteren Bearbeitungszeit von sicherlich 20 Jahren aus.

In Zeiten knapper Kassen sind Kreativität und innovative Vorgehensweisen mehr denn je gefragt und hier sehe ich ganz klar eine der Aufgaben von VEGAS: Nämlich in Zusammenarbeit mit der Praxis, mit Ingenieurbüros und der Umweltverwaltung wirkungsvolle und kostengünstige Lösungswege zur Untersuchung und Sanierung von Altlasten zu entwickeln.

## **1.7 Vorsorge statt Sanierung**

Gerade die Frage der Altlastensanierung zeigt, dass es zu kurz gegriffen wäre und uns auch teuer zu stehen käme, Umwelttechnologien und auch Umweltforschung nur als nachsorgende Ansätze zu sehen. Nur wenn es gelingt, von der Stufe nachgeschalteter Reinigungstechniken überzugehen zu produktions- und produktintegrierten Umweltschutztechniken, hat unser Wirtschaften eine langfristige und das heißt auch eine nachhaltige Zukunft.

## **1.8 Zukünftige Ausrichtung der Umweltforschung**

Dank einer zielgerichteten Umweltpolitik, unterstützt durch die Umweltforschung, haben wir heute eine deutlich verbesserte Luftreinhaltung, wir haben verminderte Abwasserfrachten, wir haben eine internationale Chemiekaliengesetzgebung und in der industriellen Produktion sind Produkte und Produktionsprozesse im Einsatz, die wesentlich geringere Umweltbelastungen mit sich bringen. Und, um noch einmal auf den Problemfall Altlasten zurückzukommen, wir glauben, dass wir die umwelt-relevante Industriegeschichte soweit aufgearbeitet haben, dass auch die durch sie verursachten Umweltbelastungen in den kommenden Jahren auf ein akzeptables Maß zurückgeführt werden können.

Aber es bleiben nach wie vor Problembereiche der Umweltpolitik, zu deren Lösung wir uns auf umwelt-wissenschaftliche Resultate stützen müssen. Ich möchte Ihnen deshalb die Förderschwerpunkte unseres Umweltforschungsprogramms BWPLUS kurz darstellen.

## **1.9 Förderschwerpunkte BWPLUS**

### **Lärmschutz**

Lärm wird von der Bevölkerung als eines der gravierendsten Umweltprobleme wahrgenommen. In Baden-Württemberg fühlen sich 3 Mio. Einwohner, das ist fast ein Drittel der Bevölkerung, durch Lärm mittelmäßig bis äußerst stark belästigt. Wir wollen für Ba-

den-Württemberg eine flächendeckende Begrenzung der Lärmbelastung der Bevölkerung auf ein gesundheitsverträgliches Maß erreichen.

Dazu erwarten wir von der Umweltforschung Beiträge zur Bewertung und auch die Entwicklung von lärmarmen Techniken. Als Beispiel möchte ich die Entwicklung von Reifen nennen, weil sich auch hier zeigt, dass Umweltprobleme nie isoliert betrachtet werden dürfen: Sie sollen lärmarm und auch gleichzeitig emissionsarm im Hinblick auf die Feinstaubproblematik sein.

### **Klimaschutz und Klimawandel**

Der Klimaschutz ist langfristig eine der größten Herausforderungen. Die Temperaturen hier in Baden-Württemberg sind in den letzten 50 Jahren bereits um mehr als ein Grad angestiegen. Dieser Trend wird sich aller Voraussicht nach auch zukünftig fortsetzen, möglicherweise sogar verstärken. Wir müssen weltweit, aber auch bei uns in Baden-Württemberg Maßnahmen ergreifen, um die Emissionen von Treibhausgasen zu reduzieren, wobei hier dem Energiesektor eine Schlüsselstellung zukommt. Trotz aller Anstrengungen im Klimaschutz werden wir aber einen weiteren globalen Klimawandel in den nächsten Jahrzehnten nicht vollständig vermeiden können. Da die Auswirkungen auf Baden-Württemberg bisher trotz einiger Forschungsaktivitäten noch nicht in allen Konsequenzen bekannt sind, werden wir hier weiterhin erhebliche Anstrengungen unternehmen müssen. Wir hoffen hier auch auf eine tatkräftige Unterstützung durch das Bundesforschungsministerium, das eine große Ausschreibung zum Thema Klimaschutz und Schutz vor Klimawandel auf den Weg gebracht hat.

### **Biodiversität**

In den vergangenen Jahren und Jahrzehnten haben wir einen dramatischen Rückgang der biologischen Vielfalt weltweit, aber auch hier in Baden-Württemberg, zu verzeichnen. Dies betrifft den Verlust an genetischer Vielfalt, den Rückgang von Arten und Populationen und auch den Verlust der Vielfalt von Lebensgemeinschaften und Lebensräumen. Da aber die Kenntnisse gerade auf dem Gebiet der genetischen Vielfalt heute noch sehr gering sind, wollen wir hier mit unserer Umweltforschung einen Beitrag leisten. Dabei sollen insbesondere bedeutende Risiken auf regionaler Ebene identifiziert werden, z. B. die Frage von Landschaftszerschneidung oder Zersiedelung, und daraus Instrumente zur Vermeidung entwickelt werden. Aber auch die Auswirkungen von Technologien und menschlichem Handeln auf die regionale Lebensvielfalt, etwa den natürlichen Genpool, dürfen wir nicht aus dem Auge verlieren.

### **Neuartige Schadstoffe in der Umwelt und Umgang mit Chemikalien**

Trotz vieler erfolgreicher Forschungsprojekte und umweltpolitischer Maßnahmen bleibt das potenzielle Risiko chemischer Stoffe und ihrer Abbauprodukte für den Menschen und die Umwelt ein Dauerthema. In unserem Alltag haben wir bewusst, vor allem aber unbewusst Kontakt mit Chemikalien in der Atemluft, in Lebensmitteln, in der Kleidung und in Medikamenten. Die Liste lässt sich beliebig erweitern. Wir haben heute ein sehr viel größeres Wissen über solche Stoffe und unser Umgang mit ihnen ist sehr viel ver-

antwortungsvoller als in der Vergangenheit. Dennoch geraten regelmäßig neue Stoffe oder Wirkungen in das Blickfeld der öffentlichen Debatte. Hier muss die Umweltforschung Grundlagen und Beratung für politische Entscheidungen liefern.

### **Flächenmanagement**

Mit dem letzten Förderschwerpunkt unseres BW-Plus-Programms komme ich zurück zu einem Bereich, der auch im Umfeld von VEGAS in den letzten Jahren eine wichtige Rolle gespielt hat. Der fortlaufende Zuwachs an Siedlungs- und Verkehrsflächen steht im Widerspruch zu einer nachhaltigen Entwicklung und schränkt Handlungsoptionen für zukünftige Generationen ein. Auf der Grundlage von Lösungen aus der Umweltforschung sind wir in Baden-Württemberg dem hohen Siedlungsdruck in diesem prosperierenden Land mit einer klaren Strategie entgegengetreten: Kommunales Flächenmanagement, mehr regionale Kooperation und Abstimmung. Wir haben einen alle Fachressorts umfassenden Handlungskatalog für eine nachhaltige Raum- und Siedlungsentwicklung erarbeitet. In dem Aktionsbündnis „Flächen gewinnen in Baden-Württemberg“ vom 19. Oktober 2004 haben wir all dies politisch umgesetzt.

Viele Wissenschaftler und Ingenieure, auch im Kontext von VEGAS, haben hierzu Beiträge erarbeitet. Besonders erwähnen möchte ich an dieser Stelle den im Sommer verstorbenen Herrn Dr. Barczewski. Ich erinnere an das schon im Jahr 2000 durchgeführte Symposium "Ressource Fläche" und die viel früher einsetzenden Überlegungen zu wissenschaftlichen und technischen Konzeptionen. Mit der Firma „reconsite“ hat es sogar eine Firmenausgründung aus diesem Bereich gegeben.

## **1.10 Schluss**

Wir haben in Baden-Württemberg viele hervorragende Forschungseinrichtungen und Wissenschaftler. Durch unser Umweltforschungsprogramm BWPLUS und seine Vorgänger haben wir einen Beitrag geleistet, dass die Forscher nicht allein innerhalb ihrer speziellen Disziplin Wissensproduktion betrieben haben, sondern immer auf neue offene Fragen und Unsicherheiten reagiert und gemeinsam nach Lösungen gesucht haben. VEGAS gehört für mich eindeutig zu den Leuchttürmen dieser Forschungslandschaft. Behalten wir dabei im Auge, dass Wissenschaft nicht nur als Produkt zu sehen ist, also als Artikel in einer Zeitschrift oder heute im Internet, sondern auch als ein Prozess der im Diskurs Impulse gibt, Kontroversen austrägt, Ideen weiterführt und eine geistige Auseinandersetzung bietet.

Dies ist in und um VEGAS immer wieder geschehen und setzt sich weiter fort. Wir brauchen lebende Wissenschaft, die im Austausch auch mit der Praxis steht. Nur so finden Ideen ihren Weg in die Welt und werden umgesetzt. Arbeiten Sie weiter auf diesem Weg, die Universität Stuttgart und Baden-Württemberg ist dafür ein hervorragender Ort.

## 2 FORSCHUNG FÜR DEN NACHHALTIGEN SCHUTZ VON GRUNDWASSER UND BODEN

Reinhard Junker, Min.Dir. im Bundesministerium für Bildung und Forschung, BMBF

Die heutige Jubiläumsveranstaltung nehme ich gerne zum Anlass, um einen erfolgreichen Meilenstein in der Forschungspolitik der Bundesregierung zu würdigen. Die Grundsteinlegung für VEGAS wurde bekanntlich aus der Idee geboren, neue und weitergehende Verfahrenstechnologien zum nachhaltigen Schutz von Grundwasser und Boden zu entwickeln, diese gleichzeitig unter naturnahen Feldbedingungen zu testen und sie rasch in die Praxis zu transferieren. Insoweit hatte das BMBF mit VEGAS bereits vor 10 Jahren den Gedanken in Angriff genommen, die Verwertung als Bestandteil forschungspolitischer Fördermaßnahmen besonders in den Vordergrund zu stellen – in einem Stadium, in dem dieser Begriff unter Forschern noch nicht so verbreitet war.

Den hohen Stellenwert des Grundwasser- und Bodenschutzes hat die Bundesregierung bereits frühzeitig erkannt und in Forschungsaktivitäten umgesetzt. Das Grundwasser stellt in Deutschland mit rd. 65 % die wichtigste Ressource zur Trinkwassergewinnung dar. Weitere rd. 20 % werden aus Quellwasser, Uferfiltrat und angereichertem Grundwasser gewonnen. Im Falle von bereits aufgetretenen Schäden ist die Anwendung effizienter Sanierungsmaßnahmen zu prüfen, um weitere Schäden für Mensch und Umwelt zu vermeiden.

In Deutschland besteht ein nicht unerhebliches Gefährdungspotenzial angesichts der mehr als 170.000 erfassten bzw. mehr als 240.000 geschätzten Altlasten-Verdachtsflächen. Diese Anzahl würde einerseits Sanierungskosten in dreistelliger Milliardenhöhe erwarten lassen; andererseits bietet sich vielfach die Option, den Schadensfall dann nicht zu sanieren, wenn keine unmittelbaren gravierenden Folgen drohen. Dies muss allerdings verlässlich und bezahlbar abgeklärt werden.

Es war klar: Eine Erfolg versprechende Entwicklung und zielstrebige Umsetzbarkeit derartiger Verfahrenstechnologien und Entscheidungssysteme erfordert den Einsatz und die Bündelung von Know-how durch interdisziplinäre Kooperation von Forschern und Anwendern an einer geeigneten Versuchseinrichtung mit bestmöglichen praxisnahen Versuchsbedingungen. Dafür gab es aber seinerzeit noch keine Versuchsanlage in Deutschland. Der Grund, VEGAS zu erschaffen.

Erwähnenswert in diesem Zusammenhang ist die Historie der Entstehung und Realisierung der VEGAS-Versuchseinrichtung, die insbesondere durch sehr konstruktive Initiativen der Universität Stuttgart und des Landes Baden-Württemberg einen weiteren, nochmals 10-jährigen „Vorlauf“ hatte:

- Bei dem 1985 vom Land Baden-Württemberg gegründeten Forschungsprogramm „Projekt Wasser-Abfall-Boden“ (PWAB) am Forschungszentrum Karlsruhe fanden die generellen Ziele des VEGAS-Konzeptes positive Resonanz. PWAB wurde seinerzeit in Personalunion mit dem gleichfalls in Karlsruhe ansässigen Projektträger des BMBF für den Bereich: „Wassertechnologie und Schlammbehandlung“ (PtWT) unter damaliger Leitung von Herrn Prof. Dr. S.H. Eberle geführt. Das Konzept sah vor, weitergehende Erkundungsmaßnahmen durchzuführen, Prognosen zum Langzeitverhalten von Schadstoffen für Gefährdungsabschätzungen zu erarbeiten und Sanierungsverfahren zu entwickeln. Als ursprüngliches Konzept war geplant, ein Naturfeld an einem geeigneten Grundwasserleiterstandort mit Bodennutzung ausfindig zu machen und einzurichten. 1986 wurde dazu eine Feasibility-Studie unter Leitung von Herrn Prof. Kobus und den Herren Dr. Teutsch sowie Dipl.-Ing. Ptak am Institut für Wasserbau der Universität Stuttgart erstellt. Als geeignetes „Naturtestfeld Wasser und Boden“ war die Horkheimer Neckar-Insel bei Heilbronn ausgewählt worden.
- Die Durchführbarkeit kontrollierter Kontaminations- und Sanierungsexperimente erforderte jedoch aufgrund der Vorgaben des §34 Wasserhaushaltsgesetzes einen alternativen Forschungsansatz. Danach ist das Einbringen von Schadstoffen in das Grundwasser unter keinen Umständen erlaubt. Kontaminationsprozesse in natura sind insoweit in Deutschland grundsätzlich unzulässig.
- Nach Diskussion mit dem PWAB-Projektrat wurde die Fa. Züblin AG 1987 mit der Erstellung einer technischen Feasibility-Studie beauftragt, die Möglichkeiten von Versuchen mit Schadstoffen im Untergrund aufzuzeigen.
- Der PWAB-Projektrat entschied nach Vorlage der Studie, die Errichtung einer Versuchshalle zur Durchführung von Kontaminations- und Sanierungsexperimenten mit Priorität zu verfolgen und eine Beteiligung des BMBF anzustreben. Eine Konzeption wurde durch das Institut für Wasserbau in Abstimmung mit den Universitäten Karlsruhe und Stuttgart ausgearbeitet.
- Nach Gesprächen und Abstimmungen zwischen Umweltministerium des Landes Baden-Württemberg und dem BMBF im Jahre 1988/89 wurde schließlich Anfang 1990 beim BMBF ein Antrag über die Gesamtausgaben für den Bau der Versuchseinrichtung in Höhe von 10,6 Mio. DM, rd. 5 Mio. €, eingereicht, jeweils mit einer Förderquote von 50 % durch das BMBF und das Land Baden-Württemberg. Die Bewilligung erfolgte Ende 1991 bzw. Anfang 1992 durch das Land Baden-Württemberg und das BMBF. Der Antrag beschränkte sich zunächst auf die Errichtung einer Grundwasser-Versuchshalle mit ihren technischen Einrichtungen. Ein Forschungsprogramm war seinerzeit nur skizziert und sollte zu einem späteren Zeitpunkt konkretisiert werden. Dies erschien damals deshalb geboten, weil für die Realisierung des Bauvorhabens – von der Finanzierung über die Planung bis zur Inbetriebnahme – ca. 4 Jahre erforderlich waren.

- Ca. Mitte 1992 erfolgte die Ausarbeitung eines Forschungsprogramms durch das Institut für Wasserbau für potenzielle Forscher. Im Herbst 1992 wurden im Forschungszentrum Karlsruhe im Rahmen eines großen Symposiums mit rd. 80 aktiven Teilnehmern für ein VEGAS-Forschungsprogramm 38 Projektideen vorgestellt und diskutiert, davon wurden 28 durch den Projektbeirat positiv bewertet.
- Mitte 1993 wurde der Programmrahmen durch den VEGAS-Beirat verabschiedet. Die Projektideen wurden in einen Gesamtkontext integriert und damit dem VEGAS-Projekt zusätzlich einen fachlich geschlossenen Rahmen verliehen.

Die Bilanz aus 10-jähriger Forschungsaktivität seit Inbetriebnahme der Versuchseinrichtung im Sommer 1995 zeigt eine bemerkenswerte Erfolgsgeschichte:

Es wurden 62 Vorhaben mit einer Gesamtzusammenfassung von rd. 19,5 Mio. € gefördert. Der größte Anteil mit rd. 11,5 Mio. € für 32 Projekte (entspricht rd. 60 % der Ausgaben und rd. 52 % der Gesamtprojekte) sind durch das BMBF finanziert worden. Rd. 5 Mio. € für 13 Projekte (entspricht rd. 26 % der Ausgaben und rd. 21 % der Gesamtprojekte) hat das Land Baden-Württemberg gefördert.

Die EU und Sonstige wie z.B. die DFG haben rd. 3 Mio. € für 17 Projekte beigesteuert. Das sind rd. 14 % der Forschungsausgaben und 27 % aller Projekte. Die EU gewährte davon allein rd. 2 Mio. € für 6 Projekte.

Es ist zu begrüßen, dass die bisherigen Fördermaßnahmen mit dazu beigetragen haben, Projekte nicht nur erfolgreich durchzuführen, sondern – wie geplant – auch zu einer Umsetzung und Anwendung der entwickelten Verfahrenstechnologien führten. Hier sind beispielsweise Technologien wie das TUBA-Verfahren (Dampf-injektion), das DHR-Verfahren (Dichtewand-Hebe-Reaktor) und das Wasserdampf-Luft-Injektionsverfahren zu nennen.

Dem forschungspolitischen Grundgedanken bei der Einrichtung des Projektes ist insoweit Rechnung getragen worden. Entwicklungen sollen aber auch bestmöglich so gestaltet werden, dass der Output an Know-how dazu führen kann, Arbeitsplätze zu erhalten bzw. zu schaffen durch frühzeitige Beteiligung von Firmen oder sogar über Firmen-Neugründungen.

Dazu ist es erforderlich, bei zukünftigen FuE-Aktivitäten bereits im Vorfeld von Projektplanungen verstärkt entsprechende Firmen und Sanierungsträger anzuwerben und einzubeziehen, unter finanziell angemessener Beteiligung. Erfolgversprechende Basis für einen solchen Weg ist zweifellos das erarbeitete Renommee der Institution VEGAS. Dafür stehen zahlreiche Publikationen, regelmäßige nationale und internationale Veranstaltungen und Einbindungen in vielfältige wissenschaftliche Netzwerke. Forschungs- und Anwendungsaktivitäten von VEGAS-Verfahren über nationale Grenzen hinweg belegen dies beispielhaft durch Kooperationen mit Frankreich, der Schweiz und Japan. Aber auch

das Interesse der National Engineering & Environmental Laboratory (NEEL) aus Idaho, USA, zum Aufbau einer ähnlichen Versuchseinrichtung, belegt in besonders eindrucksvoller Weise die hohe fachliche Reputation des VEGAS-Konzeptes.

Die Entstehung von VEGAS ist sicherlich ein gutes Beispiel für die föderalistisch geprägten Strukturen und forschungspolitischen Rahmbedingungen in Deutschland. Die Einrichtung einer solch großen und zukunftsweisenden Versuchsanlage sollte für jedes Bundesland ein Highlight darstellen und nicht dem Bund alleine überlassen werden, vorzugsweise bei der Finanzierung.

Bund und Länder müssen hierbei hinsichtlich ihrer politischen und monetären Mitverantwortung zur nachhaltigen Verbesserung der Umwelt- und Lebensbedingungen angemessen und entsprechend ihrer Leistungskraft zusammenwirken. Dies ist hier in vorbildlicher Weise geschehen.

Aus Sicht des BMBF hat VEGAS auch und nicht zuletzt zu den Erfolgen von weiteren Großverbänden bzw. Forschungsschwerpunkten beigetragen:

- Sickerwasserprognose – Die Prognose des Schadstoffeintrages in das Grundwasser mit dem Sickerwasser (**SIWAP**) zielt auf eine objektiviertere Gefahrenabschätzung.

*Forschungsgegenstand:* Erarbeitung von praktikablen Methoden für eine quantifizierbare und justiziable Prognose des Schadstoffeintrages mit dem Sickerwasser in das Grundwasser. Als Schadstoff-Quellen werden bevorzugt aufgebrachte bzw. eingebaute Recyclingmaterialien und Abfälle zur Verwertung betrachtet, die bei natürlichen Wasserbewegungsgeschwindigkeiten und unter Standort-typischen Bodenverhältnissen in das Grundwasser gelangen können.

Eine Strukturierung in zwei Teilschwerpunkte „Quellstärkeermittlung“ und „Transportprognose“ sowie die Begleitung des Förderschwerpunktes durch eine zentrale Koordination soll dazu beitragen, die umfangreiche und komplexe Sachmaterie effizient und zeitnah erarbeiten zu können. Die dazu notwendige interdisziplinäre Bearbeitung der Aufgabenstellung wird gewährleistet durch Forschergruppen aus den Fachbereichen Abfallwirtschaft, Hydrogeologie/Hydrologie, Bodenkunde, Mineralogie/Geochemie, Wasserchemie/Analytik, Baustoffforschung und Mathematik/Physik sowie durch die Beteiligung selbständiger Ingenieurbüros. Die zu erarbeitenden Verfahrensvorschläge sollen für die kommende Novellierung der Bundesbodenschutzverordnung genutzt werden.

Für die über 50 Einzel- und Verbundprojekten hat der BMBF ca. 12 Millionen € für 5 Jahre bereitgestellt.

- Kontrollierter natürlicher Rückhalt und Abbau von Schadstoffen bei der Reinigung kontaminierter Grundwässer und Böden (**KORA**)

*Forschungsgegenstand:* Am Beispiel verschiedener, jeweils branchen-typisch belasteter Standorte werden die im Untergrund ablaufenden natürlichen Abbau- und Rückhalteprozessen (engl.: natural attenuation) von Schadstoffen kontaminierter Grundwässer und Böden erforscht und bewertet. Diese Vorgänge sind als ergänzende Option für aktive Sanierungsmaßnahmen zu verstehen. Ihr Verständnis gilt als unverzichtbar zur Beantwortung z. B. der Frage, wie weit Sanierungsmaßnahmen gehen müssen und welchen zuverlässig prognostizierbaren Anteil Naturprozesse übernehmen können, z.B. durch Einbindung von mikrobiologischen Abbauvorgängen und/oder chemisch-physikalischen Prozessen.

Ergänzend zum naturwissenschaftlichen Untersuchungsprogramm werden auch Fragen der rechtlichen Rahmenbedingungen, der umwelt-ökonomischen Bewertung und der Entscheidungsfindung bearbeitet. Die Ergebnisse sollen dazu beitragen, dass die zuständigen Behörden Naturprozesse zukünftig hinsichtlich ihrer Eignung zur Erzielung / Erhaltung eines guten Zustandes der Grundwässer und Böden effizient bewerten und einordnen können.

Im Rahmen des auf 5 Jahre Laufzeit angelegten Förderschwerpunktes wurden ca. 20 Mio. € für über 60 Vorhaben bewilligt.

- Sanierungsforschung in regional kontaminierten Aquiferen (**SAFIRA**)

*Forschungsgegenstand:* Entwicklung und stufenweise Umsetzung neuer energiearmer bzw. passiver Wasseraufbereitungstechnologien für organische Schadstoffgemische (im Grundwasser) vom Prototyp zur volltechnischen Anwendung. Dazu werden die SAFIRA-Großversuchseinrichtungen in Bitterfeld und anderen Standorten durch das Umweltforschungszentrum Leipzig in Zusammenarbeit mit weiteren Forschungseinrichtungen und interessierten Unternehmen genutzt. Insbesondere sollen die Langzeitstabilität der neuen Technologien unter Feldbedingungen demonstriert sowie umweltplanerische Aspekte bei einer Implementierung der in situ-Reaktionszonen am Beispiel des Bitterfelder Raumes erarbeitet werden.

Für dieses Verbundprojekt stellte das BMBF fast 13 Mio. € bei einer Laufzeit von 5 Jahren zur Verfügung.

- Anwendung von Reinigungswänden für die Sanierung von Altlasten (**RUBIN** = Reaktionswände und -barrieren im Netzwerkverbund)

*Forschungsgegenstand:* Der Schwerpunkt der RUBIN-Projekte besteht in der Untersuchung und Lösung der bau- und betriebstechnischen Probleme bei der Errichtung von Reinigungswänden im Grundwasserleiter auf gegenwärtig 8 repräsentativen Standorten. Es sollen verallgemeinerungsfähige Kriterien insbesondere

für die Planung, den Bau, den Betrieb, die Ökonomie, die Langzeitwirksamkeit und die ökologische Verträglichkeit dieser Vorrichtungen gewonnen werden.

Der FuE-Verbund mit einer Laufzeit von 3 Jahren und derzeit 11 Projekten ist mit einem Etat von ca. 4 Millionen € ausgestattet.

- Untersuchungen für eine nachhaltige Reduzierung der Flächeninanspruchnahme **(REFINA)**

*Forschungsgegenstand:* Erarbeitung und Umsetzung von innovativen Strategien für die Verminderung der Flächeninanspruchnahme und ein nachhaltiges Flächenmanagement. Die Konzepte sollen für urbane wie auch ländlich-verdichtete Räume mit hoher Zu- oder Abwanderung aber auch die Entwicklungszentren naher oder peripherer Räume erarbeitet werden, in denen eine Weichenstellung hinsichtlich der zukünftigen Entwicklung erforderlich sein wird.

Für den Forschungsschwerpunkt mit einer Laufzeit von 7 Jahren sind rd. 20 Mio. € bereitgestellt worden.

Diese Schwerpunkte derzeitiger Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten verdeutlichen, dass der Förderschwerpunkt „Boden und Grundwasser“ einschließlich des Problembereichs „Altlasten“ im neuen BMBF-Rahmenprogrammes „Forschung für die Nachhaltigkeit“ gewichtig eingebunden ist. VEGAS spielt dabei dank der hier vorhandenen Kompetenz in Form des verfügbaren Know-hows und seines Großtechnikums weiterhin eine maßgebliche Rolle.

In diesem Sinne darf ich anlässlich der heutigen Veranstaltung allen Beteiligten bei VEGAS viel Erfolg wünschen, aber Sie auch zu Ihren bisherigen Leistungen herzlich beglückwünschen. Mein Dank gilt insbesondere für Ihr zielstrebiges und langjährig hohes Engagement, welches mit dazu beigetragen hat, dass VEGAS zu dem werden konnte ist, was es heute ist: Eine national und international anerkannte Großversuchseinrichtung. Die gemeinsame finanzielle Unterstützung durch das BMBF und das Land Baden-Württemberg war hier bei VEGAS gut angelegt.

Für den weiteren erfolgreichen Fortgang Ihrer Aktivitäten wünsche ich Ihnen alles Gute.

### **3 DAS VEGAS-KONZEPT: EIN BRÜCKENSCHLAG ZWISCHEN FORSCHUNG UND PRAXIS**

Helmut Kobus, Universität Stuttgart

Im vorliegenden Beitrag wird der Weg von der Konzeption bis zur Realisierung von VEGAS nachgezeichnet. Bund, Land und Universität haben in gemeinsamem Interesse die Basis für VEGAS geschaffen, denn Grundwasser- und Altlastensanierung ist ein Thema, dem nicht nur in Baden-Württemberg, sondern bundesweit und weltweit seit einem Vierteljahrhundert große Aufmerksamkeit zukommt. Im Kontext der öffentlichen Wahrnehmung der Grundwasserkontaminationen und der Altlastenproblematik haben sich neue Forschungsansätze und die VEGAS-Idee entwickelt.

#### **3.1 Die Wahrnehmung von Belastungen des Grundwassers mit Schadstoffen**

Grundwasser, unsere wichtigste Trinkwasserressource, wurde traditionell aufgrund des sogenannten „Selbstreinigungsvermögens“ des Untergrundes als reines Naturgut betrachtet. Aber eine zunehmende Zahl von Kontaminationen in Trinkwasserfassungen hat anfangs der 80er Jahre die vielseitigen Belastungen des Grundwassers durch Siedlung, Verkehr, Industrie, Gewerbe und Landwirtschaft aufgezeigt. Wegen der großen natürlichen Verweilzeiten sind Grundwasserschäden stets Langzeitschäden. Dies ist insbesondere am Problem der industriellen Altlasten deutlich geworden - sozusagen ein Langzeiterbe der Industrialisierung im letzten Jahrhundert.

Lokale Kontaminationen können langfristig zu ausgedehnten regionalen Grundwasserbelastungen führen. An Schadensfällen, die zunächst durch Belastungen von Trinkwasserfassungen erkannt wurden, hat sich oft eine kilometerlange Fahne auf dem Weg vom Schadensherd zu den nächstgelegenen Trinkwasserfassungen gezeigt, wobei die Schadensursache oft viele Jahrzehnte zurücklag. Daher der Begriff „Altlasten“.

Diese Problematik war eine große Herausforderung für die Forschung, der sich die DFG mit der Einrichtung eines DFG-Schwerpunktprogramms „Schadstoffe im Grundwasser“ angenommen hat. Im Rahmen dieses Schwerpunktprogramms haben wir (für einen von drei Themenbereichen) in einer interdisziplinären Forschergruppe das Thema „Numerische Modellierung des großräumigen Wärme- und Schadstofftransports im Grundwasser“ gemeinsam mit den Universitäten Karlsruhe und Hohenheim in Angriff genommen (2).

Numerische Modelle müssen anhand von Naturdaten validiert werden. Für die Arbeiten unserer Forschergruppe konnte hierzu eine Kooperation mit dem Umweltministerium Baden-Württemberg (unter dem damaligen Umwelt- und Landwirtschaftsminister Weiser) erreicht werden, weil BW als erstes Bundesland die Tragweite und die Brisanz der

Altlastenproblematik erkannt hat. Das Land BW hat verschiedene begleitende Fallstudien durchführen lassen, und die DFG hat die Forschungsarbeiten finanziert – eine sehr erfolgreiche Kombination, die es bis dahin noch nicht gegeben hatte (6).

Die Forschergruppe hat sich damals auf die brennendsten Fragen der Praxis konzentriert: Die Probleme der Chlorkohlenwasserstoffe (CKW) aus der Industrie, die Nitratproblematik aus der Landwirtschaft und die Wärmeausbreitung im Untergrund (geothermische Nutzungen) – jeweils verbunden mit konkreten Fallstudien:

- CKW: Lobdengau bei Ladenburg
- Nitrat: Bruchsal-Karlsdorf
- Wärme: Emmental.

Im Zuge der gemeinsamen Bemühungen brachte Baden-Württemberg damals als erstes Bundesland einen „CKW-Leitfaden“ heraus (1), und zur Nitrat- und Pestizidbelastung des Grundwassers wurde mit der „Schutz- und Ausgleichsleistungsverordnung“ das Konzept des „Wasserpennings“ eingeführt.

### **3.2 Die Altlastenproblematik**

Erkundungsprogramme in den 80er Jahren haben das enorme Gefährdungspotential von Altlasten erstmals deutlich gemacht. Bei einer Gesamtzahl von ca. 240000 Verdachtsflächen in der Bundesrepublik (davon etwa 35000 in BW), von denen ein erheblicher Teil als sanierungsbedürftig einzustufen war, wurde seinerzeit ein finanzieller Aufwand für die Sanierung in der Größenordnung von 100 Milliarden Euro geschätzt (7,9).

Schon bald hat sich gezeigt, dass für eine wirksame Sanierung zielgerichtet der Schadensherd angegangen und die Schadstoffquelle beseitigt werden muss, bevor sie langfristig ein großes Wasservolumen kontaminiert und somit letztlich auch die Trinkwasserversorgung gefährdet. Damit stellte sich aber der Forschung eine sehr komplexe Aufgabe: Die Versickerung und Ausbreitung von Schadstoffen in Phase und in Lösung in einem heterogenen Untergrund, verbunden mit Reaktions- und Adsorptionsprozessen.

Für diese Aufgabenstellung sind klassische Laborversuche im Chemie- oder Bodenvorbereitung vom Becherglas oder Säulenversuch nicht direkt übertragbar und aufgrund der sehr unterschiedlichen Skalen wenig aussagefähig für die realen Bedingungen im Feld. Die maßgeblichen physikalischen, chemischen und mikrobiologischen Prozesse im natürlichen Untergrund spielen sich im Mikromaßstab der einzelnen Poren ab, deren Längenmaßstab um rund 10 Zehnerpotenzen kleiner ist als der wasserwirtschaftliche Betrachtungsraum eines genutzten Grundwasservorkommens.

Im Jahr 1985 hat das Land BW ein Förderprogramm für Forschungsarbeiten im Bereich Wasser – Abfall – Boden (PWAB) gestartet mit dem Ziel, Lösungsansätze zur Grundwasser- und Altlastenproblematik zu entwickeln und in die Praxis umzusetzen. Aus den oben genannten Gründen wurde hierzu zunächst die Idee verfolgt, ein Testfeld für reale Kontaminationsexperimente einzurichten.

Wir haben uns auf die Suche nach einem geeigneten Standort für ein Naturtestfeld in BW gemacht, aber die Bemühungen mussten letztlich ergebnislos eingestellt werden, weil unser strenges Wasserhaushaltsgesetz keinerlei Eintrag von Schadstoffen in den natürlichen Untergrund zulässt – auch nicht im Interesse der Umweltforschung!

### 3.3 Das VEGAS-Konzept

Und so wuchs konsequenterweise hieraus das Konzept einer Versuchshalle mit Großversuchsständen für kontrollierbare Experimente unter naturnahen Bedingungen.

Nicht nur Laborversuche, auch Feldstudien sind nur beschränkt aussagefähig. Sie sind nicht nur zeit- und kostenintensiv, sondern auch dadurch eingeschränkt, dass meistens weder die Gesamtmasse des Schadstoffs im Untergrund noch dessen räumliche Verteilung hinreichend bekannt sind und auf die natürliche Untergrundstruktur nur anhand weniger einzelner Messpunkte rückgeschlossen werden kann.

Die großmaßstäblichen Experimente in VEGAS liegen in ihren Abmessungen und Versuchsbedingungen zwischen dem klassischen Laborversuch und dem realen Feldfall – sozusagen als Brückenschlag vom Labor zum Feld – für Experimente mit realen Schadstoffen und Schadstoffgemischen (Cocktails) in realitätsnahen, heterogenen Böden unter Einsatz modernster Messtechnik.

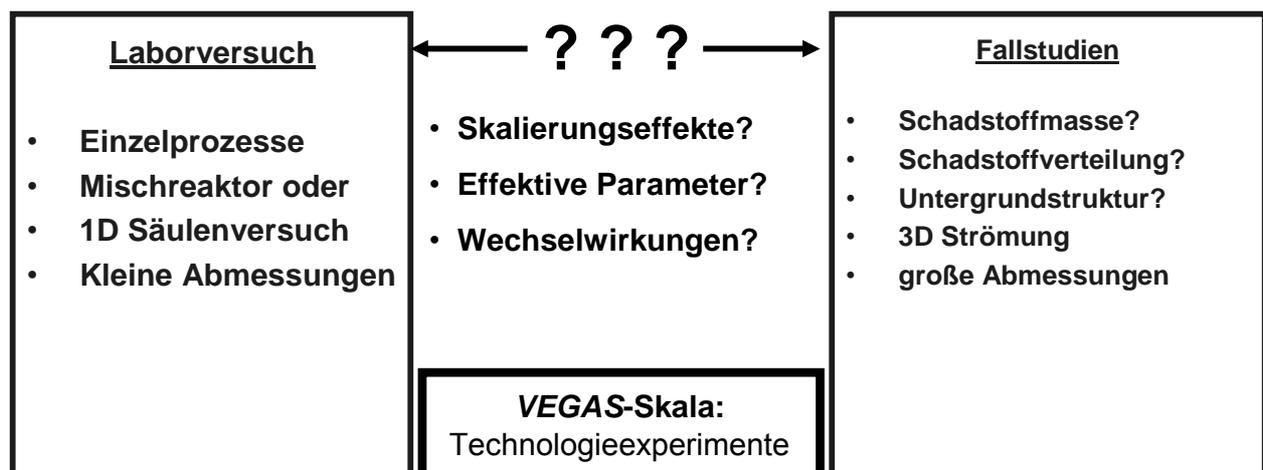


Abb. 3.1: VEGAS: Brücke vom Labor zum Feld

Die VEGAS-Technologieexperimente unter kontrollierten Randbedingungen bieten die Möglichkeit einer genauen Stoffbilanzierung. Primäres Ziel ist die Entwicklung und Op-

timierung von in-situ-Sanierungsverfahren, also Schadensherdsanierung ohne Bodenaushub, weil diese Verfahren unter Umständen umweltfreundlichere und kostengünstigere sowie auch vielseitigere Einsatzmöglichkeiten bieten (z. B. in bebauten Gebieten), sowie die Entwicklung und Optimierung von Erkundungstechniken und der Vor-Ort-Analytik.

### **3.4 Der Weg zu einer gemeinsamen Förderung**

Der VEGAS-Gedanke fand im Beirat von PWAB positive Resonanz und führte 1988 zu einem Grundsatzbeschluss, obwohl klar war, dass die Gesamtdimension des Vorhabens die Möglichkeiten von PWAB übersteigen würde. Minister Weiser griff die Idee auf und regte an, eine Institution in Partnerschaft des Landes und der Industrie zu schaffen – also schon damals der Gedanke einer „public-private partnership“. Allerdings war die Bereitschaft der Industrie, eine entsprechende Stiftung zu finanzieren, eher verhalten, so dass der Gedanke letztlich nicht weiterverfolgt wurde.

Nachdem sich in der DFG-Forschergruppe Grundwasser weltweite Kontakte zu führenden Forschern und Institutionen entwickelt hatten (5), von denen insbesondere die Grundwasserforschungszentren in Waterloo (Canada), Berkeley (USA) und Strasbourg (Frankreich) zu nennen sind, haben wir 1989 in Stuttgart eine internationale Konferenz zum Thema „Contaminant Transport in Groundwater“ (CTG) veranstaltet, auf der die Idee vom kontrollierten Großexperiment in der internationalen Diskussion eine sehr positive Resonanz fand (3). Unsere kanadischen Partner haben den Schritt zum kontrollierten Sanierungsexperiment schnell getan (4), und auch unser Strasbourger Partnerinstitut hat in den Folgejahren die Idee erfolgreich umgesetzt.

Auf deutscher Seite konnte das Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF, damals noch BMFT) dafür gewonnen werden, eine solche Anlage mitzufinanzieren, sofern sie als bundesweites Zentrum allen interessierten Forschern und Industriepartnern zugänglich gemacht würde. Und so kam letztlich die Konstellation zustande, nach der das Umweltministerium BW gemeinsam mit dem BMBF und mit Unterstützung durch das Ministerium für Wissenschaft und Forschung (MWF) BW und durch die Universität Stuttgart mit vereinten Kräften die Einrichtung von VEGAS auf den Weg gebracht haben.

Die Realisierung dieser in mancher Hinsicht aus dem üblichen verwaltungstechnischen und auch finanziellen Rahmen fallenden Lösung war nur dadurch zu erreichen, dass alle Beteiligten das Anliegen unterstützten und bereit waren, auch ungewöhnliche Wege zu beschreiten. Dass diese Entwicklung konsequent möglich war, trotz verschiedener Wechsel bei den beteiligten Institutionen (z. B. haben alle beteiligten Ministerien in diesem Zeitraum den Namen gewechselt), spricht für die Bedeutung der Thematik und für die Schlüssigkeit des Konzepts.

### 3.5 VEGAS – Bau und Einrichtung

VEGAS ist dem Institut für Wasserbau angegliedert, dessen Infrastruktur, Werkstätten und Labors mitgenutzt werden.

Als bundesweit einzige Versuchseinrichtung ihrer Art steht sie allen interessierten Institutionen und Ingenieurbüros zur Nutzung offen. Die Nutzungsprioritäten werden von einem wissenschaftlichen Beirat festgelegt, dem neben den beteiligten Förderinstitutionen eine Reihe namhafter Persönlichkeiten aus Wissenschaft und Praxis angehören.

1985	Vorstellung Projektidee bei PWAB
1986/87	Feasibility Studien Naturtestfeld / Versuchshalle
1988	PWAB Grundsatzbeschuß
1989	Internationales Symposium CTG
1990	Antrag an BMFT (heute BMBF)
1992	Bewilligung und Bearbeitungsbeginn Forschungsprogramm: Workshops 10/92 und 10/94
1993/94	Bau der Versuchshalle
1995	Installation der Versuchsbehälter
25.09.1995	Einweihung und Inbetriebnahme VEGAS

**Abb. 3.2: VEGAS: Zeitliche Entwicklung**

Ein Blick auf die VEGAS-Chronologie verdeutlicht die inhärenten Zeitmaßstäbe der deutschen Forschungsförderung: Insgesamt 7 Jahre bis zur Förderentscheidung im Jahr 1992, plus drei Jahre für den Bau und die Einrichtung - das sind letztlich 10 Jahre bis zur Realisierung.

Bei der Bauplanung und in den Genehmigungsverfahren waren zahlreiche Fragen bezüglich der strengen Vorschriften und Auflagen zu klären:

VEGAS muss ähnlich wie eine „Sondermüllbehandlungsanlage“ eine eigene Abwasserbehandlungsanlage und eine vollständige Kontrollmöglichkeit für Leckagen vorweisen, muss auch Entsorgungskosten berücksichtigen und braucht verschiedene Funktions-, Labor- und Nebenräume. Alle Planungen hierfür wurden zügig umgesetzt.

Die VEGAS-Halle wurde in direktem Anschluss an die Versuchsanstalt für Wasserbau errichtet (wobei das frühere Freigelände für große wasserbauliche Versuche aufgegeben werden musste). Die Grundsteinlegung erfolgte im Oktober 1993 und bereits nach

einem Jahr wurde das fertige Bauwerk im Dezember 1994 übergeben. Es folgte der Einbau der verschiedenen Grossbehälter und deren Befüllung sowie die Bestückung mit Betriebs-, Mess- und Kontrolleinrichtungen im ersten Halbjahr 1995, so dass die Fertigstellung der Gesamtanlage bereits Mitte 1995 erreicht war.

### 3.6 VEGAS – Forschungsprogramm

Parallel zu den baulichen Aktivitäten wurde das in VEGAS aufzugreifende Forschungsprogramm mit Hilfe von zwei Workshops vorangebracht (8). Zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme von VEGAS waren bereits 19 Forschungsprojekte und 8 Kooperationsprojekte angelaufen, die in 5 Themenbereiche gegliedert waren. Diese umfassten natur- und ingenieurwissenschaftliche Fragestellungen und Methoden, Technologieexperimente und numerische Simulationstechnik, und als übergreifender Rahmen wurde das Thema „Flächenrecycling und Planungsrisiko Altlasten“ für ein urbanes Flächenmanagement thematisiert.

Die Inbetriebnahme der neuen Anlagen erfolgte am 26. und 27. September 1995 mit einem Festakt und einer internationalen Fachtagung. Die Beiträge dieser Fachtagung sind in dem Buch (10) „Groundwater and Subsurface Remediation: Research Strategies for in-situ Technologies“ festgehalten.

In diesem Buch werden das VEGAS-Konzept beschrieben sowie in 22 eingeladenen Beiträgen internationaler Wissenschaftler folgende Fragestellungen behandelt:

- from concepts to quantification: experiments
- from processes to technologies: interactions and scales
- from processes to systems: numerical models
- from technology to application: strategies

Zusammenfassend lässt sich der Beitrag von VEGAS für Forschung, Praxis und Lehre in dem folgenden Zitat aus der Eröffnungsveranstaltung 1995 umreißen:

VEGAS steht nicht nur als Akronym für „Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung“, sondern bedeutet auf Spanisch auch soviel wie „fruchtbare, wasserreiche oder auch künstlich bewässerte grüne Talauen“ - und in dieser Bedeutung kommt auch unsere übergreifende Thematik zum Ausdruck: Die ganzheitliche Betrachtung des Wassers in der natürlichen Umwelt.

Unser Ziel für VEGAS ist es, zu einer nachhaltigen Bewirtschaftung unserer Naturressourcen Grundwasser und Boden beizutragen und die Bemühungen der Umweltpolitik um einen verbesserten Umweltschutz und insbesondere um den Grundwasserschutz aktiv zu unterstützen.

Darüber hinaus leistet VEGAS aber auch einen wichtigen Beitrag zur Lehre und Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses dadurch, dass die disziplinentorientierte Grundausbildung hier ergänzt und erweitert wird auf die Fähigkeit zur interdisziplinären Zusammenarbeit - eine Eigenschaft, die für kreative Forschung und für innovative Wirtschaftsentwicklung von zentraler Bedeutung ist.

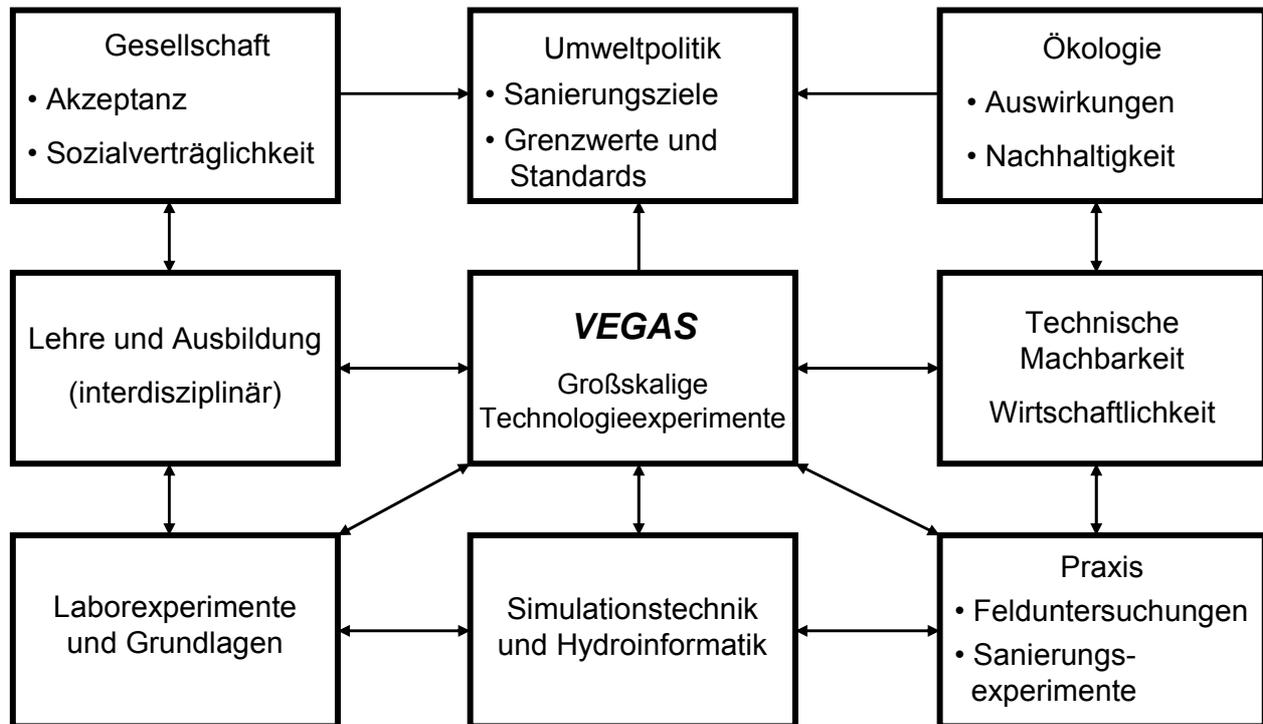


Abb. 3.3: VEGAS – Beitrag zu Forschung, Praxis und Lehre

### 3.7 Schlussbemerkung

Mit der Inbetriebnahme von VEGAS im Jahr 1995 war eine wichtige erste Etappe zurückgelegt und die Basis für innovative VEGAS-Forschung gegeben.

VEGAS ist im Teamwork unter aktiver Mitwirkung zahlreicher Kollegen, Mitarbeiter und Forschungspartner konzipiert und realisiert worden, und ihnen allen gebührt Anerkennung und Dank. Die vielfältigen Beiträge haben ihren Niederschlag in zahlreichen Veröffentlichungen gefunden. Seit der Inbetriebnahme wurde VEGAS von den Herren Dr. Baldur Barczewski (Wissenschaftlicher Leiter) bis zu seinem allzu frühen Tod im Juli 2005 und Dr. Hans-Peter Koschitzky (Technischer Leiter) sehr engagiert und erfolgreich geleitet.

### 3.8 Literaturhinweise

- (1) Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft, Umwelt und Forsten Baden-Württemberg, (MELUF-BW) (1984): „Leitfaden für die Behandlung von Grundwasserunreinigungen durch leichtflüchtige Chlorkohlenwasserstoffe“. Wasserwirtschaftsverwaltung Heft 13.
- (2) Kobus, H. (1987): Ein Programm zur Erforschung aktueller Probleme in Grundwasserwirtschaft und Grundwasserschutz. Wasserwirtschaft 11, (591-597).
- (3) Kobus, H., Kinzelbach W. (Hrsg.) (1989): „Contaminant Transport in Groundwater“, IAHR/AIRH Proceedings 3, International Symposium Stuttgart, April 1989, Balkema-Verlag Rotterdam (486 Seiten).
- (4) Cherry, J.A., Feenstra, S., Kueper, B.H., McWhorter, D.B. (1990): “Status of In-Situ Technologies for Cleanup of Aquifers Contaminated by DNAPLs Below the Water Table”. International Specialty Conference on How Clean is Clean? Cleanup Criteria for Contaminated Soil and Groundwater, Air and Waste Management Association.
- (5) International Association of Hydraulic Research (IAHR) (1991): “Hydraulics and the Environment, Partnership in Sustainable Development”. IAHR-Journal, extra issue, Vol. 29.
- (6) Kobus, H. (Hrsg.) (1992): “Schadstoffe im Grundwasser I: Wärme- und Schadstofftransport im Grundwasser“, DFG-Forschungsbericht, VCH-Verlag, Weinheim.
- (7) Umweltministerium Baden-Württemberg (UM-BW), (1992): „Umweltdaten 91/92 Baden-Württemberg“, Landesanstalt für Umweltschutz (LFU), Karlsruhe.
- (8) Kobus, H., Cirpka, O., Barczewski, B., Koschitzky, H.-P. (1993): “Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung VEGAS – Konzeption und Programmrahmen“, Mitteilungsheft Nr. 82, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, ISBN 3-921694-82-5.
- (9) Der Rat von Sachverständigen für Umweltfragen (1995): „Altlasten II – Sondergutachten Februar 1995“, Bonner Universitäts- Buchdruckerei, Bonn.
- (10) Kobus, H., Barczewski, B., Koschitzky, H.-P. (Eds.) (1996): „Groundwater and Subsurface Remediation: Research Strategies for in-situ Technologies“, Serie Environmental Engineering, Springer Verlag.

## 4 10 JAHRE VEGAS-FORSCHUNG: ENTWICKLUNG UND TENDENZEN

Baldur Barczewski, Jürgen Braun, Hans-Peter Koschitzky  
VEGAS, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart

Im September 1995 wurde die Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung (VEGAS) eröffnet. Mit einer bundes- oder gar weltweit einmaligen experimentellen Ausstattung sollten in VEGAS Technologien und Konzepte zur Erkundung und In-situ-Sanierung von Untergrundkontaminationen und kontaminierten Grundwasserleitern entwickelt werden.

Im Laufe der ersten zehn Jahre wurden beachtliche Erfolge bei der Entwicklung von Sanierungstechnologien und Erkundungstechniken erzielt. Gleichzeitig wurde jedoch auch deutlich, dass Technologieentwicklung allein nicht ausreicht, die Herausforderungen eines nachhaltigen Boden- und Grundwasserschutzes zu meistern. Die Technologieentwicklung muss in ein breiteres Umfeld eingebettet werden. Dazu gehört einerseits die Grundlagenforschung, andererseits aber auch die Implementierung der entwickelten Methoden durch Pilotanwendungen sowie flankierend die Aus- und Weiterbildung von Fachleuten aus Behörden und Ingenieurbüros.

Vor dem Hintergrund der großen Zahl und des Ausmaßes mancher Schadensfälle, auf Grund der Erkenntnis, dass viele Schadensfälle nicht genau lokalisiert und/oder mit den heute zur Verfügung stehenden Methoden nicht saniert werden können und durch die zunehmend knapper werdenden finanziellen Mittel der öffentlichen Hand aber auch der Wirtschaft, fand in den letzten Jahren in gewisser Weise ein Paradigmenwechsel statt, dem sich auch VEGAS stellen musste. So steht zum Beispiel die Frage im Raum: Ist eine vollständige Entfernung der Schadstoffe aus dem Untergrund in jedem Fall notwendig, oder wären auch eine (kontrollierte) Sicherung, ein kontrollierter natürlicher Abbau von Schadstoffen im Untergrund (Monitored Natural Attenuation, MNA) oder eine partielle Quellensanierung Optionen, Sanierungsziele zu erreichen?

### 4.1 Herausforderungen und Ziele

Schadstoffe im Untergrund belasten sowohl Böden als auch Grundwasser. Insbesondere die so genannten NAPLS (non-aqueous phase liquids), die insbesondere im letzten Jahrhundert an Tausenden von Schadensfällen in den Untergrund eindrangen, sind in vielen Fällen auch in sehr kleinen Konzentrationen toxisch. Sie haben auf Grund ihrer geringen Wasserlöslichkeit eine Verweilzeit im Boden von zig bis Hunderten von Jahren.

Sie können über die Entnahme von Grundwasser zur Trinkwasserversorgung in den Nahrungskreislauf, oder über die Bodenluft (insbesondere in Kellerräumen) in die Atemluft gelangen und somit eine direkte Bedrohung für den Menschen darstellen.

Weiterhin sind belastete Grundstücke auf dem Immobilienmarkt nicht veräußerbar, was zu vielen – insbesondere innerstädtischen – Industriebrachen und parallel dazu zu einem nicht unerheblichen Flächenverbrauch führt (derzeit in Deutschland ca. 110 ha/d).

Konventionelle In-situ-Sanierungstechniken, wie z.B. Pump&Treat sind durch die geringe Löslichkeit der Schadstoffe oft ökonomisch wenig sinnvoll. Ex-situ-Technologien wie z.B. das Ausgraben und Entsorgen der Schadstoffquelle führen oft zu einer Verlagerung des Problems (Deponierung) und weisen eine sehr schlechte Ökobilanz (Transport auf Straßen) auf. Außerdem ist ein Ausheben der Schadstoffquelle bei bebauten Grundstücken oder tiefliegenden, oft auch nicht exakt lokalisierbaren Schadstoffquellen nicht möglich.

Neue Technologien zur ökonomischen, aber auch ökologischen Sanierung von kontaminierten Grundwasserleitern müssen entwickelt und angewandt werden. Nur so sind die Sicherung unserer Umwelt, ein Erhalt unserer Lebensqualität und eine Verminderung der Zersiedlung möglich.

## **4.2 Schwerpunkte der VEGAS Aktivitäten**

VEGAS wurde konzipiert, um durch Technologieentwicklung eine Brücke zwischen kleinskaligen Laborversuchen und der Feldanwendung zu schlagen. Eine solche Brücke steht auf den Fundamenten „Grundlagenforschung“ auf der einen Seite und „Feldanwendung, Technologietransfer“ auf der anderen Seite. Ein solches Bauwerk kann somit nur erfolgreich sein, wenn beide Fundamente tragfähig sind. Weiterhin ist der Bau einer solchen Brücke nur möglich, wenn regelmäßige Messungen und begleitende numerische Berechnungen durchgeführt werden.

## **4.3 Grundlagenforschung**

Grundlegend zur Entwicklung von Sanierungstechnologien ist ein gutes Verständnis der zugrunde liegenden physikalischen Prozesse und Parameter sowie der daraus abgeleiteten (konstitutiven) Beziehungen. Insbesondere im Bereich der Mehrphasenströmung sind diese in vielen Fällen kontra-intuitiv. Weiterhin muss die Grundlagenforschung sehr interdisziplinär ausgebaut werden, um insbesondere auch chemische, verfahrenstechnische und thermodynamische Aspekte zu berücksichtigen.

## 4.4 Technologieentwicklung

Der ursprüngliche Schwerpunkt der VEGAS-Aktivitäten liegt in der Entwicklung von Sanierungstechnologien. Forscher aus Hochschule und Industrie arbeiten dabei interdisziplinär zusammen. Bevor in VEGAS die Entwicklung einer neuen Technologie erfolgen kann, müssen die Gutachter der Geldgeber von einer Projektidee überzeugt werden sowie die VEGAS-Leitung prüfen, ob die erforderliche Infrastruktur in VEGAS zur Verfügung gestellt werden kann. Der VEGAS-Beirat entscheidet dann über die Nutzung der Einrichtungen von VEGAS.

Sanierungstechnologien können grob in „Dekontamination“ und „Sicherung“ eingeteilt werden. Bei Dekontamination wird die Schadstoffquelle entfernt, während bei Sicherung entweder die Quelle eingekapselt oder die Schadstofffahne durch chemische oder hydraulische Methoden behandelt wird. VEGAS hat sich in den vergangenen Jahren vor allem auf die Quellenerkundung und -sanierung konzentriert.

Nachfolgend werden zwei Verfahren, exemplarisch vorgestellt, deren Leistungsfähigkeit in Pilotanwendungen gezeigt werden konnte und die inzwischen auch gemeinsam mit Ingenieurfirmen in der Feldanwendung sind.

### 4.4.1 Thermische Sanierungstechnologien

Der Eintrag von Energie, sowohl konvektiv in Form von Dampf oder eines Dampf-Luft-Gemisches als auch konduktiv mittels fester Wärmequellen, erhöht die Temperatur der kontaminierten Zone. Dadurch werden einerseits die Grenzflächenspannung, die Viskosität und die Dichte des Schadstoffs herabgesetzt, als maßgeblicher Effekt wird aber andererseits der Dampfdruck der Schadstoffe erhöht. Somit geht der Schadstoff verstärkt in die Gasphase über und kann über die Bodenluft abgesaugt werden. Die Technologieentwicklungen in VEGAS konzentrierten sich dabei zuerst auf die ungesättigte Zone, wurden dann aber auch auf die gesättigte Zone ausgedehnt. Im Rahmen mehrerer Promotionen wurden diese Technologien im Labor entwickelt, in Großversuchen optimiert und haben inzwischen auch bei mehreren Feldfällen ihr Potential unter Beweis gestellt. Dabei konnte gezeigt werden, dass Schadstoffquellen innerhalb sehr kurzer Zeit mit überschaubaren Energiekosten sicher aus dem Untergrund entfernt werden können.

### 4.4.2 Der Dichtwand-Heber-Reaktor

Gegenüber thermischen Verfahren ist der Dichtwand-Heber-Reaktor (DHR) eine sehr kostengünstige Technologie, da er als Energie das natürliche Grundwassergefälle verwendet. Der DHR erhöht, ähnlich wie das konventionelle Pump-and-Treat-Verfahren, die Strömung durch die Schadstoffquelle und verstärkt somit Lösungsprozesse. Diese Lösungsprozesse sind jedoch diffusionslimitiert, was bedeutet, dass der geringe Ener-

gieinput durch eine Sanierungsdauer, die Jahre oder Jahrzehnte betragen kann, „erkauft“ wird.

Die beiden Technologien bilden das High-Tech- und das Low-Tech-End der VEGAS-Entwicklungen. High-/Low-Tech ist hier keinesfalls eine Wertung des zur Entwicklung notwendigen Sachverstandes, es beschreibt lediglich die Anforderungen an Technologie- und Energieaufwand bei der Anwendung. Beide exemplarisch aufgeführten Technologien haben, in Abhängigkeit von den jeweiligen Anforderungen im Feld (Sanierungsdauer, Finanzen, etc.), ihre Anwendungsmöglichkeiten.

Andere Technologien, die in VEGAS (weiter-)entwickelt wurden sind zum Beispiel:

- Einsatz von Tensiden zur Abreinigung von NAPL-Schadensfällen  
(Uni Stuttgart, Uni Tübingen, TZW Karlsruhe, Uni Karlsruhe, BASF AG, Ludwigshafen, FZ Jülich, IfE Clausthal-Zellerfeld, Tauw Umwelt GmbH, Moers, Stadt Trier)
- Alkoholspülung zur Abreinigung von DNAPL- und LNAPL-Schadensfällen  
(Uni Stuttgart, Uni Karlsruhe, Battelle, USA, Tauw Netherlands)
- Injektion von Mikroemulsionen zur Abreinigung von DNAPL-Schadensfällen  
(Uni Stuttgart, FZ Jülich, IBL Heidelberg, TZW Karlsruhe)
- Entwicklung von speziellen Sanierungsbrunnen (GZB, LIP)  
(Uni Karlsruhe, Ed Züblin AG)
- Immobilisierung von Schwermetallen  
(Umweltwirtschaft Stuttgart, TU Berlin, Engler-Bunte-Institut, Karlsruhe, VEDEWA, Hess. Industriemüll GmbH)
- Entwicklung reaktiver Wände (Fe(O))  
(Uni Stuttgart, Uni Kiel)
- Enhanced Natural Attenuation  
(Uni Stuttgart, Uni Tübingen, TZW Karlsruhe)

Zur Unterstützung und Vorbereitung der Technologieentwicklung wurde Grundlagenforschung sowie die Entwicklung von Mess- und Erkundungstechniken durchgeführt:

- Lösungs- und Transportvorgänge im Grundwasser  
(Uni Stuttgart, BGD Dresden, Uni Hohenheim, Uni Karlsruhe)
- NAPL-Infiltrationsvorgänge im gesättigten und ungesättigten Boden  
(Uni Stuttgart, Uni Hohenheim, Uni Karlsruhe, DGFZ Dresden)
- Entwicklung von Messsystemen zur Detektion von NAPL in Phase  
(Uni Stuttgart, Uni Hohenheim, DGFZ Dresden, UFZ Leipzig-Halle)

Weiterhin wurden Untersuchungen zum Wiedereinbau (Recycling) bzw. zur Deponierung kontaminierter Materials durchgeführt zur

- Sickerwasserproblematik  
(Uni Stuttgart, G.M.F. Karlsruhe, TZW Karlsruhe, FhG Karlsruhe, Stadt Karlsruhe)

Ein vollständiger Überblick aller in VEGAS durchgeführten Forschungsvorhaben und (mit-)entwickelten Technologien ist im Rahmen dieses Beitrags nicht möglich. Dazu wird z.B. auf die Proceedings der jährlich stattfindenden VEGAS-Statuskolloquien verwiesen. Die oben aufgeführten Forschungsthemen veranschaulichen nicht nur das Spektrum der in VEGAS durchgeführten Forschungsarbeiten, sie machen auch deutlich, dass VEGAS nicht nur von Wissenschaftlern der Universität Stuttgart, sondern von Hochschulen und Ingenieurbüros im In- und Ausland genutzt wird. Insbesondere durch solche kooperative Forschungsansätze wird das Wissen verschiedenster Fachbereiche in erfolgreiche Neu- und Weiterentwicklungen umgesetzt.

### 4.5 Numerische Modellentwicklung

Insbesondere bei der Dimensionierung neuer Technologien ist die numerische Modellierung unverzichtbar. In VEGAS fand in den letzten Jahren eine Symbiose zwischen der numerischen Modellierung und den experimentellen Arbeiten statt. Dabei lag ein besonderer Schwerpunkt auf der Entwicklung und ingenieurpraktischen Anwendung von Simulationsmethoden und -techniken zur Beschreibung von Mehrphasen-, Mehrkomponentenströmungen und Transportprozessen im Untergrund. Eine wichtige Basis für die numerische Modellentwicklung sind die in experimentellen Versuchen ermittelten konstitutiven Beziehungen (z.B. Abhängigkeit der Bodenfeuchte vom Kapillardruck, Abhängigkeit der Löslichkeit oder Dampfdruck von der Temperatur, etc.). Diese Beziehungen wurden in den letzten Jahren systematisch in numerischen Modellen umgesetzt, die nunmehr auf leistungsstarken Parallelrechnern unter anderem dafür eingesetzt werden können, Designparameter für Großversuche zu bestimmen. Bei den unter genau kontrollierten Randbedingungen durchgeführten Großversuchen werden in vorgegebenen Abständen Proben entnommen bzw. Parameter gemessen. Diese Versuchsergebnisse werden dann zum Nachweis (Verifizierung und Validierung) der numerischen Modelle verwandt.

Mit Unterstützung der nunmehr zur Verfügung stehenden numerischen Modelle können Laborversuche und Feldanwendungen für isotherme und nicht-isotherme Dreiphasenströmungen von Wasser, Gas und NAPL dimensioniert werden. Bei den Simulationen werden dabei sowohl die reinen Strömungen als auch der Mehrkomponententransport simuliert.

## 4.6 Messtechnik

Messtechnik hat im Bezug auf die Forschungsarbeiten in VEGAS drei Schwerpunkte: Erkundung, Monitoring und Langzeitüberwachung

Klassischerweise wird durch Entnahme von Boden- und Wasserproben ein (potentieller) Schadensfall erkundet. Basierend auf dieser Erkundung wird dann eine Sanierungsstrategie festgelegt, bzw. entwickelt. Eine detaillierte Erkundung kann auf der einen Seite recht kostenintensiv sein, auf der anderen Seite können dadurch mittel- und langfristig Sanierungs- und Nachsorgekosten eingespart werden. Insbesondere eine gute Detailkenntnis der Lage und Konzentration eines Schadensherdes ist für eine effiziente Sanierung von größter Bedeutung. Konventionelle Erkundungstechniken basieren auf wenigen sehr hochwertigen Messungen (Laboranalysen), die jedoch u.a. auf Grund ihrer geringen Anzahl kaum Information über die genaue Lage der Kontamination lieferten. In VEGAS wurden deshalb neue Methoden entwickelt (z.B. basierend auf Sensoren und Lichtleitern), die unter bestimmten Voraussetzungen schnell und kostengünstig eine Eingrenzung des Schadensherdes ermöglichen. Basierend auf diesen sehr kostengünstigen Messungen können dann die teureren, quantitativen Methoden gezielt dort eingesetzt werden, wo der Schadstoff bereits nachgewiesen wurde.

Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass Sanierungsmaßnahmen teuer sind. Deshalb ist es in jedem Fall dringend erforderlich, dass eine kontinuierliche Messung (Monitoring) des Sanierungsfortschritts stattfindet, um z.B. Pumpraten, Temperatur, Eintrag von Oxidationsmitteln, etc. während der Sanierungsmaßnahme zu optimieren. Instrumente der Vor-Ort-Messtechnik wurden entwickelt, um auch im Feld einen zeitnahen Rücklauf bezüglich der Schadstoffverteilung und vor allem der Reduzierung der Schadstoffgehalte zu erhalten und somit die Sanierungskosten minimieren zu können.

Nach Abschluss einer Sanierungsmaßnahme (Quellensanierung, Einbau einer Reaktiven Wand, etc.) ist mittels Langzeitüberwachung nachzuweisen, dass unterstrom des Schadstoffherds keine Gefährdung der Schutzgüter mehr stattfindet.

Sollte mittelfristig auf Grund des bereits angesprochenen Paradigmenwechsels auch eine partielle Quellensanierung oder Monitored Natural Attenuation als Sanierungsansatz genehmigungsfähig werden, ist auch dies nur mit einer entsprechenden automatisierten Langzeitüberwachung möglich. In Abhängigkeit vom Schadensfall müssten bestimmte Parameter festgelegt, deren Konzentration im Abstrom überprüft und nachgewiesen werden, sodass vorgegebene Grenzwerte eingehalten werden.

## 4.7 Technologie- und Wissenstransfer

VEGAS organisiert seit Jahren vielfältige Weiterbildungsveranstaltungen und betreibt dadurch einen aktiven Wissenstransfer in die Praxis. Hierzu gehören auch die jährlich stattfindenden Lehrgänge zur Probennahme von Grundwasser und Boden.

Der Versuchseinrichtung angegliedert ist die Geschäftsstelle des *fortbildungsverbundes boden und altlasten* Baden-Württemberg. Hier werden in Zusammenarbeit mit Ingenieurbüros und Umweltverwaltung jährlich rund zehn Veranstaltungen zu Themen im Bereich des vorsorgenden und nachsorgenden Bodenschutzes, Flächenrecyclings und Umweltgesetzgebung etc. angeboten. Über die ebenfalls bei VEGAS angesiedelte Geschäftsstelle des *altlastenforums* Baden-Württemberg e.V. bestehen enge Kontakte zu Ingenieurbüros, Behörden und Kommunen. Darüber hinaus führt VEGAS zu aktuellen Forschungsthemen Symposien durch. In diesem Rahmen werden neue wissenschaftliche Erkenntnisse und Themen in einem größeren Kreis von Fachleuten diskutiert.

Durch die enge Einbindung in die Lehre der Universität und insbesondere auch die international orientierten Studiengänge wird ein weltweiter Technologietransfer gewährleistet.

## 4.8 Die Brücke und das Fundament

In VEGAS konnten in den zurückliegenden Jahren von Wissenschaftlern und Praktikern verschiedene Sanierungstechnologien entwickelt werden. Diese basieren auf der einen Seite auf der Grundlagenforschung und sollen auf der anderen Seite durch eine erfolgreiche Feldanwendung ihren (auch wirtschaftlichen) Erfolg nachweisen.

Aber an dieser Stelle zeigt sich auch nach zehn Jahren erfolgreicher Forschung immer noch eine Bruchstelle. Die Geldgeber von Bund und Land finanzieren das eine Fundament (die Grundlagenforschung) und die Brücke (Technologieentwicklung). Eine Finanzierung des zweiten Fundaments (Feldanwendung) wird von der Industrie erwartet. In Zeiten leerer Kassen ist die Industrie jedoch immer weniger bereit, ein solches finanzielles Risiko zu tragen. Die Technologieentwicklung aus Sicht der Geldgeber hört in der Regel mit dem großskaligen Experiment auf, die Anwendung beginnt für die Industrie nach einem erfolgreich durchgeführten Pilotversuch.

Somit muss es nunmehr Aufgabe aller Beteiligten sein, die Durchführung von Pilotversuchen „interessant“ zu machen. Dies kann von Seiten der Geldgeber durch eine entsprechende finanzielle Unterstützung geschehen, von Seiten der Behörden und Gesetzgeber kann dies aber auch dadurch geschehen, dass ein Eigentümer seiner Sanierungspflicht durch die Durchführung einer Pilotanwendung nachkommen kann. Nur durch eine solche gemeinsame Anstrengung von Behörden, Geldgebern und Sanierungspflichtigen wird die erfolgreiche Umsetzung der entwickelten Technologien langfristig gewährleistet.

## 4.9 Ausblick und Tendenzen

In den letzten zehn Jahren wurden in VEGAS neben der reinen Technologieentwicklung zur Grundwasser- und Altlastsanierung noch die beiden Schwerpunkte „Messtechnik“ (Vor-Ort-Analytik) und „Brachflächenrecycling“ aufgebaut.

Die Messtechnik ist zur Begleitung der Technologieentwicklung dringend notwendig und soll mittelfristig in VEGAS durch den Aufbau eines Kompetenzzentrums weiter verstärkt werden.

Der zweite Schwerpunkt, das Brachflächenrecycling, stellt durch die Einbindung von Eigentümern, Forschern, Versicherungen, Banken, etc. ein extrem heterogenes Forum dar, das jedoch notwendig ist, um auch mittelfristig Tendenzen und Ziele der Sanierung zu diskutieren und ggf. zu hinterfragen. Des Weiteren wird es durch den Schwerpunkt Brachflächenrecycling möglich, dieser heterogenen Gruppe Sanierungsmöglichkeiten aufzuzeigen, aber auch von ihnen die Anforderungen an die Forschung aus verschiedenster Perspektive zu erhalten.

Wie bereits ausgeführt findet derzeit teilweise ein Paradigmenwechsel statt.

- Ist es wirklich notwendig, jeden Schadensfall, unabhängig von den Kosten, zu 100% zu sanieren? Was würde geschehen, wenn die Schadstoffquelle nur zu 80% entfernt würde? Würde dies tatsächlich lediglich bedeuten, die Lebensdauer der Quelle von 500 auf 300 Jahre zu vermindern?
- Welche Alternativen können aufgezeigt werden, wenn eine Sanierung technisch nicht durchführbar ist?
- Sollte für gewisse Schadensfälle Monitored Natural Attenuation (MNA) unter genau festgelegten Randbedingungen zugelassen werden?

VEGAS muss sich auch mit der Frage des Recyclings von Bauschutt im Verkehrsbau beschäftigen. Jährlich fallen allein in Baden-Württemberg Tausende von Tonnen teilweise kontaminierter Bauschutt an. Methoden müssen gefunden werden, dieses Rohstoffpotential sinnvoll und ohne Umweltgefährdung zu nutzen.

Last, but not least muss sich auch VEGAS Fragen der Globalisierung stellen. Dazu gehört einerseits, dass hier entwickelte Technologien weltweit eingesetzt werden sollten und dass ein Technologietransfer in Schwellen- und Entwicklungsländer sowie EU-Beitrittsstaaten forciert werden muss. Gleichzeitig werden sich durch solche Aktivitäten neue Forschungsfelder aufzeigen. Man denke nur z.B. an Versalzungsprobleme bei der Bewässerung. Unter genau kontrollierten Bedingungen könnte hierzu in den VEGAS-Versuchsbehältern die Salzverlagerung in Abhängigkeit von der chemischen Zusammensetzung des Bewässerungswassers, sowie den Infiltrations- und Evapotranspi-

rationsraten ermittelt werden, um mittelfristig die oft pragmatischen und wasserintensiven Ansätze zu optimieren.

In den letzten Jahren hat sich VEGAS sowohl in Deutschland als auch international (z.B. in den USA oder Japan) einen guten Ruf erworben. Diesen Ruf gilt es in der nächsten Dekade zu festigen und auszubauen. Dabei wird und darf die „klassische“ Entwicklung von Sanierungstechnologien nur ein Standbein von vielen sein.

## 5 PERSPECTIVES ON GROUNDWATER REMEDIATION

Walter W. Kovalick, Jr., Ph.D., Linda D. Fiedler,  
U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC

### 5.1 Introduction

Twenty-five years ago, federal legislation – the Comprehensive Environmental Response, Compensation, and Liability Act (CERCLA) – created a national program to clean up about 1400 significant abandoned hazardous waste sites in the United States. Also known as Superfund, this law spurred the development of cleanup programs in all 50 states to respond to thousands of other sites. Subsequently, Congress created programs to deal with releases of contaminants from currently operating industrial facilities (similar to Superfund sites) and leaking underground tanks (primarily petroleum hydrocarbons). As of 2005, much progress has been made in cleaning up sites identified in the Superfund program. Remedy construction has been completed at over 900 sites.<sup>1</sup> Corrective action is completed for over 300,000 releases from leaking underground tanks.<sup>2</sup>

Groundwater contamination continues to be the most challenging aspect of remediating waste sites. Our knowledge of the complex hydrogeology of the subsurface, and how chemical releases behave, has vastly improved since the 1980s. In those early days, it was believed that most contamination was in the dissolved phase, and could be extracted and treated by pumping to the surface and conventional above-ground treatment processes. Now we know that at many sites, residual contamination, often in the form of nonaqueous phase liquid (NAPL), provides a continuous source groundwater contamination if not located and removed. Also, as detection levels for contaminants improve, additional contaminants that may be difficult to treat are being found at sites.

Over the past 10 years there have been significant advances in methods to characterize and clean up contaminated groundwater. Substantial improvements have been made in our ability to characterize heterogeneities in the subsurface, locate and delineate NAPLs, and define plume boundaries through the use of field sampling and analysis methods and new approaches (like the Triad approach). As alternatives and supplements to conventional pump-and-treat technology, new and improved chemical, physical, and biological technologies have been developed, demonstrated, and commercialized. Improved approaches to designing and optimizing pump-and-treat systems and monitoring networks are also being implemented. Emerging groundwater contaminants, (such as methyl tertiary butyl ether (MTBE), perchlorate, and 1,4-dioxane) also are driving the development, testing, and demonstration of new treatment techniques.

