

---

**Sonderdruck**

# altlasten spektrum

## **FOKS – Focus on Key Sources**

**Abschluss der Integralen Grundwasseruntersuchung  
Stuttgart-Feuerbach Störerauswahl und Einbindung  
der Einzelfallbearbeitung in eine übergeordnete  
Sanierungsstrategie für den ganzen Stadtteil**

Hermann Josef Kirchholtes, Peter von Schnakenburg, Thomas Ertel,  
Uli Schollenberger, Stefan Spitzberg, Wolfgang Schäfer



**CENTRAL  
EUROPE**  
COOPERATING FOR SUCCESS.



**EUROPEAN UNION  
EUROPEAN REGIONAL  
DEVELOPMENT FUND**

This project is implemented through the CENTRAL EUROPE Programme co-financed by the ERDF.

**ESV**

ERICH SCHMIDT VERLAG

## Lokale Projektkoordination:

# STUTTGART



Landeshauptstadt Stuttgart  
Amt für Umweltschutz

## Internationale Projektpartner:



weitere Infos: <http://projectfoks.eu/>

## Impressum

### altlasten spektrum

Organ Ingenieurtechnischer Verband  
Altlastenmanagement und Flächenrecycling e.V. (ITVA)

[www.ALTLASTENdigital.de](http://www.ALTLASTENdigital.de)

Jahrgang: 21 (2012)

Erscheinungsweise: Die Zeitschrift erscheint 6 mal im Jahr

Redaktion: [www.altlastenspektrum-itva.de](http://www.altlastenspektrum-itva.de)

Jörg Frauenstein, Grenzstraße 18 C, 15732 Eichwalde,  
E-Mail: [redaktion@altlastenspektrum-itva.de](mailto:redaktion@altlastenspektrum-itva.de),  
Tel.: 0340/21 03 30 64 (UBA/Dessau-Roßlau), Fax: 032 12 12 57 682

Herausgeber: Ingenieurtechnischer Verband für Altlastenmanagement  
und Flächenrecycling e.V.

Geschäftsstelle: Invalidenstraße 34, 10115 Berlin  
Tel.: 030/48 63 82 80, Fax: 030/48 63 82 82,  
E-Mail: [info@itv-altlasten.de](mailto:info@itv-altlasten.de), Internet: [www.itv-altlasten.de](http://www.itv-altlasten.de)

Herausgeberbeirat: Prof. Dr. P. DOETSCH, RWTH Aachen;  
Dr. M. DOMBERT, DOMBERT RECHTSANWÄLTE, Potsdam;  
Dr. K.-P. FEHLAU, Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft  
des Landes Nordrhein-Westfalen i.R., Düsseldorf;  
Dr.-Ing. V. FRANZIUS, Umweltbundesamt Dessau-Roßlau, i.R.;  
Dr. H. FRIEGE, AWISTA Gesellschaft für Abfallwirtschaft und Stadtreinigung  
mbH, Düsseldorf;  
Prof. Dr.-Ing. habil. A. HETTLER, Universität Dortmund, Lehrstuhl Baugrund-  
Grundbau, Dortmund;  
Prof. Dr. B. MAHRO, Hochschule Bremen;  
Prof. Dr. jur. R. MÜLLER, Prof. Dr. Müller & Kollegen, Bad Lauchstädt;  
Dr. N. SIMMLEIT, TPA, Gesellschaft für Qualitätssicherung und Innovation  
GmbH, Köln;  
Dr. F. G. SIMON, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin.

Verlag: Erich Schmidt Verlag GmbH & Co. KG, Genthiner Straße 30 G, 10785  
Berlin, Tel.: 030/25 00 85-0, Fax: 030/25 00 85-305, E-Mail: [ESV@ESVmedien.de](mailto:ESV@ESVmedien.de),  
Internet: [www.ESV.info](http://www.ESV.info)

Vertrieb: Erich Schmidt Verlag GmbH & Co. KG, Genthiner Straße 30 G, 10785  
Berlin, Postfach 30 42 40, 10724 Berlin, Tel. 030/25 00 85-229, Fax: 030/25 00  
85-275, E-Mail: [ABO-Vertrieb@ESVmedien.de](mailto:ABO-Vertrieb@ESVmedien.de), Konten: Berliner Bank AG, Kto-Nr.  
51 220 31 01, (BLZ 100 708 48), IBAN DE31 1007 0848 0512 2031 01, BIC(SWIFT)  
DEUTDEB110

Bezugsbedingungen: Bezugsgebühr im Jahresabonnementspreis € (D) 68,40;  
Einzelbezug je Heft € (D) 13,40; jeweils einschließlich 7 % Mehrwertsteuer und  
zzgl. Versandkosten. Sonderpreis für Mitglieder des ARS Jahresabonnement sfr.  
90,00 zzgl. Versandkosten. Die Bezugsgebühr wird jährlich im voraus erhoben.  
Abbestellungen sind mit einer Frist von 2 Monaten zum 1. 1. j. J. möglich.  
Keine Ersatz- und Rückzahlungsansprüche bei Störung oder ausbleiben durch  
höhere Gewalt oder Streik. Preise für gebundene Ausgaben früherer Jahrgänge  
auf Anfrage.

Anzeigen: Erich Schmidt Verlag GmbH & Co. KG, Genthiner Str. 30 G, 10785  
Berlin, Tel. 030/25 00 85-628, Fax: 030/25 00 85-630, E-Mail: [Anzeigen@ESV-  
medien.de](mailto:Anzeigen@ESV-<br/>medien.de). Anzeigenleitung: Sibylle Böhler. Es gilt Anzeigenpreisliste Nr. 14,  
1. Januar 2012, die unter <http://mediadaten.ALTLASTENdigital.de> bereitsteht  
oder auf Wunsch zugesandt wird.

Manuskripte: Hinweise für die Abfassung von Beiträgen stehen Ihnen auch  
als PDF zur Verfügung unter: [www.ESV.info/zeitschriften.html](http://www.ESV.info/zeitschriften.html). – Von Text und  
Tabellen erbitten wir neben einem sauberen Ausdruck auf Papier – möglichst  
ohne handschriftliche Zusätze – das Manuskript auf CD-ROM oder per E-Mail  
bevorzugt in Word, sonst zusätzlich im RTF-Format. Zur Veröffentlichung  
angebotene Beiträge müssen frei sein von Rechten Dritter. Sollten sie auch an  
anderer Stelle zur Veröffentlichung oder gewerblichen Nutzung angeboten  
worden sein, muss dies angegeben werden. Mit der Annahme zur Veröffentli-  
chung überträgt der Autor dem Verlag das ausschließliche Verlagsrecht und  
das Recht zur Herstellung von Sonderdrucken für die Zeit bis zum Ablauf  
des Urheberrechts. Das Verlagsrecht umfasst auch die Rechte, den Beitrag  
in fremde Sprachen zu übersetzen, Übersetzungen zu vervielfältigen und zu  
verbreiten sowie die Befugnis, den Beitrag bzw. Übersetzungen davon in Daten-  
banken einzuspeichern und auf elektronischem Wege zu verbreiten (online  
und/oder offline), das Recht zur weiteren Vervielfältigung und Verbreitung zu  
gewerblichen Zwecken im Wege eines fotomechanischen oder eines anderen  
Verfahrens sowie das Recht zur Lizenzvergabe. Dem Autor verbleibt das Recht,  
nach Ablauf eines Jahres eine einfache Abdruckgenehmigung zu erteilen; sich  
ggf. hieraus ergebende Honorare stehen dem Autor zu. Bei Leserbriefen sowie  
bei angeforderten oder auch unaufgefordert eingereichten Manuskripten  
behält sich die Redaktion das Recht der Kürzung und Modifikation der Manu-  
skripte ohne Rücksprache mit dem Autor vor.

