



Abschlussbericht der BMBF-Forschungsvorhaben 02WT0188 - 0191

BMBF-PROJEKTVERBUND

Anwendung von Mikroemulsionen zur in-situ-Sanierung organischer Untergrundkontaminationen

PROJEKT 1 02WT0188	Weiterentwicklung / Optimierung der Mikroemulsionseigenschaften bezüglich Schadstoffabtrennung, Rückgewinnbarkeit und biologischen Abbaus Forschungszentrum Jülich GmbH
Projekt 2 02WT0190	Biologischer Abbau verbleibender Restkomponenten im Grundwasser nach erfolgter Sanierung DVGW-Technologiezentrum Wasser, Karlsruhe
Projekt 3 02WT0191	Durchführung von Feldversuchen zum Scale up der Labor- und Technikumsversuche IBL Umwelt- und Biotechnik GmbH, Heidelberg
Projekt 4 02WT0189	Großskalige Untersuchungen zur Entwicklung und Optimierung von hydraulischen Sanierungsverfahren unter Einsatz von Mikroemulsionen - VEGAS - Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart

Koordination: Forschungszentrum Jülich GmbH
Dr.-Ing. Günter Subklew



BMBF-PROJEKTVERBUND

**Anwendung von Mikroemulsionen
zur in-situ-Sanierung organischer Untergrundkontaminationen**

Abschlussbericht

Teilprojekt Forschungsnehmer	Titel	Förderkennzeichen	Laufzeit
1 Forschungszentrum Jülich	Weiterentwicklung / Optimierung der Mikroemulsionseigenschaften bezüglich Schadstoffabtrennung, Rückgewinnbarkeit und biologischen Abbaus	02WT0188	01.06.2001 bis 30.09.2004
2 DVGW-Technologiezentrum Wasser, Karlsruhe	Biologischer Abbau verbleibender Restkomponenten im Grundwasser nach erfolgter Sanierung	02WT0190	01.06.2001 bis 31.12.2004
3 IBL Umwelt- und Biotechnik GmbH, Heidelberg	Durchführung von Feldversuchen zum Scale up der Labor- und Technikumsversuche	02WT0191	01.06.2001 bis 31.12.2004
4 - VEGAS - Institut für Wasserbau Universität Stuttgart	Großskalige Untersuchungen zur Entwicklung und Optimierung von hydraulischen Sanierungsverfahren unter Einsatz von Mikroemulsionen	02WT0189	01.06.2001 bis 31.05.2005

Teilprojekt Forschungsnehmer	Projektbearbeitung
1 Forschungszentrum Jülich	Dr. G. Subklew, Dr. J. Groeneweg, Dr. J. Ulrich, Dr. F.-H. Haegel, R. Flucht, L. Fürst, K. Heinen, A. Höltkemeier, L. Poschen, T. Joel
2 DVGW-Technologiezentrum Wasser, Karlsruhe	Dr. A. Tiehm, H. Schell, Dr. M. Stieber, S. Kraßnitzer, A. Müller, D. Schäfer
3 IBL Umwelt- und Biotechnik GmbH, Heidelberg	E. Kohlmeier, F. Seitz, Dr. Thilo Schenk, Dr. Anja Greiner, M. Dercq, C. Strunk
4 - VEGAS - Institut für Wasserbau Universität Stuttgart	Dr. B. Barczewski [†] , Dr. M. Stuhmann, B. Memminger, G. Bisch, N. Fütterer, E. Patzelt, G. Tkachenko, R. Philippin

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart Abschlußbericht	
3a. Titel des Berichts Projektverbund "Anwendung von Mikroemulsionen zur in-situ-Sanierung organischer Untergrundkontaminationen" Teilprojekt 1: Weiterentwicklung / Optimierung der Mikroemulsionseigenschaften bezüglich Schadstoffabtrennung, Rückgewinnbarkeit und biologischen Abbaus		
3b. Titel der Publikation		
4a. Autoren des Berichts (Name, Vorname(n)): Dr. Günter Subklew, Dr. Joost Groeneweg, Dr. Julia Ulrich, Dr. Franz-Hubert Haegel, Reinhold Flucht, Leander Fürst, Katja Heinen, Agnes Höltkemeier, Lothar Poschen, Thomas Joel		5. Abschlussdatum des Vorhabens 30.09.2004 / 31.05.2005 (Verbund)
4b. Autoren der Publikation (Name, Vorname(n))		6. Veröffentlichungsdatum
		7. Form der Publikation
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Teilprojekt 1: Institut für Chemie und Dynamik der Geosphäre Forschungszentrum Jülich GmbH D-52425 Jülich		9. Ber. Nr. Durchführende Institution
		10. Förderkennzeichen *) 02WT0188
		11a. Seitenzahl Bericht 106
		11b. Seitenzahl Publikation
		12. Literaturangaben 27
13. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn		14. Tabellen 39
		15. Abbildungen 52
		16. Zusätzliche Angaben
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) Projektträger Karlsruhe, Bereich Wassertechnologie und Entsorgung, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen, Juli 2005		
18. Kurzfassung In den Versuchen des Projektverbundes zur Anwendung von Mikroemulsionen (Bestandteile: anionisches und nichtionisches Tensid, Rapsmethylester (RME), Salzlösung, Wasser) bei der Schadstoffsolubilisierung und -extraktion aus den mit Tetrachlorethen (Perchloroethylen, PER) belasteten Bereichen der gesättigten Zone im Untergrund erwies sich die Mikroemulsionen im Labor- und Technikumsmaßstab als sehr gut geeignet für diese Aufgabenstellung. Da das Fließverhalten der Mikroemulsion und die Prozesse der Schadstoffaufnahme im Maßstab von mehreren Kubikmetern wegen der dort verstärkten Dispersion der Mikroemulsion nur bedingt mit Ergebnissen aus kleinskaligen Versuchen vergleichbar sind, ergab sich zunächst im Feldexperiment auf Grund der knapp bemessenen Menge an Mikroemulsion ein nicht ausreichender Austrag an Schadstoff und Mikroemulsionskomponenten. Die so gewonnenen entscheidenden Hinweise auf das Fließverhalten der Mikroemulsion und auf die Schadstoffaufnahme im Untergrund resultierten in dem erfolgreiche Gelingen eines großskaligen Versuchs im Technikum, bei dem weit über 90 % des Schadstoffs PER aus einem künstlichen Grundwasserleiter entfernt wurden. Die Ergebnisse belegen weiterhin allen Experimenten die gute Abbaubarkeit des RME und des nichtionischen Tensids. Der Abbau des anionischen Tensids ging bei aeroben Bedingungen deutlich über einen Primärabbau hinaus. Der co-metabolische Abbau von PER in Gegenwart von Mikroemulsionskomponenten konnte belegt werden. Eine Störung der Schadstoffextraktion durch mikrobiologische Prozesse wurde in keinem Experiment beobachtet. Damit ist nach erfolgter Extraktion eine komplette Sanierung durch eine biologische Nachbehandlung möglich. Die zur Aufbereitung der Spüllösung und zur Rückgewinnung der Mikroemulsionskomponenten ausgearbeiteten Verfahrensweisen erfordern einen nur verhältnismäßig geringen Aufwand. Im Rahmen des Feldexperiments wurden weiterhin die notwendigen Techniken zur Herstellung, Qualitätskontrolle, Lagerung, Handhabung und Infiltration der Mikroemulsion unter Standortbedingung entwickelt und erfolgreich getestet. Insgesamt konnte der Nachweis geführt werden, dass sich das Verfahren von der Herstellung bis zur Rückgewinnung der Mikroemulsion auch im großskaligen Maßstab grundsätzlich erfolgreich durchführen lässt.		
19. Schlagwörter Bodensanierung, Grundwasserleiter, gesättigte Zone, in situ-Sanierung, DNAPL, Tetrachlorethen, Perchloroethylen, PER, Mikroemulsion, Tensid, Rapsmethylester, hydraulische Verfahren, Felduntersuchung, Mikrobiologie, mikrobieller Abbau, aerob, anaerob		
20. Verlag	21. Preis	

*) Auf das Förderkennzeichen des BMBF soll auch in der Veröffentlichung hingewiesen werden.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart Abschlußbericht	
3a. Titel des Berichts Projektverbund "Anwendung von Mikroemulsionen zur in-situ-Sanierung organischer Untergrundkontaminationen" Teilprojekt 2: Biologischer Abbau verbleibender Restkomponenten im Grundwasser nach erfolgter Sanierung		
3b. Titel der Publikation		
4a. Autoren des Berichts (Name, Vorname(n)): Dr. Andreas Tiehm, Heico Schell, Dr. Michael Stieber, Silke Kraßnitzer, Axel Müller, Daniel Schäfer		5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.12.2004 / 31.05.2005 (Verbund)
4b. Autoren der Publikation (Name, Vorname(n))		6. Veröffentlichungsdatum
		7. Form der Publikation
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Teilprojekt 2: DVGW – Technologiezentrum Wasser Karlsruher Straße 84 D-76139 Karlsruhe		9. Ber. Nr. Durchführende Institution
		10. Förderkennzeichen *) 02WT0190
		11a. Seitenzahl Bericht 78
		11b. Seitenzahl Publikation
13. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn		12. Literaturangaben 30
		14. Tabellen 13
		15. Abbildungen 41
16. Zusätzliche Angaben		
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) Projekträger Karlsruhe, Bereich Wassertechnologie und Entsorgung, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen, Juli 2005		
18. Kurzfassung In den Versuchen des Projektverbundes zur Anwendung von Mikroemulsionen (Bestandteile: anionisches und nichtionisches Tensid, Rapsmethylester (RME), Salzlösung, Wasser) bei der Schadstoffsolubilisierung und -extraktion aus den mit Tetrachlorethen (Perchlorethylen, PER) belasteten Bereichen der gesättigten Zone im Untergrund erwies sich die Mikroemulsionen im Labor- und Technikumsmaßstab als sehr gut geeignet für diese Aufgabenstellung. Da das Fließverhalten der Mikroemulsion und die Prozesse der Schadstoffaufnahme im Maßstab von mehreren Kubikmetern wegen der dort verstärkten Dispersion der Mikroemulsion nur bedingt mit Ergebnissen aus kleinskaligen Versuchen vergleichbar sind, ergab sich zunächst im Feldexperiment auf Grund der knapp bemessenen Menge an Mikroemulsion ein nicht ausreichender Austrag an Schadstoff und Mikroemulsionskomponenten. Die so gewonnenen entscheidenden Hinweise auf das Fließverhalten der Mikroemulsion und auf die Schadstoffaufnahme im Untergrund resultierten in dem erfolgreiche Gelingen eines großskaligen Versuchs im Technikum, bei dem weit über 90 % des Schadstoffs PER aus einem künstlichen Grundwasserleiter entfernt wurden. Die Ergebnisse belegen weiterhin allen Experimenten die gute Abbaubarkeit des RME und des nichtionischen Tensids. Der Abbau des anionischen Tensids ging bei aeroben Bedingungen deutlich über einen Primärabbau hinaus. Der co-metabolische Abbau von PER in Gegenwart von Mikroemulsionskomponenten konnte belegt werden. Eine Störung der Schadstoffextraktion durch mikrobiologische Prozesse wurde in keinem Experiment beobachtet. Damit ist nach erfolgter Extraktion eine komplette Sanierung durch eine biologische Nachbehandlung möglich. Die zur Aufbereitung der Spüllösung und zur Rückgewinnung der Mikroemulsionskomponenten ausgearbeiteten Verfahrensweisen erfordern einen nur verhältnismäßig geringen Aufwand. Im Rahmen des Feldexperiments wurden weiterhin die notwendigen Techniken zur Herstellung, Qualitätskontrolle, Lagerung, Handhabung und Infiltration der Mikroemulsion unter Standortbedingung entwickelt und erfolgreich getestet. Insgesamt konnte der Nachweis geführt werden, dass sich das Verfahren von der Herstellung bis zur Rückgewinnung der Mikroemulsion auch im großskaligen Maßstab grundsätzlich erfolgreich durchführen lässt.		
19. Schlagwörter Bodensanierung, Grundwasserleiter, gesättigte Zone, in situ-Sanierung, DNAPL, Tetrachlorethen, Perchlorethylen, PER, Mikroemulsion, Tensid, Rapsmethylester, hydraulische Verfahren, Felduntersuchung, Mikrobiologie, mikrobieller Abbau, aerob, anaerob		
20. Verlag	21. Preis	

*) Auf das Förderkennzeichen des BMBF soll auch in der Veröffentlichung hingewiesen werden.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart Abschlußbericht
3a. Titel des Berichts Projektverbund "Anwendung von Mikroemulsionen zur in-situ-Sanierung organischer Untergrundkontaminationen" Teilprojekt 3: Durchführung von Feldversuchen zum Scale up der Labor- und Technikumsversuche	
3b. Titel der Publikation	
4a. Autoren des Berichts (Name, Vorname(n)): Eberhard Kohlmeier, Frank Seitz, Dr. Thilo Schenk, Dr. Anja Greiner, Michael Dercq, Carolin Strunk	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.12.2004 / 31.05.2005 (Verbund)
4b. Autoren der Publikation (Name, Vorname(n))	6. Veröffentlichungsdatum
	7. Form der Publikation
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Teilprojekt 3: IBL Umwelt- und Biotechnik GmbH Technologiepark – UmweltPark Wieblinger Weg 21 D-69123 Heidelberg	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen *) 02WT0191
	11a. Seitenzahl Bericht 127
	11b. Seitenzahl Publikation
13. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	12. Literaturangaben 27
	14. Tabellen 21
	15. Abbildungen 62
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) Projekträger Karlsruhe, Bereich Wassertechnologie und Entsorgung, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen, Juli 2005	
18. Kurzfassung In den Versuchen des Projektverbundes zur Anwendung von Mikroemulsionen (Bestandteile: anionisches und nichtionisches Tensid, Rapsmethylester (RME), Salzlösung, Wasser) bei der Schadstoffsolubilisierung und -extraktion aus den mit Tetrachlorethen (Perchlorethylen, PER) belasteten Bereichen der gesättigten Zone im Untergrund erwies sich die Mikroemulsionen im Labor- und Technikumsmaßstab als sehr gut geeignet für diese Aufgabenstellung. Da das Fließverhalten der Mikroemulsion und die Prozesse der Schadstoffaufnahme im Maßstab von mehreren Kubikmetern wegen der dort verstärkten Dispersion der Mikroemulsion nur bedingt mit Ergebnissen aus kleinskaligen Versuchen vergleichbar sind, ergab sich zunächst im Feldexperiment auf Grund der knapp bemessenen Menge an Mikroemulsion ein nicht ausreichender Austrag an Schadstoff und Mikroemulsionskomponenten. Die so gewonnenen entscheidenden Hinweise auf das Fließverhalten der Mikroemulsion und auf die Schadstoffaufnahme im Untergrund resultierten in dem erfolgreiche Gelingen eines großskaligen Versuchs im Technikum, bei dem weit über 90 % des Schadstoffs PER aus einem künstlichen Grundwasserleiter entfernt wurden. Die Ergebnisse belegen weiterhin allen Experimenten die gute Abbaubarkeit des RME und des nichtionischen Tensids. Der Abbau des anionischen Tensids ging bei aeroben Bedingungen deutlich über einen Primärabbau hinaus. Der co-metabolische Abbau von PER in Gegenwart von Mikroemulsionskomponenten konnte belegt werden. Eine Störung der Schadstoffextraktion durch mikrobiologische Prozesse wurde in keinem Experiment beobachtet. Damit ist nach erfolgter Extraktion eine komplette Sanierung durch eine biologische Nachbehandlung möglich. Die zur Aufbereitung der Spüllösung und zur Rückgewinnung der Mikroemulsionskomponenten ausgearbeiteten Verfahrensweisen erfordern einen nur verhältnismäßig geringen Aufwand. Im Rahmen des Feldexperiments wurden weiterhin die notwendigen Techniken zur Herstellung, Qualitätskontrolle, Lagerung, Handhabung und Infiltration der Mikroemulsion unter Standortbedingung entwickelt und erfolgreich getestet. Insgesamt konnte der Nachweis geführt werden, dass sich das Verfahren von der Herstellung bis zur Rückgewinnung der Mikroemulsion auch im großskaligen Maßstab grundsätzlich erfolgreich durchführen lässt.	
19. Schlagwörter Bodensanierung, Grundwasserleiter, gesättigte Zone, in situ-Sanierung, DNAPL, Tetrachlorethen, Perchlorethylen, PER, Mikroemulsion, Tensid, Rapsmethylester, hydraulische Verfahren, Felduntersuchung, Mikrobiologie, mikrobieller Abbau, aerob, anaerob	
20. Verlag	21. Preis