This paper provides a summary of the progress made in these areas of groundwater cleanup in the last decade. It also discusses promising new areas of technology development.

## 5.2 The Groundwater Cleanup Challenge

The ease with which groundwater can be remediated is often described in terms of the types of contaminants and the complexity of the hydrogeological setting. In 1994, the National Research Council (NRC) first published a table that graphically depicted the relative ease of cleaning up contaminated aquifers.<sup>3</sup> The NRC rated mobile, dissolved contaminants in homogenous, single layered geology as the easiest to remediate (“1” on a scale of “1” to “4”) and separate phase dense nonaqueous phase liquid (DNAPL) in fractured hydrogeology as the most difficult (“4”). DNAPL in other media were rated as a “3” or “4”, in terms of ease of cleanup.

A non-aqueous phase liquid (NAPL) is a chemical or mixture of chemicals that do not readily mix with water. In water, NAPLs form a separate liquid phase and do not readily dissolve. Dense NAPLs (DNAPLs) sink while light NAPLs (LNAPLs) float. DNAPLs include chemical compounds and mixtures with a wide range of chemical properties, including chlorinated solvents, creosote, coal tar, and polychlorinated biphenyls (PCBs). After a spill, DNAPLs migrate into the subsurface resulting in disconnected blobs of liquid referred to as “residual DNAPL”, and continuous distributions of DNAPL sometimes referred to as “pools”, which occupy pore spaces within soil or fractures in bedrock. Since DNAPLs, in particular, are only slightly soluble in water, DNAPL source zones can persist for many decades and, in some cases, for the foreseeable future.

The number of sites in the U.S. with DNAPL source zones is uncertain. However, in the early 1990s, the Superfund program reviewed existing site investigation data from a sample of 712 sites in order to estimate the extent of the DNAPL problem. Results were presented in a 1993 report, which concluded that *“...approximately 60% of all NPL sites exhibit a medium to high likelihood of having DNAPLs present as a source of subsurface contamination”*.<sup>4</sup>

Since the 1994 NRC study was published, technologies have been demonstrated to address DNAPL in all media, with varying levels of success. For instance, EPA has documented 61 demonstration or cleanup projects to address contamination in fractured bedrock; 18 of these projects involve suspected or confirmed DNAPL.<sup>5</sup> The ratings in the NRC table should thus be modified to reflect these advances in treatment, many of which are discussed below.

### 5.3 Groundwater Characterization

In the 1980s and early 1990s conventional sampling wells and sampling techniques, along with offsite laboratory analysis was the norm. The location of groundwater wells and depth of sampling was dependent on the historical knowledge of waste disposal areas and limited information on the aquifer characteristics. The number of wells was more dependent on budget than what was needed to fully assess the site contamination. With the availability of new field sampling and analysis capabilities, the ability now exists to locate many more wells, and to sample and analyze in the groundwater at multiple depths in the field. EPA recently published a report that summarized many of these approaches.<sup>6</sup>

Direct Push Technology (DPT) has in large part enabled the increase in sampling density and depth-discrete sampling and analysis. DPT consists of a vehicle-mounted drive source and small-diameter stainless steel probe that may be supplemented with auxiliary equipment. The probes are advanced into the ground to take depth-discrete samples and measurements along a vertical axis; multiple samples or measurements can be taken in a single push to generate vertical profiles of contamination. Some of the tools that can be used with DPT include the membrane interface probe for volatile contaminants, the conductivity probe, induced fluorescence for petroleum hydrocarbons, downhole thermal desorption with top-side analysis for volatile contaminants, and in-situ cameras. In addition to DPT, diffusion sampling and in-situ groundwater sampling techniques allow more representative sampling of groundwater. Hydrophobic dyes, DNAPL partitioning tests, optical televiewer, and soil gas profiling, together with DPT-mounted techniques and in situ groundwater sampling, can help locate and quantify DNAPLs.

Geophysical methods can be used to survey large areas or to describe small-scale conditions such as those in and around borehole walls. On either scale, these methods measure the physical properties of subsurface materials. Any changes in measurements are interpreted to indicate changes in the subsurface matrix (solids and/or fluids). Geophysical methods include single borehole methods (e.g., acoustic televiewer, electromagnetic induction, gamma-gamma, natural gamma, neutron, and resistivity) which provide a profile of changes in specific properties of the soil/rock matrix and fluid chemistry surrounding a borehole. Electrical methods measure the electrical resistance or conductance of the subsurface by transmitting a current between electrodes placed at, or into, the ground surface. Electromagnetic methods measure changes in the bulk subsurface electrical conductivity due to changes in subsurface conductive features. Ground penetrating radar and magnetics can be used to find conducting bodies, such as drums, in the subsurface.

Many of these methods allow the generation of data in the field, which can be processed through computer-based decision support tools to update the conceptual site

model (CSM) in the field. Sampling efforts and analytical methods can be adjusted interactively as the CSM is updated so that the plume and contaminant sources, such as DNAPLs, can be delineated in one mobilization, decreasing the time and expense of a groundwater investigation. This approach – using dynamic field strategies and real-time measurement – are two legs of the previously mentioned Triad approach, an improved strategy for characterizing waste sites. The third leg is the upfront systematic planning which ensures that the data obtained in the field program support the decisions that need to be made for the site. Improved site assessment methods, together with the Triad approach, represent considerably more reliable approaches to delineating the groundwater problem than existed 10-20 years ago. More information on the Triad approach and field methods can be found at <http://www.triadcentral.org> and <http://fate.cluin.org>.

#### **5.4 Advancing Use of Sensors in Monitoring Systems**

New sensors are being developed and used to characterize, monitor, and automate aspects of site assessment and cleanup. In fall 2005, EPA plans to publish a report on the use of sensors and related systems to facilitate site cleanup. The report provides seven case studies on projects that illustrate their use in site characterization, monitoring, and process automation.<sup>7</sup>

These systems can consist of a number of different components, including mechanical, electronic, and analytical (chemical) sensors along with their associated control systems, telemetry systems, and software. Control systems that work in conjunction with sensors include programmable logic controllers (PLCs) and other electronic microprocessor devices. Control systems are able to receive sensory inputs, process information, and trigger specific actions. These components may be used alone or together to form relatively simple or highly complex systems. When properly applied, such systems can provide long-term benefits for remediation projects by reducing manpower requirements, reducing analytical costs, and generating information that facilitates process optimization.

Sensors used in characterization are typically used to measure environmental parameters. A membrane interface probe may be used to detect and locate subsurface contamination; an electrochemical probe to measure groundwater parameters such as pH; and a thermometer to measure sample temperature. Sensors in monitoring are used to measure both environmental and systemic parameters. An anemometer may be used to measure wind velocity at a site; a water-level sensor to measure long term fluctuations in groundwater elevation; and a flow meter to monitor flow through a pipe.

Telemetry systems facilitate system control or data acquisition from remote locations. They can be radio or telephone based. When sensors are automated, they can be used to measure parameters necessary for proper system operation (e.g., water levels in

wells and tanks, temperature, pressure drop, flow rate, and effluent concentration). These parameters are then used by microprocessor devices such as PLCs to make operational decisions, including starting up or shutting down components of the remediation system.

## **5.5 Increasing Use of In Situ Approaches to Groundwater Treatment**

Technologies to remediate groundwater have advanced well beyond pump-and-treat technology in the past 10 years, particularly with respect to treatment in place. The selection and use of groundwater remediation technologies in the Superfund program provides a measure of their commercial availability and acceptability in the marketplace. EPA tracks the use of treatment technologies at Superfund sites.<sup>8</sup> An analysis of Records of Decision (RODs) signed in 1991 shows that 90% of RODs signed that addressed groundwater included pump-and-treat technology, and only 5% included in situ groundwater treatment. By contrast, in 2002, 40% of groundwater remedies were pump-and-treat and 24% were in situ treatment.

### **5.5.1 Permeable Reactive Barriers**

Since the first commercial full-scale permeable reactive barrier (PRB) in California in 1994, the technology has continued to gain acceptance as an effective groundwater remediation strategy to intercept plumes in the subsurface and subsequently remediate them. PRBs are often used instead of pump-and-treat systems, but unlike pump-and-treat, they are passive, and rely on natural attenuation processes to reduce plume concentrations. Zero valent iron (ZVI) continues to be the most common material used in PRBs. The reducing capabilities of ZVI can dechlorinate chemicals such as trichloroethylene (TCE), perchloroethylene (PCE), chlorinated pesticides, and polychlorinated biphenyls (PCBs).

ZVI can reduce Cr(VI) to Cr(III), as well, precipitating it out of solution thus immobilizing it as chromium (III) hydroxides or chromium-iron hydroxide solid solutions.<sup>9</sup>

There are more than 100 deployments of the technology worldwide, primarily in the U.S., but also in Australia, Canada, Europe, and Japan. Fifteen to 20 new PRBs are installed each year. PRB design and installation practices have changed somewhat over time. Over the last 5 to 6 years, designers have moved away from funnel-and-gate designs and toward continuous walls. There has also been a shift in construction methods: while cofferdam and continuous trenching enjoyed popularity between 1995 and 1998, injection-type methods (e.g., hydrofracturing, biopolymer columns, and jetting) have been used more recently. Injection-type methods are often more cost effective than other techniques, and are capable of emplacing reactive materials at greater depths (the maximum depth of conventional trenching is about 70 ft.).<sup>10</sup>

Much research has been conducted to examine mineral precipitates' impact on ZVI PRB performance. While precipitate build-up has been observed in the field, there is no indication that these precipitates reduce PRB reactivity to the point of necessitating rejuvenation or iron replacement. The studies conclude that most PRBs will function for at least 10 to 15 years before they require refurbishing.<sup>11</sup> Hydraulic issues are typically to blame when a PRB exhibits inadequate performance. These problems can be caused by sewer lines that influence flow, construction artefacts that impede flow, bypass around the system, and insufficient residence time. Construction methods for PRB installation have improved, and this has reduced the frequency of problems.<sup>9</sup>

Although zero valent iron (ZVI) is the predominant treatment medium, there is an increasing use of other materials contingent upon the chemical composition of the contaminant plume. Walls containing apatite, compost, limestone and sulfate-reducing bacteria have recently been installed and the variants of ZVI (nanoscale, microscale, and atomized) are being demonstrated.<sup>9</sup>

### 5.5.2 Bioremediation

The science of bioremediation, which principally involves the use of bacteria to degrade (metabolize) organic chemicals, has advanced significantly in the past 10 years. In the 1980s and early 1990s, bioremediation was more commonly applied to wood preserving sites with creosote and pentachlorophenol, and to petroleum hydrocarbons found in fuel oil, diesel, and gasoline. Chlorinated compounds, such as TCE and PCE, were thought to be resistant to biodegradation. Bioremediation of chlorinated solvents, and what is now known to be their biodegradation products (e.g., 1,2-dichloroethene, vinyl chloride), has become much more common as the biodegradation mechanisms and ways to augment them, have become better understood. Bioremediation techniques enhance the activity of the microorganisms and subsequent contaminant degradation through the use of nutrients, oxygen, co-substrates, alternative electron donors, or supplemental bacteria. The process of biodegrading chlorinated solvents is anaerobic (without oxygen) and is called reductive dechlorination. If the necessary microbes are not present in sufficient quantity at a site, bioaugmentation with non-native bacteria grown from other sites is often successful. In 1999 the first successful bioaugmentation for reductive dechlorination was demonstrated at the Hill Air Force Base, DE site, under the Bioremediation Consortium of the Remediation Technologies Development Forum (RTDF), a public-private partnership of industry, EPA, and other federal agencies.<sup>12</sup>

Bioremediation is also effective at remediating several contaminants that have emerged as major threats to groundwater and drinking water. Methyl tertiary butyl ether (MTBE), an oxygen and octane enhancer used in gasoline in many parts of the U.S. for the past 15 years. MTBE contamination is a major concern because it's low taste and odor threshold (5-10 ppb) which renders water undrinkable, and its high solubility and mobility in groundwater. In situ bioremediation has been used at many sites to ad-

dress MTBE.<sup>13</sup> A recent report also documented several full-scale and 10 pilot-scale projects for in situ bioremediation of perchlorate.<sup>14</sup> The most common use for ammonium perchlorate is in explosives and rocket propellant, and, like MTBE, it is highly soluble and mobile in groundwater.

In the Superfund program, there are 44 projects involving bioremediation to address groundwater in situ. Of these, 5 are completed and 21 are operational. The most common types of contaminants at these sites are chlorinated volatile organic compounds (VOCs) (24 projects), BTEX (benzene, toluene, ethylbenzene, and xylene) compounds (16), polyaromatic hydrocarbons (PAHs) (16), and pesticides and herbicides (7). Increasingly, bioremediation is being selected for chlorinated VOC sites. Of the 24 projects using bioremediation to treat chlorinated VOCs, 16 were selected recently in fiscal years 2000-2002 (the latest year for which data are available).<sup>15</sup>

### 5.5.3 Phytoremediation

In the last decade there has been considerable interest in the use of plants to destroy, remove, or immobilize contaminants in soil and groundwater. Studies during that time have shown modest success in applications to metals and harder to degrade organic compounds, such as PAHs and pesticides. One application that has become popular in the last several years is the use of trees as a solar-driven natural pump-and-treat system to control the migration of and remove chlorinated solvents from groundwater. Poplars and cottonwoods are promising trees for this application because they extend their roots to the water table and pump from the saturated zone. They also are fast-growing (3-5 meters/ year). Early projects include Carswell Air Force Base, TX, where in 1996 almost 700 cottonwood trees were planted to clean up shallow TCE-contaminated groundwater. A recent study of current field-scale phytoremediation projects analyzed a subset of 80 phytoremediation projects in the U.S. for which data were available.<sup>16</sup> Of these over half involved the use trees for hydraulic control and/or contaminant removal from groundwater. Most of the projects were planted in the last 10 years.

EPA is working with other public and private partners in the Remediation Technologies Development Forum (RTDF) Phytoremediation Action Team to demonstrate three important phytoremediation applications, including the use of trees for plume control. The group recently published a protocol for evaluating the applicability and performance of phytoremediation for managing chlorinated solvents in soil and groundwater.<sup>17</sup>

In the Superfund program there are 12 projects to address groundwater using phytoremediation. Six are operational, one is completed and the remainders are in design.

The technology is being applied to chlorinated VOCs, BTEX, chlorinated pesticides, radionuclides (cesium-137), and inorganics (cadmium, chromium, mercury, nickel, silver, and zinc).

#### 5.5.4 In Situ Chemical Oxidation

Several in situ methods have been developed to address DNAPL sources of groundwater contamination. DNAPLs require the use of more aggressive physical and chemical treatment to be removed or destroyed. In situ treatment technologies used to address DNAPL include in situ thermal, chemical oxidation, and surfactant/co-solvent flushing. Recently, bioremediation is also being applied to smaller residual source areas

Only since 1997 have guidance documents been written on the use of oxidants to destroy organic contaminants in ground water or soils in situ. But interest has grown rapidly, and there are presently hundreds of documented applications. In the early 1990's research focused on hydrogen peroxide and Fenton's reagent but gradually interest has grown in potassium or sodium permanganate and ozone. In situ chemical oxidation (ISCO) provides many benefits as a remediation technology. First, there are a number of oxidants and delivery techniques available from many companies and, as a result, the technology is readily available and can be altered to address many different situations. In addition, the oxidants produce rapid reactions with a wide variety of common organic contaminants of concern including BTEX compounds, PAHs of various types, chlorinated solvents, MTBE, and some of the energetics such as TNT and HMX. The speed of the reaction also allows ISCO to be used to facilitate or enhance other remediation techniques such as bioremediation or surfactant flushing. A final reason for a strong interest in ISCO is that it can be used for rapid cleanup to facilitate property sales.

In recent years, most consultants recognize that the application of an oxidant, particularly powerful ones that react quickly, will be iterative and two or even three injections should be planned. In complex geology, where the source area is not completely delineated, direct push injection is becoming more favored than permanently-located injection wells. DP wells provide the flexibility to respond more accurately to rebound areas. Also, sodium or potassium permanganate, which reacts slowly and lasts longer than other oxidants, is being used more often in treatment zones to intercept groundwater contaminant plumes. An update on recent trends in the use of ISCO recently became available.<sup>18</sup>

#### 5.5.5 In Situ Thermal Treatment

High-temperature methods to destroy or volatilize contaminants in situ have been used since the 1990's. Four types of in situ thermal treatment are currently commercially available: Steam Enhanced Extraction (SEE), Electrical Resistance Heating (ERH), Thermal Conductive Heating (TCH), and Radio Frequency Heating (RF). A recent report summarizes these methods, and their application to chlorinated solvents.<sup>19</sup>

SEE was adapted from oil field applications to address hazardous site contamination, and involves the injection of steam (at 100°C) into the subsurface to dissolve, vaporize, and mobilize contaminants that are then recovered and treated aboveground. The tech-

nology has been used to address petroleum hydrocarbons, creosote, pentachlorophenol, and chlorinated solvents. EPA has documented 36 applications of this technology.<sup>20</sup> It is currently being used at a former wood treating site at the Port of Ridgefield, WA, and has been selected in Records of Decision at several other wood treating Superfund sites. The first full-scale use of SEE at a Superfund site occurred in the late 1990's to address significant creosote and pentachlorophenol contamination at an electric utility site. A pump-and-treat system had been in operation at the site since 1976 at a cost of \$1M/year. The three-year SEE effort resulted in recovery of over 1.3M pounds of contaminants from as deep as 135 feet. It was estimated that the pump-and-treat system would have required 3500 years to remove a similar amount of contamination.

ERH was developed to augment the capability of Soil Vapor Extraction (SVE) to recover chlorinated VOCs, particularly in low permeability strata where SVE alone cannot achieve necessary advective flow. ERH is also generally limited to temperatures around 100° C and is thus most suitable for VOCs. It involves the application of electrical current using electrodes through the subsurface, which boils pore water, converting it to steam. The steam strips contaminants for extraction and treatment at the surface. ERH has been applied at least 30 petroleum hydrocarbon and chlorinated VOC sites.

TCH was originally developed to address PCB contamination. It usually heats the subsurface with an array of vertical heater/vacuum wells, then extracts contaminants for treatment. Numerous PCB projects of various sizes were completed using either the thermal blanket or thermal well configurations. Fifteen projects have been identified.<sup>20</sup> TCH can achieve subsurface temperatures >500°C; however, at sites with appreciable water, dewatering, diversion or water boil off must occur before higher temperatures can be reached. In addition to its application to chlorinated VOCs, TCH is currently being applied to several sites with creosote, pentachlorophenol, and coal tar.

RF has seen less use than other in situ thermal processes due in part to application limitations in saturated conditions. RF heat is transmitted to the soil through electrodes or applicators. A recent application to address solvent contamination in fractured media suggests that this may be an appropriate niche for this technology.

### **5.5.6 In Situ Surfactant/Co-Solvent Flushing**

These technologies are used to solubilize contaminants, particularly NAPLs, so that they can be recovered and treated at the surface. Surfactant-enhanced aquifer remediation (SEAR) involves the injection of surfactants into the subsurface to increase the solubility of the DNAPL through micellar solubilization. Co-solvent flushing enhances mobilization and solubilization using solvents, such as ethanol, methanol, and isopropanol. When the alcohol partitions into the DNAPL, it reduces interfacial tension, and increases the contaminant's solubility.<sup>21</sup> Currently these technologies are primarily being used in conjunction with other techniques, such as bioremediation, to make contaminants more available for subsequent in situ treatment methods.<sup>22</sup>

## 5.6 Pump-and-Treat and Groundwater Monitoring Optimization

Although in situ treatment is being used increasingly to address groundwater contamination, pump-and-treat systems have been selected or used at over 700 Superfund sites. To ensure that these systems are operated cost-effectively, in 2000 EPA initiated a program to evaluate and optimize their operation<sup>23</sup>, and finalized the program in 2004<sup>24</sup>. The program has conducted 30 remedial system evaluations (RSE) and issued guidance on improved design, operation, and maintenance.<sup>25</sup>

Long-term monitoring is a continuing program investment that is necessary to monitor plume capture and treatment progress as part of pump-and-treat systems, and the protectiveness of monitored natural attenuation and containment remedies for wastes left in place at sites. In 2001, recognizing that long-term monitoring optimization (LTMO) methods showed promise for reducing costs at sites, EPA initiated a program to encourage the use of these innovative methods at Superfund sites, sought out information on LTMO tools, sponsored a project to showcase their applicability and effectiveness at three unique sites, and subsequently prepared a general guide to their use.<sup>26</sup> EPA is continuing to seek additional pilot sites to showcase the application of LTMO, as well as offer technical assistance and training to assure broader understanding and use of these techniques.

## 5.7 New Frontiers

Several recent studies highlight the lack of performance data concerning the effectiveness of DNAPL treatment technologies, in particular their impact on the concentration and extent of plumes.<sup>27, 28</sup> The outstanding question is how to measure the benefits of partial depletion of the DNAPL source zone, since it is believed that in many cases available technology cannot remove all of the source. Mass flux is a new method being tested to measure reductions in the rate at which DNAPL is dissolving in the groundwater. It is hoped that the rate of mass flux can be tied to reductions in plume size and concentrations.<sup>29</sup>

In addition to the available technologies discussed earlier, two promising new technologies to address DNAPL are being explored: in situ bioremediation and nanotechnology. Studies have shown that microbes survive and degrade chlorinated solvents very close to some DNAPL source zones and that certain substrates appear to increase the rate of dissolution of the DNAPL into the aqueous phase, where the microbes can metabolize it. In some cases, such as when DNAPL is present as ganglia (rather than pools) this treatment may be sufficient to address the source area. In situ bioremediation is also being studied as a polishing step to in situ thermal, chemical oxidation, and surfactant/co-solvent treatment of chlorinated solvent source zones.

Another promising technology to treat source areas is nanotechnology, specifically nanosized zero valent iron and its derivatives. Nanosized ZVI has an extremely high

surface area and surface reactivity compared with granular forms. These features enable the nanoparticles to remediate more material, at a higher rate, and with a lower generation of hazardous by products. The ability of the nanoparticles to act as strong reducers also enables the remediation of an extremely wide range of contaminants. Nanoscale ZVI is available commercially, and has been applied to chlorinated solvents and chromium VI at a minimum of 15 sites. Emulsified zero valent iron (EZVI), a mixture of nanoscale ZVI and surfactant, has been tested at one site; this material is miscible with DNAPL, and allows the DNAPL to dissolve into the emulsified ZVI and subsequently be reduced.<sup>30</sup>

## 5.8 Conclusions

In the last decade, researchers and practitioners continue to refine and develop new methods for assessing and cleaning up contaminated groundwater. An increasing number of field methods and approaches have enhanced the ability to delineate site contamination so that selected remedies can be effectively selected and applied. A wide range of new and refined in situ treatment technologies have become available using biological, chemically, and physical techniques, and combining them in more cost-effective ways. Given these recent trends in technology development and deployment, it is expected that in another 10-years time, much progress will be made in refining approaches to cleaning up the remaining cleanup challenges, such as DNAPLs.

## 5.9 Additional Information

Several EPA websites provide additional information on the programs and technologies described in this paper.

- Clean-Up Information (CLU-IN) Homepage. The “CLU-IN” Homepage is a website that contains a variety of information about site remediation that is accessible in computer files or databases (<http://clu.in.org>). The CLU-IN homepage also links to related web sites, such as the Interstate Technology and Regulatory Council (ITRC) homepage at <http://www.itrcweb.org>. This site contains recent information on the development of innovative technologies to remediate waste sites. Another link is to EPA REACHIT at <http://www.epareachit.org>, a database on vendors and applications of site characterization and remediation technologies.
- TechDirect. TechDirect is a monthly e-mail service to keep subscribers abreast of new EPA and other government and nonprofit organization publications and events of interest to site remediation and site characterization professionals. To subscribe, go to <http://clu.in.org/techdirect>.

- Federal Remediation Technologies Roundtable (FRTR) Homepage. This homepage, at <[www.frtr.gov](http://www.frtr.gov)>, contains products developed jointly by member federal agencies, including remediation case studies and a collection of technology assessment reports.

The authors gratefully acknowledge the assistance of Richard Steimle, James Cummings, Ellen Rubin, Katherine Watlington, and Lisa Moretti in the preparation of this paper.

## 5.10 References

1. U.S.EPA. NPL Site Status Information. August 2005. <<http://www.epa.gov/superfund/sites/npl/status.htm>>
2. U.S.EPA. FY 2005 Semi-Annual Mid-Year Activity Report. June 2, 2005. <[http://www.epa.gov/oust/cat/ca\\_05\\_12.pdf](http://www.epa.gov/oust/cat/ca_05_12.pdf)>
3. National Research Council. Alternatives for Ground Water Cleanup. National Academy Press, 1994. <<http://books.nap.edu/catalog/2311.html>>
4. U.S.EPA. Evaluation of the Likelihood of DNAPL Presence at NPL Sites, National Results, Office of Solid Waste and Emergency Response (OSWER), Publication 9355.4-13, EPA/540-R-93-073, September 1993. <<http://www.epa.gov/superfund/resources/remedy/pdf/540r-93073-s.pdf>>
5. U.S.EPA. Fractured Bedrock Focus Area. <<http://www.cluin.org/fracrock>>
6. U.S.EPA. Site Characterization Technologies for DNAPL Investigations. EPA 542-R-04-017. 2004. <<http://www.clu-in.org/download/char/542r04017.pdf>>
7. U.S.EPA. Sensor Technologies Used During Site Remediation Activities – Selected Experiences, EPA 542-R-05-007, Draft. July 2005. Will be <<http://www.clu-in.org/techpubs.htm>>
8. U.S.EPA. Treatment Technologies for Site Cleanup: Annual Status Report (Eleventh Edition). EPA 542-R-03-009. February 2004. <[http://www.clu-in.org/download/remed/asr/11/main\\_body.pdf](http://www.clu-in.org/download/remed/asr/11/main_body.pdf)>
9. U.S.EPA. Capstone Report on the Application, Monitoring, and Performance of Permeable Reactive Barriers for Ground-Water Remediation. Volume I. August 2003. <<http://www.frtr.gov/multisitereports.htm>>
10. ITRC. Permeable Reactive Barriers: Lessons Learned/New Directions. 2005. Interstate Technology and Regulatory Cooperation Work Group (ITRC). <<http://www.itrcweb.org/Documents/PRB-4.pdf>>
11. ESTCP. Evaluating the Longevity and Hydraulic Performance of Permeable Reactive Barriers at Department of Defense Sites. ESTCP Cost and Performance Report. 2003. U.S. DoD, Environmental Security Technology Certification Program, Project CU-9907. <<http://www.estcp.org/documents/techdocs/index.cfm>>

12. Major, D. et al. Field Demonstration of Successful Bioaugmentation to Achieve Dechlorination of Tetrachloroethene to Ethene , Environmental Science and Technology, Vol. 36, No. 23, 2002.
13. U.S.EPA. Technologies to Treat MtBE and Other Fuel Oxygenates. May 2004. <<http://www.clu-in.org/download/remed/542r04009/542r04009.pdf>>
14. U.S.EPA. Perchlorate Treatment Update. EPA 542-R-05-015. May 2005. <<http://www.clu-in.org/download/remed/542-r-05-015.pdf>>
15. U.S.EPA. Annual Status Report Remediation Database. August 2005. <<http://cfpub.epa.gov/asr/>>
16. U.S.EPA. Use of Field-Scale Phytotechnology for Chlorinate Solvents, Metals, Explosives and Propellants, and Pesticides. EPA 542-R-05-002. April 2005. <<http://clu-in.org/download/remed/542-r-05-002.pdf>>
17. Remediation Technology Development Forum. Evaluation of Phytoremediation for Management of Chlorinated Solvents in Soil and Groundwater, January 2005, EPA 542-R-05-001. <[http://www.rtdf.org/public/phyto/chlor\\_solv\\_management.pdf](http://www.rtdf.org/public/phyto/chlor_solv_management.pdf)>
18. Interstate Technology and Regulatory Council (ITRC). Technical and Regulatory Guidance for in Situ Chemical Oxidation of Contaminated Soil and Groundwater, Second Edition. ITRC. January 2005. <<http://www.itrcweb.org/Documents/ISCO-2.pdf>>
19. U.S.EPA. In Situ Thermal Treatment of Chlorinated Solvents: Fundamentals and Field Applications. EPA 542-R-04-010. March 2004. <<http://www.clu-in.org/download/remed/epa542r04010.pdf>>
20. U.S.EPA. In Situ Thermal Treatment Site Profile Database. August 2005. <http://clu-in.org/products/thermal/>>
21. ITRC. Technical and Regulatory Guidance for Surfactant/Co-Solvent Flushing of DNAPL Source Zones. DNAPLS-3. April 2003. <<http://www.itrcweb.org>>
22. Moretti, L. Bioremediation of DNAPL Source Zones. Prepared under USEPA National Network of Environmental Management Studies Program. August 2005. <<http://www.clu-in.org/studentpapers/>>
23. U.S.EPA. Superfund Reform Strategy, Implementation Memorandum: Optimization of Fund-lead Ground Water Pump and Treat (P&T) Systems. OSWER 9283.1-13, October 31, 2000. <<http://www.epa.gov/superfund/programs/reforms/docs/implem.pdf>>
24. U.S.EPA. Action Plan for Ground Water Remedy Optimization. OSWER 9283.1-25. August 25, 2004. [http://www.clu-in.org/download/remed/hyopt/guidance/general\\_guidance/final\\_action\\_plan.pdf](http://www.clu-in.org/download/remed/hyopt/guidance/general_guidance/final_action_plan.pdf)>

25. U.S.EPA. Technology Focus: Remediation Optimization. <<http://www.cluin.org/optimization>>
26. U.S.EPA. Roadmap to Long-Term Monitoring Optimization. EPA542-R-05-003. June 2005. <<http://clu.in.org/download/char/542-r-05-003.pdf>>
27. U.S.EPA. The DNAPL Remediation Challenge: Is There a Case for Source Depletion? EPA/600/R-03/143. March 2004. <http://www.epa.gov/ada/pubs/reports.html>
28. NRC. Contaminants in the Subsurface: Source Zone Assessment and Remediation. 2004. <<http://books.nap.edu/books/030909447X/html/index.html>>
29. ITRC. Strategies for Monitoring the Performance of DNAPL Source Zone Remedies. DNAPLs-5. August 2004. < [http://www.itrcweb.org/gd\\_DNAPLs.asp](http://www.itrcweb.org/gd_DNAPLs.asp)>
30. Bronstein, K. Emerging Nanotechnologies for Site Remediation and Wastewater Treatment. Prepared under USEPA National Network of Environmental Management Studies Program. August 2005. <http://www.cluin.org/studentpapers/>

## 6 ANWENDUNG VON MIKROEMULSIONEN ZUR IN-SITU-SANIERUNG ORGANISCHER UNTERGRUNDKONTAMINATIONEN

Günter Subklew, Franz-Hubert Haegel, Julia Ulrich, Leander Fürst, Agnes Höltkemeier,  
Forschungszentrum Jülich GmbH

Baldur Barczewski, Matthias Stuhmann, Birgit Memminger, Genia Tkachenko, Ralf Philippin,  
VEGAS, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart

Frank Seitz, Thilo Schenk, Eberhard Kohlmeier, IBL Umwelt- und Biotechnik GmbH, Heidelberg

Heico Schell, Michael Stieber, Andreas Tiehm, DVGW-Technologiezentrum Wasser, Karlsruhe

### 6.1 Einleitung

In dem Projektverbund **Anwendung von Mikroemulsionen zur in-situ-Sanierung organischer Untergrundkontaminationen** verfolgten die Partner das Ziel, die wissenschaftlich-technischen Voraussetzungen für die in-situ-Sanierung von DNAPL-Schadensherden in Grundwasserleitern unter Anwendung von Mikroemulsionen zu erarbeiten.

Zur Erprobung des Verfahrens waren – neben begleitenden Laborarbeiten – Feldexperimente am Versuchsstandort Eppelheim der Landesanstalt für Umweltschutz des Landes Baden-Württemberg (LfU) geplant, um Hinweise auf das Verhalten von Mikroemulsionen in Grundwasserleitern unter möglichst realitätsnahen Bedingungen zu erhalten. Im Technikum bei VEGAS fanden großskalige Versuche statt, in denen unterschiedliche Brunnenanordnungen erprobt wurden und die vor allem auch die Möglichkeit boten, alle Stoffflüsse im „Aquifer“ optisch zu verfolgen.

### 6.2 Ergebnisse

In den Versuchen des Projektverbundes auf den verschiedenen Skalen vom Labormaßstab bis zum Versuch am Feldstandort Eppelheim haben sich Mikroemulsionen als Medien mit hohem Vermögen für die Schadstoffsolubilisierung und -extraktion aus mit Tetrachlorethen (Perchloroethylen; PER) hoch kontaminierten Bereichen der gesättigten Zone erwiesen. Dabei wurden die wesentlichen Ergebnisse in folgenden Bereichen erzielt:

- Verhalten der Mikroemulsion im Boden
- Berechenbarkeit und Skalierbarkeit des Fließens der Mikroemulsion im Aquifermaterial

- Ausarbeitung und Optimierung der einzelnen Schritte des Verfahrens im Hinblick auf eine Feldanwendung
- Biologische Prozesse und biologische Nachsorge
- Verbesserung der Wirtschaftlichkeit.

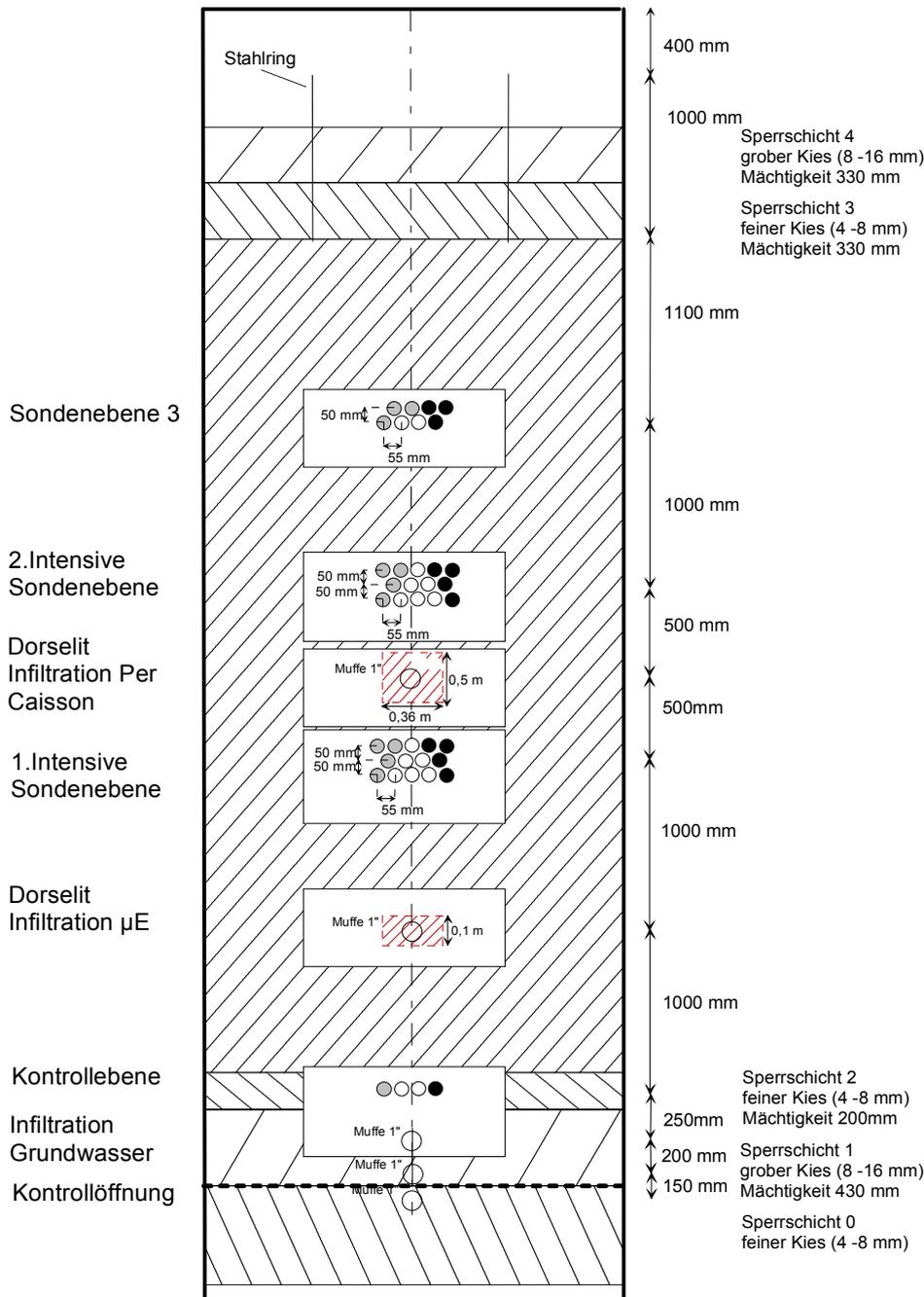
Im Laufe der Projektarbeiten stellte sich heraus, dass das Fließverhalten der Mikroemulsion und die Prozesse der Schadstoffaufnahme im Maßstab von mehreren Kubikmetern nur bedingt mit Ergebnissen aus kleinskaligen Versuchen vergleichbar sind. Diese Erkenntnis, zu der die Ergebnisse des Feldversuchs entscheidend beitrugen, ermöglichte letztlich die erfolgreiche Durchführung eines großskaligen Experimentes im VEGAS-Technikum, in dessen Verlauf über 90 % des Schadstoffs PER aus dem künstlichen Grundwasserleiter entfernt werden konnten.

Die Restkonzentrationen des Schadstoffs und der im Boden verbliebenen Mikroemulsionskomponenten erlaubten eine Beseitigung dieser Fremdstoffe im Rahmen einer biologischen Nachsorge. Gerade in den Bereichen der höchsten Restkonzentrationen an PER und Rapsmethylester (RME) trat im Versuchsbehälter biologische Aktivität auf. Dies korrespondiert mit Ergebnissen aus Laborversuchen und aus dem Versuch am Feldstandort. Ein Versuch mit Bodenproben aus dem Rinnenexperiment mit kurzer Fließstrecke im VEGAS-Technikum konnte einen co-metabolischen Abbau von PER durch die Mikroemulsionskomponenten belegen.

Für die Aufbereitung des Abwassers und die Rückgewinnung der Mikroemulsionskomponenten wurden Verfahrensweisen ausgearbeitet, die mit geringem Aufwand durchgeführt werden können.

### 6.2.1 Feldexperiment

Das Feldexperiment am Standort Eppelheim (Abb. 6.1) lieferte trotz des nicht zufriedenstellenden Austrags von Schadstoff und Mikroemulsionskomponenten wichtige Hinweise auf das Fließverhalten der Mikroemulsion und die Schadstoffaufnahme, die im weiteren Verlauf des Projektverbundes wesentlich zum Gelingen der großskaligen Untersuchungen im VEGAS-Technikum beitrugen.



**Abb. 6.1: Aufbau der Versuchssäule am Feldstandort Eppelheim**

Für den unzureichenden Austrag an PER und Rapsmethylester war im Wesentlichen die für die vorgesehene Fließstrecke zu knapp bemessene Menge an infiltrierter Mikroemulsion verantwortlich. Bei einer Dispersion der Mikroemulsion, wie sie in Laborversuchen vorher beobachtet worden war, wäre die infiltrierte Menge ausreichend gewesen, um am Schadstoffherd noch weitestgehend als Phase vorzuliegen und den Schadstoff komplett aufzunehmen. Die Ergebnisse der Sonden zwischen der Infiltrationsstelle und dem Schadstoffherd bestätigten auch dieses erwartete Verhalten. Ebenso lag die Zeit des Durchtritts durch die erste Sondenebene im erwarteten Bereich. Allerdings zeigte sich, dass die Dispersion der Mikroemulsion in der Versuchssäule in

Eppelheim stärker ausgeprägt war als in kleinskaligen Laborversuchen. Dies führte zu einem schnelleren Verlust der Phasenkohärenz der Mikroemulsion, so dass sie oberhalb der Schadstoffquelle nicht mehr als Mikroemulsionskörper bewegt werden konnte. Der Austrag erfolgte deshalb nur noch in Form einer Emulsion. Aus der deutlichen Zunahme der Kontaktfläche zwischen Mikroemulsion und Wasser resultierte auch eine starke Auslaugung der wasserlöslichen Komponenten aus der Mikroemulsion, womit ein Verlust ihrer günstigen Fließeigenschaften, die im Wesentlichen auf der guten Benetzung des Bodens beruhen, einhergeht. Letztlich verblieben dadurch bei dem Versuch am Feldstandort große Mengen an Rapsmethylester im Boden, in denen der Schadstoff gelöst vorlag.

Zudem hat sich der Verzicht auf die fokussierende Wirkung eines Absaugbrunnens oberhalb der Kontamination wahrscheinlich als nachteilig erwiesen. Dass bei geringeren Fließstrecken eine Extraktion der schadstoffangereicherten Mikroemulsion möglich ist, konnte in der großen Rinne des VEGAS-Technikums deutlich gezeigt werden. Hier wurde sogar eine größere Schadstoffmenge mit einer geringeren Mikroemulsionsmenge als bei dem Versuch in Eppelheim weitgehend aus dem Bodenmaterial entfernt. Die Fließstrecke betrug in diesem Fall allerdings nur etwa 1 m im Gegensatz zu 4,5 m Fließstrecke am Feldstandort. Außerdem wurde in VEGAS die fokussierende Wirkung eines Absaugbrunnens genutzt. Aus den Daten der Sonden in Eppelheim lässt sich schließen, dass bei Verwendung eines Absaugbrunnens unmittelbar oberhalb der Kontamination die Mikroemulsion weitgehend als Phase hätte extrahiert werden können, da in der entsprechenden Sondenebene auf jeden Fall noch Mikroemulsion angekommen war.

Während des Versuchs war in der Säule kurzzeitig auch unterhalb der Quelle Schadstoff beobachtet worden. Dies ist darauf zurück zu führen, dass lokal kurzfristig so hohe Konzentrationen an PER in der Mikroemulsion auftraten, dass deren Dichte über diejenige von Wasser anstieg und somit ein Absinken des Schadstoffs erfolgte. Diese schadstoffbelastete Mikroemulsion wurde aber durch nachdrängende Mikroemulsion wieder nach oben bewegt. Eine Mobilisierung in Phase nach unten trat somit nicht auf. Insbesondere wurden während des laufenden Versuchs in der Kontrollsondenebene im untersten Bereich der Säule zu keinem Zeitpunkt erhöhte PER-Werte gemessen.

Die Ergebnisse der biologischen Untersuchungen zur Begleitung und Nachsorge am Feldstandort können uneingeschränkt als erfolgreich bewertet werden. Aus dem relativ späten Abbau der Mikroemulsion mit Sulfat als Elektronenakzeptor und unter methanogenen Milieubedingungen lässt sich die für den Feldeinsatz erforderliche Stabilität der Mikroemulsion nachweisen. Unter vergleichbaren Feldbedingungen wäre eine Störung der Extraktionsphase durch die vom Umsatz her bedeutendsten mikrobiellen Redoxprozesse innerhalb von drei Monaten unwahrscheinlich. Weiterhin wurde die reduktive Dechlorierung von PER durch die Mikroemulsionsbestandteile stimuliert. Dieser

Befund ist für die Konzeption einer biologischen Nachsorge für den Feldeinsatz von großer Bedeutung.

### 6.2.2 Großskaliges Rinnenexperiment mit vier Schräg-Infiltrationsbrunnen

Für das Experiment wurde die große VEGAS-Rinne (6 m Länge, 1 m Breite und 3 m Höhe) verwandt (Abb. 6.2) Durch die einseitige Verglasung konnte der zu sanierende „Aquifer“ auf der gesamten Länge eingesehen werden. Als unterste Schicht wurde Ton mit 1 % Gefälle in Richtung des Grundablasses eingebaut. Anschließend erfolgte die Installation der Edelstahlwand zur Reduzierung der Breite. An den Seiten wurden 50 cm lange Kiesbereiche für eine gleichmäßige Wassergrundströmung im gesamten Aquiferbereich geschaffen und für den Aquifer wurde Feinsand mit Schwemmkornanteilen verwandt. Aufgrund der Breite des Versuchsstandes (50 cm) entschied man sich, jeweils zwei Schräg-Infiltrationsbrunnen pro Seite zu rammen. Auf diese Weise sollte der Dreidimensionalität der Rinne Rechnung getragen werden. Während des Einbaus des Sandmaterials erfolgte die Installation von 30 Probenahmestellen. Der eingebaute Schadstoffherd hatte ein Volumen von 200 Litern und beinhaltete 4 Liter PER (6.480 g) in Restsättigung. Insgesamt 300 Liter Mikroemulsion sollten über die die vier Schrägbrunnen injiziert werden, davon 200 Liter über die oberstromigen Brunnen und 100 Liter über die „Polsterbrunnen“.

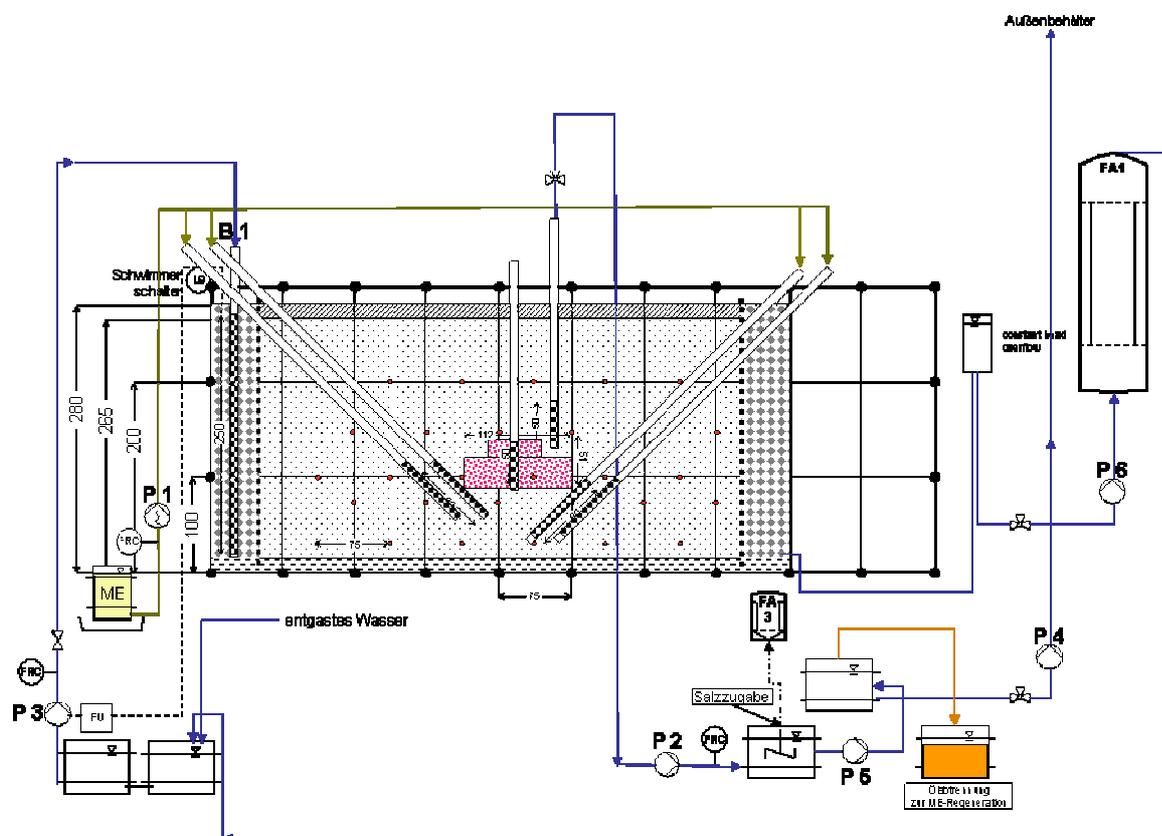


Abb. 6.2: Versuchsplan des großskaligen Schrägbrunnen-Experimentes

Die Mikroemulsion tauchte nach 1½-stündiger (oberstromig) bzw. nach 3-stündiger Injektion (abstromig) an der Glasscheibe auf. Die ersten Austrittsstellen lagen, wie bei vorangegangenen Küvettenexperimenten, im oberen Bereich der Brunnen-Verfilterungsstrecken. Beim Kontakt der sich ausbreitenden Mikroemulsion mit dem Schadstoff-Pool verfärbte sich diese weißlich. PER-Verdrängung und -Anreicherung, wie sie bei Push&Pull-Küvettenexperimenten beobachtet worden waren, konnten nicht festgestellt werden. Im weiteren Verlauf der Injektion trat auch im mittleren Bereich der Brunnenverfilterungen Mikroemulsion aus, so dass sich die Ausbreitungsform nicht kugelförmig, sondern oval darstellte. Nachdem das Polster von 100 Litern Mikroemulsion am rechten Brunnen eingegeben war, startete (mit zwei Stunden Verzögerung) die Extraktion am abstromig gelegenen, rechten Vertikalbrunnen. Der Brunnen förderte jedoch neben klarem Wasser sehr viel Luft und zeigte kaum Einfluss auf die Bewegung der Mikroemulsion im Aquifer. Selbst nach 8 Stunden Extraktion blieb das geförderte Wasser klar. Deshalb wurden an den rechten Schrägbrunnen weitere 50 Liter Mikroemulsion injiziert und die Extraktion auf den zentralen Brunnen verlagert. Diese Maßnahme bewirkte in den darauf folgenden Stunden einen deutlichen Transport der Mikroemulsion in Richtung des Zentralbrunnens. Hierbei durchströmte die Mikroemulsion den Schadstoff-Pool. Nach 5 Stunden der Extraktion am Zentralbrunnen trafen sich linke und rechte Mikroemulsionsfront in der Mitte. Genau zu diesem Zeitpunkt wurden die höchsten PER-Konzentrationen in der extrahierten Spüllösung gemessen (Abb. 6.3).

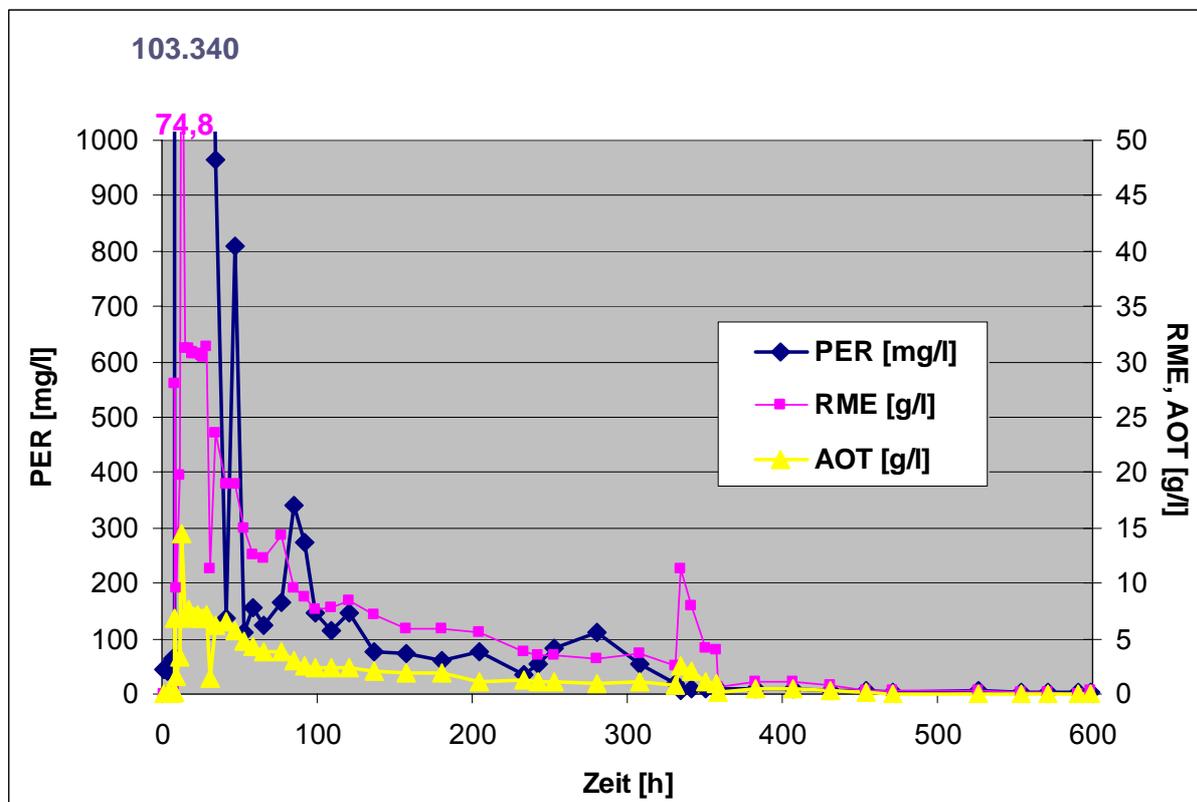


Abb. 6.3: Konzentrationen in der Spüllösung

Schließlich blieb nur noch abstromig ein Mikroemulsionsrest übrig, während im unteren Bereich bereits mikrobieller Abbau einsetzte. Nach 25 Tagen Extraktion war visuell die gesamte infiltrierte Mikroemulsion entfernt, so dass der Versuch beendet wurde. Zudem waren die Konzentrationen an PER, RME und AOT in der Spüllösung auf sehr geringe Werte (2 mg PER/L; 0,06 g RME/L; < 0,1 g AOT/L) abgesunken. In diesem Zeitraum waren 17,6 m<sup>3</sup> Spüllösung angefallen, von denen die höher belasteten ersten 10,4 m<sup>3</sup> nach dem entwickelten Aufbereitungskonzept behandelt wurden. Direkt im Anschluss an das Experiment erfolgte auch die Bodenprobennahme.

Insgesamt ergaben sich die extrahierten Mengen zu 77 % RME, 81 % AOT und >100 % (164 %) PER. Dieser letzte überhöhte Wert wird auf die Bedingungen bei der Probennahme zurückgeführt.

Die Ergebnisse der Bodenbeprobungen bestätigten die Schadstoffentfernung bei diesem Experiment. Bei lediglich sechs Proben konnte leichter PER-Geruch festgestellt werden, aufwändige Gesundheitsschutzmaßnahmen waren beim Aushub nicht notwendig. Maximale Restkonzentrationen von bis zu 587 mg PER/kg befanden sich 20 bis 40 cm unterhalb des ursprünglichen Schadstoff-Pools. Das Absenken des Wasserspiegels vor der Probennahme könnte zu einer Verlagerung von PER-Resten nach unten geführt haben. Die RME-Bodengehalte waren mit durchschnittlich 5,1 g/kg und Maximalkonzentrationen von 20 g/kg vergleichsweise hoch. Die Bilanzierung der im Boden verbliebenen Restkomponenten ergab 14 % RME, 0,5 % AOT, 2 % PER. Unter Berücksichtigung von PER-Verlusten bei der Mischprobenherstellung kann davon ausgegangen werden, dass über 90 % des DNAPL aus dem kontaminierten Aquifer entfernt worden waren.

### **6.3 Zusammenfassung**

Der Umgang mit der Mikroemulsion und deren Aufbereitung sind zufriedenstellend gelöst. Die biologische Begleitung und Nachsorge einer Feldanwendung erscheinen ebenfalls möglich. Die Chemie der Mikroemulsion wurde im Hinblick auf deren Stabilität optimiert. Etliche Effekte der Fließdynamik des Mehrphasensystems sind untersucht und beschrieben. Besonders die befürchtete Gefahr einer Verfrachtung von Schadstoff in tiefere Zonen durch Mobilisierung wird heute weniger kritisch beurteilt. Allerdings lässt der gegenwärtige Stand der Kenntnisse zum Einsatz von Mikroemulsionen für die Extraktion von DNAPL aus der gesättigten Zone eine Anwendung im Feld nur sehr eingeschränkt zu, da insbesondere die Problematik der Fließdynamik eines realen Bodenkörpers nicht abschließend bewertet werden kann und eine ausreichende Sicherheit des Verfahrens trotz des gelungenen Versuchs in VEGAS noch nicht gewährleistet ist. Andererseits zeigen die Ergebnisse der Arbeiten aber auch sehr deutlich das Potenzial, das Mikroemulsionen für die Sanierung von DNAPL-Schadensherden bieten. Auch die biologische Abbaubarkeit der Mikroemulsions-Bestandteile ist diesbezüglich positiv zu bewerten. Da bisher keine anderen ausgereiften Verfahren zur in-situ-Sanierung sol-

cher Fälle existieren, bleibt die Anwendung von Mikroemulsionen auf jeden Fall weiter diskussionswürdig. Eine Feldanwendung des Verfahrens in anderen Projekten scheint derzeit nur nach intensiven Voruntersuchungen der Randbedingungen am Standort mit begleitenden Laborversuchen ratsam.

Die biologischen Untersuchungen am Feldstandort erbrachten wesentliche Erkenntnisse zum biologischen Abbau bei allen relevanten Redoxmilieubedingungen. In Bodenproben des Feldversuches fanden sich ebenso wie in Proben aus groß- und kleinskali- gen Experimenten der Projektpartner nach Schadstoffextraktion und Nachspülphase, auch bei optimierter Brunnengeometrie, Restkonzentrationen der Mikroemulsionskomponenten. Wesentlicher Bestandteil war dabei das RME. Deshalb wurden unter allen relevanten Redoxmilieubedingungen umfangreiche Versuchsreihen zur Bilanzierung des RME-Abbaus durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen in allen Experimenten die Abbaubarkeit des RME. Uniperol zeigt ein ähnliches Abbauverhalten bei geringerer Abbaugeschwindigkeit. Der Abbau des anionischen Tensids Dioctylsulfosuccinat ging bei aeroben Bedingungen deutlich über einen Primärabbau hinaus. Der co-metabolische Abbau von PER in Gegenwart von Mikroemulsionskomponenten konnte sowohl in Laborversuchen als auch im Feldversuch belegt werden. Eine Störung der Schadstoffextraktion durch mikrobiologische Prozesse konnte in keinem Experiment beobachtet werden. Damit ist eine komplette Sanierung, nach erfolgter Extraktion, durch eine biologische Nachbehandlung möglich.

Die Frage der Wirtschaftlichkeit eines Verfahrens stellt sich nur in solchen Fällen, in denen es gegen traditionelle Maßnahmen wie das Auskoffern antreten muss. In allen anderen Fällen, in denen ein Schadensherd wegen Überbauung dafür nicht zugänglich ist, konkurriert das Verfahren gegen bisher ebenfalls nicht ausgereifte Verfahren zur in-situ-Sanierung. Ein weiterer wesentlicher Aspekt für die Betrachtung der Wirtschaftlichkeit ist die Wiedergewinnung der Mikroemulsionsbestandteile nach der Durchspülung des Untergrundes. Eine kostengünstige Lösung für diese Aufgabe wurde erarbeitet. Die Dauer einer Sanierung ist ebenfalls ein wesentlicher ökonomischer Faktor. Mit Ausnahme der biologischen in-situ-Sanierung gehen die bisher gängigen Standard-Verfahren, welche sich an große DNAPL-Pools heranwagen, von Sanierungszeiträumen von 10 bis 50 Jahren aus. Ein feldtaugliches Mikroemulsions-Verfahren stellt dagegen Sanierungszeiten von wenigen Wochen bis Monaten in Aussicht und ist allein deshalb schon unter wirtschaftlichen Aspekten interessant.

## 6.4 Danksagung

Die Arbeiten des Projektverbundes wurden gefördert durch das Bundesministerium für Forschung und Bildung, Projektträgerschaft Wassertechnologie und Entsorgung (Förderkennzeichen 02WT0188-0191), und durch die Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg.

## **7 IN-SITU-GRUNDWASSERSANIERUNG DURCH GEZIELTE ALKOHOLINJEKTION MITTELS VERTIKALER ZIRKULATIONSSTRÖMUNG EINES GZB**

Ulf Mohrlök, Institut für Hydromechanik (IfH), Universität Karlsruhe (TH)

### **7.1 Einführung**

Grundwasserschadensfälle, verursacht durch Chlorkohlenwasserstoffe (CKW), bilden aufgrund der Toxizität und Persistenz der CKW ein hohes Gefährdungspotential, da diese sich in gelöster Form nahezu ungehindert mit der Grundwasserströmung ausbreiten und demzufolge auch im Zustrom zu Trinkwassergewinnungsanlagen anzutreffen sind. Zudem kann mobilisierte CKW-Phase gravitationsbedingt unkontrolliert in tiefere Aquiferbereiche absinken.

Das Institut für Hydromechanik (IfH), Universität Karlsruhe, und das Institut für Wasserbau (IWS), Universität Stuttgart, haben in enger Zusammenarbeit durch Kombination und Weiterentwicklung der Technologien der Alkoholspülung (Braun et al. 2003) und des Grundwasser-Zirkulations-Brunnens (GZB) (Mohrlök et al. 2003) eine In-situ-Sanierungstechnologie entwickelt, die eine gezielte Alkoholinjektion mittels GZB zur Sanierung von Schadstoffquellen ermöglicht.

In skalenübergreifenden, experimentellen Untersuchungen ist es gelungen, einen Alkoholcocktail (s. Greiner et al. 2003) über aufwärts gerichtete vertikale Zirkulationsströmung gezielt und unter hydraulisch kontrollierten Bedingungen zu injizieren. In 2D-Experimenten am IfH konnte auf diese Weise wiederholt ein PCE-Schadensherd mit ausreichender Sicherheit und großer Effizienz saniert werden. In 3D-Experimenten im VEGAS-Blockaquifer an der Universität Stuttgart konnte allerdings bisher nur die gezielte Alkoholinjektion demonstriert werden.

Um die entwickelte In-situ-Sanierungstechnologie unter ökonomisch und ökologisch vertretbaren Bedingungen in der Praxis einsetzen zu können, wurden auch Untersuchungen zur Minimierung des Verbrauchs von Alkoholen sowie zur biologischen Abbaubarkeit der Alkohole durchgeführt. Mit Hilfe von „partitioning tracer tests“ (PTT) kann der Schadensherd lokalisiert und damit durch gezielten Einsatz der Alkohole der Menge minimiert werden. Die Entwicklung einer kontrollierten Entnahme der Alkohole und einer geeigneten Abwasseraufbereitungsanlage ermöglichte die Wiedergewinnung und damit Wiederverwendung der Alkohole.

## 7.2 Grundprinzipien der Alkoholspülung mittels GZB

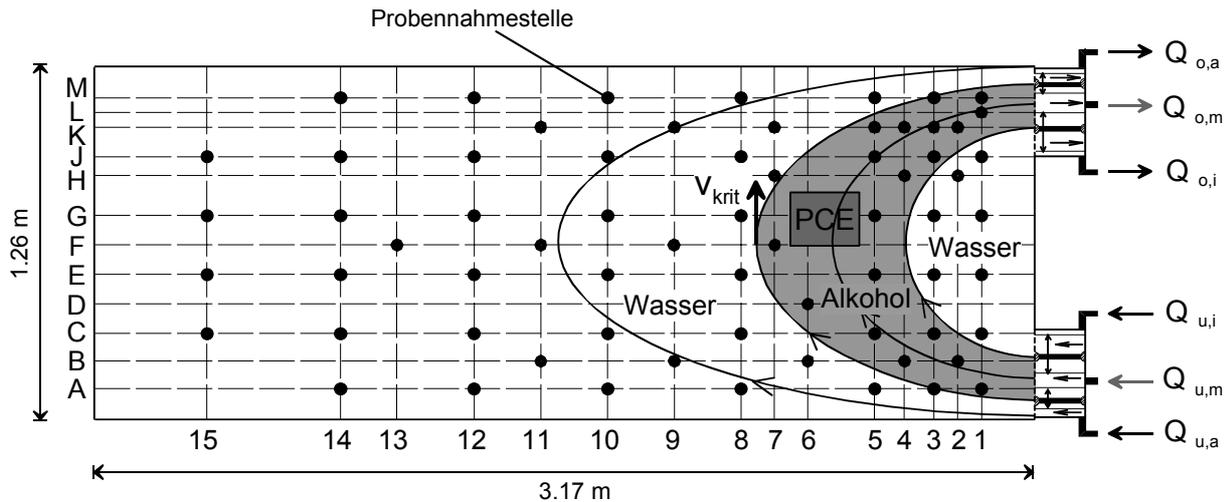
### 7.2.1 Solubilisierung und Mobilisierung eines DNAPL

Ziel bei der In-situ-Sanierung durch Alkoholspülung ist, einen DNAPL mit großer Effizienz und möglichst sicher aus dem Grundwasser zu entfernen. Der Einsatz von Alkoholen steigert zum einen die Effizienz durch erhöhte Solubilisierung der schlecht löslichen DNAPL. Zum anderen wird durch den eingesetzten Alkohol die Grenzflächen-spannung für die DNAPL-Phase verringert, was zu einer unkontrollierten, abwärts gerichteten Mobilisierung führen kann. Diesem kann entweder durch eine aufwärts gerichtete, vertikale Mindestgeschwindigkeit oder durch Einsatz eines leichten, schwellenden Alkohols, der durch Vermischung mit dem DNAPL dessen Dichte herabsetzt, entgegengewirkt werden. Da schwellende Alkohole mit Wasser nicht mischbar und in Form einer Mehrphasenströmung hydraulisch nicht kontrollierbar sind, ist der Einsatz eines weiteren Alkohols als Lösungsvermittler erforderlich.

Am IWS wurde zur Abreinigung von PCE ein Alkoholcocktail entwickelt (Greiner et al. 2003), der aus ca. 23 Vol.-% 1-Hexanol als schwellendem Alkohol, aus ca. 54 Vol.-% 2-Propanol (Isopropanol) als Lösungsvermittler und noch aus ca. 23 Vol.-% Wasser besteht. Dieser Alkoholcocktail bildet eine wässrige Phase mit einer 15% geringeren Dichte und 3,7-fach größeren dynamischen Viskosität als Wasser. Er ist sowohl mit Wasser als auch mit PCE mischbar, kann sich jedoch bei zu großer Einmischung von Wasser aufgrund von Dispersionseffekten oder von PCE bei der Sanierung in eine wässrige und eine organische (Hexanol-)Phase aufspalten. Dieses Mehrphasensystem stellt allerdings keine Gefahr dar, da die Hexanol-Phase auch mit PCE einen LNAPL bildet. Kritisch hierbei ist allerdings die Entmischung bei der Alkoholinjektion, da dann nur noch die übrig bleibende wässrige Phase und nicht mehr der Alkoholcocktail den Schadensherd erreicht.

### 7.2.2 Hydraulische Steuerung der Alkoholinjektion

Ziel der Entwicklung der Alkoholinjektion mittels aufwärts gerichteter Zirkulationsströmung eines GZBs war, den Alkoholcocktail gezielt unter hydraulisch kontrollierten Bedingungen an den Schadensherd zu transportieren (Abb. 7.1). Die Segmentierung des Zugabefilters in Kammern mit flexiblen Trennplatten ermöglichte eine gezielte Alkoholinjektion über die mittlere Kammer. Eine ähnliche Segmentierung des Entnahmefilters erlaubte eine kontrollierte Entnahme der Alkohole. Über die hydraulische Steuerung muss eine vertikale Mindestgeschwindigkeit im Bereich des Schadensherds erreicht und zusätzliche dichtebedingte Strömung vermieden werden.



**Abb. 7.1: Gezielte Alkoholspülung zur Abreinigung eines PCE-Schadensherds in der 2D-Versuchsrinne am IfH (schematisch)**

Zur hydraulischen Steuerung der Alkoholinjektion waren über die Randbedingungen am Zugabefilter die Druckverhältnisse so zu definieren, dass den Viskositäts- und Dichteunterschieden zwischen Wasser und Alkoholcocktail Rechnung getragen wird (Mohrlok et al. 2005). Zur Erhaltung hydrostatischer Druckverhältnisse am Zugabefilter kann die geringere hydraulische Leitfähigkeit im Bereich der Alkoholspülung, bedingt durch die größere Viskosität des Alkoholcocktails, durch Reduzierung der Zugaberate des Alkoholcocktails in die mittlere Kammer ausgeglichen werden. Auftriebseffekte durch die Dichteunterschiede können durch Anpassung der Druckdifferenzen zwischen den Zugabekammern an den jeweiligen Trennplatten über Steuerung der Zugaberaten verringert werden. Die Steuerung war durch unabhängige Regelung der Zugaberaten in die einzelnen Kammern möglich.

Die Druckverhältnisse unterschieden sich hinsichtlich des Auftriebseffekts für unvollständige und vollständige Wasser-Alkohol-Zirkulation (Mohrlok & Heinrich 2004). Eine vollständige Wasser-Alkohol-Zirkulation liegt dann vor, wenn bei Durchbruch des Alkoholcocktails am Entnahmefilter die innere von der äußeren Wasser-Zirkulation vollständig entkoppelt ist. Diese Situation trat bei den 2D-Experimenten in der Versuchsrinne am IfH immer auf. Bei den 3D-Experimenten im VEGAS-Blockaquifer war die gezielte Alkoholinjektion nicht nur auf eine bestimmte Höhe sondern auch einen bestimmten horizontalen Winkel des Zugabefilters beschränkt, so dass immer eine unvollständige Wasser-Alkohol-Zirkulation vorlag.

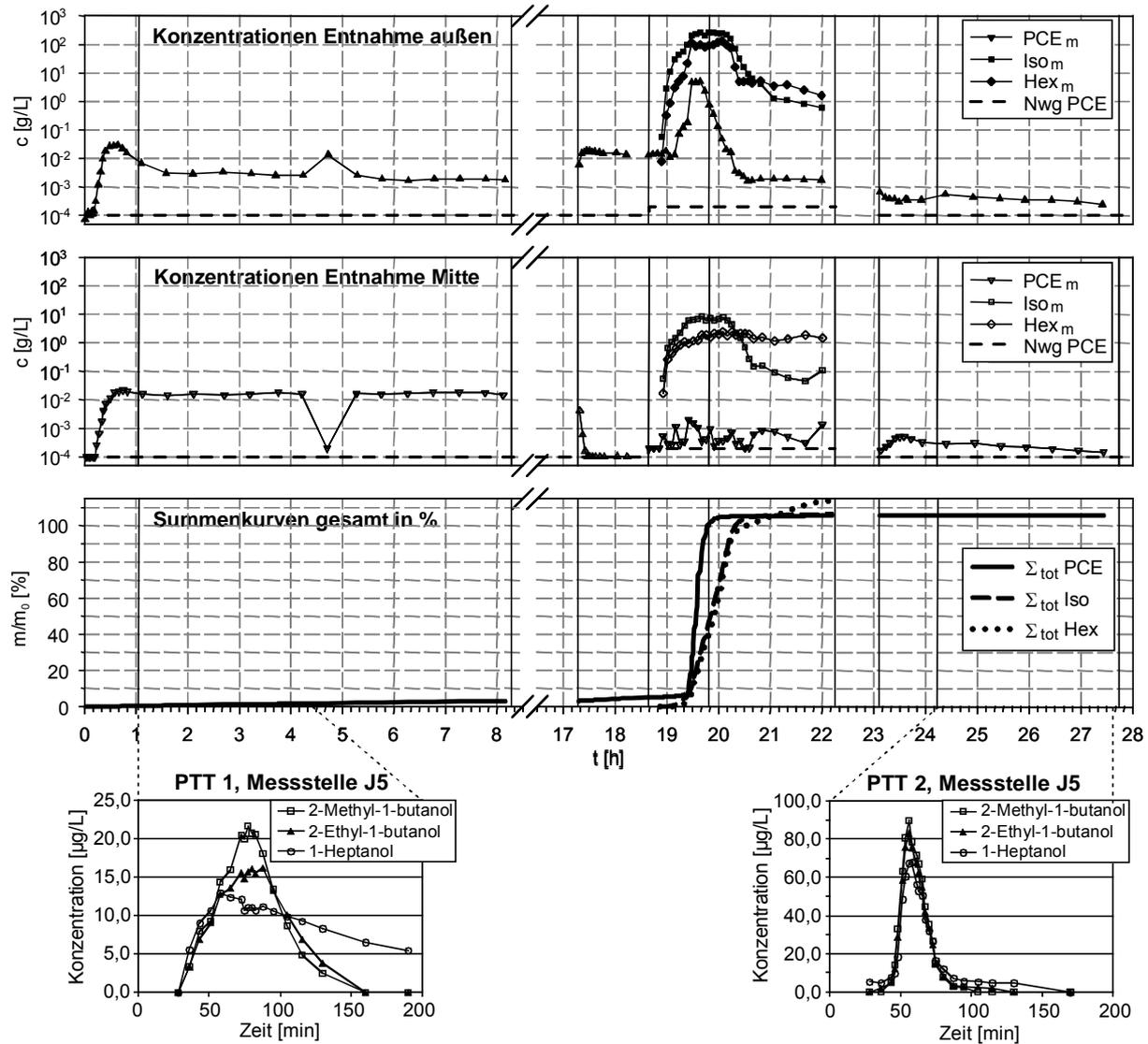
## 7.3 Laborexperimente

### 7.3.1 2D-Experimente in der Versuchsrinne am IfH

Die 2D-Experimente in der Versuchsrinne am IfH dienen der Entwicklung der hydraulischen Steuerung der gezielten Alkoholinjektion. Über Tracerexperimente konnten die Zirkulationsbereiche und die vertikale Mindestgeschwindigkeit im Bereich des Schadensherds nachgewiesen werden (Mohrlok et al. 2005). Alkoholspülungen. Über unterschiedliche Zugaberaten konnten die Alkoholinjektionen anhand des zeitlichen Verlaufs der Druckdifferenz an den Grenzflächen Wasser-Alkohol hydraulisch kontrolliert werden. Dabei wurde sowohl der veränderten Viskosität als auch der veränderten Auftriebsverhältnisse bei vollständiger Wasser-Alkohol-Zirkulation Rechnung getragen (Mohrlok & Heinrich 2004). Bei erfolgreicher Steuerung der Alkoholinjektion wurde Entmischung nur in geringem Maße beobachtet.

Diese Steuerung wurde in zwei Experimenten, S1, S2, erfolgreich bei der Sanierung eines PCE-Schadensherds angewendet (Mohrlok & Heinrich 2003, Mohrlok et al. 2005). Es wurden jeweils 175 ml mit Sudan IV angefärbtes PCE mittels einer 25 ml-Glaspipette in sieben Schichten in ein Volumen von etwa 12 L in residualer Sättigung von 4,5 Vol.-% verteilt. Die Abreinigung des Schadstoffs konnte damit an der Glasfront des Versuchsaufbaus visuell verfolgt werden. Die Alkoholinjektion erfolgte über etwa 70 min in die mittlere Zugabekammer.

Ein Absinken des PCEs beim Erreichen der Alkoholfront am Schadensherd wurde nur im Sanierungsexperiment S1 beobachtet und nach kurzer Distanz durch Vermischung mit dem von unten nachströmenden Alkoholcocktail gestoppt. Der Austrag aus dem Schadensherd erfolgte in beiden Experimenten als Mischung mit dem Alkoholcocktail. Ca. 50 min nach Alkoholzugabe wies der Schadensherd visuell keine Verunreinigung mehr auf. Der Austrag des PCE dauerte nicht einmal 20 min. und war noch während der Alkoholinjektion abgeschlossen (Abb. 7.2). Das bedeutet, dass die Abreinigung des PCE nach Spülung weniger Porenvolumen abgeschlossen war.



**Abb. 7.2:** Ergebnisse des zweiten Sanierungsexperiments S2 in der 2D-Versuchsrinne am IfH, Austräge der Alkohole und von PCE sowie Durchbruchkurven aus den beiden PTTs an der Messstelle J5 im Abstrom des Schadensherds (s. Abb. 7.1)

Die höchsten PCE-Konzentrationen von bis zu über 5 g/L wurden nur in wenigen Proben beobachtet. Im Nachlauf lagen bereits 1,5 h nach Beginn der Alkoholinjektion die Konzentrationen bei etwa 1 mg/L. Da die Massenbilanzen auf sehr wenigen großen Konzentrationswerten beruhen, die zudem hohe Anforderungen an die chemische Analytik stellten, galt die Wiederfindung von ca. 85% PCE im Experiment S1 und ca. 103% im Experiment S2 praktisch vollständig (Abb. 7.2). Ähnliches gilt für die Alkoholwiederfindung. Das beobachtete Tailing des Hexanol (Abb. 7.2) war durch geringfügige Entmischung verursacht. Das Hexanol stieg unkontrolliert auf und wurde über Lösungsprozesse mit der wässrigen Phase ausgetragen.