Rechtliche Hinweise: Die Zeitschrift sowie alle in ihr enthaltenen einzelnen  
Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung,  
die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der  
vorherigen Zustimmung des Verlages. Das gilt insbesondere für Vervielfäl-  
tigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die  
Einspeicherung und Verarbeitung in elektronische Systeme. – Die Veröffentli-  
chungen in dieser Zeitschrift geben ausschließlich die Meinung der Verfasser,  
Referenten, Rezensenten usw. wieder. – Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen,  
Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in dieser Zeitschrift berechtigt  
auch ohne Kennzeichnung nicht zu der Annahme, daß solche Namen im  
Sinne der Markenzeichen- und Markenschutzgesetzgebung als frei zu betrach-  
ten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Zitierweise: altlasten spektrum, Jahrgang, Heft, Seite

Sonderdruck: altlasten spektrum, 2012, Heft 3, Seite 101 ff.

ISSN: 0942-3818

Druck: Druckerei Hermann Schlesener, Ullsteinstraße 108, 121091 Berlin

# FOKS – Focus on Key Sources

## Abschluss der Integralen Grundwasseruntersuchung Stuttgart-Feuerbach Störerauswahl und Einbindung der Einzelfallbearbeitung in eine über- geordnete Sanierungsstrategie für den ganzen Stadtteil

Hermann Josef Kirchholtes, Peter von Schnakenburg, Thomas Ertel, Uli Schollenberger, Stefan Spitzberg, Wolfgang Schäfer

### 1 Einleitung

Wie in vielen urbanen Räumen mit langer und intensiver industrieller Nutzung liegen auch in Stuttgart-Feuerbach vielfältige, sich bereichsweise überlagernde Verunreinigungen von Boden und Grundwasser vor. Sowohl die komplexen Schadensmuster in Verbindung mit den komplizierten hydrogeologischen Verhältnissen als auch der stete Nutzungswandel der Flächen führen dazu, dass mit der herkömmlichen grundstücks- bzw. störerbezogenen Vorgehensweise nur eine unzureichende Identifizierung und Charakterisierung von Schadensherden und zugehörigen Schadstofffahnen erreicht wird.

Der Untersuchungsraum liegt im Norden Stuttgarts inmitten des oberirdischen Einzugsgebiets des Feuerbachs, der nach NE zum Neckar entwässert. Das Gewässersystem ist in die Schichten des Mittleren Keupers (Trias) eingetieft. Die hydrogeologischen Verhältnisse kennzeichnet ein schichtig gegliederter Kluftgrundwasserleiter im Gipskeuper (Schluff-Tonsteine mit einzelnen karbonatischen, meist dolomitischen Bänken sowie Sulfatgesteinen, Aquifer 2-5), unterlagert von Unterkeuper und Muschelkalk. Am Hangfuß und in der Talniederung sind die Festgesteine mit Quartär-sedimenten bedeckt, deren Mächtigkeit in Rinnen des ehemaligen Feuerbachs bis zu 10 m beträgt. Die generell nach NE gerichtete Grundwasserfließrichtung

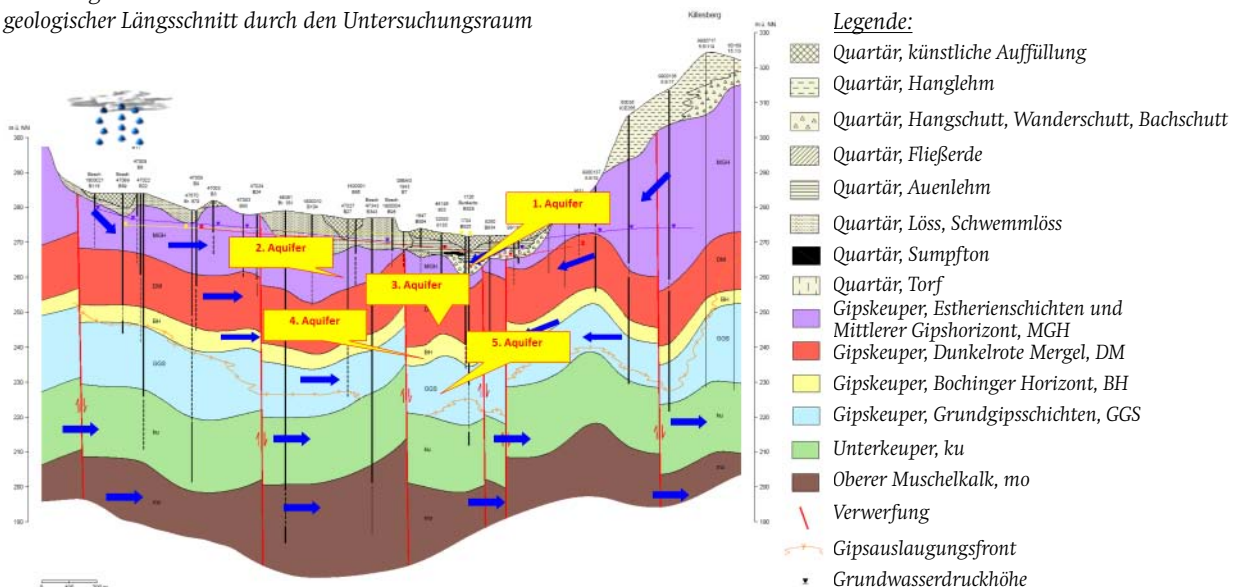


Abbildung 1.1: Luftbild Stuttgart-Feuerbach

kann lokal und in Abhängigkeit saisonaler Schwankungen um mehr als 90° variieren.

Zu Beginn des Projektes MAGIC (Management of Groundwater at Industrially Contaminated Sites, [www.magic-cadses.com](http://www.magic-cadses.com)) im Jahre 2006 waren das Ausmaß und die Größe der Grundwasserkontaminationen nach rund 25-jähriger Einzelfalluntersuchung in Feuerbach immer noch nicht vollständig bekannt. Daher wurde der Untersuchungsraum Stuttgart-