*) Auf das Förderkennzeichen des BMBF soll auch in der Veröffentlichung hingewiesen werden.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart Abschlußbericht
3a. Titel des Berichts Projektverbund "Anwendung von Mikroemulsionen zur in-situ-Sanierung organischer Untergrundkontaminationen" Teilprojekt 4: Großskalige Untersuchungen zur Entwicklung und Optimierung von hydraulischen Sanierungsverfahren unter Einsatz von Mikroemulsionen	
3b. Titel der Publikation	
4a. Autoren des Berichts (Name, Vorname(n)): Dr. Baldur Barczewski^{*)}, Dr. Matthias Stuhmann, Birgit Memminger, G. Bisch, Nadine Fütterer, Eileen Patzelt, Genia Tkachenko, Ralf Philippin	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.05.2005 / 31.05.2005 (Verbund)
4b. Autoren der Publikation (Name, Vorname(n))	6. Veröffentlichungsdatum
	7. Form der Publikation
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Teilprojekt 4: Institut für Wasserbau Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung Universität Stuttgart Pfaffenwaldring 61 D-70550 Stuttgart	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen ^{*)} 02WT0189
	11a. Seitenzahl Bericht 97
	11b. Seitenzahl Publikation
	12. Literaturangaben 29
13. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	14. Tabellen 14
	15. Abbildungen 53
	16. Zusätzliche Angaben
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) Projekträger Karlsruhe, Bereich Wassertechnologie und Entsorgung, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen, Juli 2005	
18. Kurzfassung In den Versuchen des Projektverbundes zur Anwendung von Mikroemulsionen (Bestandteile: anionisches und nichtionisches Tensid, Rapsmethylester (RME), Salzlösung, Wasser) bei der Schadstoffsolubilisierung und -extraktion aus den mit Tetrachlorethen (Perchlorethylen, PER) belasteten Bereichen der gesättigten Zone im Untergrund erwies sich die Mikroemulsionen im Labor- und Technikumsmaßstab als sehr gut geeignet für diese Aufgabenstellung. Da das Fließverhalten der Mikroemulsion und die Prozesse der Schadstoffaufnahme im Maßstab von mehreren Kubikmetern wegen der dort verstärkten Dispersion der Mikroemulsion nur bedingt mit Ergebnissen aus kleinskaligen Versuchen vergleichbar sind, ergab sich zunächst im Feldexperiment auf Grund der knapp bemessenen Menge an Mikroemulsion ein nicht ausreichender Austrag an Schadstoff und Mikroemulsionskomponenten. Die so gewonnenen entscheidenden Hinweise auf das Fließverhalten der Mikroemulsion und auf die Schadstoffaufnahme im Untergrund resultierten in dem erfolgreiche Gelingen eines großskaligen Versuchs im Technikum, bei dem weit über 90 % des Schadstoffs PER aus einem künstlichen Grundwasserleiter entfernt wurden. Die Ergebnisse belegen weiterhin allen Experimenten die gute Abbaubarkeit des RME und des nichtionischen Tensids. Der Abbau des anionischen Tensids ging bei aeroben Bedingungen deutlich über einen Primärabbau hinaus. Der co-metabolische Abbau von PER in Gegenwart von Mikroemulsionskomponenten konnte belegt werden. Eine Störung der Schadstoffextraktion durch mikrobiologische Prozesse wurde in keinem Experiment beobachtet. Damit ist nach erfolgter Extraktion eine komplette Sanierung durch eine biologische Nachbehandlung möglich. Die zur Aufbereitung der Spüllösung und zur Rückgewinnung der Mikroemulsionskomponenten ausgearbeiteten Verfahrensweisen erfordern einen nur verhältnismäßig geringen Aufwand. Im Rahmen des Feldexperiments wurden weiterhin die notwendigen Techniken zur Herstellung, Qualitätskontrolle, Lagerung, Handhabung und Infiltration der Mikroemulsion unter Standortbedingung entwickelt und erfolgreich getestet. Insgesamt konnte der Nachweis geführt werden, dass sich das Verfahren von der Herstellung bis zur Rückgewinnung der Mikroemulsion auch im großskaligen Maßstab grundsätzlich erfolgreich durchführen lässt.	
19. Schlagwörter Bodensanierung, Grundwasserleiter, gesättigte Zone, in situ-Sanierung, DNAPL, Tetrachlorethen, Perchlorethylen, PER, Mikroemulsion, Tensid, Rapsmethylester, hydraulische Verfahren, Felduntersuchung, Mikrobiologie, mikrobieller Abbau, aerob, anaerob	
20. Verlag	21. Preis

^{*)} Auf das Förderkennzeichen des BMBF soll auch in der Veröffentlichung hingewiesen werden.

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. Type of Report Final report	
3a. Report Title Project network "Application of microemulsion at the in situ remediation of organic underground contamination" Project 1: Further development / optimization of properties of microemulsion under the aspect of contaminant separation, recovery and microbial degradation.		
3b. Title of Publication		
4a. Author(s) of the Report (Family Name, First Name(s)) Dr Günter Subklew, Dr Joost Groeneweg, Dr Julia Ulrich, Dr Franz-Hubert Haegel, Reinhold Flucht, Leander Fürst, Katja Heinen, Agnes Höltkemeier, Lothar Poschen, Thomas Joel		5. End of Project 30.09.2004 / 31.05.2005 (network)
4b. Author(s) of the Publication (Family Name, First Name(s))		6. Publication Date
8. Performing Organization(s) (Name, Address) Project 1: Institut für Chemie und Dynamik der Geosphäre Forschungszentrum Jülich GmbH D-52425 Jülich		7. Form of Publication
13. Sponsoring Agency (Name, Address) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn		9. Originator's Report No.
		10. Reference No. 02WT0188
		11a. No. of Pages Report 106
		11b. No. of Pages Publication
		12. No. of References 27
		14. No. of Tables 39
		15. No. of Figures 52
16. Supplementary Notes		
17. Presented at (Title, Place, Date) Projekträger Karlsruhe, Bereich Wassertechnologie und Entsorgung, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen, July 2005		
18. Abstract On different scales, from the range of the laboratory up to pilot plant station tests, the partners of the project network performed experiments, in which the microemulsion applied (anionic and non-ionic surfactant, rape oil methyl ester (RME), brine, water) showed a high solubilization and extraction capacity of Tetrachlorethen (Perchloroethylene, PER) present in the water saturated zone in the underground. There is only a limited comparability of the flow behaviour of the microemulsion and the uptake of pollutants at small-scale experiments with the results from experiments on the scale of several cubic meters. Because of the dispersion of the microemulsion intensified there, a not sufficient discharge of pollutant and microemulsion components resulted in the field experiment due to the scarcely measured quantity of microemulsion. The crucial clue to the flow behaviour of the microemulsion and to the pollutant admission in the underground resulted in a successful large-scale experiment, with which more than 90 % of the pollutant PER from an artificial groundwater aquifer were removed. Further the results of the experiments demonstrate the good degradability of RME and of the nonionic surfactant. Under aerobic conditions the anionic surfactant clearly showed more than only primary degradation. The co-metabolic degradation of RME in presence of microemulsion components could be shown. A disturbance of the pollutant extraction by micro-biological processes wasn't observed in any experiment. Thus a complete remediation of a contaminated site is possible by a biological subsequent treatment after extraction. The process steps for the treatment of the flushing solution and for the recovery of the microemulsion components require an only relatively small effort. In the context of the field experiment further the necessary techniques developed for the setting up, quality control, storage, handling and infiltration of the microemulsion were successfully tested under field conditions. Altogether it could be proven that in principle the whole process from making the microemulsion up to its regeneration can be performed successfully in a large scale.		
19. Keywords soil remediation, aquifer, saturated zone, in situ-remediation, DNAPL, Tetrachlorethen, Perchloroethylene, PER, microemulsion, surfactant, rape oil methyl ester, hydraulic process, field experiment, microbiology, microbial degradation, aerobic, anaerobic		
20. Publisher		21. Price

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. Type of Report Final report	
3a. Report Title Project network "Application of microemulsion at the in situ remediation of organic underground contamination" Project 2: Microbial degradation of remaining compounds in the ground water after remediation		
3b. Title of Publication		
4a. Author(s) of the Report (Family Name, First Name(s)) Dr Andreas Tiehm, Heico Schell, Dr Michael Stieber, Silke Kraßnitzer, Axel Müller, Daniel Schäfer		5. End of Project 31.12.2004 / 31.05.2005 (network)
4b. Author(s) of the Publication (Family Name, First Name(s))		6. Publication Date
8. Performing Organization(s) (Name, Address) Project 2: DVGW – Technologiezentrum Wasser Karlsruher Straße 84 D-76139 Karlsruhe		7. Form of Publication
13. Sponsoring Agency (Name, Address) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn		9. Originator's Report No.
		10. Reference No. 02WT0190
		11a. No. of Pages Report 78
		11b. No. of Pages Publication
		12. No. of References 30
		14. No. of Tables 13
		15. No. of Figures 41
16. Supplementary Notes		
17. Presented at (Title, Place, Date) Projekträger Karlsruhe, Bereich Wassertechnologie und Entsorgung, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen, July 2005		
18. Abstract On different scales, from the range of the laboratory up to pilot plant station tests, the partners of the project network performed experiments, in which the microemulsion applied (anionic and non-ionic surfactant, rape oil methyl ester (RME), brine, water) showed a high solubilization and extraction capacity of Tetrachlorethen (Perchloroethylene, PER) present in the water saturated zone in the underground. There is only a limited comparability of the flow behaviour of the microemulsion and the uptake of pollutants at small-scale experiments with the results from experiments on the scale of several cubic meters. Because of the dispersion of the microemulsion intensified there, a not sufficient discharge of pollutant and microemulsion components resulted in the field experiment due to the scarcely measured quantity of microemulsion. The crucial clue to the flow behaviour of the microemulsion and to the pollutant admission in the underground resulted in a successful large-scale experiment, with which more than 90 % of the pollutant PER from an artificial groundwater aquifer were removed. Further the results of the experiments demonstrate the good degradability of RME and of the nonionic surfactant. Under aerobic conditions the anionic surfactant clearly showed more than only primary degradation. The co-metabolic degradation of RME in presence of microemulsion components could be shown. A disturbance of the pollutant extraction by micro-biological processes wasn't observed in any experiment. Thus a complete remediation of a contaminated site is possible by a biological subsequent treatment after extraction. The process steps for the treatment of the flushing solution and for the recovery of the microemulsion components require an only relatively small effort. In the context of the field experiment further the necessary techniques developed for the setting up, quality control, storage, handling and infiltration of the microemulsion were successfully tested under field conditions. Altogether it could be proven that in principle the whole process from making the microemulsion up to its regeneration can be performed successfully in a large scale.		
19. Keywords soil remediation, aquifer, saturated zone, in situ-remediation, DNAPL, Tetrachlorethen, Perchloroethylene, PER, microemulsion, surfactant, rape oil methyl ester, hydraulic process, field experiment, microbiology, microbial degradation, aerobic, anaerobic		
20. Publisher		21. Price

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. Type of Report Final report	
3a. Report Title Project network "Application of microemulsion at the in situ remediation of organic underground contamination" Project 3: Performing field tests to scale up laboratory and pilot plant experiments		
3b. Title of Publication		
4a. Author(s) of the Report (Family Name, First Name(s)) Eberhard Kohlmeier, Frank Seitz, Dr Thilo Schenk, Dr Anja Greiner, Michael Dercq, Carolin Strunk		5. End of Project 31.12.2004 / 31.05.2005 (network)
4b. Author(s) of the Publication (Family Name, First Name(s))		6. Publication Date
8. Performing Organization(s) (Name, Address) Project 3: IBL Umwelt- und Biotechnik GmbH Technologiepark – UmweltPark Wieblinger Weg 21 D-69123 Heidelberg		7. Form of Publication
13. Sponsoring Agency (Name, Address) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn		9. Originator's Report No.
		10. Reference No. 02WT0191
		11a. No. of Pages Report 127
		11b. No. of Pages Publication
		12. No. of References 27
		14. No. of Tables 21
		15. No. of Figures 62
16. Supplementary Notes		
17. Presented at (Title, Place, Date) Projekträger Karlsruhe, Bereich Wassertechnologie und Entsorgung, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen, July 2005		
18. Abstract On different scales, from the range of the laboratory up to pilot plant station tests, the partners of the project network performed experiments, in which the microemulsion applied (anionic and non-ionic surfactant, rape oil methyl ester (RME), brine, water) showed a high solubilization and extraction capacity of Tetrachlorethen (Perchloroethylene, PER) present in the water saturated zone in the underground. There is only a limited comparability of the flow behaviour of the microemulsion and the uptake of pollutants at small-scale experiments with the results from experiments on the scale of several cubic meters. Because of the dispersion of the microemulsion intensified there, a not sufficient discharge of pollutant and microemulsion components resulted in the field experiment due to the scarcely measured quantity of microemulsion. The crucial clue to the flow behaviour of the microemulsion and to the pollutant admission in the underground resulted in a successful large-scale experiment, with which more than 90 % of the pollutant PER from an artificial groundwater aquifer were removed. Further the results of the experiments demonstrate the good degradability of RME and of the nonionic surfactant. Under aerobic conditions the anionic surfactant clearly showed more than only primary degradation. The co-metabolic degradation of RME in presence of microemulsion components could be shown. A disturbance of the pollutant extraction by micro-biological processes wasn't observed in any experiment. Thus a complete remediation of a contaminated site is possible by a biological subsequent treatment after extraction. The process steps for the treatment of the flushing solution and for the recovery of the microemulsion components require an only relatively small effort. In the context of the field experiment further the necessary techniques developed for the setting up, quality control, storage, handling and infiltration of the microemulsion were successfully tested under field conditions. Altogether it could be proven that in principle the whole process from making the microemulsion up to its regeneration can be performed successfully in a large scale.		
19. Keywords soil remediation, aquifer, saturated zone, in situ-remediation, DNAPL, Tetrachlorethen, Perchloroethylene, PER, microemulsion, surfactant, rape oil methyl ester, hydraulic process, field experiment, microbiology, microbial degradation, aerobic, anaerobic		
20. Publisher		21. Price

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. Type of Report Final report	
3a. Report Title Project network "Application of microemulsion at the in situ remediation of organic underground contamination" Project 4: Large-scale experiments for the development and the optimization of hydraulic remediation techniques using a microemulsion		
3b. Title of Publication		
4a. Author(s) of the Report (Family Name, First Name(s)) Dr Baldur Barczewski[†], Dr Matthias Stuhmann, Birgit Memminger, G. Bisch, Nadine Fütterer, Eileen Patzelt, Genia Tkachenko, Ralf Philippin		5. End of Project 31.05.2005 / 31.05.2005 (network)
4b. Author(s) of the Publication (Family Name, First Name(s))		6. Publication Date
8. Performing Organization(s) (Name, Address) Project 4: Institut für Wasserbau Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung Universität Stuttgart Pfaffenwaldring 61 D-70550 Stuttgart		7. Form of Publication
13. Sponsoring Agency (Name, Address) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn		9. Originator's Report No.
		10. Reference No. 02WT0189
		11a. No. of Pages Report 97
		11b. No. of Pages Publication
		12. No. of References 29
		14. No. of Tables 14
		15. No. of Figures 53
16. Supplementary Notes		
17. Presented at (Title, Place, Date) Projekträger Karlsruhe, Bereich Wassertechnologie und Entsorgung, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen, July 2005		
18. Abstract <p>On different scales, from the range of the laboratory up to pilot plant station tests, the partners of the project network performed experiments, in which the microemulsion applied (anionic and non-ionic surfactant, rape oil methyl ester (RME), brine, water) showed a high solubilization and extraction capacity of Tetrachlorethen (Perchloroethylene, PER) present in the water saturated zone in the underground.</p> <p>There is only a limited comparability of the flow behaviour of the microemulsion and the uptake of pollutants at small-scale experiments with the results from experiments on the scale of several cubic meters. Because of the dispersion of the microemulsion intensified there, a not sufficient discharge of pollutant and microemulsion components resulted in the field experiment due to the scarcely measured quantity of microemulsion. The crucial clue to the flow behaviour of the microemulsion and to the pollutant admission in the underground resulted in a successful large-scale experiment, with which more than 90 % of the pollutant PER from an artificial groundwater aquifer were removed.</p> <p>Further the results of the experiments demonstrate the good degradability of RME and of the nonionic surfactant. Under aerobic conditions the anionic surfactant clearly showed more than only primary degradation. The co-metabolic degradation of RME in presence of microemulsion components could be shown. A disturbance of the pollutant extraction by micro-biological processes wasn't observed in any experiment. Thus a complete remediation of a contaminated site is possible by a biological subsequent treatment after extraction.</p> <p>The process steps for the treatment of the flushing solution and for the recovery of the microemulsion components require an only relatively small effort. In the context of the field experiment further the necessary techniques developed for the setting up, quality control, storage, handling and infiltration of the microemulsion were successfully tested under field conditions. Altogether it could be proven that in principle the whole process from making the microemulsion up to its regeneration can be performed successfully in a large scale.</p>		
19. Keywords soil remediation, aquifer, saturated zone, in situ-remediation, DNAPL, Tetrachlorethen, Perchloroethylene, PER, microemulsion, surfactant, rape oil methyl ester, hydraulic process, field experiment, microbiology, microbial degradation, aerobic, anaerobic		
20. Publisher		21. Price