Beim zweiten Sanierungsexperiment S2 wurde zuvor ein PTT zur Schadstoffdetektion und danach ein weiterer PTT zur Sanierungskontrolle durchgeführt. Es wurden jeweils

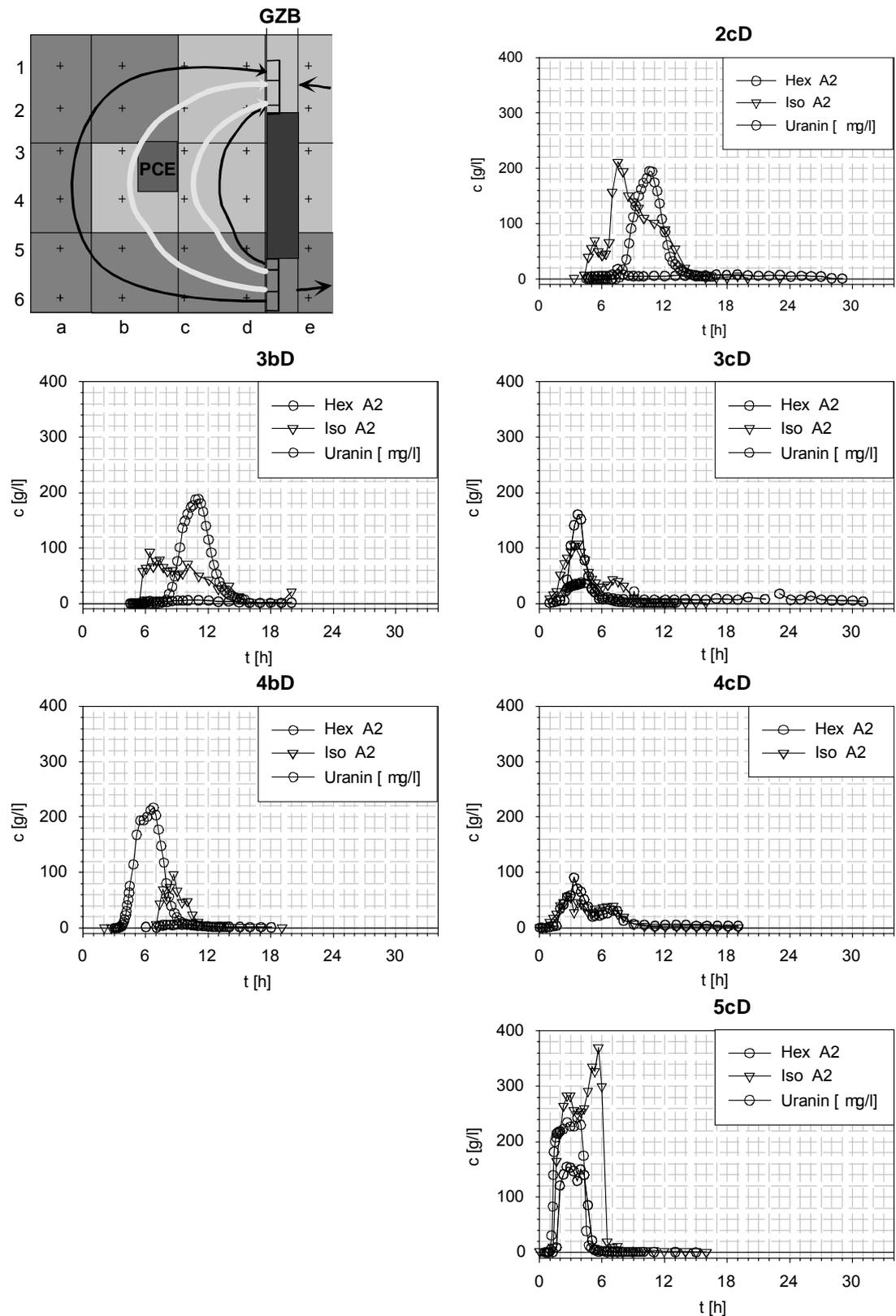
die Tracerstoffe 2-Methyl-1-butanol, 2-Ethyl-1-butanol und 1-Heptanol, puls förmig mit einer Dauer von ca. 5 min bei reiner Wasserzirkulation in allen drei Zugabekammern zugegeben. Durchbruchskurven wurden an den Zugabekammern, den Messstellen C5 und J5 im direkten An- bzw. Abstrom des Schadensherds sowie den Entnahmekammern bestimmt. Die quantitative Analyse der Durchbruchskurven scheiterte bislang an der komplexen Zirkulationsströmung. Qualitativ zeigte sich der Einfluss des PCE bzw. dessen effiziente Sanierung durch Alkoholspülung recht gut in den Durchbruchskurven an der Messstelle J5 (Abb. 7.2). Die parallel an den Entnahmekammern bestimmten PCE-Konzentrationen zeigten, dass der Massenausstrag von PCE bei einer etwa 8-stündigen Wasserspülung nur ein Bruchteil desjenigen einer etwa 1,5-stündigen Alkoholspülung betrug (Abb. 7.2).

### 7.3.2 3D-Experimente im VEGAS Blockaquifer

Die in den klein- und mittelskaligen Experimenten entwickelte Sanierungstechnologie wurde auf großskalige Experimente im heterogenen VEGAS-Blockaquifer zur Demonstration der Anwendbarkeit unter realitätsnahen Bedingungen übertragen, die in enger Zusammenarbeit von IfH und IWS durchgeführt wurden. Die Zugabe- und Entnahmeeinheiten des GZB wurden von der Fa. IEG mbH, Reutlingen, zur Verfügung gestellt und ermöglichten eine Alkoholinjektion in einer bestimmten Höhe und einem begrenzten horizontalen Winkel des Zugabefilters. Von besonderer Bedeutung war dabei die Dichtheit der Abtrennung zwischen den Zugabekammern, um die großen Auftriebseffekte beherrschen zu können.

Mit Hilfe eines Uranintracerexperiments wurde die drei-dimensionale Zirkulationsströmung im heterogenen Aquifer erkundet. Zwei Experimente mit Alkoholinjektion ohne Schadensherd, A1, A2, dienten der Ermittlung der Bedingungen für eine gezielte, hydraulisch gesteuerte Alkoholinjektion. Dabei wurden die Erfahrungen und Ergebnisse der 2D-Experimente zugrunde gelegt. Die Zugaberaten wurden anhand des zeitlichen Verlaufs der Druckdifferenz zwischen den Zugabekammern entsprechend gesteuert. Konstante optimale hydraulische Bedingungen konnten in den großskaligen Experimenten allerdings nicht eingestellt werden.

Dennoch konnte beim Experiment A2 der Alkoholcocktail erfolgreich in den Blockaquifer injiziert werden (Messstelle 5cD, Abb. 7.3). Die Alkoholinjektion war auch direkt vergleichbar mit dem Transport von Uranin unter vergleichbaren hydraulischen Verhältnissen. Die niedrigen Hexanol- und Isopropanolkonzentrationen in den Querschnitten b und c deuteten auf eine Entmischung des Alkoholcocktails hin (Abb. 7.3). Die Lage der Messstellen im Blockaquifer ließ damit jedoch keinen direkten Rückschluss auf die Alkoholkonzentrationen im Bereich des Schadensherds zu.



**Abb. 7.3:** Lage der Messstellen und berechneten Bahnlinien im Blockaquifer sowie Durchbruchkurven des Uranin (Uranintracerexperiment) und der Alkohole (zweite Alkoholspülung A2) im zentralen Messquerschnitt D

Im abschließenden Sanierungsexperiment waren die Zugabekammern untereinander nicht vollständig abgedichtet und somit die Auftriebseffekte nicht beherrschbar. Der eingebaute PCE-Schadensherd konnte daher mittels der durchgeführten Alkoholspülung nicht abgereinigt werden. Dennoch konnte dieses Experiment als Teilerfolg betrachtet werden, da bei der großtechnischen Anwendung der Technologie die Mischung aus Alkoholcocktail und Schadstoff kontrolliert entnommen und ein großer Teil der Alkohole über die Abwasseraufbereitungsanlage wieder gewonnen wurde.

## 7.4 Diskussion und Schlussfolgerungen für die Praxis

Die entwickelte In-situ-Sanierungstechnologie bietet durch Kombination von Alkoholspülung und GZB die Möglichkeit, problematische Schadstoffe wie DNAPL durch Spülung weniger Porenvolumen effizient und sicher aus dem Grundwasser zu entfernen. Viskositätsunterschiede und Auftriebseffekte sind über die robuste Zirkulationsströmung eines GZB mit segmentierter Zugabe kontrollierbar, was die hydraulische Steuerung einer gezielten Alkoholinjektion ermöglicht. Dabei ist ein technischer Aufwand erforderlich, um die Zugabekammern untereinander abzudichten.

Dieser erhöhte technische Aufwand wird durch enorme Steigerung der Effizienz bei der DNAPL-Sanierung ausgeglichen (Tab. 7.1). Allerdings sind auch die Investitionen für den Einsatz der relativ teuren Alkohole zu beachten. Die Durchführung von PTTs erlaubt jedoch die Alkoholmengen angepasst an die Schadstoffverteilung zu minimieren. Ebenso ermöglicht die kontrollierte Entnahme zusammen mit einer Abwasseraufbereitung die Wiedergewinnung und damit Wiederverwendung der Alkohole.

**Tab. 7.1: Vergleich der Effizienz der Sanierungen mittels reiner Wasserzirkulation und mittels Zirkulation mit Alkoholinjektion**

	2d-Exp., IfH (Weber 2000)	2d-Exp., IfH (Mohrlok et al. 2005)	VEGAS-Exp. (Mohrlok et al. 2003)	VEGAS-Exp. (Mohrlok et al. 2005)
Schadstoff	TCE	PCE	TCE	PCE
Wasserlöslichkeit [mg/L]	1100	160	1000	160
Sanierungsdauer [h]	1190 <sup>1</sup>	1,5	1460 <sup>1</sup>	50 <sup>2</sup>
Lösungsvermittler	Wasser	Alkohol	Wasser	Alkohol
Volumen Lösungsvermittler [L]	4400	80	2800000	3200 (+ 800)
Gesamtzirkulationsraten [m <sup>3</sup> /h]	0,023	0,8	12	11
Gesamtwasservolumen [m <sup>3</sup> ]	4,4	1,2	2800	550
Massenausrag pro eingesetztem Lösungsvermittler [mg/L]	66	3500	6,9	4700 <sup>2</sup>
Massenausrag pro Gesamtwasservolumen [g/m <sup>3</sup> ]	66	233	6,9	27 <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Wert umgerechnet auf PCE-Löslichkeit.

<sup>2</sup> Angaben sind Prognosewerte, da das Sanierungsexperiment nicht erfolgreich war.

Da die verwendeten Alkohole mikrobiologisch abbaubar sind, kann eine weitere Gefährdung des Grundwassers durch Anwendung der entwickelten Technologie ausgeschlossen werden. Eine erfolgreiche Sanierung einer CKW-Verunreinigung auf der Technikumsskala steht noch aus. Die im Forschungsvorhaben erzielten Ergebnisse liefern zur Planung einer Pilotstudie eine wesentliche Grundlage. Inwieweit sich diese Technologie am Markt durchsetzen werden kann, ist allerdings auch von der Akzeptanz bei Ingenieurbüros und Behörden abhängig. Ein wichtiger Aspekt ist hierbei die Genehmigung der Einleitung von Alkoholen ins Grundwasser. Für die geplante Pilotstudie haben die Projektpartner vom Land Baden-Württemberg unter entsprechenden Auflagen das grundsätzliche Einverständnis erhalten.

## 7.5 Danksagung

Die vorgestellten Ergebnisse wurden in enger Zusammenarbeit mit dem Institut für Wasserbau und VEGAS, beide Universität Stuttgart, und der Fa. IEG mbH, Reutlingen, erzielt und durch die Unterstützung des BMBF (FKZ 02 WT0064/65) ermöglicht.

## 7.6 Literatur

- Braun, J., Greiner, P., Koschitzky, H., Schnieders, J. & K. Weber (2003): Übersicht über Technologieentwicklungen zur NAPL-Sanierung mittels. In Symposium Resource Fläche und VEGAS - Statuskolloquium 2003, Editor: Schrenk, V., et al., Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, 10/2003. - Nr.: 124.
- Greiner, P., Braun, J., Hofstee, C., Koschitzky, H., Schnieders, J. & K. Weber (2003): Alcohol flushing: Detection and In-Situ-Remediation of DNAPL. 8. International FZK/TNO Conference on Contaminated Soil (ConSoil 2003-Proceedings), The Netherlands Organization for Applied Scientific Research (TNO), Gent, Belgium, 5/2003.
- Mohrlok, U. & K. Heinrich (2003): In-situ Grundwassersanierung durch gezielte Alkoholinjektion mittels Grundwasser-Zirkulations-Brunnen (GZB): Ergebnisse aus Laborexperimenten. In B. Barczewski, et al., VEGAS-Statuskolloquium 2004, Mitteilungen Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, Heft131, 113-120.
- Mohrlok, U., Weber, O., Jirka, G.H., Scholz, M. (2003): Grundwasser-Zirkulations-Brunnen (GZB) zur In-situ-Grundwassersanierung, Grundwasser 8(1), 13-22.
- Mohrlok, U., Greiner, Ph., Heinrich, K., Trötschler, O., Schnieders, J., Jirka, G.H., Koschitzky, H.-P., Braun J. (2005): Entwicklung einer weitergehenden Grundwassersanierungstechnologie zur Abreinigung von anthropogenen chlorierten Kohlenwasserstoffen hoher Dichte (CKW) durch Alkoholinjektion. Abschlussbericht des gleichlautenden BMBF-Projekts, Institut für Hydromechanik, Karlsruhe, Institut für Wasserbau Stuttgart.

Weber O. (2000): Solubilisierungsmodell zur Beschreibung des Stoffübergangsprozesses in der wassergesättigten Zone. Dissertation, Institut für Hydromechanik 2000/2, Universität Karlsruhe. 169 S.

## 8 NUMERISCHE MODELLIERUNG DER MEHRPHASEN- /MEHRKOMPONENTEN-HYDRAULIK BEI DER ALKOHOL- SPÜLUNG

Philipp Greiner<sup>1</sup>, Jürgen Braun<sup>1</sup>, Holger Class<sup>2</sup>, Hans-Peter Koschitzky<sup>1</sup>,  
Johannes Schnieders<sup>3</sup>, Leopold Stadler<sup>2</sup>

<sup>1</sup> VEGAS, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart

<sup>2</sup> Lehrstuhl für Hydromechanik und Hydrosystemmodellierung,  
Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart

<sup>3</sup> seit April 2005: Wasser- und Abwasser - Zweckverband Niedergrafschaft, Neuenhaus

### 8.1 Einführung

Chlorierte Kohlenwasserstoffe (CKW) wie Tetrachlorethen (PCE) und Trichlorethen (TCE) besitzen aufgrund ihrer stoffspezifischen und toxikologischen Eigenschaften ein hohes Gefährdungspotential für die Umwelt und den Menschen. Im Grundwasser können sie zu jahrzehntelangen Kontaminationen führen. Ausgehend von den Schadstoffherden (Schadstoffquellen) in denen der CKW in residualer Sättigung oder in Schadstoffpools vorliegt, können sich im Grundwasserabstrom lange Kontaminationsfahnen (bis zu mehreren Kilometern) ausbilden (Stupp et al. 2005). Durch ihre geringe Wasserlöslichkeit, ihre Benetzungseigenschaften in der Bodenmatrix und ihre hohe Dichte, können diese DNAPL-Schadstoffquellen (Dense Non Aqueous Phase Liquid) nicht mit herkömmlichen In-situ-Sanierungsverfahren wie z.B. „Pump and Treat“ effizient aus einem Grundwasserleiter entfernt werden.

Daher versuchen Forschungseinrichtungen weltweit, neuartige Sanierungsverfahren für DNAPL kontaminierte Grundwasserleiter zu entwickeln mit dem Ziel die Schadstoffquellen zu entfernen. Durch die Verwendung von Cosolvents kann beispielsweise die Löslichkeit von CKW erhöht werden. Da ein Cosolvent aber die Grenzflächenspannung zwischen der wässrigen und der Schadstoffphase herabsetzt, kann es zu einer Mobilisierung der DNAPL-Phase kommen, wodurch diese aufgrund der Gravitationskraft unkontrolliert in tiefer gelegene Bereiche des Grundwasserleiters eindringen kann. Dies muss unter allen Umständen vermieden werden.

Durch den Einsatz von Alkoholcocktails (Mischung aus zwei Alkoholen und Wasser) kann die Löslichkeit von CKW erhöht und gleichzeitig eine unkontrollierte Mobilisierung vermieden werden. In einem vom BMBF geförderten Verbundprojekt Instituts für Wasserbau (IWS), Universität Stuttgart und dem Institut für Hydromechanik (IfH), Universität Karlsruhe wurde durch aufeinander aufbauenden Experimente (Batch, Säule, 2D und 3D) und begleitenden numerischen Arbeiten die gezielte Alkoholcocktail-Injektion systematisch untersucht um darauf aufbauend ein neues, innovatives In-Situ-

Sanierungsverfahren zu entwickeln. Während sich das IfH mit der gezielten Alkoholcocktail-Zugabe beschäftigte, war das IWS für die Zusammensetzung des Alkoholcocktails, die Abwasseraufbereitung (Alkoholrecycling) und die numerische Modellierung zuständig (Mohrlok et al. 2005).

## 8.2 Zusammensetzung des Alkoholcocktails und Prinzip der Alkoholspülung

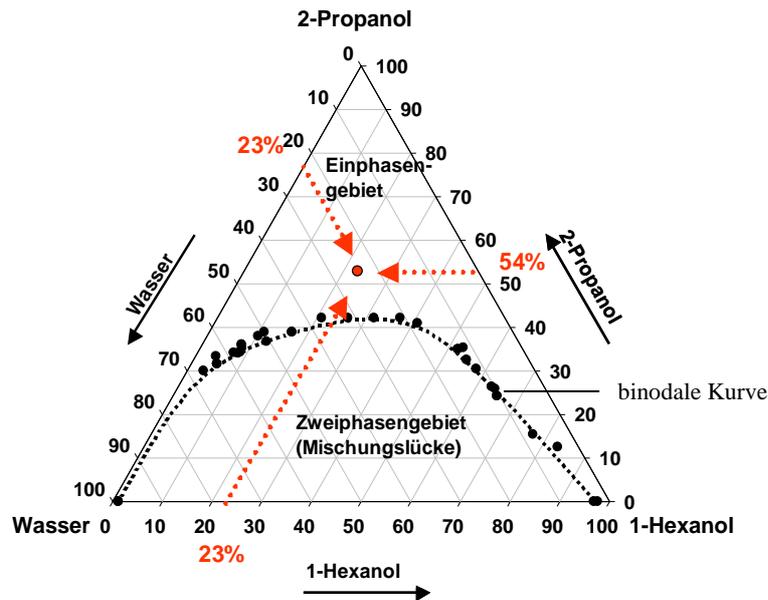
Ein zur Sanierung von CKW kontaminierten Grundwasserleitern geeigneter Alkoholcocktail muss mehrere Anforderungen erfüllen:

- sichere und schnelle Entfernung des Schadstoffes aus der Bodenmatrix
- hohe Stabilität des Alkoholcocktails (Mischungseigenschaften)
- geringe Anschaffungs- und Aufbereitungskosten
- Umweltverträglichkeit (Wassergefährdungsklasse 0 oder 1)

Ein einzelner Alkohol ist nicht in der Lage alle diese Anforderungen zu erfüllen. Erst das Zusammenwirken eines lipophilen und eines hydrophilen Alkohols ermöglichen dies.

Lipophile Alkohole werden auch als schwellende Alkohole bezeichnet, da sie in die Schadstoffphase eindringen und deren Dichte verringern, so dass die Gefahr einer unkontrollierten Verlagerung des DNAPL in tiefere Aquiferbereiche verringert wird. Ein lipophiler Alkohol ist aber in einem Grundwasserleiter nicht über Brunnen kontrollierbar, da er eine eigene, wasserunlösliche Phase bildet. Er kann erst durch das Mischen mit einem hydrophilen Alkohol einen wasserlöslichen, hydraulisch kontrollierbaren Alkoholcocktail bilden.

Neben der Auswahl der Alkohole ist auch das Mischungsverhältnis von entscheidender Bedeutung. Das Mischungsverhalten von drei Flüssigkeiten kann in sogenannten ternären Phasendiagrammen dargestellt werden (Abb. 8.1, vgl. Greiner 2004).



**Abb. 8.1: Ternäres Phasendiagramm von Wasser, 2-Propanol und 1-Hexanol bei 20°C**

Die binodale Kurve im ternären Diagramm stellt dabei die Trennfläche zwischen dem Ein- und Zweiphasengebiet dar. Zur Sanierung von CKW kontaminierten Grundwasserleitern kann beispielsweise ein Alkoholcocktail bestehend aus 54% (v/v) 2-Propanol (hydrophiler Alkohol), 23% (v/v) 1-Hexanol (lipophiler Alkohol) und 23% (v/v) Wasser eingesetzt werden. Enthielte der Alkoholcocktail zu geringe Mengen an 2-Propanol ( $< 40\%$ ) würde er sich entmischen und in zwei Phasen aufspalten (vgl. Abb. 8.1). Geringere Wasseranteile würden neben der Verteuerung des Alkoholcocktails zu einer höheren Viskosität führen, was sich negativ auf die hydraulischen Eigenschaften des Cocktails auswirken würde.

Zum effektiven Einsatz des Alkoholcocktails muss dieser den CKW Schadensherd in einem Grundwasserleiter möglichst von unten nach oben durchströmen. Die aufwärtsgerichtete Strömung wirkt dabei ebenfalls einer unkontrollierten Verlagerung des DNAPL entgegen. Die Strömung muss eine Mindestgeschwindigkeit, die sogenannte kritische Geschwindigkeit, überschreiten. Die kritische Geschwindigkeit hängt neben der hydraulischen Durchlässigkeit des Bodenmaterials von der Dichte des Schadstoffes ab.

Durch eine geeignete Brunnenanordnung bzw. den Einsatz von Grundwasserzirkulationsbrunnen können solche aufwärtsgerichtete Strömungsfelder erzeugt werden. Der Alkoholcocktail erreicht so den Schadstoff und es kommt zu einer Solubilisierung und kontrollierten Mobilisierung des CKW, so dass die Mischung bestehend aus Schadstoff, Alkoholcocktail und Grundwasser über einen Brunnen abgepumpt werden kann. Anschließend können die Alkohole teilweise wieder recycelt und so das Abwasservolumen reduziert werden.

## 8.3 Numerische Modellierung

Aufbauend auf den Erkenntnissen von Batchversuchen, die der Bestimmung der Zusammensetzung des Alkoholcocktails dienten, wurden in VEGAS zunächst Sanierungsversuche in Glassäulen (1D) durchgeführt. Gefolgt von mittel- und großskaligen Rinnenversuchen (2D und 3D) ebenso wie Versuche im VEGAS Großbehälter (3D) im Blockmodell (Grundwasserleiter aus quaderförmigen Blöcken mit unterschiedlichen hydraulischen Durchlässigkeiten) wurde die In-Situ-Sanierungstechnologie „Alkoholspülung“ systematisch bis zur Anwendungsreife entwickelt. Diese Versuche haben gezeigt, dass mit Hilfe der Alkoholspülung unter definierten Bedingungen eine schnelle und sichere Abreinigung von CKW in einem Grundwasserleiter stattfinden kann.

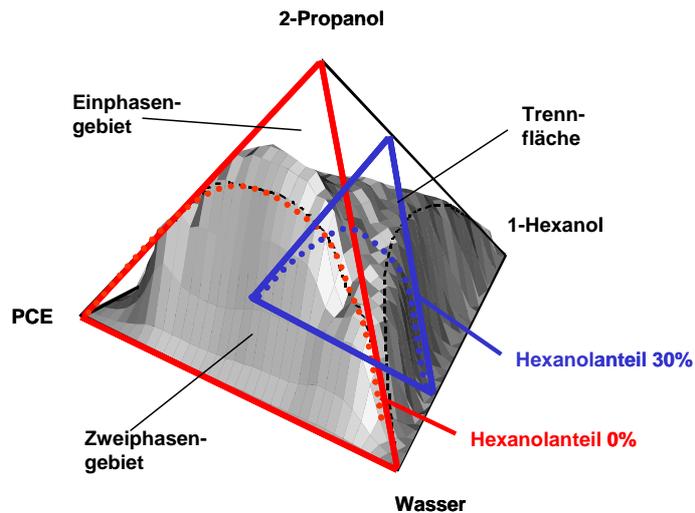
Besonders großskalige Versuche sind sehr zeitaufwändig und kostenintensiv. Daher wurde parallel zu diesen Versuchen ein numerisches Modell aufgebaut, das die komplexen Vorgänge der Alkoholspülung simulieren soll. Als numerischer Modellcode wird MUFTE-UG (Multiphase Flow Transport and Energy model on Unstructured Grids; Helmig et al. 1998) verwendet.

### 8.3.1 Konstitutive Beziehungen

Die Alkoholspülung stellt ein komplexes Mehrphasen-/Mehrkomponentensystem dar. Im einfachsten Fall handelt es sich um ein Zweiphasen-/Vierkomponentensystem mit den Komponenten Wasser, hydrophiler und lipophiler Alkohol sowie Schadstoff. Sofern der Schadstoff als Schadstoffmischung vorliegt, erweitert sich die Anzahl der Komponenten noch. Für das numerische Modell wurde von den vier Komponenten Wasser, 2-Propanol, 1-Hexanol und PCE ausgegangen.

Zur Aufstellung der konstitutiven Beziehung war es erforderlich, die relevanten Parameter wie Mischungsverhalten, Viskosität und Dichte zu bestimmen und zu untersuchen und mit Gleichungen mathematisch zu beschreiben. Durch Versuche wurden systematische Messreihen für die einzelnen Parameter aufgestellt.

In Abhängigkeit der Volumina der vier Komponenten bilden sich entweder eine oder zwei Phasen aus. Das Mischungsverhalten ist schematisch in Abb. 8.2 dargestellt. Um die dreidimensionale Trennfläche (Übergang zwischen dem Ein- und Zweiphasengebiet) beschreiben zu können, wurde das quaternäre Phasendiagramm (Tetraeder) wieder auf ternäre Phasendiagramme (gleichseitige Dreiecke) mit konstanten Hexanolanteil zurückführt. Die binodalen Kurven in den ternären Phasendiagrammen können mit der Gleichung von Hand (1939) beschrieben werden. Zwischen den einzelnen binodalen Kurven kann interpoliert werden, so dass die komplette Trennfläche zwischen dem Einphasen- und dem Zweiphasengebiet im numerischen Model beschrieben werden kann.



**Abb. 8.2: Schematische Darstellung des quaternären Phasendiagramms für Wasser, 1 Hexanol, 2 Propanol und PCE**

Für alle möglichen Phasenzustände müssen die konstitutiven Beziehungen aufgestellt werden. Die Aufstellung der konstitutiven Beziehungen ist in Greiner 2004 dargestellt.

### 8.3.2 Modellkonzept

Ein Modellkonzept zur Implementierung der konstitutiven Beziehungen in das numerische Modell MUFTE-UG wurde im Rahmen einer Diplomarbeit erarbeitet. Als Primärvariablen wurden der Druck in der NAPL-Phase und die Gesamtmolenbrüche von Wasser, 2-Propanol sowie 1-Hexanol ausgewählt.

Ausgehend von einem „Switchkriterium“, das die Aufteilung der Phasen beschreibt, werden aus den vier Primärvariablen alle weiteren Größen berechnet. Da nicht für alle Parameter Gleichungen vorlagen, die direkt aus Messungen abgeleitet werden konnten, war es notwendig, Näherungslösungen für einzelne Beziehungen wie z.B. das Diffusionsverhalten zu verwenden. Auch für die Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung lagen keine Messwerte für die verschiedenen Phasen vor. Mit Hilfe eines Skalierungsfaktors, der aus der Grenzflächenspannung zwischen den einzelnen Phasen berechnet wurde, konnte diese Beziehung angepasst werden. Die Grenzflächenspannung zwischen zwei Phasen konnte wiederum aus den Zusammensetzungen (Molenbrüche) der Phasen berechnet werden.

### 8.3.3 Verifizierung und Validierung

Eine direkte Verifizierung der numerischen Simulationen mit einer analytischen Lösung ist aufgrund der Komplexität der Alkoholspülung und nicht vorhandener analytischer Lösungen nicht möglich. Mit Hilfe von „einfachen“ eindimensionalen Säulenversuchen mit bekannten Randbedingungen soll das Modell auf Zuverlässigkeit überprüft und validiert werden. Eine Glassäule, die homogen mit Sand gefüllt ist und PCE in residualer

Sättigung enthält und von unten nach oben mit Alkoholcocktail durchströmt wird, bietet aufgrund des eindimensionalen Strömungsfelds solche Randbedingungen.

Aufbauend auf den Ergebnissen muss das Modell gegebenenfalls angepasst werden. Der nächste Schritt wird die Simulation von komplexeren Systemen sein, die dann ebenfalls mit den Versuchsergebnissen verglichen werden.

#### **8.3.4 Zusammenfassung und Ausblick**

Zur Erweiterung des numerischen Modells MUFTE-UG war es notwendig, zahlreiche klein- und mittelskalige Versuche durchzuführen, um alle relevanten Parameter der Alkoholspülung zu untersuchen. Aufbauend auf diesen Ergebnissen wurden Gleichungen für die konstitutiven Beziehungen aufgestellt. Nach Aufstellung eines Modellkonzepts werden diese in MUFTE-UG implementiert. Nachdem das numerische Modell auf Zuverlässigkeit überprüft und verifiziert ist, kann es als Planungsinstrument eingesetzt werden. So können beispielsweise komplexe Brunnenanordnungen und Pumpraten für eine Pilotsanierung simuliert und getestet werden.

Außerdem besteht die Möglichkeit das numerische Modell auf andere Mehrkomponenten Systeme (verschiedene Alkohole und Schadstoffe) zu übertragen. Dazu müssen „nur“ klein- und mittelskalige Versuche durchgeführt werden. Anhand der Ergebnisse werden dann die konstitutiven Beziehungen angepasst.

Ein numerisches Modell wird zwar nie alle Versuche ersetzen können, da es immer nur ein stark vereinfachtes Abbild der Wirklichkeit ist. Mit Hilfe von numerischen Simulationen kann aber die Anzahl von Versuchen wesentlich reduziert werden und auf einfachere Art Parameterstudien betrieben werden, die wertvolle Erkenntnisse für die Einsatzfähigkeit des Verfahrens unter verschiedenste Randbedingungen (Bodenmatrix, Schadstoffart und -mischung, Alkoholcocktail) liefern.

### **8.4 Danksagung**

Die Sanierungsexperimente in VEGAS wurden in Zusammenarbeit mit dem Institut für Hydromechanik, Universität Karlsruhe durchgeführt und dank der Finanzierung des BMBF (FKZ 02 WT0064/65) ermöglicht. Die Implementierung der konstitutiven Beziehungen erfolgte in enger Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Hydromechanik und Hydrosystemmodellierung, Universität Stuttgart.

### **8.5 Literatur**

Greiner, P., Braun, J., Schnieders, J. und H.-P. Koschitzky: Alkoholspülung - Bestimmung der Parameter für ein numerisches Modell. VEGAS - Statuskolloquium 2004 (5. Oktober 2004, Universität Stuttgart), Editor: Barczewski, B., Koschitzky, H.-P.,

- Weber, K. & R. Wege, Institut für Wasserbau, 10/2004. - Nr.: 131 - Seiten: 106-112 - ISBN: 3-933761-34-4
- Hand, D.B. (1939). Dimeric distribution, I, the distribution of a consolute liquid between two immiscible liquids. J. Phys. and Chem., Vol. 34, 1961-2000.
- Helmig, R., Bastian, P., Class, H., Ewing, J., Hinkelmann, R., Huber, R.U., Jakobs, H. und H. Sheta (1998): Architecture of the Modular Program System MUFTE-UG for Simulating Multi-phase Flow and Transport Processes in Heterogeneous Porous Media. Mathematical Geology, Berlin, 1998. - Vol.: 2 - Seiten: 123-131.
- Mohrlok, U., Greiner, Ph., Heinrich, K., Trötschler, O., Schnieders, J., Jirka, G.H., Koschitzky, H.-P., Braun J. (2005): Entwicklung einer weitergehenden Grundwasser-sanierungstechnologie zur Abreinigung von anthropogenen chlorierten Kohlenwasserstoffen hoher Dichte (CKW) durch Alkoholinjektion. Abschlussbericht des gleichlautenden BMBF-Projekts, Institut für Hydromechanik, Karlsruhe, Institut für Wasserbau Stuttgart.
- Stupp, H. d., Bakenhus, A., Lorenz, D.(2005) Grundwasserverunreinigungen durch CKW - Entwicklung des Kenntnisstandes über vier Jahrzehnte. TerraTech 3-4/2005.

## 9 EIN KONZEPT ZUR KOPPLUNG NUMERISCHER MODULE FÜR DIE SIMULATION VON SCHADSTOFFVERSICKERUNG, -AUSBREITUNG UND THERMISCHER SANIERUNG

Holger Class, Steffen Ochs

Lehrstuhl für Hydromechanik und Hydrosystemmodellierung,  
Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart

### 9.1 Motivation

In den vergangenen Jahren wurden auf dem Gebiet der numerischen Simulation von Mehrphasen-Strömungs- und Transportvorgängen im Untergrund eine Vielzahl von leistungsfähigen Modellkonzepten und Programmen unterschiedlichster Komplexität entwickelt. Die Anwendungsbereiche solcher numerischer Modelle im Umweltingenieurwesen umfassen beispielsweise Schadstoffausbreitungs- und Sanierungsszenarien (Falta et al., 1992; Forsyth, 1993; Class und Helmig, 2002), Nah- und Fernfelduntersuchungen im Bereich von Endlagern für radioaktive Stoffe

(z.B. Bastian et al., 2000), neuerdings die Untersuchung von CO<sub>2</sub>-Injektion (Sequestrierung) in geologischen Formationen zur Verminderung der Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre (z.B. Nordbotten et al., 2005), und auch technische Mehrphasen-Mehrkomponenten-Prozesse wie z.B. in Papier oder in Diffusionsschichten von Brennstoffzellen (z.B. Acosta et al., 2005).

Jedes Modellkonzept erfordert eine Idealisierung der in der Natur bzw. im technischen System ablaufenden Prozesse. Der Grad der Abstraktion im Modell hängt in der Regel auch von der räumlichen und zeitlichen Betrachtungsskala ab.

Auf kleineren Skalen können mit vertretbarem Rechenaufwand detaillierte Modelle höherer Komplexität formuliert werden. Beim Übergang auf größere Skalen werden Details der physikalischen Prozesse entweder vernachlässigt, weil sie auf der großen Skala keine wichtige Rolle spielen, oder ihre Auswirkungen werden mit Hilfe so genannter Upscaling- bzw. Multi-Skalen-Techniken auf der größeren Skala berücksichtigt. Die Entwicklung von Upscaling-Ansätzen ist derzeit ein Gebiet intensiver Forschungsarbeit, wobei für viele Anwendungen jedoch derzeit noch keine Konzepte vorliegen, die sinnvolle Simulationen auf der Feldskala erlauben. Helmig (1997) gibt einen ausführlichen Überblick über Simulationsmethoden und Konzepte für Mehrphasensysteme in porösen Medien.

In diesem Beitrag stellen wir eine weitere Möglichkeit vor, großskalige Berechnungen, erforderliche Modellkomplexität und akzeptablen Rechenaufwand zusammen zu bringen. Unter der Annahme, dass sich die ablaufenden Prozesse mit der Zeit verändern bzw. im zeitlichen Verlauf an Bedeutung gegenüber anderen Prozessen an Bedeutung

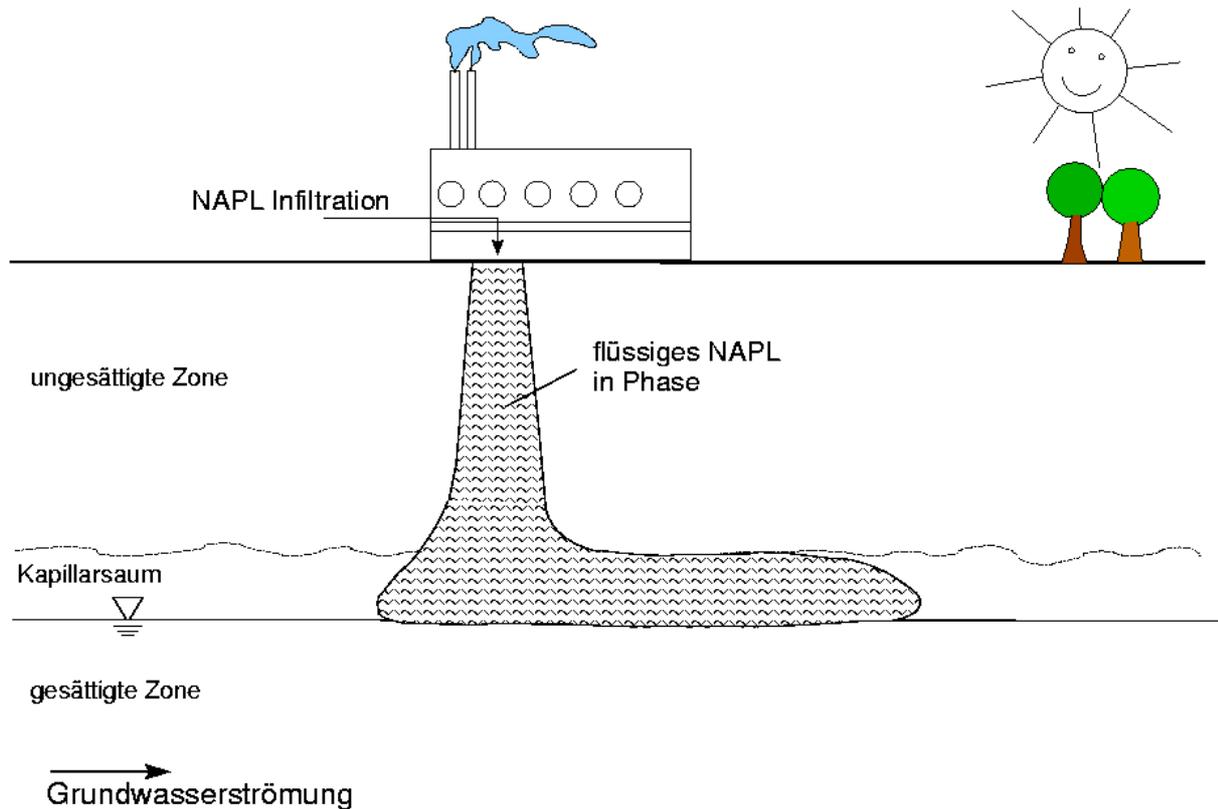
verlieren/gewinnen, kann ein Modellproblem in Zeitintervalle eingeteilt werden, wobei jeweils verschiedene Modellkonzepte zur Anwendung kommen. Die Schwierigkeit besteht darin, die Schnittstellen zwischen den Modellen zu definieren bzw. die jeweils vorhandenen Primärvariablen eines Konzeptes zu initialisieren.

Nachfolgend soll dies am Beispiel einer Schadstoffversickerung und -ausbreitung mit anschließender Bodensanierung gezeigt werden.

## **9.2 Ablaufende Mehrphasenprozesse**

### **9.2.1 Schadstoffversickerung und -ausbreitung als Phase**

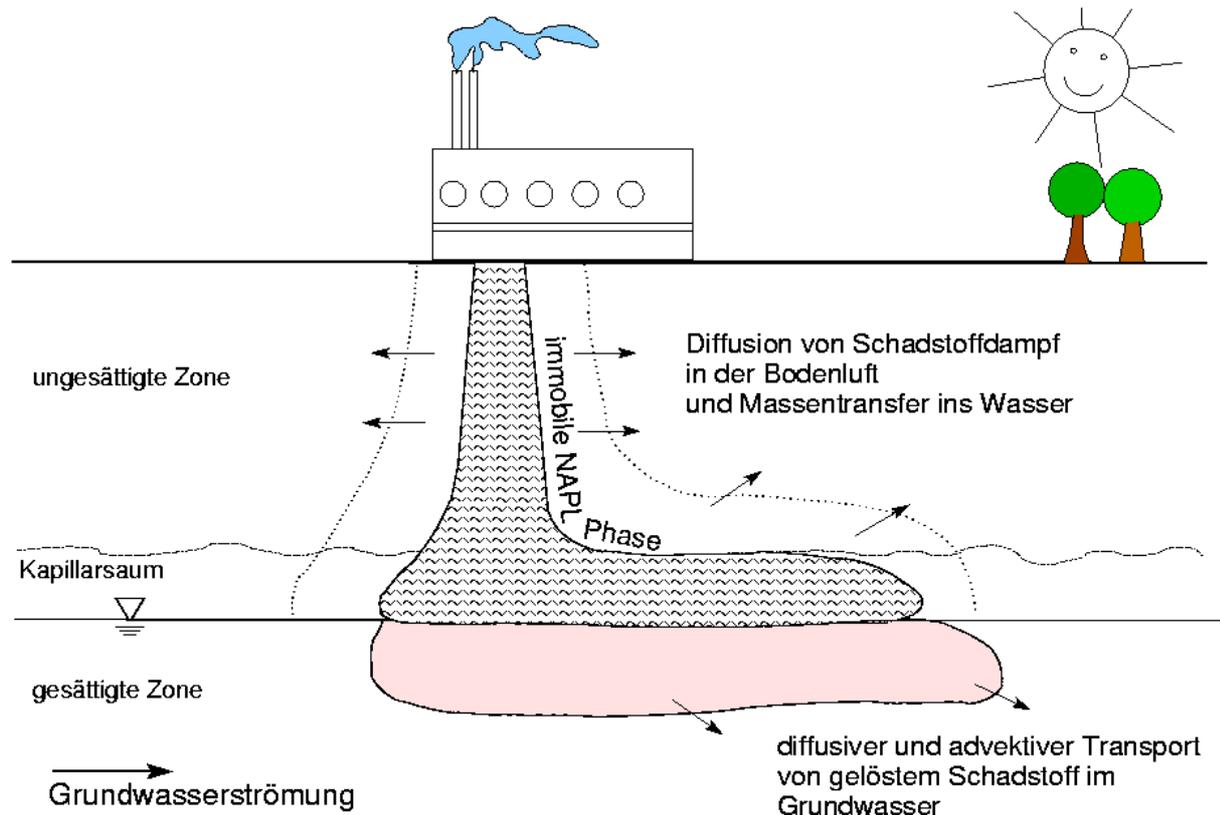
Wir nehmen zunächst an, dass ein NAPL (Non-Aqueous Phase Liquid) in den Untergrund eindringen kann und durch die ungesättigte Zone bis zum Erreichen des Kapillarsaums und des Grundwasserspiegels sickert. Wie in Abb. 9.1 dargestellt, bildet sich im Fall eines LNAPLs (Dichte kleiner als die des Wassers) ein Pool auf dem Grundwasserspiegel aus. Dieser Vorgang findet in vergleichsweise kurzer Zeit statt. Die Beschreibung in einem numerischen Modell erfordert ein isothermes Mehrphasenkonzept, wobei die drei Phasen Wasser, Gas (Bodenluft) und NAPL zu berücksichtigen sind. Der Einfluss von Massentransfer wie z.B. Evaporation, Lösung oder Adsorption am Korngerüst spielt für den Versickerungsvorgang und die Ausbreitung des Schadstoffs als Phase eine untergeordnete Rolle.



**Abb. 9.1: Versickerung und Ausbreitung der flüssigen Phase**

### 9.2.2 Ausbreitung von gelöstem und evaporiertem Schadstoff

Die Ausbreitung der flüssigen Schadstoffphase kommt je nach Menge ab einem bestimmten Zeitpunkt zur Ruhe, nämlich dann, wenn sich die Sättigung des Schadstoffs der residualen Sättigung annähert. Nunmehr gewinnen der Massentransfer sowie die Ausbreitung des Schadstoffes in den anderen Fluidphasen an Einfluss. Das in Wasser gelöste bzw. in die Bodenluft evaporierte NAPL wird zum einen advektiv mit der Strömung der jeweiligen Phase transportiert und kann sich andererseits auch diffusiv in den Phasen verteilen. Diese Vorgänge können über sehr lange Zeiträume hinweg andauern. Um sie in einem Modell beschreiben zu können ist ein Dreiphasen-Dreikomponenten-Konzept erforderlich.



**Abb. 9.2: Ausbreitung von gelöstem und evaporiertem Schadstoff in Wasser und Bodenluft**

### 9.2.3 Thermisch unterstützte Sanierung

Wendet man für den oben beschriebenen Schadensfall zunächst eine Bodenluftabsaugung an, so kann relativ schnell der in der Bodenluft ausgebreitete Schadstoff erfasst werden. Nach kurzer Zeit gehen jedoch die Austragsraten stark zurück, sodass zur effizienten Verkürzung der Sanierungszeit oft thermisch unterstützte Verfahren wie z.B. die Injektion von Dampf und Luft zur Anwendung kommen. Das Fortschreiten der Dampffront im Untergrund ist wesentlich beeinflusst durch thermophysikalische Prozesse wie Verdampfung und Kondensation von Wasser und Schadstoff sowie Wärmeübergänge zwischen den Phasen, vorwiegend durch Abgabe der Verdampfungsenthalpie an das Korngerüst. Ein entsprechendes Modell erfordert die Berücksichtigung der Energiebilanzgleichung, wobei in vielen Fällen die Annahme von lokalem thermischem Gleichgewicht begründbar ist.

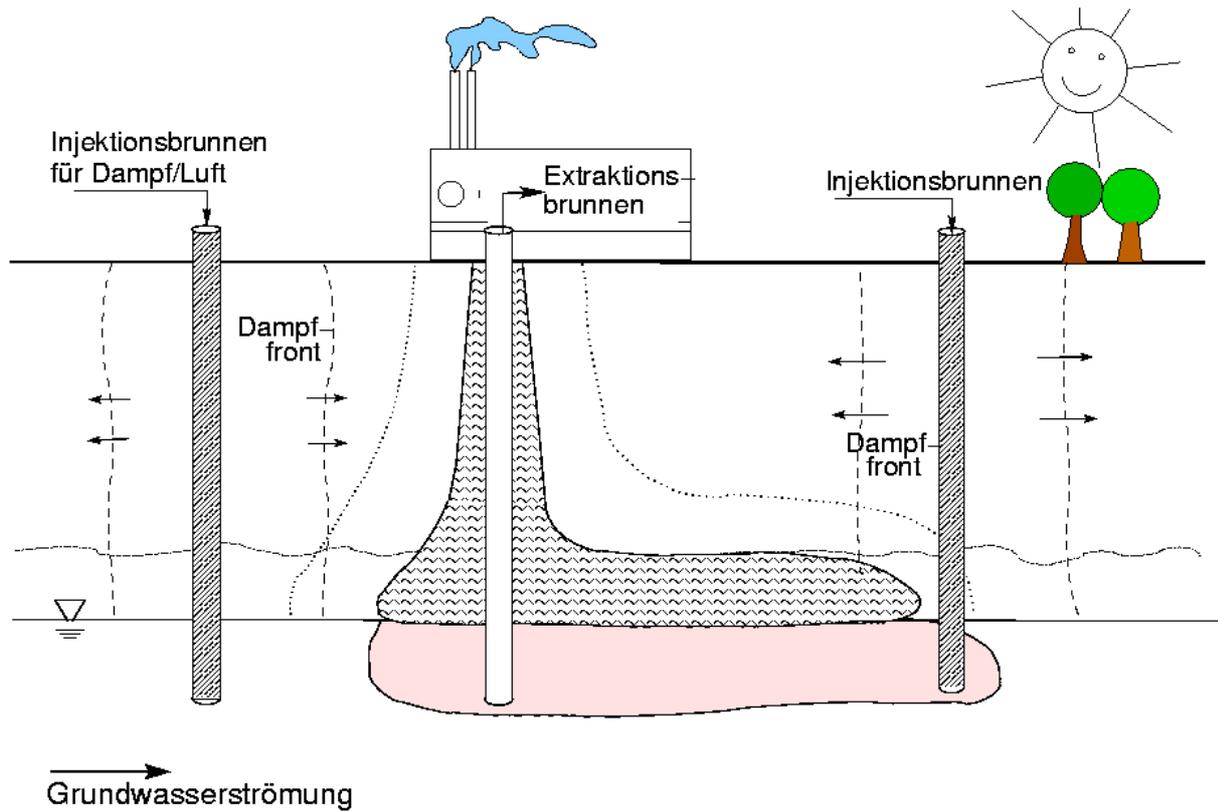


Abb. 9.3: Thermisch unterstützte Sanierung mit Dampf-/Luftinjektion

### 9.3 Modellkopplung

Ein wichtiger Aspekt bei der effizienten Anpassung der Modellkomplexität ist der Rechenaufwand bzw. die Rechenzeit. Der geringste Rechenaufwand wird in der Regel mit dem einfachsten Modell erzielt. In diesem Fall wäre dies das isotherme Dreiphasenmodell zur Beschreibung der Schadstoffversickerung.

Solange nur isotherme Prozesse simuliert werden, kann die Anzahl der Unbekannten im Modell auch bei Mehrkomponentenmodellen noch konstant gehalten werden, jedoch steigt der Rechenaufwand entsprechend der höheren Komplexität der Gleichungen an. Nichtisotherme Systeme erfordern zusätzliche Gleichungen für die thermische Energie (Class et al., 2002). Pro Energiegleichung (für lokales thermische Gleichgewicht genügt eine Energiegleichung) vergrößert sich die Zahl der Unbekannten im System um  $1 \cdot \text{Anzahl der Knoten}$ .

Will man die oben beschriebenen Mehrphasen- bzw. Mehrphasen-Mehrkomponenten-Vorgänge mit Modellen, die möglichst an die erforderliche Komplexität angepasst sind, beschreiben, so ist eine Kopplungsstrategie erforderlich, um die Parameterübergabe zwischen den Modellen zu realisieren. Die Schwierigkeit besteht darin, dass beim Übergang von einem einfachen auf ein komplexeres Modell in der Regel Detailinformationen fehlen. Beispielsweise erfordert ein nichtisothermes Dreiphasen-Dreikompo-

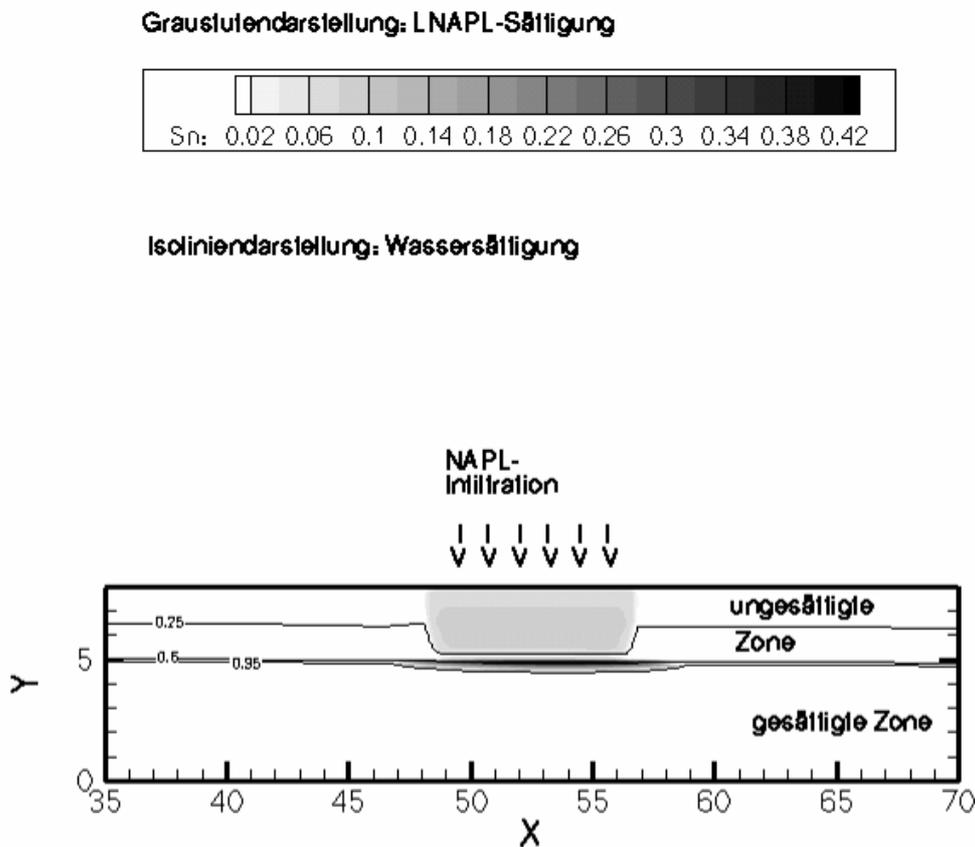
nenten-Modell in Gebieten, in denen nur Wasser und Gas als Phasen vorliegen, die Zuweisung eines Molen- bzw. Massenbruchs für die Komponente Schadstoff in einer der existenten Phasen. Im isothermen Dreiphasenmodell liegen jedoch keine Molen- bzw. Massenbrüche vor, da Massentransfer zwischen den Phasen in den Modellannahmen vernachlässigt wurde. Der nachfolgende Algorithmus zeigt exemplarisch einen möglichen Variablentransfer vom isothermen Dreiphasenmodell (3p) zum nichtisothermen Dreiphasen-Dreikomponenten-Modell (3p3cni). Die Primärvariablen des 3p-Modells sind der Druck der Gasphase  $p_g$  sowie die Sättigungen  $S_w$  und  $S_n$ . Im 3p3cni-Modell sind die Primärvariablen abhängig vom Phasenzustand.

Set  $T = T_{init} = \text{const.}$  im gesamten Modellgebiet

```
if  $S_w > \epsilon$                                /* z.B.  $\epsilon = 10^{-6}$  */ {
  if  $S_n > \epsilon$ 
    {
       $S_{n,new} = S_n$ ;
      state = NWG;          /* alle drei Phasen existent */
    }
  else
    {
      /* es gilt:  $S_{n,new} = 0$  */
       $x_g^c = 1.E-10$ ;      /* willkürlicher aber kleiner Wert! */
      state = WG;          /* nur Wasser und Gasphase */
    }
   $p_{g,new} = p_g$ ;
   $S_{w,new} = S_w$ ;
  if ( $S_w == 1$ )
    {
      /* Zugunsten der Robustheit sollte Phasenzustand W */
      /* im 3p3cni-Modell nicht initialisiert werden */
       $S_{w,new} = 0.999$ ;
    }
}
else /* lasse dann nur Phasenzustand G zu */
  {
     $p_{g,new} = p_g$ ;
     $x_g^w = 1.E-10$ ;      /* willkürlicher aber kleiner Wert */
     $x_g^c = 1.E-10$ ;      /* willkürlicher aber kleiner Wert */
    state = WG;
  }
```

## 9.4 Beispielanwendung

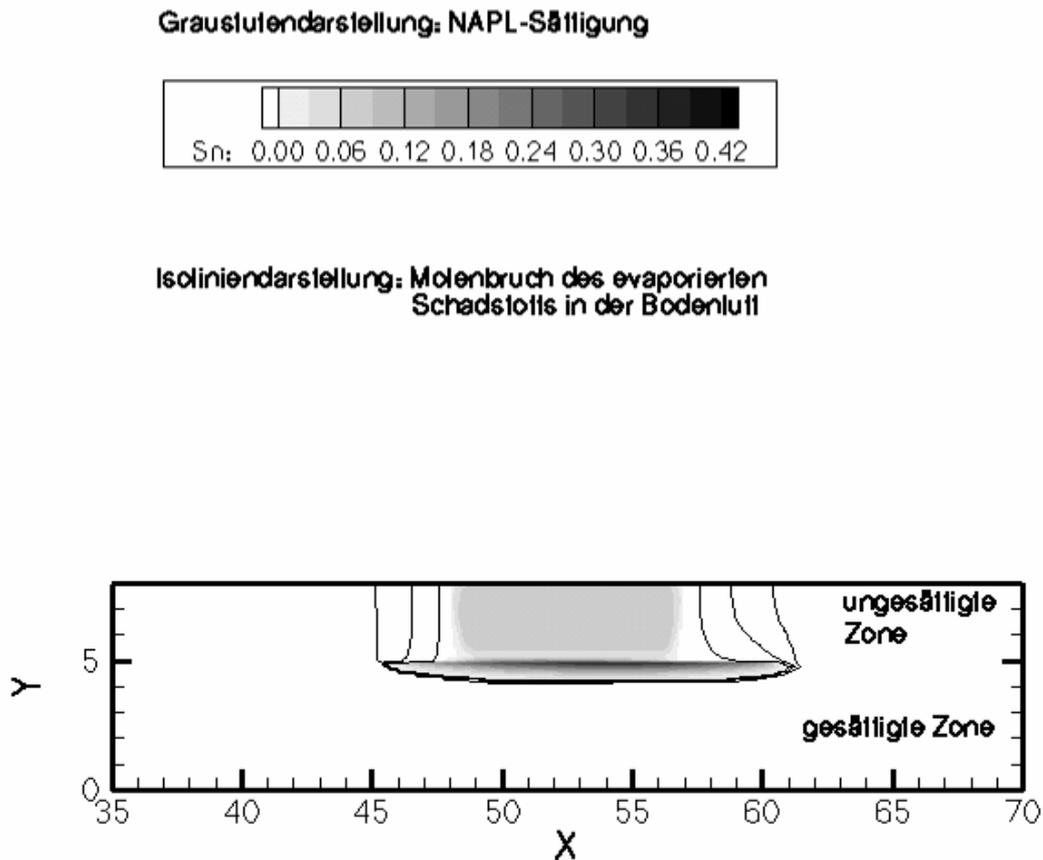
Die oben beschriebene Modellkopplung wird nachfolgend exemplarisch angewendet. Das Gebiet des zweidimensionalen Beispielproblems umfasst 130m in der Längsausdehnung bei 8m unter GOK. Unterhalb von ca. 5m befindet sich die gesättigte Zone, darüber die ungesättigte Zone mit Kapillarsaum. Im Bereich zwischen 48.75 und 56.25m vom linken Rand entfernt versickert ein LNAPL, z.B. Benzin (gleichmäßig verteilt über 3 Tage versickern insgesamt 972kg bzw.  $1.209\text{m}^3$  pro Meter Breite). Bei einer Porosität von 0.4 und einer Permeabilität von  $10^{-11}\text{m}^2$  ergibt sich dann nach 50 Tagen Simulationszeit mit dem Dreiphasenmodul 3p das in Abb. 9.4 dargestellte Szenario.



**Abb. 9.4: LNAPL-Versickerung und anschließende Ausbreitung der Phase nach 50 Tagen Simulationszeit , gerechnet mit MUFTE-Modul 3p**

Die Ausgabedatei des 3p-Moduls nach 50 Tagen wird entsprechend dem oben formulierten Algorithmus in das Eingabeformat des 3p3cni-Moduls konvertiert, welches in der Lage ist, Massentransferprozesse und Ausbreitung von evaporiertem und gelöstem Schadstoff zu beschreiben. Während die Ausbreitungsgeschwindigkeit von gelöstem Schadstoff aufgrund kleiner Diffusionskoeffizienten wesentlich von Geschwindigkeit der Grundwasserströmung abhängt (hier: ca. 5cm/Tag), kann sich der evaporierte Schadstoff bedingt durch den größeren Diffusionskoeffizienten in der Bodenluft vergleichs-

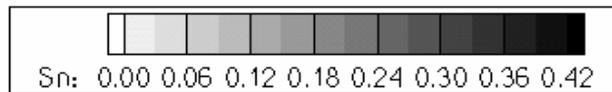
weise schnell ausbreiten. Abb. 9.5 zeigt die mit dem 3p3cni-Modul berechnete Verteilung nach 18 Tagen simulierter Zeit.



**Abb. 9.5: Diffusive Ausbreitung von evaporiertem Schadstoff in der Bodenluft**

An den Stellen  $x=45\text{m}$  und  $x=60\text{m}$  werden nun Injektionsbrunnen platziert, um mit Hilfe einer Dampfinjektion die Schadstoffquelle zu sanieren. In der Mitte der Kontamination bei  $x=52.5\text{m}$  befindet sich ein Extraktionsbrunnen, der durch einen Dirichlet-Rand mit konstantem atmosphärischem Druck modelliert wird. Die Injektionsrate in den beiden Injektionsbrunnen beträgt jeweils  $69\text{kg/h}$ , wobei ca. 90% Dampf und 10% Luft injiziert wird. Die Dampffront breitet sich in Richtung der Kontamination aus, der flüssige Schadstoff wird verdampft und an der Dampffront durch wiederholtes Auskondensieren akkumuliert. Dadurch erhöht sich an der Front die Mobilität des flüssigen LNAPLs, so dass das Absinken auf den Grundwasserspiegel verstärkt wird. In Abb. 9.6 ist die Situation nach 18 Stunden simulierter Zeit dargestellt. Der Extraktionsbrunnen ist durch einen schmalen Bereich, in dem keine NAPL-Sättigung vorliegt erkennbar. Im Modell wird dies durch eine Dirichlet-Randbedingung abgebildet.

Graustufendarstellung: NAPL-Sättigung



Isolinien-Darstellung: Temperatur (Dampfausbreitung)

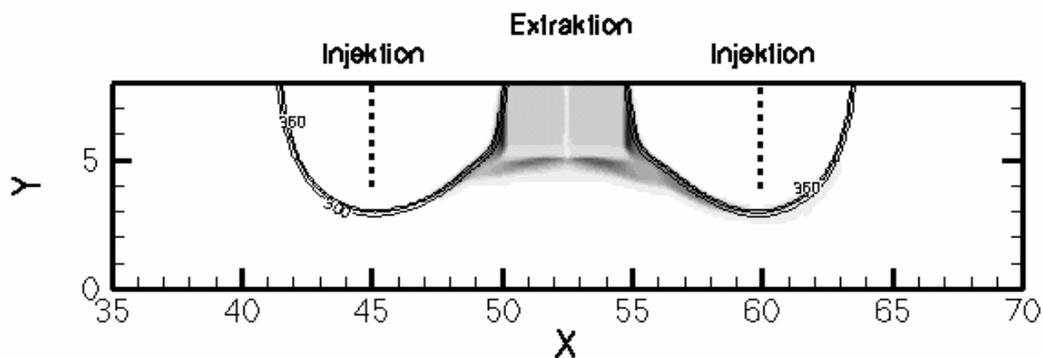


Abb. 9.6: Fortschreiten der Dampffront nach 18 Stunden Simulationszeit

## 9.5 Zusammenfassung und Ausblick

Zur effizienten Ausnutzung von zu Verfügung stehenden Rechenkapazitäten und Modellkonzepten ist es in vielen Fällen von Vorteil, wenn Modelle entsprechend ihrer problemspezifisch erforderlichen Komplexität miteinander gekoppelt werden, sofern sich die physikalischen Prozesse zeitlich und/oder räumlich aufgliedern lassen. Dies wurde exemplarisch in diesem Beitrag anhand einer Schadstoffversickerung mit anschließender Ausbreitung und Sanierung vorgestellt. Von entscheidender Bedeutung ist die Definition von Kopplungsschnittstellen, die den Transfer der Modellparameter (Primärvariablen) sowie ggf. weitere Informationen von einem zum nächsten Modell gewährleisten.

Insbesondere für praxisrelevante Probleme auf größerer Skala ist die Verwendung von Kopplungsansätzen wichtig, um die nach wie vor limitierenden Rechenzeiten zu reduzieren.

## 9.6 Referenzen

- Acosta M., Eigenberger G., Merten C., Class H., Helmig R., Thoben B., Müller-Steinhagen H., 2005:  
Modeling non-isothermal two-phase multicomponent flow in the cathode of PEM fuel cells. submitted to: J. Power Sources.
- Bastian P., Chen Z., Ewing R.E., Helmig R., Jakobs H., Reichenberger V., 2000:  
Numerical simulation of multiphase flow in fractured porous media. in: Lecture Notes in Physics, pp. 80-92, Springer Verlag.
- Class H., Helmig R., Bastian P., 2002:  
Numerical Simulation of Nonisothermal Multiphase Multicomponent Processes in Porous Media - 1. An Efficient Solution Technique. Adv. Water Resour. 25, pp. 533-550.
- Class H., Helmig R., 2002:  
Numerical Simulation of Nonisothermal Multiphase Multicomponent Processes in Porous Media – 2. Applications for the Injection of Steam and Air. Adv. Water Resour. 25, pp. 551-564.
- Falta R.W., Pruess K., Javandel I., Witherspoon P.A., 1992:  
Numerical Modeling of Steam Injection for the Removal of Nonaqueous Phase Liquids From the Subsurface. 1. Numerical Formulation. Water Resour. Res. 28(2), pp. 433-449.
- Forsyth P.A., 1993:  
Three dimensional modeling of steam flush for DNAPL site remediation. CS-93-56, University of Waterloo, Dep. Of Computer Science.
- Helmig R., 1997:  
Multiphase Flow and Transport Processes in the Subsurface - A Contribution to the Modeling of Hydrosystems. Springer Verlag.
- Nordbotten J.M., Celia M.A., Bachu S., 2005:  
Injection and Storage of CO<sub>2</sub> in Deep Saline Aquifers. Transport in Porous Media 58(3), pp.339-360.

## **10 ATLASTEN UND ATLASTENSANIERUNG IN BADEN-WÜRTTEMBERG AUS SICHT DER LFU**

Helmut Krug, LfU, Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg

### **10.1 Einleitung**

Altlasten - noch in den 60er Jahren wusste man weder was eine Altlast ist, geschweige denn wie man damit umzugehen hat. Mitte der 70er Jahre brachten einige spektakuläre Einzelfälle wie z. B. die Dioxin-Problematik in Rheinfelden und Rastatt die Altlastenproblematik in das Bewusstsein der Bürger und Politiker. Sehr schnell wurde deutlich, dass Altlasten die Gesundheit der Bürger in einem nicht akzeptablen Umfang gefährden können und daher die erforderlichen Schritte einzuleiten sind, um die Bürger angemessen zu schützen. Neben diesen spektakulären Einzelfällen häuften sich auch Grundwasserverunreinigungen mit LCKW, die in Einzelfällen zur Stilllegung von Wasserwerken führten bzw. entsprechende Reinigungsmaßnahmen für das Trinkwasser erforderlich machten. Altlasten stellen daher nicht nur eine akute Bedrohung der Gesundheit, sondern sie können die elementaren Lebensgrundlagen, wie hier z. B. die Trinkwasserversorgung, nachhaltig gefährden. Der sorglose und unsachgemäße Umgang mit Gefahrstoffen und Chemikalien beruhte in den meisten Fällen auf Unkenntnis, da das Thema Umwelt bzw. Umweltschutz in den Köpfen der allermeisten Menschen noch nicht angekommen war. Sie konnten daher nicht abschätzen, welche schwerwiegenden Auswirkungen ihr Handeln hervorrief und wir sollten diesen Sachverhalt gerechterweise bei der Beurteilung berücksichtigen, auch wenn wir manchmal fassungslos den eingetretenen Schäden gegenüberstehen. Auch in der Gegenwart ist man in dieser Hinsicht vor Überraschungen nicht gefeit: Der Benzinzusatzstoff MTBE, der unter anderem auch zur Verbesserung des Abgasverhaltens bei Verbrennungsmotoren beitragen kann, erwies sich aus Sicht des Grundwasserschutzes als sehr problematisch. Bisher wurden Schadensfälle bei Tankstellen und Tanklager im Vergleich zu LCKW-Schadensfällen als verhältnismäßig unproblematisch eingestuft, da die Schadstoffausbreitung in einem Grundwasserleiter meist durch mikrobiologische Abbauvorgänge begrenzt war. MTBE hat die Problematik wegen seiner hohen Mobilität bei gleichzeitig sehr schlechter mikrobiologischer Abbaubarkeit erheblich verschärft.

### **10.2 Rückblick**

Baden-Württemberg hat im Vergleich zu anderen Bundesländern schon früh auf das Problem Altlasten reagiert und bereits in der ersten Hälfte der 80er Jahre das Thema aufgegriffen. Ein erster Meilenstein hierbei war der „Leitfaden für die Beurteilung und Behandlung von Grundwasserverunreinigungen durch leichtflüchtige Chlorkohlenwas-

serstoffe (LCKW)“, der von dem damaligen Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft, Umwelt und Forsten Baden-Württemberg herausgegeben wurde und an dessen Erarbeitung die LfU neben anderen Behörden maßgeblich beteiligt war.

Der genannte Leitfaden stellt mit Sicherheit einer der ersten gelungenen Beispiele dar, altlastenrelevante Beiträge der einzelnen Wissensgebiete zusammenzufassen und praxisnah darzustellen. Der Leitfaden spannt einen großen Bogen von den erforderlichen Präventivmaßnahmen bei der Lagerung und beim Umgang mit LCKW über das Verhalten dieser Stoffe im Grundwasserleiter bis hin zu den technischen Möglichkeiten zur Erkundung und Sanierung von Grundwasserverunreinigungen. Diese Herangehensweise kann auch als Geburt des neuen Fachgebietes „Altlasten“ aufgefasst werden, das sowohl wissenschaftliche und technische als auch verwaltungstechnische und rechtliche Aspekte beinhaltet.

Im März 1987 wurde mit der Gründung des „Instituts für Altlastensanierung“ bei der LfU die systematische Altlastenbearbeitung in Baden-Württemberg initiiert. Die „Konzeption zur Behandlung altlastverdächtiger Flächen und Altlasten in Baden-Württemberg“, die am 17. Oktober 1988 vom Ministerrat verabschiedet wurde, sieht zur Bewältigung des Altlastenproblems ein stufenweises Vorgehen vor.

**Als Ziel wurden folgende Schwerpunkte formuliert:**

- eine vollständige, flächendeckende Erfassung altlastverdächtiger Flächen,
- die abgestufte Erkundung altlastverdächtiger Flächen,
- die Beurteilung ihres Gefährdungspotentials sowie
- die Reduzierung der von Altlasten ausgehenden Gefährdungen auf ein vertretbares Maß

**Wesentliche Bestandteile des Stufenplans:**

- Die Altlastenbearbeitung in Baden-Württemberg erfolgt stufenweise mit einer sehr engen Verzahnung von aufeinander folgenden Bearbeitungs- bzw. Erkundungsschritten und einer jeweils dazwischengeschalteten Bewertung.
- Diese Bewertung gliedert sich in insgesamt fünf Bewertungsschritte, wobei jeder Schritt ein bestimmtes „Beweisniveau“ voraussetzt.
- Jedes Beweisniveau erfordert einen vorgegebenen Kenntnis- bzw. Erkundungsstand der betreffenden Altlast.
- Es erfolgt je nach Relevanz eine besondere Bewertung der vier Schutzgüter Grundwasser, Oberflächengewässer, Mensch und Pflanze.

Diese Vorgehensweise wurde im sog. „Altlastenhandbuch Baden-Württemberg“ dokumentiert und ist in den wesentlichen Grundzügen heute noch aktuell. Viele Bundesländer, sowie die Nachbarländer Österreich und die Schweiz haben sich bei ihrer Vorgehensweise bei der Altlastenproblematik an Baden-Württemberg orientiert und selbst

das vor einigen Jahren verabschiedete Bundesbodenschutzgesetz scheint hiervon beeinflusst worden zu sein.

Diese stufenweise Bearbeitung ermöglicht eine frühzeitige Reduzierung der zu bearbeitenden Fälle und ermöglicht die Priorisierung der Altlasten, die einen vordringlichen Handlungsbedarf aufweisen. Zur Gewährleistung einer landeseinheitlichen Vorgehensweise und als Voraussetzung der Förderung kommunaler Altlasten müssen alle in der so genannten Bewertungskommission bei den 44 Stadt- und Landkreise bewertet werden. Die LfU ist hier „Pflichtmitglied“ und sieht auch weiterhin eine wichtige Aufgabe darin, die unteren Verwaltungsbehörden entsprechend zu beraten und zu unterstützen.

### **10.3 Flächendeckende historische Erhebung**

In Baden-Württemberg wurde bereits 1988 mit einer flächendeckenden historischen Erhebung aller altlastenverdächtigen Flächen begonnen. Die historische Erhebung als erstmalige landesweite Erfassung wurde 2002 abgeschlossen. Damit sind alle altlastenverdächtigen Flächen bekannt, die bis 2002 entstanden sind. Die ersten Erhebungen wurden 1991 im Landkreis Ravensburg und in der Stadt Karlsruhe begonnen. Sie wie auch einige andere frühere Erhebungen erfassen daher nur den Zeitraum bis Mitte der 90er Jahre, während die jüngste abgeschlossene Erhebung Fälle bis 2002 berücksichtigt. Da alle abgemeldeten Betriebe oder in Teilen stillgelegte Bereiche, sofern sie einer Altlasten relevanten Branche angehören, als altlastverdächtige Flächen angesehen und überprüft werden müssen, finden in regelmäßigen Abständen Nacherhebungen statt, um eine möglichst aktuelle Übersicht zu erhalten. In einigen Kreisen haben solche Nacherhebungen bereits begonnen und sind auch in Einzelfällen abgeschlossen.

### **10.4 Finanzierung und Förderung**

Zur finanziellen Unterstützung der betroffenen Städte und Gemeinden bei der Erkundung, Sanierung und Überwachung von altlastverdächtigen Flächen und Altlasten haben Land und Kommunen seit 1988 den so genannten Altlastenfonds geschaffen. Der Altlastenfonds dient ausschließlich der Finanzierung kommunaler Altlasten. Zuwendungsfähige Aufwendungen sind:

- Erhebungs- und Erkundungsmaßnahmen
- Sicherungs- und Sanierungsmaßnahmen
- Überwachungsmaßnahmen

Förderfähigkeit und Umfang der Förderung wird nach den „Förderrichtlinien Altlasten“, die letztmals im Dezember 2004 novelliert wurden, geregelt. Neben den kommunalen Altlasten spielen die privaten Altlasten eine bedeutende Rolle. Von 1991 bis 1996 standen Fördermittel für private Altlasten aus der Sonderabfallabgabe zur Verfügung.

Nach dem Wegfall dieser Finanzierungsmöglichkeit wurden ab dem Haushaltsjahr 2000 für private Altlasten Landesmittel in Höhe von ca. 800.000 Euro eingestellt. Mit diesen Mitteln wird in erster Linie die Gefahrverdachtserforschung bei den privaten Flächen zu 50 % gefördert.

Bis heute hat das Land Baden-Württemberg ca. 600 Millionen Euro als Fördermittel für kommunale Altlasten und ca. 25 Millionen Euro für private Altlasten bereitgestellt. Zählt man zu dieser Summe noch den Anteil der Kommunen, der nicht durch Förderung abgedeckt wurde und die große Anzahl privater Altlasten, so dürfte sich das Gesamtvolumen der Altlastenbearbeitung auf sicherlich über einer Milliarde Euro belaufen. Diese möglicherweise erschreckend hohe Summe hat nicht nur die Umweltsituation in Baden-Württemberg merklich verbessert, sondern es ist auch ein nicht mehr zu vernachlässigender Wirtschaftszweig herangewachsen. Die Arbeitsplätze, die hierbei entstanden sind, sind meist überdurchschnittlich qualifiziert und die Altlastenbranche wie Ingenieurbüros, Sanierungsfirmen und Labors sind auch jenseits der Landesgrenzen konkurrenzfähig. Schätzungsweise werden zukünftig noch mindestens 1 bis 1,5 Milliarden Euro zur Behandlung kommunaler und privater Altlasten benötigt. Der hierzu notwendige Zeitbedarf liegt mit Sicherheit bei mindestens zwanzig Jahren.