Abbildung 1.2:  
geologischer Längsschnitt durch den Untersuchungsraum



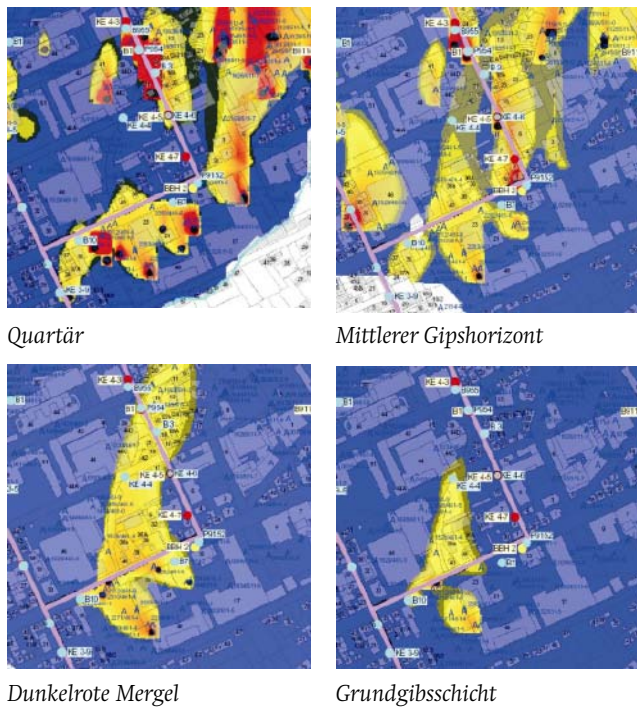


Abbildung 1.3:  
Die Schadstofffahnen in den  
verschiedenen Aquiferen

Feuerbach in den Jahren 2006–2009 nicht einzel-fallbezogen, sondern gesamtheitlich betrachtet, um laterale und vertikale Schadstofftransportpfade sowie das Stoffverhalten im Untersuchungsgebiet zu identifizieren und quantitativ zu beschreiben (Abbildung 1.3). Als wesentliche Werkzeuge kamen Immissionspumpversuche und die Simulation anhand eines Strömungs- und Transportmodells zum Einsatz. Damit konnten die aus 193 Schadensbereichen resultierenden Schadstofffrachten für LCKW quantifiziert werden. Für fünf betroffene Grundwasserstockwerke wurden Übersichten erarbeitet und anhand von Modellszenarien eine Priorisierung für die weitere Bearbeitung vorgenommen. Die wesentlichen Ergebnisse finden sich in Kirchholtes et. al 2010 „Einsatz von Modellwerkzeugen bei der integralen Erkundung von LCKW-Verunreinigungen“ [4], Ertel & Schollenberger 2008 „Handbook for Integral Groundwater investigation – Magic Interreg IIIB Cadres“ [3] sowie „Integrale Grundwasseruntersuchung in Stuttgart-Feuerbach. Ergebnisse des Interreg III B Projektes MAGIC“ [1]. Auf diesen Kenntnisstand baut das Folgeprojekt FOKS (Focus on Key Sources of Environmental Risks, INTERREG IVB CENTRAL, [www.projectfoks.eu](http://www.projectfoks.eu)) auf mit dem Ziel, für prioritäre Schadstofffahnen und Schadensherde, die noch keinem Verursacher zugeordnet waren, eine sachgerechte Störerauswahl zu treffen sowie eine übergeordnete Sanierungsstrategie für den Stadtteil zu erarbeiten, die auch natürliche Schadstoffminderungsprozesse berücksichtigt. Das im Folgenden dargestellte Arbeitsprogramm und die Ergebnisse des FOKS-Projektes umfassen

- Identifizierung der Wirksamkeit natürlicher Schadstoffminderungsprozesse im Untersuchungsraum,
- Weiterentwicklung des numerischen Transportmodells, das den Kenntniserwerb nachbildet,
- Identifizierung von Schadstoffquellen von erheblicher Bedeutung, der jeweiligen Herd-Fahnen-Beziehungen und dazugehörige Störerauswahl,
- Erstellung eines räumlichen Grundwasserbewirtschaftungs- und -sanierungsplanes für das Gesamtgebiet.

Die Umsetzung des Arbeitsprogrammes in Feuerbach erfolgte im Zeitraum November 2008 bis April 2012 und wurde von der EU aus dem Programm INTERREG IVC CENTRAL mit insgesamt 420.000 € bezuschusst.

## 2 Wirksamkeit natürlicher Schadstoffminderungsprozesse im Untersuchungsraum

In *Abbildung 2.1* ist die LCKW-Belastungssituation im Untersuchungsgebiet für die 2000er Jahre (Mittelwerte) in Form von Tortendiagrammen dargestellt. Die im Rahmen von MAGIC modellierte Fahne ist grau hinterlegt. Die farbigen Segmente der Tortendiagramme stellen die jeweiligen Anteile [Mol-%] an Tetrachlorethen (PCE), Trichlorethen (TCE), 1,2-cis-Dichlorethen (cDCE) und Vinylchlorid (VC) bezogen auf ihre Summenkonzentration dar. Die Größe der Kreise kennzeichnet die Summenkonzentration an LCKW. Zum Vergleich ist in *Abbildung 2.2* die Situation in den 1980er Jahren abgebildet. Aufgrund der damals geringeren Zahl an Messstellen kann die damalige Situation nicht so flächendeckend wie die heutige dargestellt werden. Es ist aber deutlich zu erkennen, dass früher in den meisten Messstellen TCE vorherrschte und in einigen Messstellen bereits hohe Anteile an DCE vorlagen. In den 2000er Jahren dominiert hingegen in weiten Teilen PCE und bereichsweise auch DCE.

Darstellung und Vergleich der Stoffmengenkonzentrationen [ $\mu\text{mol/l}$ ] ist vorteilhaft, da die Molmasse der Verbindungen mit abnehmender Chlorierung (von PCE nach Ethen) stark abnimmt. Da Chlor mit einer relativen Atommasse von 35,45 wesentlich schwerer ist als der dieses Atom beim Abbau ersetzende Wasserstoff, werden die Moleküle bei jedem Dechlorierungsschritt leichter. Dies ist für die Bewertung von Abbauprozessen wichtig. Vergleicht man nur Massenkonzentrationen [ $\mu\text{g/l}$ ] miteinander, ergibt sich bei Messreihen (zeitlich oder räumlich) ein Massenverlust schon aus der Substitution von Chlor durch Wasserstoff. Damit könnte irrtümlicherweise auf einen Massenverlust durch Abbau geschlossen werden, auch wenn in Wirklichkeit kein einziges Molekül vollständig dechloriert wurde, sondern nur ein Umbau (Teilabbau) beispielsweise von PCE nach cDCE stattfand.

Zur Verdeutlichung dieser Spektrenveränderung zeigen wir die jährliche Veränderung der LCKW-Zusammensetzung und -Konzentrationen am Bei-

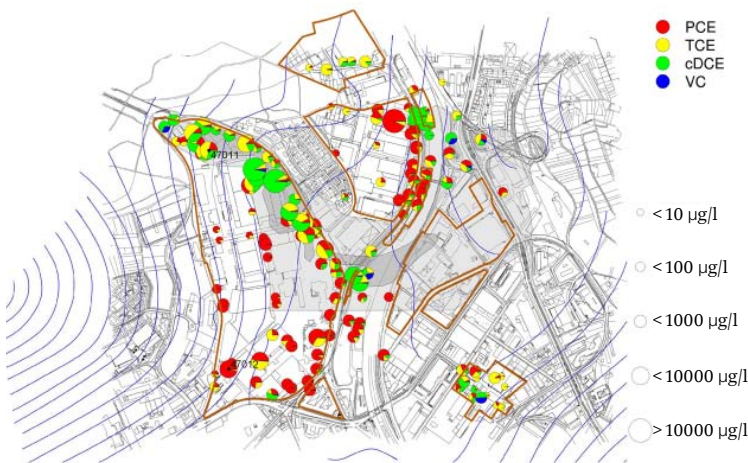


Abbildung 2.1:  
LCKW-Verteilung in den 2000er Jahren



Abbildung 2.2:  
LCKW-Verteilung in den 1980er Jahren

spiel von zwei Messstellen. *Abbildung 2.3* zeigt die Situation am Beispiel der Messstelle 47011. Die obere Graphik zeigt die Zusammensetzung der LCKW in molaren PCE-, TCE-, cDCE- und VC-Anteilen und die untere Graphik die Konzentrationsentwicklung in  $\mu\text{mol/l}$ . Zu Beginn der Messungen bestanden die LCKW zu über 95 Mol-% aus TCE. Seitdem nimmt sowohl der PCE- als auch der cDCE-Anteil zu und der TCE-Anteil entsprechend ab. Er beträgt mittlerweile weniger als 40 Mol-%. Gleichzeitig nehmen auch die LCKW-Summenkonzentrationen ab. Während die TCE-Konzentration stark abgenommen hat, verharrt die PCE-Konzentration weitgehend auf dem ursprünglichen Niveau. Die PCE-Zunahme ist also nur relativ.

Besonders augenfällig ist die relative PCE-Anreicherung in der Messstelle 47012 (*Abbildung 2.4*). Hier hat sich ein früher durch TCE dominierter LCKW-Schaden durch den selektiven TCE-Rückgang zu einem PCE-Schaden entwickelt. cDCE tritt hier nur in geringen Anteilen auf.

Während die Zunahme von cDCE eindeutig durch reduktive Dechlorierung hervorgerufen wird, kann es

zur relativen PCE-Anreicherung durch zwei mögliche Prozesse kommen, die sich auch überlagern können:

1. Die niedriger chlorierten Chlorethene sind wesentlich besser wasserlöslich als PCE. Als Folge der an diesem Standort seit vielen Jahren laufenden hydraulischen Sanierung ist deshalb ein bevorzugter Austrag der besser löslichen Stoffe möglich, was zu einer relativen PCE-Anreicherung führen kann.
2. PCE ist im Gegensatz zu den niedriger chlorierten Chlorethenen aerob nicht abbaubar. Ein selektiver aerober Abbau der niedriger chlorierten Ethene kann deshalb ebenfalls zu einer relativen PCE-Anreicherung führen.

