

Magistrat der Stadt Oberursel (Taunus)
Umwelt, Energie und Verkehr
Rathausplatz 1
61440 Oberursel (Taunus)

ARCADIS DEUTSCHLAND GMBH
Europaplatz 3
64293 Darmstadt
Postfach 10 03 31
64203 Darmstadt
Telefon: 06151 388-0
Fax: 06151 388-999
E-Mail: darmstadt@arcadis.de
Internet: www.arcadis.de

UMWELT

Darmstadt,
9. Mai 2014

Ansprechpartner:
Dr. Thomas Held
t.held@arcadis.de

Unser Zeichen:
DE0114.000630/th

Telefon-Durchwahl:
327

Telefax-Durchwahl:
988

Projekt:
Altlastensanierung Oberursel, Eppsteiner Str. 13

Bericht:
Überprüfung der Auswahl des thermischen Sanierungsverfahrens mittels Dampf-Luft-Injektion im Hinblick auf seine Geeignetheit



Wir sind nach ISO 9001 zertifiziert.

Auftraggeber: Magistrat der Stadt Oberursel

Geschäftsführer:
Marcus Herrmann (Vorsitz)
Jürgen Boenecke
Dr. Roland Damm
Adam Mahr

Amtsgericht Darmstadt
HRB 4537

INHALTSVERZEICHNIS

		SEITE
1	Vorgang, Aufgabenstellung, Unterlagen	5
1.1	Vorgang, Aufgabenstellung	5
1.2	Unterlagen	6
2	Sanierungsstandort	8
2.1	Lage, Nutzung	8
2.2	Geologie und Hydrogeologie	9
2.3	Belastungssituation	12
2.3.1	Boden	12
2.3.2	Bodenluft	14
2.3.3	Schichtwasser	16
2.3.4	Grundwasser	16
2.3.5	Abschätzung der Schadstoffmenge in der ungesättigten Bodenzone	17
2.3.6	Innenraumluft	18
3	Konzeptionelles Standortmodell	18
4	Sanierungsuntersuchung	22
4.1	Randbedingungen für die Sanierung	22
4.2	Erste technische Maßnahmen	22
4.3	Variantenstudie	25
4.4	Machbarkeitsstudie zur Dampf-Luft-Injektion (DLI)	27
4.5	Bau der Sanierungsinfrastruktur und ergänzende Untersuchungen	28
4.6	Technische Umsetzung	31
5	Bewertung der Entscheidungsfindung	35
6	Zusammenfassung	41

TABELLENVERZEICHNIS

		Seite
Tabelle 1	Grundwasserstände (entnommen aus [U 14])	11
Tabelle 2	Ergebnisse der Bodenuntersuchung 2006 (entnommen aus [U 3])	12
Tabelle 3	Bodenbelastung (GWM 1, BLB 1 und BLB 2)	13
Tabelle 4	Bodenbelastung (BLB 3, GWM 2/2010 und GWM 4/2010) (aus [U 14])	13
Tabelle 5	Ergebnisse der Grundwasseruntersuchungen (entnommen aus [U 14])	17
Tabelle 6	Verlauf der LCKW-Konzentrationen (1. Bodenluftabsaugversuch)	23
Tabelle 7	LCKW-Konzentrationen (Start und Ende, 2. Bodenluftabsaugversuch) (entnommen aus [U 11])	24

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

		Seite
Abbildung 1	Lage des Sanierungsstandortes (gelber Kreis)	8
Abbildung 2	Geologische Profile der Bohrungen BS 1 (links) und BS 3 (rechts)	9
Abbildung 3	Geologisches Profil von GWM 1 (links) und GWM 2/2010 (rechts) (gestrichelte Line: Filterstrecke)	10
Abbildung 4	Bodenluftbelastung im Bereich des Kanals (entnommen aus [U 12])	14
Abbildung 5	Bodenluftbelastung	15
Abbildung 6	Konzeptionelle Standortmodell (entnommen aus [U 8])	19
Abbildung 7	Profilschnitt durch den Nahbereich des Standortes (aus [U 10])	20
Abbildung 8	Konzentrationsentwicklung an BLB 1 und BLB 2 (entnommen aus [U 11])	24
Abbildung 9	Lage Grundwassermessstellen und Aushubbereiche (entnommen aus [U 14] und [U 16], verändert)	29
Abbildung 10	Sanierungsinfrastruktur (entnommen aus [U 21])	32
Abbildung 11	Blick in den Innenhof mit der Sanierungsanlage in zwei Containern	33
Abbildung 12	Verlauf der LCKW-Konzentrationen in Grundwasser (entnommen aus [U 21])	34

I:\DE011\2014\DE0114_000630_Altlastensanierung_Oberursel\0120 Teilleistung\80_Berichte und Anlagen\3_Endfassung\DE0114_000630_Bericht_Final.docx

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

BBodSchV	Bundebodenschutzverordnung
BLB	Bodenluftbrunnen
BTEX	Benzol, Toluol, Ethylbenzol, Xylol
cDCE	<i>cis</i> -1,2-Dichlorethen
DLI	Dampf-Luft-Injektion
GWM	Grundwassermessstelle
HDI	Hochdruckinjektion
LCKW	Leichtflüchtige chlorierten Kohlenwasserstoffen
LCKW	Leichtflüchtige halogenierte Kohlenwasserstoffe
LHKW	Leichtflüchtigen halogenierte Kohlenwasserstoffen (hier identisch mit LCKW)
m u. GOK	Meter unter Geländeoberkante
MKW	Mineralölkohlenwasserstoffe
PAK	Polyzyklischen aromatische Kohlenwasserstoffe
PCB	Polychlorierte Biphenyle
PCE	Tetrachlorethen
TASK	Terra-, Aqua- und Sanierungskompetenzzentrum, Leipzig
TCE	Trichlorethen
VC	Vinylchlorid

1 Vorgang, Aufgabenstellung, Unterlagen

1.1 Vorgang, Aufgabenstellung

Die Stadt Oberursel (Taunus) saniert aktuell im Bereich der Eppsteiner Straße 11–13 in Abstimmung mit dem Regierungspräsidium Darmstadt eine Belastung des Bodens und des Grundwassers mit leichtflüchtigen chlorierten Kohlenwasserstoffen (LCKW).

Zur Sanierung des Schadens wurde im Rahmen der Sanierungsuntersuchung ein thermisches Verfahren ausgewählt (Machbarkeitsstudie) [U 13]. Dieses umfasst eine Injektion eines Dampf-Luft-Gemisches (DLI-Verfahren; Dampf-Luft-Injektion) in den Untergrund. Die Schadstoffe werden dadurch in die Gasphase überführt, die aus dem Untergrund abgesaugt und gereinigt wird.

Das DLI-Verfahren wurde bislang nicht in den in Oberursel im Untergrund vorhandenen stark tonhaltigen Böden angewendet. Nachdem jedoch eine Machbarkeitsstudie im Jahr 2010 die grundsätzliche Eignung des Verfahrens auch bei dieser Bodenstruktur bestätigt hatte, wurde beschlossen, das Verfahren zunächst auf einer Pilotfläche zu testen. Diese Pilotsanierung ist nach einer ersten Bewertung der Sanierungsergebnisse positiv verlaufen. Daher soll jetzt das verbliebene Sanierungsareal in Angriff genommen werden.

Die Sanierungsmaßnahme steht derzeit in erheblichem öffentlichem Interesse. Unter anderem wird bezweifelt, dass das gewählte Sanierungsverfahren für die vorliegende Kontamination angemessen und unter den gegebenen örtlichen und hydrogeologischen Randbedingungen geeignet ist. Insbesondere stehen folgende Fragen im Vordergrund:

- Ist das DLI-Verfahren unter den gegebenen hydrogeologischen Bedingungen anwendbar und erfolgsversprechend?
- Unterbindet das Verfahren zuverlässig die relevanten Wirkungspfade, insbesondere Boden → Innenraumluft und Boden → Grundwasser?
- Können Sekundärschäden wie beispielsweise Setzungen des Bodens zuverlässig vermieden werden?
- War das DLI-Verfahren unter technischen und ökonomischen Gesichtspunkten das am besten geeignete Verfahren?
- Gab es überhaupt Alternativen zum DLI-Verfahren?

ARCADIS Deutschland GmbH wurde, da sie bisher nicht im Projekt involviert und kein Auftragnehmer der Stadt Oberursel war, seitens des Magistrates der Stadt Oberursel (Taunus) daher beauftragt, die Entscheidung hinsichtlich des DLI-Verfahrens zu überprüfen.

1.2 Unterlagen

- [U 1] Dr. Hug Geoconsult GmbH (2002): Flurstück 167/2, Eppsteiner Str. 13, Oberursel (Ts.), Umwelttechnische Untersuchungen (Bericht, 28.08.2002).
- [U 2] Dr. Hug Geoconsult GmbH (2002): Flurstück 167/2, Eppsteiner Str. 13, Oberursel (Ts.), Historische Recherche und Untersuchungskonzept (Bericht, 27.10.2005).
- [U 3] Dr. Hug Geoconsult GmbH (2002): Flurstück 167/2, Eppsteiner Str. 13, Oberursel (Ts.), Detailuntersuchungen (Bericht, 06.06.2006).
- [U 4] Dr. Hug Geoconsult GmbH (2006): Wohnhäuser Eppsteiner Straße 11 und 13, Oberursel (Ts.), Untersuchungen der Raumluft auf leichtflüchtige Substanzen (Bericht, 20.11.2006).
- [U 5] Dr. Hug Geoconsult GmbH (2006): Flurstück 167/2, Eppsteiner Straße 13, Oberursel (Ts.), Bodenluftabsaugversuch (Bericht, 28.12.2006).
- [U 6] Dr. Hug Geoconsult GmbH (2007): Eppsteiner Straße 15, Oberursel (Ts.) – Gebäudeschadstoff- und Raumluftuntersuchung (Bericht, 07.02.2007).
- [U 7] Dr. Hug Geoconsult GmbH (2007): Eppsteiner Straße 13 und 15, Oberursel (Ts.) – Ergänzende umwelttechnische Untersuchungen (Bericht 04.05.2007).
- [U 8] Dr. Hug Geoconsult GmbH (2007): Stadt Oberursel/Ts.), Eppsteiner Straße 13, Kostenprognose Sanierung (Bericht 04.05.2007).
- [U 9] Dr. Hug Geoconsult GmbH (2007): Eppsteiner Straße 15, Gebäudeschadstoff- und Raumluftuntersuchungen (Bericht, 07.02.2008).
- [U 10] Büro für Hydrogeologie und Umwelt (2009): Vorbereitende Maßnahmen zur Sanierung der Altlast Eppsteiner Straße 13, Untersuchungen des Grundwassers (Bericht, 15.01.2009).
- [U 11] Dr. Hug Geoconsult GmbH (2009): Flurstück 167/2, Eppsteiner Straße 13, Oberursel (Ts.), Sanierungsvorbereitende Untersuchungen (Bericht, 09.03.2009).
- [U 12] Dr. Hug Geoconsult GmbH (2009): Stadt Oberursel/Ts., Eppsteiner Straße, Untersuchungen in der Kanaltrasse (Bericht, 04.05.2009).
- [U 13] Dr. Hug Geoconsult GmbH (2009): Flurstücke 167/1, 167/2, Eppsteiner Straße 13, Oberursel (Taunus), Variantenbetrachtung (Gutachten, 17.07.2009).
- [U 14] Dr. Hug Geoconsult GmbH (2010): Flurstücke 167/1 und 167/2, Eppsteiner Straße 13, Oberursel (Taunus), Sanierungsuntersuchungen (Bericht, 23.06.2010).
- [U 15] Universität Stuttgart – VEGAS (Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung) (2010): Machbarkeitsstudie mit Kostenschätzung für den Einsatz des In-situ-Sanierungsverfahrens Dampf-Luft-Injektion ins Grundwasser am Standort „Eppsteiner

- Straße“ in Oberursel, Taunuskreis, zur Sanierung des CKW-Schadens (Schadensherdentfernung (Bericht, 14.07.2010).
- [U 16] Dr. Hug Geoconsult GmbH (2012): Flurstücke 167/1 und 167/2, Eppsteiner Straße 13, Oberursel (Taunus) – Ausführungsplanung Phase 1: Bautechnik und Bohrarbeiten (Bericht, 17.02.2012).
- [U 17] Universität Stuttgart – VEGAS (Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung) (2013): Thermische In-situ-Sanierung mittel Dampf-Luft-Injektion des CKW-Schadens Eppsteiner Straße 13 in Oberursel (Ts.) – Ausführungsplan Pilotanwendung DLI (Bericht, 24.01.2013).
- [U 18] Dr. Hug Geoconsult GmbH (2013): Eppsteiner Straße 13, Oberursel, In-situ-Bodensanierung, Pilotversuch, Analytisches Überwachungskonzept (Bericht, 11.02.2013).
- [U 19] Furgro Consult GmbH (2013): Ausbaukontrollmessungen, Messstellen Oberursel (Ergebnisbericht, 12.02.2013).
- [U 20] Universität Stuttgart – VEGAS (Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung) (2013): CO₂-Tracerversuch Pilotanwendung DLI, Eppsteiner Straße, Oberursel (Bericht, 10.05.2013).
- [U 21] Universität Stuttgart – VEGAS (Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung) (2013): Piloteinsatz zur „Mobilen thermischen In-situ-Sanierungsanlage in modularer Bauweise (MOSAM) im Rahmen der Sanierungsplanung „Eppsteiner Straße 13“ in Oberursel (Hessen) (Anschlussbericht, 02.12.2013).
- [U 22] Held, T. (2014): In-situ-Verfahren zur Boden und Grundwassersanierung – Verfahren, Planung und Sanierungskontrolle. Wiley-VCH, Weinheim.
- [U 23] Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten (Bundes-Bodenschutzgesetz- BBodSchG) vom 17. März 1998 (BGBl. I S. 502), zuletzt geändert durch Art. 5, Abs. 30 vom 24.02.2012 (BGBl. I S. 212).
- [U 24] Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) 12.07.1999 (BGBl. I S. 1554), zuletzt geändert durch Artikel 5, Abs. 31 des Gesetzes vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212).
- [U 25] Hiester, U., Müller, M., Koschitzky, H.-P., Trötschler, O., Roland, U., Holzer, F., Edel, H.-G. (2012) Leitfaden Thermische In-situ-Sanierungsverfahren (TIS) zur Entfernung von Schadensherden aus Boden und Grundwasser.
www.ufz.de/export/data/38/40405_TASK_Leitfaden_TISS.pdf (25.05.2013).
- [U 26] Johnson, P., Dahlen, P., Triplett, J., Foote, E., Williams, S. (2009): Critical Evaluation of State-of-the-Art In Situ Thermal Treatment Technologies for DNAPL Source Zone Treatment. ESTCP Project ER-0314.