## **10.5 Modellstandorte und Referenzstandorte**

Die Modellstandorte, die Vorhaben mit Modellcharakter und Referenzstandorte sind wichtige Bestandteile der systematischen Altlastenbearbeitung in Baden-Württemberg. 1987, als das Modellstandortkonzept entwickelt und mit seiner Umsetzung begonnen wurde, waren die zur Verfügung stehenden Technologien für die Erkundung und Sanierung von Altlasten begrenzt, es lagen wenig praktische Erfahrungen mit diesen Techniken vor, so dass ein zielgerichteter Einsatz dieser Techniken in vielen Fällen nur bedingt möglich war. Es wurde auch sehr schnell deutlich, dass für viele Problemstellungen zu dem damaligen Zeitpunkt keine oder nur unzureichende Problemlösungsmöglichkeiten zur Verfügung standen. Dies war der Anlass, 1987 ein Modellstandortkonzept zu entwickeln und mit seiner Umsetzung zu beginnen. Zielsetzung war hierbei sowohl Erfahrungen bei der Erkundung und Sanierung von Altlasten zu gewinnen als auch den Einsatz von innovativen Techniken zu ermöglichen. Von Anfang an wurde eine vertiefte Bearbeitungsweise im Vergleich zu der routinemäßigen Altlastenbearbeitung unter Beteiligung von Forschung und Wissenschaft angestrebt.

Großer Wert wurde darauf gelegt, die gewonnenen Erfahrungen praxisnah auszuwerten und zu bewerten. Die Ergebnisse wurden sowohl in entsprechende Schriftenreihen der LfU als auch in der einschlägigen Fachpresse veröffentlicht, so dass ein zeitnahe Wissenstransfer gewährleistet war. Den an den Modellstandorten beteiligten Ingenieurbüros und wissenschaftlichen Institutionen wurde auf diese Weise die Gelegenheit geboten, praxisnahe Erfahrungen zu gewinnen, was mit Sicherheit der nachfolgend weiteren Altlastenbearbeitung von Nutzen war und auch noch ist. Während die Zielrich-

tung von Modellstandorten, Modellvorhaben und Referenzstandorten vom Grundsatz vergleichbar ist, bestehen bei der organisatorischen Abwicklung der Projekte deutliche Unterschiede:

- Die Maßnahmen an den Modellstandorten wurden unter der organisatorischen und koordinierenden Leitung der LfU durch sog. Standort-Ingenieurbüros durchgeführt. Die betroffenen Behörden und Kommunen waren in einem Arbeitskreis vertreten, in dem das Vorgehen im Einzelnen abgestimmt wurde. Insgesamt wurden neun Modellstandorte in dieser Form bearbeitet. Als ein Beispiel soll hier der Modellstandort "Kiesgrube Eppelheimer Feld" genannt werden. An diesem Standort wurden bis hin zum großtechnischen Maßstab mikrobiologische Sanierungsverfahren schwerpunktmäßig für LCKW-Kontaminationen entwickelt und getestet.
- Vorhaben mit Modellcharakter und Referenzstandorte werden unter Beibehaltung der verwaltungsmäßigen Zuständigkeiten bearbeitet. Die LfU ist in der Form der Fachbegleitung von Einzelmaßnahmen eingebunden. Bisher wurden insgesamt acht Standorte im Rahmen dieser Konzeption bearbeitet. Am Standort "Osterhofen" wird z. B. das Verhalten einer Ammoniumfahne aus Altablagerungen näher untersucht. An den Standorten Kehl und Wernau wurde pilothaft untersucht, ob die Schadstoffausbreitung im Grundwasserleiter durch natürliche Abbauvorgänge begrenzt ist.

### 10.6 Vermittlung von Wissen und Erfahrung

Die Altlastenbearbeitung ist - verglichen mit den klassischen Bereichen der Wasserwirtschaft - ein verhältnismäßig junges Aufgabengebiet. Zu Beginn der systematischen Altlastenbearbeitung lagen weder Regelwerke noch standardisierte Handlungsanleitungen vor. Mit dem Altlastenhandbuch Teil 1 und 2 wurden 1987 die Grundlagen für den Beginn einer systematischen Altlastenbearbeitung geschaffen. Die Altlastenbearbeitung ist im hohen Maße ein interdisziplinäres Fachgebiet. Der Altlastenbearbeiter sowohl in der Verwaltung als auch im Ingenieurbüro kann sich nicht in alle relevanten Wissensgebiete einarbeiten, sondern er benötigt für seine tägliche Arbeit Handbücher und Leitfäden, in denen das benötigte Fachwissen komprimiert und praxisnah zusammengestellt ist.

Bei der Altlastensanierung handelt es sich noch um ein relativ junges Wissensgebiet, so dass bis heute sowohl Forschung als auch Verfahrensentwicklung notwendig ist, um die Innovation auf diesem Gebiet voranzutreiben. Die LfU sieht es als Aufgabe an, aus den umfangreichen Forschungsergebnissen das für die Praxis bedeutsame Wissen herauszuarbeiten und zu veröffentlichen. Neben den Veröffentlichungen der LfU haben sich auch die so genannten „Altlasten und Boden-News“ als ideales Medium erwiesen, wichtige Informationen zum Thema Altlasten zeitnah weiterzugeben.

Trotz der intensiven Bemühungen, den Wissensstand in Handbüchern und sonstigen Veröffentlichungen für die Sachbearbeiter in den Ingenieurbüros und den Behörden möglichst kompakt aufzubereiten, wurden diese aufgrund ihrer Vielzahl mit der Zeit immer schwerer überschaubar, d. h. die Nutzbarkeit war zumindest teilweise eingeschränkt. Mit dem Vorhaben „AlfaWeb“ werden dem Altlasten-Sachbearbeiter die erforderlichen Arbeitshilfen für die Altlastenbearbeitung am Arbeitsplatz bereitgestellt werden. Rechner gestützte Such- und Navigationshilfen, wie sie aus der Internet-Nutzung bekannt sind, sollen den Bearbeiter unterstützen, die relevanten Informationen aufzufinden und sicherstellen, so dass alle Informationsquellen umfassend herangezogen werden können.

Das Vorhaben AlfaWeb ist Teil des Ende 1994 begonnenen Verbundprojektes GLOBUS des Ministeriums für Umwelt und der LfU Baden-Württemberg. In GLOBUS (globale Umweltsachdaten im Umweltinformationssystem Baden-Württemberg) sind verschiedene Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten zur Entwicklung der Konzeption des Umweltinformationssystems gebündelt. Heute stehen die meisten Veröffentlichungen der LfU allen interessierten Personen ohne Einschränkungen Werkzeugen des Internets zur Verfügung. Die Veröffentlichungen sind bundesweit bekannt, werden in der Fachliteratur häufig zitiert und erfahren eine sehr hohe Wertschätzung. Selbst die umfangreichen Arbeitshilfen, die in Baden-Württemberg zur Verfügung stehen, können in manchen Fällen mit speziellen Fragestellungen keine vollständige Unterstützung bieten. Die Einzelfallberatung war und ist auch heute noch eine wichtige Aufgabe der LfU. Bei innovativen Sanierungstechniken liegen häufig sehr wenige praktische Erfahrungen vor, so dass es für die unteren Verwaltungsbehörden schwierig ist, sowohl die Risiken als auch die Chancen, die mit diesen Techniken verbunden sind, abzuschätzen.

Das gilt insbesondere für grundsätzlich neue Herangehensweisen an die Altlastproblematik wie die Beurteilung der Sanierungsnotwendigkeit einer Altlast unter Berücksichtigung der natürlichen Rückhalte- und Abbauvorgänge im Grundwasserleiter. Da in diesen Fällen – in rechtlicher Hinsicht nicht unproblematisch – bei Einhaltung vorgegebener Kriterien auf eine Sanierung verzichtet wird, muss die Entscheidung der zuständigen unteren Verwaltungsbehörde fachlich sehr fundiert sein, um rechtlich belastbar zu sein.

Ähnlich ist die Situation auch bei laufenden Sanierungen, die sich vielfach, wie z. B. die Sanierung von LCKW-Schadensfällen, über viele Jahre hinziehen. In einigen Fällen kann es durchaus sinnvoll sein, laufende Sanierungsmaßnahmen, auch wenn die Sanierungsziele noch nicht vollständig erreicht wurden, abubrechen, wenn die Sanierungsmaßnahme nur noch sehr wenig effektiv ist und unter auch Heranziehung einer Gesamtumweltbilanz wenig sinnvoll erscheint. Diese Fälle sind stark einzelfallspezifisch und die Entscheidung muss fachlich fundiert und nachvollziehbar sein, damit sie gegebenenfalls auch rechtlich Bestand hat.

## 10.7 Zukünftige Arbeitsschwerpunkte bei der Altlastensanierung

Selbst nach 20 Jahren intensiver Altlastenbearbeitung ist diese Generationenaufgabe noch längst nicht abgeschlossen. Die laufenden Nacherhebungen von Altlasten zeigen immer wieder, dass selbst bei diesem ersten Schritt der Altlastenbearbeitung das Ende noch nicht abzusehen ist. Die Wahrscheinlichkeit, dass zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch Altlasten mit besonderer Brisanz entdeckt werden, ist zwar relativ gering, aber bei vielen altlastenverdächtigen Flächen wird es auch in Zukunft notwendig sein, eine systematische Erkundung durchzuführen, um zu einer abschließenden Bewertung der Einzelfälle zu gelangen. Es ist damit zu rechnen, dass noch eine beachtliche Anzahl von Altlasten mit Sanierungsbedarf vor uns liegt.

Die Bewertungskommission unter Beteiligung der LfU hat sich aus Sicht aller Beteiligten bei der Bewältigung der Altlastenproblematik bewährt. Die Anzahl der jährlich bewerteten Altlastenfälle bewegt sich weiterhin auf einem relativ hohen Niveau. Für die LfU bedeutet dies, dass auch in den nächsten Jahren erheblicher personeller Aufwand notwendig ist, um dieser Aufgabe nachzukommen.

In den letzten Jahren häufen sich die Sanierungsfälle, die nicht zu einem positiven Abschluss gebracht werden können, d. h. die vorgegebenen Sanierungsziele können nicht erreicht werden. Typisch hierfür sind LCKW-Sanierungsmaßnahmen, die selbst nach zehn Jahren Sanierungsdauer nicht erfolgreich abgeschlossen werden können. Häufig liegt die Ursache darin begründet, dass die Sanierungsmaßnahme wenig fachgerecht durchgeführt wurde, so dass die Sanierungsmaßnahme verständlicherweise nur wenig effektiv war. Ein Teil dieser Fälle hat durchaus die Perspektive, durch entsprechende Nachbesserungen des Sanierungskonzepts zu einem erfolgreichen Abschluss gebracht zu werden, ein nicht unerheblicher Teil dieser Fälle kann jedoch mit den heutigen zur Verfügung stehenden Möglichkeiten in absehbarer Zeit nicht vollständig saniert werden. In Einzelfällen wird die Sanierung abgebrochen, da sie auf Grund des hohen technischen Aufwandes und der erzielbaren Ergebnisse nicht verhältnismäßig erscheint.

Für die LfU bedeutet dies, dass sie sich zukünftig verstärkt auch mit Altlasten auseinandersetzen muss, die man bereits als bearbeitet betrachtet hat. Viele Altlasten befinden sich heute in der Sanierung und sind daher längst noch nicht abschließend saniert. Das betrifft in besonderem Maße Altlasten, die nicht dekontaminiert, sondern lediglich gesichert wurden. Typische Sicherungstechniken, die hierbei zum Einsatz kommen, sind z. B. die bautechnische Einkapselung einer Altlast oder eine sog. hydraulische Sicherung. Als Maßnahme zur Gefahrenabwehr sind Sicherungsverfahren sehr gut geeignet, da durch sie in relativ kurzer Zeit die Einhaltung der Sanierungsziele möglich ist. Weniger geeignet sind diese Verfahren für eine nachhaltige Lösung der Altlastproblematik, da bautechnische Sicherungen nur eine endliche Lebensdauer aufweisen bzw. hydraulische Sicherungen Laufzeiten aufweisen, die verwaltungstechnisch nicht über-

schaubar sind. Ein Gaswerk mit entsprechenden PAK-Kontaminationen kann nach heutigem Stand des Wissens bis ca. 1000 Jahren Schadstoffe emittieren, d. h. eine entsprechende hydraulische Sicherung müsste für diesen Zeitraum in Betrieb gehalten werden. Die hierbei auflaufenden Kosten und auch die Umweltbelastungen aus dem laufenden Betrieb durch z. B. Energieverbrauch der Pumpen würde sich für diesen Zeitraum in einer Höhe aufsummieren, die nicht mehr zu vertreten ist und macht deutlich, dass Sicherung für eine Altlast keine Dauerlösung darstellt. Dieses Beispiel zeigt sehr deutlich, dass z.Zt. noch kein umfassendes Instrumentarium zur Verfügung steht, die Altlastenproblematik nachhaltig zu lösen. Die Weiter- bzw. Neuentwicklung von Sanierungstechniken oder ganz neue Konzeptionen wie z. B. „Natural Attenuation“ werden bei der Altlastenbearbeitung an Bedeutung gewinnen.

Natürliche Abbau- und Rückhalteprozesse (Natural Attenuation, NA) können die Ausbreitung von Schadstoffen in Grundwasserleitern verlangsamen oder zum Stillstand bringen. Aufmerksam auf dieses Phänomen wurde man durch Beobachtungen, dass bei einer erheblichen Anzahl von Altlasten im Grundwasser Schadstofffahnen von weitaus geringerem Ausmaß als erwartet beobachtet werden. Vielfach gibt es in diesem Zusammenhang auch Hinweise, dass die Schadstoffausbreitung im Grundwasserleiter zum Stillstand gekommen ist, d. h., dass sich eine stationäre Schadstofffahne ausgebildet hat. Es liegt in diesen Fällen ein begrenzter Grundwasserschaden vor, der sich nicht weiter vergrößert.

Bei der Beurteilung der Sanierungsnotwendigkeit von Altlasten fanden diese Sachverhalte bisher keine Berücksichtigung. Entscheidend für die Sanierungsnotwendigkeit einer Altlast sind die Schadstoffkonzentrationen und Schadstofffrachten im direkten Abstrom einer Altlast. Eine Berücksichtigung von NA-Prozessen ermöglicht eine Differenzierung der Altlasten im Hinblick auf Auswirkungen im weiteren Abstrom. Bei Vorliegen entsprechender Voraussetzungen, wie z. B. eine stationäre Schadstofffahne mit einer relativ geringen Ausdehnung, kann möglicherweise auf eine herkömmliche Altlastensanierung verzichtet werden. Voraussetzung ist, dass die natürlichen Abbau- und Rückhalteprozesse nachgewiesen und quantifiziert werden können. Ein Langzeit-Monitoring muss sicherstellen, dass der vorliegende begrenzte Grundwasserschaden keine weitere Ausdehnung erfährt. Die damit verbundene Kostenreduzierung kann erheblich sein und insbesondere auch eine Fokussierung der begrenzten finanziellen Mittel auf wirklich brisante Fälle ermöglichen.

Der Nachweis von Natural Attenuation-Prozessen setzt genaue Kenntnisse hinsichtlich der Schadstofffahne voraus. Während die Altlastenerkundung sich bisher auf den Schadensherd und den direkten Abstrom konzentrierte, muss die Erkundung bei Altlasten, die für ein sog. MNA-Konzept (Monitored Natural Attenuation) geeignet erscheinen, auf die Fahne ausgedehnt werden und der mikrobiologische Abbau mit Hilfe von entsprechenden Methoden sowohl qualitativ als auch quantitativ nachgewiesen werden. Auf diesem Gebiet besteht noch ein erheblicher Bedarf an Entwicklung von inno-

vativen Erkundungsmethoden, wie z. B. molekulare und isotopische Methoden zum Nachweis des natürlichen Schadstoffabbaus im Grundwasserleiter für unterschiedliche Kontaminanten.

Die LfU hat in den vergangenen Jahren insgesamt drei sog. „Referenzstandorte“ fachlich begleitet, bei denen an die entsprechenden natürlichen Abbauvorgänge nachgewiesen werden konnten und auf eine Sanierung verzichtet werden konnte. Z. Zt. werden drei weitere Standorte bearbeitet, um Lösungskonzepte für das spezielle Ammoniumproblem bei Altablagerungen zu entwickeln.

MNA-Konzepte können nur zu einem Teil zur Lösung der Altlastproblematik beitragen. Bei einem Teil der Schadstoffe wie z. B. LCKW stellt sich nur in seltenen Fällen ein zufrieden stellender natürlicher Abbau im Grundwasserleiter ein, auch komplizierte geologische bzw. hydrogeologische Standortrandbedingungen wie z. B. Kluftgrundwasserleiter bieten nur wenige Perspektiven für solche Konzepte, da der unverzichtbare quantitative Nachweis der Wirksamkeit der Abbauprozesse unter diesen Randbedingungen in der Regel nicht erbracht werden kann. Es besteht daher auch in Zukunft die Notwendigkeit, wenn man eine nachhaltige Altlastensanierung anstrebt, Schadensherde zu dekontaminieren. Innovative Sanierungstechniken wie z. B. In-situ Oxidation oder die Injektion von Nanoeisen können hierbei in Zukunft möglicherweise eine wichtige Rolle spielen. Über das Programm BW PLUS wurden im Frühjahr 2005 2 Anträge zu diesen Arbeitsgebieten bewilligt. Weitere Themen, die die LfU auch zukünftig vorantreiben will, sind nachfolgend aufgelistet:

- Weiterentwicklung von Methoden zur Sickerwasserprognose
- Innovative Methoden zur Auswertung von Grundwassermessdaten wie z. B. die Mischungsanalyse und Isotopenuntersuchungen
- Integrale Altlastenuntersuchung zur Ermittlung des Verursachers

## 10.8 Ausblick

Die Altlastenbearbeitung im Jahr 2005 erfährt sowohl in der Öffentlichkeit als auch in der Politik nicht mehr die Beachtung, wie wir es vor zehn Jahren noch gewohnt waren. Das wirkt sich natürlich auch unmittelbar auf Möglichkeiten und Perspektiven der LfU aus, auf diesem Gebiet tätig zu sein. Die Ressourcen, die hierbei zur Verfügung stehen, sowohl beim Personal als auch bei den finanziellen Mitteln, sind bei weitem nicht mehr vergleichbar zu denen in der Anfangszeit der Altlastenbearbeitung. Die hohe Frequenz der Veröffentlichungen lässt sich in Zukunft mit Sicherheit nicht aufrechterhalten. Ebenso ist ein Modellstandortprogramm für die Zukunft mit Sicherheit nicht realistisch.

Die LfU wird andere Wege beschreiten müssen, Fachwissen und Praxiserfahrungen zusammenzutragen und weiterzugeben. Mitarbeiter der LfU sind z. B. als Gutachter bzw. Beirat in Forschungsverbünde wie z. B. „RUBIN“ oder „KORA“ integriert und können ihren Einfluss in entsprechendem Umfang dort zur Geltung bringen. Zur Sicherung

der Praxisnähe beinhalten diese Forschungsverbände als ein Einzelthema die Erarbeitung von Handbüchern für die Verwaltung und Ingenieurbüros, ebenso werden ähnlich wie in der Vergangenheit in Baden-Württemberg an Modellstandorten praxisnahe Erfahrungen gesammelt. Unter diesen Randbedingungen wird die LfU auch in Zukunft in der Lage sein, entsprechend ihren Möglichkeiten die Weitergabe von Praxiserfahrungen sicherzustellen.

Boden ist eine endliche Ressource, doch erscheint der Verbrauch dieser Ressource bisher als zwangsläufige Folge jeder kommunalen Entwicklung. Seit den siebziger Jahren sind durch die Stilllegung produzierender und verarbeitender Betriebe großflächige Industriebrachen entstanden. Im Rahmen eines Flächenrecyclings, bei der eine effektive Altlastensanierung eine entscheidende Rolle spielt, können die Voraussetzungen für deren Neunutzung geschaffen werden. Die Altlastensanierung wird in Zukunft zunehmend neben ihrer klassischen Aufgabe der Gefahrenabwehr bei Stadtentwicklung und Bauleitplanung an Bedeutung gewinnen.

Das vor einigen Jahren gegründete „Altlastenforum“ bietet den LfU-Mitarbeitern auch die Möglichkeit, ihre Erfahrungen in dort installierte Arbeitskreise einzubringen und bei entsprechenden Veröffentlichungen mitzuarbeiten. In ähnlicher Weise sind in einigen VDI-Richtlinien die Erfahrungen von LfU-Mitarbeitern eingeflossen. Die LfU wird auch in Zukunft den Kontakt zur Wissenschaft suchen, sowohl um neue Entwicklungen in der Wissenschaft bzw. Technik frühzeitig in Erfahrung zu bringen, als auch die Wissenschaft auf die aktuellen Probleme bei der Altlastenbearbeitung aufmerksam zu machen. Eine ganz vorrangige Aufgabe wird es auch in Zukunft bleiben, die für die Altlastenbearbeitung zuständigen Behörden bei der Bewältigung der Altlastenproblematik wie in der Vergangenheit zu unterstützen.

## **11 FORSCHUNGSARBEITEN AM DEUTSCH-FRANZÖSISCHEN INSTITUT FÜR UMWELTFORSCHUNG ZUM TRANSFER UND VERBLEIB VON LCKW IN PORENGRUNDWASSERLEITERN**

Gerhard Schäfer<sup>1</sup>, Martine Bohy<sup>1</sup>, Lotfi Dridi<sup>1</sup>, Fabien Nex<sup>1,4</sup>, Ingrid Pollet<sup>1</sup>, Olivier Razakarisoa<sup>1</sup>, Alleign Zeru<sup>1</sup>, Maxime Bano<sup>2</sup>, Baldur Barczewski<sup>3</sup>, Fadi Merheb<sup>4</sup>

<sup>1</sup>IMFS -IFARE, UMR 7507 ULP-CNRS, Strasbourg, <sup>2</sup>IPGS, UMR 7516 ULP-CNRS, Strasbourg, <sup>3</sup>VEGAS, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, <sup>4</sup>BURGEAP, Strasbourg, Lyon

### **11.1 Kontext und Ziele**

Die in den zurückliegenden zwei Jahren durchgeführten Forschungsarbeiten befassten sich mit Experimenten, Untersuchungen auf Feldstandorten und numerischen Modellierungen zur Ausbreitung und zum Transfer von leichtflüchtigen chlorierten Kohlenwasserstoffen (LCKW) in porösen Medien. Sie binden sich thematisch in das elsässische Umweltforschungsnetzwerk REALISE (Reseau Alsace des Laboratoires en Ingénierie et Sciences pour l'Environnement) ein, das im Rahmen des Planvertrags Staat-Region Elsass (2000-2006) finanziell gefördert wird. Die wissenschaftlichen Ziele waren speziell auf die Charakterisierung von Heterogenitäten sowohl des Untergrunds als auch der Schadstoffverteilung in der ungesättigten und gesättigten Bodenzone mit Hilfe von verschiedenen Techniken, wie z.B. Lichtleitersonden oder Georadar ausgerichtet. Unsere Vorgehensweise basiert auf einer Hierarchisierung der maßgebenden Transportprozesse auf drei Beobachtungsebenen: Labor, Großversuchseinrichtung SCERES (Site Contrôlé Expérimental de Recherche pour la réhabilitation des Eaux et des Sols), Feldstandort.

### **11.2 Experimentelle und numerische Untersuchungen zur Charakterisierung von LCKW-Schadensherden auf der Versuchseinrichtung SCERES**

Die auf SCERES durchgeführten Untersuchungen waren auf drei Teilaspekte ausgerichtet, die, aufgrund der bislang erzielten Erkenntnisse, ein Hauptinteresse darstellten sowohl in Bezug auf die Studie der Mehrphasenströmung gekoppelt mit dem Stofftransfer zwischen Fluidphasen als auch in der Validierung von Erkundungstechniken auf realen Standortorten. Es handelt sich in erster Linie um einen detaillierten Test der Partitioning-Tracer-Methode, die Untersuchung des Einflusses von Inhomogenitäten des porösen Mediums und der Heterogenität des Schadensherds auf den Transport der LCKW im Untergrund, und die Berücksichtigung dieser Heterogenitäten (Aqui-

ferstruktur und Sättigungsgrade des Schadstoffes) bei der Solubilisierung einer Schadstoffquelle (thermodynamisches Gleichgewicht oder Lösungskinetik) sowie in der numerischen Modellierung.

Die Studien im inhomogenen Milieu umfassten zwei Experimente mit einer Schadstoffmischung aus Trichlorethylen (TCE) und Perchlorethylen (PCE): das eine mit einer oberflächennahen geringdurchlässigen Schicht, und das andere mit zwei zusätzlich in der ungesättigten und gesättigten Zone eingebauten geringdurchlässigen Blöcken.

### 11.2.1 Test der Partitioning-Tracer-Methode

Im Oktober 2000 wurde ein erstes Partitioning-Tracerexperiment auf SCERES mit einer residual vorliegenden TCE-Schadstoffquelle durchgeführt. Die verwendeten Tracer waren in dieser Vorstudie zwei Alkohole: Isopropanol (IPA) als idealer Tracer und 4-Methyl 2-Pentanol (4M2P) als Partitioning-Tracer. Die Messergebnisse belegten, dass für den Partitioning-Tracer wegen der bedeutenden vertikalen Vermischungseffekte im Brunnenrohr keine signifikante Retardation im Entnahmebrunnen nachgewiesen werden konnte, wenngleich unmittelbar im Unterstrom des Imprägnationskörpers in einigen Messstellen eine zeitliche Verzögerung gegenüber dem idealen Tracer beobachtet wurde (Bohy et al, 2001). Um eine tragfähigere Aussage hinsichtlich der Eignung von Partitioning-Tracern beim Einsatz auf kontaminierten Standorten machen zu können, wurden Anfang 2003 neue Überlegungen für ein Großexperiment in SCERES angestellt.

Unter Beibehaltung des Abstands zwischen Infiltrations- und Entnahmebrunnens von 13 m (kompatibel mit möglichen Anordnungen auf realen Standorten) sollte dabei die Schadstoffquelle in Längsrichtung ausgedehnt werden sowie ein Partitioning-Tracer mit erhöhtem Verteilungskoeffizienten gegenüber TCE, gleichbedeutend mit einem größeren Retardierungsfaktor, gewählt werden. 1-Oktanol wurde als Partitioning-Tracer mit hohem Verteilungskoeffizienten für die untersuchten Lösungsmittel (TCE und PCE) identifiziert. Dieser Alkohol wurde daraufhin in komplementären Laborexperimenten getestet. Die durchgeführten Säulenversuche zeigten zwar die Anwendungsgrenzen des 1-Oktanol (ausgeprägtes „Tailing“ der Konzentrationsdurchgangskurve) auf, belegten aber eine deutlich erhöhte Retardierung gegenüber 4M2P im Fall geringer Abstandsgeschwindigkeiten (Bohy et al, 2004). Im Großexperiment wurde eine Tracerlösung mit drei Tracern eingesetzt: ein idealer Tracer (IPA) sowie zwei Partitioning-Tracer (4M2P und 1-Oktanol).

Das Großexperiment wurde im zweigeschichteten Modellaquifer von SCERES durchgeführt (hydraulische Leitfähigkeit der 2.5 m mächtigen Mittelsandschicht von ca.  $8 \times 10^{-4}$  m/s; die darunterliegende 50 cm Grobsandschicht weist eine Durchlässigkeit von ca.  $6 \times 10^{-3}$  m/s auf). Gegenüber dem Vorversuch wurden drei Versuchsparameter wesentlich verändert (Dridi, 2003): (1) der Imprägnationskörper ist dreimal so lang (1.5 m anstelle von 0.5 m); (2) die Abstandsgeschwindigkeit ist geringer um thermodynami-

sche Gleichgewichtsbedingungen zu favorisieren (0.4 m/d anstelle von 1.4 m/d) ; (3) das ausgebrachte TCE-Volumen ist größer (5.2 Liter anstelle von 1.6 Liter).

Wenngleich 1-Oktanol wegen seines hohen Verteilungskoeffizienten bekannt dafür ist gut geeignet zu sein, um sehr geringe Sättigungsgrade von nicht mit Wasser mischbaren Fluiden zu detektieren, konnten unsere Messergebnisse dies nicht bestätigen. Mehrere Nachteile, die seinen Einsatz im Feldfall nicht favorisieren, sind festzuhalten: begrenzte Löslichkeit in Wasser; mögliche starke Adsorption auf dem porösen Medium; zeitlich instabil, da biologisch abbaubar; Tailing der Konzentrationsdurchgangskurve. Andererseits zeigte sich, dass in der veränderten Versuchskonfiguration das gewählte Tracerpaar IPA-4M2P geeignet ist, um eine TCE-Schadstoffquelle selbst bei geringen Sättigungsgraden zutreffend zu charakterisieren.

Im Rahmen dieses Großexperiments wurden darüber hinaus zwei weitere Methoden zur Charakterisierung des Schadensherdes angewandt und mit der Partitioning-Tracer-Methode verglichen (Razakarisoa et al, 2005): (1) direkte Kartierung der TCE-Quelle über in situ Beprobung; (2) Kartierung der Schadstofffahne gekoppelt mit einer iterativen Rückwärts-Modellierung (Pollet, 2004).

### **11.2.2 Untersuchungen zum Stofftransfer von chlorierten Kohlenwasserstoffgemischen im inhomogenen Modellaquifer**

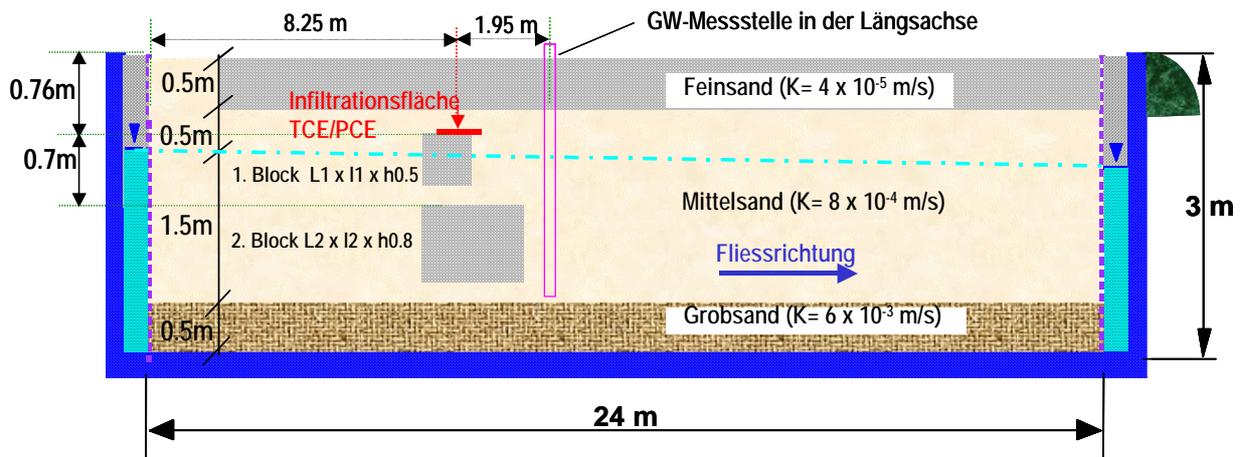
#### **Oberflächennahe geringdurchlässige Schicht**

Die ursprüngliche Zweischichtenstruktur von SCERES wurde durch den Austausch des Mittelsandes bis auf eine Tiefe von 50 cm durch einen geringdurchlässigen Feinsand ( $K = 4 \times 10^{-5}$  m/s) oberflächennah verändert, um den Austrag der Schadstoffdämpfe in die Atmosphäre zu limitieren und gleichzeitig dessen Einfluss auf den Stofftransfer zwischen ungesättigter und gesättigter Zone untersuchen zu können. In der Tat, aufgrund der unterschiedlichen Kapillardruck-Sättigungsbeziehungen und bedingt durch die komplette Wassersättigung des Modellaquifers mit anschließender Drainage, bildete sich im Bereich der Feinsandschicht ein „schwebender“ Grundwasserkörper (Wassersättigung bis zu 70%) aus. Die Schadstoffquelle (TCE-PCE-Gemisch) befand sich sowohl in der gesättigten als auch ungesättigten Bodenzone.

Die oberflächennahe Feinsandschicht beeinflusst aufgrund des erhöhten Wassergehaltes nachhaltig die Gasdiffusion und wirkt so als „Diffusionsbarriere“ Gegenüber den früheren Experimenten im Zweischichtenaquifer erfolgt dadurch eine bevorzugte horizontale Migration der Dämpfe in der Mittelsandschicht. Gleichzeitig reduziert sich der Schadstoffaustrag in die Atmosphäre auf ein Drittel (Bohy, 2003). Die Gaskonzentrationsprofile weisen unterhalb der Feinsandschicht, zwischen 0.6 m und 1.2 m Tiefe, nur einen geringen Gradienten auf (Dridi et al., 2005). Die numerische Modellierung des Experiments erfolgte mit dem Rechencode SIMUSCOPP; die numerisch berechneten Konzentrationen in der Gas- und Wasserphase stimmten gut mit den Messwerten überein.

### Lokale geringdurchlässige Inhomogenitäten

In dieser zweiten, inhomogenen Aquiferkonfiguration wurde die Dreischichtenstruktur von SCERES beibehalten und zusätzlich zwei gering durchlässige Blockstrukturen in der ungesättigten und gesättigten Zone eingebaut (Abb. 11.1). Ziel war es, eine stark ungleichförmige Verteilung des Schadstoffes (Imprägnationskörper) im porösen Medium zu erhalten, um den Einfluss eines hoch kontaminierten Bereichs auf den Stofftransfer untersuchen zu können. Des Weiteren war es interessant zu wissen, wie sich der Austausch in der ungesättigten Zone zwischen dem Schadstoff in Phase und der Gasphase unmittelbar im Nahbereich der gering durchlässigen Zonen gestalten würde.



**Abb. 11.1: Längsschnitt durch SCERES : inhomogene Aquiferstruktur mit zwei (auf der Längsachse von SCERES) eingelagerten geringdurchlässigen Blöcken**

Der resultierende TCE-PCE-Schadensherd erwies sich als extrem heterogen, asymmetrisch und erstreckte sich weit über die Infiltrationsfläche hinaus. Zahlreiche Mini-Sondierungen, die während der Phase der Intensitätsabnahme der Quelle durchgeführt wurden, führten zu diesem Ergebnis. Diese Beobachtung wurde indirekt jedoch schon während der Infiltration des Gemisches im Oktober 2004 gemacht, als sehr unterschiedliche Ankunftszeiten der „Ölfronten“ an den fest installierten, von VEGAS entwickelten Lichtleitern registriert wurden.

Es wurde außerdem festgestellt, dass sich in der oberflächennahen Schicht kein thermodynamisches Konzentrationsgleichgewicht zwischen der Gas- und Wasserphase einstellt, was auf die erhöhten Wassergehalte und daraus resultierenden kleinen Gasdiffusionskoeffizienten zurückzuführen ist. An ausgewählten Probennahmestellen wurden Konzentrationsmessungen in der Bodenluft vorgenommen, anschließend umgerechnet über das Henry-Gesetz in äquivalente Konzentrationen der Wasserphase, und mit denen im Bodenwasser verglichen (Abb. 11.2).

Zwei Multilevel-Probennahmetechniken wurden im Modellaquifer in einer voll verfilterten GW-Messstelle getestet: VEGAS-Probennahmer; Passivsammler DMLS (Diffusion Multi Layer System) mit einer Beprobungshöhe von 12 cm. Die Messergebnisse beider

Beprobungstechniken wurden mit den Konzentrationswerten einer klassischen Punktbeprobung im porösen Medium unmittelbar im Oberstrom der Messstelle verglichen. Abb. 11.3 zeigt exemplarisch die mit dem VEGAS-Probennehmer aufgenommenen Konzentrationsprofile im Vergleich mit denen der Punktbeprobung im porösen Medium. Die gemessenen TCE- und PCE- Profile weisen zwar die selbe Tendenz auf, betrachtet man jedoch die Tatsache, dass die im porösen Medium punktförmig entnommenen Wasserproben die Realität darstellen, so werden mit dem VEGAS-Probennehmer die Konzentrationen ab einer Tiefe von 2 m etwas überschätzt.

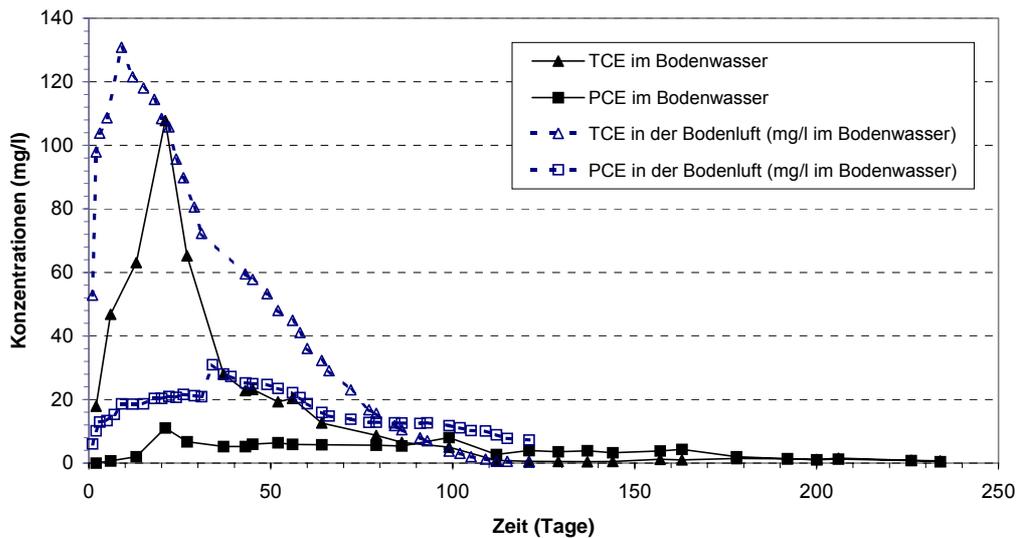


Abb. 11.2: Vergleich der PCE- und TCE-Konzentrationen in der Gas- und Wasserphase (Messstelle befindet sich in 0.4 m Tiefe)

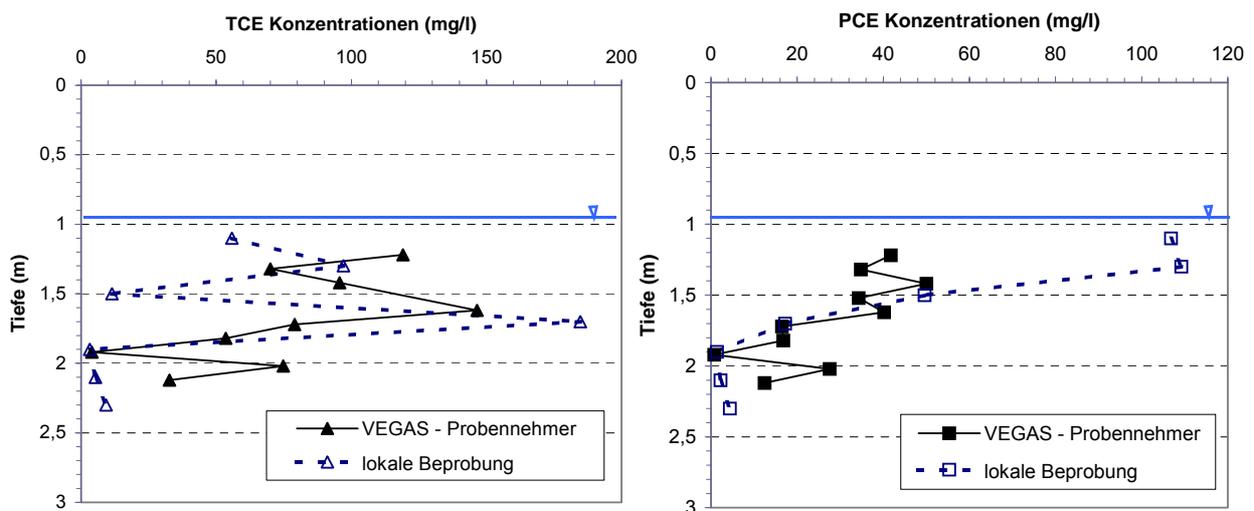


Abb. 11.3: Vergleich gemessener TCE- und PCE- Konzentrationen in der gesättigten Zone: VEGAS-Probennehmer und lokale Beprobung im porösen Medium

### 11.3 Mathematische Modellierung des biologischen Abbaus von LCKW

Im Rahmen der Doktorarbeit von F. Nex wurde ein innovatives Modellkonzept zum Abbau von LCKW auf der Darcy-Skalenebene entwickelt. Es beschränkt sich auf die Betrachtung der Familie der Chloräthane (einschließlich Äthylen) (Nex, 2004; Nex et al., 2004). Als anorganische Elektronenakzeptoren wurden  $O_2$ ,  $NO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$  et  $CO_2$  berücksichtigt, jedoch nicht die Mechanismen zur Reduzierung von Eisen und Mangan, denn gewöhnlich sind diese Komponenten nur in geringen Mengen im Grundwasserleiter vorhanden und dabei oftmals nur bedingt bioverfügbar. Des Weiteren wurde neben den Chloräthanen nur ein weiterer Elektronengeber in Betracht gezogen, der als Summenparameter DOC (gelöster organischer Kohlenstoff) modelliert wurde.

Der Modellansatz beruht auf einem Doppel-Switch-System:

- (1) der erste „Switch“ entspricht der Wahl eines Abbaumechanismus in Abhängigkeit von der Umweltbedingung im Aquifer, welches den energetisch günstigsten Elektronenakzeptor involviert;
- (2) der zweite „Switch“ besteht in der Wahl der möglichen Reaktionsmechanismen, spezifisch für jede Komponente (z.B., PCE kann unter aeroben Bedingungen nicht oxidiert werden).

Des Weiteren erfolgt die mathematische Darstellung der biologischen Abbaureaktionen auf der modifizierten Monod/Michaelis-Menten – Kinetik, um die Inhibition des biologischen Abbaus einer Komponente durch alle im Aquifer vorhandenen organischen Komponenten zu berücksichtigen.

Dieses Abbaumodul wurde in ein numerisches 1D Finite-Differenzen-Transportmodell integriert und verschiedenen Tests unterzogen. Zunächst erfolgte eine Verifizierung anhand eines Laborexperiments unter reduzierenden Bedingungen; die Messdaten konnten hier unter Zugrundelegen der beobachteten kinetischen Abbaukoeffizienten zufriedenstellend nachgebildet werden (Nex, 2004). Weitere Tests wurden auf der Basis eines theoretischen Beispielfalls im Vergleich mit dem Rechencode RT3D sowie im Rahmen des von der ADEME (Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie) ausgeschrieben „Benchmark“-Projekts im Frühjahr 2005 durchgeführt.

### 11.4 Untersuchungen auf Feldstandorten

Die durchgeführten Arbeiten betreffen den Stofftransfer von LCKW in Porengrundwasserleitern, wobei der Schwerpunkt auf zwei wissenschaftlichen Zielsetzungen lag:

- (i) Quantifizierung der PCE-Emission aus einem (oder mehreren) Schadensherd(en) des Industriegebiets „Metzgerau“ (plaine des Bouchers) in Straßburg;

- (ii) numerische Modellierung des Verbleibs von PCE im Grundwasser im Unterstrom eines im Bereich des Piémont vosgien gelegenen Schadensherdes.

#### **11.4.1 Standort «Plaine des Bouchers»**

Im Rahmen des europäischen Forschungsprojekts INCORE wurde in Zusammenarbeit mit der Städtegemeinschaft Straßburg, dem BRGM und der Universität Tübingen der innovative Ansatz zur integralen Erkundung der Belastung des Grundwassers durch LCKW auf dem Straßburger Standort „Plaine des Bouchers“ getestet (Schäfer et al., 2004). Unsere komplementären numerischen Untersuchungen zeigten darüber hinaus auch die Anwendungsgrenzen eines vereinfachten Auswertungsverfahrens der Integralen Pumpversuchsmethode auf, die insbesondere dann zum Tragen kommen, wenn in der Schadstofffahne das Verhältnis zwischen longitudinalen und lateralen Konzentrationsgradienten groß ist (Zeru, 2004 ; Zeru und Schäfer, 2005).

#### **11.4.2 Standort «Piémont vosgien»**

Im Rahmen der Doktorarbeit von I. Pollet wurde ein mehrschichtiges Grundwassermodell aufgebaut, das die Alluvionen der Rheinebene und die Kolluvionen der Vogesen beinhaltet. Der kontaminierte Aquiferbereich betrug in etwa 2 ha; das Modellgebiet hingegen erstreckte sich über 900 ha.

Die Modellierung des Transports gelöster Schadstoffe zeigte eindrücklich auf, dass die Heterogenität des porösen Mediums und der vorliegenden PCE-Schadstoffquelle (hinsichtlich ihrer Intensität und räumlichen Verteilung) im Bereich der Kolluvionen die bestimmenden Einflussgrößen darstellen (Pollet, 2004). Das entwickelte Transportmodell wurde u.a. eingesetzt, um die Wirksamkeit der eingeleiteten hydraulischen Sanierungsmassnahme zu testen.

Die Schematisierung des Aquifers im Bereich des Piémont und die Nachbildung des heterogenen Schadensherdes, gestützt auf Felddaten, stellten die wesentlichen wissenschaftlichen Elemente der numerischen Studien dar, die eine enge Zusammenarbeit mit dem Ingenieurbüro BURGEAP und VEGAS der Universität Stuttgart erforderlich machten. In den Forschungsarbeiten wurde insbesondere das numerische Mehrphasen-Mehrkomponentenmodell SIMUSCOPP eingesetzt, um den Einfluss der Lösungskinetik des Schadensherdes untersuchen zu können.

### **11.5 Ausblick**

Es ist geplant, die in der Versuchseinrichtung SCERES begonnenen Arbeiten zum Einfluss von Heterogenitäten auf den Stofftransfer im teilgesättigten Milieu und zur Validierung von Erkundungstechniken von Schadensherden fortzuschreiben, wobei letztere sich auf eine enge Zusammenarbeit mit VEGAS (Lichtleitertechnik) und dem Straßburger Institut Physique du Globe (IPGS) zur Anwendung von Georadar stützen wird.

Des Weiteren ist vorgesehen, das entwickelte Modellkonzept zum biologischen Abbau von LCKW in ein bestehendes numerisches Mehrphasen-Transportmodell, wie z.B. der Rechencode MUFTE-UG, zu integrieren. Die Realisierung des Projekts erscheint möglich zumal die ADEME eine finanzielle Unterstützung für ein derartiges F&E Vorhabens, das eine Zusammenarbeit mit dem Institut für Wasserbau der Universität Stuttgart konkret vorsieht, in Aussicht gestellt hat.

## 11.6 Danksagung

Die durchgeführten Forschungsarbeiten wurden durch die ADEME, die Wasserbehörde Rhein-Maas, das Forschungsministerium, den Planvertrag Staat-Region Elsass (Université Louis Pasteur (ULP), CNRS, Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement), das nationale Hydrologie-Forschungsprogramm des INSU-CNRS und die Europäische Kommission (über das 5. F&E Rahmenprogramm) maßgeblich finanziell unterstützt.

## 11.7 Literaturangaben

- Bohy M. 2003. Caractérisation de sources de pollution composées d'un mélange de solvants chlorés en aquifère alluvial. Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 6/10/03, 183 S.
- Bohy M., Benremita H., Mehreb F., Muntzer P., Pollet I., Razakarisoa O., Schäfer G., 2001. 2eme rapport intermédiaire sur l'étude du comportement des solvants chlorés dans le milieu souterrain. Convention inter Agences n°99/928/07/589
- Bohy M., Schäfer G., Razakarisoa O. 2004. Caractérisation de zones sources de DNAPL à l'aide de traceurs bisolubles : mise en évidence d'une cinétique de partage. C.R. Géosciences, 336 (9), 799-806.
- Dridi L. 2003, Caractérisation par la technique du traceur bisoluble des sources de pollution par solvants chlorés en aquifère poreux, DEA Mécanique et Ingénierie, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 2003, 59 S.
- Dridi L., Schäfer G., Razakarisoa O. 2005. Transfert d'un mélange de solvants chlorés en aquifère poreux hétérogène : Expérimentations sur site contrôlé et simulations numériques, 17ème Congrès Français de Mécanique, Troyes, 29/08-02/09, 2005.
- Nex F. 2004 Modélisation numérique de la biodégradation des solvants organo-chlorés dans les aquifères fondée sur des expérimentations in situ. Le cas des chloroéthènes. Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 12/10/2004, 190 S.
- Nex F., Schäfer G., Côme J.-M., Vogel T. M. 2004. A novel approach for modeling the biodegradation of chlorinated solvents. in Battelle's Fourth International Confer-

- ence on Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds, Monterey, CA, USA, 8 S.
- Pollet I. 2004 Simulation numérique du devenir de solvants organo-halogénés en nappes d'eau souterraine sur site réel. Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 9/11/2004, 229 S.
- Razakarisoa O., Dridi L., Pollet I., Schäfer G., Côme J.-M., Mouton Cl., Quintard M., Ropars M. 2005. Large-scale controlled experiment to the characterization of TCE source zone in alluvial aquifer. ConSoil 2005, theme B, Bordeaux, 3-7/10/2005
- Schäfer G., Elsass Ph., Jellali S., Nayagum D., Ptak T., Rinck G., Zeru A. 2004 Application of the integral pumping test in Strasbourg, IGEA (Ingeneria e GEologia degli Acquiferi – Groundwater Geoengineering) 19, ISSN 1121-9041, 61-72.
- Zeru A., Schäfer G. 2005 Analysis of groundwater contamination using concentration-time series recorded during an integral pumping test: bias introduced by strong concentration gradients within the plume. Journal of Contaminant Hydrology, in Druck.
- Zeru A. 2004 Numerical investigations on the inversion of pumped concentrations for groundwater pollution quantification. Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 27/09/2004, 192 p.

## 12 NUMERISCHE UND EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN ZUR DAMPFINJEKTION IN DIE GESÄTTIGTE BODENZONE

Steffen Ochs<sup>1</sup>, Holger Class<sup>1</sup>, Arne Färber<sup>2</sup>  
Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart

<sup>1</sup>Lehrstuhl für Hydromechanik und Hydrosystemmodellierung,

<sup>2</sup>Lehrstuhl für Hydrologie und Geohydrologie

### 12.1 Motivation

Im Zuge der industriellen Entwicklung ist es in den vergangenen Jahrzehnten zu teilweise beträchtlichen Grundwasser- und Bodenverunreinigungen mit Schadstoffen verschiedenster Art gekommen. Als besonders problematisch einzustufen sind dabei Schadensfälle bei denen chlorierte Kohlenwasserstoffe (CKW) ausgetreten sind. Die im Allgemeinen geringe Wasserlöslichkeit, der moderate Dampfdruck und die meist ungenügende biologische Abbaubarkeit der CKW's führen zu einer Langzeitkontamination und stellen konventionelle Sanierungsmethoden vor erhebliche Probleme. Aus diesem Grund wurde in den letzten Jahren eine Reihe innovativer Methoden zur Sanierung solcher Schadstoffherde entwickelt.

Eine vielversprechende Gruppe von Sanierungsmethoden stellen die thermischen/thermisch-unterstützten Verfahren dar, bei denen thermische Energie, in Form von Dampf oder durch feste Wärmequellen, in den Untergrund eingeleitet wird. Durch die Erhöhung der Temperatur und somit der Mobilität der Schadstoffe können relativ kurze Sanierungszeiträume im Vergleich zu konventionellen Verfahren realisiert werden. Ein Schlüsselfaktor für eine erfolgreiche Sanierung ist dabei, die Erwärmung des kontaminierten Bereichs.

In der Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung (VEGAS) der Universität Stuttgart wurden bereits eine Reihe von Laborversuchen zur Dampfinjektion in die ungesättigte Bodenzone durchgeführt [Färber:1997], [Betz:1998], diese wurden im Anschluss am Lehrstuhl für Hydromechanik und Hydrosystemmodellierung erfolgreich numerisch nachgerechnet [Class:2002], [Emmert:1996]. Durch diese enge Verknüpfung von experimentellen und numerischen Arbeiten konnte das Prozessverständnis solch komplexer Systeme verbessert und prognose- und leistungsfähige numerische Modelle entwickelt werden. Bei der Dampfinjektion in die gesättigte Bodenzone treten durch den Dichteunterschied zwischen Wasser und Dampf zusätzlich Auftriebskräfte auf. Dadurch kommt es, im Gegensatz zur ungesättigten Bodenzone, zu einer deutlich unterschiedlichen Ausbreitung der Dampffront (siehe Abb. 12.1). Erste Untersuchungen zeigen, dass die Form der Dampffront, und somit die maximale

Reichweite, in erster Linie vom Verhältnis der injizierten Dampfmenge zur hydraulischen Durchlässigkeit abhängt. Ziel der durchgeführten Untersuchungen ist es, die Einflussfaktoren auf die Ausbreitung der Dampffront in der gesättigten Bodenzone zu untersuchen und ein prognosefähiges, robustes numerisches Modell zur Auslegung von Sanierungen zu entwickeln.

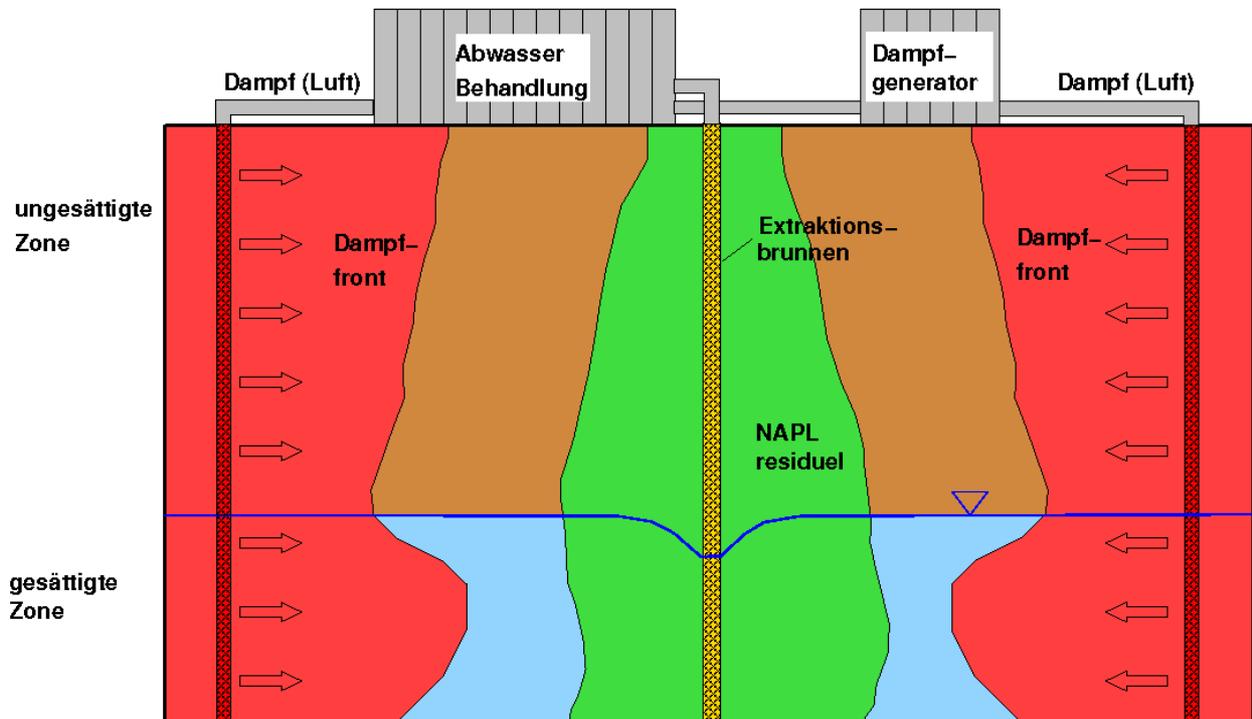
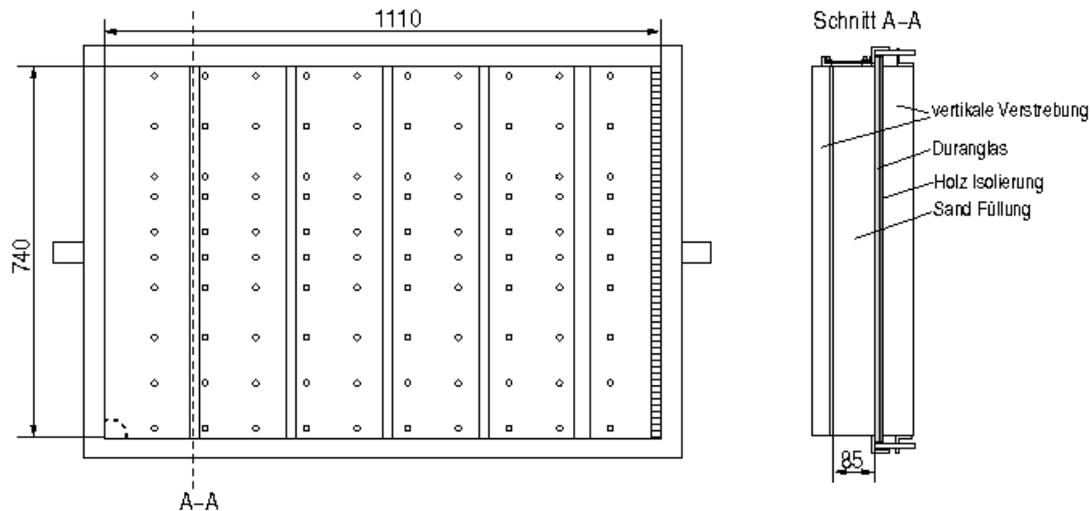


Abb. 12.1: Schema einer Dampfinjektion in die gesättigte und ungesättigte Bodenzone

## 12.2 Experimentelle Untersuchungen

### 12.2.1 Versuchsaufbau

Die experimentellen Untersuchungen zur Dampfinjektion, in ein mit Wasser gesättigtes poröses Medium, erfolgten an einem 2D Versuchsstand mit den Abmessungen 1,11m x 0,74m x 0,085m (siehe Abb. 12.2). Die Küvette aus Edelstahl besitzt an der Vorderseite eine wärmebeständige DURAN-Glasscheibe zur visuellen Dokumentation der Experimente. Zusätzliche Stahlstreben versteifen die Küvette an der Vorder- und Rückseite und minimieren eventuell auftretende Spannungen durch Wärmeausdehnung. An der unteren linken Ecke kann Dampf über einen Injektionsfilter, mit ca. 4cm Durchmesser, injiziert werden. An der rechten Seite der Küvette befindet sich ein Filter, welcher an einen Überlaufbehälter angeschlossen ist. Dadurch wird am rechten Rand eine hydrostatische Druckverteilung über die gesamte Tiefe aufgeprägt.



**Abb. 12.2: Versuchsaufbau Küvette 2D**

### 12.2.2 Mess- und Verfahrenstechnik

Der prinzipielle Aufbau der verwendeten Mess- und Verfahrenstechnik ist in Abb. 12.3 dargestellt. Der Dampf für die Experimente wird in einem Dampferzeuger mit einer Leistung von 3 kW erzeugt und über einen Zyklonabscheider geführt, um eventuell gebildetes Kondensat abzuscheiden. Ein 4m langer beheizbarer Schlauch führt vom Zyklon zum Injektionsfilter. Um die auftretenden Wärmeverluste so gering wie möglich zu halten wurden sämtliche Leitungen und die Küvette mit Glaswolle isoliert. Die Isolierung an der Vorderseite der Küvette erfolgt mit XPS (Styrodur), um eine visuelle Dokumentation der Versuche zu ermöglichen.

Zur Messung der Temperatur sind in der Küvette insgesamt 100 Temperaturfühler vom Typ Pt 100 in 10 Reihen angeordnet. Weitere Temperaturfühler und Druckaufnehmer befinden sich im Dampferzeuger und Injektionsfilter. Zusammen mit der Dampfrate, die über ein Schwebekörper-Anemometer gemessen wird, werden die Temperatur- und Druckdaten an einen Computer (PC-1) weitergeleitet (Abb. 12.3). Neben der Onlinemessung der Temperatur werden mit einer Infrarotkamera (VARIOSCAN 3022-hr) Aufnahmen von der Dampffront gemacht. Mittels dieser Aufnahmen kann der Verlauf der Dampffront exakt verfolgt werden. Im Gegensatz zu den Punktinformationen der Temperaturfühler liefert die Infrarot Kamera detaillierte flächige Messwerte mit einer Auflösung von bis zu 0,03K.

Die Messung der Wassersättigung erfolgt mittels einer Gamma-Dichtemessung. Bei diesem Verfahren wird über die Abschwächung der radioaktiven Gamma-Strahlung die Wassersättigung ermittelt. Zur Anwendung kommt ein Setup mit einem computergesteuerten Roboter, das bereits mehrfach am Institut für Wasserbau eingesetzt wurde. Eine detaillierte Beschreibung findet sich in [Färber:1997].

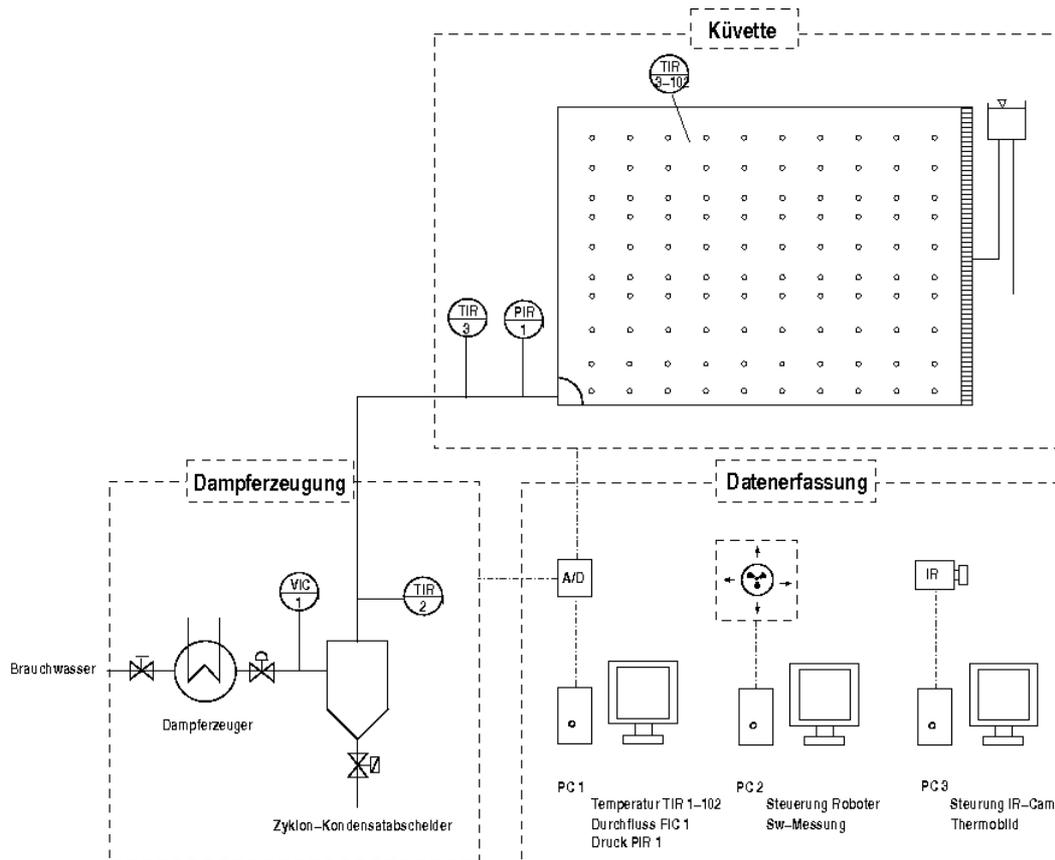


Abb. 12.3: Mess- und Verfahrenstechnische Peripherie

### 12.2.3 Durchgeführte Experimente

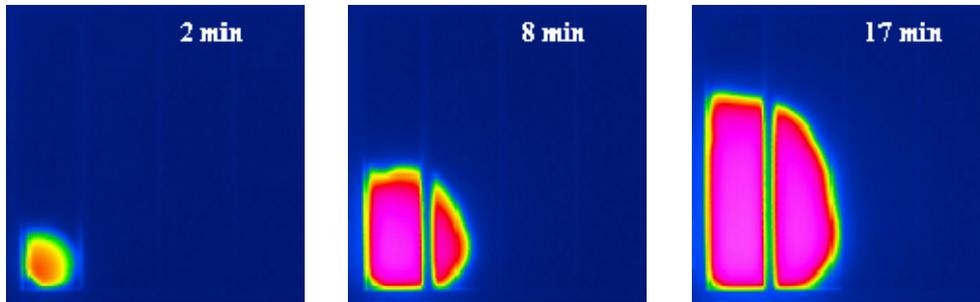
Die Ausbreitung einer Dampffront in einem wassergesättigten, homogenen porösen Medium wird maßgeblich durch das Verhältnis der Reibungs- zu den Auftriebskräften bestimmt. Dieses Verhältnis kann in dimensionsloser Form durch die Gravitationszahl ( $Gr$ ) beschrieben werden [van Looken:1983]. Je kleiner die  $Gr$ -Zahl ist, desto größer ist der Einfluss der Auftriebskräfte und die Dampffront breitet sich stärker in vertikaler Richtung aus. Bei sehr großen  $Gr$ -Zahlen dominieren die Reibungskräfte die Ausbreitung der Dampffront, welche sich nahezu radial um die Injektionsstelle ausbreitet (siehe Abb. 12.4).

$$Gr \equiv \frac{\mu_D \cdot \underline{Q}_D}{(\rho_w - \rho_D) \cdot g \cdot L_h \cdot L_b \cdot \underline{K}_{De} \cdot \rho_D} = \frac{\text{Reibungskräfte}}{\text{Auftriebskräfte}} \quad (1)$$

Bei der Herleitung der  $Gr$ -Zahl wird deutlich, dass die Längen  $L_b$  und  $L_h$  nicht, wie oft vereinfacht angenommen, die Abmessungen des Versuchstands wiedergeben, sondern die Fläche bilden durch die der Dampfstrom  $\underline{Q}_D$  fließt. Da sich diese Fläche im Laufe der Ausbreitung ändert, ändert sich auch die  $Gr$ -Zahl und somit die Form der Dampffront. Da in Gleichung 1 neben der Dampfmenge nur die effektive Permeabilität eine variable Größe darstellt, auf die im Experiment direkt Einfluss genommen werden kann,

wurden Experimente mit unterschiedlichen Dampfzraten und Permeabilitäten  $K_{De}$  (verschiedene Sanden) durchgeföhrt.

a)



b)

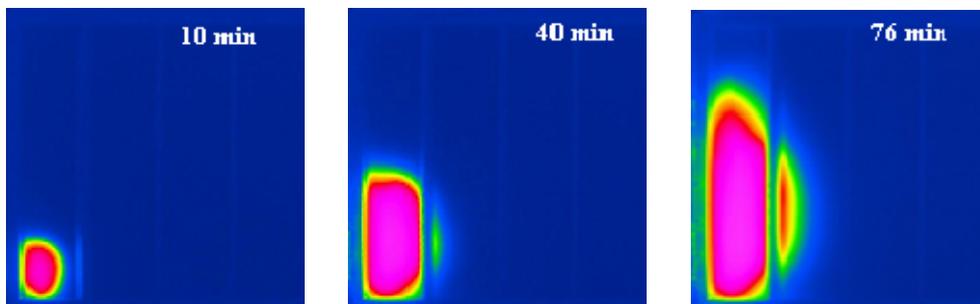


Abb. 12.4: Infrarot-Bilder a) hohe Injektionsrate; b) mittlere Injektionsrate

### 12.3 Numerisches Modell

Die numerische Simulation der Dampfzjektionsexperimente erfolgt mit dem Programmsystem MUFTE\_UG [Helmig et. al:1998], welches in einer Kooperation zwischen dem Institut für Wissenschaftliches Rechnen (IWR) der Universität Heidelberg und dem Lehrstuhl für Hydromechanik und Hydrosystemmodellierung am Institut für Wasserbau (IWS) der Universität Stuttgart entwickelt wurde. MUFTE steht dabei für **MU**ltiphasen **F**low, **T**ransport and **E**nergie **M**odel und umfasst zahlreiche Module zur Simulation komplexer nichtisothermer Mehrphasen Prozessen in porösen und geklüfteten Medien [Helmig et. al:1997]. UG steht für **U**nstructured **G**rids und enthält effiziente Lösungstechniken für Systeme von partiellen nichtlinearen Differentialgleichungen [Bastian et. al:1997]. Durch die fortschreitende Weiterentwicklung von MUFTE und die Verknüpfung mit der flexiblen numerischen Toolbox UG konnte das Anwendungsgebiet von dem einstmalig rein wissenschaftlichen Bereich auf praxisrelevante großskalige Probleme erweitert werden.

Der modulare Aufbau von MUFTE ermöglicht es, die einzelnen Module auf die zu untersuchenden Fragestellungen anzupassen. Somit ist es möglich bereits vorhandene Module mit geringem Aufwand an neue Problemstellungen anzupassen oder, falls er-

forderlich, neue Module zu entwickeln. In Abb. 12.5 ist eine Übersicht über die in MUFTE vorhandenen Module und ihre Anwendungsmöglichkeiten dargestellt.

1 Phasen Module	<div style="border: 1px solid gray; padding: 2px; margin-bottom: 5px; text-align: center;">Strömung (S)</div> <div style="border: 1px solid gray; padding: 2px; margin-bottom: 5px; text-align: center;">Transport (T)</div> <div style="border: 1px solid gray; padding: 2px; margin-bottom: 5px; text-align: center;">S+T in Klüften</div>	<p><b>Grundwasserströmung</b>  <b>Schutzzonenabgrenzung</b>  <b>Transport gelöster Stoffe</b>  <b>Sorption + Abbau</b>  <b>Transport in Klüften</b>  <b>Kluftgenerierung</b></p>
2 Phasen Module	<div style="border: 1px solid gray; padding: 2px; margin-bottom: 5px; text-align: center;">2Phasen (2p)</div> <div style="border: 1px solid gray; padding: 2px; margin-bottom: 5px; text-align: center;">2p1cni</div> <div style="border: 1px solid gray; padding: 2px; margin-bottom: 5px; text-align: center;">2p2cni</div> <div style="border: 1px solid gray; padding: 2px; margin-bottom: 5px; text-align: center;">2p3cni</div>	<p><b>DNAPL Infiltration in ges. Zone</b>  <b>Gas (Methan) in ges. Zone</b></p> <p><b>Dampfinkjektion in ges. Zone</b></p> <p><b>Dampfinkjektion in unges. Zone</b>  <b>DNAPL Transport (Fahne)</b></p> <p><b>Gasströmung (CH<sub>4</sub>)</b></p>
3 Phasen Module	<div style="border: 1px solid gray; padding: 2px; margin-bottom: 5px; text-align: center;">3 Phasen (3p)</div> <div style="border: 1px solid gray; padding: 2px; margin-bottom: 5px; text-align: center;">3p3cni</div> <div style="border: 1px solid gray; padding: 2px; margin-bottom: 5px; text-align: center;">3pxcni</div>	<p><b>DNAPL Infiltration in unges. Zone</b></p> <p><b>NAPL Infiltration Transport</b></p> <p><b>Thermische Sanierung</b></p> <p><b>Mehrkomponenten NAPL Transport</b></p>

**Abb. 12.5: Derzeit in MUFTE\_UG implementiert in Module**

Für die Simulation der Dampfinkjektions-Experimente wurde ein speziell entwickeltes 2-Phasen / 1-Komponenten Modul (2p1cni) verwendet. Das diesem Modul zugrunde liegende Modellkonzept ist in Abb. 12.6 dargestellt. Mit dem 2p1cni-Modul ist es möglich den simultanen Fluss der beiden Phasen Wasser und Gas (Dampf) zu beschreiben. Die Komponente Wasser kann durch Verdampfung bzw. Kondensation von einer Phase in die Andere übergehen. Neben einer Massen- und Energiebilanz müssen eine Vielzahl von sogenannten konstitutiven Beziehungen, die z.B. den Mehrphasenfluss oder den Massentransfer zwischen den Phasen beschreiben, in das Modul integriert werden. Auf eine detaillierte Beschreibung dieser Gleichungen wird hier verzichtet und auf die Arbeiten von Emmert [Emmert:1997] und Class [Class:2002] verwiesen.

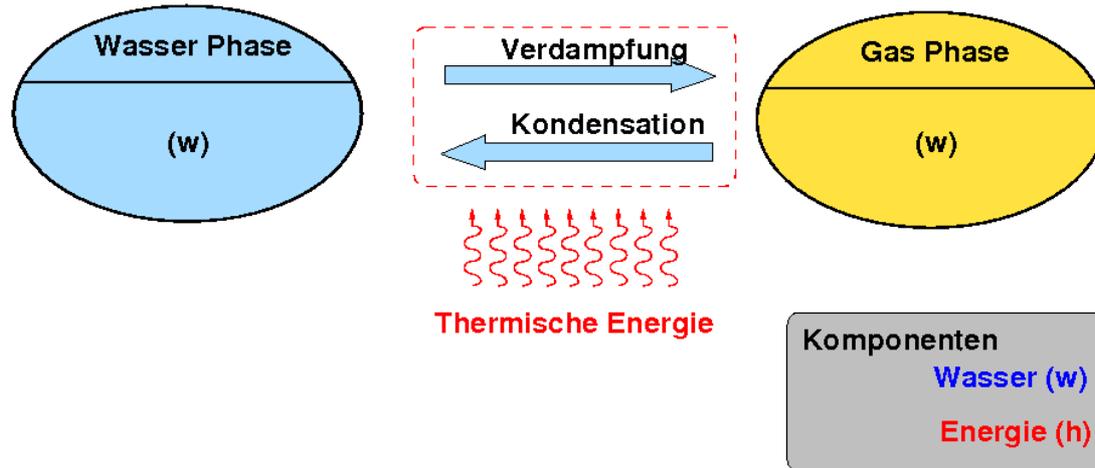


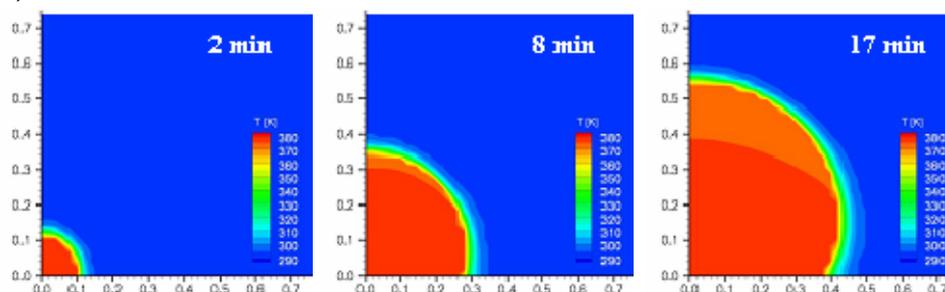
Abb. 12.6: Konzeptionelles 2-Phasen / 1-Komponenten (2p1c) Modell

## 12.4 Numerische Untersuchungen

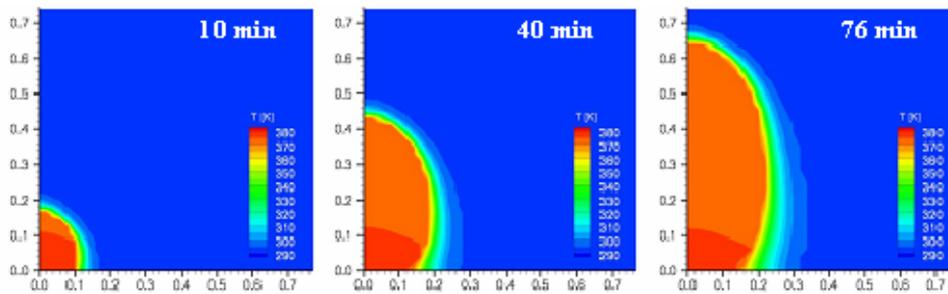
Mit dem zuvor dargestellten 2p1cni-Modul wurden die durchgeführten Experimente in einem ersten Schritt numerisch nachgerechnet. In einem zweiten Schritt wurden weitere Varianten mit unterschiedlichen Permeabilitäten und der Dampfdraten simuliert, um den charakteristischen Verlauf der Dampffront zu bestimmen. Die für die Simulation notwendigen hydraulischen Parameter wie z.B. Porosität, Permeabilität und die Kapillardruck-Sättigungsbeziehung, sowie deren Streuung wurden in Vorversuchen bestimmt. Bei dem Aufbau des Modells wurde auf eine möglichst exakte Beschreibung des Systems geachtet. Neben der genauen Wiedergabe der Systemgrenzen, in den Randbedingungen des Modells, wurden für die Küvette ein Wärmekapazitätsfeld und die Wärmeverluste generiert. Dieser Aufwand ist notwendig, da sowohl die Erwärmung der Küvette, als auch die Wärmeverluste zu einer Verzögerung der Dampffront-Ausbreitung führen.