Ob ein selektiver mikrobieller Abbau stattfindet oder nicht, kann durch die Bestimmung der stabilen Kohlenstoffisotope in den LHKW-Molekülen festgestellt werden. Da Moleküle, die ausschließlich das leichte Isotop  $^{12}\text{C}$  enthalten, mikrobiell bevorzugt umgesetzt werden, kommt es zu einer Anreicherung des schwereren Isotops  $^{13}\text{C}$  im verbliebenen Rückstand der abgebauten Substanz. Falls ein selektiver Abbau abläuft, ist deshalb eine deutliche Anreicherung des Isotops  $^{13}\text{C}$

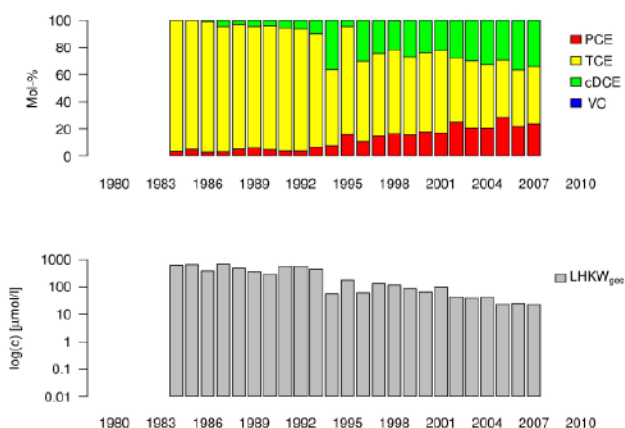


Abbildung 2.3: LCKW-Entwicklung in GWM 47011

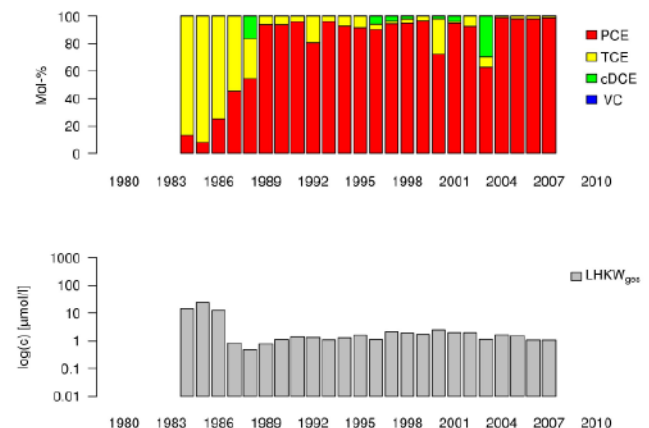


Abbildung 2.4: LCKW-Entwicklung in GWM 47012

an den residualen Anteilen der selektiv abgebauten Stoffe TCE und cDCE zu erwarten, während die nicht oder nur unwesentlich abgebauten PCE-Anteile ihre Ausgangssignatur weitgehend beibehalten.

In *Tabelle 2.1* sind die  $\delta^{13}\text{C}$ -Signaturen der im Januar 2011 aus den in den obigen Beispielen beschriebenen Messstellen entnommenen Grundwasserproben aufgeführt. In beiden Messstellen sind die  $\delta^{13}\text{C}$ -Signaturen von TCE und cDCE im Vergleich zu PCE deutlich schwerer („weniger negativ“). Bei schwereren  $\delta^{13}\text{C}$ -Signaturen als  $-20\text{‰}$  ist generell von einem mikrobiellen Abbau auszugehen, da die zur LCKW-Synthese verwendeten Ausgangsstoffe i. d. R. eine leichtere Signatur aufweisen. Somit kann es als gesichert gelten, dass ein selektiver aerober Abbau der niedriger chlorierten Ethene stattfindet.

Die Kartierung der Redoxverhältnisse zeigte, dass der größte Teil des Untersuchungsgebiets durch ein aerober Milieu geprägt ist, während anaerobe Milieuverhältnisse nur verhältnismäßig kleinräumig auftreten.

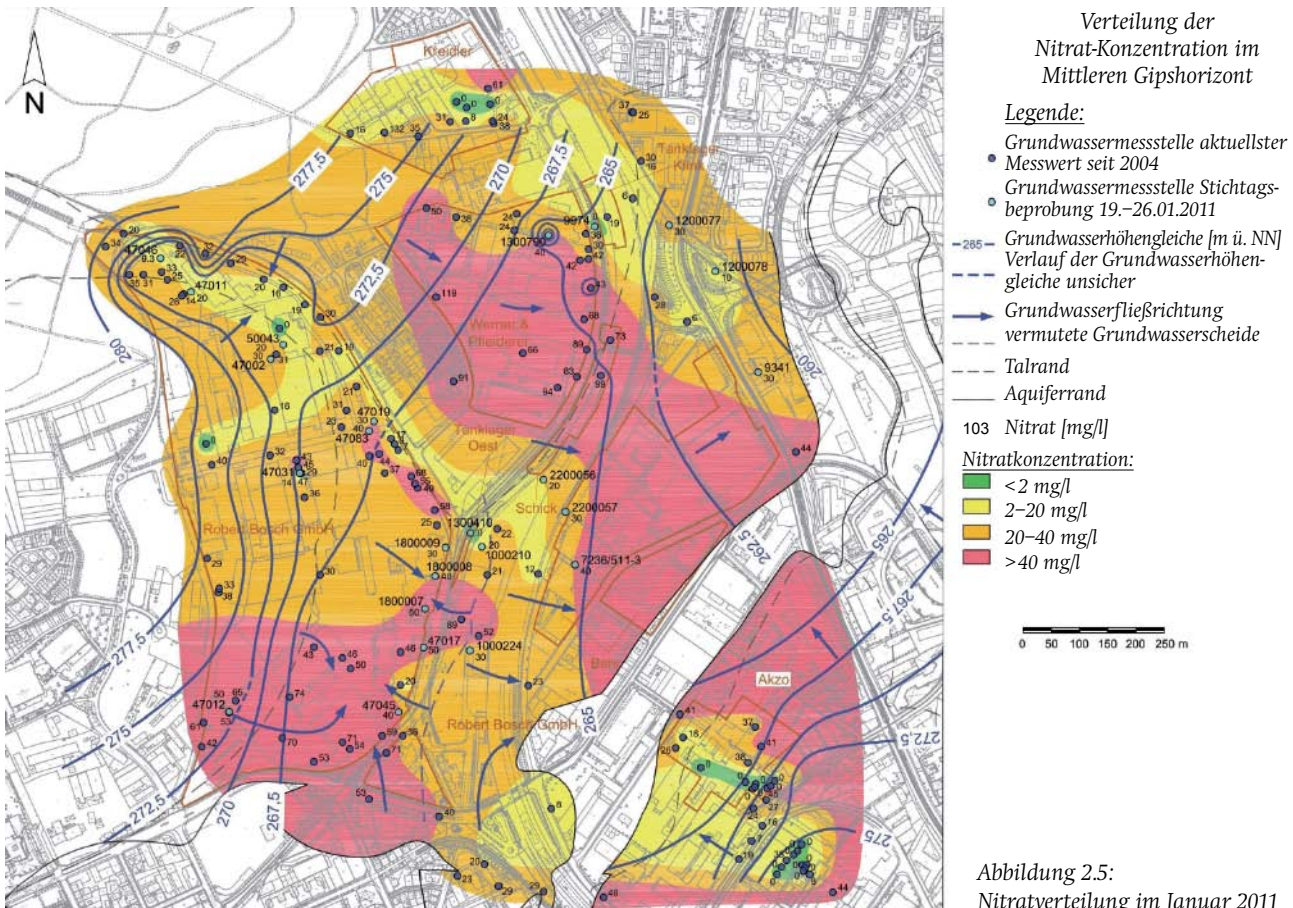
Tabelle 2.1:  $\delta^{13}\text{C}$ -Signaturen in den Messstellen 47011 und 47012 [‰]

GWM	PCE	TCE	cDCE	VC
47011	-26,3	-22,7	-15,5	-
47012	-27,5	-12,3	-1,9	-

In *Abbildung 2.5* ist die Redoxzonierung im Untersuchungsgebiet am Beispiel des Redoxindikators Nitrat dargestellt.