2 Sanierungsstandort

2.1 Lage, Nutzung

Das Flurstück 167/2 (Eigentum des Magistrats der Stadt Oberursel, Taunus) und das südlich angrenzende Flurstück 167/1 (Eigentum der Familie Mohns) in Oberursel liegen zwischen der Eppsteiner Straße und der Oberen Hainstraße. Flurstück 167/2 ist Teil eines städtebaulichen Entwicklungsgebietes in der größtenteils denkmalgeschützten Altstadt der Stadt Oberursel/Ts. und sollte veräußert werden [U 13] (Abbildung 1) [U 2].

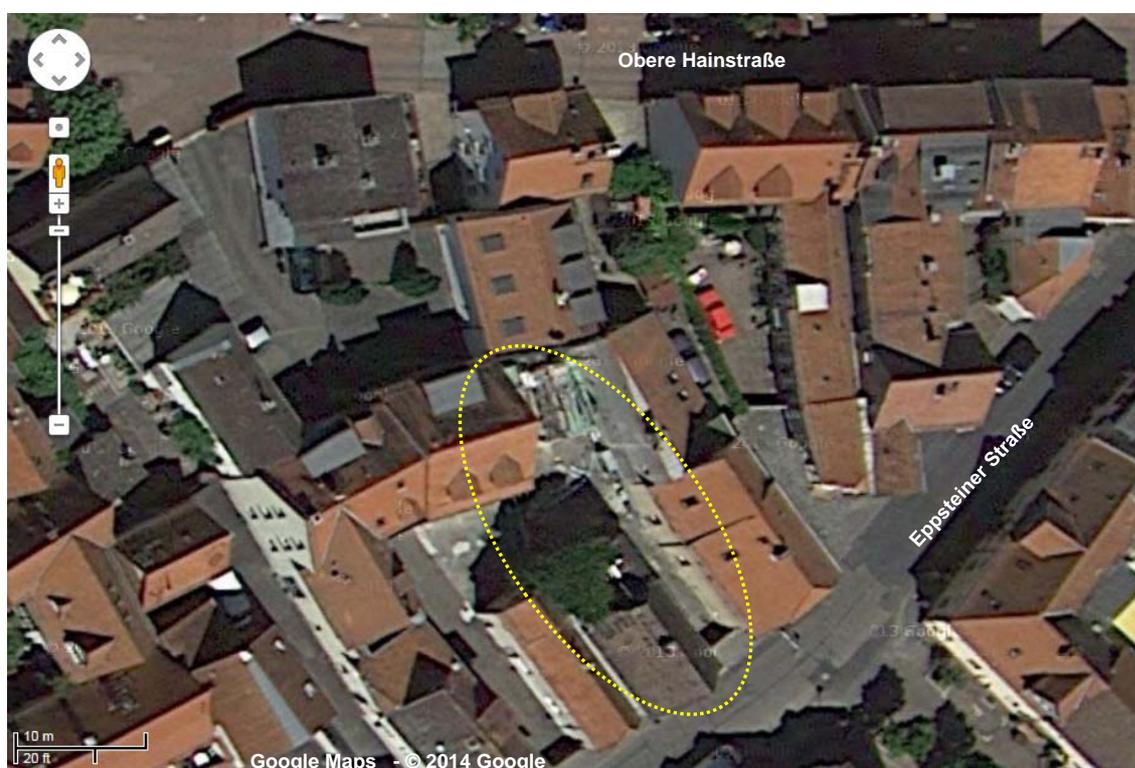


Abbildung 1 Lage des Sanierungsstandortes (gelber Kreis)

Das Flurstück 167/1 hat eine Größe von etwa 142 m² (ca. 78 m² bebaut). Das Flurstück 167/2 hat eine Größe von 123 m², darauf befand sich vor Beginn der Sanierungsmaßnahmen ein Gartenhaus in Holzbauweise und einen Carport. Die Hoffläche beider Flurstücke war mit Kopfsteinpflaster teilversiegelt.

Vor 1932 wurde das Gelände zu Wohnzwecken sowie landwirtschaftlich genutzt [U 2]. Von 1932 bis 1953 war auf dem Flurstück 167/2 eine Schlossereiwerkstatt ansässig. Von 1953 bis 1976 wurde das Grundstück als chemische Fabrik der Firma Dr. Büscher & Gausmann genutzt.

Hergestellt wurden Korrosionsschutzmittel. Dafür wurden Lösemittel (u.a. Testbenzin) verwendet. Daneben wurden verunreinigte Lösemittel (hauptsächlich Tetrachlorethen (PCE) und Trichlorethen (TCE)) durch Destillation zurückgewonnen. Die Abfüllstelle der gereinigten Lösemittel sowie die Lagerung der entleerten und gefüllten Fässer befanden sich in dem überdachten Hofraum. Das Gebäude der chemischen Fabrik wurde nach der Schließung der Fabrik in 1977 abgebrochen.

Aufgrund der Schadstoffverteilung wird davon ausgegangen, dass Reinigungsarbeiten von Behältern und Destillationsgefäßen sowie Umfüllarbeiten im Bereich der Hoffläche der Firma als Ursache der Kontamination dienten. Im Umfeld des belasteten Areals finden sich keine altlastenrelevanten Nutzungen [U 2].

2.2 Geologie und Hydrogeologie

Der lokale Untergrundaufbau des Grundstücks Eppsteiner Str. 13 wurde bis in eine Tiefe von 18 m u. GOK erkundet. Lokal wurden bis in eine Tiefe von maximal 2,0 m u. GOK Auffüllungen, die mit früherer Bautätigkeit (Arbeitsräume, Kanalgrabenfüllungen, frühere Bohrlöcher) zusammenhängen, erbohrt.

Unter den Auffüllungen wurden die sog Taunusschotter aufgeschlossen, die kleinräumig wechselnd mehr oder weniger dicht gelagert sind und einen hohen Feinkornanteil aufweisen (Abbildung 2).

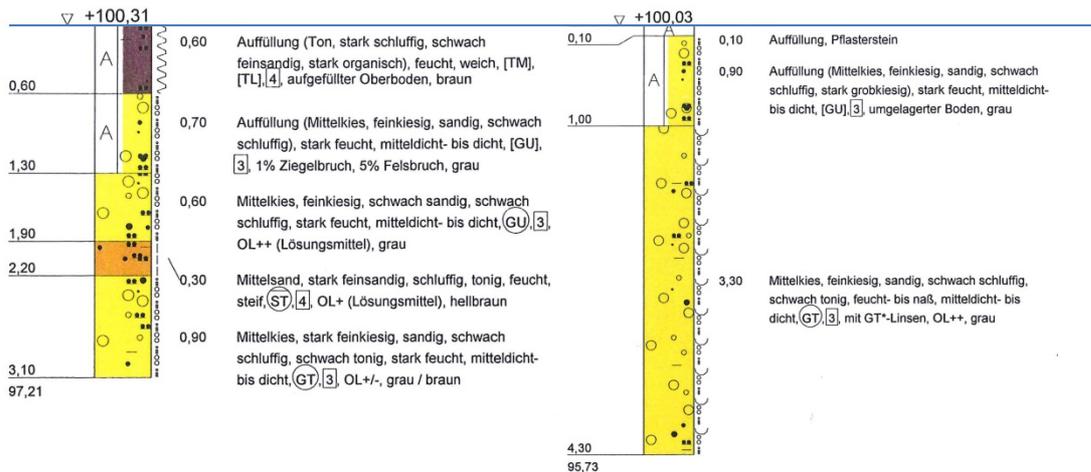


Abbildung 2 Geologische Profile der Bohrungen BS 1 (links) und BS 3 (rechts)

I:\DE011\2014\DE0114_000630_Altlastensanierung_Oberusel\0120 Teilleistung\80_Berichte und Anlagen\3_Endfassung\DE0114_000630_Bericht_Final.docx

Innerhalb der Taunusschotter haben sich Bereiche mit höherem Feinkornanteil (sog. Tonlinsen) ausgebildet, so beispielsweise 8,5 - 9,5 m u. GOK in der Bohrung GWM 1 und 9,5 – 9,8 m u. GOK in GWM 2 (Abbildung 3).

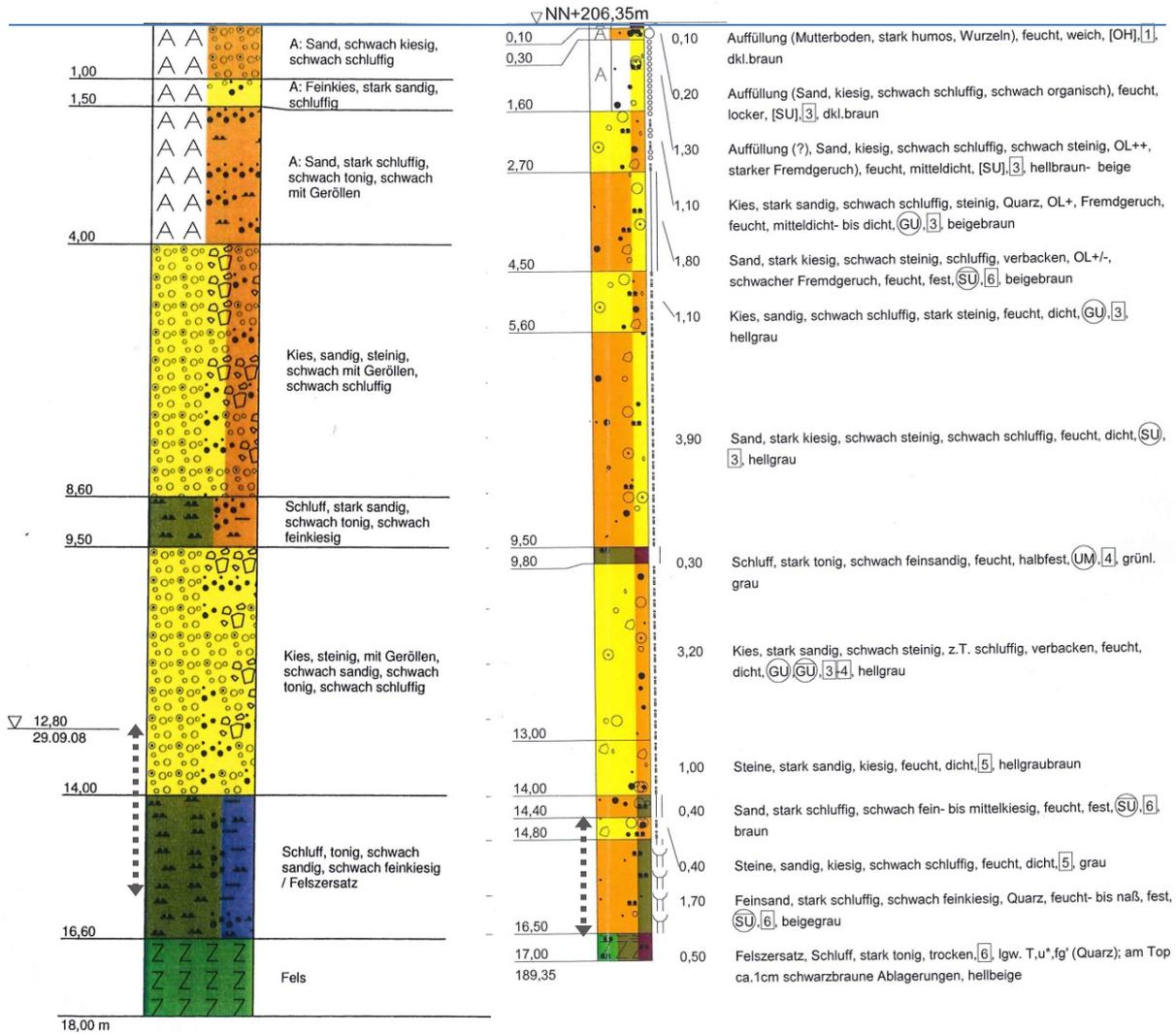


Abbildung 3 Geologisches Profil von GWM 1 (links) und GWM 2/2010 (rechts) (gestrichelte Linie: Filterstrecke)¹

¹ Bei dem angegebenen Grundwasserstand handelt es sich um das hydraulische Druckniveau des gespannten Grundwasserleiters. Das Grundwasser selbst steht innerhalb der Zersatzzone des Fels, der darüber liegende Kies (Schotter) sollte trocken sein.