Ergebnisse:

a)



b)



**Abb. 12.7: Ergebnisse Simulation: a) hohe Injektionsrate;  
b) mittlere Injektionsrate**

Der Vergleich der experimentellen Ergebnisse in Abb. 12.4 mit den Ergebnissen der Simulationen in Abb. 12.7 zeigt eine generell gute Übereinstimmung der Temperaturverteilungen. Für die hohe Injektionsrate bereitet sich die Dampffront nahezu radial um die Injektionsstelle aus. Bei der um den Faktor 5 niedrigeren Injektionsrate ist der Einfluss der Auftriebskräfte deutlich zu erkennen. Die Dampffront breitet sich stärker vertikal aus. Die Abweichungen zwischen den experimentellen und berechneten Temperaturverteilungen, für die mittlere Injektionsrate, können aus klein-skaligen Heterogenitäten resultieren. Diese haben bei kleinen Gr-Zahlen einen deutlich größeren Einfluss auf die Ausbreitung der Dampffront als bei großen Gr-Zahlen. Um Heterogenitäten, die eventuell durch den Einbau entstanden sind, zu identifizieren werden Tracertests in der Küvette durchgeführt. Mittels des Vergleichs der Tracertests mit Simulationen können klein-skalige Heterogenitäten identifiziert und in das Modell integriert werden. Da die Auswertung der Tracertests zu diesem Zeitpunkt noch nicht vorlag wurde für die numerische Simulation eine konstante Permeabilität angenommen.

In Abb. 12.8 sind charakteristische Typkurven für unterschiedliche Dampfinjektionsraten zusammengestellt. Die Typkurven resultieren aus einer Vielzahl von Simulationen und zeigen den charakteristischen Verlauf der Dampffront in der Küvette kurz vor dem Erreichen des oberen Rands. Um eine bessere Übertragbarkeit der Ergebnisse zu erreichen wurde eine dimensionslose Darstellung gewählt. Wie bereits mehrfach festgestellt ist der Einfluss der Gr-Zahl auf die Ausbreitung der Dampffront deutlich zu erkennen. Eine hoher Injektionsrate ( $Q$ ), was einer großen Gr-Zahl entspricht, resultiert in einer radialen Ausbreitung. Mit abnehmender Injektionsrate, kleiner werdenden Gr-Zahl, nimmt die horizontale Ausdehnung der Dampfzone ab. Diese Erkenntnisse sollen dazu verwendet werden einen Leitfaden für die Auslegung von Dampfinjektionen in der gesättigte Bodenzone zu entwickeln.

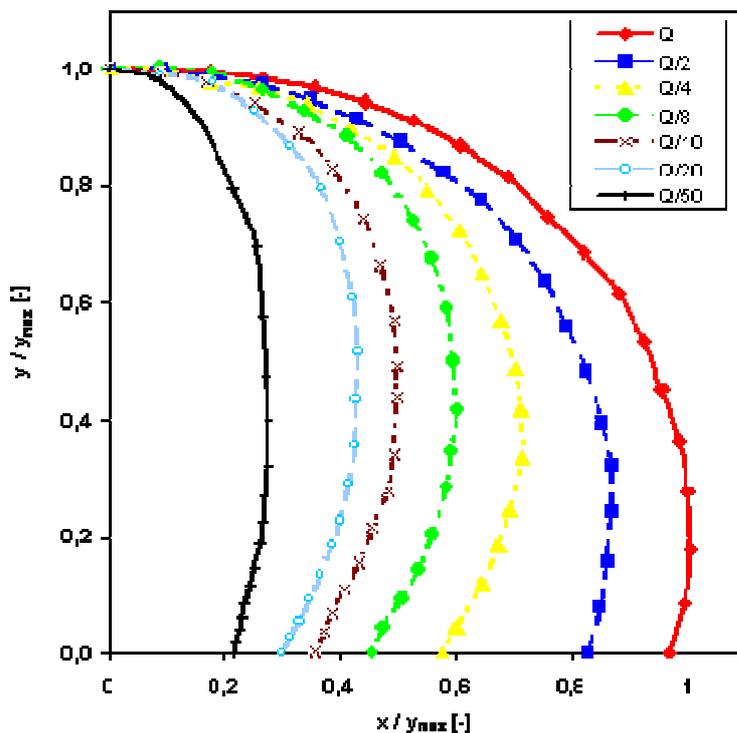
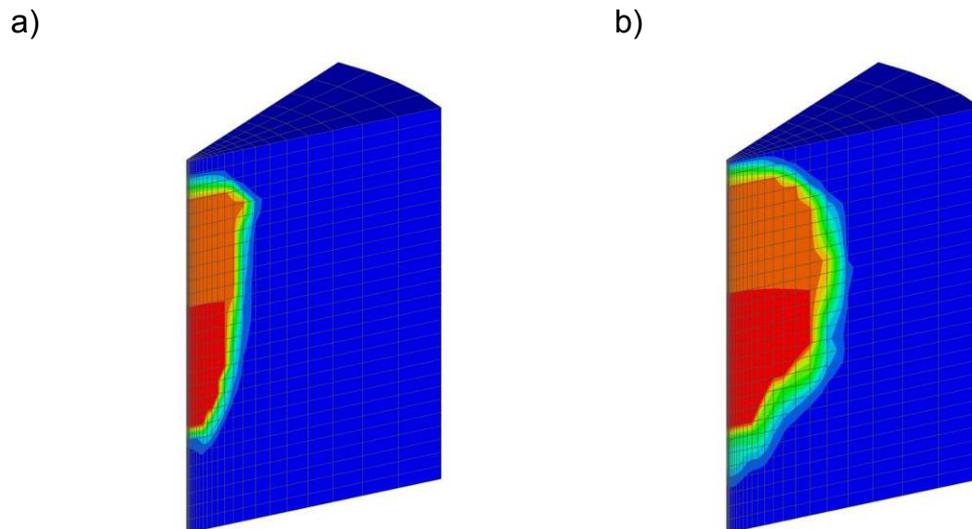


Abb. 12.8: Typkurven für unterschiedliche Injektionsraten

## 12.5 Fallbeispiel: Pilotsanierung KA-Durlach:

Das Institut für Wasserbau wurde Ende 2004 von der Stadt Karlsruhe beauftragt einen Pilotversuch zur Auslegung einer thermischen Sanierung eines CKW Schadensfalls durchzuführen. Bei dem Standort handelt es sich um eine ehemalige chemische Reinigung unter deren Gebäuden sich eine Kontamination mit chlorierten Kohlenwasserstoffen (PCE) befindet. Voruntersuchungen ergaben, dass die Kontamination deutlich in die gesättigte Bodenzone reicht. Um eine Sanierung des Schadensherdes zu erzielen, muss die Dampf-injektion unterhalb des kontaminierten Bereichs erfolgen, d.h. hier in der gesättigten Zone. Ziel der Pilotsanierung ist es die Leistungsfähigkeit der Sanierungsmethode an diesem Standort zu demonstrieren und die thermische Reichweite zu ermitteln. Unter der thermischen Reichweite wird derjenige Abstand vom Injektionsbrunnen verstanden, bis zu dem sich die Dampf-front im gesamten kontaminierten Bereich ausdehnt. Da die Ausbreitung der Dampf-front wie bereits gezeigt, stark von der Gr-Zahl und somit in erster Näherung vom Verhältnis der Injektionsrate zur Permeabilität des Bodens abhängt ist die Auslegung einer solchen Anlage nicht trivial. Aus diesem Grund wurde das zuvor vorgestellte 2p1cni-Modul verwendet um im Vorfeld des Pilotversuchs einige Varianten (z.B. verschiedene Permeabilitätsverteilungen, Injektionsraten) zu untersuchen (siehe Abb. 12.9). Dabei erwiesen sich die numerischen Untersuchungen sehr hilfreich um die thermische Reichweiten für die einzelnen Varianten zu bestimmen. Im Hinblick auf eine Sanierung des gesamten Areal hat die thermische

Reichweite einen starken Einfluss auf die Kosten. Eine durchgeführte Kostenanalyse zeigt, dass eine Reduzierung der Gesamtkosten um über 20% zu erzielen ist, für den Fall, dass statt einer konservativen Schätzung der thermische Reichweite die Ergebnisse der Simulation, zur Auslegung herangezogen werden. Diese Tatsache untermauert die Notwendigkeit zuverlässige Planungshilfen und numerische Modelle zur Auslegung von Dampfinkjektionen zu entwickeln.



**Abb. 12.9: Dampffront für:**  
a) hoch permeable Variante b) nieder permeable Variante

## 12.6 Zusammenfassung /Ausblick

Mit dem vorgestellten 2p1cni-Modul war es möglich Experimente, die in VEGAS durchgeführt wurden, numerisch nachzurechnen. Dabei konnte ohne Kalibrierung der einzelnen Parameter, eine gute Übereinstimmung mit den Messwerten erzielt werden. Das Modell wird im Weiteren dazu verwendet, die durchgeführten Experimente invers zu modellieren, um eine Aussage über die Parametersensitivität zu erreichen. Darüber hinaus soll ein Planungsleitfaden für die Auslegung von Dampfinkjektionen in die gesättigte Bodenzone entwickelt und Feldversuche numerisch begleitet werden.

## 12.7 Literatur:

Bastian, P., Birken, K., Lang, S., Johannsen, K., Neuss, H., Rentz-Reichert, H., Wieners, C.,

UG: A flexible software toolbox for solving partial differential equations. Computing and Visualization in Science, S. 27 – 40. Springer Verlag, 1997.

- Betz, C. Wasserdampfdestillation von Schadstoffen im porösen Medium: Entwicklung einer thermischen in-situ Sanierungstechnologie. Dissertation, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, 1998.
- Class, H. Theorie und numerische Modellierung nichtisothermer Mehrphasenprozesse in NAPL-kontaminierten porösen Medien. Dissertation, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, 2001.
- Class, H., Helmig, R. Numerical Simulation of Nonisothermal Multiphase Multicomponent Processes in Porous Media- 1. Applications for the Injection of Steam and Air, *Advances in Water Resources*, Nr. 25, S. 551 - 564, 2002.
- Class, H., Helmig, R., Bastian, P., Numerical Simulation of Nonisothermal Multiphase Multicomponent Processes in Porous Media- 1. An efficient Solution Technique, *Advances in Water Resources*, Nr. 25, S. 533 - 550, 2002
- Färber, A. Wärmetransport in der ungesättigten Bodenzone: Entwicklung einer thermischen in-situ Sanierungsmethode. Dissertation, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, 1997.
- Helmig, R. Multiphase Flow and Transport Processes in the Subsurface – A Contribution to the Modeling of Hydrosystems. Springer Verlag, 1997.
- Helmig, R., Class, H., Huber, R., Sheta, H., Ewing, R., Hinkelmann, R., Jakobs, H., Bastian, P. Architecture of the Modular Program system MUFTE\_UG for Simulating Multiphase Flow and Transport Processes in Heterogeneous Porous Media, *Mathematische Geologie*, 2, 1998.
- Van Lookeren, J. Calculation Methods for Linear and Radial Steam Flow in Oil Reservoirs, *Society of Petroleum Engineers Journal*, S. 427- 439, 1983.

## 13 FESTE WÄRMEQUELLEN ZUR IN-SITU-GRUNDWASSER-REINIGUNG BEI DNAPL-SCHÄDEN – ERSTE ERGEBNISSE EINER U.S.-GEFÖRDERTEN FORSCHUNGSKOOPERATION

Uwe Hiester, Hans-Peter Koschitzky, Oliver Trötschler (VEGAS, Universität Stuttgart), Arne Färber (IWS, Universität Stuttgart), Ralph Baker, Gorm Heron, John LaChance (TerraTherm, Inc., USA), Myron Kuhlman (MK Tech Solutions, Inc., USA)

### 13.1 Motivation

DNAPL wie beispielsweise CKW sind eine der am häufigsten auftretenden Verunreinigungen von Boden und Grundwasser. Verfahrenstechnische Neu- und Weiterentwicklungen im Sanierungsbereich erlauben inzwischen die zuverlässige Reinigung der ungesättigten Bodenzone sowie gut bis mitteldurchlässiger Grundwasserbereiche mit thermischen In-situ-Verfahren. Hier seien als Beispiele das TUBA-Verfahren (Dampf-(Luft-)injektion) und das THERIS-Verfahren (feste Wärmequellen) genannt [2].

Gering durchlässige Bodenschichten können allerdings mit Verfahren, bei denen eine Injektion in den Boden- oder Grundwasserkörper erfolgt (z.B. TUBA) nicht gereinigt werden. Mit festen Wärmequellen lässt sich hingegen der Untergrund konduktiv erwärmen. Durch die Überführung der flüssigen Schadstoffe (NAPL) in die Gasphase und deren anschließende Extraktion über eine Bodenluftabsaugung analog zur Anwendung thermischer Verfahren in der ungesättigten Bodenzone bzw. der TUBA-Anwendung im Grundwasser ist eine zuverlässige und nachhaltige Reinigung der gering durchlässigen Bereiche auch im Grundwasser zu erwarten [1].

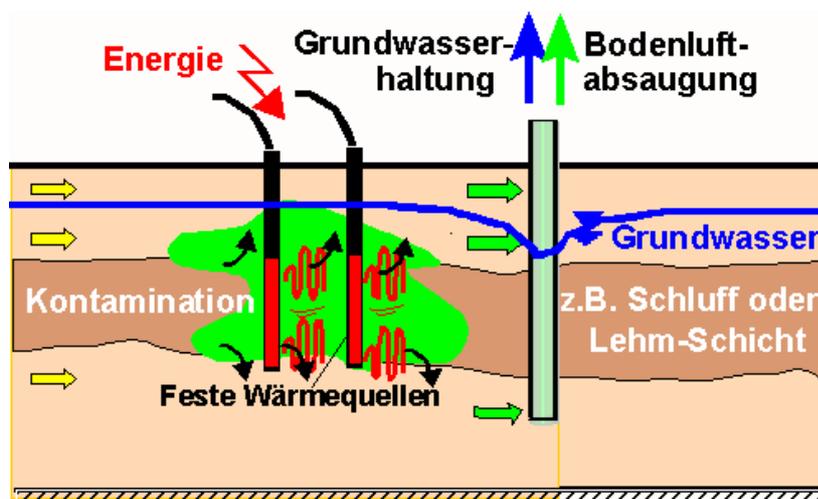


Abb. 13.1 Prinzipskizze der Anwendung fester Wärmequellen im Grundwasser

Die hierbei in der gesättigten Bodenzone ablaufenden nicht-isothermen Mehrphasen-Mehrkomponenten-Übergangsprozesse sind Gegenstand eines neuen US-geförderten Forschungsprojektes. Im Rahmen von SERDP (Strategic Environmental Research and Development Program) wird VEGAS in Zusammenarbeit mit der amerikanischen Sanierungsfirma TerraTherm, Inc. und MKTechSolutions, Inc. als Ingenieurbüro für numerische Simulationen diese Prozesse in der VEGAS - Einrichtung in Experimenten auf verschiedenen Skalen untersuchen.

Hierbei soll am Ende des zweieinhalbjährigen Forschungsprojektes ein deutlich verbessertes Verständnis der komplexen und gekoppelten Prozesse stehen, das die Basis für numerische Simulationen legt und Auslegungen von Sanierungen erleichtern soll.

### **13.2 Wirkungsprinzip fester Wärmequellen im Grundwasser**

Im Untergrund erfolgt durch den Betrieb fester Wärmequellen im Grundwasser (Betriebstemperaturen von mehreren hundert °C) eine Verdampfung der Flüssigkeiten (Wasser und NAPL) in unmittelbarer Nähe der Heizelemente. Das entstehende Gas steigt aufgrund seiner gegenüber der umgebenden Flüssigkeit um Größenordnungen geringeren Dichte auf. Kühlere Flüssigkeit strömt in den erhitzten Bereich nach. Es entsteht ein Übergangsbereich, in dem gleichzeitig wässrige Phase und Gasphase im Grundwasser vorliegen.

In weiterer Entfernung zum Heizelement reicht die eingetragene Energie in Abhängigkeit von der Sanierungszeit nicht aus, um die Flüssigkeit zu verdampfen. Es liegt daher nur wässrige Phase im Porenraum vor. Diese ist in der Vertikalen allerdings unterschiedlich erhitzt, wodurch es in der wässrigen Phase zu einer dichtbedingten Auftriebs- und Walzenströmung kommt. Im Gegensatz zu einem freien Wasserkörper werden diese Bewegungen im porösen Medium stark von den hydraulischen Eigenschaften der Bodenmatrix beeinflusst.

Die Extraktion der Schadstoffe erfolgt vornehmlich über die Gasphase, also über die Absaugung der Bodenluft in der über dem Aquifer liegenden ungesättigten Bodenzone. Begleitend kann eine moderate Grundwasserhaltung je nach Standortbedingungen zusätzlich empfehlenswert sein. Die Reinigung von Abluft und Abwasser erfolgt über konventionelle Anlagen.

### **13.3 Arbeitsprogramm**

Im ersten Halbjahr des Forschungsprojektes stehen Wärmetransportexperimente im Fokus der Untersuchungen. Im Rahmen von Küvettenexperimenten (2D) werden die Prozesse in verschiedenen Bodenarten untersucht, um in Abhängigkeit von der hydraulischen Durchlässigkeit die Wärmeausbreitung besser beschreiben zu können.

Parallel dazu werden in einem der VEGAS-Großbehälter im Technikumsmaßstab 3D Versuche durchgeführt. Im bestehenden „Set-Up“ des THERIS-Versuchsstandes (Abb. 13.2), welcher bislang für Untersuchungen in der ungesättigten Bodenzone diente, werden gesättigte Verhältnisse hergestellt, so dass Untersuchungen zum Wärmetransport beim Betrieb fester Wärmequellen im Grundwasser in einer gering durchlässigen Bodenschicht durchgeführt werden können.

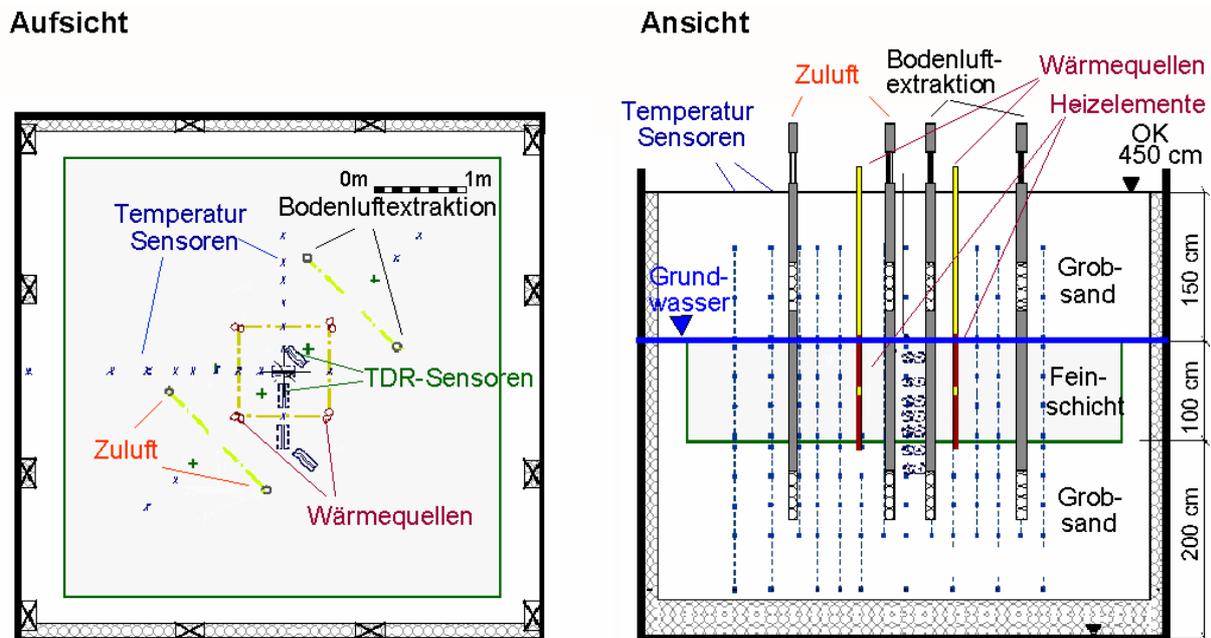


Abb. 13.2: Aufsicht und Grundriss des THERIS-Großbehälters

Parallel zu diesen Experimenten werden die vorhandenen messtechnischen Systeme weiterentwickelt, um diese bei weiteren Großbehälterversuchen zum Einsatz bringen zu können. Hierzu werden ab Frühjahr nächsten Jahres die beiden Mittelsegmente des VEGAS-Großbehälters vollständig entleert und auf der Basis der Ergebnisse der Wärmetransportexperimente mit einem neuen, projektspezifischen Set-Up bestückt. Hierbei wird auch technisches Equipment (Wärmequellen) des US Partners zu Einsatz kommen.

Ab Sommer 2006 werden Experimente zur Quantifizierung der Sanierungsleistung im Technikumsmaßstab durchgeführt. Hierbei sind u.a. die Variation der Schadstoffe und ihrer Einbaukonzentrationen geplant.

Alle Untersuchungen werden numerisch begleitet. Der Fokus liegt hierbei auf der Verbesserung der numerischen Berechnungs- und Modellansätze, um Prognoserechnungen für eine Sanierungsplanung zu verbessern. Der Abschluss der Untersuchungen ist für Ende 2007 geplant.

## 13.4 Literaturhinweise

- [1] Baker, La Change, Kresge, Bukowski, Galligan, Parker, Duteau, Kuhlman, White (2004): *In situ Thermal Destruction (ISTD) of MGP Waste in a former Gasholder: Design and Installation*. In Proceedings of the Fourth Conference on Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds.
- [2] Hiester, U., Koschitzky, H.-P. und A. Färber (2004): *THERIS: Effizienzsteigerung der Bodenluftabsaugung durch feste Wärmequellen – Entwicklungspotentiale neuer Einsatzbereiche*. VEGAS - Statuskolloquium 2004, (Universität Stuttgart), Editor: Barczewski, B., Koschitzky, H.-P., Weber, K. & R. Wege, Institut für Wasserbau, Nr.: 131 - Seiten: 88-97 - ISBN: 3-933761-34-4

## 14 MACHBARKEITSSTUDIE ZUM EINSATZ VON CHEMISCHER OXIDATION ZUR SANIERUNG VON CKW-KONTAMINATIONEN (QUELLENANIERUNG)

Norbert Klaas, Oliver Trötschler, VEGAS, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart

### 14.1 Einleitung

Da halogenierte Kohlenwasserstoffe wegen Ihrer hohen Dichte als Phase in den Grundwasserkörper eindringen können, sind derartige Altlasten häufig nur mit größtem Aufwand zu sanieren. In Fällen, wo die Schadstoffe aufgrund der Untergrundverhältnisse und der Art des Eintrags als Phase relativ fein verteilt im Aquifer vorliegen, könnte eine Oxidation mit chemischen Oxidationsmitteln als Sanierungsvariante in Frage kommen. Ein evtl. geeignetes Oxidationsmittel könnte dabei Kalium- bzw. Natriumpermanganat sein. Dieses kann als wässrige Lösung in den gesättigten Bereich infiltriert werden.

Im Rahmen einer Machbarkeitsstudie werden die aus der Literatur bekannte grundsätzliche Anwendbarkeit der chemischen In-situ-Oxidation, in der englischsprachigen Literatur als In Situ Chemical Oxidation (ISCO) bekannt, in klein und mittelskaligen Versuchen in VEGAS unter realitätsnahen Bedingungen untersucht und die Übertragbarkeit auf den Feldmaßstab systematisch untersucht werden. Solche grundlegenden Untersuchungen fehlen bislang in der Literatur [1], sind aber eine wichtige Voraussetzung für die Anwendung – insbesondere vor dem genehmigungsrechtlichen Hintergrund (wasserrechtliche Genehmigung). Die derzeit in den USA angewendete Methode zielt auf den Einsatz von Rührbehältern zur Bestimmung des Bedarfs an Oxidationsmitteln ab [5]. Küvetten- und Säulenversuche bieten hier den entscheidenden Vorteil, dass hydrogeologische Aspekte der Standorte in die Betrachtung einbezogen werden können. In Ergänzung wird in einem Feldfall die praktische Anwendung dieser Technik untersucht.

### 14.2 Zielstellung

Hauptziel dieser Studie ist es, in systematischen Untersuchungen die Randbedingungen zu untersuchen, unter denen der Einsatz von chemischer Oxidation zur Quellenanierung von CKW Kontaminationen sinnvoll ist. Grundlagenuntersuchungen, primär aus den USA [6, 7, 8] belegen die grundsätzliche Eignung von chemischer Oxidation – insbesondere unter Einsatz von Permanganat – zur Mineralisierung von CKW (z.B. Trichlorethen, Tetrachlorethen). Es sind auch eine Reihe von Anwendungsfällen beschrieben [2, 4, 8, 9, 20], die z.T. unterschiedliche Ergebnisse geliefert haben. Bei einem Teil dieser Anwendungen konnte nur eine kurzfristige Reduktion der CKW-

Konzentration in der Fahne erreicht werden, die anschließend wieder in den Bereich des ursprünglichen Niveaus anstieg [4].

Vor diesem Hintergrund sollen hier zunächst 2D-Küvettenversuche im Meter-Maßstab durchgeführt werden, in denen verschiedene Kontaminationssituationen nachgestellt werden können. Vorteil dieser Vorgehensweise ist es, dass so realitätsnahe Versuche möglich werden, die dennoch schnell und flexibel durchführbar sind. Auf diese Weise lassen sich Einflüsse wie die Konzentration des Oxidationsmittels, die Art der Schadstoffverteilung, der Einfluss des Aquifermaterials und die hydraulischen Randbedingungen variieren. Ein wichtiger Aspekt hierbei ist die Reaktionsgeschwindigkeit unter realen bzw. realitätsnahen Bedingungen. Diese lässt sich in 2D-Versuchen durch Variation des äußeren Gradienten („Grundwasserströmung“) untersuchen. Zwar liegt aus der Literatur eine Vielzahl von kinetischen Daten vor, diese wurden allerdings meist mittels Batch-Experimenten ermittelt und sind auf reale Verhältnisse nicht unbedingt übertragbar.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sollen ein tieferes Verständnis der Einflussparameter liefern, mit denen die Anwendbarkeit von chemischer Oxidation an konkreten Standorten abgeschätzt werden kann.

### 14.3 Stand der Technik

Pilotanwendungen und Teilflächensanierungen mittels ISCO (In-Situ Chemische Oxidation) bei Einsatz von Permanganaten als Oxidationsmittel werden in den USA seit Mitte der '90-er Jahre durchgeführt. Es sind mehr als 20 Standorte [3] bekannt. Speziell zur Anwendung von Permanganaten hat die US-EPA im Jahre 2001 ein technisches Handbuch erstellt, das als Einleitung und Ratgeber in technischen und juristischen Fragen dienen soll [5]. Über mindestens zwei Anwendungsfälle wurde in Europa (Deutschland (2004) [9] und Dänemark (2002) [10]) berichtet, weitere sind in Planung.

Der Einsatz von Permanganat zielt speziell auf die Behandlung von CKW-Schäden, sowohl des Schadstoffherdes (Pools, residuale Sättigung), als auch der Schadstofffahne ab. Bedingt durch die Redoxspannung der Reaktion

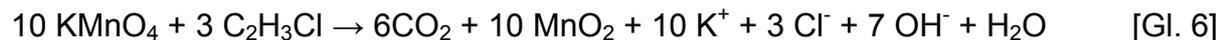
a) im sauren Milieu:



b) im stark sauren Milieu:



lässt sich nur ein Teil der chlorierten Kohlenwasserstoffe oxidieren. Aromatische Kohlenwasserstoffe (BTEX) werden nicht oxidiert und hemmen bei hohen Konzentrationen sogar die Oxidation der CKW. Die oxidierbaren CKW sind: PCE, TCE, DCE und VC. Die Redoxreaktionen für die einzelnen Substanzen lauten [5]:

*Perchlorethen (PCE)**Trichlorethen (TCE)**Dichlorethen (DCE)**Vinyl Chloride (VC)*

Alle Reaktionen sind exotherm und laufen ohne weitere Katalysatoren mit hoher Reaktionsgeschwindigkeit ab. Während die Oxidation von PCE und TCE Säure freisetzt, also eher in neutralem oder alkalischem Grundwasser abläuft, läuft die Oxidation von DCE bevorzugt im sauren Medium ab und wirkt wie im Falle der Oxidation von VC alkalisch. Im Vergleich zu anderen Oxidationsmitteln ( $\text{H}_2\text{O}_2$ , Fenton's Reagenz) konnte eine geringe Abhängigkeit der Reaktion vom pH-Wert und eine höhere effektive Oxidationsleistung festgestellt werden [11]. Allen Reaktionen gleich ist die Bildung von Manganoxid (Braunstein:  $\text{MnO}_2$ ). Braunstein fällt nach dessen Bildung aus und bewirkt in der Regel eine Verockerung des Aquifers mit zum Teil erheblicher Verschlechterung der hydraulischen Leitfähigkeit ( $k_f$ -Wert) [9].

### 14.3.1 Bisherige Probleme bei der Anwendung

Die Analyse von 18 Feldanwendungen [12] (8 Pilotanwendungen), wovon 10 als erfolgreich bezeichnet wurden, zeigte, dass folgende Probleme in der praktischen Anwendung von ISCO auftraten:

- **Effektive Erschließung des Sanierungsfeld:**

Durch Druckinjektion oder Rezirkulationssysteme wird nur der gut durchlässige Bereich erschlossen, die „chemische Reichweite“ ist kleiner als die hydraulische Reichweite (Verbrauch des Oxidationsmittels während der Ausbreitung), die injizierte Menge wurde zu gering abgeschätzt oder der Brunnenabstand im Raster zu weit gewählt. Durch mixed-in-soil oder Einbau von reaktiven Wänden erfolgte kein gleichmäßiger Transport des Oxidationsmittels im Aquifer und somit konnten nur die gut durchlässigen Bereiche saniert werden.

- **Vermischungsprobleme zwischen Reagenz und Schadstoff:**

Nur gut durchlässige Bereiche konnten behandelt werden. Hier liegt der prinzipielle Unterschied zwischen Schüttelversuchen im Labor und Pilotanwendungen im Feld.

- **Veränderung der hydraulischen Durchlässigkeit durch Verockerung:**

Eine Veränderung der hydraulischen Leitfähigkeit konnte definitiv nur im Labor bestimmt werden. In zwei Feldanwendungen wurde der Verdacht auf Verockerung geäußert [9, 10, 12],

- **Rebound-Effekt:**

Der Wiederanstieg der Schadstoffkonzentrationen im Grundwasser wird zumeist auf den mangelnden Kontakt zwischen Oxidationsmittel und Schadstoff infolge lokaler Heterogenitäten zurückgeführt.

- **Primärer Einsatz in Fahnenanierung:**

Anwendungen zur Fahnenanierung führten stets zu temporärem Erfolg, der Rebound lag meistens unterhalb der anfänglichen Konzentration (Zeitdauer: ~ 1 Jahr).

- **CKW-Mobilisierung durch Druckinjektion aus schlecht durchlässigen Bereichen:**

In mehreren Anwendungen konnte eine Erhöhung der Schadstoffkonzentrationen an einzelnen Kontrollbrunnen festgestellt werden, während bei anderen ein signifikanter Rückgang messbar war. Eine direkte Mobilisierung wurde nicht nachgewiesen, jedoch legen die erhöhten Werte diesen Verdacht nahe.

- **Bedarfsmenge zu niedrig kalkuliert:**

Die Bedarfsmenge wurde in den Feldanwendungen in den 90-er-Jahren zu niedrig gewählt, da dem NOM (natural organic matter) und dem Bedarf für die Oxidation von reduzierten Mineralstoffen nicht berücksichtigt wurde. In den „neuen“ Anwendungen wurde die Mindermenge durch die heterogene Ausbreitung des Oxidationsmittels begründet. Eine mehrmalige Injektion bewirkte zumeist eine effiziente Sanierung, jedoch um den Preis höherer Sanierungskosten.

Die aufgetretenen Probleme zeigen, dass besondere Anforderungen an die Erkundung des Schadenfalls, insbesondere der geologischen und hydrogeologischen Bedingungen erforderlich sind. Zudem sollten die Laboruntersuchungen zur Bestimmung des Bedarfs an Oxidationsmitteln auf einer Skalenebene erfolgen, die repräsentativ und aussagekräftig ist, z.B. Säulenversuche oder Küvettenexperimente. Auf dieser Skala können auch Rebound-Effekte und der Einfluss der Manganoxid-Ausfällung auf die hydraulische Leitfähigkeit und die Effizienz der Oxidation gezielt untersucht und quantifiziert werden.

## 14.4 Arbeitsprogramm

Das Arbeitsprogramm schließt Untersuchungen auf unterschiedlichen Skalen ein. Untersuchungen im 0-D Maßstab (Schütteltests) sollen nicht durchgeführt werden. Der Wissensstand in diesem Bereich im Bezug auf eine Feldanwendung ist als ausreichend anzusehen. Schütteltests dienen zur Beurteilung, ob eine Oxidation der CKW erfolgt

und mit welcher Geschwindigkeit und Effizienz dies geschieht, sowie zur groben Quantifizierung des Bedarfs an Oxidationsmittel.

Die für eine Feldanwendung elementaren und zum Teil noch nicht geklärten Aspekte einer möglichen Verockerung des Aquifers, einem anzustrebenden direkten Kontakt zwischen den Reaktanten, der Bestimmung von kinetischen Parametern in Abhängigkeit von Bodentyp (Pufferkapazität, Mineralogie), Schadstoffverteilung (gelöst, fein dispers, residual, Pools) und eingesetztem Oxidationsmittel und dessen Konzentration lassen sich in Säulenversuchen (1-D), sowie Küvettenexperimenten (2-D) mit größerer Repräsentanz beurteilen.

#### **14.4.1 Untersuchungen zur Reaktionskinetik und Effizienz**

Die Untersuchungen zur Reaktionskinetik und maximalen Sanierungseffizienz werden in Säulenversuchen durchgeführt. Es werden die Aspekte:

- Hintergrundgehalte an oxidierbaren Substanzen
- Einfluss der Schadstoffverteilung auf die Sanierungseffizienz
- Änderung der hydraulischen Leitfähigkeit in Abhängigkeit des Bodentyps (Grob- sand, Feinsand, sandiger Schluff)

untersucht.

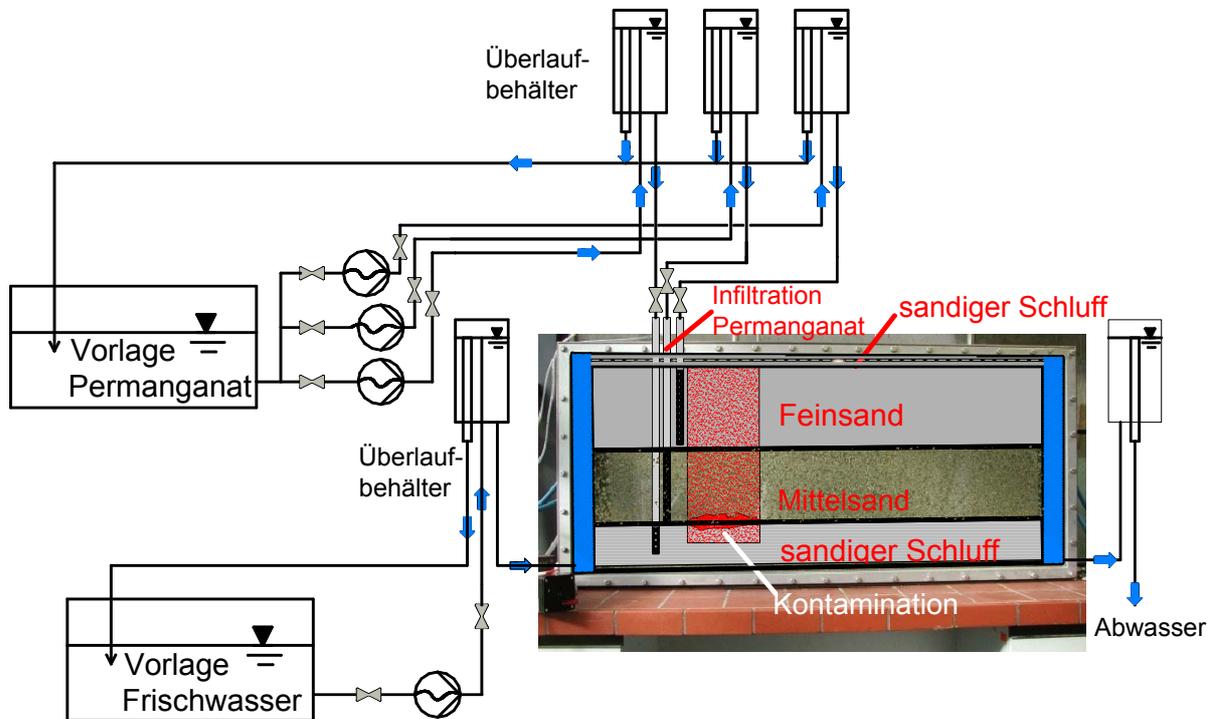
#### **14.4.2 Untersuchungen zum Einfluss der Ausfällung von Manganoxid und Oxidation organischen Kohlenstoffs auf den Stoffumsatz und die hydraulische Leitfähigkeit**

Der Einfluss der Ausfällung von Manganoxid in den Porenräumen auf die Oxidation von residual vorliegendem CKW soll unter möglichst naturnahen Strömungsverhältnissen mit Abstandsgeschwindigkeiten zwischen 4 m/a und 0,85 m/d untersucht werden. Der Bedarf an Permanganat soll in Abhängigkeit des Anteils an organischem Kohlenstoff ( $C_{org}$ ) und in Relation zum Bedarf für die Oxidation der CKW im Rahmen der Untersuchungen im 2-D Maßstab quantifiziert werden.

Die Untersuchungen werden in Edelstahlküvetten mit Glasscheiben durchgeführt (siehe Abb. 14.1). Auf diese Weise kann die Lage der Kontamination, die Wirkungsweise des Oxidationsmittels und Bildung von Manganoxid optisch schon während des Versuchs kontrolliert werden. Die Dimensionen der Küvette sind ca. 140 cm Länge, 65 cm Höhe und 8 cm Tiefe. In dieser Dimension sind realitätsnahe Untersuchungen möglich, die es auf der anderen Seite erlauben, sehr flexibel auf Beobachtungen zu reagieren und die Versuchsbedingungen anzupassen. Zudem können hier genügend große Probenmengen gewonnen werden, um alle erforderlichen Parameter untersuchen zu können, ohne den Versuch zu stark zu stören (Eingriff ins hydraulische System).

Die Küvette wird mit den drei unterschiedlichen Böden schichtenweise befüllt. Über Beimischung von Humus soll der  $C_{org}$ -Anteil der einzelnen Schichten im Bereich zwi-

schen 0,2 – 1,5 % eingestellt werden. Die Küvette wird mit einem Deckel dicht verschlossen. Der Grundwasserspiegel soll um 70 cm gehalten werden, es handelt sich also um einen teilgespannten Aquifer. In Abb. 14.1 ist der Aufbau schematisch dargestellt.



**Abb. 14.1: Versuchsaufbau Küvettenexperimente ISCO**

Eine Mischkontamination von TCE und TCE wird in residualer Sättigung in verschiedene Schichten eingebaut (Feinsand, Mittelsand, sandiger Schluff). Im Bereich der sandigen Böden soll der Schadstoff gleichmäßig über die Höhe eingebracht werden, im Bereich des schluffigen Bodens (unterste Schicht) sollen nur die Randbereiche am Übergang zu der gut durchlässigen Bereichen kontaminiert werden. Hierdurch soll die Ausbildung eines Schadstoffpools auf einem unten liegenden Stauer (Eindringtiefe max. 10 cm) nachgebildet werden.

Das hydraulische System sieht den Einsatz von Überlaufbehältern zur konstanten Einstellung des hydraulischen Gradienten vor. In diese Grundströmung wird über getrennte Infiltrationsbrunnen, die jeweils im Bereich der Schichten verfiltert sind, das Permanganat oberstromig der Kontamination infiltriert/injiziert.

Der Bedarf an Permanganat wird hauptsächlich durch die Masse an organischen Kohlenstoff ( $C_{org}$ , NOM), sowie die Menge der reduzierten anorganischen Verbindungen bestimmt. Über entsprechende Berechnungsansätze kann die erforderliche Menge unter Kenntnis der eingesetzten organischen Masse, sowie der Schadstoffmasse in den

einzelnen Schichten berechnet werden. Interessant ist hierbei, inwieweit die theoretischen Berechnungsansätze den tatsächlichen Bedarf decken, bzw. welche alternativen Ansätze/Verfahrensweisen anzuwenden sind.

Die Küvette wird mit einer Reihe von Probennahmestellen ausgestattet, die eine selektive Grundwasserprobenahme im Bereich der einzelnen Schichten ober- und unterstromig der Schadstoffquelle erlaubt. Hierdurch wird die zeitliche und räumliche Bestimmung von Konzentrationsverläufen der prozessrelevanten Größen:

- PCE- und TCE-Gehalte in Grundwasser und Boden,
- Permanganat-, Mangan-, Kalzium-, Sulfat-, Chlorid- Gehalte im Grundwasser und Feststoffproben, IC, TOC,
- sowie die Entwicklung des pH-Wertes und der Redoxspannung

ermöglicht.

#### **14.4.3 Numerische Modellierung der Küvettenexperimente (Strömung-, Transport- und Reaktionsmodell MODFLOW 2000)**

Die experimentellen Untersuchungen sollen durch ein numerisches Modell abgebildet werden, um Vorhersagen zur Sanierungseffizienz bei alternativen Szenarien treffen zu können.

Aufbauend auf der hydraulischen Daten (kf-Werte der Böden, Druckhöhenverteilung, Durchflüsse) und der Kenntnis des physikalischen Modellaufbaus, wird ein numerisches Strömungsmodell (3D-FEM-Modell MODFLOW 2000) für die Küvette erstellt und kalibriert. Aufbauend auf den Ergebnissen eines Tracertests können die für den Stofftransport wichtigen Daten zur Dispersion bestimmt werden. Über iterative Berechnungen wird das Strömungsmodell um den Stofftransport erweitert. Unter Nutzung der verfügbaren Daten zur Löslichkeit und Verteilung der Schadstoffe kann der Stofftransport, bzw. die „hydraulische Sanierung“ begleitend zum physikalischen Modell modelliert werden.

Unter Einsatz der kinetischen Parameter (Reaktionen pseudo-erster Ordnung) aus Säulenversuchen und in Folge aus den Untersuchungen im 2-D Maßstab soll die Oxidation der Schadstoffe numerisch im Reaktionsmodell, Bestandteil von MODFLOW, nachgebildet, bzw. vorausgesagt werden.

Da MODFLOW keine Mehrphasenströmungen modellieren kann, können nur Prozesse mit gelösten Stoffen modelliert werden, wie sie abstromig der residualen Schadstoffquellen ablaufen. Inwieweit die Prozesse der direkten Oxidation der Pools nachgebildet werden können, bleibt zu prüfen.

Es sollen die geochemischen Prozesse (Ausfällung Manganoxid, Eisenoxide, Oxidation von Huminstoffen, Änderung pH-Wert, etc.) modelliert werden, um Aussagen über Menge und Auswirkung der Oxidationsprozesse treffen zu können. Mit dem numerischen Simulationsprogramm PHREEQ-C können sowohl Gleichgewichtsprozesse, als

auch Batch-Reaktionen berechnet werden und die Auswirkung auf die vorliegende Bodenmatrix dargestellt werden. Hier kann auch die Wirkung der Rücklösung von Manganoxid durch die eingesetzten Säuren quantifiziert werden, wenn Daten zur Reaktionskinetik und Löslichkeit vorliegen.

Die erforderlichen Daten zu den einzelnen Reaktionen können entweder Stoffdatensammlungen entnommen werden oder sind während den Säulenversuchen zu bestimmen.

## 14.5 Literatur

- [1] Hood, E.D.; et al., 2004. Oxidant Fate and Mobility: Controlling Factors and Estimation Methods in Abstracts D7 zu Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds: The Fourth International Conference, May 24 –27<sup>th</sup>, Monterey, CA, USA
- [2] Werner, P.G.; 2004. A Comparison of Full Scale Chemical Oxidation Programs For Remediation of Tetrachloroethene in Abstracts D7 zu Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds: The Fourth International Conference, May 24 – 27<sup>th</sup>, Monterey, CA, USA
- [3] Clayton, W.S.; et al., 2004. In Situ Oxidation: Quantifying the Good, the Bad and the Ugly in Abstracts D7 zu Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds: The Fourth International Conference, May 24 –27<sup>th</sup>, Monterey, CA, USA
- [4] Westergaard, C.; et al., 2004. Permanganate Oxidation of PCE in Moraine Clay in Abstracts D7 zu Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds: The Fourth International Conference, May 24 –27<sup>th</sup>, Monterey, CA, USA
- [5] Technical and Regulatory Guidance for In Situ Chemical Oxidation of Contaminated Soil and Ground Water (ITRC 2001), <http://www.itrcweb.org/ISCO-1.pdf>
- [6] Yan, Y.E., Schwartz, F.W., 1999. Oxidative Degradation and Kinetics of Chlorinated Ethylenes by Potassium Permanganate, *Journal of Contaminant Hydrology* 37, pp. 343–365.
- [7] Schroth, M.H., Oostrom, M., Wietsma, T.W., and Istok, J.D., 2001. In-Situ Oxidation of Trichloroethene by Permanganate: Effects on Porous Medium Hydraulic Properties, *Journal of Contaminant Hydrology* 50, 79-98.
- [8] Schnarr, M., Truax, C., Farquhar, G., Hood, E., Gonullu, T., Stickney, B., 1998. Laboratory and Controlled Field Experiments Using Potassium Permanganate to Remediate Trichloroethylene and Perchloroethylene DNAPLs in Porous Media, *Journal of Contaminant Hydrology* 29, pp. 205–224.
- [9] Edel, H.-G., et al., 2004. In-situ-chemische Oxidation (ISCO), Einsatz eines neuartigen Verfahrens zur Sanierung eines LCKW-Grundwasserschadens, Teil 1 in altlasten spektrum 5/2004, pp. 251 – 258

- 
- [10] Christensen, J.S.; et al., 2004. Permanganate Oxidation of PCE: Laboratory Testing and Design Considerations in Abstracts D7 zu Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds: The Fourth International Conference, May 24 –27<sup>th</sup>, Monterey, CA, USA
- [11] Gates, D.D., Siegrist, R.L., Cline, S.R., 1995. Chemical Oxidation of Volatile and Semi-Volatile Organic Compounds in Soil. 88th Annual Meeting and Exhibition. Air and Waste Management Association, Pittsburgh, PA, pp. 95-TP66.03.
- [12] Yin, Y., Allan, H.E., 1999. Technology Evaluation Report TE99-01: In Situ Chemical Treatment <http://gwrtac.org/pdf/inchem.pdf>

## 15 IN-SITU-IMMOBILISIERUNG VON SCHWERMETALLEN IM GRUNDWASSER

Ralf Crocoll, Crocoll Consult GmbH Bretten

Norbert Klaas, VEGAS, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart

Michael Reinhard, Arcadis Consult GmbH Karlsruhe

### 15.1 Einleitung

Während für viele Standorte mit organischen Kontaminationen Möglichkeiten zur Sanierung mit In-situ-Techniken bestehen, bleibt bei Kontaminationen mit Schwermetallen in der Regel nur die Auskoffnung als Sanierungsoption. Schwermetallkontaminationen spielen zwar zahlenmäßig nur eine untergeordnete Rolle, gehen aber häufig mit schwerwiegenden Grundwasserschäden einher. Bei einer Reihe dieser Standorte liegen tiefreichende und großflächige Schadensbereiche vor, die sich einer klassischen Sanierung durch Auskoffern entziehen.

Ein neuer Ansatz solche Schadensfälle zu sanieren, besteht in der Nutzung des gegen im Grundwasser vorhandenen Sulfats. Gelingt es, durch biochemische Umsetzungen aus diesem Sulfat, Sulfid zu bilden, werden die vorhandenen gelösten Schwermetalle als schwerlösliche Metallsulfide im Aquifer festgelegt. Das hier beschriebene Immobilisierungsverfahren eröffnet die Möglichkeit, bislang mit vertretbarem Aufwand nicht sanierbare Grundwasserschadensfälle mit den Schwermetallen Quecksilber, Blei, Cadmium, Arsen, Antimon und anderen Metallen, die schwerlösliche Sulfide bilden, mit relativ geringen Eingriffen in den Aquifer und damit relativ geringen Kosten zu sanieren. Das Vorhaben wird gefördert von vom Land Baden-Württemberg (BWPLUS) und befindet sich in der Startphase.

### 15.2 Zielsetzung

Mit den Untersuchungen soll ein Immobilisierungsverfahren für Schwermetalle entwickelt werden, welches mobile Schwermetalle unter Nutzung des natürlich im Grundwasser vorhandenen Sulfatgehalts als unlösliche Metallsulfide dauerhaft immobilisiert. Dazu sollen organische Kohlenstoffquellen in den Aquifer eingebracht und auf mikrobiologischem Weg aus Sulfat Sulfid gebildet werden. Das Sulfid reagiert mit einer Reihe von Metallen und bildet so unlösliche Metallsulfide. In der ersten Stufe des Entwicklungsvorhabens wird im Labor die grundsätzliche Machbarkeit geprüft. Anschließend soll im Technikumsmaßstab in VEGAS das Verfahren erprobt und optimiert werden. Hier ist vorwiegend die Betriebsweise im Hinblick auf die Art der Zugabe der organi-

schen Kohlenstoffquelle, sowie die Untersuchung der Reaktionsstrecke zu untersuchen.

In der dritten Stufe ist angedacht, das Verfahren an realen Standorten zu testen und die Funktionsweise unter Realbedingungen unter Beweis zu stellen.

## 15.3 Grundlagen

### 15.3.1 Metallsulfide

Eine Reihe von Metallen aus den Haupt- und Nebengruppen des Periodensystems bilden schwerlösliche Metallsulfide. Die nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über die Löslichkeitsprodukte einiger relevanter Metallsulfide.

**Tab. 15.1: Löslichkeitsprodukte einiger Metallsulfide (bei 20°C)**

Metallsulfid	pK <sub>L</sub>	Metallsulfid	pK <sub>L</sub>
NiS [mol <sup>2</sup> /l <sup>2</sup> ]	21	PbS [mol <sup>2</sup> /l <sup>2</sup> ]	28
ZnS [mol <sup>2</sup> /l <sup>2</sup> ]	24	CuS [mol <sup>2</sup> /l <sup>2</sup> ]	40
CdS [mol <sup>2</sup> /l <sup>2</sup> ]	27	HgS [mol <sup>2</sup> /l <sup>2</sup> ]	52
As <sub>2</sub> S <sub>3</sub> [mol <sup>5</sup> /l <sup>5</sup> ]	28	Sb <sub>2</sub> S <sub>3</sub> [mol <sup>5</sup> /l <sup>5</sup> ]	58

Die Schwerlöslichkeit von Metallsulfiden nutzt man im Kationentrennungsgang aus, der die Grundlage der qualitativen chemischen Analytik bildet. Aus der obigen Tabelle lässt sich berechnen, dass bei einer Konzentration von 5 mg/l Sulfid und einem pH-Wert von 7 im Grundwasser eine maximale Gleichgewichtskonzentration an Quecksilber von 10<sup>S43</sup> Mol/l vorliegen kann (entsprechend 2\*10<sup>-35</sup> g/l).

Diese Rechnung zeigt das Potential dieses Verfahrens. Sulfide sind im Übrigen für viele dieser Metalle die natürlich vorkommenden Minerale, was die Stabilität dieser Verbindungen unterstreicht. Bei Arsen und Antimon muss diese Aussage allerdings relativiert werden, da diese in neutraler wässriger Lösung als Anionen vorliegen. In wie weit die skizzierte Methode auf diese Verbindungen anwendbar ist, muss daher untersucht werden. In der Literatur gibt es allerdings Hinweise, dass auch für diese Metalle eine Sulfidfällung im Grundwasser möglich ist [Kirk et al. (2004)].

### 15.3.2 Redoxreaktionen im Grundwasser

In Baden-Württemberg enthalten die meisten Grundwässer sowohl Sauerstoff als auch Sulfat. Bringt man in derartige Grundwasserleiter einen abbaubaren organischen Stoff ein, wird dieser zunächst unter Verbrauch an Sauerstoff und anderer Elektronenakzeptoren

toren (z.B. Nitrat und Eisen) abgebaut. Ist dieser Vorrat an Elektronenakzeptoren aufgebraucht, wird auch Sulfat als Elektronenakzeptor verwendet.

Es bilden sich daher im Aquifer im Abstrom von Altlasten Zonen aus, in denen bestimmte Reaktionen dominieren [Barczewski et al. 2003]. Die Lage dieser Zonen wird dabei durch das Vorhandensein bzw. das Fehlen der genannten Oxidationsmittel bestimmt. Für die geplanten Untersuchungen müssen die im Folgenden beschriebenen Probleme gelöst werden. Zum einen muss den Mikroorganismen eine genügende Menge an geeigneter abbaubarer Substanz zur Verfügung gestellt werden. Zum anderen gilt es, das Depot bzw. die Quelle an abbaubarer Substanz in einer solchen Entfernung zum Schadensherd im Grundwasserzustrom zu platzieren, dass die Zone, in der Sulfidbildung auftritt mit der Eintragszone der Schwermetalle ins Grundwasser zusammenfällt, um dort eine genügend hohe Sulfidkonzentration aufrechtzuerhalten.

Darüber hinaus müssen umfangreiche Untersuchungen zum Grundwasser- und Aquiferchemismus durchgeführt werden. Besonderes Augenmerk muss auf mögliche Konkurrenzreaktionen gelegt werden. Nitrat, Eisen(III) und Mangan(IV) werden bevorzugt reduziert. Das heißt, dass bei der Auslegung der Menge an organischer Substanz, die für eine Sulfidbildung erforderlich sein wird, diese Randbedingungen mit berücksichtigt werden müssen. Hier ist zu beachten, dass - abhängig vom pH-Wert - Eisen(II) in Anwesenheit von Sulfid als Eisensulfid ausfallen kann. Es müssen also im Einzelfall umfangreiche Untersuchungen zur Spezifikation der Oxidationsstufe und mikrobiologischen Verfügbarkeit der geogenen Eisen- und Manganverbindungen vorgenommen werden. Entsprechende Methoden wurde in VEGAS entwickelt [Wege, 2004] und sollen in diesem Vorhaben angewandt werden. In der Literatur werden außerdem Konkurrenzreaktionen zwischen Sulfatreduktion und Methanogenese einerseits und Eisenreduktion andererseits beschrieben [Lovley und Phillips (1987)]. Auch hierzu müssen die relevanten Parameter in den Untersuchungen überwacht werden.

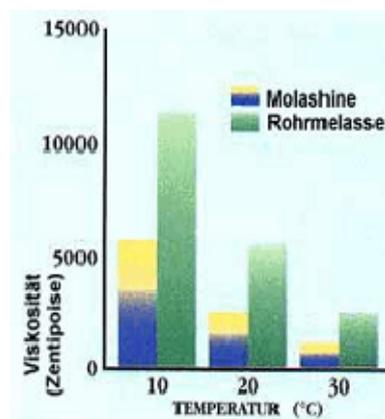
Auch bei Chrom-Schäden, die häufig, könnte diese Methode der Erzeugung anaerober Verhältnisse unter Umständen eingesetzt werden. Zwar bildet Chrom keine schwerlöslichen Sulfide, aber das im Grundwasser vorliegende Chrom(VI) (Chromat) kann unter den reduzierenden Bedingungen mikrobiell zu Chrom(III) reduziert werden. Ob die Mikroorganismen unter Feldbedingungen in der Lage sind, Enzymsysteme zu produzieren, die eine ausreichende Reaktionsgeschwindigkeit ergeben, muss geprüft werden. Chrom(III) ist jedenfalls als Hydroxid schwerlöslich und fällt unter den üblichen pH-Bedingungen im Grundwasser spontan aus ( $pK_L$  30,2). Zudem ist Chrom in der Oxidationsstufe 3 von der Toxizität her weit weniger relevant. Indizien dafür, dass dieses Verfahren auch bei Chrom-Altlasten angewandt werden kann, finden sich in der Literatur [Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie (2000), Vainshtein (2003), Caldwell (2004), Hazen, et al. (2004)]. Ähnliche Vorgänge können u.U. auch bei Arsen für eine Reduzierung der Grundwasserkonzentration eine Rolle spielen [Kirk et al. (2004)].

### 15.3.3 Elektronenakzeptoren

Wie bei allen Sanierungsverfahren, bei denen aktiv Stoffe ins Grundwasser eingebracht werden, stellt sich das Problem der Genehmigungspflicht dieses Eintrags, dem zunächst die Gesetzgebung entgegensteht (Wasserhaushaltsgesetz, WHG). Dies bedeutet, dass belegt werden muss, dass die Stoffe, die eingebracht werden sollen, zu keiner Grundwassergefährdung führen. Speziell bei dem hier vorgeschlagenen Verfahren kommt noch hinzu, dass ein Bereich eines ursprünglich aeroben Grundwasserleiters bewusst anaerob gemacht werden soll, was mit einer Veränderung der Grundwasserqualität einhergeht.

Allerdings lässt bei vielen Standorten die Art und Schwere der Kontamination und die Unmöglichkeit, diese auf anderem Weg zu beseitigen, einen Eingriff in das Redox-Milieu verhältnismäßig erscheinen, dass also der Gewinn an Grundwasserqualität den Effekt durch den Eingriff rechtfertigt.

Als Elektronenakzeptoren für die Sulfatreduktion eignet sich prinzipiell eine Vielzahl an organischen Verbindungen. Um das Problem der Genehmigungsfähigkeit der Einbringung von Stoffen ins Grundwasser gering zu halten, ist zunächst vorgesehen als Elektronenakzeptor Melasse zu verwenden. Diese ist zum einen sehr kostengünstig zu beziehen, da sie in großen Mengen als Nebenprodukt bei der Zuckerherstellung anfällt und überwiegend als Viehfutterzusatz verwendet wird. Daneben findet Melasse auch in der Nahrungsmittelindustrie Verwendung, z.B. als Brotzusatz.



**Abb. 15.1: Viskosität von Molasse und Molashine**

Als interessante Variante zu Melasse könnte Molashine dienen, ein auf Melasse basierendes technisches Produkt, dem Pflanzenöl zugesetzt wird. Dadurch wird die Melasse besser verarbeitbar. Für den Einsatz als Elektronenakzeptor könnte dieses Produkt den Vorteil haben, dass es in weniger viskoser Form als Melasse in den Untergrund verpresst werden kann. Durch den Fettanteil erfolgt eine langsamere Freisetzung und damit verbunden ließe sich ein länger wirkendes Kohlenstoff-Depot erzeugen. Die Kos-

ten für Molashine liegen zurzeit bei ca. 150 € pro Tonne (ohne Transport) und sind somit für das Gesamtverfahren nicht von Belang.

In der Literatur werden zwar Verfahren beschrieben, die organische Schwefelverbindungen zur Immobilisierung von Schwermetallen anwenden [Willett, Koenigsberg (2004)], diese sind aber zum einen von der toxikologischen Bewertung weit kritischer als Molasse, zum anderen sind die Reaktionsmechanismen weit komplexer, was eine Anwendung unter den natürlichen Bedingungen im Feld sehr viel schwieriger macht. Zumindest wird die Steuerung des Prozesses weitaus aufwendiger.

Davis et al. (2004) berichten von Erfolgen bei der Entfernung von Schwermetallen aus belasteten Wässern mittels Polymeren, die Ethanol freisetzen.

Aus dem Bereich der Sickerwasserbehandlung aus Bergbaurückständen werden rein passive Sanierungsverfahren unter Nutzung der mikrobiellen Sulfatreduktion beschrieben, die mit Zugabe von organischem Kohlenstoff oder auch ausschließlich unter Nutzung des geogenen organischen Kohlenstoffs ablaufen [Mueller et al. (1996), Drury (2000), Gammons et al. (2000)]. Aus diesen Untersuchungen sind auch kinetische Daten zur Sulfatreduktion und ihrer zeitlichen Entwicklung in Abhängigkeit von der Art und dem Alter des Substrats bekannt.

**Tab. 15.2: Ergebnisse eines Pilotversuchs zur mikrobiellen Schwermetallentfernung [Gammons et al. (2000)]**

	Summer (8/17/98)			Winter (2/19/98)		
	influent	effluent	% removed	influent	effluent	% removed
T(°C)	19.0	19.1		2.0	2.7	
pH	6.80	6.84		6.42	6.73	
SC (µmho/cm)	872	1070		821	897	
Alkalinity	66.3	178		72	149	
DIC (mg C/L)	16.1	54.4		18.3	36.4	
Eh (mV)	476	-153		493	76	
As	8.6	11.9	(-38%)	7.3	5.2	28.8%
Cd	40.5	0.51	98.7%	32.7	0.52	98.4%
Cu	123	3.6	97.0%	216	1.0	99.5%
Fe	28.8	18.0	37.5%	171	528	(-209%)
Mn	6680	3640	45.5%	7070	8080	(-14%)
Zn (filtered)	9330	10.5	99.9%	9950	101	99.0%
Zn (unfiltered)	9850	42.9	99.6%	10,000	640	93.6%
Sulfate (mg SO <sub>4</sub> /L)	472	289	38.8%	336	313	6.8%
H <sub>2</sub> S (mg H <sub>2</sub> S/L)	0.0	34.1		0.0	2.0	

Heavy metals = filtered (0.45 µm), µg/L; alkalinity = mg CaCO<sub>3</sub>/L

Man erkennt in der Tabelle die hohe H<sub>2</sub>S-Bildung und damit verbunden gute Entfernungsraten für Cadmium, Kupfer und Zink während der Sommerperiode aber auch im Winter trotz einer geringeren H<sub>2</sub>S-Bildung und DIC-Zunahme. Für Arsen war die Effek-

tivität unter den Versuchsbedingungen allerdings gering. Die Methode dürfte also auch bei den üblichen Bedingungen im Grundwasser (ca. 10 °C) effektiv sein (evtl. mit Ausnahme von Arsen).

## **15.4 Arbeitsprogramm**

### **15.4.1 Voruntersuchungen im Labormaßstab**

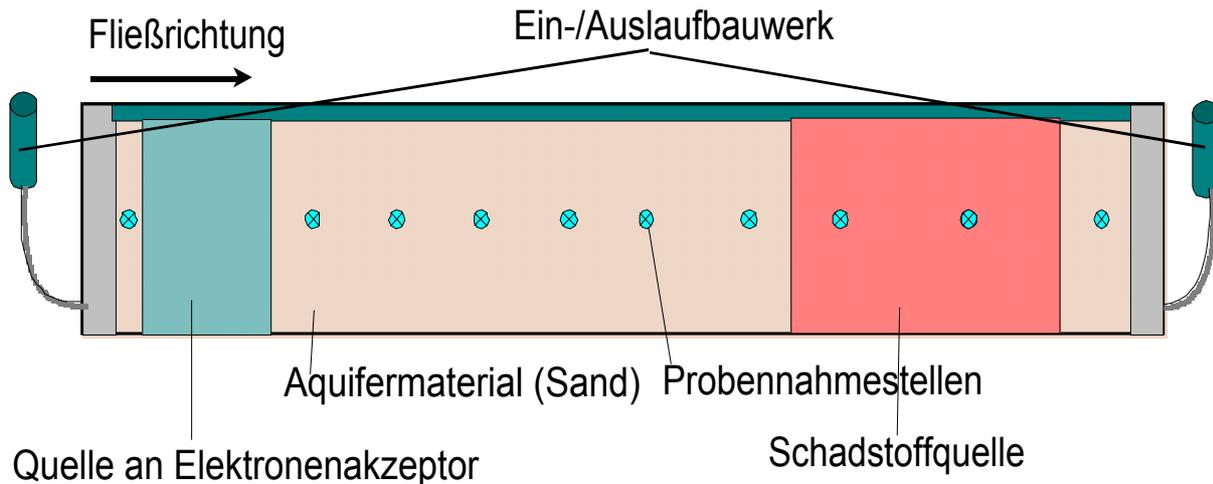
Die Voruntersuchungen in Projektphase I dienen dazu, die grundsätzliche Funktionsweise des Verfahrens zu demonstrieren. Dazu sollen in Säulenversuchen Untersuchungen durchgeführt werden zum Löseverhalten der Molasse bzw. Molashine. Des Weiteren wird die Sulfidbildung aus Sulfat untersucht. In diesen Versuchsreihen soll sulfathaltiges Wasser durch ein Depot mit Molasse geleitet werden und anschließend eine Säule durchlaufen, in der die mikrobielle Reduktion zum Sulfid stattfindet. Durch Variation der Flussraten, bzw. der Aufenthaltsdauer in der Säule wird die Reduktionskinetik untersucht. Die Kenntnis dieser Parameter ist eine wesentliche Voraussetzung für die Dimensionierung der späteren Technikums- und Feldversuche.

Eine dritte Versuchsreihe dient zur Untersuchung der Effektivität der Umsetzung von Sulfid mit Schwermetallen. Hierzu wird in Säulen kontaminiertes Material von einem realen Standort zunächst mit reinem Wasser später mit einer Sulfidlösung durchströmt. Ein wichtiger Parameter hierbei ist die Veränderung des pH-Werts, der einen erheblichen Einfluss auf die Bildung von Sulfiden und deren Stabilität hat.

Ein weiterer Untersuchungsgegenstand ist die Art bzw. Stabilität der gebildeten Sulfide, d.h. Reaktion der ausgefallenen Sulfide auf einen Milieuwechsel hin zu einer aeroben Umgebung. Dies kann beim späteren Einsatz des Verfahrens im Feld zum Beispiel durch Schwankungen des Grundwasserspiegels oder durch vermehrte Grundwasserneubildung geschehen. Kommt es dabei zu nennenswerten Re-Oxidationsprozessen, bei denen die Schwermetalle wieder freigesetzt werden, wäre ein Feldeinsatz dieses Verfahrens kritisch zu bewerten.

### **15.4.2 Untersuchungen im Technikumsmaßstab (Projektphase II)**

Mit den Ergebnissen aus der Phase I werden dann Versuche im technischen Maßstab geplant und dimensioniert werden. Es ist vorgesehen, die Versuche in einen 2d-Versuch und einen 3d-Versuch zu untergliedern.



Im 2d-Versuch soll eine Rinne gefüllt werden. In den vorderen Teil soll ein Depot aus Melasse bzw. eine Möglichkeit zur Dosierung von Melasse eingebaut werden. Der Versuchsstand soll anfangs ohne Depot an Elektronenakzeptoren betrieben und so die Auslaufkonzentration an Schwermetallen ohne Eingriff ermittelt werden. Nach Zugabe des Depots sollte die Auslaufkonzentration an Schwermetallen nach einer Anlaufphase (Adaptationsphase) abnehmen. Der 3d-Versuch dient der Entwicklung einer Methode, die es erlaubt, Melasse (oder andere Elektronenakzeptoren) so in einen Aquifer einzubringen, dass ein gewisser In dieser Phase müssen die Ergebnisse im Hinblick auf die wasserrechtliche Genehmigungsfähigkeit des Verfahrens aufgearbeitet werden.

### 15.4.3 Untersuchungen im Feldmaßstab (Projektphase III)

Zur Demonstration der Funktionsweise ist es sinnvoll das Verfahren unbedingt im Feld zu testen. Eine Feldanwendung ist im Rahmen dieses Projekts aus Kostengründen nicht realisierbar, sollte aber angestrebt werden, nachdem das Verfahren im Technikummaßstab erfolgreich entwickelt wurde.

## 15.5 Literatur

- Barczewski, B., Birkle, M., Tiehm, A., Schulze, S., Ebner, R., Wege, R. Klaas, N. (2003): Charakterisierung der Natural Attenuation-Prozesse am Standort "Stürmlinger Sandgrube". In: 5. Symposium Natural Attenuation (Integrierte Konzepte und Sanierungstechnologien), 2.-3. Dezember 2003, Frankfurt.
- Caldwell, B., Willett, A., Marrs J. (2004): MRC™ and HRC® Soil Reactor Experiment Conducted at a Former Chrome-Plating Shop. Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds: The Fourth International Conference, 24.-27. Mai 2004, Monterey, California.
- Davis A.C., Patterson, B.M., Grassi, M.E., McKinley, A.J., Robertson, B.S. (2004): Effects of Acidity on Bacterial Sulfate Reduction and the Bioprecipitation of Metals in

- Groundwater. BacMin Conference 8 - 10 November 2004, Bendigo, Vic (Australien).
- Drury, W.J. (2000). Modeling of Sulfate Reduction in Anaerobic Solid Substrate Bioreactors for Mine Drainage Treatment. *Mine Water and the Environment*. 19 (1), 18-28.
- Hazen, T.C., et al (2004): Field Investigations of HRC-Stimulated Bioreduction of Cr(VI) at Hanford 100H. Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds: The Fourth International Conference, 24.-27. Mai 2004, Monterey, California.
- Gammons, C.H., W.J. Drury and Y. Li. (2000). Seasonal Influences on Heavy Metal Attenuation in an Anaerobic Treatment Wetland, Butte, Montana. Fifth International Conf. On Acid Rock Drainage, Denver, CO. May 21-24, 2000 SME, Littleton, CO.
- Kirk, M.F., Holm, Th.R., Park, J., Jin, Q., Sanford, R.A., Fouke, B.W., Bethke, C.M. (2004): Bacterial sulfate reduction limits natural arsenic contamination in groundwater. *Geology*, 32(11) 953–956.
- LfU Baden-Württemberg (1993): Der Grundwasserzirkulationsbrunnen (GZB). Handbuch Altlasten und Grundwasserschadensfälle, Texte und Berichte zur Altlastenbearbeitung 7/93.
- Lovley, D.R., Phillips, E.J.P. (1987): Competitive Mechanisms for Inhibition of Sulfate Reduction and Methane Production in the Zone of Ferric Iron Reduction in Sediments. *Applied and Environmental Microbiology*, 53(11), 2636-2641.
- McFarland, M.J., Sims, R.C. (1991): Thermodynamic Framework for Evaluating PAH Degradation in the Subsurface. *Ground Water*, Vol. 29, No. 6.
- Mueller, R.F., D.E. Sinkbeil, J. Pantano, W. Drury, F. Diebold, W. Chatham, J. Jonas, D. Pawluk, M. Thompson, and J. Figueira (1996): "Treatment of Metal Contaminated Groundwater in Passive Systems: A Demonstration Study." 1996 National Meeting of the American Society for Surface Mining and Reclamation, Knoxville, TN May 1996.
- Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie (2000): Materialien zur Altlastenbehandlung Nr. 1/2000, Mikrobiologische Sanierungsverfahren.
- Umweltbundesamt, Projektträger "Abfallwirtschaft und Altlastensanierung (PT AWAS)", Hrsg. (1999): Handbuch der Sanierung von quecksilberbelasteten Standorten.
- Vainshtein, M., Kusch, P., Mattusch, J., Vatsurina, A., Wießner, A. (2003): Model experiments on the microbial removal of chromium from a contaminated groundwater. *Water Research* 37, 1401-1405.
- Wege, Ralf (2004): Untersuchungs- und Überwachungsmethoden zur Beurteilung des Natural-Attenuation-Potentials von gaswerkstypischen Schadensfällen. Dissertation am Institut für Wasserbau der Universität Stuttgart (im Druck).

Willett, A., Koenigsberg, S.S. (2004): Metals Remediation Compound (MRC™): A New Slow-Release Product for In Situ Metals Remediation. Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds: The Fourth International Conference, 24.-27. Mai 2004, Monterey, California.

## 16 ENHANCED NATURAL ATTENUATION ZUM IN-SITU- ABBAU VON HETEROZYKLISCHEN KOHLENWASSER- STOFFEN

Anne Sagner, Andreas Tiehm, DVGW-Technologiezentrum Wasser (TZW), Karlsruhe

Oliver Trötschler, Thomas Haslwimmer, Hans-Peter Koschitzky,

VEGAS, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart

### 16.1 Einleitung

Böden und Grundwässer vieler ehemaliger Gaswerksgelände und Deponien mit Gaswerks-Rückständen sind mit Teerölen kontaminiert, die als Nebenprodukte bei der Stadtgaserzeugung anfallen und häufig aufgrund unsachgemäßer Lagerung in den Untergrund vordringen konnten. Teeröle setzen sich aus hunderten unterschiedlicher chemischer Verbindungen zusammen, von denen sich der größte Teil einer der nachfolgend aufgeführten Gruppen zuordnen lässt: monoaromatische Kohlenwasserstoffe (BTEX), mineralische Kohlenwasserstoffe (MKW), polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK), alkylierte PAK, Phenole und NSO-Heterozyklen (NSO-HET). NSO-HET unterscheiden sich von den PAK durch ein substituiertes Sauerstoff-, Schwefel- oder Stickstoffatom. Diese Atome haben starke Auswirkungen auf die Polarität und damit die Wasserlöslichkeit der Substanzen. Von Arvin et al. (1988) untersuchte Teeröle setzten sich insgesamt aus ca. 85% PAK, 12% Phenolen und lediglich 3% NSO-HET zusammen. Im Gegensatz dazu fanden sich in der wasserlöslichen Fraktion dieses Teeröls 45% Phenole und 38% NSO-HET.

Während PAK in Bezug auf ihre Verbreitung im Boden und Grundwasser und ihre biologische Abbaubarkeit in den letzten Jahrzehnten von vielen Arbeitsgruppen untersucht wurden (reviewed in Tiehm & Schulze 2003), findet man wenig Veröffentlichungen über das Vorkommen und die Abbaubarkeit von NSO-HET. Dies erscheint bemerkenswert, da seit langem bekannt ist, dass einige NSO-HET sowohl toxisch als auch kanzerogen wirken. So kann z.B. Chinolin Leberkrebs auslösen und ist im Ames-Test mit *Salmonella typhimurum* mutagen (Tada et al. 1980). Benzothiophen führt zu Fettstoffwechselstörungen in der Leber und verringert die Zahl der Leukozyten und Erythrozyten nach oraler Gabe an Ratten und Mäusen (Lagno & Sviridov 1972). Robbiano et al. (2004) konnten nach einmaliger oraler Gabe von 500 mg/kg Benzofuran genotoxische Effekte in der Rattenniere nachweisen.

In den letzten Jahren wird MNA (Monitored Natural Attenuation) und ENA (Enhanced Natural Attenuation) bei Grundwasserkontaminationen mit BTEX und PAK zunehmend als seriöse Sicherungs- bzw. Sanierungsalternative zu teils erheblich teureren, konventionellen Sanierungsverfahren erwogen. Um auch NSO-HET in MNA oder ENA mit ein-

zubeziehen, stellt die Abbaubarkeit dieser Kontaminanten an den betroffenen Standorten eine Grundvoraussetzung dar. Dyreborg et al. (1997) stellten Literaturdaten zur Abbaubarkeit von NSO-HET unter verschiedenen Redoxbedingungen zusammen und stellen dabei große Unterschiede fest. Obwohl sich in den letzten Jahren immer mehr Autoren mit dem Thema NSO-HET beschäftigen (Anweiler et al. 2001, Mund & Hollender 2003, Zamfirescu & Grathwohl 2001), sind immer noch viele Fragen in Bezug auf Vorkommen und Abbaubarkeit offen.

Während NSO-HET unter anaeroben Bedingungen im Feld recht persistent sind, zeigt sich, dass nach Zugabe von Sauerstoff NSO-HET gemeinsam mit BTEX und PAK mit hoher Geschwindigkeit abgebaut werden (Sagner & Tiehm 2004). Insofern liegt es nahe, den Abbau durch Sauerstoff zu stimulieren. Da bei gasförmiger Dosierung die geringe Wasserlöslichkeit von  $O_2$  häufig einen limitierenden Faktor darstellt, bietet  $H_2O_2$  eine gute Alternative, um große Sauerstoffmengen in den Untergrund einzubringen.  $H_2O_2$  kann als Flüssigkeit in den Aquifer infiltriert werden, wo es schnell zu Wasser und Sauerstoff zerfällt (Disproportionierung).