Inhalt.....	Seite
1 EINLEITUNG	2
1.1 Aufgabenstellung.....	2
1.1.1 Forschungszentrum Jülich.....	2
1.1.2 DVGW-Technologiezentrum Wasser, Karlsruhe	2
1.1.3 IBL Umwelt- und Biotechnik GmbH, Heidelberg.....	3
1.1.4 VEGAS – Institut für Wasserbau der Universität Stuttgart	3
1.1.5 Standort.....	3
1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde.....	4
1.2.1 Projektverbund	4
1.2.2 Forschungszentrum Jülich.....	4
1.2.3 DVGW-Technologiezentrum Wasser, Karlsruhe	4
1.2.4 IBL Umwelt- und Biotechnik GmbH, Heidelberg.....	4
1.2.5 VEGAS – Institut für Wasserbau der Universität Stuttgart	5
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens	6
1.3.1 Projektverbund	6
1.3.2 Forschungszentrum Jülich.....	6
1.3.3 DVGW-Technologiezentrum Wasser, Karlsruhe	7
1.3.4 IBL Umwelt- und Biotechnik GmbH, Heidelberg.....	7
1.3.5 VEGAS – Institut für Wasserbau der Universität Stuttgart	9
1.4 Stand der Wissenschaft und Technik vor Projektbeginn	9
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	16
2 EINGEHENDE DARSTELLUNG DES PROJEKTVERBUNDES	17
2.1 Ergebnisse	17
2.1.1 Zusammenfassende Bewertung der Ergebnisse.....	17
2.1.2 Forschungszentrum Jülich.....	20
2.1.3 DVGW-Technologiezentrum Wasser, Karlsruhe	20
2.1.4 IBL Umwelt- und Biotechnik GmbH, Heidelberg.....	20
2.1.5 VEGAS – Institut für Wasserbau der Universität Stuttgart	20
2.2 Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse	20
2.3 Fortschritt bei anderen Stellen	21
2.3.1 Sanierungsverfahren	21
2.3.2 Stand der Technik	21
2.3.3 Thermische Verfahren	21
2.3.4 Alkohol-Flushing	22
2.3.5 DMD-Verfahren	22
2.3.6 Mikroemulsionsbildung im Aquifer.....	23
2.3.7 Fortschritte zu anderen Fragestellungen.....	23
2.3.8 Biologische Nachsorge.....	24
2.4 Veröffentlichungen	27

Wir trauern um Herrn Dr. Baldur Barczewski

Als wir uns zuletzt am 13. Dezember 2004 nach einem langen Arbeitstag von unserem Kollegen Herrn Dr. Barczewski in Stuttgart verabschiedeten, konnte niemand ahnen, dass es kein Wiedersehen mehr geben würde. Auch wenn einige um die Schwere seiner Erkrankung wussten, beunruhigte uns die Ankündigung seines geplanten mehrwöchigen Krankenhausaufenthaltes nicht so sehr, als dass wir auch nur im Ansatz mit dem Schlimmsten gerechnet hätten.

Während der Fertigstellung dieses Abschlussberichtes erreichte uns die Nachricht von seinem Tode. Nach vielen Jahren einer engen und stets vertrauensvollen Zusammenarbeit haben wir jetzt für immer einen bewundernswert engagierten, umsichtigen und erfahrenen wissenschaftlichen Weggefährten verloren. Sein sachlich begründeter Optimismus wird uns stets als vorbildlich in Erinnerung bleiben.

Kurz vor seinem Tode sprach er am Telefon noch sehr zuversichtlich davon, bei dem zehnjährigen Jubiläum von VEGAS im September 2005 zumindest für eine kurze Zeit wieder dabei sein zu wollen. Dieser Wunsch ist ihm verwehrt geblieben.

Wir sind dankbar dafür, mit ihm eine Strecke des Lebens gemeinsam gegangen zu sein und werden stets mit großem Respekt an ihn denken.

Im Juli 2005

1 EINLEITUNG

1.1 Aufgabenstellung

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

Die grundlegenden Fragestellungen waren:

- Bestimmung von Eigenschaften und Fließverhalten der Mikroemulsionen;
- Optimierung der Mikroemulsionen durch Variation der Zusammensetzung;
- Abtrennung des extrahierten Schadstoffs und Rückgewinnung der Mikroemulsionsbestandteile nach einer Durchspülung des Untergrundes;
- Synthese eines neuen anionischen Tensides;
- Biologischer Abbau der im Boden verbleibenden organischen Restbestandteile der Mikroemulsion sowie von nicht entfernten Schadstoffen.

Zudem war die Durchführung zweier Feldexperimente am Modellstandort 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. Die Versuche sollten in Stahlsäulen durchgeführt werden, die für andere Sanierungsexperimente in den Boden der ehemaligen Deponie gerammt worden waren. Zwei dieser Säulen waren noch ungenutzt.

1.1.1 Forschungszentrum Jülich

Dem Forschungszentrum Jülich (FZJ) oblag dabei die Aufgabe, sein Wissen und seine Erfahrungen zum physikalisch-chemischen Verhalten von Mikroemulsionen sowie zur Analytik der Mikroemulsionskomponenten den Partnern zur Verfügung zu stellen und in Abstimmung mit diesen die Mikroemulsionen für die Anwendung zu optimieren. Dazu gehörten insbesondere Versuche zur Verringerung des Ölgehaltes der Mikroemulsionen und die Synthese eines neuen anionischen Tensids mit einem Potenzial zur verbesserten biologischen Abbaubarkeit. Ferner sollten in Jülich Grundlagenversuche zum Fließverhalten von Mikroemulsionen in Bodensäulen und zur Rückgewinnung der organischen Komponenten sowie zur Regeneration der Mikroemulsion durchgeführt werden.

In einer zweiten Arbeitsgruppe des FZJ waren Untersuchungen zum anaeroben und aeroben Abbau von Natrium-bis-(2-ethylhexyl)sulfosuccinat, dem Wirkstoff des anionischen Tensides Leophen RA, vorgesehen. Hierzu sollten auch Abbauprobeversuche mit radioaktiv markierten Verbindungen durchgeführt werden.

1.1.2 Technologiezentrum Wasser

Am Technologiezentrum Wasser in Karlsruhe sollten die Elutions- und Abbauprozesse der Mikroemulsionskomponenten näher untersucht werden, um Aussagen darüber zu gewinnen, ob eine mögliche Gefährdung des Grundwasserleiters durch die Infiltration und den Verbleib von Mikroemulsionskomponenten im Untergrund ausgeschlossen werden kann bzw. welche geeigneten Maßnahmen zur Stimulierung des biologischen Abbaus zu treffen sind. Zunächst

sollte unter unterschiedlichen Redoxbedingungen, wie sie in der gesättigten Bodenzone nach Infiltration der Mikroemulsion zu erwarten sind, die biologische Abbaubarkeit der Komponenten sowie die Toxizität der mit diesen in Kontakt gekommenen flüssigen Phase untersucht werden. Durch vergleichende Untersuchungen im Labor und an Proben aus den Feldexperimenten sollte die Übertragbarkeit der Laborergebnisse getestet werden.

1.1.3 IBL Umwelt- und Biotechnik GmbH Heidelberg

Dem Unternehmen IBL oblag die Durchführung und Evaluierung der beiden geplanten Feldversuche. Im ersten Feldversuch sollten das hydraulische System, die technische Anlage und die Betriebsweise optimiert werden. Im zweiten Feldversuch war die Entfernung von Perchlorethylen, das in die Säule eingebracht werden sollte, mit Hilfe einer Mikroemulsion vorgesehen. Mit diesem Versuch sollte der Nachweis geführt werden, dass die Entfernung von DNAPL-Schadensherden durch die Mikroemulsionstechnik unter Bedingungen "natürlicher" Untergrundstrukturen ein effektives und sicheres Verfahren darstellt. Zusätzlich sollten die Feldversuche durch Modellrechnungen mit einem Reaktiv-Transport-Simulationsmodell begleitet werden, um Abschätzungen über die Notwendigkeit und das Ausmaß von biologischen Nachsorgemaßnahmen vornehmen zu können. Die Durchführung der biologischen Nachsorge in den beiden Säulen gehörte ebenfalls zur Aufgabenstellung von IBL.

1.1.4 VEGAS – Institut für Wasserbau der Universität Stuttgart

VEGAS sollte Untersuchungen zum Strömungsverhalten von Mikroemulsionen und zur Rückgewinnung der Mikroemulsionskomponenten durchführen. Es sollten geeignete hydraulische Systeme entwickelt werden, die es ermöglichen, Schadstoff und Mikroemulsion sicher aus einem gesättigten Grundwasserleiter zu entfernen. Die Entwicklung technischer Brunnensysteme, welche angepasst an die Schadstoffverteilung im Schadensherd trotz zeitlich und räumlich variabler Dichteunterschiede einen sicheren Transport der schadstoffbeladenen Mikroemulsion in Richtung der Extraktionsbrunnen gewährleisten, stand im Vordergrund der geplanten Arbeiten. In mittel- und großskaligen Experimenten sollten Ansätze zur Übertragung in Feldanwendungen entwickelt werden.

Zur Rückgewinnung der Mikroemulsion sollten in Stuttgart Versuche zur Entfernung des Schadstoffs aus der Extraktionslösung mittels eines Strippverfahrens stattfinden.

1.1.5 Feldexperimente am Modellstandort Eppelheim

Die Arbeiten der einzelnen Partner waren auf die Durchführung von zwei Feldversuchen am Modellstandort Eppelheim der Landesanstalt für Umweltschutz des Landes Baden-Württemberg (LfU) ausgerichtet. Die LfU hatte Eppelheim als Modellstandort ausgewiesen mit dem Ziel, innovative Techniken zur Altlastensanierung zu erproben. Die Versuche sollten unter finanzieller und fachlicher Beteiligung der LfU stattfinden. Im ersten Feldversuch sollten vor allem die hydraulischen Maßnahmen optimiert werden. Durch die gemeinsamen Arbeiten von FZJ, VEGAS, TZW und IBL bei der Vorbereitung und Durchführung dieses Versuches sollte auch der Wissenstransfer zwischen den Partnern und insbesondere zu IBL ermöglicht werden. Im zweiten Versuch war schließlich die Entfernung einer künstlich eingebrachten Perchlorethylen-Kontamination vorgesehen.

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

1.2.1 Projektverbund

Am 29.07.1998 wurde von den Partnern des Projektverbundes eine Projektskizze eingereicht. Die Anträge wurden 14.10.1999 gestellt. Die Genehmigung erfolgte zum 01.06.2001. Die Koordinierung des gesamten Projektverbundes erfolgte durch das Forschungszentrum Jülich.

Die Landesanstalt für Umweltschutz des Landes Baden-Württemberg (LfU) beteiligte sich mit 75.000,- EUR an den Kosten der Untersuchungen im Feld.

1.2.2 Forschungszentrum Jülich

Die Arbeiten des Forschungszentrums basierten auf dem fundierten Know-how über Tenside und Mikroemulsionen und hierbei auch zur Abtrennung von Schadstoffen aus kontaminierten Materialien, das im Laufe von 7 Jahren vor Stellung der Anträge erarbeitet worden war.

Zu Beginn und während der Laufzeit des Vorhabens ergaben sich Verzögerungen bei der Besetzung bzw. Wiederbesetzung von Stellen. Durch vorübergehende Einschränkungen bei den experimentellen Arbeiten wegen eines Umzugs, der zum Zeitpunkt der Antragstellung noch nicht abzusehen war, trat eine weitere Verzögerung ein. Durch eine kostenneutrale Verlängerung konnten die Arbeiten aber im vorgesehenen zeitlichen Umfang durchgeführt werden.

1.2.3 DVGW-Technologiezentrum Wasser, Karlsruhe

Unter Leitung von Prof. W. Kühn beschäftigt sich das Technologiezentrum Wasser bereits seit Anfang der achtziger Jahre mit der Altlastenproblematik. Im Rahmen von Forschungsvorhaben und Aufträgen von Versorgungsunternehmen und Kommunen wurden grundlagen- und praxisorientierte Fragestellungen zum mikrobiellen Abbau von aliphatischen und aromatischen Kohlenwasserstoffen sowie leichtflüchtigen chlorierten Kohlenwasserstoffen bearbeitet. Unter anderen sind Natural Attenuation und Enhanced Natural Attenuation chlorierter Kohlenwasserstoffe die Themen derzeit laufender Projekte. Wissenschaftliches und technisches Stammpersonal führte die Arbeiten des vorliegenden Vorhabens während der gesamten Laufzeit aus. Im Rahmen des Projektes wurde eine Diplomarbeit betreut.

1.2.4 IBL Umwelt- und Biotechnik GmbH, Heidelberg

IBL Umwelt- und Biotechnik GmbH wurde 1984 in Heidelberg gegründet und verfügt über Vertretungen in Baden-Württemberg, Bayern, Hessen und Rheinland-Pfalz. Im Unternehmen sind über 46 Mitarbeiter aller aufgabenrelevanten Naturwissenschaften und Ingenieurdisziplinen beschäftigt.

Die biologische in-situ Sanierung kontaminierter Standorte respektive die Betrachtung der natürlichen Abbauprozesse unter Einbeziehung numerischer Modellierung der Grundwasserströmung und des Schadstofftransports sowie die Sanierungsausführung sind ein festes Standbein der IBL. Die Laboratorien und Werkstätten sind eine wesentliche Voraussetzung für die angewandte Forschung und die technische Weiterentwicklung von Sanierungsverfahren.

IBL entwickelt seit über 20 Jahren Verfahren und Verfahrenskombinationen zur Reinigung von belasteten Wässern und Böden. Auch klassische pump and treat-Verfahren werden kombiniert mit Desorptionstechniken und mikrobiologischen Reinigungs- und Anreicherungsverfahren, die auf eine aerobe und anaerobe Prozesssteuerung abgestimmt sind. Das Basic- und Detail-Engineering wird im Fachbereich Anlagenbau projektiert und umgesetzt. Als in-situ-Technologien werden neben biologischen, chemischen und kombinierten Verfahren auch Airsparging, Bioslurping, Bioventing und eine Aufbereitung der Grundwässer mittels Phytopflanzenfilter und Photooxidation eingesetzt. Vor-Ort-Parameter werden mittels Datenlogger erfasst und per Fernabfrage zur kontinuierlichen Prozessüberwachung abgerufen.

In der technischen Werkstatt konstruiert und fertigt IBL Pilotanlagen und innovative Sanierungsanlagen entsprechend den jeweiligen Standortbedingungen für die Altastensanierung (Boden, Grundwasser) und die Reinigung von Wasser/Abwasser sowie Luft/Abluft. Die Koordination notwendiger Bohr- und Tiefbauarbeiten sowie die Verlegung von Versorgungs- und Entnahmeleitungen (ober- und unterflurig) erfolgt durch eigene Techniker.

Für das Sanierungsmonitoring und die Überprüfung des laufenden Sanierungsbetriebes auf komplexen geologischen Standorten sowie zur Gewinnung von horizontal zonierten Grundwasserproben kommt das IBL-Multilevelsystem zum Einsatz. Hierdurch kann eine gesicherte Dokumentation der Schadstoffverteilung, des Schadstofftransportes und des Sanierungsfortschrittes erfolgen. Des Weiteren ermöglichen numerische Modellierungen und Simulationen die Überprüfung des Sanierungsverfahrens, die optimale Platzierung der Sanierungsinfrastruktur sowie die ständige Kontrolle der hydraulischen Sicherung und Anpassung des Sanierungsbetriebes.

Die Projektteams der IBL bestehen aus qualifizierten Biologen, Chemikern, Geologen sowie Ingenieuren, Chemieingenieuren, Technikern und bio-/chemietechnischen Laborfachkräften.

Intern erfolgt eine kontinuierliche Überprüfung der etablierten Maßnahmen der Qualitätssicherung, die im vorgeschriebenen Turnus durch externe Institutionen überprüft und bewertet werden (Zertifizierung, Akkreditierung). Die IBL GmbH ist akkreditiert gemäß DIN EN ISO/IEC 17025:2000.