Stellenweise sind innerhalb der Taunusschotter, im Wesentlichen 2 m und 3 m u. GOK sog. schwebende geringmächtige Grundwasser„stockwerke“ ausgebildet (Stauwasser bzw. Schichtwasser).

In der Bohrung GWM 1 wurde unterhalb der Tonschicht Schotter angetroffen. Ab 14,0 m u. GOK steht verwitterter hellgrauer Fels an, der bis 16,0 m u. GOK stark lehmig und darunter bis zur Bohrendteufe eher plattig verwittert/zersetzt ist. Das Bodenprofil kann wie folgt zusammengefasst werden:

- 0 – 2 m u. GOK Auffüllung
- 2 – 9 m u. GOK Taunusschotter, dicht, mit Schlufflinsen
- 9 – 10 m u. GOK Schluff-, Tonlage
- 10 – 14 m u. GOK Schotter, gerundet (wahrscheinlich Mainterrasse)
- 14 – 16 m u. GOK Fels, verwittert, stark lehmig
- 16 – 20 m u. GOK Fels, verwittert, plattig, Grünschiefer

Im stark inhomogen aufgebauten Untergrund mit weit gestuftem Korngrößenspektrum wird eine nutzbare Porosität von 15 % abgeschätzt. Die hydraulische Durchlässigkeit der ungesättigten Bodenzone wurde zunächst als gering durchlässig mit k_f -Werten von 10^{-5} m/s bis 10^{-7} m/s abgeschätzt [U 13].

An GWM 4/2010 liegt der Grundwasser(druck)spiegel innerhalb der Felsersatzzone; das Grundwasser ist gespannt. Das in der Grundwassermessstelle GWM 1 auf etwa 12 m u. GOK (oberhalb der Felsersatzzone) bei Bohrende ansteigende Wasser wurde daher in [U 14] ebenfalls als Schichtwasser bewertet. In der Grundwassermessstelle in der Eppsteiner Straße (GWM 5/2007) steht das Grundwasser bei 15,3 m u. GOK.

Tabelle 1 Grundwasserstände (entnommen aus [U 14])

Grundwassermessstelle	Gelände mNN	Wasserstand 12.04.2010			Wasserstand 26.04.2010			Wasserstand 26.05.2010		
		mNN	muGOK	muPOK	mNN	muGOK	muPOK	mNN	muGOK	muPOK
GWM 1/2008	206,42	-	-	-	193,87	12,55	12,35	193,73	12,69	12,49
GWM 2/2010	206,35	193,52	12,83	12,71	193,52	12,83	12,71	193,51	12,84	12,72
GWM 4/2010	206,75	192,28	14,47	14,39	192,29	14,46	14,38	192,3	14,45	14,37
GWM 5/2007	206,44	190,79	15,65	15,47	190,76	15,68	15,5	190,79	15,65	15,47

Die gemessenen Grundwasserstände sind Tabelle 1 zusammengestellt (die Lage der Messstellen ist in Abbildung 9 gezeigt). Daraus lässt sich keine eindeutige Grundwasserströmungsrichtung

I:\DE011\2014\DE0114_000630_Altlastensanierung_Oberusel\0120 Teilleistung\80_Berichte und Anlagen\3_Endfassung\DE0114_000630_Bericht_Final.docx

erkennen, selbst wenn man den Grund- bzw. Schichtwasserstand in GWM 1 außer Acht lässt. Nach [U 14] wird durch GWM 5/2007 zudem ein anderer Grundwasserhorizont erschlossen. Großräumig ist die Grundwasserströmung nach SSO gerichtet [U 10], was auch die Ausbreitung der Schadstoffe zu bestätigen scheint. Phrealog-Messungen ergaben dagegen einen überwiegend nach Norden gerichteten Grundwasserfluss [U 10]; allerdings ist dieses Messverfahren stark fehleranfällig; die Messwerte sind unplausibel.

Ein im Mai 2010 durchgeführter Slug-Test ergab hydraulische Durchlässigkeiten im Bereich $0,2 \cdot 10^{-7}$ m/s bis $3,5 \cdot 10^{-7}$ m/s [U 14].

2.3 Belastungssituation

2.3.1 Boden

In 2002 wurden auf dem Flurstück 167/2 drei Bohrungen bis in eine Tiefe von etwa 4,0 m u. GOK niedergebracht (BS 1 bis BS 3) und im Feststoff Schwermetalle, BTEX und LCKW untersucht. Mit den Untersuchungen konnte eine Kontamination des Bodens nahezu ausschließlich mit LCKW festgestellt werden [U 1]. In 2006 wurden acht Kleinbohrungen (BS 4 bis BS 11) bis in eine Tiefe von max. 4,0 m u. GOK niedergebracht [U 3]. Der Feststoff wurde auf seinen Gehalt an LCKW, MKW, PAK, PCB, Arsen und Schwermetalle untersucht. Die Untersuchungen ergaben eine Belastung des Bodens bevorzugt mit LCKW (Tabelle 2).

Tabelle 2 Ergebnisse der Bodenuntersuchung 2006 (entnommen aus [U 3])

Messstelle	Beprobungstiefe	Beprobungsdatum	LHKW	MKW	PAK	PCB	Arsen	Blei	Cadmium	Chrom ges.	Kupfer	Nickel	Quecksilber	Zink
BS 1	(m unter GOK)	08.08.2002	Angaben in mg/kg											
	0,6 - 1,3		n. a.	n. a.	n. a.	n. a.	6,1	4,9	n. n.	9,5	3,2	4,6	n. n.	6,7
	1,3 - 1,9		183	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.					
BS 1	2,2 - 3,1	08.08.2002	0	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.					
BS 3	1,0 - 2,0	08.08.2002	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.	4	3,9	n. n.	7	3,2	2,7	n. n.	2,7
	2,0 - 3,0	08.08.2002	32,9	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.					
	3,0 - 4,9	08.08.2002	32,4	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.					
BS 4, G 1	0,0 - 0,6	13.03.2006	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.	4,3	42,8	0,26	5,2	23,5	9,9	0,04	9,6
BS 4, G 2	0,6 - 1,0	13.03.2006	651	292	0	0,47	8	45,1	n. n.	7,3	40,4	19,2	n. n.	56
BS 4, G 3	1,0 - 2,0	13.03.2006	1.020	n. a.	n. a.	n. a.	2,1	6,9	n. n.	2,3	4,4	5,2	n. n.	28,2
BS 4, G 4	2,0 - 2,5	13.03.2006	203	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.					
BS 6, G 2	0,1 - 1,0	27.03.2006	n. a.	16	n. a.	n. a.	3,3	26,7	n. n.	2,7	6,1	5,7	n. n.	22,5
BS 7, G 3	1,0 - 1,3	27.03.2006	n. a.	120	n. a.	n. a.	5,7	16,2	n. n.	4,2	9,1	7,4	n. n.	28,7
BS 10, G 1	0,0 - 1,0	13.03.2006	n. a.	181	0,15	7,44	3,5	45,5	0,27	4,2	28,8	11,5	n. n.	174
BS 10, G 2	1,0 - 1,8	13.03.2006	n. a.	43	0,02	0,943	4,6	15,1	0,08	15,8	13,7	7,9	n. n.	70,1
BS 11, G 1	0,0 - 1,0	27.03.2006	31	61	0,02	0,139	4,4	48	0,14	3,6	40,3	9,5	n. n.	123
BS 11, G 2	1,0 - 2,0	27.03.2006	190	18	n. n.	0,01	2,4	5,6	n. n.	5,3	3,5	5,2	n. n.	17

I:\DE011\2014\DE0114_000630_Altlastensanierung_Oberseel\0120 Teilleistung\80_Berichte und Anlagen\3_Endfassung\DE0114_000630_Bericht_Final.docx

Alle anderen untersuchten Schadstoffe wurden entweder nur lokal angetroffen (PCB², Cu, Zn) oder in Konzentrationen angetroffen, von denen keine Gefährdung für die Schutzgüter der Bundesbodenschutzverordnung (BBodSchV) ausgeht. In 2008 wurde die Belastung unterhalb 4 m u. GOK in der ungesättigte Bodenzone bis in eine Tiefe von etwa 10 m u. GOK (Grundwasserspiegel: ca. 12 m u. GOK) erkundet [U 12]. Die höchsten LCKW-Konzentrationen liegen im Tiefenbereich bis etwa 4,0 m bzw. 6,0 m u. GOK vor. Die analysierten LCKW bestehen zu etwa 99 % aus den beiden Einzelsubstanzen PCE und TCE, VC wurde nicht nachgewiesen. Die in deutlich geringeren Konzentrationen vorliegenden BTEX setzen sich zu 80 - 90 % aus Xylenen zusammen. Benzol war nicht nachweisbar (Tabelle 3). An BLB 1 und BLB 2 verhindert ein Tonhorizont bei 8,8 bzw. 8,4 m u. GOK lokal ein weiteres Absinken der LCKW.

Tabelle 3 Bodenbelastung (GWM 1, BLB 1 und BLB 2) (aus [U 13]; in mg/kg)

Entnahmetiefe	GWM 1		BLB 1		BLB 2		
	muGOK	LHKW	BTEX	LHKW	BTEX	LHKW	BTEX
0,0 - 1,0		504	1,43	3.260	10,8	-	-
1,0 - 2,0				1.910	4,18	745	1,69
2,0 - 4,0		167	0,62	500	n. n.	395	n. n.
4,0 - 6,0		0,27	n. n.	68	n. n.	46	n. n.
6,0 - 8,0		0,15	n. n.	491	1,52	4	n. n.
8,0 - 9,0				29	n. n.	19	n. n.
9,0 - 10,0	1,53		0,02	0	n. n.	-	-
10,0 - 12,0		3,96	n. n.	-	-	-	-
12,0 - 14,0		0,58	n. n.	-	-	-	-
14,0 - 16,0		29,3 ⁺	n. n.	-	-	-	-

Tabelle 4 Bodenbelastung (BLB 3, GWM 2/2010 und GWM 4/2010) (aus [U 14])

Entnahmetiefe	BLB 3		GWM 2/2010		GWM 4/2010		
	muGOK	LHKW	BTEX	LHKW	BTEX	LHKW	BTEX
0,0 - 1,0		16,5	1,23	11,8	0,02	0,37	n. n.
1,0 - 2,0		1.376	2,68	13,3	n. n.	0,14	n. n.
2,0 - 3,0		356	1,07	13,2	n. n.	0,52	n. n.
3,0 - 4,0		1.273	1,91	17,2	0,02	0,11	n. n.
4,0 - 5,0		136	0,22	22,7	n. n.	0,23	n. n.
5,0 - 6,0		39,4	0,07	18,7	0,02	0,12	0,01

² Erhöhte PCB-Belastungen wurden auch in BLB 3 vorgefunden (2,9 mg/kg, 0,2 – 1,3 m u. GOK).

In der Folgezeit wurden beim Bau aller Messstellen jeweils Bodenproben aus dem Bohrgut entnommen und auf LCKW sowie BTEX, z.T. aber auch auf weitere Schadstoffe analysiert. Neben den oberflächennah sehr hohen LCKW-Belastungen (in BLB 5 wurden oberflächennah auch max. 5.000 mg/kg MKW nachgewiesen) wurde festgestellt, dass die LCKW-Konzentrationen in der Tendenz von der Geländeoberkante zur Tiefe hin abnehmen. Teilweise finden sich im Tiefenbereich von 4 – 6 m u. GOK wieder deutlich höhere Schadstoffbelastungen. Die tiefen Bohrungen (Tabelle 4) zeigen auch in der wassergesättigten Bodenzone noch erhebliche bodengebundene LCKW-Gehalte. Die Bohrungen BK 1 und BK 2 innerhalb der Eppsteinstraße wiesen LCKW-Belastungen von maximal 5,83 mg/kg (BK 1, 4 – 4,5 m u. GOK) bzw. 0,01 mg/kg (BK 2, 4 – 4,5 m u. GOK) auf [U 12].

2.3.2 Bodenluft

Die Bodenluft der Bohrungen BS 1 bis BS 3 (2006; [U 1]) und BS 4 bis BS 11 (2008; [U 3]) wurde auf ihren Gehalt BTEX und LCKW untersucht.

In 2009 wurde überprüft, inwieweit sich die LCKW-Kontamination, ausgehend von BS 6 entlang des Kanals ausgedehnt hat (Abbildung 4).