Im Bereich der anaeroben Zonen erfolgt eine reduktive Dechlorierung der primären Schadstoffe PCE und TCE mit Bildung der Metabolite cDCE und teilweise VC. Der größte Teil des im Untersuchungsgebiet vorhandenen TCEs wurde als Primärschadstoff eingetragen. Nur im Bereich der kleinräumigen anaeroben Zonen findet zusätzlich eine TCE-Bildung durch die reduktive Dechlorierung von PCE statt.

Außerhalb dieser anaeroben Zonen wird PCE nicht abgebaut, während die niedriger chlorierten Ethene verbreitet aerob ohne Bildung der genannten Metaboliten mineralisiert werden. Diese Prozesse führen zu der veränderten Schadstoffzusammensetzung und zum heutigen Verteilungsmuster der LCKW im Grundwasser. Es ist davon auszugehen, dass der Massenumsatz durch aeroben LCKW-Abbau im Untersuchungsgebiet deutlich größer ist als durch reduktive Dechlorierung. Eine ausschließliche Betrachtung der Metabolite cDCE und VC führt deshalb zu einer Unterschätzung des mikrobiellen LCKW-Abbaus.



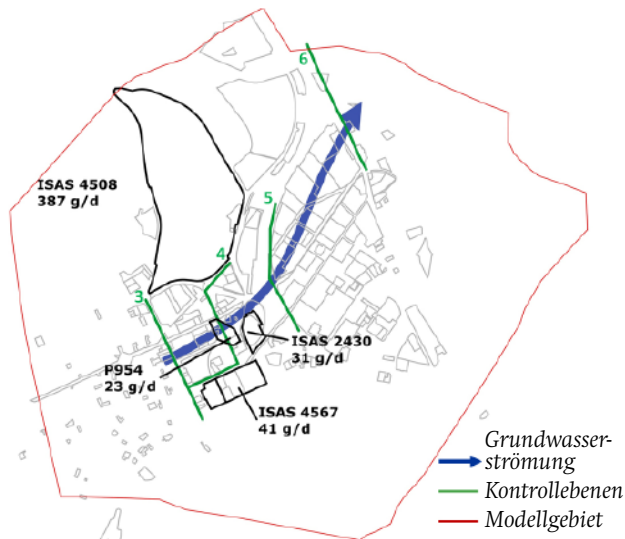


Abbildung 3.1:  
Modellraum Stuttgart-Feuerbach mit den zur Modellkalibrierung verwendeten Kontrollebenen, den vier wesentlichen Standorten und deren tägliche LCKW-Freisetzungsraten

### 3 Weiterentwicklung des numerischen Transportmodells

Im Modell wurde im Vorläufer-Projekt MAGIC als Transportspezies die Summe der leichtflüchtigen chlorierten Kohlenwasserstoffe (LCKW) Tetrachlorethen (PCE), Trichlorethen (TCE), cis-1,2-Dichlorethen (DCE) und Vinylchlorid (VC) verwendet. Ein Abbau der Summe der LCKW wurde nicht betrachtet. Ziel der vorgestellten Berechnungen war nun die modellgestützte Abschätzung der Abbauraten für die Summe der LCKW. Als Rechenprogramme wurden weiterhin die Finite-Differenzen-Modelle MODFLOW (McDonald und Harbaugh 1988) (Strömung) und MT3DMS (Zheng und Wang, 1999) (Transport) verwendet, zur Erleichterung der Dateneingabe und zur Darstellung der Ergebnisse diente die Oberfläche PMWIN (Chiang, 2011.)

Bei der Kalibrierung des Transportmodells im Rahmen des MAGIC-Projekts hatte sich gezeigt, dass die berechneten LCKW-Konzentrationen in der am weitesten im Abstrom gelegenen Kontrollebene 6 (Abbildung 3.1) syste-

matisch höher waren als die Messwerte. Bei der Berücksichtigung eines LCKW-Abbaus würden vor allem die berechneten Konzentrationen in der Kontrollebene 6 reduziert, weil diese Kontrollebene relativ weit von den meisten Schadensherden entfernt liegt und somit der Schadstoffabbau relativ lange einwirken kann.

Implementiert wurde der Abbau als flächenhafter unspezifischer Abbauprozess erster Ordnung, der in allen fünf Modellschichten stattfindet. Da im Modell die Summe der LCKW als Transportspezies fungiert, bedeutet ein Abbau erster Ordnung anschaulich entweder eine Mineralisierung unter aeroben Bedingungen (DCE und/oder VC werden oxidiert), oder eine reduktive Dechlorierung, die über VC hinausgeht und damit die Summe der LCKW verringert.

Letztlich können mit dem Abbauprozess erster Ordnung aber auch Prozesse wie irreversible Sorption oder Verflüchtigung an der Grundwasseroberfläche nachgebildet werden. Der Prozess wird deshalb hier als unspezifischer Abbau bezeichnet.

Im Rahmen der Modellanpassung erwies sich ein Abbau mit einer Halbwertszeit von zwei Jahren als am besten geeignet, um die berechneten Konzentrationen in der Kontrollebene 6 zu reduzieren und gleichzeitig die berechneten Konzentrationen in den drei anderen oberstromig gelegenen Kontrollebenen zu erhalten.

Die Überprüfung der Modellkalibrierung erfolgte für die Immissionspumpversuche aus dem MAGIC-Projekt vom Frühjahr 2007. In der Kontrollebene 6 (Abstrombereich, vgl. Abbildung 3.1) konnte die Nachbildung von sechs der acht IPV verbessert werden, eine IPV-Nachbildung blieb unverändert, und eine Nachbildung wurde schlechter. In der Kontrollebene 5 verbesserten sich zwei IPV-Nachbildungen, sechs blieben unverändert, und eine wurde schlechter, in den Kontrollebenen 4 und 3 ergaben sich keine nennenswerten Veränderungen im Vergleich zur Simulation ohne Abbau. Insgesamt hat die Berücksichtigung eines unspezifischen Abbaus 1. Ordnung mit einer Halbwertszeit von zwei Jahren zu einer verbesserten Nachbildung des LCKW-Transports im Modellgebiet geführt. Dieser Abbau wird daher auch für alle weiteren Modellrechnungen beibehalten.

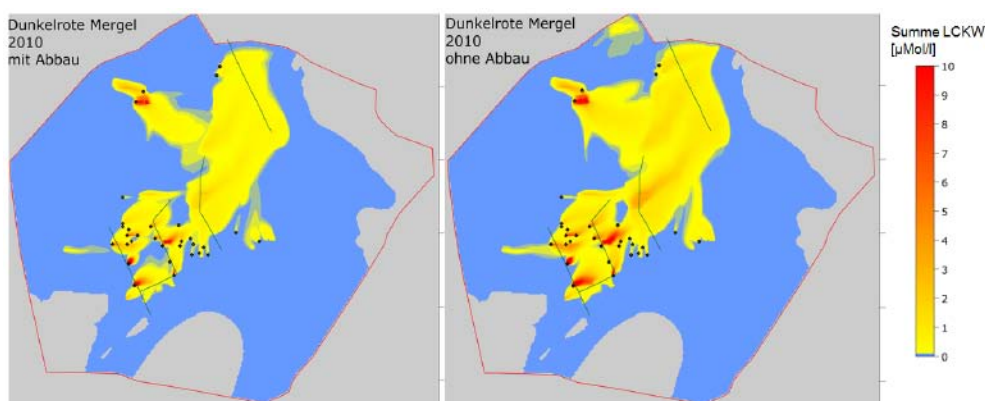


Abbildung 3.2:  
LCKW – Verteilung im Modellgebiet für das Jahr 2010 in den Dunkelroten Mergeln, mit und ohne Berücksichtigung von Abbau im Transportmodell

**Konzentrationsverteilungen und Massenbilanz**

In die *Abbildung 3.2* sind die berechneten LCKW-Verteilungen für das Jahr 2010 einmal mit und einmal ohne Berücksichtigung des o. g. Abbaus dargestellt.