IBL technische Werkstätten verfügen über die zur Fertigung der Sanierungsanlagen erforderlichen Einrichtungen zur Metall- und Kunststoffbearbeitung.

1.2.5 VEGAS – Institut für Wasserbau der Universität Stuttgart

In der Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung (VEGAS) werden seit Anfang der 90er Jahre Technologien zur Sanierung kontaminierter Grundwasserleiter untersucht und entwickelt. Durch zahlreiche großskalige Laboruntersuchungen und Technologieentwicklungen sowie Pilotstudien im Feld besitzt VEGAS vielseitige und umfassende Erfahrungen beim Aufbau sowie bei der Durchführung und Interpretation von großskaligen Labor- und Feldexperimenten. Beispielhaft seien hier erfolgreiche Feldsanierungen mit thermisch unterstützter Bodenluftabsaugung und mit Tensidspülung sowie großskalige Laboruntersuchungen zur Alkoholspülung genannt. Darüber hinaus wurden in den letzten Jahren mehrere neue Methoden zur in-situ-Messung von Schadstoffen im Boden und Bodenwasser entwickelt.

Zu Beginn des Projektes konnte die Stelle des Wissenschaftlers erst zum 01.12.2001 besetzt werden. Insbesondere die umfangreichen Vorarbeiten zum Feldversuch und die Dauer des

Feldversuchs machten eine kostenneutrale Verlängerung der Projektlaufzeit bis zum 31.05.2005 notwendig.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

1.3.1 Projektverbund

Für den gesamten Projektverbund wurden Änderungen des Zeitplanes notwendig. Sie waren vor allem bedingt durch Erkenntnisse, die erst während der Laufzeit des Projektverbundes gewonnen wurden, und durch Verzögerungen bei der Besetzung bzw. Wiederbesetzung von Stellen. Dadurch ergaben sich notwendige Änderungen in der Gewichtung und im zeitlichen Ablauf der geplanten Arbeiten bei den einzelnen Partnern. Für den gesamten Projektverbund oder mehrere Partner galt dies vor allem für die geplanten Feldversuche und die Arbeiten zur Aufbereitung.

Abweichend vom ursprünglich vorgesehenen Programm wurde insbesondere nur ein Versuch am Feldstandort durchgeführt, weil das in der Säule vorhandene Material die Durchführung des vorgesehenen Versuches nicht zuließ. Die Säule musste deshalb ausgekoffert und mit standortnahe Material wieder verfüllt werden. Auf Grund dadurch anfallender zusätzlicher Kosten war die Durchführung eines zweiten Versuches nicht mehr möglich.

Während der Durchführung des Feldversuches kam es zu einem unerwartet geringen Austrag der Mikroemulsionskomponenten. Zur Ursachenforschung wurden von allen Partnern zusätzliche Arbeiten durchgeführt, die letztlich zur Klärung des Problems führten und die erfolgreiche Durchführung eines großskaligen Experimentes in VEGAS ermöglichten.

An Hand von Ergebnissen aus den Projektarbeiten wurden zur Aufbereitung andere Methoden als ursprünglich vorgesehen untersucht. Die zum Ende des Projektverbundes ausgearbeiteten Techniken sind wesentlich einfacher als die in den Anträgen vorgesehenen.

1.3.2 Forschungszentrum Jülich

Bei der Gewichtung einzelner Aufgaben mussten aus sachlichen Gründen Änderungen vorgenommen werden. Dies gilt insbesondere für die geplanten Arbeiten zur Optimierung der Mikroemulsion hinsichtlich einer Verringerung des Ölgehalts und einer möglichen Verbesserung des biologischen Abbaus durch die Synthese eines neuartigen Tensids. Diese Arbeiten mussten wegen unvorhersehbarer Schwierigkeiten im Zusammenhang mit der Bildung von Flüssigkristallen, die während der Planung des Feldversuches plötzlich in den Mikroemulsionen auftraten, im Umfang deutlich reduziert werden. Zur Behebung des Problems, das durch die Änderung der Formulierung einer der Mikroemulsionskomponenten seitens des Herstellers bedingt war, waren umfangreiche zusätzliche Untersuchungen zum Phasenverhalten notwendig.

Die Ergebnisse der biologischen Arbeiten zum Abbau des Wirkstoffes in der Formulierung des anionischen Tensids machten das Arbeiten mit radioaktiv markierten Verbindungen nicht mehr erforderlich, da unter aeroben Bedingungen die Abspaltung von Schwefel aus der Verbindung bereits über die Sulfatbildung nachgewiesen werden konnte und unter anaeroben Bedingungen gar kein Abbau stattfindet.

Zu Beginn des Projektes wurden eine Wissenschaftlerin und ein Diplom-Ingenieur (FH) für die mikrobiologischen Arbeiten eingestellt. Die zweite Ingenieur-Stelle im Bereich der Analytik und Schadstoffabtrennung konnte erst zum 01.10.2001 mit einer Diplom-Ingenieurin besetzt werden. Diese Mitarbeiterin schied am 31.03.2003 auf eigenen Wunsch aus. Die

Stelle konnte danach zum 01.06.2003 wiederbesetzt werden. Wegen der Leerzeiten bei den Stellenbesetzungen und der Verzögerungen durch Umzugsmaßnahmen wurde die Laufzeit des Projektes kostenneutral vom 31.05.2003 zunächst auf 31.12.2003 und später wegen der zusätzlich erforderlichen Untersuchungen im Zusammenhang mit der Durchführung des Feldversuchs bis zum 30.09.2004 verlängert.

Das aus dem Projekt finanzierte Personal führte mit Ausnahme der Arbeiten mit radioaktiv markierten Verbindungen und der Planung des zweiten Feldversuchs, die beide aus inhaltlichen bzw. finanziellen Gründen nicht durchgeführt wurden, die antragsgemäßen Arbeiten durch. Die für die beiden genannten Themen vorgesehenen Zeiträume wurden durch umfangreichere Arbeiten zu den anderen projektbezogenen Inhalten ausgefüllt. So wurden im Rahmen der biologischen Arbeiten zum anaeroben Abbau zusätzliche Untersuchungen mit schwefelreduzierenden Reinkulturen durchgeführt. Statt der Planung des zweiten Feldversuchs waren umfangreichere Arbeiten zur Auswertung und Interpretation des durchgeführten Feldversuches notwendig.

Im Rahmen der Eigenleistung des Forschungszentrums wurden Arbeiten zu allen antragsgemäßen Themen durchgeführt. Der Umfang der analytischen Arbeiten war dabei größer als geplant. Auf Grund von Zusatzuntersuchungen im Zusammenhang mit dem Feldexperiment mussten die Arbeiten zur Tensidsynthese Ende 2003 eingestellt werden.

1.3.3 DVGW-Technologiezentrum Wasser, Karlsruhe

Zu Beginn des Vorhabens konnten die Aufgaben planmäßig aufgenommen und bearbeitet werden. Zeitliche Verschiebungen ergaben sich durch die Verzögerungen beim Feldversuch. Der Beginn von weiterführenden Experimenten am TZW wurde teilweise verschoben, um Erkenntnisse des Feldversuchs und aus Untersuchungen der Partner im Versuchsaufbau berücksichtigen zu können. Deshalb wurde eine kostenneutrale Verlängerung der Laufzeit beantragt.

1.3.4 IBL Umwelt- und Biotechnik GmbH, Heidelberg

Im Rahmen des Projekts war die Vorbereitung und Durchführung von zwei Feldversuchen am Modellstandort der Landesanstalt für Umweltschutz (LfU) in Eppelheim vorgesehen. Die vorbereitenden Untersuchungen dort führten zu dem Kenntnisstand, dass der obere Auffüllbereich der Kontrollsäule in der vorliegenden Zusammensetzung (undurchlässige Kunststoffschichten etc.) nicht für die Feldversuche geeignet war. Der anschließende Bereich der Ton-Schluffschicht konnte wegen der sehr niedrigen Durchlässigkeit und der geringen Mächtigkeit ebenfalls nicht genutzt werden. Die anstehende Sand-Kiesschicht wäre von der Durchlässigkeit am besten für die Mikroemulsionsuntersuchungen geeignet gewesen, wies aber wiederum eine zu geringe Mächtigkeit auf.

Um den Feldstandort trotz der vorliegenden Bodenverhältnisse am effektivsten für einen Feldversuch nutzen zu können, wurde die Versuchssäule (Reservesäule) im Rahmen der weiteren Versuchsplanung ausgehoben und nach eingehenden Untersuchungen mit sandigem Material aus dem nahen, mit DNAPL kontaminierten Aquifer wiederverfüllt. Parallel hierzu wurde der Boden der Säule durch Einschweißen einer Platte gegen den Untergrund abgeschlossen. Es wurden Infiltrationslanzen (Brunnen) für Grundwasser, Mikroemulsion und DNAPL, Extraktionsbrunnen sowie Sonden zur Probenahme und Fluoreszenzdetektion in unterschiedlichen Ebenen installiert. Ein künstlicher Schadstoffpool (Perchloroethylen) in

Residualkonzentration wurde mit eingebaut. Das Versuchsgelände wurde präpariert und eingezäunt.

Onsite wurde die Anlagentechnik zur Infiltration, zur Extraktion, zur Behandlung der extrahierten Stoffströme, zur Steuerung und Dokumentation des gesamten Prozesses, etc. installiert. Hierzu gehörte auch ein Brunnensystem zur vollständigen Erfassung der Wasser- und Luftpfade. Für die Bilanzierung des Versuchs wurde ein System zur Homogenisierung der geförderten Extrakte mit anschließender repräsentativer Probenahme entwickelt und installiert. Das entstehende Abwasser sollte vor Ort gesammelt und bei geringer Belastung direkt entsorgt oder aber bei hohen Schadstoffgehalten onsite bzw. offsite aufbereitet werden. Die Mikroemulsion für den Feldversuch wurde nach Angaben von FZJ hergestellt und zwischengelagert. Die Testläufe mit Wasser durch die Gesamtanlage sowie mit Mikroemulsion durch die Anlagentechnik onsite verliefen erfolgreich.

Der Feldversuch wurde nach dem Ende der Frostperiode am 07.04.2003 gestartet. Die vorbereitete Menge Mikroemulsion (ME) wurde innerhalb eines kurzen Zeitraumes infiltriert. Während und nach der Infiltration wurde die Bewegung der Mikroemulsionsfront durch den Bodenkörper durch gezielte Durchströmung mit Grundwasser unterstützt. Dieser Prozess des Durchströmens der Versuchssäule wurde durch die Analyse von Proben aus verschiedenen Ebenen sowie durch Detektion der mit einem Tracer versehenen Mikroemulsion mittels Fotosensoren verfolgt und dokumentiert.

Die Begleitung der Feldversuche durch Modellrechnungen mit einem Reaktiv-Transport-Simulationsmodell sollte zur Abschätzungen über die Notwendigkeit und das Ausmaß von biologischen Nachsorgemaßnahmen dienen. Es stellte sich aber im Verlauf des Projektes heraus, dass für das vorliegende komplexe Mehrphasensystem die vorhandene Datenbasis zur Modellierung nicht ausreicht.

Mit Eintritt der Frostperiode wurde die Anlage am 08.12.2003 stillgelegt, um witterungsbedingte Schäden zu vermeiden. Bis zu diesem Zeitpunkt waren die nachgewiesene Extraktion an Schadstoff sowie die Wiedergewinnung an Mikroemulsionsbestandteilen deutlich geringer als erwartet. Des Weiteren war während des Versuchsverlaufs eine zunehmende Verlangsamung der Bewegung der Mikroemulsion durch die Säule beobachtet worden, die zu einer wesentlichen Verlängerung des ursprünglich geplanten Versuchsablaufs geführt hatte.

Da die Auswertung der über die Flüssigphase gewonnenen Daten nicht zu einem befriedigenden Ergebnis zum Versuchsablauf führte und festgestellt werden musste, dass nur durch einen direkten Eingriff in die Säule mit Sondierbohrungen der Erfolg des Versuchs quantifizierbar ist, die damit verbundenen Störungen im Sandkörper jedoch die Fortsetzung eines regulären Versuchsbetriebs unmöglich gemacht hätten, wurde nach längeren Diskussionen im Einvernehmen mit allen Projektpartnern beschlossen, den Versuch endgültig zu beenden.

Nach umfangreichen Vorbereitungsarbeiten wurden die Sondierbohrungen Ende März 2004 begonnen. Es wurden aus der Säule mehrere Linerproben entnommen, die nach einer ersten optischen Überprüfung keine Heterogenitäten in der Säule und damit auch keine mögliche Blockierung des Vertikalflusses erkennen ließen. Diese Proben wurden auf die Hauptbestandteile der Mikroemulsion sowie auf PER hin analytisch untersucht.

Mit den Ergebnissen dieser und weiterer Untersuchungen konnten zahlreiche mögliche Ursachen für den verminderten Austrag ausgeschlossen bzw. erhärtet werden.

1.3.5 VEGAS – Institut für Wasserbau der Universität Stuttgart

Zu Beginn des Vorhabens konnte die Stelle des Wissenschaftlers erst sechs Monate nach Projektbeginn besetzt werden. Weitere Verzögerungen entstanden durch Schwierigkeiten bei der Herstellung einer stabilen Mikroemulsion. Dieses Problem war auf eine Änderung der Formulierung eines der Tenside durch den Hersteller zurückzuführen und wurde vom FZJ durch Formulierung einer neuen Mikroemulsionsrezeptur Anfang 2003 behoben. Insbesondere die umfangreichen Vorarbeiten zum Feldversuch und die Dauer des Feldversuchs machten eine kostenneutrale Verlängerung der Projektlaufzeit bis zum 31.05.2005 notwendig. Die Durchführung eines großskaligen quasi 3-D-Experimentes war in Anbetracht der Ergebnisse des Feldversuchs nicht sinnvoll. Stattdessen wurden mehr als 30 mittelskalige 2-D-Experimente durchgeführt, die für das Verständnis des Fließ- und Transportverhaltens der Mikroemulsion im gesättigten Untergrund essentiell waren. Das erfolgreiche großskalige Experiment im VEGAS-Technikum konnte nur mit zusätzlichen Eigenleistungen durchgeführt werden.

1.4 Stand der Wissenschaft und Technik vor Projektbeginn

Für die Sanierung von Altlasten wurden in der Vergangenheit neben Sicherungsmaßnahmen und Bodenaushub für den gesättigten Bereich vor allem Pump-and-Treat-Verfahren (P+T) eingesetzt. Diese zielen jedoch genauso wie die damals gerade neu propagierten reaktiven Wände (Funnel-and-Gate-Verfahren) auf die Beseitigung der im Abstrom des Schadensherds gelösten Schadstoffe ab (Fahnensanierung). In-situ-Verfahren dagegen gehen hingegen davon aus, die Schadstoffe aus dem Schadensherd zu extrahieren oder durch mikrobiellen Abbau in unschädliche Substanzen umzuwandeln. International wird auch verstärkt diskutiert, nach Entfernung des Hauptschadensherdes die verbliebene Restkontamination und die Kontaminationsfahne natürlichen Abbauprozessen zu überlassen. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass chlorierte Stoffe, z.B. LCKW, deren Dichte meist über der Dichte des Wassers liegt, keinen oder nur einen sehr geringen vollständigen Abbau zeigen, so dass sich im Abstrom des Schadensherdes sehr lange Schadstofffahnen mit teilweise über 10 km Länge ausbilden.

Zur Entfernung schlecht wasserlöslicher flüssiger Schadstoffe (non aqueous phase liquids = NAPL) aus dem Schadensherd muss entweder durch Erniedrigung der Grenzflächenspannung ihre Mobilität erhöht oder durch Zugabe von Lösungsvermittlern ihre Löslichkeit verbessert werden. In beiden Fällen können Tenside eingesetzt werden [1]. Zur Verbesserung der Löslichkeit ist auch die Verwendung organischer Lösungsmittel (cosolvents), wie Alkoholen möglich [2, 3]. In Feldversuchen zeigten Alkohole, bezogen auf die Masse an organischen Komponenten, aber eine geringere Effektivität als Tensidlösungen [2, 4]. Die Infiltration von Ethanol im Rahmen eines Pilotprojektes führte zwar zum Austrag eines beträchtlichen Anteils der PER-Menge (ca 62 %) aus dem Schadensherd unter einer ehemaligen Textilreinigung [5]. Letztlich kann eine Schadstoffentfernung in dieser Größenordnung aber noch nicht als ausreichend angesehen werden. Allerdings wurden auch bereits erfolgreiche Laborversuche zur Steigerung der Effektivität von Alkoholmischungen beschrieben [6].