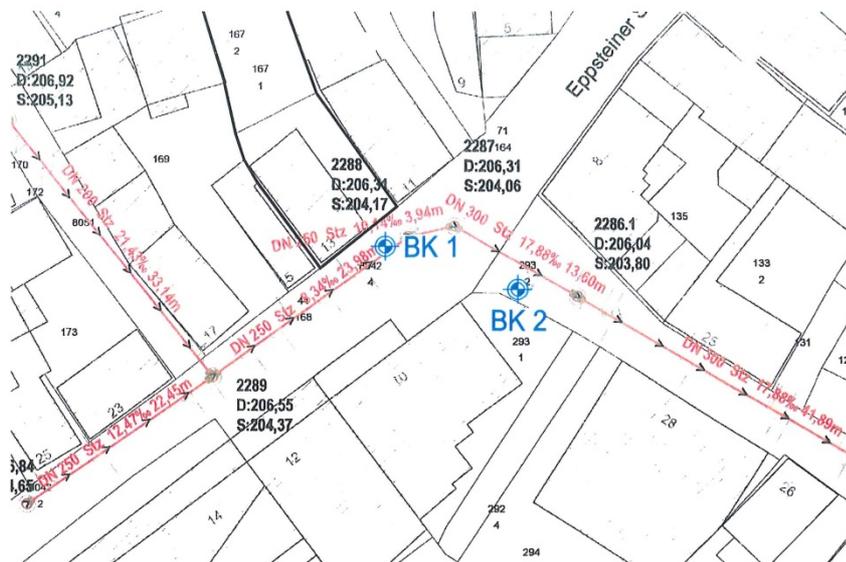


Abbildung 4 Lage der Sondierpunkte im Bereich des Kanals (entnommen aus [U 12])

Hierzu wurden zwei weitere Bohrungen (BK 1 und BK 2) niedergebracht und beprobt. Die Belastung an BK 1 ist im Wesentlichen dem Schadensherd zuzuordnen. Über die Sand/Kies-Schüttung des Kanals erfolgt keine wesentliche Verfrachtung zu BK 2.

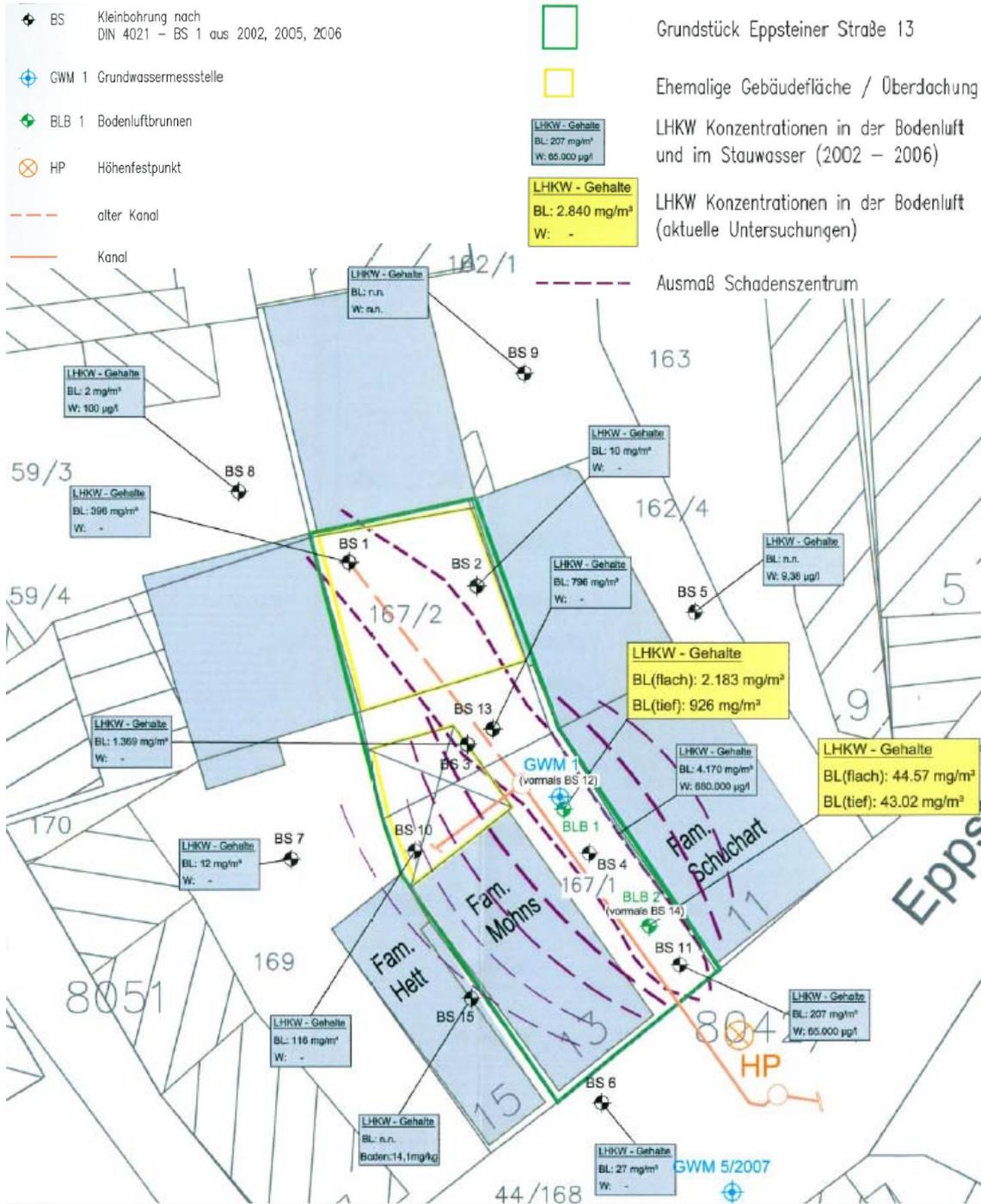


Abbildung 5 Bodenluftbelastung

I:\DE011\2014\DE0114_000630_Altlastensanierung_Oberursel\0120 Teilleistung\80_Berichte und Anlagen\3_Endfassung\DE0114_000630_Bericht_Final.docx

Die Zusammenfassung der in der Bodenluft gemessenen LCKW-Belastung ist in Abbildung 5 visualisiert. Überwiegend bestehen die LCKW aus PCE und TCE, VC wurde nicht und cDCE mit max. 254 mg/m³ nachgewiesen.

2.3.3 Schichtwasser

Im Rahmen der Detailuntersuchung 2006 [U 3] wurde in 5 von 8 Bohrungen bis 4 m u. GOK Schichtwasser angetroffen³. Die Untersuchungen zeigten, dass das Stauwasser, vor allem des Grundstücks Eppsteiner Straße 13 mit LCKW kontaminiert ist. Dominierend sind PCE und TCE, es wurden aber auch hohe Gehalte an 1,1,1-Trichlorethan (max. 14,3 mg/L) und geringe Konzentrationen an cDCE (max. 1.5 mg/L) und VC (max. 0,002 mg/L) nachgewiesen:

- BS 4 680 mg/L LCKW
- BS 5 0,01 mg/L LCKW
- BS 8 0,1 mg/L LCKW
- BS 9 0,0003 mg/L LCKW
- BS 11 65 mg/L LCKW

BS 4 und BS 11 sind im Bereich des Kanalrohrs zur Hausentwässerung lokalisiert.

2.3.4 Grundwasser

In 2008 wurde eine Grundwassermessstelle⁴ (GWM 1, DN 50) bis zum Erreichen des ersten Grundwasserstauers niedergebracht und das Grundwasser untersucht. Die Maximalkonzentrationen in GWM 1 liegen bei 655 mg/L LCKW (18.02.09), überwiegend TCE und PCE. Es sind aber auch cDCE und VC (max. 459; 23.10.08) nachweisbar. BTEX wurden in GWM 1 nicht nachgewiesen.

GWM 5/2007 wies max. 178 mg/L LCKW mit einer ähnlichen Einzelstoffverteilung wie GWM 1 auf, allerdings mit einem etwas stärkeren Transformationsgrad. Die BTEX-Konzentration lag bei max. 368 µg/L (18.02.09, davon 308 µg/L Benzol).

³ In den Bohrungen BS 1 bis BS 3 wurde kein Schichtwasser angetroffen

⁴ Ausbau in Edelstahl (DN 50, Filterstrecke 12 – 16 m u. GOK), die bis dahin vorhandenen Kunststoffpegel der BS 12 und der BS 14 wurden überbohrt. 2008 befindet sich nur noch der Reichweitenpegel BS 13 in Kunststoffausführung im Boden.

In der Folgezeit wurden weitere Grundwassermessstellen in Edelstahl errichtet und beprobt (Tabelle 5).

Tabelle 5 Ergebnisse der Grundwasseruntersuchungen (entnommen aus [U 14])⁵

Messstelle	Beprobungsdatum	Summe BTEX	Benzol	Summe LHKW	Tetrachlor-ethen	Trichlor-ethen	Trichlor-methan	Dichlor-methan	cis-1,2-Dichlor-ethen	Vinyl-chlorid
		Angaben in µg/l								
ehem. BS 4 bei BLB 1	März 2006	-	-	680.000	473.000	191.000	756	743	247	13
ehem. BS 11 bei BLB 2	März 2006	-	-	65.000	24.600	38.700	27	3	1.530	18
BLB 3	13.04.2010	240	12	290.692	23.100	260.000	2.370	1.040	3.810	18
	26.04.2010	559	21	438.192	45.000	381.000	4.340	1.800	5.530	243
GWM 1/2008	23.10.2008	-	-	437.000	95.200	329.000	5.880	4.870	1.390	459
	18.02.2009 (S)	1.433	n. n.	655.380	222.000	412.000	6.350	11.700	2.699	218
	20.02.2009	930	n. n.	359.365	143.000	211.000	3.570	n. n.	3.570	139
	13.04.2010	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	26.04.2010	539	30	219.195	84.200	126.000	2.390	4.540	1.330	41
GWM 2/2010	13.04.2010	198	24	202.841	43.500	146.000	3.320	8.240	1.600	145
	26.04.2010	108	15	111.835	21.400	81.500	2.000	5.530	1.040	347
GWM 4/2010	13.04.2010	n. n.	n. n.	3.806	157	3.474	116	5	53	0
	26.04.2010	n. n.	n. n.	5.927	439	5.230	189	6	60	0
GWM 5/2007	18.02.2009	368	308	177.553	36.900	131.000	2.210	1.850	4.480	920
	26.04.2010	125	121	44.560	7.420	34.600	535	75	1.600	272

Die Grundwassermessstellen wurden auf weitere Schadstoffe hin untersucht. MKW waren in GWM 1 und GWM 2/2010 (hier: 15,4 mg/L), PCB (4,1 µg/L) und n-Alkane (239 µg/L) nur in GWM 1 nachweisbar.

In [U 10] wird vermutet, dass die LCKW-Belastung in das 2. Grundwasserstockwerk eingedrungen sei und sich bereits eine LCKW-Fahne weit nach Südosten ausgebreitet hat. Die wurde bisher jedoch noch nicht weiter untersucht.

2.3.5 Abschätzung der Schadstoffmenge in der ungesättigten Bodenzone

In [U 13] wurde das Schadstoffinventar abgeschätzt. Unter Zugrundelegung der Bodenbelastung (jeweils arithmetische Mittel) von 500 mg/kg für den Bereich 0 - 4,0 m u. GOK und 75 mg/kg für den Bereich von 4,0 m bis 10,0 m u. GOK, eines kontaminierten Bodenkörper von 2.000 m³,

⁵ Wasser der ehem. BS-Bohrungen stellt gesichert Schichtwasser dar. GWM 4/2010 erfasst den Kluftgrundwasserleiter

und einer Dichte des Bodens von 2 t/m^3 ergibt sich ein Inventar in der ungesättigten Bodenzone 400 Ltr. LCKW (640 kg)⁶. Ferner sei davon auszugehen, dass punktuell an lokal ausgebildeten Stauhohizonten noch LCKW in Phase vorhanden sind, so dass die rechnerisch ermittelte LCKW-Menge eher die untere Grenze des Schadstoffpotenzials darstelle.

2.3.6 Innenraumluft

In den Gebäuden Eppsteiner Straße 11, 13 und 15 wurden 2006 Raumluftuntersuchungen durchgeführt [U 4]. In allen drei Gebäuden wurden erhöhte LCKW-Konzentrationen festgestellt:

Eppsteiner Str. Nr. 13

- Keller: max. $959 \mu\text{g/m}^3$ LCKW ($391 \mu\text{g/m}^3$ PCE, $430 \mu\text{g/m}^3$ TCE),
- Erdgeschoss: max. $370 \mu\text{g/m}^3$ LCKW ($199 \mu\text{g/m}^3$ PCE, $119 \mu\text{g/m}^3$ TCE),

Eppsteiner Str. Nr. 11

- Keller: max. $20,5 \mu\text{g/m}^3$ LCKW ($8,5 \mu\text{g/m}^3$ PCE, $12 \mu\text{g/m}^3$ TCE),
- Erdgeschoss: max. $118 \mu\text{g/m}^3$ LCKW ($71 \mu\text{g/m}^3$ PCE, $45 \mu\text{g/m}^3$ TCE),

Eppsteiner Str. Nr. 15 [U 6]

- Keller: max. $517 \mu\text{g/m}^3$ LCKW,
- Erdgeschoss: max. $152 \mu\text{g/m}^3$ LCKW.

Im Keller des Gebäudes Eppsteiner Straße 13 wurde eine dauerhafte Raumluftreinigungsanlage installiert. Das Gebäude Eppsteiner Straße 15 war zum Untersuchungszeitpunkt nicht bewohnt, weshalb hier kein akuter Handlungsbedarf bestand.