Die Verteilungen sehen im direkten Abstrom der Schadensherde nahezu identisch aus, mit zunehmender Transportstrecke führt der flächenhaft wirksame Abbau jedoch zu reduzierten Konzentrationen. Besonders fällt dieser Effekt in den tieferen Schichten wie in den dargestellten Dunkelroten Mergeln auf, weil dort die Aufenthaltszeiten relativ lange sind und der Abbau daher ausreichend Zeit hat, um sich auswirken zu können.

Die Massenbilanz für das Ende des Simulationszeitraums (2010) zeigt die *Tabelle 3.1*. Die Bilanzterme sind in g/d PCE-Äquivalent angegeben. Dazu wird die im Modell verwendete Stoffmengeneinheit Mol zur besseren Anschaulichkeit in die Masseneinheit g umgerechnet, und zwar unter der vereinfachenden Annahme, dass die LCKW gänzlich in Form von PCE vorliegen. 1 mMol LCKW entspricht dann 166 g PCE-Äquivalent (PÄ).

*Tabelle 3.1: Massenbilanz (in PCE-Äquivalent PÄ) für das Jahr 2010 mit und ohne Berücksichtigung des Schadstoffabbaus.*

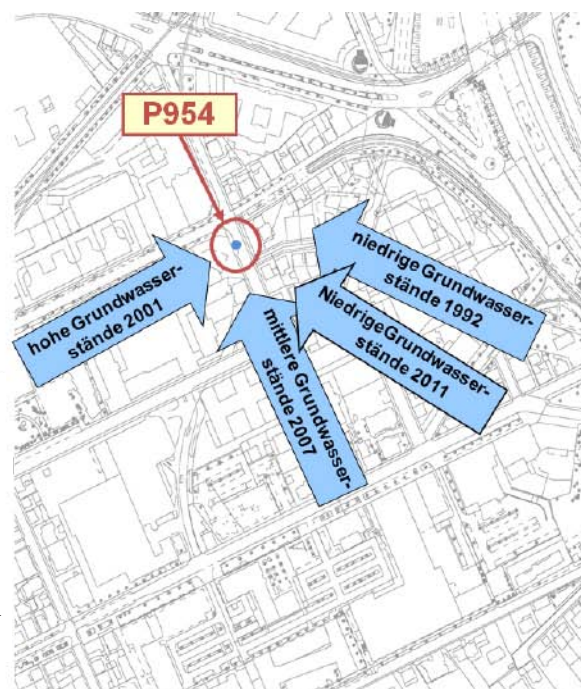
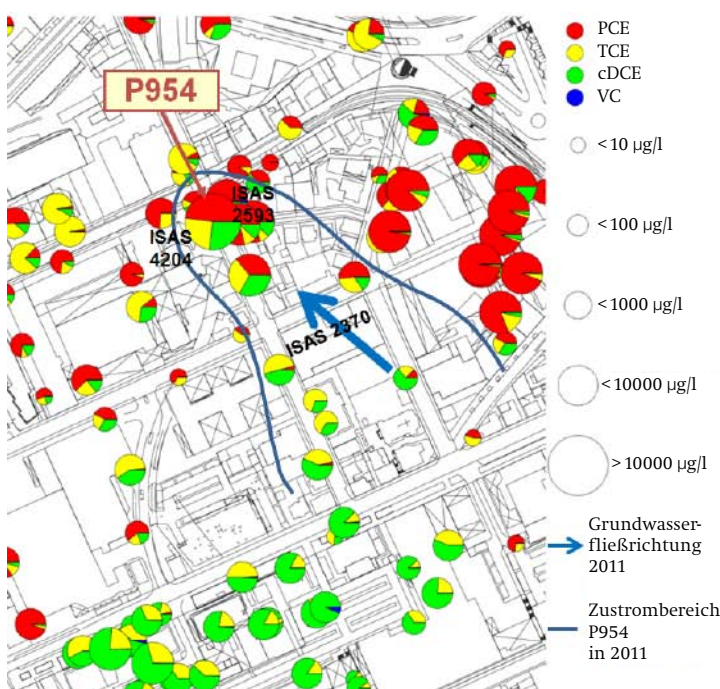
g/d PÄ	ohne Abbau	mit Abbau
Freisetzung	+ 531	+ 540
Förderung	-484	-401
Abstrom Feuerbach	-47	-23
Abstrom Unterkeuper	0	0
Abbau	0	-116

Infolge der Berücksichtigung des Abbaus musste die LCKW-Freisetzung geringfügig von 531 g/d PÄ auf 540 g/d PÄ erhöht werden. Der Abbau führt trotz der relativen langen Halbwertszeit im Modell von zwei Jahren dazu, dass dadurch gut 20 % der freigesetzten LCKW aus dem Modellgebiet entfernt werden. Infolge dessen verringert sich sowohl der berechnete Abstrom in den Feuerbach als auch die durch die Brunnen im Modellgebiet entnommene LCKW-Masse.

**4 Identifizierung von Schadstoffquellen und Störerauswahl**

Der inmitten einer Vielzahl bekannter Schadensherde gelegene Sanierungsbrunnen P954 entnimmt aus dem quartären Grundwasserleiter seit rund 10 Jahren Grundwasser mit einer durchschnittlichen Belastung von ca. 7 mg/l Summe LCKW. Allerdings konnte bislang keiner der umliegenden Herde als Ursache für die Grundwasserbelastung identifiziert werden. Die kleinräumige Schadenssituation sowie die lokal stark variierenden Grundwasserfließverhältnisse erschweren die Störerauswahl trotz einer Vielzahl vorhandener Grundwassermessstellen im nahen Umfeld (*siehe Abbildung 4.1*).

Nachdem sämtliche vorliegenden Untersuchungen wie  
 – Zeitreihen von Konzentrationsmessungen,  
 – Immissionspumpversuche und Frachtberechnungen,  
 – Verteilungsmuster der LCKW-Einzelstoffe,  
 – FCKW und SF<sub>6</sub>-Gehalte,  
 – <sup>13</sup>C-Isotopensignaturen und  
 – Grundwassermodellrechnungen  
 zusammenfassend ausgewertet vorlagen, ergab sich noch immer kein schlüssiges Bild.



*Abbildung 4.1: Örtliche Situation bei P954. Links: Schadstoffverteilung (Mittelwerte) und Grundwasserströmung (2011) im FOKS-Projektgebiet. Rechts: schwankende Grundwasserfließverhältnisse in unterschiedlichen Jahren in Abhängigkeit der Grundwasserstände*