Die Erhöhung der Mobilität von Schadstoffen mit einer höheren Dichte als Wasser (dense non aqueous phase liquids = DNAPL) ist außerordentlich kritisch, da sie auf Grund von Dichteströmungen zu einer Verlagerung des Schadstoffes in tiefere Bodenschichten führen kann [7]. Die Unabdingbarkeit einer Mobilitätskontrolle wurde bereits frühzeitig erkannt. Als notwendig wurde deshalb erachtet, dass die Grenzflächenspannung nicht zu stark herabgesetzt wird und somit keine nennenswerte Mobilisierung einsetzt [8], damit der Schadstoff

mit Hilfe der Solubilisierung entfernt wird. Dass aber bereits bei der Solubilisierung mit Tensiden eine abwärtsgerichtete Strömung auftritt, wurde in VEGAS nachgewiesen [9].

Unter günstigen Umständen, d. h. bei Anwesenheit einer dichten Schicht unterhalb der Kontamination, wurden zwar einige Feldversuche zur Extraktion von DNAPL mit Tensiden erfolgreich durchgeführt [10 – 12], jedoch besteht zumindest in einem Fall der begründete Verdacht, dass eine Verfrachtung von TCE nach unten stattgefunden hat [13]. In einem weiteren Fall blieb die Anwendung von Tensiden erfolglos [14].

Am Forschungszentrum Jülich wurden deshalb Mikroemulsionen als alternative Extraktionsmedien entwickelt [15, 16] und erstmals 1997 bei einem Versuch in der Großen Rinne von VEGAS im Maßstab von mehreren Kubikmetern für die Entfernung von Trichlorethen aus einem relativ gut durchlässigen künstlichen Aquifer eingesetzt. Die wesentlichen Ergebnisse dieses Versuches waren:

1. Die vorgeschaltete Spülung mit einer Tensidlösung führte zu einer geringfügigen Solubilisierung des DNAPL Trichlorethen und zu einem Transport in den unteren Bereich des Auslaufs.
2. Die Mikroemulsion war aufgrund ihrer hervorragenden Benetzungseigenschaften in der Lage, auch in gering durchlässige Bereiche einzudringen.
3. Der DNAPL Trichlorethen wurde aufgrund der geringeren Dichte der Mikroemulsion nach oben transportiert.
4. Nach dem Spülen mit Tensid und Wasser verblieben Reste der Mikroemulsion im Boden.
5. Während der Spülung setzte unter anaeroben Bedingungen biologische Aktivität ein.
6. Der Schadstoffgehalt konnte, mit weniger als 2 Porenvolumina Mikroemulsion, innerhalb einer vergleichsweise kurzen Zeit sicher um mindestens 90 % reduziert werden. Eine genaue Angabe war jedoch nicht möglich, da vorher bereits andere Experimente in der Rinne durchgeführt worden waren.

Das Verfahren wurde vom FZJ später mehrfach bei Messen mit einem Modellschadstoff in Säulen mit einem Bodeninhalt von mehreren Kilogramm vorgestellt. Das FZJ war zu diesem Zeitpunkt zusammen mit VEGAS die einzige Institution, die dieses Verfahren durchführte. Als Alternative wurde auch die Mikroemulsionsbildung mit dem Schadstoff im Aquifer durch Infiltration geeigneter Tensidsysteme diskutiert [17–20]. Allerdings besteht dabei, ähnlich wie bei den Tensiden, das Problem einer eventuellen Mobilisierung in tiefer gelegene Bereiche des Bodens. Dem versucht man durch Verwendung von Konzentrationsgradienten bei der Infiltration der Tensidlösung oder bei der Einstellung eines optimalen Salzgehaltes entgegenzuwirken [21]. Zudem sind Tenside für die Solubilisierung von DNAPL wegen deren höherer Polarität in der Regel weniger effektiv. Für LNAPL gab es bereits Beispiele erfolgreicher Feldexperimente [22].

Da aus Sicherheitsgründen zusätzlich zur Extraktionslösung noch Grundwasser gefördert wird, müssen tensidhaltige Lösungen nach der Schadstoffabtrennung aufkonzentriert werden. Hierzu wurden vor allem Membranverfahren eingesetzt [23 – 25]. Diese wurden deshalb auch im Projektverbund als Aufbereitungsmethode vorgesehen. Zur Rückgewinnung der Tenside oder sonstiger Hilfsstoffe muss zusätzlich der Schadstoff abgetrennt werden. Für flüchtige Stoffe wurden hierzu Hohlfasermodule verwendet, um das Problem des Schäumens in den Griff zu bekommen, das bei tensidhaltigen Lösungen in besonders starkem Maß auftreten kann [26].

Hinsichtlich der biologischen Prozesse, die in der Nachfolge einer Schadstoffextraktion die Beseitigung der im Boden verbleibenden Mikroemulsionsbestandteile sicherstellen sollten, waren in erster Linie Fragen zur Abbaubarkeit der einzelnen Komponenten unter den spezifischen Umgebungsbedingungen der gesättigten Bodenzone zu beantworten (Vollständigkeit, Metabolitenbildung, Geschwindigkeit des Abbaus, Hemmung, Toxizität oder Adaptationsdauer der autochthonen Mikroflora). Dabei war die Verhinderung einer negativen Beeinflussung der Grundwasserqualität im Abstrom als Gesamtziel zu betrachten.

Die gute biologische Abbaubarkeit der organischen Bestandteile der Mikroemulsion, d.h. des Öl- und Tensidanteils, bilden eine Grundvoraussetzung für die Praxisanwendung der Methode. Diesbezügliche Literatur- und Herstellerangaben beziehen sich im Allgemeinen auf den mikrobiellen Abbau mit Sauerstoff unter den Bedingungen einer Kläranlage [27-30].

Laut Hersteller galt die Ölkomponente der Mikroemulsion, Rapsölmethylester, als untoxisch für aquatische Organismen (Wassergefährdungsklasse 1). Im Standard-Abbautest wird Rapsölmethylester innerhalb von 28 Tagen zu 85-88 % abgebaut (National Biodiesel Board).

Zum Abbau von Rapsölmethylester unter sauerstoffarmen bzw. völlig anaeroben Bedingungen lagen keine konkreten Daten vor. Es galt allerdings als wahrscheinlich, dass auch in diesem Milieu ein Abbau stattfindet, wobei nach Hydrolyse des Esters Methanol und freie Fettsäuren vorliegen. Aus den Fettsäuren wird in der mikrobiellen β -Oxidation Acetat gebildet. Methanol und Acetat können unter denitrifizierenden, sulfatreduzierenden und methanogenen Bedingungen mikrobiell metabolisiert werden [31-33]. Über Umsatzraten, die beim Abbau in der gesättigten Bodenzone und bei niedrigem Redoxpotential zu erwarten sind, lagen allerdings keine Angaben vor. Gegenüber Abbauprodukten in wässrigen Systemen musste mit einer Limitierung der Abbaugeschwindigkeit (eingeschränkte Bioverfügbarkeit, begrenzte Austauschflächen) gerechnet werden. Gleichzeitig wurde vermutet, dass ein Abbau noch vorhandener Schadstoffe (z.B. LHKW) durch die Reste an Rapsölmethylester bzw. seiner Abbauprodukte begünstigt und beschleunigt werden kann, da diese die Funktion des erforderlichen Co-Substrates übernehmen können [34-38].

Viele nichtionische und anionische Tenside werden in der Literatur unter aeroben Bedingungen als (vollständig) biologisch abbaubar bezeichnet [28, 39-43]. Allerdings wurde häufig nur der Primärabbau, d.h. der Verlust des Tensidcharakters, unter aeroben Milieubedingungen ermittelt und als Abbau bezeichnet; der vollständige Abbau des Tensids blieb oft ungeklärt [40, 44]. Da im Zuge einer Mineralisierung von Tensiden viele verschiedene Metaboliten auftreten können, erfordert die Aufklärung eines vollständigen Abbaus aufwendige Analysemethoden (z.B. mit ^{14}C -markierten Verbindungen [45]) oder zumindest Untersuchungen der Toxizität.

Demgegenüber fehlten Daten für einen biologischen Tensidabbau unter sauerstoffarmen und anaeroben Milieubedingungen fast vollständig. Ausnahmen waren z.B. Wagener & Schink [46], die den vollständigen Abbau eines linearen Alkylethoxylates zeigten, und Hales [42], der den Primärabbau eines anionischen Dialkylsulfosuccinats unter anaeroben Bedingungen beschrieb.

Inhibitorische oder toxische Effekte, die auf Tenside zurückzuführen sind, werden im Allgemeinen durch Interaktionen des hydrophoben Molekülanteils mit den Zellmembranen der Organismen erklärt [47, 48]. Daher wird ein funktioneller Bezug zwischen der Hydrophilie-Lipophilie-Balance des Tensidmoleküls und seiner toxischen Wirkung gesehen. Diese Effekte sind darüber hinaus konzentrationsabhängig und wurden erst bei Tensidkonzentrationen oberhalb der kritischen Mizellbildungskonzentration beobachtet [49]. In der Bodenzone treten andererseits komplexe Wechselwirkungen zwischen Tensiden und der

Bodenmatrix hinzu, die eine Sorption der Tensidmoleküle und eine Verminderung der Bioverfügbarkeit zur Folge haben.

Die positive Wirkung nicht-toxischer Tenside auf den mikrobiellen Abbau hydrophober Substanzen wurde von Tiehm et al. am Beispiel der PAK sowohl in wässriger Lösung [50] als auch für kontaminierten Gaswerksboden gezeigt [51].

Literatur

- [1] R.C. Knox, B. Shiau, D.A. Sabatini, J.H. Harwell
Field demonstration studies of surfactant-enhanced solubilization and mobilization at Hill Air Force Base, Utah
in: *ACS Symp. Ser 725*, 1999, pp. 49-63
- [2] P.S.C. Rao, M.D. Annable, R.K. Sillan, D. Dai, K. Hatfield, W.D. Graham, A.L. Wood, C.G. Enfield
Field scale evaluation of in situ cosolvent flushing for enhanced aquifer remediation
Water Resour. Res. **1997**, 33(12) 2673-2686
- [3] R.W. Falta, C.M. Lee, S.E. Brame, E. Roeder, J.T. Coates, C. Wright
Field test of high molecular weight alcohol flushing for subsurface NAPL remediation
Water Resour. Res. **1999**, 35(7), 2095-2108
- [4] J.H. Harwell, D.A. Sabatini, R.C. Knox,
Surfactants for ground water remediation
Colloids Surfaces A **1999**, 151, 255-268
- [5] J.W. Jawitz, R.K. Sillan, M.D. Annable, P.S.C. Rao, K. Warner
In-situ alcohol flushing of a DNAPL source zone at a dry cleaner site
Environ. Sci. Technol. **2000**, 34(17), 3722-3729
- [6] S.D. Lunn, B.H. Kueper
Manipulation of density and viscosity for the optimization of DNAPL recovery by alcohol flooding
J. Contamin. Hydrol. **1999**, 38(4), 427-445
- [7] K.D. Pennell, G.A. Pope, L.M. Abriola
Influence of viscous and bouancy forces on the mobilization of residual tetrachloro-ethylene during surfactant flushing
Environ. Sci. Technol. **1996**, 30, 1328-1335
- [8] J.C. Fountain
Field tests of surfactant flooding - Mobility control of dense nonaqueous-phase liquids
in: *Transport and Remediation of Subsurface Contaminants*, ACS Symposium Series 491, eds.: D.A. Sabatini, R.C. Knox, American Chemical Society, Washington, 1992, pp. 182-191
- [9] B. Barczewski, O. Trötschler, P. Thiele
Hydraulische Sanierung einer TCE-Kontamination in einem künstlichen Aquifer mit einer Mikroemulsion
Technischer Bericht des Instituts für Wasserbau 98/9 (HG 259), Universität Stuttgart, 1998
- [10] J. C. Fountain, C. Waddell-Sheets, A. Lagowski, C. Taylor. D. Frazier, M. Byrne
Enhanced removal of dense nonaqueous-phase liquids using surfactants. Capabilities and limitations from field trials
in: *Surfactant-Enhanced Subsurface Remediation. Emerging Technologies*, ACS Symposium Series 594, eds.: D.A. Sabatini, R.C. Knox, J.H. Harwell, American Chemical Society, Washington, 1995, pp. 177-190

- [11] J.C. Fountain, R.C. Starr, T. Middleton, M. Beikirch, C. Taylor, D. Hodge
A controlled field test of surfactant enhanced aquifer remediation
Ground Water 1996, 34(5), 910-916
- [12] R. Martel, P.J. Gelinis, L. Saumure
Aquifer washing by micellar solutions: 3 Field test at the Thouin Sand Pit (L'Assomption, Quebec, Canada)
J. Contamin. Hydrol. **1998**, 30(1-2), 33-48
- [13] C. Oostrom, C. Hofstee, R.C. Walker, J.H. Dane
Movement and remediation of trichloroethylene in a saturated, heterogeneous porous media. Part 2: Pump-and-treat and surfactant flushing
J. Contamin. Hydrol. **1999**, (37), 179-197
- [14] J.H. Nash, R.P. Traver
Field studies on in situ soil washing
Princ. Pract. Pet. Contam. Soils **1993**, 403-407
- [15] K. Hoppe, F.-H. Haegel, F. Dierkes, K. Mönig, G. Subklew
Neue Mikroemulsionen mit Komponenten zur Unterdrückung von Flüssigkristallen, insbesondere für die in-situ-Bodensanierung
DE 19716953 A1 (Offenlegungstag: 29. 10. 1998; Anmeldetag: 22. 4. 1997)
- [16] F. Dierkes, F.-H. Haegel, M.J. Schwuger
Low-temperature microemulsions for the in situ extraction of contaminants from soil
Colloids Surfaces A **1998**, 141, 217-225
- [17] J.R. Baran, G.A. Pope, W.H. Wade V. Weerasooriya
Phase behavior of water/perchloroethylene/anionic surfactant systems
Langmuir 1994, 10(4), 1146-1150
- [18] B.J. Shiau, D.A. Sabatini, J.H. Harwell
Solubilization and microemulsification of chlorinated solvents using direct food additive (edible) surfactants
Ground Water **1994**, 32(4), 561-569
- [19] B.J. Shiau, D.A. Sabatini, J.H. Harwell, D.Q. Vu
Microemulsion of mixed chlorinated solvents using food grade (edible) surfactants
Environ. Sci. Technol. 1996, 30(1), 97-103
- [20] J.R. Baran, G.A. Pope, W.H. Wade, V. Weerasooriya
Water/chlorocarbon Winsor I \leftrightarrow III \leftrightarrow II microemulsion phase behavior with alkyl glucamide surfactants
Environ. Sci. Technol. **1996**, 30(7), 2143-2147
- [21] D.A. Sabatini, R.C. Knox, J.H. Harwell, B. Wu
Integrated design of surfactant enhanced DNAPL remediation: efficient supersolubilization and gradient systems
J. Contamin. Hydrol. **2000**, 45(1-2), 99-121
- [22] J.W. Jawitz, M.D. Annable, P.S.C. Rao, R.D. Rhue
Field implementation of a Winsor type I surfactant/alcohol mixture for in situ solubilization of a complex LNAPL as a single-phase microemulsion
Environ. Sci. Technol. 1998, 32(4), 523-530

- [23] D. A. Sabatini, R.C. Knox, J.H. Harwell, B.J. Shiau
Surfactant enhanced NAPL remediation: From the laboratory to the field
in: *Soil and Aquifer Pollution*, ISBN 3-540-62586-0, eds.: H. Rubin, N. Narkis, J. Carberry,
Springer-Verlag, Heidelberg, 1998, pp.373-391
- [24] A.N. Clarke, K.H. Oma, M.M. Megehee, D.J. Wilson
Soil clean-up by surfactant washing. II. Design and evaluation of the components of the pilot-scale surfactant recycle system
Sep. Sci. Technol. **1993**, 28(13-14), 2103-2135
- [25] M. Lipe, D.A. Sabatini, M. Hasegawa, J.H. Harwell
Micellar-enhanced ultrafiltration and airstripping for surfactant-contaminant separation and surfactant Reuse
Ground Water Monit. Remediation **1996**, 16(1), 85-92
- [26] D.A. Sabatini, J.H. Harwell, M. Hasegawa, R. Knox
Membrane processes and surfactant-enhanced subsurface remediation: result of a field demonstration
J. Membrane Sci. 1998, 151(1), 87-98
- [27] M.J. Stiff, R. Rootham, G. Culley
The effect of temperature on the removal of non-ionic surfactants during small-scale activated-sludge sewage treatment
Wat. Res., **1973**, 7, 1003-1010.
- [28] P. Gerike, W. Jasiak
How completely are surfactants biodegraded ?
Tenside Detergents **1986**, 23, 300-304
- [29] P. Kölbener, U. Baumann, T. Leisinger, A. Cook
Nondegraded metabolites arising from the biodegradation of commercial linear alkylbenzenesulfonate (LAS) surfactants in the laboratory trickling filter
Environ. Toxicol. Chem. **1995** 14, 561-569
- [30] Y. Fujita, M. Reinhard
Identification of metabolites from the biological transformation of the nonionic surfactant residue octylphenoxyacetic acid and its brominated analog
Environ. Sci. Technol. **1997**, 31, 1518-1524
- [31] G. Gottschalk
in: M. P. Starr et al. (Eds.)
The Prokaryotes, Springer, New York **1981**
- [32] H. G. Schlegel
Allgemeine Mikrobiologie, 7. Auflage unter Mitarbeit von C. Zaborosch, Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 1992, pp. 328-350
- [33] J. Postgate
Sulphate reduction by bacteria
in: *Annual Review of Microbiology*, vol. 13, C.E. Clifton, S. Raffael, M.P. Starr (eds.), Annual Reviews, Inc., Palo Alto, California, USA, 1959, pp. 505-520
- [34] T.M. Vogel and P.L. McCarty
Biotransformation of tetrachloroethylene to trichloroethylene, dichloroethylene, vinyl chloride and carbon dioxide under methanogenic conditions
Appl. Environ. Microbiol. **1985**, 49, 1080-1083