3 Konzeptionelles Standortmodell

Die hydrogeologischen Eigenschaften des Standortes sowie die Schadstoffverteilung und Schadstofftransportpfade sind von grundlegender Bedeutung für die Auswahl des unter technischen und ökonomischen Gesichtspunkten am besten geeigneten Sanierungsverfahrens. Daher wurden diese Randbedingungen im Kapitel 2 umfassend dargestellt. Die Einzeldaten wurden im Folgenden durch die ARCADIS Deutschland GmbH zu einem sogenannten Konzeptionellen Standortmodell zusammengefasst. Dies beschreibt die der heute beobachtbaren Schadstoffver-

⁶ Berechnungsgrundlage ist die Dichte des PCE: $1,6 \text{ t/m}^3$

teilung zugrundeliegenden Verteilungsprozesse. Dort, wo keine Messdaten zur Verfügung standen, wurden begründete Annahmen getroffen.

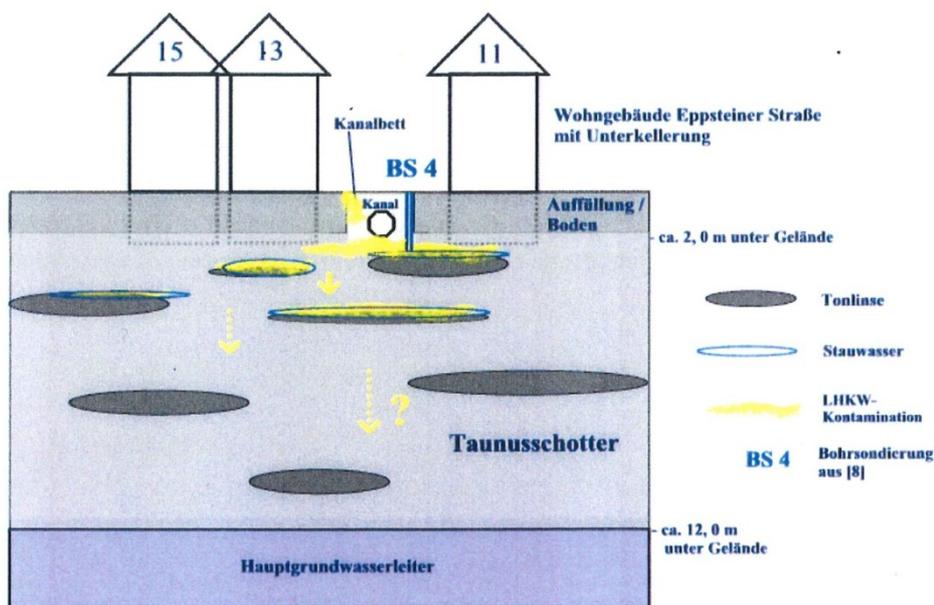


Abbildung 6 Standortmodell (entnommen aus [U 8])

Vermutlich über den Bereich der Handhabung und des Lagers der LCKW erfolgte der Eintrag in den Untergrund. Es kann vermutet werden, dass dies nicht ein einzelner Unfall war, sondern über einen langen Zeitraum verteilte Tropfverluste. Die LCKW in Phase bewegten sich entsprechend der Schwerkraft nach unten. Insbesondere das Kanalbett mit seiner Sand/Kiesfüllung dürfte die Bewegung der LCKW in Phase deutlich erleichtert haben (Abbildung 6). Wegen der sehr hohen oberflächennahen Belastung an BLB 1 kann vermutet werden, dass dort der Haupteintragsbereich lag. Die Tatsache, dass die bodengebundenen LCKW-Konzentrationen 2 m u. GOK stark abnehmen belegt die üblicherweise festgestellte stark mäandrierende Bewegung der LCKW. Dies dürfte auch die Ursache dafür sein, dass LCKW in Phase mit hoher Wahrscheinlichkeit bis in den Bereich unterhalb der beiden Gebäude, Eppsteiner Straße 11 und 13 verfrachtet wurden.

An Schluff/Tonlinsen erfolgte eine laterale Umlenkung der Phasenmigrationsrichtung. Wegen der einfachen Beweglichkeit der Phase in der ungesättigten Bodenzone baute sich kein ausreichend hoher hydrostatischer Druck auf, so dass die LCKW nicht sehr tief in die gering durchlässigen Bereiche eingedrungen sind.

Während der Migration der LCKW (bevorzugt in sogenannten Fingern) zur Tiefe hin, ist im ungesättigten Bereich eine Residualsättigung des Bodens verblieben. Aus dieser gehen die

LCKW mit der Zeit mehr und mehr in die Gasphase über. Die gasförmigen LCKW verbreiten sich lateral nur bedingt. Im Wesentlichen findet ein Übergang in die Atmosphäre statt, in der sie mit dem Wind rasch auf sehr geringe Konzentrationen verdünnt werden. Teilweise dringen die LCKW auch in Innenräume ein und können dort akkumulieren.

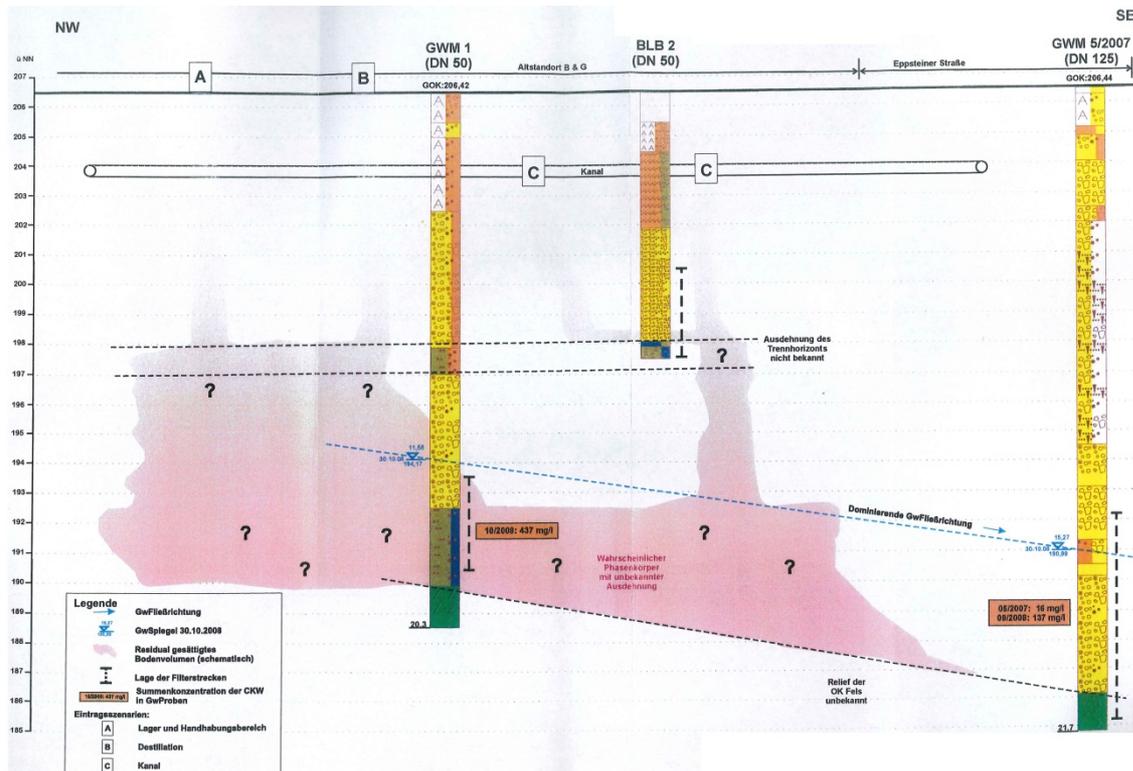


Abbildung 7 Profilschnitt durch den Nahbereich des Standortes (aus [U 10])

Oberhalb der Tonlinsen sammelt sich versickerndes Niederschlagswasser als Schichtwasser. Dieses weist vermutlich keine laterale Strömung auf. Liegt das Stauwasser im Bereich der residualen LCKW-Sättigung vor, können sich die LCKW aus der Phase im Schichtwasser lösen. Wegen der fehlenden Wasserbewegung werden dann sehr hohe Konzentrationen gelöster LCKW (bis nahe an der Löslichkeitsgrenze) erreicht.

Lateral die Tonlinsen umströmende LCKW sinken (eine ausreichende Masse eingetragener Schadstoffe vorausgesetzt) weiter in die Tiefe. Offensichtlich hemmt der Übergang des Taunusschotters zur Felsersatzzone die hydraulische Verbindung zur Tiefe hin. Die Konzentration der gelösten LCKW nimmt an dieser Schwelle zur Tiefe hin deutlich ab. Daher kann vermutet werden, dass in diesem Tiefenbereich keine ausreichend hohe LCKW-Residualsättigung mehr vorliegt, die eine signifikante Verfrachtung der LCKW in eine größere Tiefe (2.

Grundwasserstockwerk) erlauben würde. Gleichwohl ist dies ein Umstand, der noch zu überprüfen ist.

Vermutlich findet innerhalb der Felszersatzzone eine Migration der im Grundwasser gelösten LCKW entlang dem Grundwassergefälle statt (Abbildung 7). Inwieweit sich über GWM 5 hinaus eine LCKW-Fahne im Grundwasser ausgebreitet hat, ist derzeit noch ungeklärt. Wegen der geringen hydraulischen Durchlässigkeit dieser Schichten ist zu vermuten, dass sich die Fahne nicht sehr weit in den Abstrom hinein entwickelt hat. Aber auch bei diesem Punkt steht eine technische Überprüfung noch aus.

In der überwiegend aeroben ungesättigten Bodenzone findet keine Umwandlung (Transformation) der LCKW zu den geringer chlorierten Metaboliten, cDCE und VC, statt. Allenfalls in anaeroben Mikrokompartimenten bzw. in den durch das Schichtwasser gesättigten Teilbereichen ist eine Transformation zu (hier allerdings zu nur geringen Konzentrationen an cDCE) möglich. Innerhalb des Grundwassers in der Felszersatzzone findet eine weitergehende Transformation statt. Im Ergebnis weist die LCKW-Kontamination einen höheren Anteil an cDCE und VC auf (vgl. Tabelle 5). Ob dort ein (zumindest im geringen Umfang) vollständiger anaerober, reduktiver Abbau von VC zu Ethen erfolgt, ist nicht bekannt, Ethen wurde nicht analysiert. Verantwortlich für den höheren Transformationsgrad sind die Begleitschadstoffe (im Wesentlichen MKW), deren anaerober Abbau den für den reduktiven Abbau der LCKW notwendigen Wasserstoff liefern.

4 Sanierungsuntersuchung

4.1 Randbedingungen für die Sanierung

Nach [U 13] müssen bei der Auswahl des Sanierungsverfahrens folgende Randbedingungen berücksichtigt werden:

- Denkmalgeschützte Bausubstanz.
- Die Keller weisen überwiegend gestampften Lehm Boden auf.
- Die meisten Gebäude sind bewohnt, sensibilisierte Anwohnerschaft.
- Teilweise extreme räumliche Enge.
- Die Eppsteiner Straße ist eine wichtige Verkehrsverbindung im Altstadtbereich.

Für die geplante Sanierung wurden folgende Sanierungsziele festgelegt:

- Unterbindung des weiteren Eindringens von leichtflüchtigen Schadstoffen in die Raumluft der Gebäude.
- Quellen- bzw. Herdsanierung im maximal möglichen Ausmaß zur Verringerung der LCKW-Nachlieferung in das Grundwasser.

4.2 Erste technische Maßnahmen

Im Jahr 2006 wurde ein sechswöchiger Bodenluftabsaugversuch an BS 12 durchgeführt [U 5]. Die Absaugrate sank von anfänglich ca. 15 Nm³/h auf ca. 6 Nm³/h am Versuchsende. Es zeigte sich, dass an dem 1,2 - 3,2 m u. GOK verfilterten Absaugpegel (DN 50) ein LCKW-Austrag von lediglich 1,8 kg erzielt werden konnte. Der in 4,0 m Entfernung positionierte Reichweitenpegel (BS 13)⁷ wurde nur schwach erreicht ($\Delta P = -0,07$ hPa; BS 12: ($\Delta P = -85$ hPa)⁸, weshalb von einer maximalen Reichweite von 3,0 m im Radius um den Absaugpegel ausgegangen werden muss. Der LCKW-Konzentration ist in BS 12 innerhalb weniger Tage auf Werte um 50 mg/m³ abgesunken und verblieb bei dieser geringen Konzentration während des gesamten Versuches. Ca. 14 Tage nach Abschaltung der Absaugung steigt die Konzentration wieder auf 338 mg/m³ (03.11.06). An BS 14 wurde ein Anstieg der LCKW-Konzentrationen von 2.840 mg/m³ auf 3.870 mg/m³ während des Versuches festgestellt.