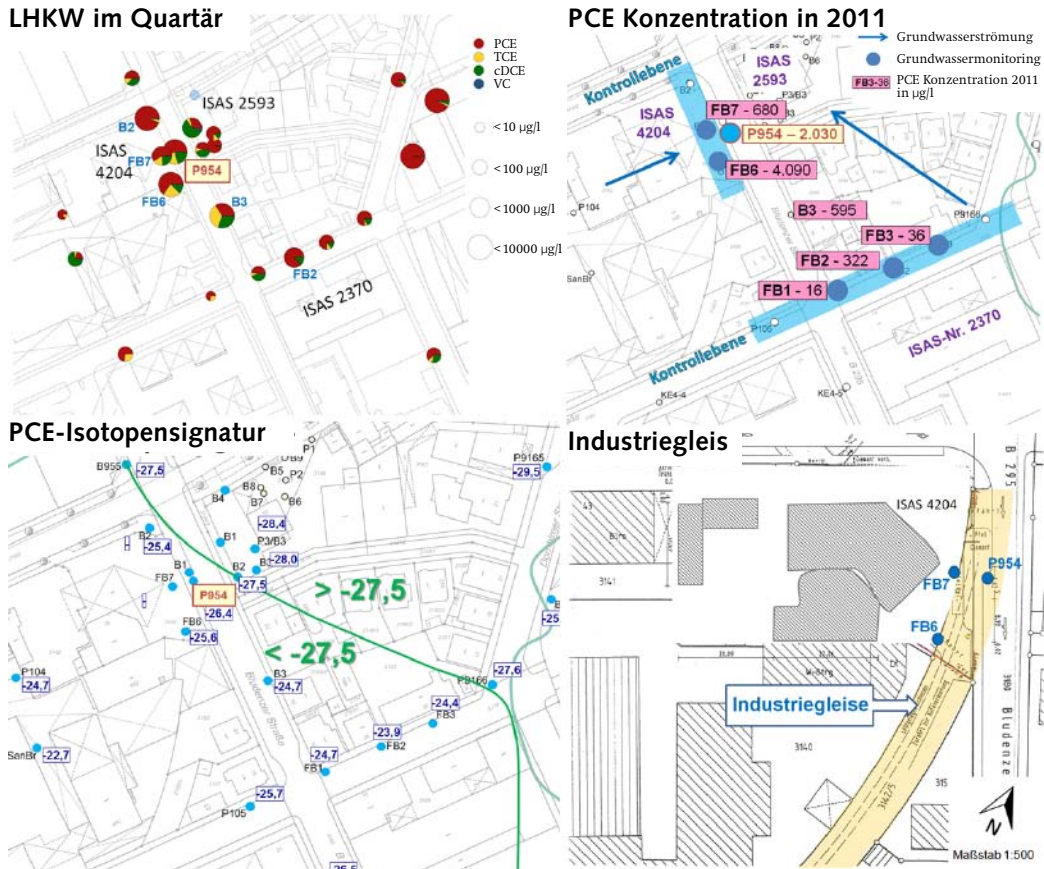


Abbildung 4.2 : Schlüsselparameter zur Identifikation der Schadstoffherkunft

Tabelle 4.1: Bewertungsmatrix FOKS Fall 2

Potenzielle Verursacher der LHKW-Verunreinigung in P954	Gewichtung	Altstandort ISAS 2430	Altstandort ISAS 2370	Altstandort ISAS 4204	Altstandort ISAS 2593	ehem. Industriegleise
	Faktor	Punkte	Punkte	Punkte	Punkte	Punkte
Umgang mit LHKW aktenkundig oder zumindest wahrscheinlich?	1	1	1	0,5	0	0,5
Lage im hydraulischen Oberstrom bzw. im EZG der P954 bei Mittelwasser/ Niedrigwasser	3	1,5	3	1,5	3	3
Schadstoffpotenzial (Konzentrationshöhe) ausreichend?	3	1,5	1,5	0	0	3
Ist das LHKW-Konzentrationsniveau weitgehend unabhängig von größeren Schwankungen (max. 50%)?	1	0,5	0	0,5	0	0,5
Weitere LHKW vertreten (1,1,1-TCA, T-DCE, 1,1,-DCE)	2	0	0	2	1	2
Spektrum der Chlorierten Ethene übereinstimmend bei ähnlichen prozentualen Anteilen?	2	0	0	1	0	2
PCE-Isotopensignatur ähnlich ( $\pm 1 \text{ ‰}$ )?	1	0	0	0	0,5	1
FCKW-Spurentreiber (F12, F11, F113) in ähnlichem Konzentrationsbereich und -verteilung vertreten?	2	0	0	0	0	2
Schwefelhexafluorid ähnlich ( $\pm 0,5 \text{ fmol/l}$ )?	1	0	0	0,5	0,5	0
<b>Punktesumme</b>		<b>4,5</b>	<b>5,5</b>	<b>6</b>	<b>5</b>	<b>14</b>
Punkteverteilung: ja = 1 Punkt teilweise zutreffend = 0,5 Punkte nein = 0 Punkte	Gewichtung des Kriteriums (Faktors): Starke Kriterien mit hoher Relevanz, multiplizieren mit 3; Mittlere Relevanz, multiplizieren mit 2; wichtig, aber weniger Relevanz, multiplizieren mit 1.					

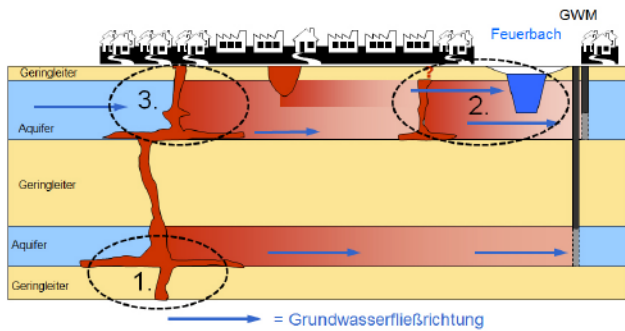


Abbildung 5.1:  
Konzeptionelles Sanierungsmodell Stuttgart-Feuerbach

1. Priorität: Verhinderung von Schadstoffeinträgen und – ausbreitung in den tieferen Grundwasserleitern (Mineralquellenschutz)
2. Priorität: Verhinderung von Schadstoffeinträgen über das Grundwasser in das Oberflächengewässer Feuerbach
3. Priorität: Reduzierung der Schadstofffreisetzung in den quartären Grundwasserleiter

Eine über das vorliegende Altlastenkataster hinausgehende historische Detailrecherche des Umfeldes vom P954 ergab Anhaltspunkte für zwei bislang noch nicht untersuchte Verdachtsbereiche, einen größeren Altstandort (ISAS-Nr. 2370) sowie ein ehemaliges Industriegleis. Über dieses Gleis wurden seit Beginn des 20. Jahrhunderts bis weit nach dem 2. Weltkrieg einige Firmen beliefert, die in erheblichem Umfang LCKW einsetzten. Im Zuge des Projektes konnten auch diese beiden Verdachtsbereiche mit den genannten Erkundungsmethoden untersucht werden. *Abbildung 4.2* illustriert diese Erkundungsergebnisse im Zusammenhang mit der Situation im Umfeld. *Tabelle 4.1* zeigt die weiter zur Störerauswahl entwickelte Bewertungsmatrix. Damit konnte zweifelsfrei ein bislang unbekannter Schaden im Bereich des ehem. Industriegleises als Hauptquelle für die Grundwasserverunreinigung in P954 identifiziert werden.

### 5 Sanierungsstrategie für den Stadtteil Stuttgart-Feuerbach

Grundlage jeder Sanierungsstrategie ist die Beschreibung der Quelle – Pfad – Rezeptor – Beziehungen in einem konzeptionellen Sanierungsmodell. Für die räumliche Sanierungsstrategie Feuerbach wurden drei Sanierungsprioritäten festgelegt. Dies verdeutlicht ein schematischer Schnitt (*Abbildung 5.1*). Diese Sanierungsprioritäten werden im Folgenden auf die bereits in *Abbildung 3.1* dargestellten vier Standorte mit jeweils mehreren Schadensherden angewendet. Mit dem Transportmodell wurden die Schadstofffrei-

setzungsraten je Standort in der Einheit PCE-Äquivalent (PA) g/d (auf Basis der molaren Stoffmengenkonzentrationen) errechnet.

Um die Freisetzungsraten aller Schadensherde angemessen einbeziehen zu können, wurde bei der Modellierung davon ausgegangen, dass alle aktuell betriebenen P&T-Maßnahmen stillgelegt werden. Nur so kann eine für die Schadenssituation angemessene Ableitung einer Gesamtsanierungsstrategie erfolgen. Als Ergebnis wird die Schadstofffreisetzungsraten für das Gesamtgebiet mit insgesamt 193 zu berücksichtigenden Schadensherden in Spalte 2 der nachfolgenden *Tabelle 5.1* dargestellt.