- [35] T. DiStefano, J. Gossett, S. Zinder
Hydrogen as an electron donor for dechlorination of tetrachloroethene by an anaerobic mixed culture
Appl. Environ. Microbiol. **1992**, 58, 3622-3629
- [36] W. DeBruin, M. Kotterman, M. Posthumus, G. Schraa, J. Zehnder
Complete biological reductive transformation of tetrachloroethene to ethane
Appl. Environ. Microbiol. **1992**, 58, 1996-2000
- [37] G. Rasmussen, J. Komisar, J. Ferguson
Transformation of tetrachloroethene to ethene in mixed methanogenic cultures: Effect of electron donor, biomass levels and inhibitors
in: *Bioremediation of chlorinated and polycyclic aromatic hydrocarbon compounds*,
R. E. Hinchee, A. Leeson, L. Semprini and S.K. Ong (eds.), Lewis Publishers, 1994, pp. 309-313
- [38] P. Sharma, P. McCarty
Isolation and characterization of a facultative aerobic bacterium that reductively dehalogenates tetrachloroethene to cis-1,2-dichloroethene
Appl. Environ. Microbiol. **1996**, 62, 761-765
- [39] W. Fischer
Zusammenhang zwischen chemischer Konstitution und biologischer Abbaubarkeit bei nichtionogenen Tensiden
in: *Chemie, physikalische Chemie und Anwendungstechnik der grenzflächenaktiven Stoffe, Band III*, Bericht vom VI. Internationalen Kongress für grenzflächenaktive Stoffe Zürich 11.-15.09.72, Carl Hanser Verlag, München, 1973
- [40] H. Brüsweiler, H. Gämperle, F. Schwager
Primärabbau, vollständiger Abbau und Abbauzwischenprodukte von Alkylphenol-ethoxylaten
Tenside Detergents **1983**, 20, 317-324
- [41] C. Ang, A. Abdul
A laboratory study of the biodegradation of an alcohol ethoxylate surfactant by native soil microbes
J. Hydrol. **1992**, 138(1-2), 191-209
- [42] S. Hales
Biodegradation of the anionic surfactant dialkyl sulphosuccinate
Environ. Toxicol. Chem. **1992**, 12, 1821-1828
- [43] L. Cavalli, A. Gellera, A. Landone
LAS removal and biodegradation in a wastewater treatment plant
Environ. Toxicol. Chem. **1993**, 12, 1777-1788
- [44] W. Janicke
Biologischer Abbau nichtionischer Tenside
Tenside Surf. Det. **1988**, 25, 345-355
- [45] A. Quick, N. J. Russell, S.G. Hales, G. F. White
Biodegradation of sulphosuccinate: direct desulphonation of a secondary sulphonate
Microbiol. **1994**, 140, 2991-2998

[46] S. Wagener, B. Schink

Fermentative degradation of nonionic surfactants and polyethylene glycol by enrichment cultures and by pure cultures of homoacetogenic and propionate-forming bacteria

Appl. Environ. Microbiol. **1988**, 54, 561-565

[47] T. Cserhati, Z. Illes, I. Nemes

Effect of non-ionic tensides on the growth of some soil bacteria

Appl. Environ. Biotech. **1991**, 35, 115-118

[48] I. Ribosa, M. Garcia, J. Sanches Leal, J. Gonzalez

Photobacterium phosphoreum test data of non-ionic Surfactants

Toxicol. Environ. Chem. **1993**, 39, 237-241

[49] J. Rouse, D. Sabatini, J. Suflita, J. Harwell

Influence of surfactants on the microbial degradation of organic compounds

Environ. Sci. Technol. **1994**, 24, 325-370

[50] A. Tiehm

Degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons in the presence of synthetic surfactants

Appl. Environ. Microbiol. **1994**, 60(1), 258-263

[51] A. Tiehm, M. Stieber, P. Werner, F.H. Frimmel

Surfactant-enhanced mobilization and biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons in manufactured gas plant soil

Environ. Sci. Technol. **1997**, 31, 9, 2570-2576

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Der Feldversuch fand am Modellstandort Eppelheim der Landesanstalt für Umweltschutz des Landes Baden-Württemberg (LfU) statt. Die LfU stellte die vorhandene Infrastruktur kostenlos zur Verfügung und beteiligte sich mit 75.000,- EUR an den Kosten zur Vorbereitung und Durchführung des Feldversuchs. Darüber hinaus war sie fachlich in die Arbeiten einbezogen, um auch die genehmigungsrechtlichen und verwaltungstechnischen Fragen des neuen Verfahrens zu klären.

Mit den Genehmigungsbehörden des Rhein-Neckar-Kreises wurden vor Durchführung des Feldversuchs Gespräche geführt. Federführend für den Projektverbund war hierbei IBL. Hierbei wurde die Auskoffnung, Abdichtung der Säule, Neubefüllung mit Boden und Vorgehensweise nach Versuchsende besprochen und mit Schreiben vom 12.11.2002 dokumentiert. Der Säulinhalt wurde absprachegemäß nach Versuchsende ausgekoffert und ordnungsgemäß entsorgt. Dies wurde dem LRA des Rhein-Neckar-Kreises mitgeteilt.

Die im Projektverbund verwendeten Tenside wurden von der BASF AG kostenlos zur Verfügung gestellt.

Zwischen VEGAS und der Nationalen Bergbau-Universität Dnepropetrowsk (Ukraine) bestehen seit Anfang 2002 wissenschaftliche Kontakte im Bereich Erkundung und Sanierung von Altlasten. Im Sommer 2003 reisten zwei Wissenschaftler von VEGAS und FZJ für fünf Tage nach Dnepropetrowsk, um die Möglichkeiten einer zukünftigen Zusammenarbeit auch im Hinblick auf eine mögliche Pilotanwendung des Mikroemulsionsverfahrens zu prüfen. Derzeit werden Projektanträge geschrieben, die in einer ersten Phase einen Know-how-Transfer in Form von Short Courses und Schulungen und in einer zweiten, optionalen Phase

Demonstrationen bzw. pilothafte Anwendungen von innovativen Sanierungsverfahren vorsehen.

Zwischen dem FZJ und dem Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle (UFZ) besteht ein intensiver Erfahrungsaustausch im Bereich der Altlastensanierung. Die Nutzung der Anlage SAFIRA des UFZ ist eine mögliche Option für die Weiterentwicklung des Verfahrens. Das TZW verfügt aus Projekten bereits über Erfahrungen mit der SAFIRA-Anlage in Bitterfeld.

Bezüglich der Schadstoff-Boden-Wechselwirkung bestehen langjährige Kontakte zwischen der Universität für Technik und Wirtschaft Budapest und dem Forschungszentrum Jülich.

2 EINGEHENDE DARSTELLUNG DES PROJEKTVERBUNDES

2.1 Ergebnisse

2.1.1 Zusammenfassende Bewertung der Ergebnisse

In den Versuchen des Projektverbundes auf 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 (Perchlorethylen; PER) hoch kontaminierten Bereichen der gesättigten Zone erwiesen. Ihre Handhabung setzt jedoch Erfahrung voraus, die teilweise erst im Rahmen des Projektverbundes gewonnen werden konnte.

Die wesentlichen Ergebnisse wurden in folgenden Bereichen erzielt:

- Verhalten der Mikroemulsion im Boden
- Berechenbarkeit und Skalierbarkeit
- Optimierung des Verfahrens im Hinblick auf eine Feldanwendung
- Ausarbeitung technischer Prozesse (Herstellung, Qualitätskontrolle, Aufbereitung) zur Handhabung des Verfahrens im Feld
- biologische Prozesse und biologische Nachsorge
- Verbesserung der Wirtschaftlichkeit

Im folgenden sollen die im Projektverbund erzielten Ergebnisse zunächst zusammenfassend bewertet werden. Dabei wird weniger Wert auf eine vollständige Aufzählung aller Ergebnisse als auf die Zusammenführung und Gewichtung derjenigen Resultate gelegt, die für eine zukünftige Anwendung von Mikroemulsionen zur Sanierung von DNAPL-Schäden entscheidend sind. Erkenntnisse aus dem Feldversuch spielen dabei eine zentrale Rolle.

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 weit über 90 % des Schadstoffes PER aus dem künstlichen Grundwasserleiter entfernt werden konnten.

Die Restkonzentrationen des Schadstoffes und der im Boden verbliebenen Mikroemulsionskomponenten erlauben 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. Somit konnte im Projektverbund der Nachweis geführt werden, dass sich das Verfahren von der Herstellung bis zur Rückgewinnung der Mikroemulsion auch im großskaligen Maßstab grundsätzlich erfolgreich durchführen lässt.

Der Versuch am Feldstandort Eppelheim war für das Gesamtergebnis von großer Bedeutung und soll deshalb mit seinen Resultaten und deren Verbindung zu Labor- und Technikumsversuchen ausführlicher dargestellt werden. Die Erkundung des Deponiekörpers im Bereich der Säulen hatte ergeben, dass Schichten undurchlässigen Bodenmaterials vorhanden waren, welche jedes in-situ-Extraktionsverfahren von vornherein ausschlossen. Deshalb wurde eine der Säulen ausgekoffert und mit standortnahe sandigen Material befüllt. In diese Säule wurde eine PER-Schadstoffquelle eingebaut, die mit Hilfe einer Mikroemulsion entfernt werden sollte. Der Austrag von Schadstoff und Mikroemulsionskomponenten im Verlauf des Experimentes war jedoch unzureichend. Dank der umfangreichen Beprobungstechnik lieferte der Versuch allerdings wichtige Hinweise auf das Fließverhalten der Mikroemulsion und auf die Schadstoffaufnahme im großskaligen Maßstab, die im späteren Verlauf des Projektverbundes wesentlich zum Gelingen des großskaligen Versuches im VEGAS-Technikum beitrugen.

Zudem wurden im Rahmen des Versuches in Eppelheim die notwendigen Techniken zur Herstellung, Qualitätskontrolle, Lagerung, Handhabung und Infiltration der Mikroemulsion unter Standortbedingung entwickelt und erfolgreich getestet.

Nachgeschaltete Laborversuche zur Ursachenforschung für das unbefriedigende Ergebnis beim Austrag von Schadstoff und Mikroemulsion ergaben, dass die Ursache hierfür im Wesentlichen die für die vorgesehene Fließstrecke zu knapp bemessene Menge der Mikroemulsion war. Bei einer Dispersion, wie sie in Laborversuchen vorher beobachtet worden war, hätte die infiltrierte Menge ausgereicht, um am Schadstoffherd noch weitestgehend als Phase vorzuliegen und den Schadstoff komplett aufzunehmen. Dies scheint auch der Fall gewesen zu sein. Die Ergebnisse aus den Sondenbeprobungen zwischen der Infiltrationsstelle und dem Schadstoffherd entsprechen diesem Verhalten. Ebenso lag die Zeit des Durchtritts durch die erste Sonderebene im erwarteten Bereich. Allerdings zeigte sich, dass die Dispersion der Mikroemulsion in der Versuchssäule in Eppelheim stärker ausgeprägt war, als in kleinskaligen Laborversuchen.

Zudem hat sich der Verzicht auf die fokussierende Wirkung eines Absaugbrunnens oberhalb der Kontamination als nachteilig erwiesen. Wie der großskalige Versuch in Stuttgart zeigte, wurde der im Boden vorliegende Mikroemulsionskörper durch den in Richtung des Brunnens wirkenden Unterdruck deutlich deformiert. Es wurde somit eine fokussierte Bewegung in Richtung des Brunnens festgestellt, die der Dispersion entgegenwirkte. Bei der Absaugung des Wassers am Säulenkopf, wie er im Feld durchgeführt wurde, entfiel dieser günstige Einfluss.

Aus den Daten der Sonden während des Feldversuchs kann geschlossen werden, dass wesentliche Annahmen bezüglich der Wirkung der Mikroemulsion auf den Schadstoff bei deren Aufeinandertreffen korrekt waren. So kam es zwar kurzzeitig zu einer Verlagerung von PER unter die ursprünglich kontaminierte Zone. Der Schadstoff wurde durch nachdrängende Mikroemulsion aber wieder nach oben befördert. Eine Mobilisierung nach unten wurde nicht

beobachtet. Allerdings führte das Auftreffen auf den Schadstoff wohl zu einer verstärkten Dispersion der Mikroemulsion. In der zweiten Sondenebene oberhalb des Schadstoffherdes wurde Mikroemulsion zunächst in den Randbereichen der Säule beobachtet. Die abschließenden Bodenanalysen ergaben allerdings, dass Mikroemulsion auch in den Bereich des Schadstoffherdes eingedrungen war. Eine nennenswerte Ausbreitung des Schadstoffs hatte nicht stattgefunden. Die Hauptkontamination lag immer noch in der Mitte der Säule und unterhalb der zweiten Sondenebene.

Ebenso dürfte nach den Ergebnissen von Säulenversuchen im Labor eine kurzfristige Infiltration von Luft die Dispersion der Mikroemulsion verstärkt haben. Insgesamt führte die verstärkte Dispersion 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. Die durch die stärkere Dispersion verursachte verstärkte Emulsionsbildung und die starke Zunahme der Kontaktfläche zwischen Mikroemulsion und Wasser führten zu einer starken Auslaugung der wasserlöslichen Komponenten aus der Mikroemulsion. Diese verlor deshalb rasch ihre günstigen Fließeigenschaften, die im Wesentlichen auf der guten Benetzung des Bodens basieren. Letztlich verblieben dadurch bei dem Versuch am Feldstandort große Mengen an Rapsmethylester im Boden, in denen der Schadstoff gelöst vorlag.

Dass bei geringeren Fließstrecken eine Extraktion der Mikroemulsion möglich ist, konnte durch einen großskaligen Versuch in der großen Rinne des VEGAS-Technikums gezeigt werden. Hier wurde sogar eine größere Schadstoffmenge mit einer geringeren Mikroemulsionsmenge als im Versuch in Eppelheim weitgehend aus dem Boden entfernt. Die Fließstrecke betrug in diesem Fall allerdings nur etwa 1 m im Gegensatz zu den beabsichtigten 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 ist.

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 kleinskaligen 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.

Nach dem gegenwärtigen Stand der Kenntnisse zum Einsatz von Mikroemulsionen für die Extraktion von DNAPL aus der gesättigten Zone ist eine Anwendung der Methode im Feld nur in Verbindung mit ausführlichen vorbereitenden und begleitenden Untersuchungen möglich, da insbesondere die Problematik der Inhomogenitäten eines realen Bodenkörpers nicht abschließend bewertet werden kann und eine ausreichende Sicherheit des Verfahrens durch den einen gelungenen Versuch in VEGAS noch nicht gewährleistet ist. Andererseits

zeigen die Ergebnisse der Arbeiten sehr deutlich das Potenzial, das Mikroemulsionen für die Sanierung von DNAPL-Schadstoffherden bieten.

2.1.2 Forschungszentrum Jülich

Dieses Kapitels ist als Anhang 1 beigefügt. Hierzu besteht eine separate Untergliederung, die dem zugehörigen Text vorangestellt ist.

2.1.3 DVGW-Technologiezentrum Wasser, Karlsruhe

Dieses Kapitels ist als Anhang 2 beigefügt. Hierzu besteht eine separate Untergliederung, die dem zugehörigen Text vorangestellt ist.