⁷ DN 50, Filterstrecke 1,2 – 3,5 m u. GOK, BS 14 ist von 1,15 – 2,0 m u. GOK verfiltert

⁸ 1 hPa = 1 mbar

Tabelle 6 Verlauf der LCKW-Konzentrationen (1. Bodenluftabsaugversuch) [U 13]

Pegel	Beprobungsdatum	Summe LHKW	Tetrachlor-ethen	Trichlor-ethen	Trichlor-methan	1, 1, 1-Trichlor-ethan	cis-1, 2-Dichlor-ethen	Vinyl-chlorid
Angaben in mg/m ³								
BS 12	21.09.2006	5.500	3.610	1.740	4,39	116	24	n. n.
	03.11.2006	338	245	89,2	89,2	0,95	3	n. n.
BS 13	21.09.2006	796	356	173	0,33	5,14	262	n. n.
	03.11.2006	375	52	155	0,22	31,3	136	n. n.
BS 14	21.09.2006	2.840	1.630	1.090	0,4	0,39	118	n. n.
	03.11.2006	3.870	2.140	1.630	0,14	0,77	98	n. n.

Sanierungsvorbereitend wurde 2008 erneut ein vierwöchiger Bodenluftabsaugversuch an vier Bodenluftpegeln (Abbildung 5) in zwei verschiedenen Tiefenstufen durchgeführt [U 11]:

- o BLB 1 flach, BLB 2 flach 1,0 - 5,0 m u. GOK
- o BLB 1 tief, BLB 2 tief 6,0 - 9,0 m u. GOK

Die erzielbare Absaugrate ($Q = 16 - 22 \text{ Nm}^3/\text{h}$, $\Delta P = -85 \text{ hPa}$) wurde teilweise durch Sickerwasservorkommen vermindert. Die Reichweite wurde erneut mit ca. 3 m bestimmt. Es wurden folgenden Austräge erzielt:

- o BLB 1 flach 7,34 kg
- o BLB 2 flach 0,15 kg
- o BLB 1 tief 2,37 kg
- o BLB 2 tief 0,26 kg

Der Austrag wurde als zu gering bewertet. Unter Berücksichtigung der Schadstoffgehalte am Feststoff, der teilweise steigenden Tendenz der LCKW-Konzentrationen während des Bodenluftabsaugversuches (Tabelle 7, Abbildung 8) und des nur geringen möglichen Volumenstroms, könne die Dauer einer konventionellen Bodenluftabsaugung nicht zuverlässig abgeschätzt werden [U 5].

Die Konzentrationsverläufe zeigen, dass sich BLB 1 herdnah und BLB 2 herdf fern befindet. Herdnah werden die LCKW-Konzentrationen im Laufe der Absaugung durch den Zustrom geringer belasteter Luft verdünnt, herdf fern werden die Schadstoffe aus dem Herd herangezogen, entsprechend steigen die Schadstoffkonzentrationen.

Tabelle 7 LCKW-Konzentrationen (Start und Ende, 2. Bodenluftabsaugversuch)
(entnommen aus [U 11])

Bodenluftbrunnen (Beprobungstiefe)	Beprobungs- datum	Summe LHKW	Tetrachlor- ethen	Trichlor- ethen	Sonstige
		Angaben in mg/m ³			
BLB 1 flach (2 - 5 m uGOK)	15.10.2008	6.340	1.630	4.470	238
	25.11.2008	14.431	5.090	8.530	709
BLB 1 tief (6 - 9 m uGOK)	15.10.2008	6.270	3.420	2.560	284
	25.11.2008	1.842	730	999	104
BLB 2 flach (2 - 5 m uGOK)	15.10.2008	10,6	5,8	4,7	0
	25.11.2008	339	152	177	10
BLB 2 tief (6 - 9 m uGOK)	15.10.2008	17,2	8,3	8,5	0
	25.11.2008	332	169	157	6

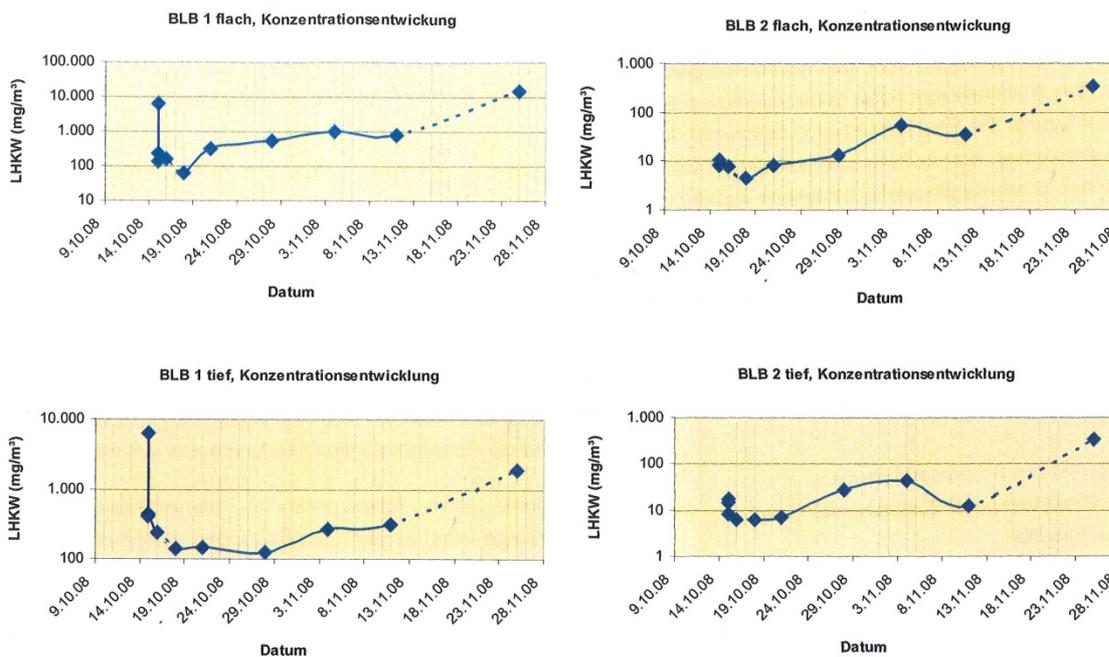


Abbildung 8 Konzentrationsentwicklung an BLB 1 und BLB 2 (entnommen aus [U 11])⁹

⁹ Der gestrichelte Verlauf zeigt die Konzentrationsänderung nach dem Abschalten der Bodenluftabsaugung

I:\DE0111\2014\DE0114_000630_Altlastensanierung_Oberursel\0120 Teilleistung\80_Berichte und Anlagen\3_Endfassung\DE0114_000630_Bericht_Final.docx

4.3 Variantenstudie

Im Jahr 2009 wurde durch den Gutachter eine Variantenstudie durchgeführt mit der Einschränkung: „Die Variantenbetrachtung bezieht sich zunächst nur auf die ungesättigte Bodenzone, wohlwissend, dass auch Sanierungen der gesättigten Bodenzone (Grundwasser) erforderlich werden“ [U 13]. Es wurden folgende Sanierungsverfahren untersucht:

- **Bodenaustausch durch Aushub und Verfüllung.** Der Aushub kann wahlweise bis in unterschiedliche Tiefen erfolgen (1 m, 2 m oder 6 m).

Mit dem Aushub bis 1 m u. GOK sollte die oberflächennahe hohe Belastung mit LCKW und anderen Begleitschadstoffen entfernt werden. Ferner wird damit die Durchführung der thermischen Bodensanierung erleichtert (Einbau oberflächennaher Bodenluftabsaugrohre, Möglichkeit zur Abdichtung gegenüber der Atmosphäre). Der Abwasserkanal verbleibt bei dieser bautechnischen Variante im Boden. Die Ausführung dieser Variante als alleinige Maßnahme unterbindet jedoch nicht die Wirkungspfade der Kontamination.

Bei einem Aushub bis in eine Tiefe von 2,0 m u. GOK (Niveau Unterkante Keller-Bodenplatte) würde auch die vermutlich kontaminierte Kanalsohle entfernt werden. Für eine optionale thermische Sanierung könnten die Absaugleitungen unterhalb des dann neu zu errichtenden Kanals installiert werden. Nach [U 13] wäre diese Variante auch als Einzelmaßnahme denkbar, wenn der Wirkungspfad Boden → Mensch durch eine gasdichte Abdichtung der Kellerwände und -sohle unterbunden werden würde.

Bei einem Aushub bis in eine Tiefe von 6,0 m u. GOK würde der größte Teil der bodengebunden Belastung entfernt werden. Da das Arbeiten mit großen Baugeräten aufgrund der räumlichen Enge technisch nicht möglich ist, wurde der Aushub bis 6 m u. GOK als nicht durchführbar erachtet.

- **Bodenaustausch mittels Bohrtechnik.** Da aufgrund der räumlichen Enge für ein Großbohrgerät kein ausreichender Arbeitsraum zur Verfügung steht, wird diese Variante, die ansonsten eine gute und hinsichtlich der Bohrtiefe variable Möglichkeit der Bodenaustausches darstellt, als nicht durchführbar eingestuft. Eine Verdichtung des nach der Schadstoffentfernung einzubringenden sauberen Kies-Sand-Gemisches würde zwar im Schutz der Bohrverrohrung stattfinden, aber dennoch zu starken Erschütterungen des Untergrundes mit statischer Gefährdung der umliegenden Bausubstanz führen und zusätzlich eine Gefährdung der Schadstoffverfrachtung in tiefere Bodenschichten darstellen.
- **Vermörtelung.** Bei diesem auch als Immobilisierung bekannten Verfahren wird eine Mörtelsuspension z. B. mittels Hochdruckinjektion (HDI) in den Boden eingemischt, wodurch die Schadstoffe immobilisiert werden. Das Verfahren wurde aus verschiedenen Gründen (u.a. seitliche Verdrängung der LCKW beim Mörtel einmischen, keine vollständige Immobilisierung der LCKW erreichbar) verworfen.
- **Gasdichte Versiegelung von Gebäudeteilen.** Das Verfahren wurde verworfen, da keine Dekontamination erfolgt und der Wirkungspfad Boden → Grundwasser weiterhin relevant bleibt.

- **Bodenluftabsaugung.** Dabei werden die gasförmigen Schadstoffe aus dem Untergrund abgesaugt und durch Sorption an Aktivkohle aus dem Luftstrom entfernt. Wegen der geringen Reichweite und der geringen Austragsrate wäre mit sehr langen Sanierungszeiten zu rechnen (> 10 Jahre).
- **Bodenluftabsaugung mit Erwärmung des Untergrundes.** Die Erwärmung des Untergrundes kann entweder mittels fester Wärmequellen oder mittels Injektion eines Dampf-Luft-Gemisches erfolgen. Die in die Gasphase mobilisierten Schadstoffe werden mittels Bodenluftabsaugung entfernt. Dazu ist es wegen Kondensation-, Sorptions- und Diffusionseffekten erforderlich, die Temperatur, bei der die Schadstoffe siedeln (hier: Gemisch-Siedetemperatur) über mehrere Wochen aufrecht zu erhalten.
Das Verfahren sei prinzipiell machbar. Bei unzureichender Planung und Überwachung während der Ausführung bestünde aber die Gefahr der unkontrollierten Schadstoffausbreitung. Daher wurde die Durchführung eines Pilotversuches empfohlen.
- **Kombiverfahren Teilaushub bis 2,0 m u. GOK mit „kalter“ Bodenluftreinigung.**
- **Kombiverfahren Teilaushub bis max. 1,0 m u. GOK mit thermischer Bodenreinigung.**
- **Kombination beider thermischer Verfahren.**

Die Variantenstudie kommt zu keiner eindeutigen Empfehlung hinsichtlich eines Verfahrens: *„Unter Berücksichtigung der Randbedingungen und zur Erreichung der Sanierungsziele [...] werden verschiedene Varianten miteinander kombiniert [...]. Jede dieser Kombinationsmöglichkeiten ist fachlich sinnvoll und technisch durchführbar, weshalb wir die Umsetzung einer dieser Varianten befürworten.“*, und endet mit der Empfehlung zur Durchführung von weiteren Untersuchungen:

- Vertiefende Untersuchungen v. a. des Grundwasserkörpers, aber auch der ungesättigten Zone des Flurstücks 167/2,
- Erstellung einer vergleichenden Kosten-Nutzen-Rechnung und/oder einer dynamischen Kostenvergleichsrechnung für ausgewählte Varianten,
- Auswahl einer Sanierungsvariante, auch unter Beteiligung der betroffenen Anwohner/Eigentümer,
- Erstellung einer Genehmigungs- und Ausführungsplanung sowie von Ausschreibungsunterlagen.

Um zeitnah zu einer Dekontamination des Standortes und damit zu einem nachhaltigen Schutz der Anwohner zu kommen, entschied die Stadt Oberursel in Abstimmung mit dem Regierungspräsidium Darmstadt die Machbarkeit der thermischen *In-situ*-Sanierung der ungesättigten Zone bzw. des schicht- und Sickerwasserbereichs mittels Dampf-Luft-Injektion (DLI) prüfen zu lassen. Diese Machbarkeitsstudie wurde durch die Universität Stuttgart erstellt [U 15].