Der nachfolgende Beitrag stellt grundlegende mikrobiologische Experimente dar, die als vorbereitende Untersuchungen für eine In-Situ-Pilotsanierung zur Förderung des aeroben biologischen Abbaus der NSO-HET auf einem Feldstandort in Stuttgart, dem Testfeld Süd, durchgeführt wurden.

## **16.2 Stimulation des Abbaus durch $H_2O_2$ in Batchansätzen**

Für die Stimulation des aeroben Abbaus teerölstämmiger Schadstoffe im Grundwasser werden im Feld häufig große Mengen an Sauerstoff benötigt. Da die Löslichkeit an molekularem Sauerstoff im Grundwasser begrenzt ist (max. 10-15 mg/L, technisch In-Situ realisierbar bis ca. 6 mg/L), wird  $H_2O_2$  zur Stimulation des Abbaus im Pilotprojekt eingesetzt. Hiermit können Sauerstoffkonzentrationen von über 20 mg/L im Grundwasser problemlos erzeugt werden. Aufgrund der möglichen toxischen Wirkung von Wasserstoffperoxid auf Mikroorganismen wurden unterschiedliche Experimente durchgeführt, um die Randbedingungen für einen  $H_2O_2$ -Einsatz abzuklären.

Batchversuche bieten die Möglichkeit, mit einem vergleichsweise geringen Untersuchungsaufwand den Abbau organischer Schadstoffe unter einer Vielzahl unterschiedlicher Milieubedingungen zu testen.

### **16.2.1 Stimulation des Abbaus durch $H_2O_2$ in Mikrokosmen des Testfeld Süd**

In Batchansätzen mit Grundwasser aus dem Testfeld Süd, das in 160 m und 200 m abstromig des Schadensherds gewonnen wurde, wurde mit einer regelmäßigen Dosierung von 20 mg/L  $H_2O_2$  gearbeitet. Die Versuche fanden bei Grundwassertemperatur (12°C) statt. Sowohl bei höheren Schadstoffkonzentrationen (Summe NSO-HET 200 µg/L) als auch bei niedrigen Konzentrationen der einzelnen NSO-HET (Summe

<40 µg/L) war in den Mikrokosmen ein mikrobieller Abbau nachweisbar (Sagner & Tiehm 2004). Auch die im Testfeld Süd als problematisch geltenden methylierten Benzofurane wurden in 200 Tagen abgebaut (Abb. 16.1). Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass im Testfeld Süd stoffwechselaktive Mikroorganismen mit einem hohen Abbau-potenzial für NSO-HET vorhanden sind, und dass auch bei niedrigen Konzentrationen im weiteren Abstrom die abbaurelevanten Enzyme der autochthonen Organismen induziert werden.

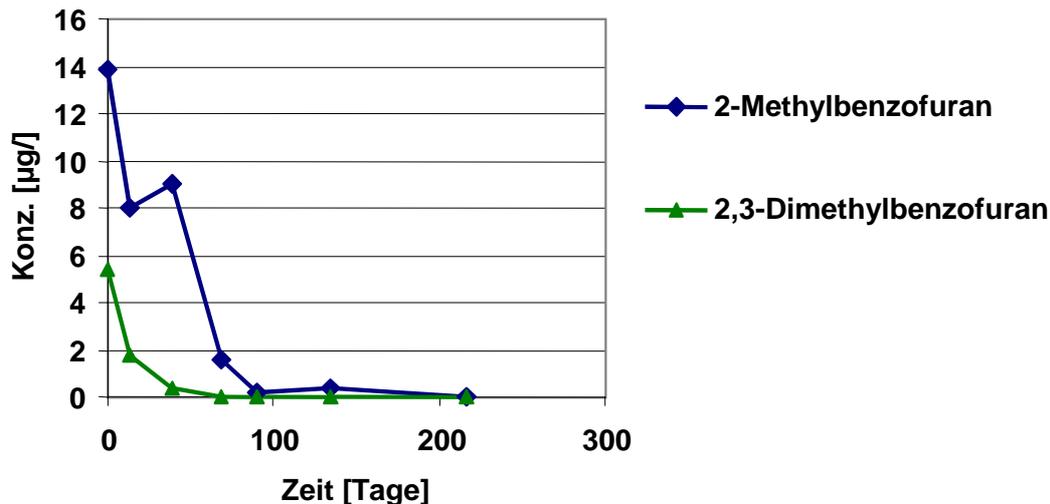
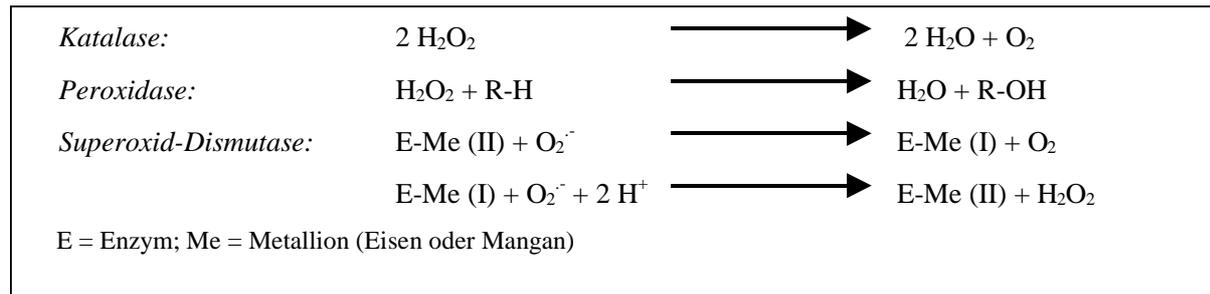


Abb. 16.1: Abbau der methylierten Benzofurane im Testfeld Süd nach Zugabe von 20 mg/L H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

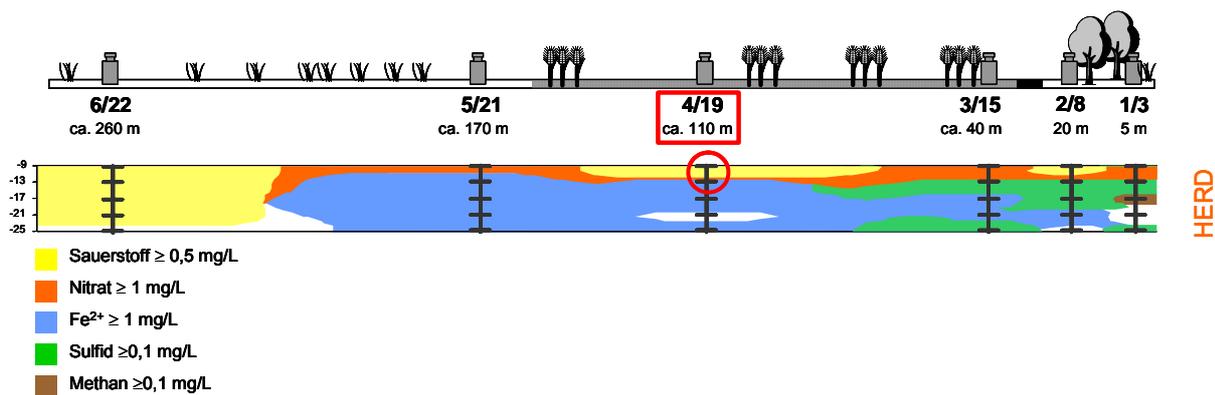
### 16.2.2 Vergleich der H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-Nutzung in Mikrokosmen aus dem Grundwasserschwankungsbereich und tieferen Zonen

Aerobe Organismen bilden zur Entgiftung von reaktiven Sauerstoffspezies Superoxid-Dismutase, Katalase und Peroxidase aus (Abb. 16.2). Die Zerfallsrate von H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ist abhängig von der Katalase- und Peroxidaseaktivität der Mikroorganismen. Obligate Anaerobier haben diese Entgiftungsmechanismen nicht. Es ist daher davon auszugehen, dass der mikrobiologisch katalysierte Zerfall des H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> mit der Menge an Katalase korreliert, über welche die Mikroorganismen verfügen. Der mikrobiologisch katalysierte Zerfall des H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> konkurriert direkt mit dem über die Bodenmatrix katalysierten Zerfall, der eine Freisetzung von Sauerstoff und dessen Lösung im Grundwasser bewirkt.



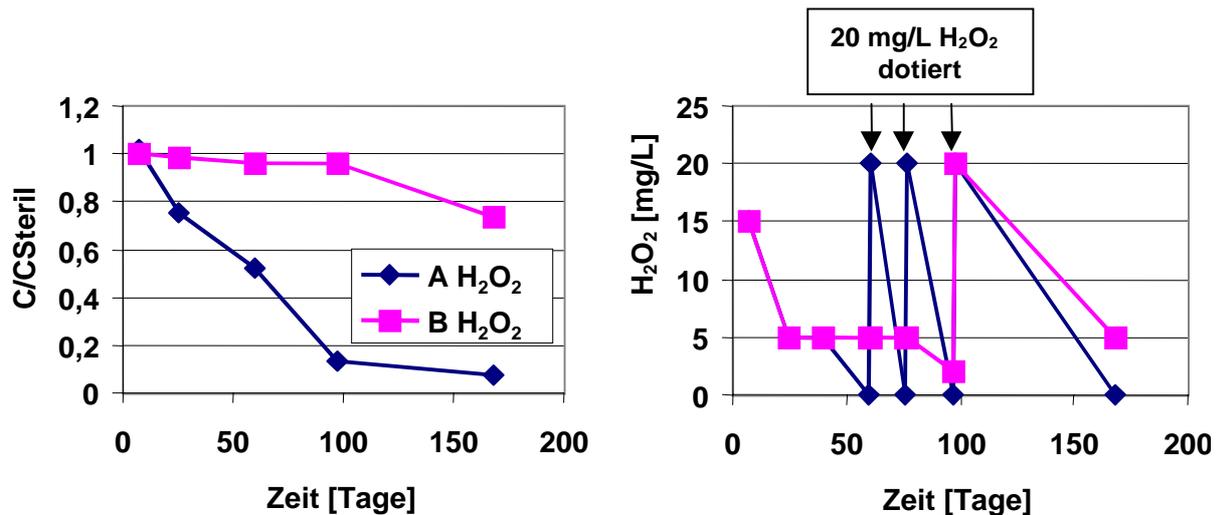
**Abb. 16.2: Katalysierte Reaktionen der Enzyme Katalase, Peroxidase und Superoxid-Dismutase. Nach Pelic-Sabo, 1991**

Um die Nutzung von  $\text{H}_2\text{O}_2$  durch Mikroorganismen, die aus einer strikt anaeroben Redoxzone stammen, im Vergleich zu Organismen zu untersuchen, die aus dem Grundwasserschwankungsbereich stammen, wurden Batchversuche mit Grundwasserproben aus verschiedenen Redoxzonen durchgeführt. Diese Fragestellung wurde mit Proben des Standortes Stürmlinger Sandgrube bearbeitet, da dort die Möglichkeit der horizontalen Probenahme aus definierten Redoxzonen gegeben ist (Wege et al. 2003, Schulze & Tiehm 2003).



**Abb. 16.3: Redoxzonierung entlang der Centerline und Lage der Probenahmestelle E4/19**

Für die Batchversuche zur Stimulation des Bioabbaus durch Zugabe von Luft-Sauerstoff und Wasserstoffperoxid wurde eine Probenahmestelle in der Stürmlinger Sandgrube ausgewählt, die 110 m abstromig vom Schadensherd in der Centerline liegt. Beprobte wurden die Horizonte A (-9 m unter GOK im Grundwasserschwankungsbereich) und B (-13 m unter GOK). Die bisherigen Beprobungskampagnen lassen auf die Verfügbarkeit von Sauerstoff und Nitrat im A-Horizont sowie Eisen(III)- und Sulfat-reduzierende Prozesse im B-Horizont schließen. In Abb. 16.3 ist die Redoxzonierung entlang der Centerline und die Lage der Probenahmestelle E4/19 dargestellt.



**Abb. 16.4: Abnahme der NSO-HET (Summe) in den Versuchsansätzen bei Raumtemperatur aus dem A- und B-Horizont (linkes Bild) und Verbrauch an H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> im A- und im B-Horizont (rechtes Bild)**

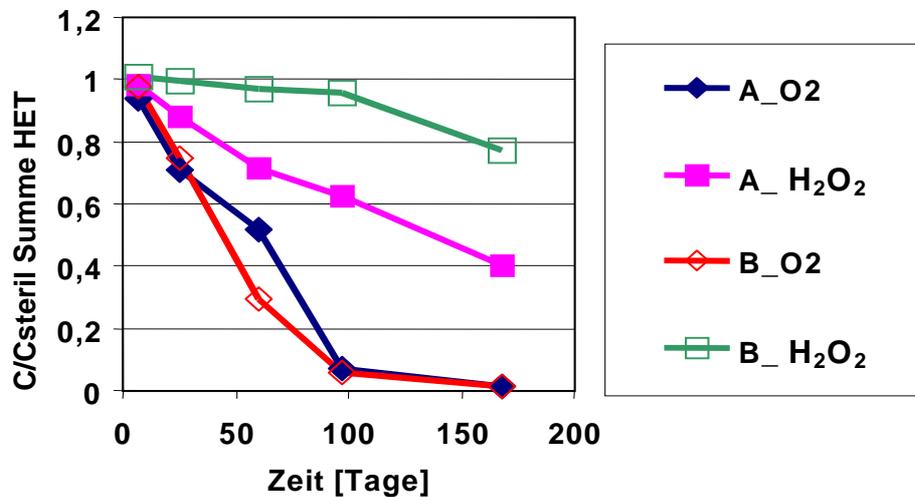
Zusätzlich zu den vorhandenen Schadstoffen wurden folgende NSO-HET mit ca. 200 µg/L aufdotiert: Benzofuran, 2-Methylbenzofuran, 2,3-Dimethylbenzofuran, Benzothiofen, Chinolin, 6-Methylchinolin, Indol, Dibenzofuran, Dibenzothiofen, Xanthen, Acridin und Carbazol. Zu jedem biologisch aktiven Ansatz wurde eine Sterilkontrolle mitgeführt. Alle Ansätze wurden bei Grundwassertemperatur (12°C) inkubiert. Zusätzlich wurden noch je ein Ansatz mit H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> aus jedem Horizont bei Raumtemperatur (25°C) inkubiert. Den Batchansätzen mit H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> wurden anfangs 20 mg/L H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> zudosiert. Bei einer Abnahme auf unter 2 mg/L H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> wurden jeweils erneut 20 mg/L H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> zugefügt.

In den Ansätzen bei Raumtemperatur zeigte sich, dass H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> im Ansatz aus dem B-Horizont nach einer anfänglich schnellen Abnahme des H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> auf einem konstanten Niveau von 5 mg/L verblieb, während im parallelen Ansatz aus dem A-Horizont (GW-Schwankungszone) H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> weiter verbraucht wurde und am 60. Tag zum ersten Mal nachdosiert werden musste (siehe Abb. 16.4, rechtes Bild).

Der anfänglich rasche Verbrauch von H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> auch im B-Horizont lässt sich darauf zurückführen, dass zu Versuchsbeginn die oxidierbaren Wasserinhaltsstoffe (insbesondere reduzierte anorganische Verbindungen) durch abiotische Prozesse aufoxidiert wurden. Das anschließend konstante Niveau von 5 mg/L H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> lässt den Schluss zu, dass die autochthonen Mikroorganismen im B-Horizont anfangs weniger gut in der Lage waren, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> als Sauerstoffäquivalent zu nutzen. In beiden Ansätzen (A und B) korrelierte der Umsatz an H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> im Wesentlichen mit der Abbauaktivität der Mikroorganismen (Abb. 16.4, linkes Bild).

Nach Pelic-Sabo (1991) enthalten fakultativ anaerobe Mikroorganismen in der Regel sowohl Katalase als auch Superoxid Dismutase, *obligat anaerobe* Mikroorganismen

hingegen nicht. Dazwischen liegen die *aerotoleranten* Mikroorganismen mit geringer Superoxid Dismutase- und Katalase-Aktivität.



**Abb. 16.5: Abbau der NSO-HET nach Zugabe von Sauerstoff bzw. H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> in Mikrokosmen aus dem A- bzw. B-Horizont bei Grundwassertemperatur**

Aufgrund der niedrigen Sauerstoffwerte ( $<0,05$  mg/L) und dem niedrigen Redoxpotential ( $-97$  mV) im B-Horizont, liegt die Vermutung nahe, dass dieser Horizont von Mikroorganismen dominiert wird, die nur in geringerem Maße über Katalase verfügen. Die Biozönose benötigt somit eine längere Adaptionszeit, bevor H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> genutzt werden kann.

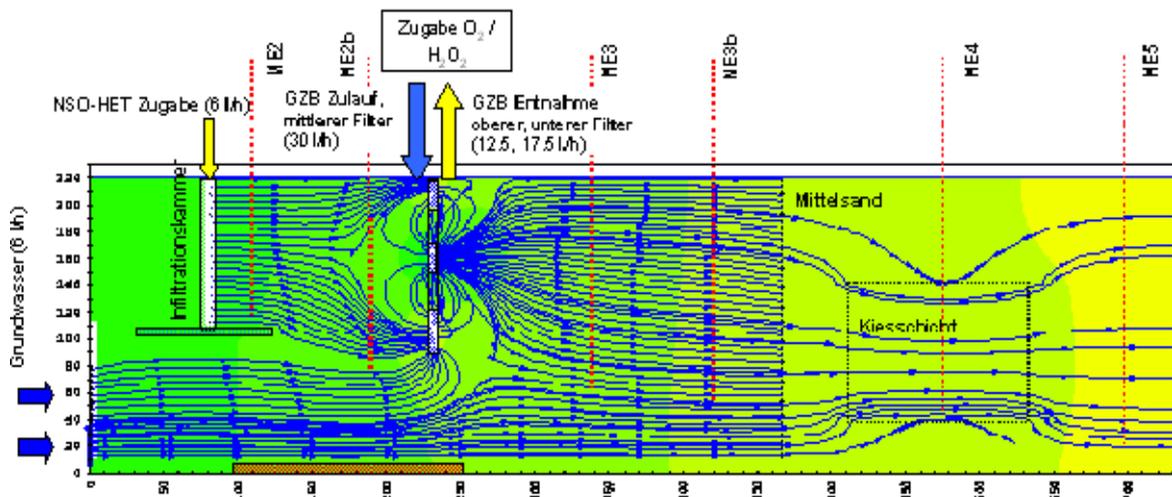
Versuche bei Grundwassertemperatur mit dem gleichen Grundwasser, dem statt H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ausreichend O<sub>2</sub> zudosiert wurde, zeigten, dass die Organismen aus beiden Horizonten erheblich schneller Sauerstoff als H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> nutzen konnten (Abb. 16.5) Unter diesen Bedingungen wurde zwischen den Ansätzen beider Horizonte kein signifikanter Unterschied in der Abbaugeschwindigkeit der NSO-HET festgestellt.

Auf Grund dieser Ergebnisse wurde in den Versuchen im Technikum (Große Rinne VEGAS) mit der Zugabe von ca. 6 mg/L Luftsauerstoff begonnen. Analog erfolgt bei der im Frühjahr 2006 beginnenden ENA-Maßnahme im Testfeld Süd eine initiale Zugabe von Luftsauerstoff, um die Adaption der Mikroorganismen an aerobe Verhältnisse und die Bildung von Katalase zu beschleunigen.

### 16.3 Aerober biologischer Abbau im Technikum: „Große Rinne“, VEGAS

Der Modellaquifer (Abb. 16.6) mit einer Länge von 7,5 m, einer Breite von 1,0 m und einer Höhe von 2,5 m ist mit einem Mittelsand (1-2 mm-Körnung, kf-Wert:  $3,5 \times 10^{-3}$  m/s) befüllt. Im Rahmen eines abgeschlossenen BMBF-Forschungsprojektes (Finkel et al., 2001) wurde der Aquifer im oberstromigen Drittel mit Teerölen kontaminiert (Eberhardt

& Grathwohl, 2002). Da bis zum Beginn des Versuchs die leicht löslichen Heterozyklen vollständig ausgespült waren, wurde über einen verfilterten Brunnenkasten (B 100 cm x L 20 cm x H 100 cm) eine für den Standort „Testfeld Süd“ repräsentative Lösung von Heterozyklen Kohlenwasserstoffen (NSO-HET) infiltriert. Anaerobes Wasser durchströmt den Modellaquifer mit einer mittleren Abstandsgeschwindigkeit von 0,41 m/d. Dies entspricht etwa 1/5 der Abstandsgeschwindigkeit des Feldstandortes.



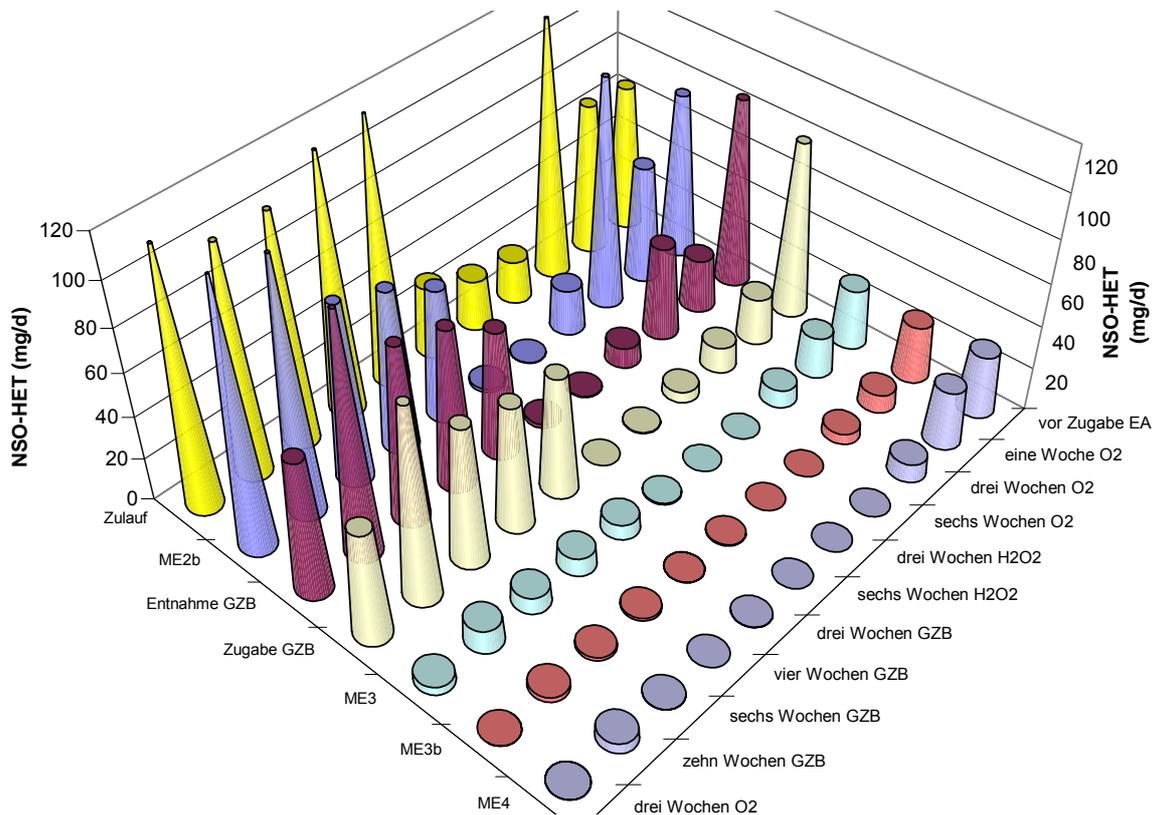
**Abb. 16.6: Schematischer Aufbau der Großen Rinne mit Lage der Probenahmestellen (ME2, 2b, 3, 3b, 4 und 5), Maße in cm**

Das Zugabesystem eines Grundwasserzirkulationsbrunnens (GZB) ist in einem 3“-Edelstahlrammbrunnen ca. 1,5 m unterstromig der Heterozyklenquelle installiert. Über zwei Filterbereiche mit ca. 30 cm Länge wird mittels Pumpen Grundwasser entnommen, über Tage gefördert, mit Luft, bzw. Wasserstoffperoxid angereichert und im mittleren Filterbereich des GZB wieder infiltriert. Das Förderstromverhältnis zwischen Grundströmung und Umwälzrate des GZB liegt bei 2,5 und gewährleistet die vollständige Erfassung der NSO-HET Quelle.

Die sich ausprägende Grundwasserzirkulationswalze erfasst ca. 80% der gesamten Aquifermächtigkeit. Hierdurch wird der erfasste Massenstrom der NSO-HET über den GZB zusätzlich verdünnt. Die hydraulische Auslegung erfolgte mittels eines Strömungs- und Transportmodells (GMS 5.1), das über Durchführung von zwei Tracerversuchen (Zugabe Fluoreszenztracer in Infiltrationskasten, bzw. in den Zugabestrom des GZB) kalibriert und verifiziert wurde.

Ziel der Zugabe von Luftsauerstoff oder Wasserstoffperoxid ist die Schaffung aerober Verhältnisse im Aquifer und die Förderung des biologischen Abbaus der NSO-HET. Vor Zugabe der Elektronenakzeptoren konnte kein nennenswerter biologischer Abbau, jedoch starke Sorptionseffekte auf dem Packer- und Rohrleitungssystem des GZB festgestellt werden. Die Annahme, dass es sich um Sorptionseffekte und nicht um mikrobiellen Abbau handelt, basiert auf dem überproportional stärkeren Massenrückgang der

3-kernigen NSO-HET im Vergleich zu den 2-kernigen, wobei die 3-kernigen NSO-HET (Acridin, Dibenzothiophen) schlechter biologisch abbaubar und besser sorbierbar sind als die 2-kernigen (6-Methylchinolin, Benzofuran). Es konnte zudem eine hohe Belastung der eingesetzten Kunststoffe von ca. 0,2 g NSO-HET/kg EPDM (Packermaterial) bestimmt werden, die im Bereich einer mehrmonatigen Zugabe der NSO-HET liegt.



**Abb. 16.7: Massenströme an NSO-HET in der Großen Rinne (Initiale Zugabe Luftsauerstoff, Zugabe H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, Aussetzen der Zugabe, Zugabe Luftsauerstoff)**

Bereits drei Wochen nach Beginn der Zugabe von Wasserstoffperoxid konnten oberstrom (ME2b) des GZB keine signifikanten NSO-HET-Frachten festgestellt werden, der Abbau lag bei ca. 99%. Nach sechs Wochen H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-Zugabe und Verifikation der hohen Abbauleistungen wurde die Dosierung ausgeschaltet und der über die Infiltrationskammer zugegebene NSO-HET Massenstrom erhöht. In Folge ging der Abbau innerhalb 3 Wochen stark zurück und fiel nach zehnwöchiger Ausschaltung der Zugabe von Elektronenakzeptoren auf Werte < 10% (Vergleich Zugabe GZB mit Zulauf). Zu diesem Zeitpunkt wurde zur Simulation einer intervallweisen Versorgung mit Sauerstoff mit der zweiten Zugabe von Luftsauerstoff begonnen. Nach dreiwöchiger Zugabe lag der Abbau bei ca. 50% des zugegebenen Massenstroms an NSO-HET (Abb. 16.7).

Während der Untersuchungen zum biologischen Abbau der NSO-HET mit einer Betriebsweise, wie sie auf dem Testfeld vorgesehen ist, konnte ein rascher und vollständi-

ger biologischer Abbau der Heterozyklen festgestellt werden. Insbesondere die Zugabe von Wasserstoffperoxid führt zu einer verbesserten Versorgung der Mikroorganismen mit Sauerstoff, woraus ein Abbau der NSO-HET im Bereich der Zirkulationswalze des GZB resultiert.

## 16.4 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Mit Grundwasserproben der kontaminierten Standorte Testfeld Süd und Stürmlinger Sandgrube konnte in Batch-Experimenten eine Stimulation des natürlichen Abbaus von NSO-HET durch die Zugabe von  $H_2O_2$  nachgewiesen werden. Die Daten weisen darauf hin, dass der Zerfall des  $H_2O_2$  von der Katalaseaktivität der Mikroorganismen abhängig ist. Mikroorganismen aus anaeroben Redoxzonen können sich bei Dosierung von  $O_2$  schneller an aerobe Verhältnisse adaptieren als bei Dosierung von  $H_2O_2$ .

Im Modellaquifer „Große Rinne“ wurde der Abbau von NSO-HET unter aeroben Bedingungen untersucht. Nach einer Phase der Luftinjektion mit einsetzendem Abbau der NSO-HET wurde die Zugabe von Wasserstoffperoxid mit einer Zielkonzentration von 50 mg/l in der Strömungswalze des GZB begonnen. Nach dreiwöchiger Zugabe von Wasserstoffperoxid konnte ein annähernd vollständiger biologischer Abbau der Heterozyklen mit Restkonzentrationen  $< 0.5 \mu\text{g/l}$  abstromig des GZB nachgewiesen werden.

Die gewonnenen Erkenntnisse sollen direkt auf die ab Ende 2005 beginnende Pilotanwendung der Zugabe von Wasserstoffperoxid mittels einem Grundwasserzirkulationsbrunnen auf dem Testfeld Süd übertragen werden.

### Danksagung

Die Autoren danken den BMBF für die finanzielle Förderung im KORA-Förderschwerpunkt (02WN0362, 02WN0363).

## 16.5 Literatur

- Annweiler, E., W. Michaelis, and R. Meckenstock. (2001): Anaerobic Cometabolic Conversion of Benzothiophene by a Sulfate-Reducing Enrichment Culture and in a Tar oil-Contaminated Aquifer. *Appl. Environ. Microbiol.* 67, 5077-5083.
- Arvin, E., B. Jensen, E.M. Godsy, D. Grbić-Galić (1988): Microbial Degradation of Oil and Creosote Related Aromatic Compounds Under Aerobic and Anaerobic Conditions. in Wu, Y.C. (ed) *Proc. Int. Conf. Physiochem. Biol. Detox. Haz. Wastes*, Atlantic City, 3.-5. 1988
- Dyrborg, S., E. Arvin, and K. Broholm (1997): Biodegradation of NSO-compounds under different redox-conditions. *J. Cont. Hydrol.* 25, 177-197.
- Finkel, M., Eberhardt, C., Teutsch, G., Grathwohl, P., Liedl, R. (2001): Langzeitentwicklung der Schadstoffkonzentrationen aus Schadensherden. FKZ 02WT9714/0

- Eberhardt, C., Grathwohl, P. (2002): Time scales of organic contaminant dissolution from complex source zones: coal tar pools vs. blobs. *J. Contam. Hydr.* 59, 45-66
- Lagno, Z.Y. and S.M. Sviridov (1972): Toxicity of Benzothiophene and Benzothiophene Sulfone. *Khim Seraorg Soedin Soderzh Neftyakh Nefteprod* 9, 580-583.
- Mundt, M. and J. Hollender (2003): Tar Oil Compounds in Groundwater: Monitoring and Determination of the Microbial Degradation Potential. *Con Soil 8<sup>th</sup> International FZK/TNO Conference on Contaminated Soil, Gent, Belgium, Theme B*, 840-844.
- Pelic-Sabo, M. (1991): Der Einfluß von Wasserstoffperoxid als Sauerstoffquelle auf die Hydrogenperoxid-Oxidoreduktasen von Mikroorganismen des Belebtschlammes. *Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft* 113. Oldenbourg Verlag, München.
- Robbiano, L., D. Baroni, R. Carrozzino, E. Mereto, G. Brambilla (2004): DNA Damage and Micronuclei Induced in Rat and Human Kidney Cells by Six Chemicals Carcinogenic to the Rat Kidney. *Toxicology* 204, 187-195
- Sagner A. & A. Tiehm (2004): Mikrobieller Abbau von Heterozyklischen Kohlenwasserstoffen: Einfluss der Redoxbedingungen. In: Barczewski, B. et al. (Hrsg) *VEGAS-Statuskolloquium 2004*. Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, Heft 131: 18-27
- Schulze, S. & A. Tiehm (2003): Redoxzonierung und mikrobieller Schadstoffabbau am Standort Stürmlinger Sandgrube. In: Schrenk et al. (Hrsg) *VEGAS-Statuskolloquium 2003*. Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, Heft 124, 193-198
- Tada, M., K. Takahashi, Y. Kawazoe, N. Ito (1980): Binding of Quinoline to Nucleic Acid in a Subcellular Microsomal System. *Chem.- Biol. Intera.* 29, 257-266.
- Tiehm, A. and S. Schulze (2003): Intrinsic Aromatic Hydrocarbon Biodegradation for Groundwater Remediation. *Oil and Gas Sci. Technol.- Rev. IFP*, 58,1-12.
- Wege, R., B. Barczewski, N. Klaas, M. Birkle, A. Tiehm, R. Ebner, R. Funke (2003): Nachweis der Stationarität von PAK-Fahnen am Feldstandort "Stürmlinger Sabdgrube". In: Schrenk et al. (Hrsg) *VEGAS-Statuskolloquium 2003*. Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, Heft 124, 193-198
- Zamfirescu, D. and P. Grathwohl (2001): Occurrence and Attenuation of Specific Organic Compounds in the Groundwater Plume at a Former Gasworks Site. *J. Contam. Hydrol.* 53, 407-427.

## 17 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN VON LANGSAMER DNAPL INFILTRATION IN HETEROGENE PORÖSE MEDIEN MIT DEFINIERTER STRUKTUR

Insa Neuweiler<sup>1</sup>, Zhu Wei<sup>1</sup> und Arne Färber<sup>2</sup>

Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart

<sup>1</sup>Lehrstuhl für Hydromechanik und Hydrosystemmodellierung,

<sup>2</sup>Lehrstuhl für Hydrologie und Geohydrologie

### 17.1 Motivation

Für viele technische Anwendungen spielen Mehrphasenströmungsprozesse eine wichtige Rolle. Im Bereich von Altlasten sind viele typische Verunreinigungen von Böden oder Grundwasserleitern oft durch wasserunlösliche Schadstoffe verursacht. Die relevanten Strömungsprozesse sind also Zwei- oder Mehrphasenströmungsprozesse. Durch die Modellierung der Versickerungsprozesse können Prognosen über das Schadensausmaß gemacht werden. Auch Sanierungsverfahren beruhen oft auf dem gezielten Einsatz von Zweiphasenströmungsprozessen. Zur Planung von Sanierungen werden daher numerische Modelle benötigt.

Die Heterogenität des Bodens ist ein großes Problem bei der Modellierung. Weder sind die Bodenparameter in der Auflösung, die nötig wäre um alle relevanten Strukturen aufzulösen, zugänglich, noch würde es Sinn machen, ein dermaßen feinaufgelöstes Modell aufzustellen. Stattdessen wird der Strömungsprozess über größere Einheiten als gemittelter Prozess in einem äquivalenten homogenen Medium genähert. Dabei werden dem homogenen Block effektive Bodenparameter zugeordnet, die die Prozesse im Mittel richtig wiedergeben (siehe Abb. 17.1). Die Zuordnung von der kleinskaligen Bodenparameterverteilung zu effektiven Parametern und Prozessen auf der großen Skala wird als *upscaling* bezeichnet.

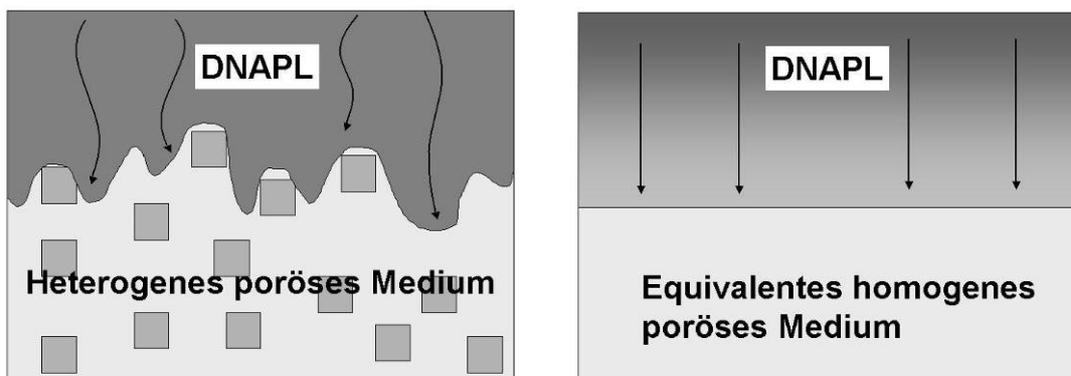


Abb. 17.1: Zweiphasenströmung in einem heterogenen und einem äquivalenten homogenen Medium mit effektiven Parametern

Upscaling für lineare Strömungs- und Transportprozesse ist ein gut untersuchtes Forschungsfeld. Für Zweiphasenströmungsprozesse sind jedoch viele grundsätzliche Fragestellungen unklar. Es ist nicht sicher, ob die gemittelten Strömungsgleichungen auf der großen Skala immer ihre Form behalten, oder wie sich die Nichtlinearität der Gleichung auf die effektiven Parameter auswirkt. Da man jedoch in der Praxis auf die Verwendung hochskalierter Strömungsgleichungen angewiesen ist, ist die grundsätzliche Untersuchung von upscaling von Zweiphasenströmung wichtig.

Es gibt verschiedenste Methoden zum upscaling von Strömungsgleichungen (z.B. Homogenisierungstheorie oder stochastische Methoden, siehe *Hornung, 1997* oder *Zhang, 2002*). Man ist hier jedoch in dem Dilemma, dass angefangen beim Modell für die kleine Skala, bei allen Schritten viele Annahmen und Vereinfachungen getroffen werden, die oft schlecht untersucht sind. Daraus ergeben sich große Unsicherheiten für die äquivalenten homogenen Modelle. Um diese Lücke zu überbrücken benötigen wir Experimente zu Zweiphasenströmung in heterogenen porösen Medien, die uns erlauben, den Fließprozess sowohl im heterogenen Medium auf der kleinen Skala als auch im Mittel quantitativ zu erfassen. Die Durchführung solcher Experimente ist das Ziel des hier vorgestellten Projektes. Die Experimente sollen gleichzeitig als Benchmark für numerische Modelle zu dienen. Mit den validierten numerischen Modellen können dann weitere Untersuchungen zu upscaling durchgeführt werden.

## 17.2 Fragestellungen

Aus den verschiedenen theoretischen Fragestellungen ergeben sich sehr unterschiedliche Anforderungen an Experimente. Hier werden einige konkrete Punkte behandelt.

### 17.2.1 Modelle und Methoden zum upscaling von Zweiphasenströmung

Die Zweiphasenströmungsgleichungen für inkompressible Fluide bestehen aus Kontinuitätsgleichungen für die Masse beider Phasen und aus einer Darcy Gleichung für die Filtergeschwindigkeit jeder Phase. Oft kann man davon ausgehen, dass beide Fluide inkompressibel sind. Weiterhin gibt es die Annahme, dass ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Kapillardruck (der Druckdifferenz in beiden Fluiden) und dem Volumenanteil (Sättigung) eines Fluides besteht. Anders als bei der Einphasenströmung ist die Durchlässigkeit des Bodens keine alleinige Eigenschaft des Bodens, sondern sie hängt von der Sättigung ab. Für die Zusammenhänge zwischen Kapillardruck, Sättigung und Durchlässigkeit gibt es verschiedene teilempirische Modelle. Wenn man nun Zweiphasenströmung in einem heterogenen Medium beschreibt, hängen die Bodenparameter außerdem vom Ort ab.

### *Modellannahmen für Zweiphasenströmung in heterogenen Medien*

Diese Beschreibung von Zweiphasenströmung beruht auf einigen Annahmen, die besonders in heterogenen porösen Medien nicht unumstritten sind. Zum einen setzt sie voraus, dass man ein repräsentatives Elementarvolumen bestimmen kann, so dass eine Kontinuumsbeschreibung auf der Darcy Skala Sinn macht. Aber vor allem die Eindeutigkeit der Beziehungen zwischen Sättigung, Kapillardruck und Durchlässigkeit werden oft hinterfragt. Abgesehen von Hystereseeffekten gibt es auch Ansätze, die eine Abhängigkeit des Kapillardrucks und der Durchlässigkeit nicht nur von der Sättigung, sondern auch von der zeitlichen Änderung der Sättigung proklamieren (z.B. *Hasanizadeh und Gray, 1993*). Die Annahmen sollen hier untersucht werden.

### *Kapillares Gleichgewicht*

Ein äquivalentes homogenes Modell wird aus dem heterogenen durch räumliche Mittelung der Gleichungen bestimmt. Dies ist in geschlossener Form nicht möglich. Bei Zweiphasenströmung kommt erschwerend hinzu, dass die Gleichungen gekoppelt und stark nichtlinear sind. Deshalb ist es sinnvoll bestimmte Strömungsbereiche zu untersuchen, für die sich das Problem vereinfacht. Ein wichtiger Fall ist die kapillar dominierte Strömung. Das bedeutet, dass die Kapillarkräfte, die einen Kapillardruckausgleich bewirken, verglichen zu anderen Kräften auf der Längenskala der Heterogenitäten überwiegen. Es stellt sich also ein Druck ein, der über größere Gebiete als konstant betrachtet werden kann. Die Sättigungsverteilung ist dann entsprechend eindeutig festgelegt. Falls man zusätzlich Strömungsprozesse betrachtet die sehr langsam sind, geschieht der Druckausgleich sehr schnell und kann auf der Längenskala der Heterogenitäten als instantan betrachtet werden. Das bedeutet, dass man unter solchen Bedingungen die transienten Prozesse auf der kleinen Skala vernachlässigen kann und die effektiven Parameterfunktionen für die hochskalierten Modelle für beide Phasen unabhängig voneinander bestimmen kann. Dies erlaubt es, Parallelen zu upscaling für Einphasenströmung zu ziehen. Die Annahme eines kapillaren Gleichgewichts und die damit möglichen Upscalingmethoden werden deshalb in der Praxis oft verwendet (siehe z.B. *Pickup und Stephen, 2000*). Durch dimensionslose Zahlen lässt sich abschätzen, wann man kapillares Gleichgewicht sinnvollerweise annehmen kann. Die Experimente sollen Strömungsprozesse abdecken, die als kapillar dominiert genähert werden können.

### *Gemittelte Infiltrationsfront*

Gewöhnlicherweise wird angenommen, dass sich die Form der Gleichungen der äquivalenten homogenen Modelle nicht ändert. Das muss jedoch nicht unbedingt sinnvoll sein. Bei Infiltrationsprozessen bewegt sich die verdrängende Phase im Mittel in eine bestimmte Richtung, die Fließpfade auf der kleinen, heterogenen Skala fluktuieren jedoch. Fluktuierende Geschwindigkeitsfelder führen z. B. beim Transport von Schadstof-

fen zu Mischprozessen, die durch einen Dispersionsterm beschrieben werden. Analog könnte man für Infiltration von Fluiden in heterogenen Medien erwarten, dass das Modell für den gemittelten Prozess einen Mischterm (oder Dispersionsterm) enthält. Dieser beschreibt keinen wirklichen Mischprozess, sondern die Verbreiterung der Infiltrationsfront im Mittel. Ein solcher Dispersionsterm wurde für mehrere Formen von Zweiphasenströmung bereits postuliert oder abgeleitet (*Langlo und Espedal, 1994* und *Pruess, 1996*). Der Dispersionsterm wird durch die Eigenschaften der Fluktuationen des Geschwindigkeitsfeldes bestimmt. Diese sollen hier untersucht werden, wobei die Fluktuationen auf der (noch kleineren) Porenskala vernachlässigbar gehalten werden müssen.

### **17.2.2 Grundsätzliche Anforderungen an experimentelle Untersuchungen**

Um einen sinnvollen Vergleich zwischen theoretischen Modellen und Experimenten in heterogenen Medien durchführen zu können ist es wichtig, dass der Fließprozess kleinskalig quantitativ erfasst werden kann. Es ist nicht realistisch, eine kleinskalige Messung über den zeitlichen Verlauf aller Variablen (Fluidsättigung und Druck) zu bekommen. Wenn jedoch die Parameter des porösen Materials gut bekannt sind, ist es möglich auch über die Messung der Sättigung Modell und Experiment gut zu vergleichen. Die Anforderungen an das Experiment sind also eine räumlich und zeitlich gut aufgelöste Messung der Fluidsättigung.

Die Infiltrationsprozesse, die hier untersucht werden, sollen in heterogenen Medien stattfinden. Um Aussagen über räumliche Mittel machen zu können, muss das Medium groß dimensioniert sein im Vergleich zur Längenskala der Heterogenitäten. Um Modell und Experiment gut vergleichen zu können ist es wichtig, dass die Struktur des Mediums genau bekannt ist. Um Artefakte zu vermeiden ist es außerdem wichtig, dass die heterogenen Strukturen einfach sind. Das poröse Material selber soll ebenfalls einfach in seinen Eigenschaften sein, damit sicher gestellt ist, dass der Einfluss der Heterogenitäten untersucht wird, und nicht Prozesse, die durch Einflüsse der Porenskala entstehen.

Weitere Anforderungen an das Experiment sind, dass die Randbedingungen genau bekannt und kontrolliert sind. Es soll betont werden, dass die Experimente hier das Ziel haben, theoretische Modelle und Methoden zu verifizieren (oder zu falsifizieren). Das Ziel ist nicht, Bodenstruktur realitätsnah darzustellen.

### **17.3 Experiment zu langsamer DNAPL Infiltration**

Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, werden Versickerungsprozesse von DNAPL (*dense nonaqueous phase liquids*) in einem quasi-zweidimensionalen Küvettenaufbau untersucht. Die Maße der Küvette sind 1050 mm x 810 mm x 16 mm (Breite x Höhe x Tiefe). Die Füllung besteht aus Blockeinheiten von 16 x 16 x 16 mm. Abzüglich

der Ränder ermöglicht das eine Auflösung von 60 x 45 Blöcken. Diese Anzahl ist groß genug, um räumlich gemittelte Größen zu untersuchen. Das Füllmaterial besteht aus Glaskugeln. Damit kommt das poröse Medium vielen Porenskalenmodellen nahe und die Parametereigenschaften lassen sich gut abschätzen. Die Küvette wird von hinten mit einer flächigen Lichtquelle durchleuchtet. Vor der Küvette ist eine Kamera platziert, die das Lichtfeld aufnimmt. Aus der Lichtintensität wird auf die Sättigung des infiltrierenden Fluids geschlossen.

### 17.3.1 Randbedingungen und dimensionslose Größen

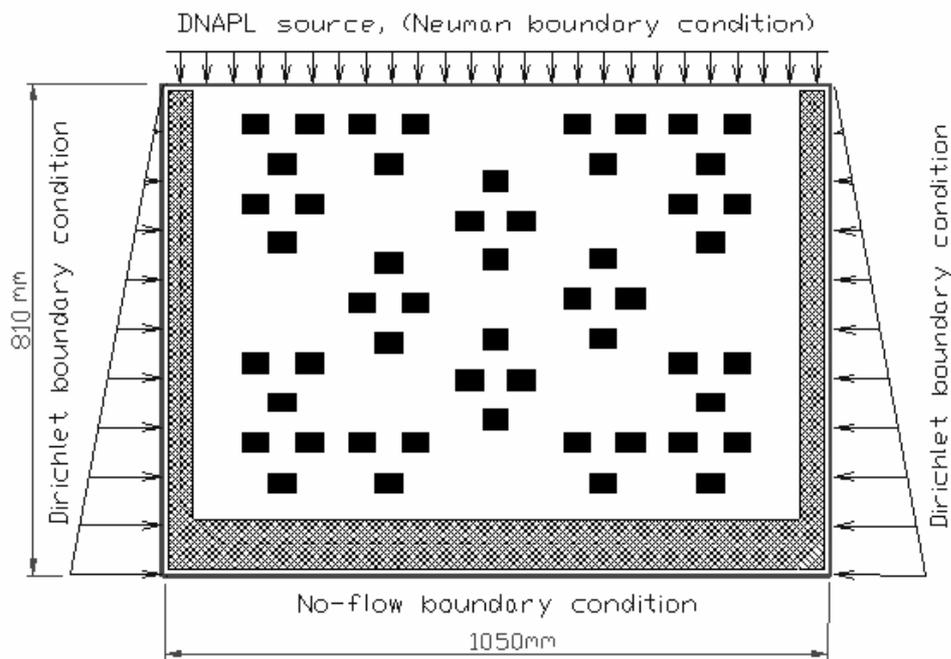
Wie oben dargestellt sollen hier zum einen die Bedingung des kapillaren Gleichgewichts überprüft werden und zum anderen sollen Geschwindigkeitsfelder in heterogenen Medien untersucht werden. Aus diesem Grund sollen langsame Fließprozesse untersucht werden, so dass Kapillarkräfte dominieren. Außerdem sollen Fließprozesse mit konstanter mittlerer Geschwindigkeit untersucht werden, um Fluktuationen des Geschwindigkeitsfeldes besser ableiten zu können. Die Strömung, die hier betrachtet wird, ist vertikal nach unten gerichtet. Um eine konstante mittlere Geschwindigkeit zu bekommen, wird an der oberen Kante eine Neumann Randbedingung (konstanter DNAPL Fluss) angesetzt. Rechter, linker und unterer Rand sind für DNAPL undurchlässig. Durch Verbindung zu Überlaufbehältern wird der Wasserdruck an diesen Rändern konstant gehalten (vgl. Abb. 17.2).

Um viskose Kräfte und Gravitationskräfte gering zu halten wird eine kleine Fließrate eingestellt und ein geringer Dichtekontrast zwischen den beiden Fluiden (Wasser und eine PCE-Toluol Mischung) gewählt. Der Einfluss von viskoser Kraft bzw. Graviationskraft zur Kapillarkraft kann durch die Kapillarzahl bzw. durch die Graviationszahl (*Hilfer und Oren, 1996*) abgeschätzt werden. Hier ergeben sich folgende Zahlen.

$$Ca = \frac{\mu_{DNAPL} \cdot u \cdot L}{K \cdot P_{entr}} = \frac{0.0008 \text{ Ns/m}^2 \cdot 1 \cdot 10^{-5} \text{ m/s} \cdot 0.8 \text{ m}}{6.510^{-11} \text{ m}^2 \cdot 500 \text{ N/m}^2} = 0.2$$

$$Gr = \frac{\Delta\rho \cdot g \cdot L}{P_{entr}} = \frac{55 \text{ kg/m}^3 \cdot 9.81 \text{ m/s}^2 \cdot 0.8 \text{ m}}{500 \text{ N/m}^2} = 0.86$$

Die Durchlässigkeit  $K$  ist die gemessene Durchlässigkeit des Hintergrundmaterials, der Eindringdruck  $P_{entr}$  wurde abgeschätzt,  $L$  ist die Höhe der Küvette. Die mittlere Fließgeschwindigkeit  $u$  ergibt sich aus der Pumprate und der Oberfläche am oberen Rand der Küvette. Die Viskosität  $\mu_{DNAPL}$  und die Dichtedifferenz zwischen DNAPL und Wasser,  $\Delta\rho$ , wurden ebenfalls aus den Fluideigenschaften von PCE und Toluol abgeschätzt. Beide Zahlen indizieren einen Fließprozess im kapillar dominierten Bereich.



**Abb. 17.2: Randbedingungen**

Ein konstanter flächiger Zufluss (Neumann Randbedingung am oberen Rand) wird hier erreicht, indem mit konstanter Rate DNAPL in acht Kammern gepumpt wird, die in der obersten Schicht des porösen Materials in der Küvette mit Tonmaterial abgetrennt sind. Es wird nur ein Zuflussschlauch der Pumpe verwendet, der dann in acht Verzweigungen abgeteilt wird. Da die Widerstände durch das poröse Medium in den einzelnen Kammern unterschiedlich sind, werden zwischen die Pumpe und die Küvette an jeden Schlauch Edelstahlkapillaren mit sehr kleinem Radius geschaltet. Der Radius und die Länge der Kapillaren sind so dimensioniert, dass der Widerstand durch die Kapillaren den Widerstand durch das poröse Medium bei weitem überwiegt. Dadurch fallen Unterschiede des Widerstandes durch das poröse Medium nicht ins Gewicht.

### 17.3.2 Sättigungsmessung

Wie oben dargestellt ist es notwendig, eine zeitlich und räumlich gut aufgelöste Messung der DNAPL Sättigung während des Fließprozesses zu erzielen. Dies soll mittels Durchlichttechnik erreicht werden (siehe *Tidwell und Glass, 1994*). Die Küvette wird während des Fließprozesses von hinten durchleuchtet und die Lichtintensität durch eine Kamara vor der Küvette aufgenommen (siehe Abb. 17.3).

Der DNAPL wird dazu mit einem Tracer gefärbt, so dass der Adsorptionskoeffizient des Lichtes von DNAPL sich deutlich von dem von Wasser unterscheidet. Die Abschwächung der Lichtintensität folgt dem Lambert-Beer-Bouguer-Gesetz. Damit erwartet man nach Durchleuchtung der Küvette an einer Stelle mit Porosität  $n$  und DNAPL Sättigung  $S_n$  die Lichtintensität

$$I = I_0 \exp\left(-\alpha_g X_g - \alpha_w (1 - S_n) n \Delta X - \alpha_{DNAPL} S_n n \Delta X - \alpha_g (1 - n) \Delta X\right)$$

$I_0$  ist die Anfangsintensität der Lichtquelle,  $\Delta X$  ist die Dicke der Küvette,  $X_g$  ist die Dicke beider Glaswände,  $\alpha_g$ ,  $\alpha_w$  und  $\alpha_{DNAPL}$  sind die Adsorptionskoeffizienten von Glas, Wasser und DNAPL.

Teilt man die Intensität durch die Intensität, die zu Beginn des Experiments an der nur mit Wasser gefüllten Küvette aufgenommen wurde ( $I_{eich}$ ), so erhält man

$$\frac{I}{I_{eich}} = \exp(-\alpha_w(1 - S_n)n\Delta X - \alpha_{DNAPL}S_n n\Delta X + \alpha_w n\Delta X) = \exp(-(\alpha_{DNAPL} - \alpha_w)S_n n\Delta X)$$

$\alpha_{DNAPL}$ ,  $\alpha_w$  und  $n$  müssen vorab durch Vergleich von Lichtintensität bei trockenen und mit Fluid gefüllten Küvetten bestimmt werden. Sind diese Größen bekannt kann aus der Lichtintensität (die sich wiederum aus dem Grauwert des Bildes bestimmen lässt), die DNAPL Sättigung berechnet werden. Die Methode ist insofern problematisch, als die Lichtquelle weißes Licht ausstrahlt. Das Lambert-Beer-Bouguer-Gesetz gilt für monochromatisches Licht. Es müssen also Abweichungen von der Linearität zwischen der Lichtadsorption und dem Logarithmus der Intensität angenommen werden. Zum Teil kann der Effekt durch Filter aufgefangen werden, es ist jedoch auf jeden Fall notwendig, eine Eichung für die Sättigung-Intensitätskurve durchzuführen. Das soll hier mittels einmaliger gleichzeitiger Messung der Sättigung in der Küvette an mehreren Stellen mit der Durchlichttechnik und der Durchleuchtung mit monochromatischer hochenergetischer Gammastrahlung geschehen. Die Intensität der hochenergetischen Strahlung wird hier mit einem Szintillationsschirm aufgenommen. Für die hochenergetische Strahlung ist das Lambert-Beer-Bouguer-Gesetz ohne Einschränkungen gültig. Sobald eine Messkurve für den Zusammenhang Sättigung (Durchlichttechnik) – Sättigung (Gammaquelle) besteht, kann mit der Durchlichttechnik auf die tatsächliche Sättigung rückgeschlossen werden. Da die Kamera (12-bit five-megapixel single reflex Digitalkamera Olympus E-1 mit 14-54 mm/f2.8-3.5 Objektiv) eine große zeitliche und räumliche Auflösung hat, kann so die Sättigung während des Fließprozesses mit ausreichender Genauigkeit bestimmt werden.

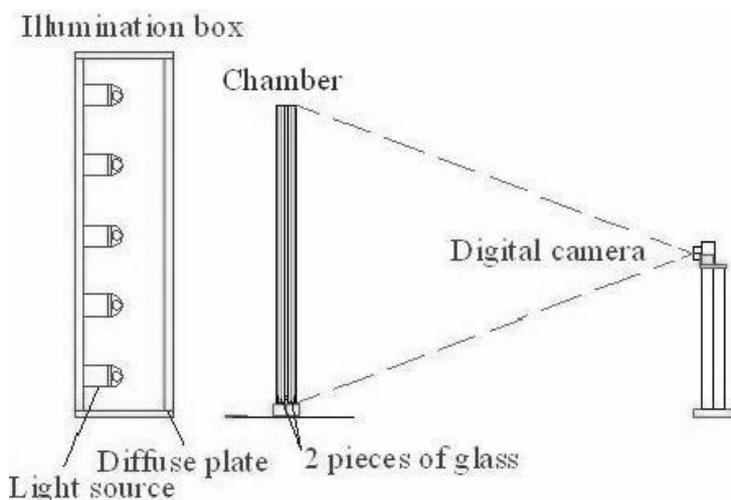
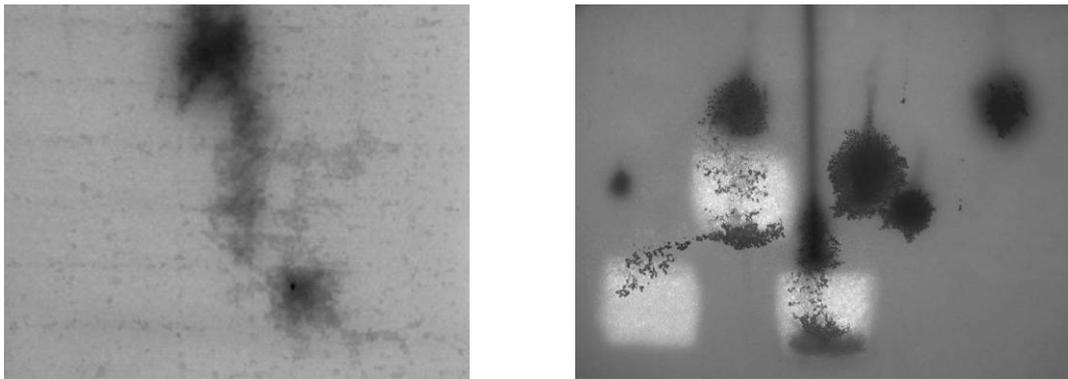


Abb. 17.3: Aufbau der Küvette, Lichtquelle und Kamera

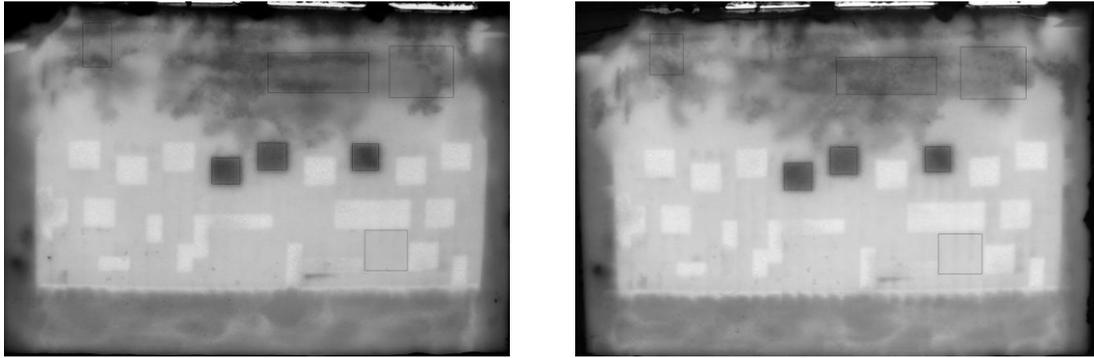
### 17.3.3 Poröses Material – Packung

Die Küvette wird mit Glaskugeln mit einem Durchmesser von 0.4 – 0.5 mm als Hintergrundmaterial gepackt. Darin eingelagert sind Blöcke aus Glaskugeln mit einem Durchmesser von 0.8 – 1.0 mm. Es werden zum einen periodische und zum anderen zufällig verteilte Strukturen der Einlagerungen untersucht. Das größte Problem beim Packen ist die Vermeidung von präferentiellen Fließpfaden für den DNAPL. Zum einen muss verhindert werden, dass DNAPL an den rechten oder linken Rand der Küvette gelangt und dort präferentielle Fließpfade findet. Dies wird erreicht, indem am linken, rechten und unteren Rand eine Schicht Glaskugeln mit sehr kleinem Durchmesser (0.1-0.2 mm) eingebracht wird, für die der Eindringdruck für DNAPL sehr groß ist. Problematisch sind aber vor allem Schichtungseffekte, die beim Füllen selber entstehen. Dass diese Effekte zu präferentiellem Fließverhalten führen können ist in Abb. 17.4 illustriert. Auch Randläufigkeiten an den Glaswänden müssen vermieden werden, damit das Fließverhalten tatsächlich als quasi zweidimensional betrachtet werden kann (vgl. Abb. 17.4).



**Abb. 17.4: Randläufigkeiten während der Infiltration. Dunkler Grauwert: DNAPL, hellerer Grauwert: Wasser. Sehr heller Grauwert: Wasser in einem Block aus größerem Material. Links: Präferentielle Fließpfade durch die Schichtung des porösen Mediums, rechts: Randläufigkeiten an der Glaswand**

Deshalb ist eine aufwändige Packungstechnik erforderlich. Auf die Glaswände wird eine dünne Schicht Glaskugeln mit sehr kleinem Radius mit Leim fixiert. Darauf wird eine dünne Schicht Glaskugeln mit mittlerem Radius (Hintergrundmaterial) fixiert. Die Küvette wird dann horizontal gelagert und mit dem Hintergrundmaterial gefüllt. Dabei wird ein Fallrohr mit Verteiler und anschließenden zwei Sieben verwendet, um jegliche horizontale Schichtung zu vermeiden. In das Hintergrundmaterial werden dann mit Schablonen die Zellen mit groben Glaskugeln eingebracht. Dann wird die obere Glaswand auf die Küvette montiert, die Küvette vertikal gestellt und durch Vibration eine möglichst dichte Packung erreicht. In Vorversuchen wurde damit eine Sättigungsverteilung erreicht, die auf Vorder- und Rückseite der Küvette gut übereinstimmt (siehe Abb. 17.5).



**Abb. 17.5: Aufnahme der Küvette während des Fließprozesses von der Vorderseite (links) und von der Hinterseite (rechts). Das rechte Bild wurde gespiegelt**

## 17.4 Zusammenfassung

Hier wurde ein Typ Experiment vorgestellt, der dazu dienen soll, Annahmen und Modelle, die bei upscaling von Zweiphasenströmung verwendet werden, genauer zu untersuchen. Dabei stehen drei Punkte im Fokus. Der erste Punkt ist die Anwendbarkeit der Zweiphasen-Strömungsgleichungen und Kontinuitätsgleichungen auf der Darcyskala in porösen Medien mit Heterogenitäten. Der zweite Punkt ist die Anwendbarkeit der Annahme eines kapillaren Gleichgewichts. Der dritte Punkt sind die Fluktuationen der Fließgeschwindigkeiten um ihren Mittelwert in einem heterogenen Medium. Das Experiment soll gleichzeitig als Benchmark für numerische Modelle dienen, mit denen upscaling von Zweiphasenströmung weiter untersucht werden soll. Die Fragestellung stellt bestimmte Anforderungen an das Experiment, da sowohl die Eigenschaften und Struktur des porösen Materials als auch die Randbedingungen des Experiments genau bekannt und definiert sein müssen. Außerdem ist eine Messung der DNAPL Sättigung mit großer Orts- und Zeitauflösung erforderlich. In diesem Experiment wird langsame Infiltration mit konstanter Fließrate von DNAPL in ein poröses Medium mit definierter Struktur untersucht. Die DNAPL Sättigung wird mit einer Durchlichttechnik gemessen. Damit können die Anforderungen erfüllt werden und ein Schritt zur Überbrückung von Modellannahmen und experimentellen Untersuchungen von upscaling von Zweiphasenströmung erreicht werden.

## 17.5 Literatur

- Hassanizadeh, S.M. und W.G. Gray, Thermodynamic basis of capillary pressure in porous media, *Water Resources Research* 29(10), 2289-3405, 1993.
- Hilfer, R. und P.E. Oren, Dimensional analysis of pore scale and field scale immiscible displacement, *Transport in Porous Media* 22, 53-72, 1996.
- Hornung, U., *Homogenization and Porous Media*, Springer, New York, 1997.

- Langlo, P. Und M.S. Espedal, Macrodispersion for two-phase, immiscible flow in porous media, *Advances in Water Resources* 17, 297-316, 1994.
- Pickup, G.E. und K.D. Stephen, An assessment of steady-state scale-up for small-scale geological models, *Petroleum Geoscience* 6, 203--210, 2000.
- Pruess, K., A fickian diffusion model for the spreading of liquid plumes infiltrating porous media, *Transport in Porous Media* 24, 1-33, 1996.
- Tidwell, V.C und R.J Glass, X-ray and visible-light transmission for laboratory measurement of 2-dimensional saturation fields in thin-slab systems. *Water Resources Research* 30(11), 2873-2882, 1994.
- Zhang, D., *Stochastic methods for flow in porous media*, Academic Press, San Diego, 2002.

## 18 CHEMISCHE ASPEKTE DER ANWENDUNG VON EISEN-KOLLOIDEN ZUR SANIERUNG VON CKW-KONTAMINATIONEN

Rainer Köster, Forschungszentrum Karlsruhe, FZK

Norbert Klaas, VEGAS, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart

### 18.1 Einleitung

CKW-Altlasten stellen sowohl was die Zahl der Fälle wie auch die Schwere der Auswirkungen nach wie vor die größten Probleme für die Schutzgüter Mensch, Grundwasser und Boden dar. In Baden-Württemberg sind CKW für ca. ein Drittel aller Altlasten als beurteilungsrelevante Substanzen verantwortlich [LfU Baden Württemberg (1998)]. Da diese Stoffe wegen ihrer hohen Dichte als Phase in den Grundwasserkörper eindringen können, sind derartige Altlasten häufig nur mit größtem Aufwand zu sanieren. Bei vielen dieser Standorte ist eine Herd-Sanierung gescheitert oder von vorne herein als unmöglich erkannt worden, da sich die exakte Lage des Phasenkörpers den Bemühungen einer Erkundung oder wegen der großen Tiefe klassischen Sanierungsverfahren entzogen haben.

Die heute einzige Möglichkeit derartige Fälle anzugehen, liegt in pump-and-treat-Maßnahmen (P&T-Maßnahmen). Dabei wird Grundwasser aus dem Abstrom einer Schadstoffquelle über Sanierungsbrunnen abgepumpt, mittels Aktivkohlefiltern oder über Strippverfahren gereinigt und schließlich einem Vorfluter zugeführt oder auch wieder reinfiltriert. Nachteil dieser Vorgehensweise ist es, dass diese Sanierungsverfahren auf unbestimmte Zeit (dies können viele Jahrzehnte sein bis die Emission natürlicher Weise auf ein akzeptables Niveau zurückgeht) betrieben werden müssen. Dies ist natürlich auf die gesamte Sanierungszeit gerechnet mit extrem hohen Kosten verbunden.

Ein Ansatz bei solchen Fällen, die Kosten erheblich zu reduzieren, könnte sein, Eisenkolloide in den Fahnenkörper einzubringen. Elementares Eisen reagiert mit CKW-Verbindungen zu Eisen(II), Chlorid und Alkanen oder Alkenen. Diese Reaktionen sind sehr gut untersucht und unter bestimmten Bedingungen sehr effektiv [Dahmke (1997)]. Mit dieser Alternative zu pump-and-treat-Maßnahmen könnten die Kosten für Fahnen-sanierungen erheblich gesenkt werden, wenn es gelingt die Kolloide im Untergrund ausreichend gleichmäßig über den Querschnitt der Fahne zu verteilen. Dazu müsste in regelmäßigen Abständen die Einbringung wiederholt werden.

## 18.2 Zielstellung

### 18.2.1 Ziel: Entwicklung einer innovativen Sanierungstechnik

Vor dem Hintergrund des an vielen Standorten ungelösten Problems von CKW-Altlasten, die nicht nachhaltig sanierbar sind, da die Schadstoffphase nicht entfernt werden kann, sollen in einer Machbarkeitsstudie Ansätze geprüft werden, die mittels der Infiltration von Eisenkolloiden in den Fahnenkörper von Altlasten, die Schadstoff-fahne sanieren. Die Wirksamkeit von elementarem Eisen zur Reduktion von CKW ist in vielen Arbeiten belegt [z.B. Zhang 2003, Paul et al. 2003, Dahmke 1997]. Eisenbarrieren, durch die das Grundwasser hindurchfließt, eignen sich daher grundsätzlich zur Behandlung von CKW-Fahnen [Birke et al.].

Ein Problem, das bei reaktiven Wänden häufig auftritt, ist allerdings die Tatsache, dass die Wirksamkeit der Wände relativ schnell nachlässt, da sich auf dem Eisen durch chemische Reaktionen Ablagerungen bilden oder durch das Entstehen von Wasserstoff die Durchlässigkeit der Wand stark vermindert wird. Außerdem ist die Erstellung einer reaktiven Wand mit erheblichen Baumaßnahmen verbunden, die in der Regel hohe Kosten verursachen, so dass sich in vielen Fällen kein Kostenvorteil gegenüber P&T-Maßnahmen ergeben

Ein Ansatz, die Vorteile des Einsatzes von elementarem Eisen zu nutzen, ohne die erwähnten Nachteile in Kauf nehmen zu müssen, könnte darin liegen, das Eisen in kolloidaler Form in den Untergrund einzubringen. Dies hätte den Vorteil, dass die Eisenpartikel wegen ihres kleinen Durchmessers und der damit verbundenen hohen spezifischen Oberfläche äußerst reaktiv sind und daher nur vergleichsweise geringe Eisenmengen erforderlich sind. Zudem kann die Eisengabe mit minimalen Eingriffen in den Untergrund erfolgen. Beide Umstände bedeuten erhebliche Kostenvorteile.

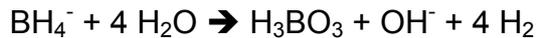
### 18.2.2 Ziel: Entwicklung und Optimierung neuartiger Fe-Kolloide

Kolloidale Suspensionen von Eisenpartikeln werden durch die Reduktion von Eisensalzen mit Natriumborhydrid hergestellt [Zhang 2003]. Es entsteht elementares Eisen, Borsäure und Wasserstoff.



Das Ergebnis ist eine Partikelsuspension mit einer breiten Partikelgrößenverteilung im Submikrometerbereich, die aufgrund des hohen Salzgehaltes und des neutralen pH-Werts nicht stabil ist.

Da aufgrund der katalytischen Zersetzung des  $\text{NaBH}_4$  an Eisen ein großer Überschuss von  $\text{NaBH}_4$  erforderlich ist, entsteht Wasserstoff nach der Gleichung:



Durch die Gasentwicklung wird die Suspension aufgrund eines Flotationseffektes zusätzlich destabilisiert. Das agglomerierte Eisen ist nicht mehr in der Lage, in ein Modelaquifer einzudringen.

Um die Migrationsfähigkeit des Eisens im Aquifer zu erhöhen, ist es notwendig, eine kolloidale Suspension herzustellen. Der erste Ansatz dazu ist eine elektrostatische Stabilisierung durch eine Erhöhung der Oberflächenladung der Partikel durch ein anorganisches Coating. Dadurch kann eine Agglomeration der Partikel während der Synthese vermieden werden.

In einem zweiten Schritt könnte auf den Primärpartikeln ein Coating mit bioabbaubaren Tensiden oder Polymeren erfolgen. Dies optimiert die Partikeleigenschaften in mehrerer Hinsicht:

Zum einen wird die Stabilisierung durch eine sterische Komponente ergänzt. Die Abscheidung der Partikel an geladenen Oberflächen im Aquifer wird dadurch erschwert.

Zusätzlich zur elektrostatischen Stabilisierung kann eine sterische Komponente die Stabilität der Partikelsuspension besonders bei höheren Salzkonzentrationen verbessern.

Wird zum Coating eine Verbindung mit hydrophoben Zonen verwendet, könnte die chemische Stabilität des Eisens im Wasser und damit die Selektivität der Reduktion erhöht werden.

Ein hydrophobes Coating bewirkt zudem eine erhöhte Adsorption der CKW an der Partikeloberfläche, die daraus resultierende lokale Konzentrationserhöhung bewirkt eine Steigerung der Reaktionsgeschwindigkeit [Alessi 2001]. Auf die Verwendung von Palladium zur Erhöhung der Reaktionsgeschwindigkeit wird verzichtet, da das Einbringen von Palladium in den Boden umweltpolitisch bedenklich ist [Kopinke 2004].

## 18.3 Stand der Technik, erster Ergebnisse

### 18.3.1 Anwendung von elementarem Eisen bei CKW-Altlasten

Weltweit, insbesondere in Nordamerika und Westeuropa, räumt man in den letzten Jahren den Reinigungswandtechnologien (auch Reaktive Wände genannt, im angelsächsischen Sprachraum z.B. Permeable Reactive Barriers (PRB), Treatment Zones oder funnel and gate) erhebliche Zukunftschancen ein, da sie als passive in situ-Verfahren z.B. gegenüber den herkömmlichen aktiven Pump-and-Treat-Methoden deutliche Vorteile besitzen: Der Energieverbrauch ist extrem gering, es erfolgt kein massiver Eingriff in das Grundwasserregime und die Sanierungsmaßnahme findet direkt im Untergrund im kontaminierten Grundwasserleiter statt, d.h. eine aufwendige

Anlagentechnik ist a priori weder einzurichten noch zu betreiben noch auf längere Zeit zu unterhalten oder vorzuhalten.

Scherer et al. (2000) werteten weltweit 124 Anwendungen von Reinigungswänden aus von denen ca. 45% auf Basis von elementarem Eisen betrieben wurden. Die Mehrzahl dieser Beispiele wurde bei Kontaminationen mit CKW eingesetzt. Probleme, die die Wirksamkeit von derartigen Reinigungswänden einschränken, sind zum Beispiel das Verstopfen der Wände durch Reaktionsprodukte (z.B. Eisenoxide oder auch Wasserstoff), die Minderung der Effektivität durch oberflächige Belegung des Eisens mit Oxidationsprodukten oder pH-Verschiebungen im Grundwasser. Durch solche und andere Langzeiteffekte lassen sich die Standzeiten von solchen Wänden im Einzelfall häufig nur schwer vorhersagen.

Bezüglich der Kosten sind reaktive Wände im Vergleich zu konventionellen pump-and-treat-Maßnahmen erst auf lange Sicht rentabel [Stupp 2001], da sie mit erheblichen Investitionskosten verbunden sind. Gepaart mit den nur schwer vorhersagbaren Langzeiteffekten ist dieser Umstand nach wie vor ein Hemmnis beim verbreiteten Einsatz dieser Technologien, der aus umweltpolitischer Sicht durchaus wünschenswert wäre.