2.1.4 IBL Umwelt- und Biotechnik GmbH, Heidelberg

Dieses Kapitels ist als Anhang 3 beigefügt. Hierzu besteht eine separate Untergliederung, die dem zugehörigen Text vorangestellt ist.

2.1.5 VEGAS – Institut für Wasserbau der Universität Stuttgart

Dieses Kapitels ist als Anhang 4 beigefügt. Hierzu besteht eine separate Untergliederung, die dem zugehörigen Text vorangestellt ist.

2.2 Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Im Rahmen des Projektverbundes wurden unmittelbar nutzbare Erkenntnisse vor allem im Bereich der biologischen Untersuchungen gewonnen. Zum Abbau von Rapsmethylester wurden die bisher wohl umfangreichsten systematischen Untersuchungen zum Abbau im Boden unternommen. Sie belegen das vermutete geringe Gefahrenpotential dieses Stoffes unter allen in Grundwasserleitern potenziell auftretenden Redox-Bedingungen. Er ist sowohl unter reduzierenden als auch oxidierenden Bedingungen gut abbaubar. Das physikochemische Verhalten von Rapsmethylester (RME) im Porenraum des Bodens gestattet andererseits nur eine geringe Mobilität dieses Stoffes, sobald die Sättigungsgrenze im Porenraum erreicht ist. Selbst bei Anwesenheit von grenzflächenaktiven Substanzen, die RME gut solubilisieren, kommt es zu sehr geringen Austrägen. Rapsmethylester ist deshalb, wie die Arbeiten des TZW zeigen, auch als Co-Substrat für den Abbau chlorierter Kohlenwasserstoffe unter reduzierenden Bedingungen sehr geeignet.

Unmittelbar nutzbar sind auch die Strategien zur Aufbereitung von Mikroemulsionen, die im Rahmen des Projektverbundes entwickelt wurden. Sie sind grundsätzlich für Systeme mit ionischen Tensiden anwendbar.

Bezüglich der ursprünglichen Zielstellung, ein anwendbares Verfahren zur Sanierung von DNAPL-Schäden zu entwickeln, wurden deutliche Fortschritte erzielt. Ohne weitere begleitende Forschungs- und Entwicklungsarbeit wird man jedoch bei der Umsetzung des Verfahrens in einem Pilotprojekt nicht auskommen. Einige wichtige Fragestellungen konnten im Projektverbund nicht mehr aufgegriffen werden, wie zum Beispiel eine Quantifizierung des Einflusses von Heterogenitäten auf den Transport der Mikroemulsionen im Maßstab von einigen Kubikmetern. Die erzielten Ergebnisse erlauben aber eine sinnvolle Dimensionierung weiterer Experimente.

2.3 Fortschritte bei anderen Stellen

2.3.1 Sanierungsverfahren

Die Teilnehmer des Projektverbundes sind auch weiterhin die einzigen, welche die Infiltration von Mikroemulsionen für die Entfernung von Schadstoffherden aus der gesättigten Zone nutzen. Über Weiter- und Neuentwicklungen von Verfahren wird vor allem aus den USA berichtet.

Neben der Solubilisierung mit Tensiden wurden Versuche mit Alkoholen, Butanolemulsionen und mikroemulsionsbildenden Tensiden (supersolubilization) durchgeführt. Die meisten Verfahren arbeiten nach dem neuesten Stand mit Komponenten, die eine Reduzierung der Dichte des Schadstoff-Extraktionsmedium-Gemisches unter diejenige von Wasser erlauben, da das Problem der Mobilisierung inzwischen klar erkannt ist [52, 53]. Als Alternative wurde auch die Infiltration von Salzlösungen unter den Schadensherd mit einer anschließenden Mobilisierung durch Tenside im Labor untersucht [54, 55]. Alle Verfahren haben Vor- und Nachteile. Welches der Verfahren sich für die Anwendung im Fall des bislang immer noch ungelösten Problems von DNAPL in der gesättigten Zone durchsetzen wird, ist zur Zeit nicht abzusehen. Es ist auch denkbar, dass Kombinationen der Verfahren eingesetzt werden oder verschiedene Verfahren für unterschiedliche Fälle angewendet werden.

2.3.2 Stand der Technik

Die Zusammenfassung eines Workshops, der im August 2001 vom Strategic Environmental Research and Development Program und dem Environmental Security Technology Certification Program in den USA abgehalten wurde, schildert den Stand der Technik zur Sanierung von LCKW-Schäden in der gesättigten Zone zum damaligen Zeitpunkt und benennt die notwendigen Schritte zur Verbesserung der Situation [56]. LCKW-Schäden werden als grundsätzlich schwierig eingeschätzt, die Gefährdung des Grundwassers als bedeutend. Ein Forschungsbedarf zur Evaluierung neuartiger Technologien für die Schadensherdsanierung wird festgestellt. Die Bewertung von Sanierungserfolgen vor allem auch nach Maßstäben der Wirtschaftlichkeit wird als bisher nicht im gewünschten Umfang möglich dargestellt. Hohe Priorität wird daher u.a. der Verbesserung von Techniken zur Erkundung und Charakterisierung von Schadensherden, der Quantifizierung von Vorteilen, die mit einer teilweisen Schadstoffentfernung verbunden sind, der verbesserten Beurteilung von Sanierungstechnologien, aber auch Grundlagenuntersuchungen zu physikalischen, chemischen und biologischen Wechselwirkungen an der Schadstoffgrenzfläche eingeräumt. Auch die Verbesserung der Datenbasis für eine Beurteilung thermischer Verfahren wird als vordringlich angesehen. Die genannten Probleme bestehen im Wesentlichen auch heute noch, wenn auch schrittweise zu einzelnen Fragen Fortschritte erzielt wurden.

Interessante Ergebnisse finden sich in der Literatur zu thermischen Verfahren, zur Mikroemulsionsbildung im Aquifer, zum Alkohol-flushing und einer Variante, dem DMD-Verfahren (density-modified displacement) bei dem eine wässrige Emulsion aus Tensid und einem nicht vollständig mit Wasser mischbaren Alkohol in den Aquifer infiltriert wird. Dieses Verfahren kommt dem Mikroemulsionsverfahren am nächsten.

2.3.3 Thermische Verfahren

Thermischen Verfahren wird für die DNAPL-Entfernung aus der gesättigten Zone in [56] ein hohes Potenzial zugesprochen. Versuche in VEGAS zeigten, dass die reine Dampf-injektion nicht geeignet ist, da die Schadstoffsättigung vor der Front der erhitzten Zone zunimmt und eine Mobilisierung des DNAPL nach unten erfolgt. Während der Forschungsarbeiten zur Wasserdampf-injektion (TUBA) kam es in VEGAS zur Weiter- und Neuentwicklung eines Verfahrens, bei dem an Stelle von reinem Wasserdampf ein Gemisch aus Wasserdampf und

Luft in den Boden injiziert wird [57]. Durch den Einsatz des Trägergases Luft wird eine Anreicherung des Schadstoffes an der fortschreitenden Dampffront reduziert, und ein Absinken der flüssigen Schadstoffe bei geeigneter Luftströmung vermieden. Im Rahmen des EU-Projektes PURE (Protection of Groundwater Resources at Industrially Contaminated Sites) konnte dieses in-situ-Verfahren für die gesättigte Zone weiterentwickelt und zur Anwendungsreife gebracht werden. 2003 wurde von VEGAS mit diesem Verfahren ein Pilotprojekt durchgeführt [58], bei dem PER extrahiert auch aus der gesättigten Zone extrahiert werden konnte. Mittlerweile wurde mit einem zweiten Pilotprojekt in der Nähe von Karlsruhe begonnen, das weiteren Aufschluss über die Eignung des Verfahrens für die Sanierung auch der gesättigten Zone geben soll.

2.3.4 Alkohol-Flushing

Parallel zu den Versuchen zur Mikroemulsion wurde in VEGAS eine Sanierungstechnologie basierend auf Alkoholspülung entwickelt. Durch Injektion von Alkoholen (Dichte ca. $0,8 \text{ g/cm}^3$), die sich bei Kontakt mit der Schadstoffphase vermischen, wird die Dichte des Schadstoffs (DNAPL) herabgesetzt. Damit wird der DNAPL (im DNAPL-Wasser-Alkohol-Gemisch) hydraulisch kontrollierbar, eine unkontrollierte nach unten gerichtete Verlagerung des Schadstoffs lässt sich verhindern.

In Säulenexperimenten konnte nachgewiesen werden, dass nach der Durchströmung des Schadensherdes mit weniger als zwei Porenvolumina Alkohol-Cocktail die Schadstoffphase zu über 95 % abgereinigt war [59].

Aufbauend auf den Säulenexperimenten (1D) wurden großskalige, zweidimensionale Experimente in der Großen VEGAS-Rinne durchgeführt. Hierbei wurde die notwendige Vertikalströmung durch Horizontalbrunnen aufgebaut und auch in diesen Experimenten konnte der Schadstoff durch den Einsatz weniger Porenvolumina abgereinigt werden [60].

Parallel zu den in VEGAS durchgeführten Experimenten wurde an der Universität Karlsruhe eine gezielte Injektion (2D) getestet, d.h. Alkohol-Cocktail führende Stromröhren wurden durch wasserführende Stromröhren gestützt. Ziel dieser Experimente war die Reduzierung der benötigten Cocktailmenge, um das Verfahren mittelfristig auch für die Praxis ökonomisch anwendbar zu machen [61].

In der letzten Phase des Forschungsvorhabens wurden die Stuttgarter und die Karlsruher Komponenten in einem heterogenen dreidimensionalen Versuch (VEGAS-Großbehälter) zusammengeführt. Diese Versuche wurden kürzlich abgeschlossen, die Ergebnisse wurden nach Kenntnis der Berichte bisher noch nicht veröffentlicht.

Aussagen über die Wettbewerbsfähigkeit und auch über den direkten Vergleich der einzelnen Methoden können derzeit noch nicht gemacht werden, da die endgültigen Forschungsergebnisse insbesondere im Projekt Alkoholspülung noch nicht veröffentlicht worden sind. Eine Veröffentlichung detaillierter Ergebnisse ist nach dem Abschluss laufender Promotionsvorhaben zu erwarten.

2.3.5 DMD-Verfahren

Als Variante des Alkohol-Flushings kann ein Verfahren angesehen werden, bei dem ein nicht vollständig mit Wasser mischbarer Alkohol, wie z.B. 1-Butanol, mit Hilfe einer Emulsion in den Aquifer eingebracht wird [62]. Zur Stabilisierung der Öl-in-Wasser-Emulsionen werden Tenside zugesetzt. Mit diesem Verfahren wird die mobilisierende Wirkung von Tensiden mit

einer Dichtereduktion verknüpft. Es wurden verschiedene anionische [63] oder nichtionische Tenside [64] verwendet, u. a. auch Aerosol OT (Natrium-bis-(2-ethylhexyl)sulfosuccinat). Die Emulsionen enthielten zusätzlich Elektrolyte (CaCl_2 , NaCl). Das Verfahren nimmt eine Stellung zwischen Tensidspülung, Alkohol-Flushing und Mikroemulsionsverfahren ein. Es befindet sich allerdings noch im Stadium von Laborversuchen. Die Experimente zur Schadstoffextraktion wurden bisher nur bei Raumtemperatur durchgeführt [63 - 65]. Eine Beurteilung im Vergleich zu den alternativen Verfahren ist noch nicht möglich, weil gerade die Reduzierung der Temperatur und Effekte der Aufwärtskalierung für Emulsionen für das Fließen im Boden kritisch und nicht vorhersagbar sind.

2.3.6 Mikroemulsionsbildung im Aquifer

Während der Laufzeit des Projektverbundes wurden Arbeiten zur Optimierung der Tenside [66], zur Verwendung von Konzentrationsgradienten [67] und zur Modellierung der Mikroemulsionsbildung im Aquifer [68] veröffentlicht. Ein entscheidender Durchbruch bei der Anwendung dieses Verfahrens, das für LNAPL im Feldmaßstab bereits erfolgreich durchgeführt wurde, konnte zur Sanierung von DNAPL-Schäden allerdings nicht erzielt werden.

2.3.7 Fortschritte zu anderen Fragestellungen

Neben Fortschritten zu alternativen Verfahren gab es auch eine Weiterentwicklung zu anderen Fragestellungen, welche die Arbeiten der Projektpartner betreffen. Diese lagen vor allem bei der Formulierung von Mikroemulsionen durch die (potenzielle) Verwendung alternativer Komponenten, der Aufbereitung und der biologische Nachsorge.

2.3.7.1 Mikroemulsionen

In einer Dissertation [69] an der TU Freiberg wurden Mikroemulsionen mit ausschließlich nichtionischen Tensiden für die gleichzeitige Extraktion von Schwermetallen und organischen Schadstoffen untersucht. Das dort gezeigte Phasendiagramm des Systems RME/Wasser/Brij 30 + Butoxyethanol (Seite 86) weist keine Flüssigkristalle bei 10 °C auf. Allerdings wurde der für die in-situ-Sanierung wichtige Temperaturbereich offensichtlich auch nicht eingehend untersucht.

Der Vorteil dieser Mikroemulsion ist eine wahrscheinlich problemlose Abbaubarkeit der einzelnen Komponenten. Nachteilig sind der hohe Tensidgehalt (> 40 %) und die Verwendung von Butoxyethanol (Ethylenglykolmonobutylether). Dieses weist ähnliche Eigenschaften wie Hexanol auf und unterliegt somit der gleichen Problematik wie die Alkohole, die beim Alkohol-flushing eingesetzt werden. Wegen der Explosionsgrenze von 1,9 - 10,3 Vol-% müssen bei der Handhabung des Stoffes besondere Schutzmaßnahmen ergriffen werden. Wegen des vergleichsweise niedrigen Siedepunktes von 170 °C ist die Abtrennung von PER aufwändiger als bei der im Projektverbund verwendeten Mikroemulsion.

Für die Extraktion von Schadstoffen aus Böden wurden von Yayanti et al. [70] Propylen-glykoethersulfate verzweigter Alkohole verwendet, die in der Lage sind, mit verschiedenen Ölen Mikroemulsionen zu bilden. Dabei kann die hierfür notwendige Polarität durch den Grad der Propoxylierung in gewissen Grenzen eingestellt werden. Diese Tenside könnten sich auch zur Substitution von Natrium-bis-(2-ethylhexyl)sulfosuccinat eignen. Sie sind allerdings nicht kommerziell erhältlich. Zu ihrer Herstellung ist eine Propoxylierungsanlage notwendig, die in Jülich nicht zur Verfügung stand. Entsprechende Produkte wären nur zu sehr hohen

Preisen über Auftragssynthesen erhältlich gewesen. Deshalb wurde von einer Untersuchung dieser Substanzklasse abgesehen.

2.3.7.2 Aufbereitung

Als Alternativen zu dem im Projektverbund verwendeten Fallfilmverdampfer käme für die Schadstoffabtrennung eventuell auch die Pervaporation in Frage, die in [71, 72] als Verfahren bei der Rückgewinnung von Tensidlösungen eingesetzt wurde. Von Interesse könnte auch die Zersetzung des Schadstoffs mittels Ultraschall sein [72].

2.3.7.3 Messtechnik

Einen interessanten Ansatz für die Verfolgung von Emulsionen (und wohl auch Mikroemulsionen) im Grundwasserleiter bieten Leitfähigkeitsmessungen, wie sie in [22] beschrieben sind.

2.3.8 Biologische Nachsorge

Yang & McCarty [74] zeigten die Eignung eines Pflanzenöls als Co-Substrat für den biologischen PER-Abbau. In Ihren Untersuchungen wurde neben Pentanol und Calcium-Oleat Olivenöl eingesetzt, um den mikrobiellen Abbau von PER zu stimulieren. Dabei ergab sich, dass Olivenöl am besten als Auxiliarsubstrat geeignet war, da es sich aufgrund seiner DNAPL-Eigenschaften mit der PER-Phase vermischt und dadurch die reduktive Dechlorierung direkt stimulierte, ohne die Bildung überschüssiger Methanmengen.

J. Hunter [75] stellte fest, dass Pflanzenöle den biologischen Abbau von Trichlorethen fördern können, in dem man sie direkt in den kontaminierten Aquifer als Emulsion einpresst. Er empfiehlt die Verwendung von Sojaöl. Diese Publikationen untermauern die TZW-Untersuchungsergebnisse zur Eignung von Mikroemulsion (Hauptkomponente Rapsmethylester, hergestellt aus Rapsöl) als Auxiliarsubstrat für die reduktive PER-Dechlorierung.

Im Anschluss an eine teilweise Schadstoffextraktion mit Tensiden wurde in einem Feldversuch reduktive Dechlorierung von PER festgestellt [76].