4.4 Machbarkeitsstudie zur Dampf-Luft-Injektion (DLI)

Im Rahmen der Machbarkeitsstudie [U 15] wurde die hydraulische Durchlässigkeit an GWM 1 und GWM 2/2010 mittels eines Slugtests¹⁰ sowie die hydraulische Durchlässigkeit an BLB 3 mit Hilfe eines Absaugversuches überprüft (erweiterte technische Maßnahmen). Insgesamt lag die Durchlässigkeit der ungesättigten Zone (Taunusschotter) mit $3,5 \cdot 10^{-5}$ m/s bis $6 \cdot 10^{-5}$ m/s im Bereich der bisherigen Annahmen, die hydraulische Durchlässigkeit der gesättigten Zone mit $4 \cdot 10^{-7}$ m/s (GWM 2/2010) bis $8 \cdot 10^{-8}$ m/s (GWM 1)¹¹ deutlich niedriger als zuvor angenommen. Damit war eine Injektion in die Felszersatzzone wegen der geringen Durchlässigkeit nicht möglich. Die DLI musste sich auf die ungesättigte Bodenzone (einschl. Schichtwasserbereich) bis ca. 13 m u. GOK beschränken [U 15]. Für das Sanierungsdesign gab es nun folgende Randbedingungen:

- Die Belastung mit LCKW reicht bis unterhalb der Gebäude.
- Eine hydraulische Grundwassersicherung ist aufgrund der geringen Durchlässigkeit nicht machbar.
- Die Bodenluftabsaugung soll über eine oberflächennahe Drainageschicht erfolgen. Dazu ist ein begrenzter Bodenaushub erforderlich.
- Die gesamte Sanierungsmaßnahme hat einen Zeitbedarf von 16 – 22 Monaten.

Die thermische *In-situ*-Sanierung wurde mit Hilfe des Softwarepaketes „DLI-Tool V1.3“ für den gesamten Standort dimensioniert. Es sollte eine gleichzeitige Injektion des Dampf-Luft-Gemisches in die „ungesättigte Zone“ und in den Stauwasserbereich erfolgen. Die Modellierung kam zu dem Ergebnis, dass die Sanierung mit folgenden Randbedingungen machbar ist:

- 7 Monate Dampf/Luft-Injektion (300 mbar Injektionsdruck).
- 7 Injektionsbrunnen um den Untergrund unter Berücksichtigung der thermischen Reichweite vollständig auf die erforderliche Temperatur aufzuheizen (Filterstrecke 4 - 13 m u. GOK).
- 11 Extraktionsbrunnen (E) zur sicheren Erfassung der verdampften LCKW (Filterstrecke 2 - 11 m u. GOK).
- Zusätzliche Absaugung der kontaminierten Bodenluft über eine Drainage.

¹⁰ Wegen der geringen Ergiebigkeit war die Bestimmung der hydraulischen Durchlässigkeit mittels Pumpversuch nicht möglich.

¹¹ „Mischdurchlässigkeit“, da die Messstellen sowohl im Bereich des Taunusschotters als auch im Bereich der Felszersatzzone verfiltert sind, für den Bereich oberhalb der Felszersatzzone wurde eine Durchlässigkeit von $1 \cdot 10^{-7}$ m/s (GWM 1) und $1 \cdot 10^{-6}$ m/s (GWM 2/2010) berechnet.

- Infiltrations- und Extraktionsbrunnen werden zum Teil mit Schrägbohrungen errichtet um den Bereich unterhalb der Bebauung zu erfassen.

Faktisch nicht berechnet werden konnte die Dauer des Schadstoffaustrags unter wegen der geringen pneumatischen Durchlässigkeit limitierenden Bedingungen der Bodenluftabsaugleistung.

Die Temperaturerhöhung im Untergrund wird mit Hilfe von Temperaturlanzen überwacht, die Hebung oder Setzung des Bodens anhand fest installierter Höhenmarken. Überschlägige Berechnungen haben gezeigt, dass der Austrag der ebenfalls im Untergrund vorhandenen Aromaten (BTEX) keine explosive Atmosphäre entstehen lässt.

Trotz der theoretisch nachgewiesenen Machbarkeit der DLI konnten folgende Punkte nicht hinreichend sicher quantitativ beurteilt werden:

- Wirksamkeit des DLI-Verfahrens bei gering durchlässigem Untergrund.
- Können Setzungen oder Hebungen bei dem vergleichsweise hohen Tonmineralgehalt des Untergrundes des dicht bebauten z.T. denkmalgeschützten Standortes ausgeschlossen werden.
- Können die mobilisierten Schadstoffe hinreichend sicher gefasst werden (Kondensat-Anteil an der Dampffront).
- Erforderlicher Zeitbedarf für die Sanierung unter den gegebenen Randbedingungen.

Bis etwa 2010 galt eine hydraulische Durchlässigkeit von $1 \cdot 10^{-4}$ m/s als derzeitige Anwendungsgrenze. Da an dem Standort eine um etwa eine Größenordnung geringere Durchlässigkeit vorliegt und zur Beantwortung der offen Fragen wurde die Durchführung der DLI zunächst als Pilotversuch im unbebauten Hinterhof des Sanierungsgeländes projektiert. Abschließendes Ziel war neben dem Nachweis der Machbarkeit die Ermittlung der Auslegungsparameter für die Sanierung im technischen Maßstab. Falls der Versuch erfolgreich sei, war vorgesehen, in gleicher bzw. angepasster, optimierter Weise mit dem restlichen kontaminierten Grundstück zu verfahren. Hierzu würde zum Ende der Pilotphase eine Dimensionierung der anschließenden Sanierung des verbleibenden Grundstücks erstellt.

4.5 Bau der Sanierungsinfrastruktur und ergänzende Untersuchungen

Basierend auf der Sanierungsausführungsplanung [U 17] wurde die gesamte Sanierungsinfrastruktur errichtet. Zunächst erfolgte der Bodenaushub bis maximal 1 m u. GOK (Abbildung 9). Ferner wurde der stillgelegte Entwässerungskanal rückgebaut. Der kontaminierte Boden (Depotklasse I, vor allem wegen der LCKW-Gehalte) wurde fachgerecht entsorgt. Das neue Kanal-

bett wurde abgedichtet, ebenso wie weitere Öffnungen (z.B. Kanalananschluss des Gebäudes), die einen Dampfaustritt ermöglichen.

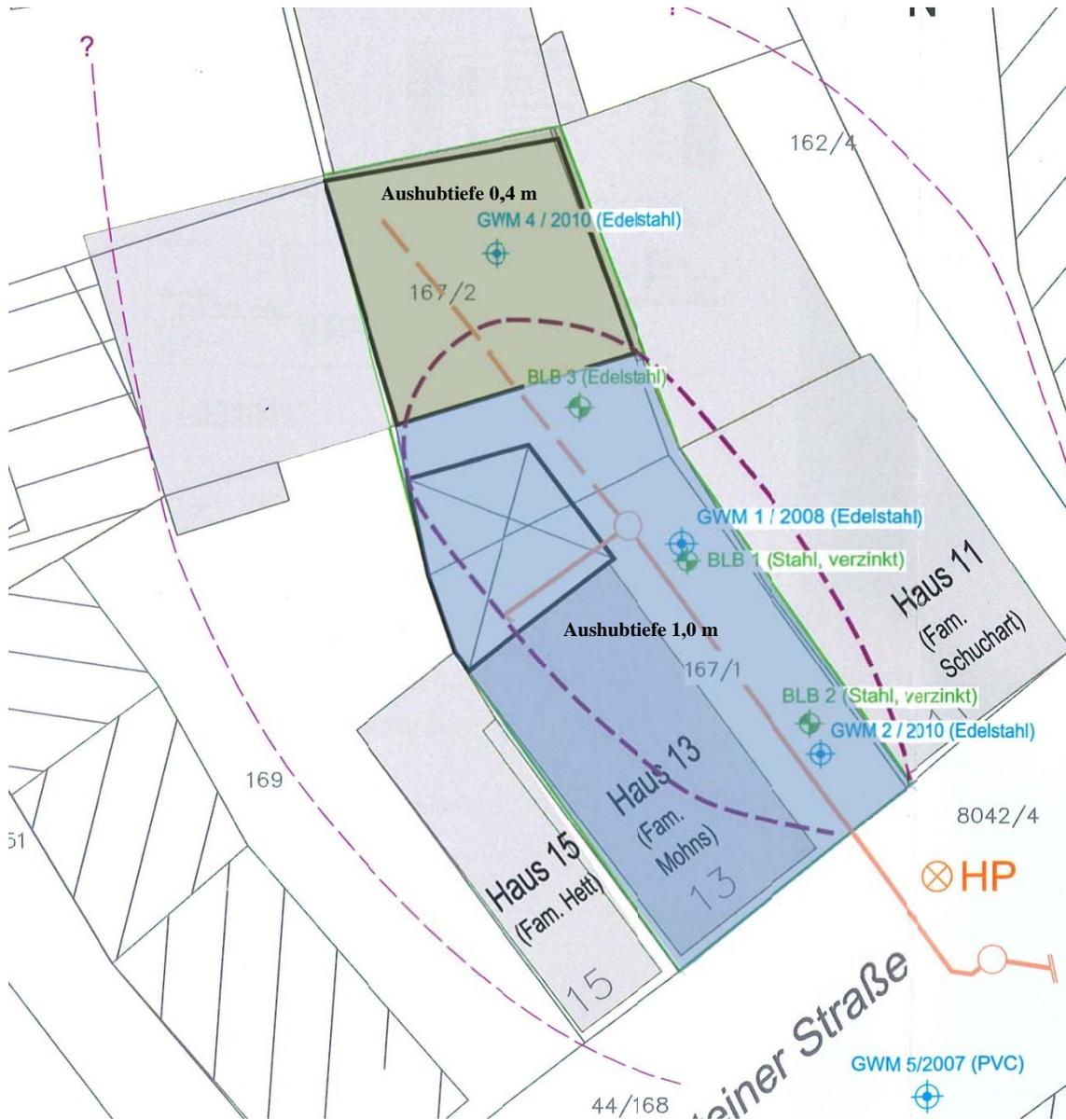


Abbildung 9 Lage Grundwassermessstellen und Aushubbereiche (entnommen aus [U 14] und [U 16], verändert)

Aufgebaut wurde der Aushubbereich mit 40 cm Feinkies (Drainage). Darin horizontal verlegt wurden Absaugleitungen (DN 100) mit einem geringen Gefälle um Ansammlungen von Kondenswasser zu vermeiden. Darauf wurde zur hydraulischen und pneumatischen Abdichtung eine temperaturbeständige HDPE-Dichtbahn mit Überlappung und Gefälle (zum Ablaufen vers-

ckernder Niederschläge), ein Geotextil und einen Feinsandschicht (Sauberkeitsschicht) aufgebracht und die Bohrungen zum Einbau der Brunnen niedergebracht.

Nach Abschluss der Sanierung soll die HDPE-Folie rückgebaut und die ursprünglichen Oberfläche (Pflaster) wieder hergestellt werden. Der Bodenaustausch erfolgte zum Schutz der Anwohner unter Einhausung (bewettertes Zelt).

Nach Inbetriebnahme der kalten Bodenluftabsaugung wurde festgestellt, dass im Vergleich zu den früheren Bodenluftabsaugversuchen eine geringere Durchlässigkeit der für das thermische Verfahren errichteten Absaugpegeln vorliegt. Daher bestand die Vermutung eines fehlerhaften Ausbaus. Folglich wurden sämtliche Absaugpegel (E1 bis E8 und E11) sowie ausgewählte Injektionsbrunnen (I2, I4 und I8) mit geophysikalischen Messungen im Januar 2013 überprüft [U 19]. Sämtliche eingebauten Tondichtungen wurden lagerichtig nachgewiesen mit Ausnahme der Pegel E3 und E4. Bei diesen beiden Pegeln war die Filterstrecke von der Tondichtung des Ringraumes beeinflusst. Anschließend wurden beide Pegel repariert.

Da nach den Vorversuchen eine geringere Durchlässigkeit der ungesättigten Bodenzonen ermittelt wurde, musste das bereits errichtete pneumatische Strömungsfeld überprüft werden. Hierzu wurde ein CO₂-Tracer-Versuch durchgeführt [U 20]. An I1 und I2 wurde mit einem Zeitversatz von 6 h jeweils über 2 h ein Luft/CO₂-Gemisch injiziert (Teil 1) (Abbildung 10). Drei Tage später wurde das Gemisch über 5 h in I3 injiziert (Teil 2). Während des gesamten Versuches erfolgte eine Bodenluftextraktion an 10 Brunnen. In der extrahierten Luft wurde die Konzentration des CO₂ gemessen. Im Rahmen des Versuchsteils 1 wurde das gesamte injizierte CO₂ wieder gefördert, im Versuchsteil 2 konnten nur 68 % des injizierten CO₂ wiedergewonnen werden. Damit war dieser Teil des Sanierungsfeldes nicht uneingeschränkt pneumatisch gesichert.

Basierend auf diesen Ergebnissen wurde für den Pilotversuch die Injektion des Dampf/Luft-Gemisches in I1 und I2 vorgesehen, I3 und I8 sollten der zusätzlichen Bodenluftentnahme dienen. Später sollte dann in I2 und I3 injiziert werden, I5 und ggf. I1 sollten zur zusätzlichen pneumatischen Sicherung dienen. Die Umschaltung der Injektion bewirkt einen Schadstofftransport transversal des Pilotfeldes und baut auf dem zuvor geschaffenen Wärmefeld hinsichtlich der Schadstoffverdampfung auf, so dass die pneumatische Anbindung der Brunnen E1, E2, E7 und E8 genutzt werden kann, um eine verringerte Schadstoffverdampfung (zwei von drei Injektionsstellen) pneumatisch abzusichern [U 20].