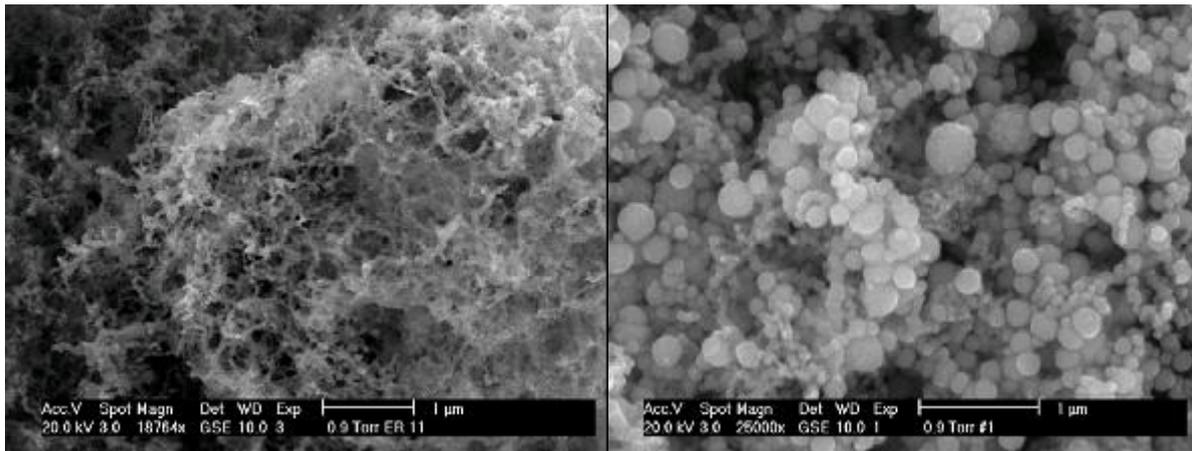
### **18.3.2 Stabilität und Reaktivität (chemisch und hydraulisch) der Kolloide, bisherige Probleme**

Zur Synthese von Eisenkolloiden wird im Allgemeinen eine Reduktion von Eisensalzen wie  $\text{FeCl}_3$ ,  $\text{FeCl}_2$  oder  $\text{FeSO}_4$  durch Natriumborhydrid angewandt. Es entsteht eine Eisensuspension mit breiter Partikelgrößenverteilung, die aufgrund der geringen Oberflächenladung der Partikel und der hohen Ionenstärke in der Suspension nicht stabil ist. Da anwesender Sauerstoff das Eisen oxidiert, muss die Reduktion unter Schutzatmosphäre, zum Beispiel in einer Glove-Box, durchgeführt werden.

Um die notwendige Menge an kolloidalem Eisen für Migrationsversuche zu gewinnen, wurde am ITC-WGT eine Syntheseapparatur in Betrieb genommen, die es erlaubt, die Kolloide unter definierten, reproduzierbaren Bedingungen, wie zum Beispiel Sauerstoffausschluss, außerhalb einer Inertgasbox, herzustellen.

Dabei wird die Morphologie der Partikel gezielt durch einen Tensidzusatz beeinflusst.

In Abb. 18.1 sind die unterschiedlichen Partikelformen dargestellt. Ohne Verwendung von Tensiden entsteht ein Geflecht aus zusammengewachsenen Primärpartikeln, die Größe des Aggregates beträgt einige Mikrometer. Der Tensidzusatz führt zur Bildung von separaten Partikeln in der Größenordnung von 100 nm.

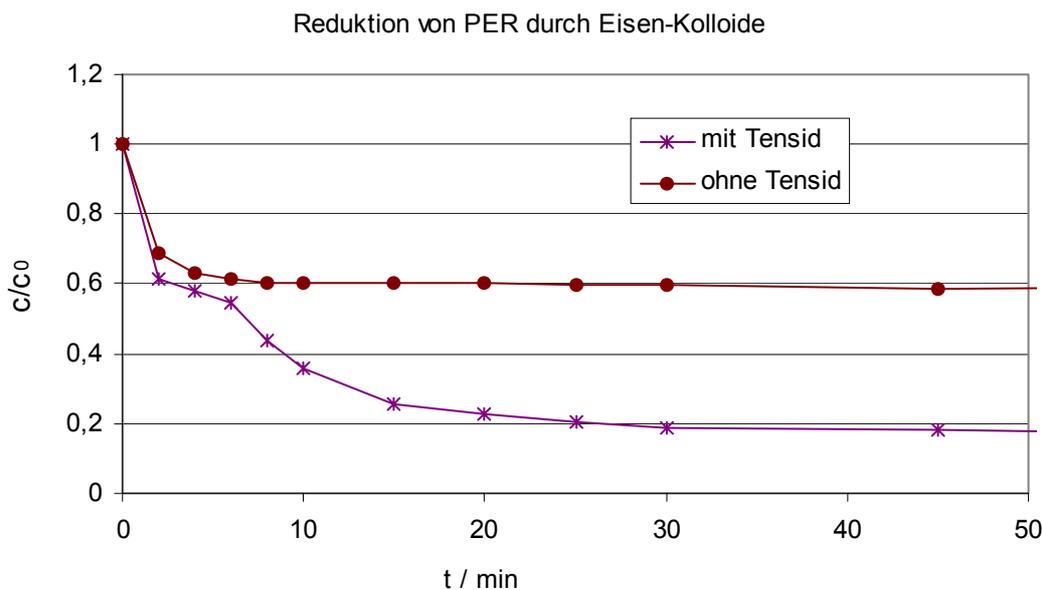


**Abb. 18.1: Auswirkung von Tensiden auf die Partikelmorphologie**

Die mit Tensidzusatz hergestellten Partikel zeigen in Modellversuchen ein besseres Migrationsverhalten als die Partikel, deren Synthese ohne Tensidzusatz erfolgte.

Problematisch ist weiterhin die Stabilität der Suspension. In einem auf die Synthese folgenden Reinigungsschritt werden die Begleitsalze der Reduktion entfernt. Dabei desorbiert auch ein großer Teil der Tenside, so dass eine sterische Stabilisierung der Suspension nicht mehr gegeben ist.

Der Tensidzusatz beeinflusst auch die Reduktion der CKW. In Abb. 18.2 ist der Konzentrationsverlauf von Tetrachlorethen bei der Reduktion durch Eisenkolloide dargestellt, die mit und ohne Tensidzusatz hergestellt wurden. Deutlich erkennbar ist, dass sich die Selektivität der Reaktion hinsichtlich der CKW-Reduktion erhöht hat. Ebenfalls erhöht hat sich die Geschwindigkeit des PER-Abbaus. Die Geschwindigkeitskonstante der Reaktion 1. Ordnung verdoppelt sich.



**Abb. 18.2: Reduktion von PER mit kolloidalem Fe<sub>0</sub>: Vergleich der Reaktionskinetik**

In sauerstoffhaltigem Wasser sind die Partikel nicht stabil, sie werden schnell oxidiert. Eine Passivierung der Partikel durch eine Eisenoxidschicht erhöht zwar die Stabilität gegenüber Sauerstoff, senkt aber die Reduktionskapazität der Partikel. Die notwendige Passivität wird hier durch den Sauerstoffeintrag durch das Injektionsverfahren bestimmt [Butschek].

### 18.3.3 Hydraulische Betriebsweise, bisherige Probleme

In kleinskaligen Vorversuchen in VEGAS konnte die grundsätzliche Wirksamkeit von kolloidalem Eisen beim Einsatz in Modellaquiferen nachgewiesen werden (Abb. 18.3). In diesen Versuchen wurden Eisenkolloide in einen Modellaquifer (Länge 1 m, Höhe 0,6 m, Breite 0,15 m), der von einer CKW-Lösung durchströmt wurde, infiltriert. Mittels Probennahmestellen wurde die zeitliche Abhängigkeit der Konzentrationsverteilung der CKW in der Küvette bestimmt. Es zeigte sich, dass nach der Zugabe der Kolloidsuspension die Konzentration im direkten Abstrom der Zugabestelle deutlich abnahm. In den umliegenden Probennahmestellen wurde dagegen kaum eine Veränderung der Konzentration gemessen, wie auch die CKW-Fracht im Gesamtabstrom nur wenig vermindert wurde. Grund hierfür war die Tatsache, dass die Reichweite der Kolloide bei der Zugabe nur sehr kleinräumig war (siehe Abb. 18.4).



Abb. 18.3: Versuchsaufbau Vorversuche



**Abb. 18.4: Reichweite der Kolloide (Visualisierung beim Ausbau der Kuvette)**

Etwas besser deutlich werden die Probleme bei einem Säulenversuch, der ebenfalls durchgeführt wurde (Abb. 18.5). Hier beträgt die Reichweite (Eindringtiefe) bedingt durch die schnelle Oxidation der Eisenkolloide nur wenige Zentimeter. Die Kolloide wurden hier als Suspension direkt auf die Säule gegeben und mit einer wässrigen CKW-Lösung nachgespült.

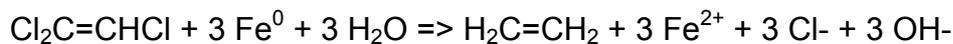


**Abb. 18.5: Visualisierung der Eindringtiefe von Kolloiden im Säulenversuch**

Das maßgebliche Problem bei der Anwendung von Eisenkolloiden im Altlastenbereich ist demnach die Frage nach der Modifikation der Kolloide. Die Reaktivität der Kolloide muss so weit reduziert werden, dass eine Ausbreitung durch Hydraulische Aufgabeverfahren ermöglicht wird. Dazu sind dann auch noch Brunnenkonstruktionen, bzw. -Anordnungen zu finden, die diesen Prozess in seiner Effizienz weiter steigern.

#### 18.3.4 Theoretische Betrachtungen, Effizienzprognosen

Geht man für die Reaktion von Trichlorethen mit elementarem Eisen von folgender Reaktionsgleichung aus,



ergibt sich ein stöchiometrisches Verhältnis von Trichlorethen in der Schadstofffahne zu erforderlichem Eisen von 1 Mol Trichlorethen zu 3 Mol Eisen oder einem Gewichtsverhältnis von 1 kg Trichlorethen (Molgewicht: 131 g/Mol) zu 1,282 kg Fe (Molgewicht 56 g/Mol). Für eine Fahne mit einer mittleren Konzentration von 100 µg/l bei einer Fahnenbreite von 50 m, einer Mächtigkeit von 10 m (Tiefe) und einer angenommenen Fließgeschwindigkeit des Grundwassers von 0,5 m pro Tag ergibt sich so bei einer halbjährlichen Eisengabe unter der Voraussetzung eines quantitativen Umsatzes ohne Nebenreaktionen ein Eisenbedarf von 4,5 kg. Unterstellt man eine 10 prozentige Effizienz des Umsatzes wären 45 kg Eisen zur Behandlung des Abstroms erforderlich.

### 18.4 Weitere Arbeiten

#### 18.4.1 Schritte zur Entwicklung chemisch und hydraulisch optimierter Kolloide

Im ersten Schritt steht die Optimierung der Partikeleigenschaften im Vordergrund. Dazu soll eine Optimierung der Synthese des Eisenkernes hin zu einer engeren Partikelgrößenverteilung und der Suspensionsstabilität vorgenommen werden. Dazu ist eine Erhöhung der Oberflächenladung notwendig.

Im zweiten Schritt soll das Coating der Partikel hinsichtlich der Selektivität der Reduktion und einer erhöhten Stabilität im Wasser verbessert werden. Dabei wird die Suspension zusätzlich sterisch stabilisiert. Der Wirkungsgrad der PCE/TCE Reduktion der modifizierten Eisenkolloide wird bestimmt und daraus die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens abgeschätzt.

Die Auswirkungen des Kolloideintrags in den Boden, wie eine Änderung des pH-Wertes oder der Permeabilität werden ebenfalls durch Säulenversuche charakterisiert. Dabei soll das Auftreten von Folgeprodukten und deren Gefahrenpotential für den Boden analysiert werden.

Schließlich soll ein Scale-up in den Technikumsmaßstab vorgenommen werden, um genügend Partikel für Versuche in größerem Maßstab zu erhalten.

#### 18.4.2 Schritte zur Entwicklung der hydraulischen Betriebsweise

In einer ersten Stufe sollen die Küvettenversuche mit den neu entwickelten, optimierten Kolloiden wiederholt werden. Dabei sollen unterschiedliche Injektionsarten – auch mit magnetisch unterstützten Gradienten – erprobt werden. Der Vorteil der Nutzung von magnetisch unterstützten Gradienten könnte darin liegen, dass die Ausbreitung der Kolloide gezielt in eine Richtung gesteuert werden kann. Damit könnte möglicherweise eine größere Reichweite und eine bevorzugte Ausbreitung senkrecht zur Grundwasserfließrichtung erreicht werden. Dazu sollen verschiedene Brunnenanordnungen verglichen werden.

In der nächsten Stufe soll in einem größeren Maßstab (ca. 1 m<sup>3</sup>) das Verhalten der Kolloide im dreidimensionalen Fall untersucht werden. Hier geht es hauptsächlich um das Problem, eine flächendeckende Kolloidverteilung über einen Grundwasserquerschnitt zu erzeugen.

### 18.5 Literatur

- Alessi D.S., Li Z.H.: Synergistic effect of cationic surfactants on perchloroethylene degradation by zero-valent iron *Environmental Science & Technology* 35 (18) 3713-3717 September 2001
- Birke V., Burmeier H. und Rosenau D. 2001: Reaktive Wände zur innovativen Altlastensanierung - Vorstellung des BMBF-Verbundvorhabens RUBIN – [http://www.rubin-online.de/deutsch/bibliothek/downloads/download/Vorstellung\\_RUBIN.pdf](http://www.rubin-online.de/deutsch/bibliothek/downloads/download/Vorstellung_RUBIN.pdf)
- Butschek, G. Köster, R.: Aquatische Fe(0)-Kolloide zur In-Situ Reduktion von LCKW Jahrestagung der Fachgruppe Wasserchemische Gesellschaft in der GDCh, Bad Mergentheim, S.103-107 2.-4. Mai, 2005, ISBN 3-936028-29-X
- Dahmke, A. (1997), „Aktualisierung der Literaturstudie ‘Reaktive Wände’ pH-Redoxreaktive Wände“. Landesanstalt für Umweltschutz, Baden-Württemberg, Texte und Berichte zur Altlastenbearbeitung, 33/97, Karlsruhe.
- Kopinke F.D., Georgi A., Weiss H.: Brief Communication. *Journal of Nanoparticle Research* 6 (1): 123-123 Februar 2004
- Paul C.J., McNeil M.S., Beck F.P. Jr., Clark P.J., Wilkin R.T., and Puls R.W.: Capstone Report on the Application, Monitoring, and Performance of Permeable Reactive Barriers for Ground-Water Remediation, EPA/600/R-03/045b, August 2003.

- Scherer M.M., Richter S., Valentine R.L. und Alvare P.J. J. (2000): Chemistry and Microbiology of Permeable Reactive Barriers for In Situ Groundwater Clean up. Critical Reviews in Environmental Science and Technology Volume 30(3), 363-411.
- Stupp H.D. (2001): Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen - Vergleiche Reinigungswände/pump-and-treat. ITVA-Fachtagung Reinigungswände auf dem Vormarsch. Magdeburg am 24. Oktober 2001.
- Wilkin R.T., Puls R.W., and Guy W. Sewell, G.W. (2002): Long-term Performance of Permeable Reactive Barriers Using Zero-valent Iron: An Evaluation at Two Sites. EPA/600/S-02/001, March 2002.
- Zhang W. (2003); Nanoscale iron particles for environmental remediation: An overview. Journal of Nanoparticle Research 5: 323–332, 2003.9

## 19 BMBF – US EPA PROJEKT: START-UP-PLAN ZUR STIMULIERUNG DES NACHHALTIGEN FLÄCHENRECYCLINGS

Volker Schrenk, Jürgen Braun, Jantje Samtleben, Baldur Barczewski  
VEGAS, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart  
Uwe Ferber, Projektgruppe Stadt und Entwicklung, Leipzig

### 19.1 Einleitung

Seit 1990 besteht im Bereich des Umweltschutzes eine deutsch-amerikanische Kooperation zwischen dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und der Environmental Protection Agency (EPA). Nachdem sich die Zusammenarbeit in den ersten Jahren auf die reine Altlastenthematik konzentrierte, hat die aktuell laufende Phase III der Kooperation die Wiedernutzung von Brachflächen zum Gegenstand. Im Rahmen der Arbeiten zu diesem Projekt wurde die Arbeitshilfe zur Erstellung von Start-Up-Plänen für Brachflächen erstellt (Ferber et al. 2005) sowie gemeinsame Workshops in den USA und in Deutschland durchgeführt. Innerhalb der Workshops erfolgte ein intensiver Meinungsaustausch zu den Sichtweisen und Lösungsansätzen für ein erfolgreiches Flächenrecycling in den Vereinigten Staaten und in Deutschland. Hierbei wurden den Teilnehmern die spezifischen Vorgehensweisen und Ansätze des jeweils anderen Landes näher gebracht. Die behandelten Themen der Workshops umfassten:

- Ökonomische Instrumente für ein wirtschaftliches Brachflächenrecycling (Charlotte, North Carolina);
- Projektmanagement und Marketing beim Brachflächenrecycling (Saarbrücken);
- Risikobewertung und Risikokommunikation beim Brachflächenrecycling (Portland, Oregon);
- Soziale Aspekte des Brachflächenrecyclings (Leipzig);
- Nachhaltige Wiedernutzung von Brachflächen (St. Louis, Missouri).

Die ausführlichen Dokumentationen der Workshops sind in der Schriftenreihe des Deutschen Instituts für Urbanistik in Berlin erschienen:

(<http://www.difu.de/publikationen>).

Das Vorhaben wird auf deutscher Seite in einer interdisziplinären Projektgruppe bearbeitet. Mitglieder der sogenannten Kerngruppe bei diesem Projekt sind die Universität Stuttgart, das Deutsche Institut für Urbanistik (Berlin), die Projektgruppe Stadt und Entwicklung (Leipzig) sowie die Ingenieur- und Beratungsgesellschaft Probiotec (Düren). Die Kerngruppe wird durch Vertreter von Modellstandorten ergänzt. Hierzu zählen die Standorte „Saarterrassen“ (GIU, Saarbrücken), „Kaserne Heiterblick“ (LESG, Leipzig), „Kienzle, Villingen-Schwenningen & OKAL, Titisee-Neustadt“ (Ingenieurgesell-

schaft Dr. Eisele, Rottenburg), „Lennestadt“ (Altenbockum & Partner, Aachen), „Duisburg Innenhafen & Landschaftspark Nord“ (M. Linne, Duisburg). Auf amerikanischer Seite sind die US EPA und einige Ingenieurbüros beteiligt, die auch entsprechende Modellstandorte in den USA repräsentieren.

## 19.2 Erfahrungen aus den Workshops

Aus den durchgeführten Workshops in den USA und in Deutschland lassen sich interessante Erkenntnisse gewinnen, welche Anreize und Vorgehensweisen für ein effektives Flächenrecycling im jeweils anderen Land schaffen könnten. In den USA befinden sich Brachflächen zum überwiegenden Teil in privatem Besitz und werden nicht zuletzt aufgrund von Haftungsrisiken für Altlasten nicht entwickelt. Die US-Erfahrungen haben hier gezeigt, dass die Instrumente zur Brachflächenrevitalisierung in erster Linie auf die Mobilisierung privaten Kapitals durch ökonomische Anreize in Form von Förderprogrammen, steuerlichen Anreizen oder in der Hilfestellung zur Beschaffung von Fremdkapital bestehen. Der Förderpolitik in den USA kommt damit eine große Bedeutung zu, und es gibt zahlreiche verschiedene Förderprogramme zur Unterstützung von Flächenrecycling. Diese Ideen könnten auch für die Diskussion um Fördermöglichkeiten in Deutschland interessant sein.

Im Zusammenhang mit dem am 11.1.2002 in Kraft getretenen „Brownfields Revitalization Act“ (siehe EPA 2005) wurden mehr als 150 Mio. US-\$ jährlich für das Flächenrecycling und zur Umweltsanierung zur Verfügung gestellt. Die US EPA gibt dabei neben einer finanziellen Förderung weitere umfangreiche Hilfestellungen in Vorgehensweise und Handhabung von Brachflächenrevitalisierung (u. a. zahlreiche Veröffentlichungen, z. B. „Roadmap“, EPA 2001). Damit soll dauerhaft der Aufbau von verbreiteter fachlicher Kompetenz sowie eine verbesserte Implementierung von Flächenrecycling erreicht werden. Daneben gibt es noch weitere Förderprogramme, z. B. durch die Economic Development Agency (EDA), das Department of Housing and Urban Development (HUD) und das Department of Transport (DOT).

Als ein besonders wirksames Instrument haben sich Steuervergünstigungen erwiesen: Hierzu zählen die Tax Increment Finance (TIF)-Zonen. Hierbei wird der Effekt genutzt, dass die Grundsteuern in den Vereinigten Staaten an die aktuellen Verkehrswerte gekoppelt sind. Bei der erfolgreichen Revitalisierung eines Grundstücks würde als Konsequenz die Grundsteuerbelastung der entsprechenden Fläche steigen. Mit der Ausweisung einer TIF-Zone wird die Grundsteuer auf den entwicklungsunbeeinflussten Wert festgelegt und die zu erwartenden Mehreinnahmen durch das Projekt für Entwicklungsmaßnahmen im Gebiet bereitgestellt (Tomerius et al. 2003). Eine weitere Möglichkeit zur Finanzierung von Flächenrecyclingmaßnahmen stellen die sogenannten Bonds dar. Hierbei handelt es sich um kommunale Anleihen oder Schuldverschreibungen, die zuerst ausgegeben, und später mit einer entsprechenden Verzinsung von der Kommune wieder zurückgezahlt werden. Den US-amerikanischen Kommunen stehen

aufgrund der verschiedenen Varianten der Bonds unterschiedliche Rückzahlungsmöglichkeiten für die verwendeten privaten Investitionssummen zur Verfügung. Möglichkeiten sind hierbei u. a. Steuernachlässe oder eingenommene Gebühren für Ver- und Entsorgungsleistungen, deren Anlagen mit Hilfe von Bonds errichtet wurden. Investoren können z. B. Bonds erwerben, bei denen es zur Gewährung von Steuernachlässen kommt.

Eine andere Möglichkeit zur finanziellen Unterstützung stellen die sogenannten Revolving Loan Funds (RLF) dar. Hierbei werden zinsgünstige Bundes-Kredite für Flächenrecyclingprojekte vergeben. Das rückgezahlte Geld fließt in einen Fund, mit dem die Finanzierung weiterer Brownfields-Projekte ermöglicht werden kann.

Insgesamt betrachtet besteht in den USA, speziell innerhalb der ökonomischen Möglichkeiten, eine hohe Flexibilität der Kommunen. Die Einführung steuerlicher Anreize sowie die Verwendung staatlicher Kreditlinien sind daher individuell und sinnvoll im regionalen Kontext zu gestalten. Derartige in den USA erfolgreich zur Anwendung kommende finanzielle Instrumente könnten effektive Impulse für neue Förderwerkzeuge in Deutschland sein.

Im Bereich der planerischen und rechtlichen Instrumente gibt es in den USA Möglichkeiten der Freistellung von Restrisiken bei der Altlastensanierung (z. B. New Jersey). Grundlage hierfür ist ein mit den staatlichen Umweltbehörden ausgehandeltes „Memorandum of Agreement“. Vergleichbar einem städtebaulichen Vertrag werden hier die Rechte und Pflichten der beteiligten öffentlichen und privaten Partner geregelt. Diesem Memorandum folgt ein „Letter of no Further Action“. Dieser schließt weitergehende Forderungen der Umweltbehörden aus und vermindert so das Entwicklungsrisiko. Treten zusätzliche Schadensfälle auf und ist ein Rückgriff auf den Verursacher nicht möglich, so übernimmt die Umweltverwaltung die Haftung.

In den USA ist die Öffentlichkeit bei Flächenrecyclingvorhaben in vielen Fällen stark engagiert und es existiert ein hohes Bürgerengagement. Dies trifft speziell auch auf die Kommunikation zwischen den Projektbeteiligten und den betroffenen Bürgern im Themenfeld der Altlasten zu. Diese offensive Art der Öffentlichkeitsarbeit ist in Deutschland noch nicht vergleichbar ausgeprägt. Zwar ist in der Kommunikation und Informationsarbeit inzwischen eine deutliche Verbesserung zu verzeichnen, die amerikanische Selbstverständlichkeit der Einbeziehung von Anwohnern ist aber noch nicht generell gegeben. Positiv in diese Richtung weisend ist das vermehrte Bürgerengagement bzw. eine starke Bürgerbeteiligung in Projekten wie z. B. der Südstadt Entwicklung in Tübingen (Söhlke 2005) oder das Vauban-Areal in Freiburg.

### 19.3 Die Arbeitshilfe zur Erstellung eines Start-Up-Plans „Brachfläche“

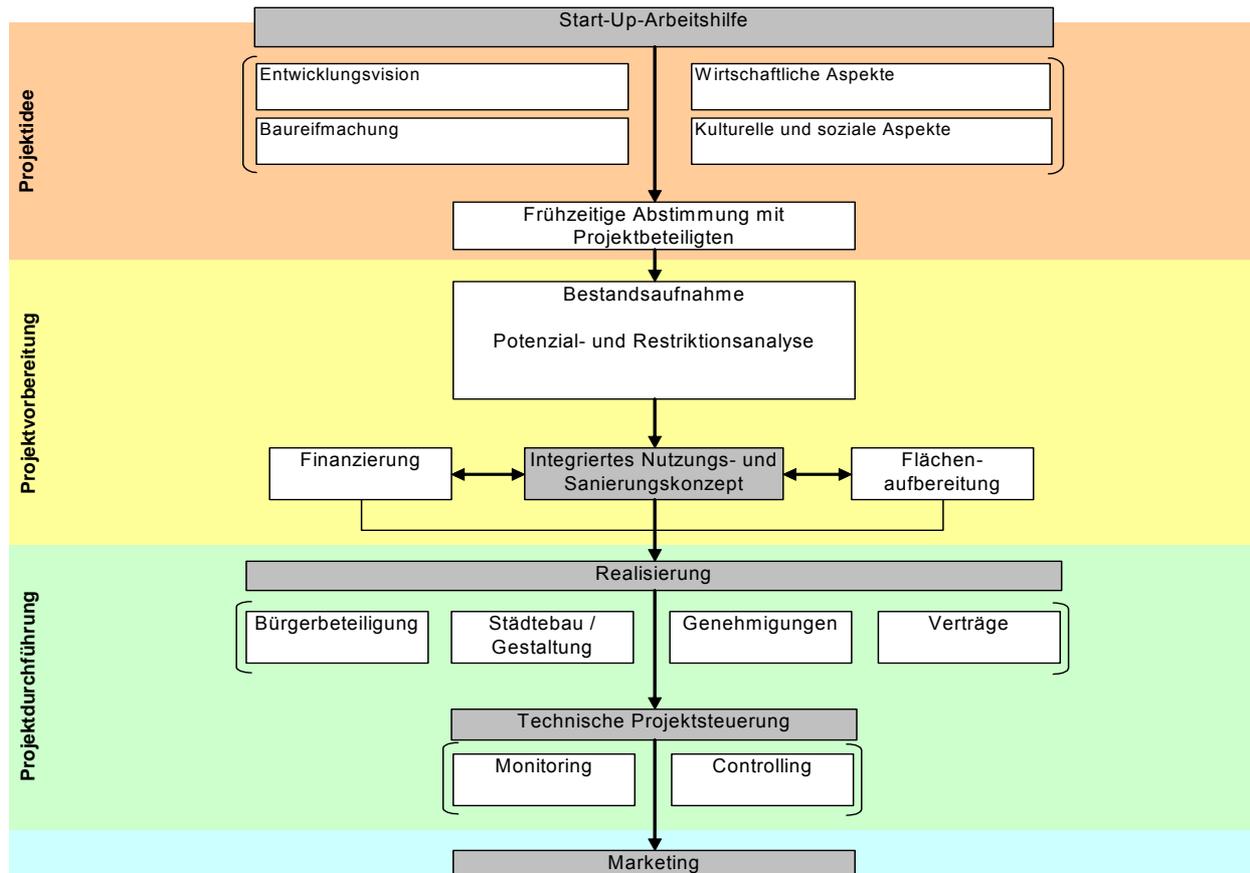
Grundsätzlich ist die Wiedernutzung von brachliegenden Grundstücken ein komplexer Vorgang, der zahlreiche verschiedene Disziplinen und Themen umfasst. Hierzu zählen stadtplanerische Fragestellungen und Umweltfragen ebenso wie wirtschaftliche und soziale Aspekte. Diese Themen sind für die an Flächenrecyclingprojekten beteiligten Personen von unterschiedlicher Bedeutung, da jeder Akteur seine eigene Perspektive besitzt.

Als Zielgruppen der Arbeitshilfe lassen sich drei Personengruppen unterscheiden:

- Personen, die ein überwiegendes Interesse an finanziellen und wirtschaftlichen Aspekten bei der Brachflächenrevitalisierung besitzen (Flächeneigentümer, Investoren, Banken, Entwickler).
- Personen mit einem Interesse an Sicherheitsaspekten (Verwaltungen, Anwohner und Nachbarschaften).
- Personen mit einem Interesse an Aspekten der Lebens- und Umfeldqualität (z. B. Bürgerinitiativen und Anwohner).

Um insbesondere Investoren und Träger von Projekten der Brachflächenrevitalisierung zu überzeugen, ist es notwendig, deren jeweilige spezifische Interessen und Anforderungen zu berücksichtigen und dabei die Risiken und Chancen eines vorgesehenen Flächenrecyclingprojektes in einem überschaubaren Umfang transparent und kalkulierbar aufzuzeigen. Dies soll durch die im Rahmen der deutsch-amerikanischen Zusammenarbeit von deutscher Seite erstellte Arbeitshilfe zur Anfertigung von Start-Up-Plänen ermöglicht werden. Mit dieser Arbeitshilfe sollen Initiatoren von Flächenrecyclingprojekten unterstützt werden, ihre Projekte für eine bestimmte Zielgruppe umfassend und verständlich in Form eines Start-Up-Plans-Brachfläche darzustellen. Dadurch soll eine Stimulierung von Flächenrecycling durch die neue Art der Aufbereitung von wichtigen Informationen für Entscheidungsträger erreicht werden.

Auf der Grundlage einer standardisierten und vereinfachten Gesamtbetrachtung in einer möglichst kompakten Form soll ein Start-Up-Plan vor allem schnelle Impulse für eine Brachflächenrevitalisierung geben. Der Start-Up-Plan soll dabei in einer frühen Projektphase zum Einsatz kommen (Abb. 19.1).



**Abb. 19.1: Mit dem Start-Up-Plan zum erfolgreichen Flächenrecyclingprojekt**

Im Rahmen einer Konferenz in Berlin im April 2005 wurde die Arbeitshilfe erstmals der Fachöffentlichkeit präsentiert und diskutiert. Sie benennt Kernthemen der Brachflächenrevitalisierung, welche in Planung und Umsetzung zu berücksichtigen sind und beschreibt verschiedene Vorgehensweisen. Darüber hinaus enthält die Arbeitshilfe einige Praxisbeispiele, bei denen es sich um die im Forschungsvorhaben involvierten Modellstandorte handelt. Diese Fallbeispiele bieten praxisorientierte Impulse, welche bei der Bearbeitung von künftigen Brachflächenprojekten relevant sein können.

Mit der zusammenfassenden Darstellung planerischer, ökologischer, wirtschaftlicher und sozialer Aspekte von Flächenrecyclingprojekten sollen Anregungen gewonnen werden, wie verschiedene Zielgruppen mit entsprechend zugeschnittenen Projektdarstellungen - den Start-Up-Plänen - angesprochen werden können.

Die erstellte Arbeitshilfe soll grundsätzlich dazu dienen,

- Projektentwickler bei der Erstellung von Wirtschaftlichkeits- und Finanzplänen zu unterstützen;
- eine interdisziplinäre Betrachtung der Wechselwirkungen zwischen planerischen, sozialen und ökonomischen Aspekten sowie Umweltgesichtspunkten zu gewährleisten, die häufig durch eine einseitige Sichtweise nicht erfolgt;

- eine intensive Zusammenarbeit zwischen den verschiedenen Projektbeteiligten (Öffentlichkeit, Investor, Grundstückseigentümer etc.) bereits in einer frühen Projektphase zu fördern und Projektstrukturen festzulegen;
- Ideen zu unterstützen, die sich auf die Potenziale der Kostenreduktion, innovative Planungstechniken, Projektnutzen und Finanzierungsmöglichkeiten beziehen.

## 19.4 Der Aufbau der Arbeitshilfe

Im einleitenden Kapitel der Arbeitshilfe werden das Ziel und die Vorgehensweise bei der Nutzung der Arbeitshilfe erläutert. Hieran schließen sich Hinweise an, wie der Start-Up-Plan unter Verwendung der Arbeitshilfe zu erstellen, und wie die anvisierte Zielgruppe zu analysieren ist.

Das Kapitel „Entwicklungsvision“ befasst sich schwerpunktmäßig mit der häufig für die Projekte ausschlaggebenden Entwicklung von Leitbildern und deren Vermittlung. Planerische Aspekte werden insofern angesprochen, als dass die hierzu erforderlichen wesentlichen Weichenstellungen und Kernaussagen in einem Start-Up-Plan zusammenfassend dargestellt werden sollen. Dieses Kapitel der Arbeitshilfe umfasst auch Informationen zu den bauplanungsrechtlichen Aspekten beim Flächenrecycling. Verschiedene bauplanungs- und bodenschutzrechtliche, für die Revitalisierung einer Fläche wichtige Themen, werden hierbei ebenfalls benannt sowie die damit in Verbindung stehenden Thematiken erläutert.

Das Kapitel „Umweltaspekte“ beschäftigt sich mit der Grundstücksaufbereitung bei Flächenrecyclingvorhaben. Es wird hierzu insbesondere darauf hingewiesen, dass die im Zusammenhang mit der Baureifmachung von Grundstücken möglichen Probleme durch bestehende Kontaminationen beherrschbar sind. Neben den Projekten, bei denen eine Altlastensanierung im Sinne des BBodSchG notwendig wird, werden auch die bei zahlreichen Projekten erforderlichen Schritte des Gebäuderückbaus und der Verbesserung des Baugrundes genannt. Bei vorhandener Bebauung ist z. B. zu klären, ob es zu einem Gebäudeerhalt oder einem Gebäuderückbau kommt. Des Weiteren können auf über lange Zeiträume nicht genutzten Flächen naturschutzrechtliche Aspekte relevant werden, z. B. durch das Vorkommen von geschützten Tier- und Pflanzenarten. Unter Umständen müssen als Konsequenz Ausgleichmaßnahmen bei einer Wiedernutzung geplant werden. Wichtig ist im Zusammenhang mit der Berücksichtigung von Umweltaspekten in einem Start-Up-Plan eine erste Abschätzung der entstehenden Kosten bei der Baureifmachung. Darüber hinaus wird die Untersuchung von Möglichkeiten zur Nutzung von Synergiepotenzialen bei der Baureifmachung empfohlen, um Kosten zu reduzieren.

Im Kapitel „Wirtschaftliche Aspekte“ wird u. a. die Analyse der Gesamtwirtschaftlichkeit bei einem Flächenrecyclingprojekt, die Erstellung von Marktanalysen und nachfrageorientierten Vermarktungskonzepten angesprochen. Wichtig für ein erfolgreiches Flä-

chenrecyclingprojekt ist ein marktorientiertes Nutzungskonzept. In diesem Zusammenhang wird auf die Notwendigkeit einer durchdachten Vermarktungsstrategie hingewiesen, die, bei der Überwindung eines schlechten Flächenimages des zu entwickelnden Standortes, oft dringend erforderlich ist. Dieses Kapitel der Arbeitshilfe gibt zudem auch Hinweise zur Flächenbewertung. Des Weiteren wird auch auf die Wertentwicklung nach einer Aufbereitung eingegangen. Ferner werden die Bausteine einer wirtschaftlichen Projektanalyse erläutert. Erforderlich sind hierzu die Ermittlung der voraussichtlichen Projektkosten und der zu erwartenden Erträge, die Bewertung von Finanzierungsmöglichkeiten sowie eine Risikoanalyse. In einem Start-Up-Plan für eine Fläche sollten diese Punkte, in Abhängigkeit vom aktuellen Kenntnisstand und der Zielgruppe, für die der Start-Up-Plan verfasst wird, deutlich dargestellt werden.

Im Kapitel „Kulturelle und Soziale Aspekte“ wird aufgezeigt, welche Bedeutung die Denkmalpflege, die soziale Stadterneuerung und berufliche Qualifizierungsmaßnahmen im Zusammenhang mit Flächenrecyclingvorhaben haben. In diesem Kontext wird auch auf die Bedeutung der Identität eines Altstandortes hingewiesen, die z. B. durch den Verbleib und die Nutzung von alter Bausubstanz erhalten werden kann. Hierdurch ist in vielen Fällen die Steigerung der Akzeptanz eines Projektes für die Anwohner möglich. Es gibt zahlreiche Projektbeispiele, bei denen die Einbeziehung der Bevölkerung in eine Flächenrecyclingmaßnahme besonders wichtig ist. Hierzu ist es erforderlich, die entsprechenden relevanten Personengruppen zu identifizieren und die Möglichkeiten einer aktiven Beteiligung zu eruieren.

Insgesamt umfasst die Arbeitshilfe alle für Flächenrecyclingprojekte wichtige Themenfelder. Bei der Darstellung eines Flächenrecyclingvorhabens in einem Start-Up-Plan ist es ausreichend, die für das entsprechende Revitalisierungsvorhaben wesentlichen Themenbereiche herauszugreifen. Der Nutzer der Arbeitshilfe muss also selbst entscheiden, welche Aspekte für seine Darstellung notwendig sind und welchen keine größere Bedeutung zukommt.

Die Arbeitshilfe ist somit keine weitere Publikation, wie Flächenrecyclingprojekte abgewickelt werden sollen. Derartige Veröffentlichungen in Form u. a. von Berichten, Arbeitshilfen und Best-Practice-Sammlungen sind in großer Anzahl erfolgt. Diese Publikationen wurden in einem quasi in Ergänzung stehenden Projekt zusammengetragen: Im Auftrag des BMBF wurden von VEGAS die bisher zum Thema „Flächenmanagement/Flächenrecycling“ in der Bundesrepublik Deutschland publizierten Handlungs- und Arbeitshilfen recherchiert, zusammengefasst und in einer Datenbank verfügbar gemacht (Schrenk 2004, Schrenk & Samtleben 2005). Die Ergebnisse dieses Projektes finden sich im Internet unter <http://www.flaecheninfo.de>. Diese Datenbank stellt eine umfassende Ergänzung der Arbeitshilfe zur Erstellung von Start-Up-Plänen dar.

Der auf Basis der Arbeitshilfe zu erstellende Start-Up-Plan soll als Dokument in einem bestimmten Format die wichtigen Akteure bei ihrer Arbeit einer erfolgreichen Flächenrevitalisierung unterstützen. Ein Start-Up-Plan soll jeweils zielgruppenorientiert verfasst

sein. Dabei ist es wichtig, ein möglichst schlankes Dokument zu erstellen, das nur so ausführlich und detailliert ist, wie es für die Entscheidungen der jeweiligen Zielgruppe erforderlich ist. Entsprechend dieser Forderung sollten die in einem Plan enthaltenen Informationen möglichst vollständig, verständlich und zielgruppengerecht aufbereitet sein. Dies hat zur Konsequenz, dass ein Start-Up-Plan für eine Bank anders aussieht als der Plan für eine Kommune. Der Plan sollte einen Umfang von 10 Seiten nicht übersteigen. Mit dem Start-Up-Plan soll es gelingen, alle bei einem Projekt betroffenen Anspruchsgruppen einzubinden. Aufgrund der Heterogenität der verschiedenen Akteure kann dies sehr schwierig sein.

Für die Nutzung eines Start-Up-Plans ergeben sich die Möglichkeiten, dass nur einzelne Schritte eines Brachflächenprojektes beschrieben oder dass komplette Projektbeschreibungen nach den Empfehlungen der Arbeitshilfe entwickelt werden. Bei der Nutzung der Arbeitshilfe zur Erstellung eines Start-Up-Plans wird folgende Vorgehensweise empfohlen:

- Festlegung und konkrete Abgrenzung des Standortes;
- Analyse der Schlüsselemente der Projektidee;
- Analyse der für das Projekt bedeutenden Zielgruppen;
- Identifikation der Schlüsselinformationen, die der Zielgruppe vermittelt werden sollen;
- Konzentration und Beschränkung auf diese Schlüsselinformation;
- Informationsbeschaffung;
- ggf. Durchführung eines Besichtigungstermins mit ausgewählten Projektbeteiligten;
- Entwurf des Plans, Berücksichtigung der Präsentationsmöglichkeit;
- Beginn mit Stichpunkten zum Informationsbedarf und Schlüsselinformationen;
- Erstellung der Projektbeschreibung.

Auf deutscher Seite wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens bisher für zwei Standorte Start-Up-Pläne mit der vorliegenden Arbeitshilfe erstellt. Hierbei konnte gezeigt werden, dass die erstellten Pläne für die am Projekt beteiligten Personen einen großen Nutzen hatten.

## **19.5 Ausblick**

Es ist vorgesehen, dass die Arbeitshilfe zur Erstellung von Start-Up-Plänen nun an zahlreichen Standorten zum Einsatz kommen soll und so einem umfassenden Praxistest unterzogen wird. Die dadurch gewonnenen Erfahrungen sollen in eine Verbesserung der Arbeitshilfe einfließen, diese überarbeitet und mit einem professionellen Lay-

out versehen auf den Markt gebracht werden. Die aktuelle Arbeitshilfe ist über VEGAS, Universität Stuttgart, erhältlich.

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung und die amerikanische Umweltbehörde EPA wollen ihre Zusammenarbeit im nachhaltigen Flächenmanagement auch weiterhin fortsetzen. Die bilaterale Kooperation soll auf deutscher Seite an das nationale „Förderprogramm zur Reduzierung der Flächeninanspruchnahme und für ein nachhaltiges Flächenmanagement (REFINA)“ angebunden werden. Interessante Themenbereiche auf deutscher und amerikanischer Seite sind dabei unter anderem das flexible Projektmanagement beim Brachflächenrecycling, das sich an verändernde Rahmenbedingungen und Zielsetzungen anpasst, das Recycling von Altflächen im Rahmen eines regionalen Flächenmanagements und die attraktive Lebensraumgestaltung auf Altflächen.

## 19.6 Danksagung

Wir danken dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) für die Finanzierung des Vorhabens (Förderkennziffer 07 DUS 03).

## 19.7 Literatur

- EPA – Environmental Protection Agency (2005): The Small Business Liability Relief and Brownfields Revitalization Act (H.R.2869) - <http://epa.gov/brownfields/pdf/hr2869.pdf> (30. Mai 2005).
- EPA – Environmental Protection Agency (2001): Road Map to Understanding Innovative Technology Options for Brownfields Investigation and Cleanup, Third Edition.
- Ferber, U., Barczewski, B., Preuß, T., Schrenk, V., Steffens, K. & Weber, K. (Hrsg.)(2005): Start-Up-Brachfläche. Arbeitshilfe zur Erarbeitung von Projektplänen. - VEGAS - Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart.
- Schrenk, V. (2004): Flächenrecycling: Kenntnisstand und Erfahrungen in Deutschland. S. 136 - 143. In: Barczewski, B., Koschitzky, H.-P., Weber, K. & R. Wege (Hrsg.): VEGAS - Statuskolloquium 2004 - Mitteilungen des Institutes für Wasserbau, Heft 131, Eigenverlag Stuttgart.
- Schrenk, V. & Samtleben J. (2005): Transfer von Forschungsergebnissen zum Flächenmanagement in die Praxis. - VEGAS - Statuskolloquium 2005 - Mitteilungen des Institutes für Wasserbau, Eigenverlag Stuttgart.
- Söhlke, C. (2005): Risikokommunikation zwischen Stadtverwaltung und Einwohnern/Einwohnerinnen - Fallbeispiel Deutschland: ehemaliges Kasernengelände in Tübingen Südstadt. S. 117 - 123. In: Preuß, T., Barczewski, B., Schrenk, V. & Weber, K. (2005): Flächenrecycling - Risikobewertung und Risikokommunikation.

- Dokumentation des 3. deutsch-amerikanischen Workshops. Difu-Materialien, Deutsches Institut für Urbanistik, Berlin, 1/2005.
- Statistisches Bundesamt (2004): Zunahme der Siedlungs- und Verkehrsfläche: 93 ha/Tag - Pressemitteilung vom 8. November 2005.  
<http://www.destatis.de/presse/deutsch/pm2004/p4660112.htm> (30. Mai 2005).
- Tomerius, S., Barczewski, B., Knobloch, J. & Schrenk, V. (Hrsg.)(2003): Finanzierung von Flächenrecycling - Förderprogrammen, öffentliche und private Finanzierungsinstrumente sowie Fallbeispiele aus den USA und Deutschland. Dokumentation des 1. deutsch-amerikanischen Workshops "Economic Tools for Sustainable Brownfield Redevelopment". - Difu-Materialien, 2003, Band 8, Berlin.
- Tomerius, S. & Preuss, T. (2001): Nachhaltige Ressourcenschonung - Flächenmanagement/ Flächenrecycling. Aktuelle Hemmnisse und Lösungsansätze in den Städten. Eine Studie zur Deutsch-Amerikanischen Kooperation des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) mit der Environmental Protection Agency (EPA) zum Thema „Nachhaltige Ressourcenschonung - Flächenmanagement/-recycling. - Deutsches Institut für Urbanistik (difu), Eigenverlag, Berlin.

## 20 TRANSFER VON FORSCHUNGSERGEBNISSEN ZUM FLÄCHENMANAGEMENT IN DIE PRAXIS

Volker Schrenk, Jantje Samtleben, VEGAS, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart

### 20.1 Einleitung

In der Bundesrepublik Deutschland gibt es seit mehreren Jahren verstärkte Aktivitäten, um die hohe Flächeninanspruchnahme, durch die Umnutzung von hauptsächlich landwirtschaftlicher Fläche in Siedlungs- und Verkehrsflächen zu reduzieren. Diese Flächeninanspruchnahme verzeichnete im Jahr 2003 einen Wert von 93 ha pro Tag (Statistisches Bundesamt 2004).

Um eine nachhaltige Trendwende zu erreichen und damit dem Ziel der Bundesregierung näher zu kommen, bis zum Jahr 2020 die Flächeninanspruchnahme auf 30 ha pro Tag zu reduzieren (vgl. RfNE 2004), wurden in den letzten Jahren zahlreiche Forschungsprojekte und Initiativen auf Landes- und Bundesebene gestartet. Als Ergebnis dieser Aktivitäten ist eine große Anzahl an Publikationen und Handlungshilfen zum breit gefächerten Themenbereich des Flächenmanagements und des Flächenrecyclings entstanden. Diese sind häufig als Handreichungen verschiedener Behörden in Umlauf gebracht oder im Internet publiziert worden. Darüber hinaus haben einige Bundesländer Aktionsbündnisse ins Leben gerufen, wie z. B. Baden-Württemberg mit der Aktion „Fläche gewinnen“.

Mittlerweile ist es aufgrund der großen Zahl an Veröffentlichungen zum Flächenmanagement schwierig, den Überblick zu behalten und die aktuellen Entwicklungen zu verfolgen. Folglich kommen viele dieser Publikationen in der Verwaltungspraxis nicht zur praktischen Anwendung, sinnvolle Synergieeffekte bleiben ungenutzt oder „Doppelentwicklungen“ bei einigen Themen bzw. in einigen Bundesländern sind aufgetreten.

Eine umfassende Zusammenstellung der existierenden Materialien und die Darstellung der Bezugsmöglichkeiten der Veröffentlichungen in einer Datenbank bzw. in einem Dokument fehlen bisher. Dies sind einige der Gründe für ein VEGAS-Forschungsprojekt, das im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF, Förderkennzeichen 0330535) durchgeführt und in dessen Rahmen Literatur zum Flächenmanagement und Flächenrecycling recherchiert und ausgewertet wurde. Die Ergebnisse des Vorhabens sind in einer Datenbank unter der Adresse <http://www.flaecheninfo.de> für die interessierte Fachöffentlichkeit verfügbar.

## 20.2 Vorgehensweise

Mit einer breit angelegten Recherche wurde unter dem Stichwort „Flächenmanagement“ sowie weiteren Begriffen, welche diesem Thema zuzuordnen sind (z. B. Flächenrecycling, Bodenmanagement und Gebäuderückbau) in Bibliothekskatalogen und dem Internet die verfügbare Literatur zusammengetragen. Die ursprünglich auf die alleinigen Begriffe „Flächenmanagement“ und „Flächenrecycling“ beschränkte Recherche wurde dabei zu Gunsten einer größeren Abdeckung von zugehörigen Themenfeldern aufgeweitet. Ausgeklammert wurde bei den Untersuchungen das Thema der Altlastenbearbeitung, die einen wichtigen Bestandteil des Flächenmanagements darstellt, aber seit langem über diverse Expertensysteme recherchierbar ist (z. B. Alfaweb, <http://www.lfu.baden-wuerttemberg.de>). Ausnahmen von diesem Grundsatz bildeten hier Publikationen zu Altlastenfragestellungen, die speziell unter dem Aspekt des Flächenmanagements bzw. des Flächenrecyclings entstanden sind.

Die recherchierte Literatur wurde im Original bzw. als Kopie beschafft und mit einem Kennblatt erfasst. Primäres Ziel war dabei die Zusammenfassung der Inhalte der jeweiligen Publikationen auf ca. zwei Seiten mit der Herausarbeitung der wesentlichen Empfehlungen der entsprechenden Veröffentlichung für eine nutzungsorientierte Umsetzung in der Praxis. Zusätzlich wurden die Publikationen mit Schlagworten näher beschrieben und dadurch charakterisiert. Neben den allgemeinen Informationen wie Seitenzahl, Verlag, Herausgabedatum sind auch Einschränkungen zum Einsatzbereich der Veröffentlichung genannt. Ein Beispiel hierfür ist der Bezug der Empfehlung nur auf ein Bundesland (z. B. MfSWVLBr 1998). In Abb. 20.1 sind die Inhalte des Kennblatts dargestellt (weitere Details zum Kennblatt finden sich bei Schrenk 2004).

<b>Titel</b>	<b>Themenbereich</b>
<b>Art der Publikation</b>	<b>Verfasser/ Hrsg.</b>
<b>Erscheinungsjahr</b>	<b>Seitenanzahl</b>
<b>Behand. Themenbereiche</b>	<b>Verlag/ Stadt/ Reihe</b>
<b>Seitenanzahl/ Anlagen</b>	<b>Zielgruppe</b>
<b>Schlagworte</b>	<b>Einschränkungen</b>
<b>Zusammenfassung</b>	
<b>Wesentl. Empfehlungen</b>	<b>Bezugsquelle/Internet</b>

**Abb. 20.1: Kriterien zur Charakterisierung der Publikationen**

Parallel zur Auswertung der Literatur erfolgte die Programmierung einer internetlauffähigen Datenbank, in die die Ergebnisse der Untersuchungen implementiert wurden. Die Datenbank ermöglicht eine rasche Recherche von Publikationen anhand von vorgege-

benen Suchbegriffen. Die Anwendung ist in Abstimmung mit Praktikern vom Design her möglichst einfach gehalten und steht im Internet unter der Adresse <http://www.flaecheninfo.de> zur Verfügung (Abb. 20.2).



**Abb. 20.2:** Layout der Datenbank mit der Oberfläche der Suchfunktion „Schlüsselworte“

## 20.3 Ergebnisse des Vorhabens

### 20.3.1 Überblick

Die Zusammenstellung der Veröffentlichungen hat gezeigt, dass zahlreiche Publikationen nur direkt über den Herausgeber bzw. den Auftraggeber der entsprechenden Studien zu beziehen sind. Häufig ist die Literatur zum Flächenmanagement nicht in Bibliothekskatalogen geführt und als sogenannte „graue Literatur“ zu bezeichnen. Daneben ist eine große Anzahl an Veröffentlichungen im Internet publiziert. Ein Zugriff ist meist nur bei Kenntnis der genauen Webadresse oder über entsprechende Suchmaschinen möglich.

Die Veröffentlichungen zum Thema Flächenmanagement können grundsätzlich in Berichte, Handlungsempfehlungen und Motivationsbroschüren unterteilt werden.

Die so bezeichneten Motivationsbroschüren führen im Wesentlichen Fachfremde in das Thema ein und wollen Akteure bzw. Entscheidungsträger für das Thema des Flächenmanagements/Flächenrecyclings interessieren. Sie bieten häufig nur wenige in der Praxis verwertbare Empfehlungen und gehen auf Themen oberflächlich ein.

Bei den den Berichten zuzuordnenden Publikationen handelt es sich u. a. oftmals um die Dokumentation von Forschungsvorhaben. Diese stellen meist in einer großen inhaltlichen Breite eine bestimmte Fragestellung dar. Empfehlungen zur Umsetzung der neu erhaltenen Ergebnisse in die Praxis sind teilweise nicht gegeben. Die Forschungsberichte haben aufgrund ihrer detaillierten Darstellung zumeist einen relativ großen Seitenumfang.

Die am besten geeigneten Veröffentlichungen für eine Umsetzung in der Praxis stellen die der Kategorie Handlungsempfehlungen dar. Diese sind häufig in enger Abstimmung mit Praktikern entstanden.

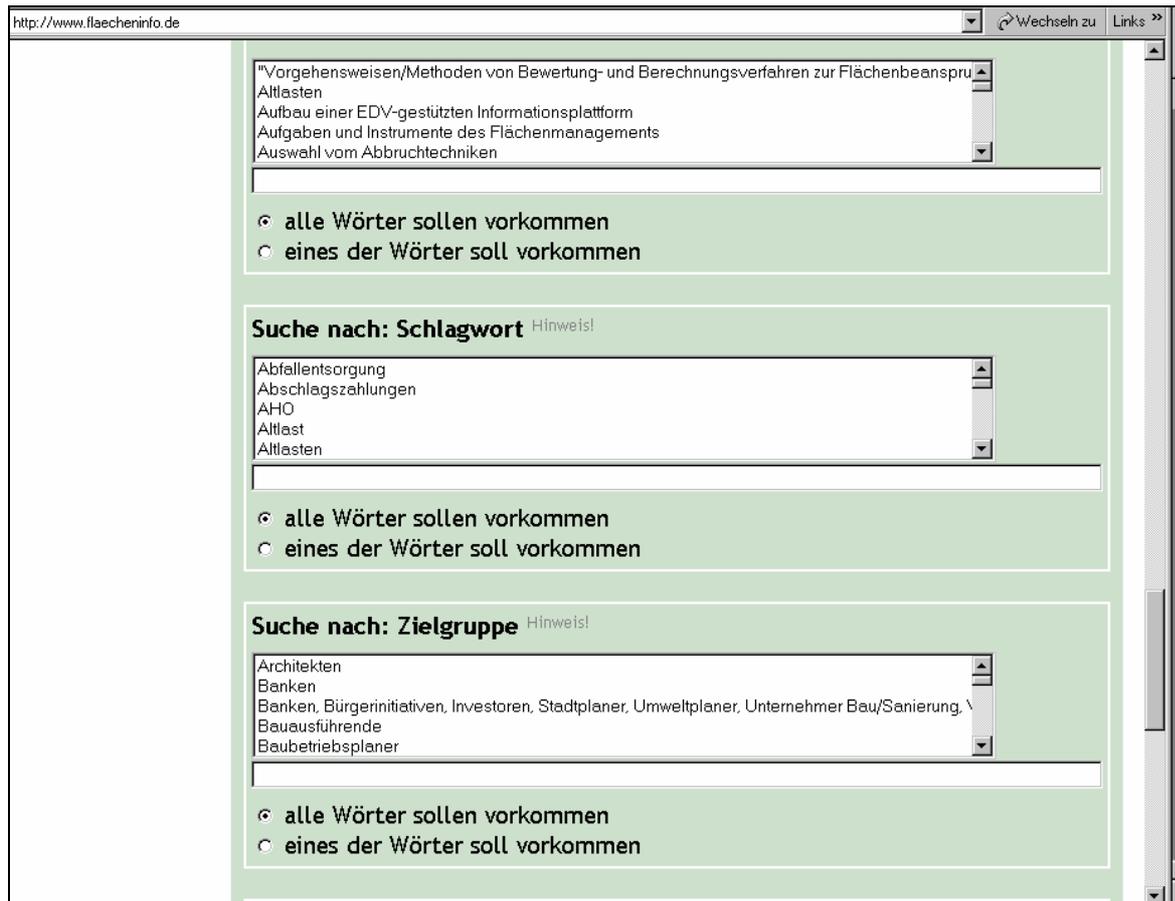
### 20.3.2 Datenbankanwendung

Die Datenbankanwendung wurde in Abstimmung mit Fachleuten aus verschiedenen Bereichen des Flächenmanagements entwickelt. Dabei wurde mehrfach der Wunsch geäußert, dass die Datenbank eine möglichst einfach gestaltete Benutzeroberfläche bieten sollte, um einen raschen Zugriff auf die Informationen zu ermöglichen.

Einleitend befindet sich auf der Startseite eine kurze Erläuterung zum Forschungsprojekt und der Datenbank. Die weiterführenden Menüpunkte umfassen

- Suche
- Themenbereich
- Veröffentlichung einstellen
- Links
- Kontakt
- Log in (für die direkte Eingabe neuer Veröffentlichungen)

Die **Suche** ist als einfache Suchanwendung in herkömmlicher Art (Eingabe von Begriffen) zu gebrauchen. Eine erweiterte Suchfunktion steht für die spezifische Suche nach Veröffentlichungen zur Verfügung. Über die dabei erscheinende Suchmaske lässt sich gezielt über Charakterisierungsmerkmale, die einer Publikation zugeordnet wurden, nach entsprechenden Veröffentlichungen suchen. Vereinfacht wird diese Suche zusätzlich durch eine große Auswahl an bereits aufgeführten Themen/Begriffen in den jeweiligen Suchkategorien (Abb. 20.3).



**Abb. 20.3: Die erweiterte Suchfunktion der Datenbank**

Für eine Schnellsuche - ohne genaue Vorstellung einer bestimmten Veröffentlichung - nur unter Einschränkung eines speziellen Themengebietetes (wie z. B. Gebäuderückbau, Brachflächenkataster, Finanzierung), bietet der Menüpunkt **Themenbereiche** die beste Lösung. Unter dieser Rubrik sind alle Publikationen hinsichtlich ihrer relevanten Themenbereiche zugeordnet. Die dort aufgeführten Oberbegriffe unterteilen sich wie in der folgenden Abb. 20.4 dargestellt. Diese Funktion ermöglicht es, eine große Anzahl an Veröffentlichungen zum gleichen Thema angeboten zu bekommen.

Jeder der in Abb. 20.4 dargestellten Begriffe ist ebenfalls noch einmal in weitere Unterpunkte unterteilt. Mehrfachnennungen von Publikationen, die komplexere Themenbereiche abdecken, sind dabei der Regelfall. Auf diese Weise ist eine Recherche von Veröffentlichungen zu einem Themenschwerpunkt, z. B. Finanzierung oder Planung, schnell möglich.



**Abb. 20.4: Untergliederung der Themenbereiche**

Mit der Funktion **Veröffentlichung einstellen** besteht die Möglichkeit für Herausgeber oder Autoren, dass sie mit einem Online-Formular eine Kurzzusammenfassung bzw. Charakterisierung ihrer Publikationen selbständig in die Datenbank eingeben und sie damit über das Internet einem großen Kreis von Interessenten zugänglich machen. Auf diese Weise kann gewährleistet werden, dass eine möglichst hohe Aktualität der Datenbank erhalten und der Umfang kontinuierlich erweitert wird. Das Online-Formular ist dabei bereits wie in Abb. 20.1 strukturiert und muss nur ausgefüllt und abgesendet werden.

Unter dem Menüpunkt **Links** finden sich die Kontaktadressen von Herausgebern und von wichtigen Institutionen, die im Themenbereich Flächenmanagement arbeiten. Hierunter fallen u. a. Bundesministerien, Bundesämter, einige Landesministerien, Forschungseinrichtungen sowie weitere relevante Institutionen. Außer den vollständigen Kontaktadressen sind auch direkte Verknüpfungen zur jeweiligen Homepage dieser Institutionen genannt.

Nur mit Hilfe der engagierten Fachöffentlichkeit wird es möglich sein, einen aktuellen Stand der Datenbank zu halten und diese um neue Veröffentlichungen zu erweitern. Über die **Log in**-Funktion können die Betreiber der Datenbank jederzeit neue Texte zur Aktualisierung der Datenbank eingeben.

### 20.3.3 Auswertung der Veröffentlichungen

Die Zusammenstellung und Auswertung der Veröffentlichungen hat gezeigt, dass inzwischen zu allen Themen in unterschiedlicher Ausführlichkeit Empfehlungen, Berichte und Fallbeispiele publiziert sind.

Die bekannteren sind hierbei auf Bundesebene sicherlich die Arbeiten des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung (BBR), des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (BMVBW) sowie die Großzahl an Publikationen, die vom Umweltbundesamt (UBA) veröffentlicht wurden. Beim Umweltbundesamt finden sich insbesondere Veröffentlichungen im Themenbereich Flächenmanagement/Flächenrecycling, welche einen speziellen Fokus auf den Boden (Boden-Wert-Bilanz (Doetsch & Rüpke 1998), Wiederherstellung von Bodenfunktionen (Gaßner et al. 2001), Ökonomische Anreize zum sparsamen und schonenden Umgang mit Boden (Bizer. & Lang 2000), Bodenschutz und Landschaftsverbrauch (Happe et al. 1999)) haben.

BBR und BMVBW beschäftigen sich mit der Stadt- und Verkehrsentwicklung bzw. -planung, zudem mit dem kontrollierten Gebäuderückbau, der Vermeidung, der Verwertung und dem Recycling von Bauabfällen. Besonders leicht zugänglich durch Ihre Internetpräsenz sind dabei unter anderem die laufenden Projekte WERKSTATTStadt ([www.werkstatt-stadt.de](http://www.werkstatt-stadt.de)) und „Fläche im Kreis“ ([www.flaeche-im-kreis.de](http://www.flaeche-im-kreis.de)).

Die kommunalen Zusammenhänge im nachhaltigen Umgang mit der Ressource Fläche wurden ausführlich auf der Ebene der Bundesländer, insbesondere von Bayern und Baden-Württemberg bearbeitet (z. B. Kommunales Flächenressourcenmanagement, Innenentwicklung vor Außenentwicklung). Andere Länder, wie z. B. Brandenburg, Niedersachsen und Nordrhein-Westfalen, haben diese Thematik aufgrund der vorhandenen Standortproblematiken z. B. im Schwerpunkt der Konversion militärischer Liegenschaften vertieft.

Die Steuerung der Flächennutzung, Instrumente, Lösungsansätze, Hemmnisse und Finanzierung für nachhaltige Flächennutzung, Verkehrsentwicklung und Stadtplanung sind häufig dargestellte Themen, welche auf Länderebene, insbesondere aber auch vom Deutschen Institut für Urbanistik (difu) behandelt wurden.

Auch internationale Erfahrungen aus der Kooperation zwischen dem BMBF und der US EPA (Environmental Protection Agency) sind in die Datenbank aufgenommen worden. Als Veröffentlichungen dieser bilateralen Zusammenarbeit sind Workshopdokumentationen und Forschungsergebnisse in Form der Arbeitshilfe zur Erstellung von Start-Up-Plänen (Ferber et al. 2005) beschrieben.

Viele praxisbezogene und exemplarische Fallbeispiele aus verschiedenen Bundesländern, welche unter unterschiedlichen Rahmenbedingungen durchgeführt wurden, sind ebenfalls in der Datenbank dokumentiert. Diese sind häufig sehr sachdienlich bei der Vorbereitung eines neuen Projektes und enthalten nicht selten eine Vielzahl an Hinweisen für Verbesserungen in Planung, Vorgehensweise und Durchführung ähnlicher Vorhaben. In zahlreichen Fällen sind auch Ansprechpartner in diesen Publikationen genannt. Dabei handelt es sich bei den in der Datenbank aufgeführten Fallbeispielen nicht generell nur um Flächenrecyclingprojekte, sondern z. B. auch um die Planung und Realisation von interkommunalen Gewerbegebieten mit ihren Erfolgs- und Misserfolgsberichten (Kahnert & Rudowsky 1999).

Die Vielzahl an Empfehlungen, die aus allen in der Datenbank aufgeführten Publikationen hervorgehen, lässt sich durch die weite Themenbreite nicht kurz zusammenfassen. Stetig wieder auftretende und allgemeine Hinweise im Hinblick auf Flächenrecycling sind jedoch

- eine flexible und frühzeitige Planung,
- die unbedingte Beachtung rechtlicher Vorgaben,
- eine zeitige und intensive Zusammenarbeit zwischen allen beteiligten Akteuren und
- das möglichst ausgeglichene Zusammenspiel von ökonomischen, ökologischen, technischen und sozialen Aspekten eines Projektes.

#### **20.3.4 Defizite**

Defizite an Publikationen bestehen bei speziellen Fragestellungen zum Flächenrecycling/Flächenmanagement. Relativ selten findet man Publikationen zu Sicherheitsaspekten bei der Umsetzung von Flächenmanagement/-recyclingvorhaben (Baubetrieb, Arbeits- und Gesundheitsschutz, Sicherstellung gesunder Wohn- und Arbeitsverhältnisse) oder auch zu rechtlichen Problemstellungen, welche sich im Flächenmanagement ergeben. Diese Themen werden zwar oft in Kombination mit anderen Zusammenhängen erwähnt, könnten aber aufgrund Ihrer hohen Relevanz in einer größeren fachlichen Tiefe benötigt werden.

Auch der sehr schwierige Themenbereich der Finanzierung/Kostenrechnung ist noch defizitär. Dies ist aber vor allem auf die nicht zu standardisierenden, stark variierenden Voraussetzungen der individuellen Projekte und Vorhaben zu begründen (Standort, Altlasten, Nachnutzungsvorhaben etc.). Zwar sind einige übergreifende Werke hierzu veröffentlicht (z. B. die Arbeitshilfe des ITVA (2003) Kostenstrukturen im Flächenrecycling, Finanzierungsmöglichkeiten beim Flächenrecycling (Süßkraut et al. 2000)), aber die praktische Nutzung/Anwendung ist nicht selten von der theoretischen Vorlage abweichend. Ein Vorschlag wäre die Erstellung einer aktuell zu haltenden Datenbank, mit der Finanzierungsoptionen für ein Projekt dargestellt und berechnet werden können.

Grundsätzlich unzureichend ist die Verfügbarkeit von praxisorientiert aufbereiteten Ergebnissen/Erkenntnissen, die umgesetzt werden können. Bei der Auswertung der zahlreichen Veröffentlichungen wurde der fehlende Wissenstransfer der erarbeiteten Ergebnisse in die Praxis sehr deutlich. So ist ein Großteil der Publikationen ohne einen wirklichen Ergebnisteil, ein Fazit oder eine Zusammenstellung der aus den Untersuchungen hervorgehenden wesentlichen Empfehlungen verfasst. Auch negative Ergebnisse sollten dabei deutlicher hervorgehoben werden, um eine Wiederholung von derartigen Entwicklungen an anderer Stelle vorzubeugen. Grundsätzlich sollte bei der Förderung von Arbeitshilfen/Handlungsempfehlungen ein größerer Schwerpunkt auf die Ergebnisverbreitung und damit verbunden der Form der Veröffentlichung gelegt wer-

den. Positive Ansätze in dieser Richtung stellen die Handlungsempfehlungen zum Flächenmanagement in Baden-Württemberg und Bayern dar, die in enger Abstimmung mit kommunalen Vertretern entstanden sind.

## 20.4 Ausblick

Mit Abschluss des Projektes liegt erstmals eine Übersicht zum Stand der Publikationen im Themenbereich Flächenmanagement in der Bundesrepublik vor. Über eine intensive Pressearbeit und Fachpublikationen wird die Datenbank in den nächsten Monaten einem breiten Fachpublikum bekannt gemacht.

Es ist erforderlich, dass diese Datenbank auch zukünftig weiter gepflegt wird, um einen aktuellen Stand zu gewährleisten. Insbesondere die im Rahmen des REFINA-Forschungsschwerpunktes zu erwartenden zahlreichen Publikationen sollten in die Datenbank eingepflegt werden. Die technischen Voraussetzungen auch einer externen Eingabe von Literatur sind geschaffen, so dass über die entsprechende Gestaltung von Forschungsvereinbarungen eine weitere Dateneingabe gewährleistet werden könnte.

Anzumerken bleibt, dass sich zahlreiche Publikationen mit der „Schadensbehebung“ der hohen Flächeninanspruchnahme bzw. mit einer Reaktion auf die aktuelle Situation befassen. Schlagworte sind u. a. Flächenrecycling, Revitalisierung von Altstandorten, Brachflächenrevitalisierung, Erhebung von Entsiegelungspotenzialen, Brachflächenkataster. Einige Veröffentlichungen sind wahrscheinlich nicht mehr notwendig, wenn es durch die Politik zu einer Umsetzung der Empfehlungen für ein aktiveres Angehen der Ursachenbekämpfung der Flächeninanspruchnahme durch die Änderung bestehender rechtlicher Regelungen und Förderungen kommen würde. Die Empfehlungen, wie im politischen Sinne zu handeln ist, sind zahlreich vorhanden und z. B. durch den RfNE (2004) oder schon 1995 vom difu (Apel et al. 1995) der Politik empfohlen worden. Ohne eine Trendwende auf der politisch-rechtlichen Basis ist jede weitere Publikation nur ein Versuch, das notwendige nachhaltige Flächenmanagement ohne effektive politische Grundlage zu betreiben.

## 20.5 Danksagung

Wir danken dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) für die Förderung dieses Projektes (Förderkennzeichen 0330535).

## 20.6 Literaturverzeichnis

APEL, D., HENCKEL, D., BUNZEL, A., FLOETING, H., HENKEL, M. J.; KÜHN, G.; LEHMBROCK, M., SANDER, R. (1995): Flächen sparen, Verkehr reduzieren. Möglichkeiten zur Steuerung der Siedlungs- und Verkehrsentwicklung. - Difu-Beiträge zur Stadtforschung, Band 16, Berlin.

- BIZER, K. & LANG, J. (2000): Ansätze für ökonomische Anreize zum sparsamen und schonenden Umgang mit Bodenflächen. - Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. - Raumplanung/Ökologie - . Forschungsbericht 201 03 196 (alt); neu: 296 15 196, UBA-FB 000070, UBA-Texte 21/00, Berlin.
- DOETSCH, P & RÜPKE, A. (1998): Revitalisierung von Altstandorten versus Inanspruchnahme von Naturflächen. Gegenüberstellung der Flächenalternativen zur gewerblichen Nutzung durch qualitative, quantitative und monetäre Bewertung der gesellschaftlichen Potentiale und Effekte. - Forschungs- und Entwicklungs-Vorhaben Nr. 103 40 119, UBA-Texte 15/98, Berlin.  
[http://www.umweltbundesamt.de/altlast/web1/berichte/gwiese2/wiese2\\_t.htm](http://www.umweltbundesamt.de/altlast/web1/berichte/gwiese2/wiese2_t.htm)
- FERBER, U., BARCZEWSKI, B., PREUß, T., SCHRENK, V., STEFFENS, K. & WEBER, K. (Hrsg.)(2005): Start-Up-Brachfläche. Arbeitshilfe zur Erarbeitung von Projektplänen. - VEGAS - Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart.
- GÄBNER, H., WILLAND, A., FISCHER, J., PIPPKE, N. LAMBRECHT, H., & GRÖNGRÖFT A. (2001): Anforderungen an die Wiederherstellung von Bodenfunktionen nach Entsiegelung. - Rechtliche und bodenfachliche Rahmenbedingungen für eine Entsiegelungsverordnung - . - Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit - Bodenschutz, Altlastensanierung - . - Forschungsbericht 299 73 230, UBA-FB 000213, UBA-Texte 54/01, Berlin.
- HAPPE, M., MOHS, B., OHLIGSCHLÄGER, G., GRABE, C., KASCHLUN, W. (1999): Bodenschutz und Landschaftsverbrauch. - Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, - Bodenschutz -, Forschungsbericht 108 02 897, UBA-FB 98-097, UBA-Texte 15/99, Berlin.
- ITVA - INGENIEURTECHNISCHER VERBAND ALTLASTEN E.V. (2003): Kostenstrukturen im Flächenrecycling. Arbeitshilfe - C 5-2. Juli 2003. - Berlin.
- KAHNERT, R. & RUDOWSKY, K. (1999): Nachhaltige Entwicklung im Handlungsfeld „Bauen und Wohnen“: Interkommunale Gewerbegebiete. Eine Dokumentation von Fallbeispielen. - Arbeitsbericht Nr. 143/November 1999. - Akademie für Technikfolgenabschätzung in Baden-Württemberg, Stuttgart.
- MFSWVLBR - MINISTERIUM FÜR STADTENTWICKLUNG, WOHNEN UND VERKEHR DES LANDES BRANDENBURG (Hrsg.)(1998): Flächenkonversion im Land Brandenburg 1991-1997. - Potsdam.
- RFNE – RAT FÜR NACHHALTIGE ENTWICKLUNG (2004): Mehr Wert für die Fläche: das „Ziel-30-ha“ für die Nachhaltigkeit in Stadt und Land. Empfehlungen des Rates für Nachhaltige Entwicklung an die Bundesregierung. – texte Nr. 11, Juli 2004, Berlin.
- SCHRENK, V. (2004) Flächenrecycling: Kenntnisstand und Erfahrungen in Deutschland. S. 136 - 143. In: BARCZEWSKI, B., KOSCHITZKY, H.-P., WEBER, K. & R. WEGE (Hrsg.):

VEGAS - Statuskolloquium 2004 - Mitteilungen des Institutes für Wasserbau, Heft 131, Eigenverlag Stuttgart.

SÜBKRAUT, G., VISSER, W., A. & BURGERS, W. (2000): Ökonomische Aspekte der Altlastensanierung. Leitfaden über Finanzierungsmöglichkeiten und -hilfen in der Altlastenbearbeitung und im Brachflächenrecycling. - Vorhaben im Rahmen des Umweltforschungsplanes des BMU FKZ: 298 77 750, UBA-Texte 04/01, Berlin.  
[http://www.umweltbundesamt.de/altlast/web1/berichte/finanz/finanz\\_t.htm](http://www.umweltbundesamt.de/altlast/web1/berichte/finanz/finanz_t.htm)

STATISTISCHES BUNDESAMT (2004): Zunahme der Siedlungs- und Verkehrsfläche: 93 ha/Tag - Pressemitteilung vom 8. November 2004.  
<http://www.destatis.de/presse/deutsch/pm2004/p4660112.htm> (30. Mai 2005).

## **21 AKTUELLE ERGEBNISSE UND ENTWICKLUNGEN BEIM EINSATZ VON VOR-ORT-ANALYTIK**

Johannes Flachowsky, c/o UFZ - Umweltforschungszentrum Leipzig/Halle GmbH

Katrin Batereau , Norbert Klaas, Martin Müller, Baldur Barczewski  
VEGAS, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart

### **21.1 Einleitung**

Stoffliche Analytik im Bereich der Altlastenerkundung und -sanierung hat die erforderlichen Parameter für die Bewertung des Standortes bereitzustellen. Die Auswahl eines geeigneten Analysenverfahrens wird primär von der zu lösenden Fragestellung, von der Zulässigkeit der Anwendung (BBodSchV) und von den verursachenden Kosten bestimmt. Dabei ist vor allem bei der Altlastenerkundung nicht nur zu entscheiden, welche Kontaminationen vorhanden sind und ob diese bestimmte Wertegrößen (Hintergrund-, Prüf-, Maßnahme- und Sanierungszielwert) überschreiten, sondern es ist auch deren laterale Ausdehnung zu bestimmen und die zu erwartende Gefährdung bei vorgesehener Nutzung zu erfassen. Das Untersuchungsziel und die beabsichtigte Aussage sowie die Spezifik des Untersuchungsstandortes und die verfügbaren finanziellen Mittel beeinflussen dabei nachhaltig die Probennahmestrategie, d.h. Rastergröße, Beprobungstiefe, Probennahmetechnik, Probenmenge und Probenqualität. Üblicher Weise beschränkt sich die Erkundung mit nachfolgender Präzisionsanalytik auf wenige Messpunkte und auf ein Probenmaterial, dass nicht durch objektive Prüfgrößen (Heterogenität von Standort, Probe und Kontamination) qualitätsgesichert ist.

Die Forderungen potentieller Investoren und Nutzer hinsichtlich Altlastenfreiheit und kompletter Risikoentlastung stehen damit häufig im Widerspruch zu der Qualität der Erkundungsergebnisse aufgrund der angewandten Erkundungsverfahren mit zu großen Rasterabständen. Das führt immer wieder bei freigestellten Flächen und nachfolgenden Aufschlussarbeiten zum Auffinden unbekannter Kontaminationsherde. Damit stehen Gutachter und ausführende Ingenieurbüros in der Zwangslage, bei im Allgemeinen unzureichenden Budgets den Entscheidungsträgern fundierte Informationen zur Gefährdungsabschätzung des untersuchten Standortes bereit zu stellen.