Literatur

[52] J.D. Childs, E. Acosta, R. Knox, J.H. Harwell, D.A. Sabatini
Improving the extraction of tetrachloroethylene from soil columns using surfactant gradient systems

J. Contamin. Hydrol. **2004**, 71, 27-45

[53] C. Hofstee, C. Gutiérrez Ziegler, O. Trötschler, J. Braun
Removal of DNAPL contamination from the saturated zone by combined effect of vertical upward flushing and density reduction

Contamin. Hydrol. **2003**, 67, 61-78

[54] E.H. Hill III, M. Moutier, T. Alfaro, C.T. Miller
Remediation of DNAPL pools using dense brine barrier strategies

Environ. Sci. Technol. 2001, 35(14), 3031-3039

- [55] D.N. Johnson, J.A. Pedit, C.T. Miller
Efficient, near-complete removal of DNAPL from three-dimensional heterogeneous porous media using a novel combination of treatment technologies
Environ. Sci. Technol. **2004**, 38(19), 5149-5156
- [56] A. Leeson, M.C. Kavanaugh, J.A. Marqusee, B. Smith, H. Stroo, M. Unger, C. Vogel, H.C. Ward
Remediating Chlorinated Solvent Source Zones
Environ. Sci. Technol. A-Pages 2003, 37(11), 224A-230A
- [57] R. Schmidt, H.-P. Koschitzky
Pilothafte Sanierung eines BTEX-Schadens an einem ehemaligen Gaswerkstandort mit der thermisch unterstützten Bodenluftabsaugung (TUBA) durch Dampf-injektion
Wiss. Bericht WB 99/5 (HG 262), Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart
- [58] A. Färber, H. Class, D. Jie, H.-P. Koschitzky, C. Müller, S. Ochs, O. Trötschler
Dampf-Luft-Injektion zur in-situ-Sanierung der gesättigten Bodenzone: Anwendungsmöglichkeiten und Erfahrungen aus einer PCE-Sanierung in Albstadt
in: *Mitteilungen, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, Heft 131, VEGAS-Statuskolloquium 2004*, Herausgeber: B. Barczewski, H.-P. Koschitzky, K. Weber, R. Wege, ISBN: 3-933761-35-2, Institut für Wasserbau der Universität Stuttgart, 2004, Seiten 78-87.
- [59] P. Greiner, J. Braun, J. Schnieders, H. Koschitzky, O. Trötschler, K. Weber
Alcohol Flushing: From Lab Scale to Field Scale
Fourth International Conference on Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds, Monterey, California, USA, 5/2004.
- [60] J. Braun, P. Greiner, H. Koschitzky, J. Schnieders, K. Weber:
Übersicht über Technologieentwicklungen zur NAPL-Sanierung mittels Alkoholcocktails
in: *Mitteilungen, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, Heft 131, Symposium Ressource Fläche und VEGAS-Statuskolloquium 2003*, Herausgeber: V. Schrenk, K. Batera, B. Barczewski, K. Weber, H.-P. Koschitzky, ISBN: 3-933761-27-1, Institut für Wasserbau der Universität Stuttgart, Seiten 141-152
- [61] U. Mohrlök, K. Heinrich,
In-situ-Grundwassersanierung durch gezielte Alkoholinjektion mittels Grundwasser-Zirkulations-Brunnen (GZB): Ergebnisse aus Laborversuchen
in: *Mitteilungen, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, Heft 131, VEGAS-Statuskolloquium 2004*, Herausgeber: B. Barczewski, H.-P. Koschitzky, K. Weber, R. Wege, ISBN: 3-933761-35-2, Institut für Wasserbau der Universität Stuttgart, 2004, Seiten 113-120.
- [62] T.C.G. Kibbey, C.A. Ramsburg, K.D. Pennell, K.F. Hayes
Implications of alcohol partitioning behavior for in situ density modification of entrapped nonaqueous phase liquids
Environ. Sci. Technol. 2002, 36(1), 104-111
- [63] C.A. Ramsburg, K.D. Pennell
Density-modified displacement for DNAPL source zone remediation: density conversion and recovery in heterogeneous aquifer cells
Environ. Sci. Technol. **2002**, 36(14), 3176-3187
- [64] C.A. Ramsburg, K.D. Pennell, T.C.G. Kibbey, K.F. Hayes
Use of a surfactant stabilized emulsion to deliver 1-butanol for density-modified displacement of trichloroethene
Environ. Sci. Technol. **2003**, 37(18), 4246-4253

- [65] C.A. Ramsburg, K.D. Pennell, T.C.G. Kibbey, K.F. Hayes
Refinement of the density-modified displacement method for efficient treatment of tetrachloroethene source zones
J. Contamin. Hydrol. **2004**, 74(1-4), 105-131
- [66] E. Acosta, S. Tran, H. Uchiyama, D.A. Sabatini, J.H. Harwell
Formulating chlorinated hydrocarbon microemulsions using linker molecules
Environ. Sci. Technol. **2002**, 36(21), 4618-4624
- [67] J.D. Childs, E. Acosta, R. Knox, J.H. Harwell, D.A. Sabatini
Improving the extraction of tetrachloroethylene from soil columns using surfactant gradient systems
J. Contamin. Hydrol. **2004**, 71(1-4), 27-45
- [68] Y. Ouyang, J.S. Cho, R.S. Mansell
Simulated formation and flow of microemulsions during surfactant flushing of contaminated soil
Water Res. **2002**, 36(1), 33-40
- [69] S. Katzer:
Einsatz von Mikroemulsionen zur Behandlung schwermetallkontaminierter und organisch belasteter Böden
Dissertation, TU Bergakademie Freiberg, 06.05.2002
- [70] S. Yayanti, L.N. Britton, V. Dwarakanath, G.A. Pope
Laboratory evaluation of custom-designed surfactants to remediate NAPL source zones
Environ. Sci. Technol. **2002**, 36, 5491-5497
- [71] L. Hitchens, L.M. Vane, F.R. Alvarez
VOC removal from water and surfactant solutions by pervaporation: a pilot study
Sep. Purif. Technol. **2001**, 24(1-2), 67-84
- [72] L.M. Vane, L. Hitchens, F.R. Alvarez, E.L. Giroux
Field demonstration of pervaporation for the separation of volatile organic compounds from a surfactant-based soil remediation fluid
J. Hazard. Mat. **2001**, B81, 141-166
- [72] H. Destailats, T.W. Alderson II, M.R. Hoffmann
Application of ultrasound in NAPL remediation: Sonochemical degradation of TCE in aqueous surfactant solutions
Environ. Sci. Technol. **2001**, 35(14), 3019-3024
- [73] V. Jain, A.H. Demond
Conductivity reduction due to emulsification during surfactant enhanced-aquifer remediation. 2. Formation of emulsion in situ
Environ. Sci. Technol. **2002**, 36(24), 5434-5440
- [74] Y. Yang, P.L. McCarty
Comparison between donor substrates for biologically enhanced tetrachloroethene DNAPL dissolution
Environ. Sci. Technol. **2002**, 36(15), 3400-3404
- [75] Hunter, J.:
Agency says vegetable oil removes pollutant from water
Watertechonline (2002), http://www.watertechonline.com/News.asp?mode=4&N_ID=30886

[76] C.A. Ramsburg, L.M. Abriola, K.D. Pennell, F.E. Löffler, M. Gamache, B.K. Amos, E.A. Petrovskis

Stimulated microbial reductive dechlorination following surfactant treatment at the Bachman Road site

Environ. Sci. Technol. 2004, 38(22), 5902-5914

2.4 Veröffentlichungen

Anlässlich des achten International FZK/TNO-Kongresses ConSoil Conference on Contaminated Soil in Gent / Belgien (12.-16.05.2003) stellte der Projektverbund seine Arbeiten in sieben Vorträgen und vier Posterbeiträgen vor. Sie wurden auf der CD mit den Tagungsbeiträgen veröffentlicht und sollen hier zusammengefasst aufgelistet werden.

Beiträge in

ConSoil 2003, Proceedings of the 8th International FZK/TNO Conference on Contaminated Soil, Gent (Belgien) 12.-16. Mai 2003, Forschungszentrum Karlsruhe, Wissenschaftliche Berichte, FZKA 6943. G.J. Annokkée, F. Arendt, O. Uhlmann(Herausgeber), Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Postfach 340, Karlsruhe, 2004

Lecture Session C.10: *Electrochemical and Microemulsions*

Seitz, F.; Kohlmeier, E.; Schenk, T.:

Field studies for the application of microemulsions

Seiten 1812-1816

Subklew, G.; Barczewski, B.; Kohlmeier, E.; Tiehm, A.:

Microemulsion – an efficient solution for the in situ-remediation of DNAPL-contaminated sites; general overview on the research and field test activities of the project network

Seiten 1817-1823

Special Session 17: *Microemulsions: An efficient Solution for the in situ-Remediation of DNAPL-Contaminated Sites*

Memminger, B.; Barczewski, B.; Fütterer, N.; Schlüpen, J.; Fürst, L.: Hasse, H.:

Microemulsion enhanced in-situ remediation – recycling concepts for the additive

Seiten 3830-3833

Schenk T.; Seitz, F.; Kohlmeier, E.:

Field studies for the application of microemulsions

Seiten 3825-3829

Stuhrmann, M.; Schlüpen, J.:

Design of hydraulic systems for in-situ remediation of DNAPLs with microemulsion

Seiten 3822-3824

Subklew, G.; Barczewski, B.; Kohlmeier, E.; Tiehm, A.:

Microemulsion – an efficient solution for the in situ-remediation of DNAPL-contaminated sites. The project network: General overview on the research and field test activities

Seiten 3819-3821

Tiehm, A.; Schell, H.; Stieber, M.:

Biodegradation of microemulsion components

Seiten 3834-3838

Short Communications Theme C: Remediation Technologies & Concepts

Memminger, B.; Barczewski, B.; Schlüpen, J.; Fürst, L.; Hasse, H.:

Microemulsion enhanced In-situ remediation – recycling concepts for the additive.

Seiten 2356-2357

Schenk, T.; Seitz, F.; Kohlmeier, E.:

Field studies fort he application of microemulsions

Seiten 2897-2901

Schlüpen, J.; Subklew, G.:

Microemulsion – a solution for in situ soil remediation

Seiten 2425-2426

Stuhrmann, M.; Schlüpen, J.:

Design of hydraulic systems for in-situ remediation of DNAPLs with microemulsion

Seiten 2358

Weitere Veröffentlichungen

C. Strunk

Status-quo-Bestimmung von geologischen, chemischen und hydraulischen Bodenparametern an einem Feldstandort in Eppelheim.

Diplomarbeit, Fachhochschule Weihenstephan, 27.02.2002

Fütterer, N.

Untersuchungen zur Aufbereitung von Mikroemulsions-Waschlösungen bei der in situ Sanierung von CKW-SchadensfällenDiplomarbeit, erstellt am Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart;
Fachhochschule Nordhausen, 2002

Patzelt, E.

In situ-Sanierung von DNAPL-Schadensfällen mit Hilfe von Mikroemulsionen. Anwendbarkeit hydraulischer Verfahrenstechnologien unter Berücksichtigung der Strömungseigenschaften der MikroemulsionDiplomarbeit, erstellt am Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart;
Fachhochschule Nordhausen, 2002

Institut für Chemie und Dynamik der Geosphäre:

Wissenschaftlicher Ergebnisbericht 2001 des Forschungszentrums Jülich; 36.72.0 Grundlagen der Schadstoffisolierung und BehandlungIm Internet verfügbar unter www.fz-juelich.de/scientific-report-2001/index.lw?index=171

Institut für Chemie und Dynamik der Geosphäre: ICG-V Sedimentäre Systeme:

Wissenschaftlicher Ergebnisbericht 2002 des Forschungszentrums JülichIm Internet verfügbar unter www.fz-juelich.de/scientific-report-2002/index.php?_p=15&fe=40

Kohlmeier, E.; Seitz, F.; Schenk, T.:

Untersuchungen zur Feldtauglichkeit mikroemulsionsunterstützter DNAPL-Sanierungen am Feldstandort "Eppelheim"VEGAS-Statuskolloquium, Universität Stuttgart, 10.10.2002,
Kurzfassungen der Beiträge, 56-72

Schlüpen, J.:

Mikroemulsion – eine Lösung für die Bodensanierung

VEGAS-Statuskolloquium, Universität Stuttgart, 10.10.2002,
Kurzfassungen der Beiträge, 45-50

Stuhrmann, M., Barczewski, B.; Memminger, B.:

Technologienentwicklung zur in situ-Sanierung von DNAPL mittels Mikroemulsionen

VEGAS-Statuskolloquium, Universität Stuttgart, 10.10.2002,
Kurzfassungen der Beiträge, 51-56

Tiehm, A.; Schell, H.; Stieber, M.:

Mikrobieller Abbau von Restkomponenten der Mikroemulsion

VEGAS-Statuskolloquium, Universität Stuttgart, 10.10.2002
Kurzfassungen der Beiträge, 57-64

Schäfer, D.:

Bilanzierung des sanierungsbezogenen Abbaus von Rapsmethylester unter verschiedenen aeroben und aeroben Bedingungen

Diplomarbeit, durchgeführt am Technologiezentrum Wasser, Karlsruhe, Fachhochschule
Giessen Friedberg, 2003

Subklew, G.; Barczewski, B.; Kohlmeier, E.; Tiehm, A.:

Mikroemulsionen für die *in situ*-Sanierung DNAPL-belasteter Standorte

Beiträge zum 5. Symposium Natural Attenuation, Frankfurt, 02.-03.12.2003, DECHEMA e.V.
(Hrsg.) 149-151

Subklew, G.; Ulrich, J.; Haegel, F.-H.; Flucht, R.; Fürst, L.; Groeneweg, J.; Höltkemeier, A.;
Joel T.; Barczewski, B.; Stuhrmann, M.; Memminger, B.; Fütterer N.; Seitz, F.; Schenk, T.;
Kohlmeier, E.; Schell, H.; Stieber, M.; Tiehm A.:

Mikroemulsionen für die *in situ*-Sanierung DNAPL-belasteter Standorte

Beiträge zum Symposium *Ressource Fläche* und VEGAS-Statuskolloquium, 30.09.-
01.10.2003, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, 2003, V. Schrenk, K. Batereau, B.
Barczewski, K. Weber, H.-P. Koschitzky (Hrsg), ISBN 3-933761-27-1 ISSN 0343-1150,
205-214

Subklew, G.; Ulrich, J.; Haegel, F.-H.:

In situ-remediation of aquifers at DNAPL-contaminated sites. The research and field test activities of a project network

Book of Abstracts; Workshop of Research on Ecology and Environmental Protection at
Yangtze River, Chongqing Institute of Three Gorges, Wanzhou, Chongqing (China), 14.-
15.10.2003, Seiten 23-24

Subklew, G.; Barczewski, Kohlmeier, E.; Tiehm, A.;

Microemulsions as solution for the in-situ-remediation of DNAPL-contaminated sites

Tagungsband PORANAL – 9th International Symposium on Particle Size Analysis,
Environmental Protection and Powder Technology, Balatonfüred (Ungarn), 05.09.-
07.09.2004. Ungarische Chemische Gesellschaft für Messtechnik, Automatisierung und
Informatik (Herausgeber), Budapest, 2004, Seite 39

Subklew, G.; Ulrich, J.; Fürst, L.; Höltkemeier, A.; Joel, T.; Barczewski, B.; Stuhrmann, M.;
Tkachenko, G.; Phillipin, R.; Seitz, F.; Schenk, T.; Kohlmeier, E.; Derq, M.; Schell, H.;
Stieber, M.; Tiehm, A.;

In-Situ-Sanierung von DNAPL-Schadensfällen mittels Mikroemulsionen

in: *Mitteilungen, Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, Heft 131, VEGAS-
Statuskolloquium 2004*, Herausgeber: B. Barczewski, H.-P. Koschitzky, K. Weber, R. Wege,
ISBN: 3-933761-35-2, Institut für Wasserbau der Universität Stuttgart, 2004, Seiten 98-105.

Subklew, G.; Barczewski, Kohlmeier, E.; Tiehm, A.;

Mikroemulsion – eine Lösung für die Bodensanierung

Tagungsband 3. Workshop ENA-In-situ Sanierung, Schwerte, 17.-18.03.2005

Geplante Veröffentlichungen

Zu den Ergebnissen des Projektverbundes sind noch Veröffentlichungen des TZW zu den biologischen Arbeiten sowie von VEGAS gemeinsam mit FZJ zum Fließverhalten der Mikroemulsionen und zu den Ergebnissen des Großversuchs in referierten Zeitschriften geplant.

Die diesem Bericht zugrundeliegenden Vorhaben wurden mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter den in der Tabelle auf dem Deckblatt aufgeführten Kennzeichen gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt tragen die Autoren.