Die vier betrachteten Standorte bedecken ca. 7 % der Fläche des Modellgebiets, ihr Anteil an der Schadstofffreisetzung ins Grundwasser beträgt dagegen rund 89 %. Gelingt es also, diese vier Standorte umfassend und vollständig zu sanieren, so wird die Grundwasserqualität in Feuerbach erheblich verbessert. *Tabelle 5.1* listet für jeden der vier Standorte die Freisetzungsraten bezogen auf die drei Sanierungsprioritäten auf. Dabei zeigen sich erhebliche Unterschiede hinsichtlich der Prioritäten „tiefere Grundwasserleiter“ und „Feuerbach“. Beispielsweise würde eine vollständige Sanierung des Standorts ISAS 4508 mit einer Gesamtfreisetzungsraten von 387 PCE-Äquivalent zwar den obersten Grundwasserleiter erheblich entlasten, sich auf den Schadstoffeintrag in die tieferen Stockwerke jedoch kaum auswirken.

Die *Tabelle* verdeutlicht, dass mit der Konzentration der Sanierungsmaßnahmen auf diese vier Standorte nahezu 90 % dessen erreicht wird, was nach Sanierung

*Tabelle 5.1:*  
Errechnete Anteile einzelner Standorte zur Gesamtsituation Schadstofffreisetzung in Feuerbach

Bilanz ohne Wasserentnahmen [g/d PA]	sämtliche Schadensherde aktiv	ISAS 4508	P954	ISAS 4567	ISAS 2430	Beseitigung der Schadensherde in 4 Flächen	
						g/d	Reduktion %
Abstrom Unterkeuper	36	1	10	18	2	31	86
Abstrom Feuerbach	168	129	2	6	9	146	87
Abbau	336	257	11	17	20	305	91
Freisetzung gesamt	540	387	23	41	31	482	89

aller 193 Standorte erreicht werden könnte. Diese vier Standorte sind also tatsächlich als „key sources“ im Sinne des FOKS-Ansatzes zu bezeichnen. Dies bestätigt die bereits bisher verfolgte Linie des Amts für Umweltschutz, neben der Regelbearbeitung der Schadensfälle gemäß wasser- und bodenschutzrechtlicher Vorschriften einzelne Standorte von erheblicher Bedeutung prioritär zu bearbeiten.

Die weiteren Arbeiten zur konkreten Ausgestaltung eines räumlichen Bewirtschaftungs- und Sanierungsplans werden

- einen Schwerpunkt auf die vier identifizierten wesentlichen Standorte legen.
- die Gesamtsituation mit allen bestehenden Grundwasserentnahmen und -behandlungsanlagen berücksichtigen und
- die festgestellten Abbauprozesse mit einbeziehen und nach Möglichkeit deren Wirkung verstärken.

## 6 Fazit

Mit Hilfe des integralen Ansatzes gelang eine gesamtliche Untersuchung und Bewertung des komplexen Untersuchungsraums im Stadtteil Stuttgart-Feuerbach. Die großräumige Betrachtung mit dem weiter entwickelten Strömungs- und Transportmodell ermöglichte eine räumliche differenzierte Bewertung der Schäden und ihres Ausmaßes. Die wesentlichen Schadstoffquellen im Untersuchungsgebiet und ihre jeweiligen Quellen sind erkannt. Anhand des konzeptionellen Sanierungsmodells und der erarbeiteten Sanierungsstrategie beginnt nun die Arbeit zur konkreten Ausgestaltung eines räumlichen Bewirtschaftungs- und Sanierungsplans.

Als wesentliche und auch auf andere, vergleichbare Gebiete übertragbare Erkenntnisse bleibt festzuhalten:

- In komplexen Fallgestaltungen ist es unerlässlich, die einzelnen Schäden in ihrem räumlichen Zusammenhang zu betrachten
- Die konsequente Bearbeitung des verfügbaren Datenbestandes ermöglicht vielfach eine Auswertung langjähriger Messreihen. Zur Identifizierung von Abbauprozessen eignen sich insbesondere vergleichende Darstellungen der Entwicklung der Stoffmengenkonzentrationen ( $\mu\text{mol/l}$ ).
- Aerobe Abbauprozesse spielen eine wesentliche Rolle, die ausschließliche Betrachtung der Metabolite DCE und VC führt zu einer Unterschätzung des mikrobiellen LCKW-Abbaus.

- Die Anwendung einer Vielzahl von Untersuchungsmethoden und -parameter in Kombination mit der Modellierung ermöglicht auch in schwierigsten Fällen die Identifizierung der Verursacher.
- Für die detaillierte Untersuchung und Bewertung einzelner Schäden kann allerdings nicht ohne weiteres aus der großräumigen Grundwassermodellierung hinein gezoomt werden. Eine lokale Anpassung des Modells ist unerlässlich.
- Die Quantifizierung der Schadstofffreisetzungsraten einzelner Quellen über das Modell stellt eine geeignete Grundlage dar zur Wirksamkeitsbetrachtung verschiedener Sanierungsalternativen und -szenarien.

## 7 Literatur

- [1] Amt für Umweltschutz Stadt Stuttgart 2009. Integrale Grundwasseruntersuchung in Stuttgart-Feuerbach. Ergebnisse des Interreg III B Projektes MAGIC. Schriftreihe des Amt für Umweltschutz, Heft 04/2009: 167 S., Stuttgart.
- [2] Chiang, W.-H., 2011. Processing MODFLOW Version 8.0.12 – A simulation system for modeling groundwater flow and solute transport. Webtech<sup>360</sup>, Irvine, Ca, USA
- [3] Ertel & Schollenberger 2008. Handbook for Integral Groundwater investigation – Magic Interreg IIIB Cadses, 58 S., Warschau
- [4] Kirchholtes et.al 2010 Einsatz von Modellwerkzeugen bei der integralen Erkundung von LCKW-Verunreinigungen, altlasten spektrum, 2010, Heft 3, S. 109
- [5] McDonald, M.C. und Harbaugh, A.W., 1988. MODFLOW, A modular three-dimensional finite difference ground-water flow model. 83-875, U.S. Geological Survey
- [6] Zheng, C. und Wang, P.P., 1999. MT3DMS – A modular three-dimensional multispecies transport model for simulation of advection, dispersion, and chemical reactions of contaminants in groundwater systems. SERDP -99-, University of Alabama, Tuscaloosa, Alabama

### Anschrift der Autoren:

Hermann Josef Kirchholtes, Peter von Schnakenburg  
Landeshauptstadt Stuttgart  
Amt für Umweltschutz  
Gaisburgstr. 4  
70182 Stuttgart

Dr. Thomas Ertel  
ET environment and technology Dr. Ertel  
Boschstr. 10  
73734 Esslingen

Dr. Uli Schollenberger, Stefan Spitzberg  
BoSS Consult GmbH  
Lotterbergstr. 16  
70499 Stuttgart

Dr.-Ing. Wolfgang Schäfer  
Steinbeis Transferzentrum für Grundwassermodellierung  
Odenwaldstraße 6  
69168 Wiesloch

[www.et-ertel.de](http://www.et-ertel.de)

-  Projektsteuerung
-  Projektförderung
-  Sachverständiger
-  Technische Dienstleistungen
-  Forschung und Entwicklung
-  Events und Training

 **environment and technology**  
berät und betreut Wirtschaft,  
Institutionen und Kommunen

Dr. Thomas Ertel  
Boschstraße 10  
73734 Esslingen  
Tel.: 0711 / 93 150 480  
Email: [info@et-ertel.de](mailto:info@et-ertel.de)

# BOSS consult

## environmental solutions

Altlasten  
Flächenrecycling  
Grundwasser  
Geothermie

Lotterbergstr. 16 - 70499 Stuttgart  
0711 6016068-0 - [www.bosscon.de](http://www.bosscon.de)



DR.-ING. WOLFGANG SCHÄFER

**STEINBEIS-TRANSFERZENTRUM  
GRUNDWASSERMODELLIERUNG**

Dr.-Ing. Wolfgang Schäfer  
Odenwaldstraße 6  
D-69168 Wiesloch  
Tel. 06222-389683  
[www.schaefer-gwm.de](http://www.schaefer-gwm.de)