### **21.2 Aufgaben und Möglichkeiten der Vor-Ort-Analytik**

Die bisherigen Vorgehensweisen der Altlastbewertung mit einer unzureichenden Erkundungsdichte und scheinbar präzisen stofflichen Aussagen sind zukünftig nicht mehr geeignet, zuverlässige Informationen über Umfang und Verteilung kleinräumiger Schadstoffbelastungen bei der Revitalisierung industrieller Brachflächen zu liefern. Ein Ansatz, dies zu ändern, ist die unmittelbare Durchführung der erforderlichen Analytik am Standort (Vor-Ort-Analytik). Dabei ist Vor-Ort-Analytik keine neue analytische Me-

thode, sondern eine besondere Vorgehensweise zur Erzeugung standortspezifischer analytischer Informationen.

Die Aufgaben der Vor-Ort-Analytik oder besser Vor-Ort-Messtechnik bestehen in der schnellen Information über Stoffgehalte als halbquantitative Analytik mit großer Stichprobenzahl zur Qualifizierung der Probennahmestrategie für die Laboranalytik. Das Ziel der Vor-Ort-Messtechnik ist vorrangig die sichere Schadherderkennung und Fahnenausbreitung und nicht die Erzeugung von Konkurrenzdaten zur Laboranalytik.

Konzeption und Auswahl der Vor-Ort-Analytik im Rahmen der Altlastenuntersuchung sind abhängig von der analytischen Fragestellung „was soll, wie schnell, in welchem Medium/Kompartiment, in welchem Konzentrationsbereich bestimmt werden?“ Als Auswahlkriterien für die einzusetzenden Vor-Ort-Messgeräte gelten Schadstoffspektrum, Qualität des Analysenverfahrens und analytische Qualitätssicherung, Dynamikbereich, Selektivität, Datenmanagement und Interpretation, Anforderungen an die Probenvorbereitung, Messdauer, Handhabbarkeit (handgehalten, tragbar, transportierbar, leicht bedienbar), Kosten (Anschaffung, Betrieb) und Anforderungen an das Personal. Ein prinzipieller Nachteil der Anwendung von Vor-Ort-Methoden ist das Fehlen von Handlungsempfehlungen, Richtlinien oder Normen und die damit verbundene mangelnde Gerichtsfestigkeit der erhaltenen Ergebnisse. Die in der BBodSchV (Anlage 1, Pkt. 2.1 – Festlegung von Probennahmestellen) bisher enthaltenen Formulierungen sind eine notwendige aber nicht hinreichende Bedingung für die Nutzung dieser Methoden. Dabei existieren bereits eine Vielzahl von geeigneten Gerätetechniken (z.B. RFA, GC/MS, Sensorkits, Wassersonden) sowie entsprechende Anwendungsbeispiele zum Einsatz dieser Feldmethoden (Barczewski et al. 2003/2005).

Vorreiter für die Bereitstellung und Anwendung von Feldmethoden im Altlastenbereich war und ist die U.S. EPA, insbesondere bezüglich der Entwicklung neuer Vorgehensstrategien bei der Anwendung analytischer Methoden im Feld. Zahlreiche Reports sind in das Internet eingestellt ([www.cluin.org](http://www.cluin.org); [www.epa.gov/tio](http://www.epa.gov/tio)). In Bezug auf Möglichkeiten, Vorzüge und Probleme der Anwendung von Methoden der Feldanalytik sind umfangreiche Angaben in der Field Analytical Technologies Encyclopedia (FATE) unter der Internet-Adresse <http://fate.clu-in.org> aufgelistet.

Die U.S. EPA verifiziert Methoden, die zur Vor-Ort-Analytik geeignet sind. Unter Verifizierung wird dabei verstanden, dass die Feldmethode das gleiche Analysenergebnis wie die Labormethode erzeugt. Die Bewertung erfolgt nach den Kriterien der Einzelstoff- bzw. Gruppenbestimmung. Das bedeutet nicht, dass damit das Verfahren validiert oder genormt ist.

Ein wesentlicher methodischer Fortschritt bei Anwendung von Vor-Ort-Messtechniken ist das von der U.S. EPA entwickelte und zur Altlasterkundung umfangreich angewendete Prinzip des „Triad Approach (Systematic Project Planning, Dynamic Work Strategies, Real-time Measurement Technologies)“, dessen wesentlicher messtechnischer Schwerpunkt die Nutzung von Vor-Ort-Messtechniken ist. Weitere Strategiekonzepte

zur Vorgehensweise enthalten die Handlungsempfehlungen zum Einsatz von Vor-Ort-Analytik der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU 2001), der Materialienband Vor-Ort-Analytik des Sächsischen Landesamtes für Umwelt und Geologie (SLUG 1999), die länderhoheitlich abgestimmte Arbeitshilfe „Vor-Ort-Analytik“ der LABO – Altlastenausschuss (ALA), ad-hoc AG „Arbeitshilfen Qualitätssicherung“, Kap. 4 (LABO 2002), die auf den Materialienband der SLUG aufbaut.

### **21.3 Entwicklungstrends und aktuelle Ergebnisse**

Grundsätzlich gilt, dass eigenständige Entwicklungen speziell zur stofflichen Bewertung von Atlasstandorten eher die Ausnahme sind. Meist wird von potentiellen Anwendern auf verfügbare Messtechniken aus anderen Anwendungsfeldern zurückgegriffen (Flachowsky 1998).

Dies sind u. a.:

- Teststäbchen und Teststreifen.
- Prüfröhrchen.
- Reaktionsküvettenphotometer.
- Sensoren (Gase, Einzelionen), Sensorarrays und Immunoassays.
- evaneszente Sensoren (unspezifische Bestimmung gelöster organischer Verbindungen in Wasser).
- globale Detektoren, insbesondere FID und PID, auch IR, WLD, IMS.
- tragbare oder transportierbare IR-Geräte, vornehmlich zur MKW-Bestimmung.
- tragbare Röntgenfluoreszenzgeräte (Radionuklidquellenanregung) zur Elementanalytik.
- tragbare (bedingt) Gaschromatographie-Massenspektrometer.
- tragbare (bedingt) Gaschromatographen.
- transportierbare (Messfahrzeuge) mobile Messtechnik mit Laboranalysenstandard (energiedispersive Röntgenfluoreszenz mit Röhrenbetrieb, komplexe Gaschromatographie-Massenspektrometer – Kopplungen).
- Fluoreszenzspektrometer mit UV- bzw. Laseranregung zur PAK - Analytik

Damit ist die Anwendung folgender prinzipieller analytischer Verfahren unter Feldbedingungen möglich, wobei in den meisten Fällen eine vorlaufende Probennahme mit Probenaufbereitung erforderlich ist.

- Schwermetallbestimmung in Böden mittels energiedispersiver Röntgenfluoreszenz,

- Schwermetallbestimmung (als Kationen in wässrigen Lösungen) mittels Reaktionsküvettenphotometrie,
- Anionenbestimmung in Wasser mittels Teststäbchen, ionenselektiver Elektroden oder Reaktionsküvetten-Photometrie,
- Anionenbestimmung in Böden über die Herstellung von Schnelleluaten (Hochgeschwindigkeitsrührer, Ultraschall) bei bedingter Vergleichbarkeit mit S4 - Eluaten, Ammoniumnitratextrakten oder Bodensättigungsextrakten,
- Bestimmung flüchtiger organischer Substanzen (VOC) in Bodenluft, in Böden nach Headspace- Aufbereitung, in Wasser nach Purge&Trap- oder Headspaceaufbereitung substanzunspezifisch mittels Handgehaltenen Detektoren (PID, FID), einzelstoffspezifisch mittels Prüfröhrchen, stoffspezifisch mittels mobiler GC/MS-Technik oder GC-FID oder GC-ECD,
- Chloraromaten- und Phenolebestimmung nach Ultraschallextraktion oder Festphasenvoranreicherung mittels mobiler GC/MS, GC-ECD, direkte Messung ausgewählter Verbindungen mittels IMS (Ionenmobilitätsspektrometrie), Phenolmessung in wässrigen Lösungen mittels enzymatischer Sensoren, Bestimmung des Phenolindex mittels Reaktionsküvettenphotometrie,
- MKW-Analytik in Böden nach extraktiver Aufbereitung mittels NDIR, Dünnschichtchromatographie, mobiler GC-FID, Immunoassay-Applikation, Trübungsmessung nach Micellextraktion (für DK-Bestimmungen) oder indirekt über die Laserfluoreszenz ohne Probeaufbereitung,
- PAH-Analytik in Böden nach extraktiver Aufbereitung oder Anreicherung aus der Wasserphase mittels mobiler GC/MS, Dünnschichtchromatographie, Immunoassay-Anwendung, Ausnutzung des SAK bei belasteten Standorten, Fluoreszenzphotometrie oder direkt mittels Laserfluoreszenzdetektion
- PCB - Analytik in Böden nach extraktiver Aufbereitung oder in Wasser direkt mittels Immunoassay,
- Ermittlung ausgewählter Pflanzenschutzmittel oder Nitroverbindungen in Böden nach extraktiver Aufbereitung oder im Wasser direkt oder nach Voranreicherung mittels stoffselektiver Immunoassays oder GC/MS - Technik.

Sieht man von den Gerätetechniken zur Messung der hydraulischen Parameter ab, existieren nur in Ausnahmefällen in sich geschlossene kommerziell verfügbare Gerätetechniken und Arbeitsanleitungen, vornehmlich für den Bereich anorganischer Parameter (Einzelkomponentenbestimmung) im Kompartiment Wasser und für Einzelstoffbestimmungen mittels Prüfröhrchen oder stoffspezifischen Sensoren. Tauchsonden im UV-VIS-Bereich oder als Fluoreszenzsonden sind zur DOC-Bestimmung und in eingeschränktem Maße zur Stoffgruppen- (PAK) oder Einzelstoffbestimmung geeignet. Entsprechend dem Trend zur Miniaturisierung von Messtechniken stehen heute dem An-

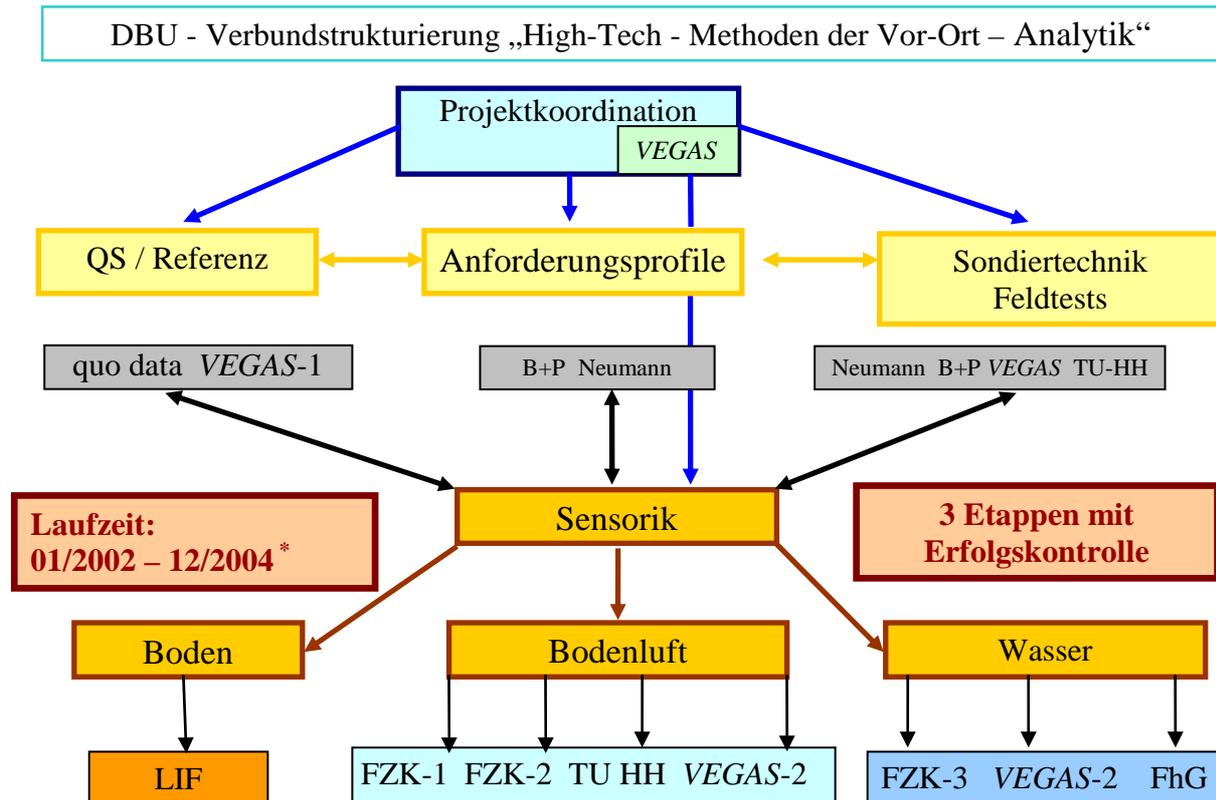
wender tragbare Massenspektrometer oder RFA-Geräte mit hohen Leistungsdaten für die Multikomponentenbestimmung zur Verfügung.

Typische Elemente der Arbeitserleichterung bei der Feldanalytik sind die Integration komfortabler Datenlogger und die Integration von Datum, Uhrzeit und R-H-Werten (GPS) in das dort abgelegte Datenprotokoll. Zunehmend an Bedeutung gewinnen werden handgehaltene komplexe Messsysteme (z.B. GDA der Fa. Airsense), bei denen unterschiedliche Sensoren zu einem Array verknüpft werden und bei denen eine stoffliche Identifizierung über Mustererkennungsverfahren vorgenommen wird. Drucksondiersysteme (LIF) und MIP-Systeme werden als CPT-Verfahren zur in-situ korrelierten Erfassung von Schadstoffherden eingesetzt, wobei das MIP-Verfahren eigentlich nur eine in-situ Probenaufbereitung in Form einer offenen Headspace ist und das stoffliche Signal erst am Gestängeende (oberirdisch) erzeugt wird (PID, FID, ECD, DLECD, GC).

Ein neuer Ansatz unter Beteiligung von VEGAS wurde im Rahmen eines von der DBU geförderten Verbundprojektes zur Entwicklung Sensorintegrierter Sondiertechnik verfolgt. Das Ziel des Verbundes bestand in der Miniaturisierung verschiedener Sensoren, ihre Integration in übliche Sondiergestänge der Kleinrammbohrung, die Sicherung der mechanischen Härtung, die drahtlose Datenübertragung und ihr Einsatz zur tiefenorientierten in-situ Erkundung (Flachowsky 2005).

Am Verbundprojekt waren die nachfolgenden in Abb. 21.1 aufgeführten Partner beteiligt, wobei die Kontrolle des Ist-Zustandes und die Freigabe weiterer Mittel durch ein Gutachtergremium (Dr. Bernd Bussian – UBA, Dipl.-Ing. Manfred Fickus – LFUWG Rheinland-Pfalz, Dr. Maximilian Hempel – DBU, Dr. Uwe Kallert – NLO Niedersachsen, jetzt Niedersächsisches Umweltministerium, Dipl.-Ing. Frieder Kern – LFU Baden-Württemberg) vorgenommen wurde.

Ein wesentliches Merkmal des Verbundes war die vernetzte Themenbearbeitung und die damit verknüpften Zuständigkeiten der einzelnen Projektpartner, die an den Aufgabenstellungen der anderen Projektteilnehmer mitwirkten. Das galt insbesondere für die Versuchsplanungs- und Bewertungsaktivitäten, die Entwicklung eines Testfeldes (Referenzstandort in der VEGAS-Halle), die Bereitstellung von Feldstandorten, die Entwicklung von gemeinsamen Modulen in der Sonde (z.B. Einlass-System mit Not-Aus, drahtlose Datenübertragung). Schematisch ist diese Vernetzung in Abb. 21.1 dargestellt.



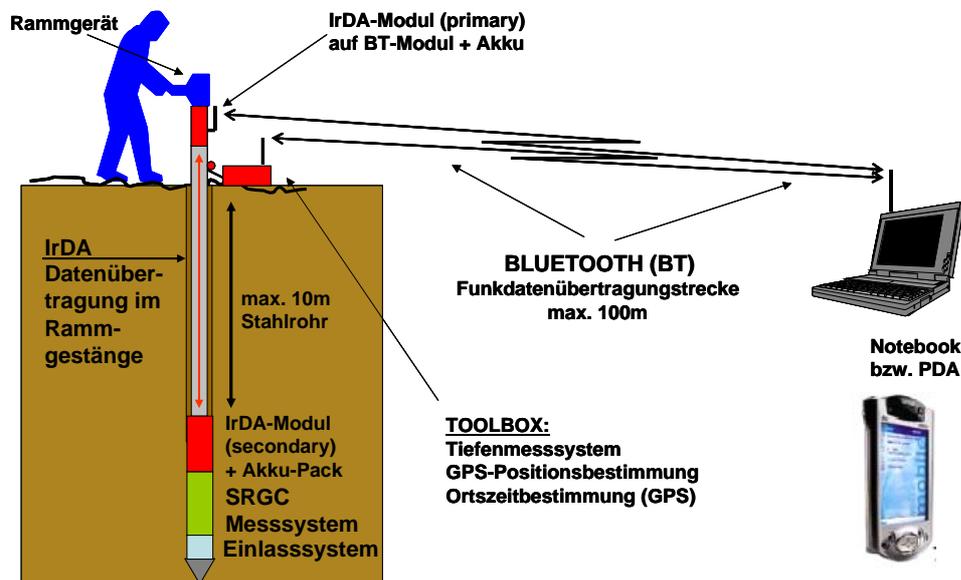
**Abb. 21.1: Verbundstruktur des High-Tech-Verbundes zur sensorintegrierten Sondiertechnik**

(quo data Langebrück; B+P/ Dr. Baermann&Partner Hamburg; Neumann Baugrund Eckernförde; LIF/ optimare Wilhelmshaven, Laserlabor Göttingen, Uni Potsdam – Inst. f. physikal. Chemie; VEGAS-1/ Referenzstandort Uni Stuttgart VEGAS-2/ Sensorik Uni Stuttgart; FZK/ Forschungszentrum Karlsruhe, IFIA, FZK-1/ ELNARA-Sensor, FZK-2/ SAGAS-Sensor, FZK-3/ EFAS-Sensor; TU HH/ TU Hamburg-Harburg AB 2-02 Umweltmesstechnik; FhG/ Fraunhofer Inst. f. Physikal. Messtechnik Freiburg/Brsg.; Projektkoordination – Flachowsky c/o UFZ Leipzig)

Die Aufgabe des Verbundes bestand in der Entwicklung von handgehaltener In-situ-Sondiertechnik (bis in Tiefen von <10 m) mit integrierter Sensorik zur Bestimmung von VOC, MKW und PAK. Dabei waren folgende Anforderungen vorgegeben:

- Messsignalerzeugung im Sondierspitzenmodul,
- Messsignaltransport zur Registriereinheit vornehmlich kabellos,
- Energieversorgung über Niederspannungsquellen,
- Energieversorgung autark im Sensormodul, im Ausnahmefall kabelgebunden,
- Volumenbegrenzung der Sensorik auf D = 30 mm, L = 65 cm,
- Feldfähigkeit und Robustheit der Sensorsysteme in Bezug auf mechanische Belastungen während des Rammens und bezüglich Feuchte und Temperatur,
- Tiefenauflösung 10 cm,
- Responsezeit (Vortrieb und Messen) < 5 min.

Der grundsätzliche Aufbau des Sensorintegrierten Sondiersystems ist schematisch in Abb. 21.2 dargestellt.



**Abb. 21.2: Schematische Darstellung des Lösungsansatzes Sensorintegrierter Sondiertechnik im DBU-geförderten Projektverbund „High-Tech-Methoden zur Untergrundsondierung (Beispiel Gassensorik mit schnellem Ramm-GC – SRGC, Zeichnung Chr. Bracht – TU Hamburg-Harburg)**

Die Datenübertragung erfolgt mit Ausnahme der aus physikalischen Gründen fasergebundenen Anregung und Signalübertragung bei LIF-Sensorik und EFAS-Sensorik prinzipiell drahtlos (im Sondiergestänge IrDA, ab Schlagkopf Bluetooth). Aus den gleichen Gründen unterscheidet sich die Gestaltung des Einlasssystems in Abhängigkeit von der zu untersuchenden Matrix.

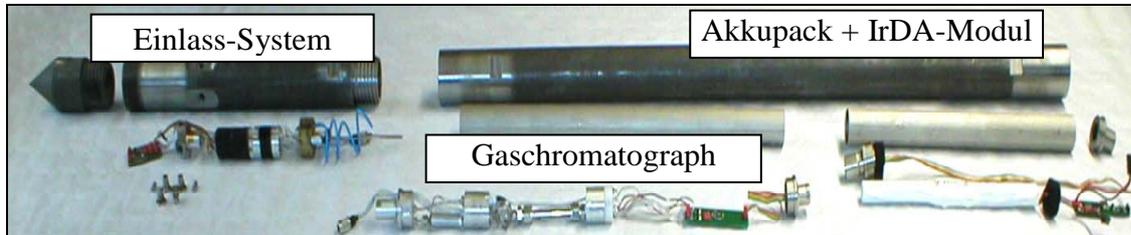
Als ziemlich komplex erwies sich der Sondaufbau, für den es in der beabsichtigten Form keine Vorbilder gibt. Die Gassensorik besteht aus dem Sensormodul mit aufgesetztem Batterie-Pack und IR-Sender. Die Sensorik wird in ein 32 mm Hüllrohr eingehaust und beidseitig mit Deckeln verschlossen, die die entsprechenden Versorgungsleitungen tragen. Das Sensormodul wird über Spiralfedern gedämpft und ist zwischen zwei Schraubringen fixiert.

Wie aus der Prinzipskizze ersichtlich, besteht das Sondiersystem neben speziell geformten Sondierspitzen (Neumann Baugrund) aus folgenden Komponenten:

- Einlasssystem
- Sensoreinheit
- Akku-Pack mit IR-Datenübertragung
- Verlängerungsgestänge
- IrDA- auf Bluetooth-Adapter mit Akku

- Toolbox auf der Oberfläche
- Messrechner bzw. PDA

Beispielhaft ist dies in Abb. 21.3 zu sehen.



**Abb. 21.3: Technische Strukturierung der Sondeneinbauten des GC-PID-Sensors (TU HH)**

Die entwickelten Sensoriken sprechen auf unterschiedliche Schadstoffe und -konzentrationen an. Robuste und preisgünstige Sensoren wie die MOX-Sensoren sind für höhere Schadstoffkonzentrationen gut geeignet, wie sie im Kontaminationsquellenbereich auftreten (Flachowsky 2005). In Abb. 21.4 ist die in ein Hüllrohr eingehauste miniaturisierte VEGAS-Sonde vor dem Einbau in die Rammkernsonde und in Abb. 21.5 ein an einer Referenzsäule ermitteltes Kontaminationsprofil dargestellt.



**Abb. 21.4: VEGAS - MOX-Sondeneinbau**

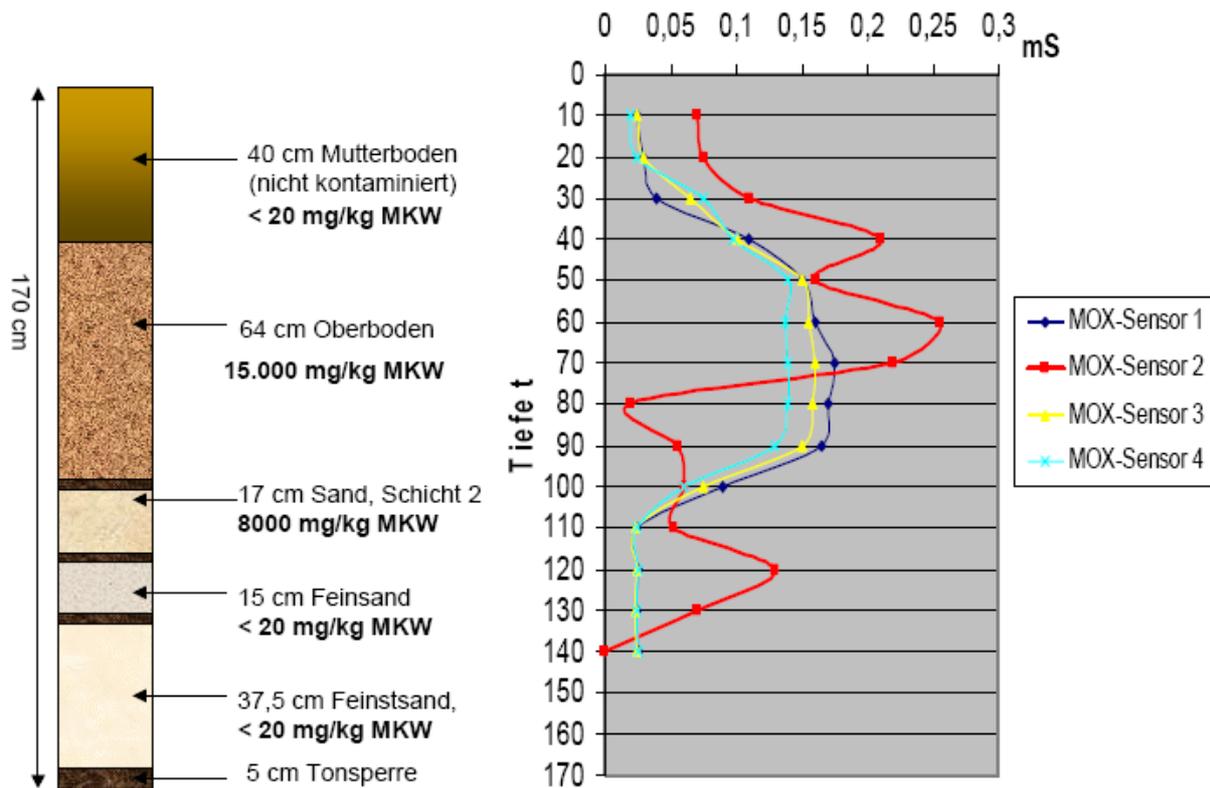
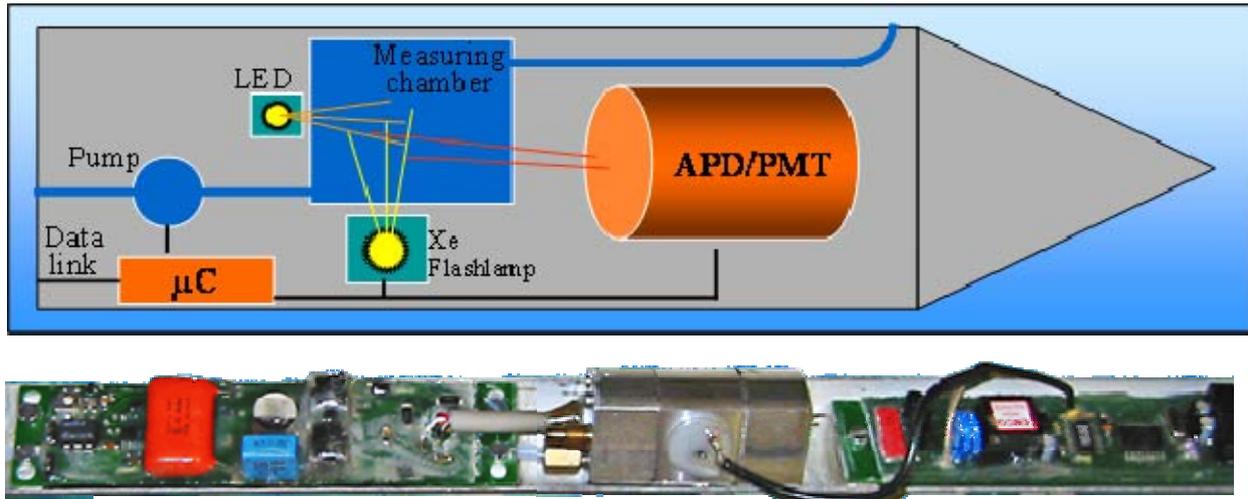
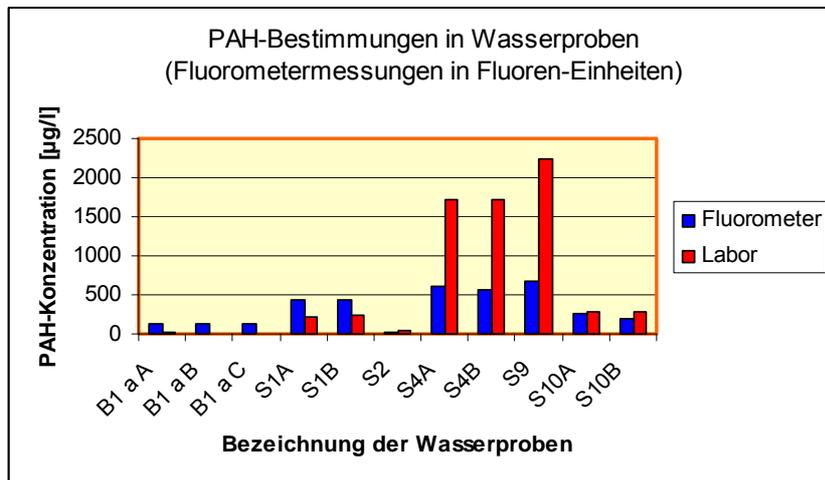


Abb. 21.5: Mittels MOX-Sonde ermitteltes Tiefenprofil

Neuartige Lösungen ergaben sich aus der Integration eines kompletten MIR- bzw. Fluoreszenzphotometers in die Sonde, wobei das von VEGAS entwickelte Fluoreszenzfluorometer im  $\mu\text{g/l}$ -Bereich arbeitet. Typischerweise registriert das System die Signale aller fluoreszierenden Stoffe im Gegensatz zur laboranalytischen PAK-Bestimmung, bei der ausgewählte PAK (z.B. 16 EPA-PAK) einzeln bestimmt und zur Summe addiert werden. In Abb. 21.6 sind Aufbau und technische Details und in Abb. 21.7 die mit dem Faserfluorometer gemessenen sowie mit der Laboranalytik verglichenen PAK-Konzentrationen in realen Grundwasserproben dargestellt. Die mittels Fluorometersensorik gemessenen und auf Fluoren kalibrierten Konzentrationswerte können deshalb nicht numerisch mit den Werten der Laboranalytik verglichen werden.



**Abb. 21.6: VEGAS PAK-Fluorometer**  
(schematischer Aufbau und rammfeste Bausteine)

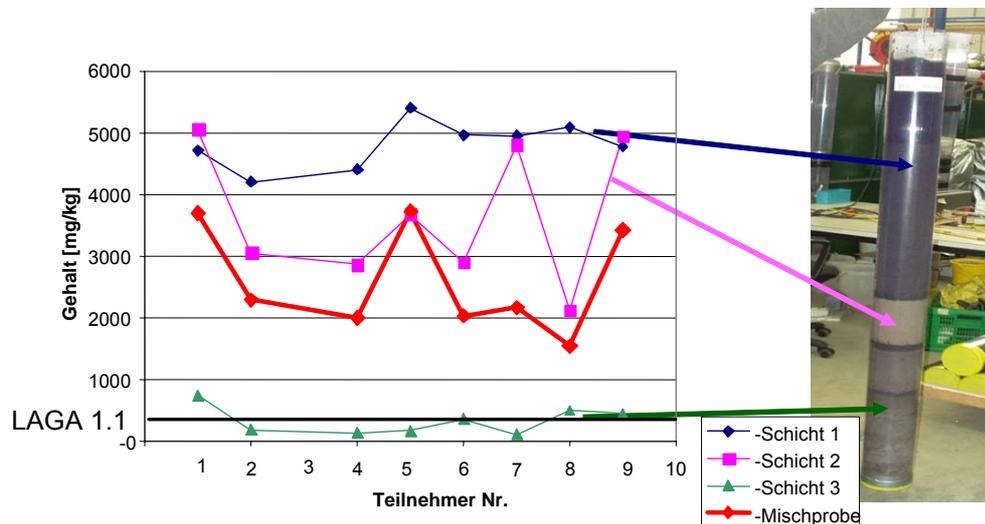


**Abb. 21.7: Vergleichsmessung (Fluorometer – Laboranalytik) PAK-belasteter Grundwasserproben**

Im Ergebnis der dreijährigen Verbundprojektarbeit stehen als anwendungsfähige Mustersaufbauten für die Bodenluft vier Sensortechniken (MOX-Sensorik, SAW-Sensorik, Mikrogradientarray-Sensorik, GC-PID), für den Aquiferbereich zwei Sensortechniken (faseroptischer Evaneszent-Feld-Absorptions-Sensor, MIR-Breitbandspektrometer) und für den Bodenbereich ein Sensor (LIF-Sensor für MKW und PAK) zur Verfügung.

Als begleitende Maßnahme wurden im Rahmen des DBU-Verbundprojektes in der VEGAS-Halle Sondiermöglichkeiten unter Verwendung von Bodensäulenaufbauten unterschiedlicher Strukturierung und Kontamination (Referenzstandort) aufgebaut. Anhand dieser wurden die Sensortechniken vor dem Feldeinsatz Zeit- und Witterungsunabhängig getestet. Die nachgewiesene Eignung der Bodensäulenaufbauten als Referenzmaterial war der Anlass, diese auch zur Qualitätsprüfung klassischer Probenentnahmetechniken nach DIN 4021 (Kleinrammbohrungen) zu benutzen (Baermann et al.

2005). Hintergrund sind die Aktivitäten des ITVA-Fachausschusses F2 zur Erarbeitung von Anforderungsprofilen an die Probennahmetechnik für die Untersuchung von Verdachtsflächen und Altlasten. Unter Verwendung MKW-kontaminierter Bodensäulen (10 Bodensäulen: 1 Referenzsäule, 9 Versuchssäulen) mit einem definierten Schichtenaufbau (Trennung der Schichten mittels Tonsperren) sowie mit MKW kontaminierten Einbauten sollten unter Beteiligung von acht Ingenieurbüros Kleinrammbohrungen nach DIN 4021 vorgenommen werden. Die Aufgabe war die Ansprache des Schichtaufbaus sowie die Beprobung der unterschiedlichen Schichten (Entnahme von drei Proben aus belasteten und/oder unbelasteten Horizonten sowie Herstellung einer Mischprobe). Nach DEV H53 (GC-FID) waren die MKW-Gehalte zu ermitteln. Um Vergleichbarkeit zu erhalten, wurden alle Proben im VEGAS-Labor analysiert. Die Vorgehensweise bei der Durchführung der Kleinrammbohrung, der Ansprache und der Probennahme oblag den Teilnehmern. Neben der eigentlichen Beprobung entsprechend der üblichen Vorgehensweise der jeweiligen Teilnehmer hatten die Probenehmer organoleptisch auffällige Bereiche zu beschreiben, zu beproben und entsprechende Schichtenverzeichnisse zu erstellen. Die Auswertung der erstellten Schichtenverzeichnisse der 8 Teilnehmer ergab, dass der humose Oberboden sowie die Mittelsande und die schluffigen Feinsande von allen Teilnehmern richtig angesprochen und beschrieben worden sind. Die jeweiligen Schichtgrenzen variieren dabei jedoch gegenüber dem Original-Schichtaufbau bis zu 0,4 m, die anhand der entnommenen Bodenproben analysierten Schadstoffkonzentrationen streuen stark. In Abb. 21.8 sind die Ergebnisse grafisch zusammen gefasst.



**Abb. 21.8: Ergebnisse des Ringversuches „Bodenprobennahme“**

Der schematische Schichtaufbau ist in Abb. 21.5 zu sehen. Keiner der Beteiligten hat den Schichtaufbau im unteren Bereich (unterhalb Schicht 2, Abb. 21.8) richtig erfasst und als unbelastet erkannt (scheinbare MKW-Gehalte bis 731 mg/kg). Damit sind über

50% der Schichtfolgen an diesen 170 cm langen Säulen nicht richtig beschrieben worden.

## 21.4 Zusammenfassung

Trotz umfangreicher gerätetechnischer Weiterentwicklungen und der Verfügbarkeit entsprechenden Instrumentariums, welches eine Kostenersparnis ermöglicht und die Verbesserung der Informationsdichte liefert, finden die Methoden der Vor-Ort-Messtechnik nur zögerlichen Eingang in der Ingenieurtechnischen Praxis. Ein wesentlicher Grund ist die fehlende Akzeptanz bei Anwendern und Genehmigungsbehörden, der Mangel an geeigneten Informationen über Anwendungspraxis und vorhandene, geeignete Geräte sowie die fehlenden behördlich anerkannten Validierungen und Zertifizierungen solcher Vor-Ort-Messtechniken (Klaas 2005). In den USA sind, allerdings im Rahmen anderer Vorgehensstrategien aufgrund größeren Ausmaßes kontaminierter Bereiche, entsprechend umfangreiche Verifikationsaktivitäten an verfügbarer Messtechnik vorgenommen worden. Eine unmittelbare Übertragung in die deutsche Umweltpraxis ist nicht möglich.

Deshalb wird seitens des BMBF, PT Jülich in dankenswerter Weise ein Forschungsprojekt bei VEGAS gefördert, in welchem Validierungs- und Verifizierungskonzepte für Vor-Ort-Messtechniken insbesondere für in-situ Erkundungen entwickelt werden, die Praxistauglichkeit in umfangreichen Feldtests geprüft und entsprechende Arbeitsanleitung für die ingenieurtechnische Praxis abgeleitet werden sollen.

Ein auf den Ergebnissen dieses Forschungsprojektes aufbauendes Ziel ist die Einrichtung eines Kompetenzzentrums bei VEGAS für die Eignungsprüfung verfügbarer Messtechniken zur Altlastenerkundung, -überwachung, und -sanierung sowie als Beratungszentrum für potentielle Anwender solcher Techniken.

## 21.5 Literatur

Baermann, A., Bahrig, B., Bücherl, K., Klaas, N. (2005): Ein „Ringversuch“ für Rammkernsondierungen. Altlastenspektrum (2/2005).

Barczewski, B., Batereau, K., Flachowsky, J., Franzius, V., Hempel, M., Klaas, N. (2005): Vor-Ort-Messtechniken zur Standorterkundung – Trends 2004, Initiativen zum Umweltschutz. Erich Schmidt Verlag GmbH & Co, Berlin, 2005. - Nr.: 62 - ISBN: 3-503-08737-0.

Barczewski, B., Batereau, K., Flachowsky, J., Franzius, V. und M. Hempel (2003): Vor-Ort-Analytik für die Erkundung von kontaminierten Standorten, Initiativen zum Umweltschutz. Erich Schmidt Verlag GmbH & Co, Berlin, 2003. - Nr.: 54 - ISBN: 3-503-07450-3.

- Flachowsky, J. (1998): Mobile Umweltanalytik, in Günzler, H. et al. (Hrsg.), Analytikertaschenbuch, Bd. 18, Springer-Verlag, Berlin – Heidelberg 1998, 143 – 179, ISBN 3-540-63611-0.
- Flachowsky, J. (2005): Stand und Entwicklungstrends von Vor-Ort-Analytik, In: Barczewski, B., Batereau, K., Flachowsky, J., Franzius, V., Hempel, M., Klaas, N. (Hrsg.): Vor-Ort-Messtechniken zur Standorterkundung – Trends 2004, Initiativen zum Umweltschutz. Erich Schmidt Verlag GmbH & Co, Berlin, 2005. - Nr.: 62 - ISBN: 3-503-08737-0.
- Klaas, N., Rombach, N. (2005): Einleitung, In: Barczewski, B., Batereau, K., Flachowsky, J., Franzius, V., Hempel, M., Klaas, N. (Hrsg.): Vor-Ort-Messtechniken zur Standorterkundung – Trends 2004, Initiativen zum Umweltschutz. E. Schmidt Verlag, Berlin, 2005. - Nr.: 62 - ISBN: 3-503-08737-0.
- LABO (2002): Arbeitshilfe für die Qualitätssicherung bei der Altlastenbearbeitung, LABO, ALA -, UA QS - Unterausschuss „Arbeitshilfe für Qualitätsfragen bei der Altlastenbearbeitung“.
- LfU – Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (2001): Handlungsempfehlung zum Einsatz von Vor-Ort-Analytik, Altlasten und Grundwasserschadensfälle, Band 33, Karlsruhe.
- SLUG – Sächsischen Landesamt für Umwelt und Geologie (1999): Vor-Ort-Analytik, Materialien zur Altlastenbehandlung, Lößnitz-Druck GmbH, Radebeul.

## 22 INDIKATOREN FÜR NACHHALTIGE ENTWICKLUNG – PRAXISTEST STUTTGART

Dipl.-Ing. Hermann J. Kirchholtes  
Landeshauptstadt Stuttgart, Amt für Umweltschutz

### 22.1 Einsatz von Indikatoren

Quantitative Indikatoren dienen dazu, komplexe Sachverhalte und Entwicklungen in wenigen Zahlen deutlich zu machen. Dazu ist es erforderlich, komplexe Sachverhalte als „kondensierte Informationen“ auf das Wesentliche zu reduzieren. [1] Die zunehmende Bedeutung von Indikatoren in Raumordnung und Bauleitplanung wird auch durch aktuelle EU-Richtlinien – wie zum Beispiel die SUP-RL und die FFH-RL – unterstrichen. [2]

Das Abfallaufkommen in Tonnen je Einwohner hat sich in Baden-Württemberg als Indikator für die abfallwirtschaftlichen Anstrengungen der Kreise zur Vermeidung und Verwertung von Abfällen etabliert. Dabei werden aber wichtige Faktoren außer Acht gelassen, wie z.B. die unterschiedlichen Strukturen der Kreise, die städtisch oder ländlich geprägt, Produktionsstandorte oder Erholungsgebiete sein können. Nur diese Strukturdaten ermöglichen einen qualifizierten Vergleich der Kreise in ihrem Bemühen um bessere Verwertung von Abfällen. Werden aber unterschiedlich strukturierte Kreise allein mit Hilfe des Indikators Abfallaufkommen verglichen, so entsteht ein verzerrtes Bild.

Die Bautätigkeit in einer Gemeinde wird durch den Anteil der Siedlungsfläche an der Gemarkungsfläche indiziert. Auch dieser Indikator kann nur einen Teilaspekt des nachhaltigen Wirtschaftens einer Gemeinde mit Boden und Fläche wiedergeben. Wird doch als Siedlungsfläche auch die Grünanlage im Innenbereich erfasst, die von der Bevölkerung (zu Recht) als Erholungsfläche geschätzt und als Grünfläche empfunden wird. Das zeigt, dass Indikatoren durch die Reduzierung aufs Wesentliche immer nur einen Teil der Wirklichkeit spiegeln und zur Interpretation meist zusätzlicher Informationen bedürfen.

Bei Indikatoren für nachhaltige Siedlungsentwicklung scheint das Bemühen um ausgewogene Erfassung des Sachverhalts ins gegenteilige Extrem umzuschlagen: Die Indikatorensets sind aufgrund der Vielzahl von Indikatoren unübersichtlich und verfehlen damit das Ziel der Kondensierung aufs Wesentliche.

### 22.2 Erfahrungen mit Indikatoren für nachhaltige Entwicklung

Indikatoren für nachhaltige Entwicklung werden diskutiert, seit der Begriff nachhaltige Entwicklung geprägt wurde.

Denn zum einen ist „Nachhaltige Entwicklung“ ein sehr schillernder Begriff, unter dem selbst die Fachleute nicht immer das Gleiche verstehen. Daher sei hier an die „offizielle“ Begriffsdefinition der UN (Brundland-Report 1987 [3]) erinnert:

„Nachhaltig ist eine Entwicklung, die den Bedürfnissen der heutigen Generation entspricht, ohne die Möglichkeiten künftiger Generationen zu gefährden, ihre eigenen Bedürfnisse zu befriedigen und ihren Lebensstil zu wählen.“

Zum anderen befindet sich der Umgang mit Indikatoren in der „Nachhaltigkeitsdiskussion“ immer noch im Experimentierstadium [4] [5]. Dabei zeichnet sich ab, dass

- kein einzelner Indikator identifiziert werden kann, der universell einsetzbar ist,
- für verschiedene Bezugsflächen unterschiedliche „Indikatorensets“ zum Einsatz kommen und
- ein Vergleich unterschiedlicher Flächen mit Hilfe von Indikatoren schwierig, wenn nicht sogar unmöglich ist.

Um die Vielfalt der Lösungsansätze zu erläutern, werden als Beispiele für die zahlreich publizierten Indikatorensets folgende kurz vorgestellt:

- CSD-Indikatoren (UN)
- Indikatoren der „Städte der Zukunft“ (DE)
- SEEDA-Checkliste (GB)
- RESCUE-SAT (EU).

### **22.2.1 CSD-Indikatoren für nachhaltige Entwicklung (UN)**

Das Committee on Sustainable Development (CSD) hat im August 1996 eine Liste von 134 Indikatoren für nachhaltige Entwicklung vorgelegt, die bis 1999 einer Testphase unterzogen wurden. Hier ging es darum, gemäß Kapitel 40 der Agenda 21 („Informationen als Entscheidungsgrundlage“, 1992) einen praktikablen und akzeptierten Satz von Indikatoren zur Beobachtung nachhaltiger Entwicklung auf nationalem Niveau und zur Erleichterung einer nationalen Berichterstattung bereitzustellen. Die Teilnehmer an der Testphase konnten aus diesem Set den nationalen Zielsetzungen entsprechend ein Menü von Indikatoren auswählen. [6]

Die Liste der UN ist in 4 Schlüsselthemen untergliedert:

- Soziales (Erziehung, Beschäftigung, Gesundheit, Wohnen, Lebensqualität, ...),
- Umwelt (Trinkwasser/Grundwasser, Landwirtschaft/sichere Nahrungsmittelversorgung, Siedlungen, Küstenbereiche, Fischerei, ...),
- Wirtschaft (Wirtschaftliche Abhängigkeit, Energieversorgung, Abfallmanagement, Transport, Bodenschätze, ...),

- Institutionen (Integrierte Entscheidungsfindung, Forschung und Technologie, Öffentliches Bewußtsein und Information, internationale Konventionen und Zusammenarbeit, ...).

Insgesamt sind unter den vier Schlüsselthemen 15 Themen und 38 Unterthemen entwickelt worden [7].

Jeder CSD-Indikator wird aus UN-Konventionen, insbesondere den verschiedenen Kapiteln der Agenda 21, hergeleitet. Beispiele für Indikatoren:

- Soziales – Wohnen – Lebensbedingungen – „Geschossfläche pro Person“.
- Umwelt – Boden – Siedlungen – „Fläche rechtlich ausgewiesener und wilder Bebauung“.

Ziel dieser Indikatoren ist die Berichterstattung auf nationaler Ebene. Angestrebt wird damit ein Ländervergleich, um den Lebensstandard, die soziale, ökonomische und institutionelle Entwicklung sowie die Umweltbedingungen der Staaten vergleichend zu bilanzieren.

Die Ergebnisse der Testphase wurden 2001 veröffentlicht [6].

### **22.2.2 Indikatoren der „Städte der Zukunft“ (DE)**

1997 begann ein Forschungsprojekt des Bundes-Bauministeriums unter dem Titel „Städte der Zukunft“ mit dem Ziel, kommunale Handlungsstrategien zur nachhaltigen Stadtentwicklung zu fördern [8]. Ein Schwerpunkt dieses Forschungsfeldes lag in der Entwicklung geeigneter „Indikatoren für die nachhaltige Stadtentwicklung“. Neben den vier Hauptakteuren Münster, Heidelberg, Dessau und Güstrow war auch Stuttgart als Referenzstadt an diesem Vorhaben beteiligt [9].

Ziel war es, einen bundesweit einheitlichen Katalog von Indikatoren speziell für die kommunale Ebene zu erarbeiten, mit dessen Hilfe die unterschiedlichen kommunalen Strategien zur nachhaltigen Stadtentwicklung verglichen und die Erfolge kontrolliert werden können. Dabei wird zwischen fünf städtebaulichen Orientierungswerten und 24 Erfolgsindikatoren für nachhaltige Entwicklung unterschieden. Als Maßstab wird das Stadtgebiet verwendet, die zugehörige Planungsebene ist der Flächennutzungsplan.

Für die fünf städtebaulichen Orientierungswerte wurden folgende „Zielindikatoren“ mit einheitlichen Messwerten für eine nachhaltige Stadtentwicklung vorgeschlagen:

- Siedlungsfläche Innen zu Außen  $\leq 3 : 1$
- CO<sub>2</sub>-Ausstoß  $\leq 50 \%$
- Trinkwasserverbrauch  $\leq 110$  Liter pro Tag und Einwohner
- Restmüll  $\leq 2,5$  Kilogramm pro Einwohner und Woche
- Modal-Split Umweltverbund : MIV  $\geq 2 : 1$  (66 % zu 33 %).

Bei den 24 Erfolgsindikatoren konnte keine einheitliche Zielzahl gefunden werden. Auch wurden Anpassungen an die speziellen Gegebenheiten vorgenommen, was die

Vergleichbarkeit eingeschränkt. Fazit: Die Erfolgsindikatoren dienen der Kontrolle der Zielerreichung einer Planung und nicht dem interkommunalen Vergleich.

Beispiele für Erfolgsindikatoren:

- Haushälterisches Bodenmanagement – Zunahme der Siedlungs- und Verkehrsfläche (in Hektar pro Jahr);
- Haushälterisches Bodenmanagement – Nutzung von Gewerbebrachen und Konversionsbauflächen (ohne Dimension).

### 22.2.3 SEEDA-Checkliste (GB)

Für die südostenglische Region Medway wurde im Jahre 2003 eine regionale Planung zur Revitalisierung aufgegebenen Hafenanlagen erarbeitet und mit Hilfe einer Nachhaltigkeits-Checkliste bewertet [10]. Ziel dieser Bewertung war es, den Nachweis der Nachhaltigkeit der geplanten Entwicklung zu führen. Diese Liste ist unter dem Namen SEEDA-Checkliste veröffentlicht worden. SEEDA steht für die teilprivatisierte Entwicklungsgesellschaft South East England Development Agency.

Die SEEDA-Liste ist in die drei thematischen Blöcke Ökonomie, Soziales und Umwelt gegliedert. Zu jedem dieser Blöcke werden Themen und Unterthemen, teilweise auch Detailthemen mit Beschreibungen wie folgt geliefert:

SEEDA Sustainability Checkliste			
Thematischer Block	Themen	Unter-Themen	Detailthemen
Ökonomie	6	32	27
Soziales	7	36	36
Umwelt	10	62	65
SUMME	23	130	128

Nach Auskunft der Regionalverwaltung von Medway wurde die Liste mit Erfolg angewendet. Die Detaillierung der Dokumentation ermöglicht eine Übertragung auf andere Projekträume, zeigt aber auch, dass es sich hierbei um eine sehr spezifisch es Werkzeug handelt.

### 22.2.4 RESCUE-SAT (EU)

Im 5. Forschungs-Rahmenprogramm der EU wurde unter der Leitaktion „Die Stadt von morgen und das kulturelle Erbe“ u.a. das Projekt RESCUE (Regeneration of European Sites in Cities and Urban Environments, 2002 bis 2005) gefördert [11]. Ein Themen-

schwerpunkt dieses Projektes befasste sich mit „Qualitätskriterien für nachhaltiges Flächenrecycling“.

RESCUE definiert: „Nachhaltiges Flächenrecycling beinhaltet das Management, die Aufbereitung und Wiedernutzbarmachung von Brachflächen in der Form, dass die Erreichung und Befriedigung menschlicher Bedürfnisse für die gegenwärtigen und zukünftigen Generationen, im jeweiligen regionalen Zusammenhang ökologisch verträglich, wirtschaftlich machbar, institutionell stabil und sozialverträglich gesichert werden kann.“ [12]

Um die Nachhaltigkeit von Flächenrecyclingprozessen zu überprüfen, wurde in RESCUE das Bewertungsinstrument „SAT – Sustainability Assessment Tool“ entwickelt. Im Abschlussbericht von RESCUE [12] wird eine Auswahl von Indikatoren für nachhaltiges Brachflächenrecycling aufgelistet. Im Rahmen des SAT werden die für eine konkrete Planung bzw. ein konkretes Projekt angepassten Indikatoren einer Gewichtung unterzogen, d.h. es wird zwischen höher und geringer gewichtigen Indikatoren unterschieden. Diese Gewichtung wird partizipativ während einem eintägigen Workshop mit unterschiedlichen, am Recyclingprozess beteiligten Akteuren durchgeführt. Dazu wird mit der Hilfe von Fragebögen und Gruppenarbeit die Auswahl und Gewichtung der Indikatoren vorgenommen. Das SAT wird damit Teil der Bürgerbeteiligung auf der Projektebene. Der Maßstab der Bearbeitung liegt bei RESCUE auf der Ebene der verbindlichen Bauleitplanung (Bebauungsplan, Projektplanung). Der Ansatz, flächenspezifische Indikatoren auszuwählen, wird der Feststellung gerecht, dass es weder universell einsetzbare Indikatorensets noch die Möglichkeit gibt, das Maß der Nachhaltigkeit unterschiedlicher Flächenentwicklungen mit Hilfe von Indikatoren zu vergleichen. So sind die Gewichtungen der vier Nachhaltigkeits-Dimensionen Ökologie, Ökonomie, Soziales und Institutionelles zumindest in Maßstabsebenen unterhalb des FNP entscheidend vom individuellen Standort abhängig und können daher nur einzelfallspezifisch definiert werden.

Die Möglichkeiten und Formen der konkreten Anwendung und der institutionellen und organisatorischen Einbindung des SAT in Planungsprozesse konnte in RESUE nur ansatzweise überprüft werden. Praktische Erprobungen sind derzeit in England, Wales und dem Ruhrgebiet in Vorbereitung.

### **22.2.5 Zwischenbilanz**

Es stellt sich die Frage, ob die bisher erarbeiteten Konzepte ausreichen, um in einem konkreten Anwendungsfall mit Hilfe von Indikatoren die Nachhaltigkeit einer geplanten Brachflächenentwicklung beurteilen und überprüfen zu können. Indikatoren können ihre Funktion, „komplexe Zusammenhänge auf wesentliche Kerngrößen zu reduzieren“, nur dann erfüllen, wenn die Anzahl der verwendeten Indikatoren überschaubar bleibt. Die Arbeit mit Indikatoren erfordert eine starke Fokussierung aufs Wesentliche.

Indikatoren sind zudem maßstabsabhängig und gebietsspezifisch. Insbesondere im kleinräumigen Maßstabbereich ist ein Vergleich unterschiedlicher Räume mit Hilfe von Indikatoren nur in Ausnahmefällen möglich, erfordert aber zumindest eine sehr strikte Beschränkung der Aufgabenstellung. Für die Ebene der Stadtentwicklung bleibt fraglich, ob es überhaupt gelingt, Aspekte und Räume (Maßstabsebenen) zu identifizieren, die sich mit Hilfe von Indikatoren vergleichen lassen.

Auf der Ebene der Stadtentwicklungsplanung muss im Einzelfall eine Auswahl charakteristischer Indikatoren erfolgen. Dafür stellt das RESCUE-SAT ein mögliches Verfahren zur Verfügung. Offen bleibt, wie der erforderliche Workshop in einen Planungsprozess eingebunden werden kann.

Bislang wurden Indikatoren in der Stadtplanung hauptsächlich für die Evaluierung eingesetzt – sie wurden kaum in Entscheidungsprozesse integriert. [13] Dabei sind Indikatoren geeignet,

- mit den am Planungsprozess beteiligten Gruppen eine Diskussion über die wichtigsten Merkmale einer nachhaltigen Entwicklung zu führen,
- die Entscheidungsträger bei der Entscheidungsfindung zu unterstützen,
- zu dokumentieren, welche Kriterien für eine nachhaltige Entwicklung stehen und
- die Nachhaltigkeit einer Entwicklung gegenüber der Planung mitzuverfolgen (Monitoring).

Dazu ist es vordringlich, eine Instanz zu identifizieren, die ausgewählte Indikatoren unabhängig und über Planungs- und Realisierungsphasen hinweg verfolgen kann.

### **22.3 INTERREG III B-Projekt REVIT**

Die Landeshauptstadt Stuttgart koordiniert das EU-Projekt REVIT und wirkt im Projekt als Partner mit. REVIT – Towards More Effective and Sustainable Brownfield Revitalisation Policies – Effektive und nachhaltige Instrumente für die Revitalisierung von Brachflächen – ist im Programm INTERREG III B, Programmgebiet Nordwest-Europa angesiedelt [14]. Die ersten REVIT-Aktivitäten begannen im Oktober 2003. Im April 2007 müssen alle Maßnahmen abgeschlossen sein. Die Gesamtkosten für REVIT betragen 19,98 Mio. EURO. Davon stehen für Stuttgart als Partner 4,4 Mio. EURO zur Verfügung. Die EU bezuschusst die Kosten zu 50 %. [15]

Beteiligt an REVIT sind neben Stuttgart die kommunalen Partner Hendelo (NL), Tilburg (NL), Torfaen (GB) und Medway (GB) sowie die Region Nantes (F).

Ziel von REVIT ist ein länderübergreifender Austausch über Konzepte des Brachflächenrecyclings in den Bereichen Städtebau, Finanzierung, Liegenschaftsorganisation, Umweltschutz und Projektmanagement sowie die Gewinnung von und die Zusammenarbeit mit privaten Investoren.

Die praktische Umsetzung von Methoden und Werkzeugen erfolgt bei den Modellvorhaben der Projektpartner. Für Stuttgart wurde hierzu das Gelände des ehem. Güterbahnhofs Bad Cannstatt ausgewählt. Dort werden standortspezifische wie auch transnational erarbeitete Methoden und Maßnahmen in die Praxis umgesetzt [16].

Die Überprüfung der Nachhaltigkeit der Entwicklungsmaßnahmen durch den Einsatz von Indikatoren für nachhaltige Entwicklung wird in einer transnationalen REVIT-Arbeitsgruppe vorbereitet und koordiniert. Die Umsetzung des gemeinsam erarbeiteten Konzeptes erfolgt im Rahmen der Modellvorhaben durch die einzelnen Partner.

## **22.4 Praxistest in Stuttgart**

Auf Basis einer kritischen Bilanzierung verfügbarer Methoden zum Einsatz von Indikatoren für nachhaltige Entwicklung wurde im November 2004 von der transnationalen thematischen REVIT-Arbeitsgruppe vereinbart, dass in Stuttgart für das Gebiet des Güterbahnhofs Bad Cannstatt eine Pilotanwendung auf der Grundlage des RESCUE-SAT-Konzeptes stattfindet.

Mittlerweile (insbesondere nach Verabschiedung des Masterplans durch den Gemeinderat) konnte mit allen Beteiligten in Stuttgart Konsens darüber erzielt werden, am 18. Oktober 2005 einen entsprechenden Workshop durchzuführen. Die ursprüngliche Planung für Juli 2005 ließ sich nicht verwirklichen.

Ziel des Workshops wird es sein, die für das Projektgebiet – auch vor dem Hintergrund einer Bürgerbeteiligung zu der notwendigen FNP-Änderung - konsensfähigen Ziele nachhaltiger Entwicklung zu identifizieren. Wenn möglich, sollen diese Ziele zu Indikatoren konkretisiert, d.h. als Ziel quantifiziert werden. Wird z.B. als Ziel ein „hoher Grünflächenanteil“ vereinbart, so kann der zugehörige Indikator „Grünflächenanteil mindestens 30 %“ heißen.

Als Planungsgrundlagen stehen zur Verfügung: Der Flächennutzungsplan FNP 2010 im Maßstab 1:10.000 aus dem Jahre 2001 [17], der Rahmenplan Mercedesstraße im Maßstab 1:2.500 vom April 2005 [18] und eine daraus abgeleitete Vorstudie zur Realisierung eines Bebauungskonzeptes (Baustufe 1) im Maßstab 1:500 bzw. 1:250, die zum Workshop fertiggestellt wird.

In dem vierstündigen Workshop sollen die Planung und ein Vorschlag für „Ziele nachhaltiger Entwicklung“ vorgestellt und diskutiert werden. Zu dem Workshop werden eingeladen: Grundstückseigentümer, Gemeinderat und Bezirksbeiräte, Bürger- und Gewerbevereine, Nachbarn, Planungsträger/Verwaltung, lokale Wirtschaftsverbände und mögliche Investoren/Bauherren.

In die Vorbereitung des Workshops sind eingebunden: Das Amt für Stadtplanung und Stadterneuerung und das Amt für Umweltschutz (gemeinsame Organisation), KOMMA.PLAN München als Moderator und ZEFIR (Zentrum für innovative Ruhrgebietsfor-

schung der Ruhr-Universität Bochum) als Mitentwickler des RESCUE-SAT-Konzeptes. Die Leitung des Workshops übernimmt der zuständige Bürgermeister Matthias Hahn. Im Rahmen der Vorbereitung des Workshops wurden die Ziele der nachhaltigen Entwicklung (ZnE) intensiv diskutiert. Dabei ergaben sich folgende Anforderungen:

- Die ZnE des Masterplans sollen aus den ZnE des Flächennutzungsplans abgeleitet werden. Evtl. auftretende Widersprüche sind zu begründen.
- Die ZnE des Masterplans waren bisher nicht beschrieben worden. Dies musste bei der Vorbereitung des Workshops nachgeholt werden.
- Die Ableitung von Indikatoren aus den Zielen für nachhaltige Entwicklung erfolgt nur optional.

Die bisher diskutierte Liste von Zielen bzw. Indikatoren für nachhaltige Entwicklung enthält keine Aspekte der Altlastenbearbeitung. Dies liegt auch daran, dass die Bodenuntersuchungen keine Hinweise auf erhebliche Umweltgefährdungen ergaben. Die vorgesehene Nutzung als Gewerbe-, Misch- oder Sportgebiet ist zudem relativ unsensibel. Wichtige ökologische Ziele sind:

- Ein hoher Grünflächenanteil und die gute Einbindung in einen regionalen Grünzug.
- Die Sicherstellung des Heil- und Mineralwasserschutzes (das Planungsgebiet liegt in der Kernzone des Stuttgarter Quellenschutzgebietes).
- Eine möglichst großflächige Entsiegelung, auch zur Dämpfung des Niederschlagsabflusses und zur Verbesserung der Grundwasserneubildung.
- Gewährleistung der notwendigen Lärmschutzmaßnahmen (gegen Verkehrslärm und Veranstaltungslärm).
- Beachtung der städtischen Standards für Energiesparmaßnahmen bei der Planung von Gebäuden.

Die Weiterentwicklung zu Indikatoren stößt auf Skepsis, da bei zu starren Fixierungen befürchtet wird, dass die bei der praktischen Umsetzung die notwendigen Spielräume für angepasste Einzelfallregelungen (zur Sicherstellung einer möglichst weitgehenden Zielerreichung) verloren gehen. Stadtplanung und Stadterneuerungen erfordern flexible Zieldefinitionen, um Gesamtziele durch Kompromisse im Einzelfall erreichen zu können.

## 22.5 Schlussfolgerungen

Angesichts der über zehnjährigen Geschichte der Indikatoren ist es erstaunlich, dass bei der Umsetzung in Stadterneuerung und Brachflächenrecycling noch vergleichsweise geringe praktische Erfahrungen vorliegen. Bei der Vorbereitung zur Pilotanwendung in Stuttgart stellte sich heraus, dass der Planung zwar Ziele der nachhaltigen Entwicklung zugrunde liegen, diese aber nicht explizit benannt wurden. Gegen die weiterge-

hende Konkretisierung als „Indikatoren“ melden die Praktiker Vorbehalte an, da sie eine zu starre Übertragung der konkreten Ziele auf den Einzelfall und damit verbundene zusätzliche Investitionshemmnisse befürchten.

Insbesondere der Hang zur Perfektionierung kann zu übergroßen Indikatorensets führen, die der Aufgabe, eine Entwicklung durch Reduzierung auf die wesentlichen Faktoren transparent zu machen, zuwider laufen. Auch ist fraglich, ob die Gewichtung unterschiedlicher Ziele bzw. Indikatoren zweckmäßig und hilfreich ist.

Der regelmäßige Einsatz von Zielen und/oder Indikatoren für nachhaltige Entwicklung bei der Stadtplanung und Stadtentwicklung ist ein erstrebenswertes Ziel. Allein schon die Diskussion über Nachhaltigkeitsziele und Indikatoren führt zu einer besseren Einbeziehung des Aspektes der „Nachhaltigkeit“ in Stadtplanung und Stadtentwicklung. Das erreichte Maß der Nachhaltigkeit einer Planung wird transparent und öffentlich, eine Überprüfung der Zielerreichung möglich und ein Wettbewerb um die größtmögliche Nachhaltigkeit von Stadtentwicklungsmaßnahmen setzt ein. Indikatoren als wichtige Instrumente der Information der Öffentlichkeit werden bei der Stadtplanung und Stadtentwicklung, auch im Sinne eines verbesserten Umweltschutzes, bisher viel zu selten eingesetzt.

## 22.6 Literatur, Quellen

- [1] BLUM, WINFRIED E.H.: Indikatoren als Brücke zwischen Wissenschaft und Politik – aus globaler und europäischer Sicht. In Blum/Kaemmere/Stock: Neue Wege zu nachhaltiger Bodennutzung. Erich Schmidt Verlag, 2002.
- [2] BIRKMANN, Jörn: Monitoring und Controlling einer nachhaltigen Raumentwicklung. Dortmunder Verlag für Bau- und Planungsliteratur, 2004.
- [3] UN (1987): Brundtland-Report der Weltkommission für Umwelt und Entwicklung
- [4] FINKE, LOTHAR: Bodenindikatoren für eine nachhaltige Siedlungsentwicklung. In Blum/Kaemmere/Stock: Neue Wege zu nachhaltiger Bodennutzung. Erich Schmidt Verlag, 2002.
- [5] MONTANARELLA, LUCA: Indikatoren für nachhaltige Nutzung. In Blum/Kaemmere/Stock: Neue Wege zu nachhaltiger Bodennutzung. Erich Schmidt Verlag, 2002.
- [6] UN DEPARTMENT OF ECONOMIC AND SOCIAL AFFAIRS (1998): Back-ground Paper 18 Status Report on the Implementation of the CSD Work Programme on Indicators of Sustainable Development“. ([www.un.org](http://www.un.org))
- [7] UN DIVISION FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT (1995): Indicators of Sustainable Development: Guidelines and Methodologies. ([www.un.org](http://www.un.org))
- [8] [www.staedte-der-zukunft.de](http://www.staedte-der-zukunft.de)

- [9] LANDESHAUPTSTADT STUTTGART (2001): Forschungsfeld „Städte der Zukunft“ – Indikatoren für die nachhaltige Stadtentwicklung. Zwischenbericht 2001. Gemeinderatsdrucksache 914/2001 vom 19.09.2001 mit Anlage.
- [10] [www.sustainability-checklist.co.uk](http://www.sustainability-checklist.co.uk)
- [11] GLÖCKNER, SUSANNE u.a.: Ziele und Instrumente für ein nachhaltiges Flächenrecycling. Handbuch der Altlastensanierung, 40. Aktualisierung, 3. Aufl., Sept. 2004
- [12] EDWARDS, DAVID u.a.: Best Practice Guidance for Sustainable Brownfield Re-generation. (RESCUE-Abschlussbericht). Land Quality Press, ISBN 0-9547474-0-2, Mai 2005.
- [13] BIRKMANN, Jörn: Vom Monitoring zum Controlling. In BBR &ARL (Hg.): Raumforschung und Raumentwicklung, Heft 5 / 2003 / 61. Jahrgang, S. 357 – 370. 2003.
- [14] [www.nweurope.org](http://www.nweurope.org)
- [15] LANDESHAUPTSTADT STUTTGART (2003): EU-Projekt REVIT (Towards More Effective and Sustainable Brownfield Revitalisation Policies – Effektive und nachhaltige Instrumente für die Revitalisierung von Brachflächen). Gemeinderatsdrucksache 412/2003 vom 29.10.2003
- [16] [www.revital-nweurope.org](http://www.revital-nweurope.org)
- [17] LANDESHAUPTSTADT STUTTGART (2001): Flächennutzungsplan Stuttgart 2010, Stand 27.01.2001. Bezug von Plan, Text und Erläuterungsbericht in 2. Auflage 2004 beim Amt für Stadtplanung und Stadterneuerung.
- [18] LANDESHAUPTSTADT STUTTGART (2005): „Rahmenplan Mercedesstraße“ Stuttgart- Bad Cannstatt. Gemeinderatsdrucksache 336/2005 vom 21.04.2005.

---

## **NACHRUF FÜR PRIVATDOZENT DR.-ING. BALDUR BARZCEWSKI**

Wissenschaftlicher Leiter von VEGAS 1995 bis 2005

Am 7. Juli 2005 verstarb Dr.-Ing. Baldur Barczewski, Privatdozent an der Universität Stuttgart und Wissenschaftlicher Leiter der Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung VEGAS am Institut für Wasserbau, im Alter von 62 Jahren an den Folgen einer schweren Krebsoperation. Die Fachwelt verliert mit ihm einen international anerkannten, hoch motivierten und kreativen Wissenschaftler, und das Stuttgarter Institut für Wasserbau trauert um einen allseits beliebten, hochgeschätzten Kollegen und langjährigen engagierten Mitarbeiter.

Baldur Barczewski wurde am 25.2.1943 in Gehlenburg/Ostpreußen geboren und ist in Haueneberstein im Nordschwarzwald aufgewachsen. Er studierte 1962 bis 1968 Physik an der Technischen Universität Karlsruhe und war danach 3 Jahre in einer Firma im Bereich der Messtechnikentwicklung für Fragen der Materialprüfung und Kontrollmessungen zur Luftverschmutzung tätig. 1972 kehrte er an die Universität Karlsruhe zurück und nahm eine wissenschaftliche Tätigkeit am Institut für Hydromechanik in der Fakultät Bauingenieur- und Vermessungswesen auf, wo er sich mit Fragestellungen der Strömungsmesstechnik befasste. Seine Forschungsarbeiten resultierten 1978 in seiner Promotion über die „Entwicklung neuer Messverfahren für Wasser- Luftgemische und deren Anwendung auf zweiphasige Auftriebsstrahlen“, die er mit Auszeichnung absolvierte. Hierfür wurde ihm 1980 der Ehrensator Huber Preis der Universität Karlsruhe verliehen.

Zu Beginn des Jahres 1979 wechselte er zum Institut für Wasserbau der Universität Stuttgart, wo er die Leitung der Arbeitsgruppe Messtechnik und Elektronik übernahm. Hier hat er den Bereich der Feldmessungen an natürlichen Gewässern vorangetrieben und ausgebaut sowie auch an zahlreichen wasserbaulichen Modellversuchen mitgewirkt. Seine Forschungsaktivitäten galten dabei insbesondere der Entwicklung innovativer Konzentrationsmessverfahren für Mehrphasenströmungen und für turbulente Strömungen mit hoher zeitlicher Auflösung, wobei er optische Sensoren und neue elektronische Steuerungs- und Datenerfassungskomponenten eingesetzt und zu voll entwickelten Messinstrumenten integriert hat.

Anfang der 80er Jahre wurde die große Problematik der Belastung des Grundwassers durch Schadensfälle und Altlasten mit ihren Langzeitfolgen für die Wasserwirtschaft und die Trinkwasserversorgung deutlich. Im Hinblick auf die sichtbar werdende Dimen-

---

sion des Problems hat sich am Stuttgarter Institut für Wasserbau der Themenbereich Grundwasserschutz und Grundwasserüberwachung, Schadstoffeintrag und -ausbreitung sowie konsequenter Weise Erkundungs- und Sanierungsmassnahmen als neuer Forschungsschwerpunkt entwickelt. Im Zuge dieser neuen Herausforderungen hat Baldur Barczewski sich konsequent den messtechnischen Fragen der Strömungs- und Konzentrationsmessung in Grundwasserleitern und im natürlichen Untergrund zugewandt und damit frühzeitig ein messtechnisch sehr anspruchsvolles Aufgabengebiet erschlossen. Seine innovativen Ideen, Entwicklungen und Erfindungen haben die Grundwassermesstechnik in den letzten 20 Jahren wesentlich vorangebracht und haben national und international hohe Anerkennung gefunden. Er war in den einschlägigen Fachgremien von Anfang an maßgeblich tätig und hatte im Hauptausschuss Gewässer und Böden der DWA den Vorsitz der Arbeitsgruppe GB-8.6 „Grundwassermessungen“ inne. International war er in der IAHR viele Jahre als deutscher Vertreter im Ausschuss „Hydraulic Instrumentation“ tätig.

Mitte der 80er Jahre hat er bei der Konzeption für ein fachübergreifendes, anwendungsorientiertes Entwicklungsprogramm zu den immer wichtiger werdenden Problemen der Altlastensanierung maßgeblich mitgewirkt. Als das bundesweite Forschungszentrum „Versuchseinrichtung zur Grundwasser - und Altlastensanierung (VEGAS)“ im Jahr 1995 in Betrieb ging, übernahm er als wissenschaftlicher Leiter gemeinsam mit dem Technischen Leiter Dr. Koschitzky die Führungsrolle. Neben seinen eigenen wissenschaftlichen Arbeiten stellte er sich damit auch der übergeordneten Aufgabe, das VEGAS-Forschungs- und Entwicklungsprogramm zu koordinieren und die schwierige Umsetzung der wissenschaftlichen Erkenntnisse in die wasserwirtschaftliche Praxis über Pilotprojekte und Fallstudien in Zusammenarbeit mit der Wasserwirtschaftsverwaltung und der Industrie voranzubringen. Er war einer der Initiatoren und langjähriges Vorstandsmitglied im „altlastenforum Baden-Württemberg e.V.“, wirkte im Arbeitskreis „Fiskalischer Bodenschutz“ mit, gehörte dem Lenkungsausschuss „Flächenressourcenmanagement“ an und hat den „fortbildungsverbund boden und altlasten Baden-Württemberg“ maßgeblich mitgestaltet. Darüber hinaus gehörte er mehreren Gutachtergremien des Bundes und des Landes Baden-Württemberg an und war Gründungsmitglied der „Bundesvereinigung Boden und Altlasten e.V.“.

Baldur Barczewski war ein engagierter, dynamischer und ideenreicher Wissenschaftler, der sowohl übergeordnete Themen für VEGAS vorangebracht als auch seine eigenen Forschungsideen aktiv weiterverfolgt hat. Mit dem Arbeitskreis FIGURA hat er die Diskussion um die Einbindung der Sanierungstechnologien in die generelle Thematik der Wiedernutzung industrieller Brachflächen, die Betrachtung von Gesamtbilanzen für Sanierungsmassnahmen und ein nachhaltiges Flächenressourcenmanagement angestoßen. Gleichzeitig hat er sich in VEGAS mit der Entwicklung neuer In-situ-

---

Sanierungstechnologien befasst. Ganz besonders lag ihm die Weiterentwicklung der Untergrunderkundung am Herzen, wo mit Lichtleitermesstechnik, sensorbasierten Systemen und mit Verfahren der Vor-Ort-Analytik wichtige neue Akzente gesetzt wurden.

Seine wissenschaftlichen Arbeiten fanden ihren Niederschlag in 85 Publikationen und mehr als 100 wissenschaftlichen Berichten des Instituts für Wasserbau. Im Jahr 2003 hat er sich an der Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften für das Fachgebiet „Umweltmesstechnik“ habilitiert.

Im Lauf seiner langjährigen Tätigkeit hat er eine große Zahl von wissenschaftlichen Mitarbeitern, Doktoranden und studentischen Hilfskräften betreut. In der Lehre hat er Vorlesungen, Labor - und Feldpraktika zur Umweltmesstechnik in den Diplomstudiengängen Bauingenieurwesen und Umweltschutztechnik sowie in dem internationalen Mastersprogramm „Water Resources Engineering and Management (WAREM)“ abgehalten. Sein profundes und sehr breites Fachwissen, sein Organisationstalent und seine aufgeschlossene, stets hilfsbereite Art wurden von Kollegen, Mitarbeitern und Studenten allseits sehr geschätzt.

Der Tod hat Baldur Barczewski allzu früh aus einem arbeitsreichen, aktiven Berufsleben gerissen. Im September wird das Forschungszentrum VEGAS sein 10jähriges Jubiläum feiern - eine Erfolgsgeschichte, die er maßgeblich mitgestaltet hat. Er hinterlässt eine große und schmerzliche Lücke, die zu schließen eine große Herausforderung darstellt. Wir haben einen hochgeschätzten Kollegen und Freund verloren, dem wir immer ein ehrendes Andenken bewahren werden.

Helmut Kobus