Röntgenrefraktometrische Untersuchungen des Bodens zeigten zudem, trotz eines vergleichsweise hohen Tonmineralgehalts im Untergrund, einen nur geringen Anteil von 3 % an quellfähigen Tonmineralen.

higen 3-Schicht-Tonmineralen auf. Ein übermäßiges Quellen des Tones war daher nicht zu befürchten.

4.6 Technische Umsetzung

Die Ergebnisse des Pilotversuches sind umfassend in [U 21] dokumentiert. Die Bewertung des Sanierungsverlaufes ist nicht Gegenstand des vorliegenden Berichtes. Er wird nur insoweit betrachtet, als es zur Ausräumung der ursprünglichen Bedenken (siehe Kapitel 4.4) erforderlich ist.

Insgesamt wurde das Pilotfeld mit 145 Temperaturfühlern zur dreidimensionalen Erfassung der Temperaturverteilung und mit acht Injektionsbrunnen ausgestattet (Abbildung 10). Über spezielle druckluftbetriebene Förderpumpen wurde Grund- bzw. Schichtwasser gefördert. Dies erleichtert eine Bodenluftabsaugung. Das geförderte Wasser ist eine Mischung aus Schichtwasser und Kondensat der DLI. Das Wasser wird in der Sanierungsanlage gereinigt und anschließend unter Einhaltung der Einleitenehmigung der Stadtentwässerung Oberursel in die Kanalisation eingeleitet. Der Pilotversuch erfolgt in 3 Phasen:

- Kalte Bodenluftabsaugung.
- Dampf-Luft-Injektion.
- Abkühlphase.

Der Pilotversuch wurde engmaschig überwacht. Dazu wurde ein Monitoringkonzept erstellt [U 18]. Dies sieht u.a. folgende Überwachungsaufgaben vor:

1. Reinigungsleistung der Sanierungsanlage (Abstrom der Luft- und Wasseraktivkohle, Wasserreinigung),
2. Bestimmung der LCKW-Konzentrationen in der Bodenluft (E-Pegel, Drainage, Bodenluftsammelstränge),
3. Bestimmung der LCKW-Konzentrationen im Grundwasser (E-Pegel, GWM 2, GWM 3 (ersetzt durch I-3), GWM 5),
4. Bestimmung der LCKW-Konzentrationen in der Innenraumluft (Hausnr. 11 und 13, ein- bis zweimal pro Woche während der Heizphase), beginnend am 20.11.2012.

Das Monitoring erlaubt eine Bilanzierung des Schadstoffaustrages und ein Erkennen einer ungewollten Schadstoffausbreitung über Bodenluft, Grundwasser und Innenräume, so dass frühzeitig Gegenmaßnahmen möglich sind. Daneben erfolgen in der Anlage kontinuierliche Mes-

sungen von Volumenstrom, Druck, Temperatur und Schadstoffen in der abgesaugten Bodenluft mittels GC-PID (1 Messung pro 2 h).

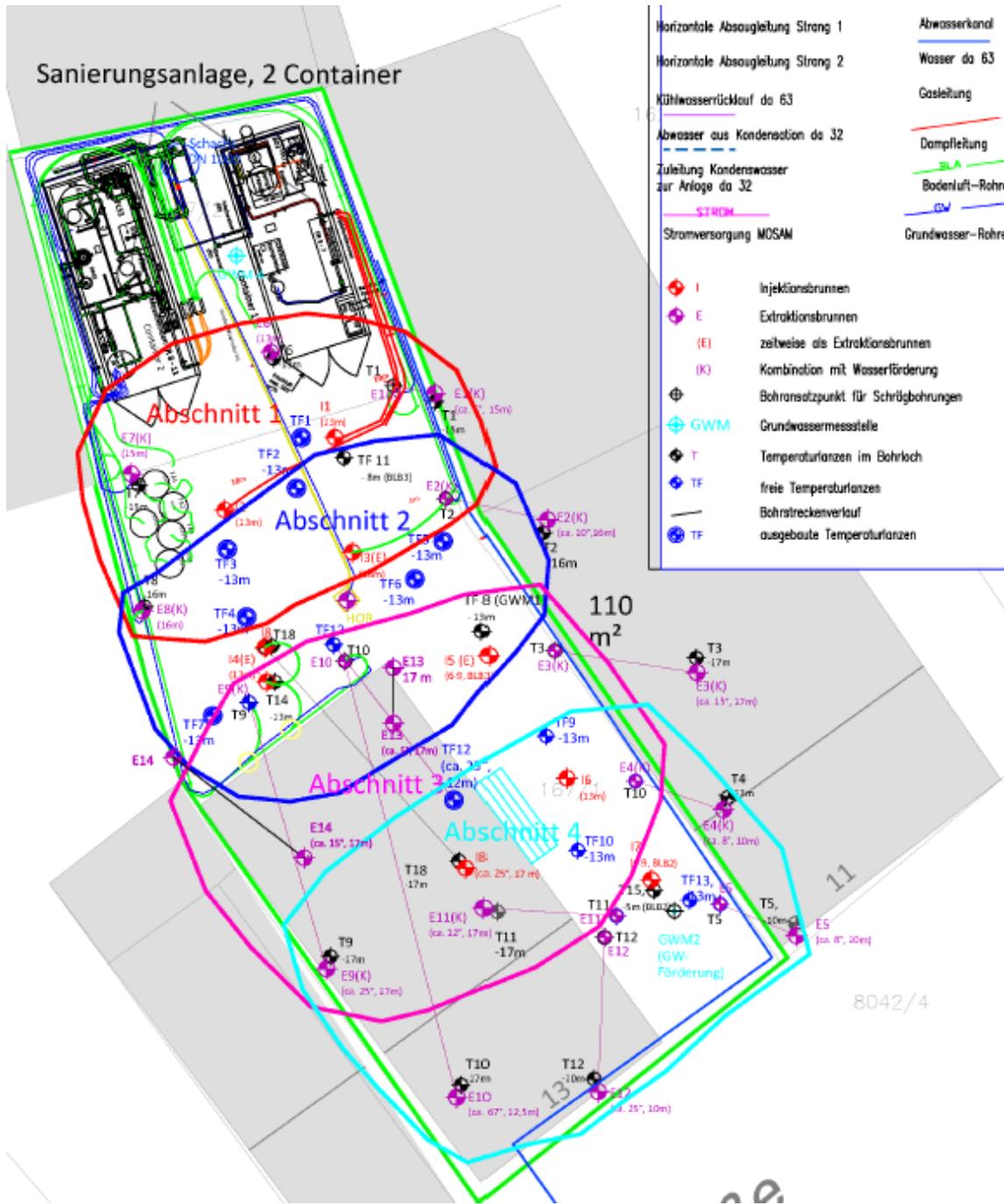




Abbildung 11 Blick in den Innenhof mit der Sanierungsanlage in zwei Containern

Die schallgeschützte Anlage, untergebracht in 2 Containern (Abbildung 11) verfügt über redundante Betriebs Elemente, ist eigensicher ausgelegt, vollautomatisiert und fernüberwacht um rasch auf Fehler und Anlagenausfälle reagieren zu können. Zudem erfolgt eine 14-tägige Anlagenkontrolle sowie zweimal pro Woche eine visuelle Inspektion.

Die Pilotsanierung (Feld 1, Abschnitt 1 und 2) erzielte folgende Erfolge und Ergebnisse:

- Die Dauer der thermischen *In-situ*-Sanierung im Pilotbereich, der in zwei Abschnitte unterteilt wurde (Feld 1.1 und Feld 1.2 bzw. Abschnitt 1 und 2), erhöhte sich auf 6 Monate Dampf-Luft-Injektion. Gemäß der Ausführungsplanung [U 17] waren eine kurze kalte Bodenluftabsaugung, 3 Monate DLI und 4 Wochen Abkühlung geplant.
- Die hydraulische Durchlässigkeit blieb während der 3 Monate Bodenluftabsaugung (BLA) unverändert. Dies führte zu einer Verlängerung der Betriebsdauer um einen Faktor 2 bis 3.
- Während der kalten Bodenluftabsaugung wurde 230 kg LCKW (123 Tagen) und während der DLI 261 kg LCKW (132 Tage) entfernt (Summe: 490 kg LCKW). Die am Versuchsende noch hohen LCKW-Konzentrationen in der Bodenluft indizieren ein ho-

hes verbliebenes Schadstoffpotential, das im Rahmen der Sanierung entfernt werden soll.

- Das Gesamtschadstoffinventar für das gesamte Grundstück (Flurstück 167/1 und 167/2) wird deutlich höher (8.000 kg LCKW) eingeschätzt.
- Über den Wasserpfad wurden dagegen nur 0,48 kg LCKW ausgetragen.
- Die LCKW-Gehalte im geförderten Wasser lagen anfänglich zwischen 3.000 und 100.000 µg/L und sanken auf 10 bis 300 µg/L zum Ende des Pilotversuches (Abbildung 12). Es wurde mit dem kondensierenden Dampf eine maximale Verfrachtung von 6 g/d LCKW in das Grundwasser abgeschätzt. Dieses wurde jedoch durch die Grundwasserextraktion wieder entfernt.

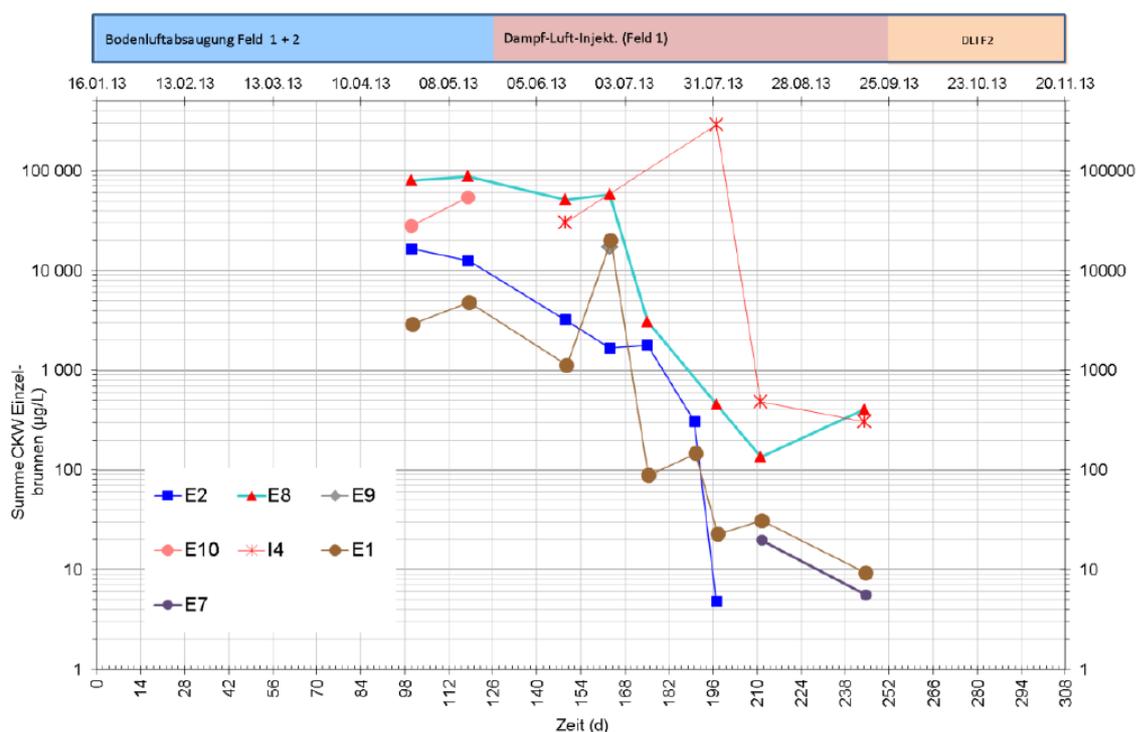


Abbildung 12 Verlauf der LCKW-Konzentrationen in Grundwasser (entnommen aus [U 21])

- Zu Beginn der Grundwasserförderung wurde eine Ölphase festgestellt. Daher musste das geförderte Wasser zuerst über einen Phasenabscheider geleitet werden.
- Bis zum Beginn der DLI konnten Bewegungen der Bodenoberfläche im Bereich von ± 1 mm festgestellt werden. Nach Start der DLI stiegen diese Werte im Pilotfeld um 4 mm an. Damit sollte eine bauliche Beeinträchtigung der Gebäude während der Sanierung nicht zu besorgen sein. Weitere Messungen während der Sanierung im volltechnischen Maßstab sind jedoch erforderlich.

I:\DE011\2014\DE0114_000630_Altlastensanierung_Oberusel\0120 Teilleistung\80_Berichte und Anlagen\3_Endfassung\DE0114_000630_Bericht_Final.docx

5 Bewertung der Entscheidungsfindung

Für eine Entscheidung zu einem unter technischen und ökonomischen Gesichtspunkten am besten geeigneten Sanierungsverfahren war die umfassende Prüfung der am Standort vorliegenden Schadstoffverteilung sowie die hydrogeologischen und baulichen Standortbedingungen erforderlich. Im Ergebnis konnte festgestellt werden, dass sich die Schadstoffe zumindest zum Teil unterhalb der existierenden und teilweise unter Denkmalschutz stehenden Bebauung und zum überwiegenden Teil in der ungesättigten Bodenzone befinden. Der belastete Bereich liegt innerhalb der dicht bebauten Altstadt von Oberursel, was die Zugänglichkeit für Sanierungsmaßnahmen allein aus technischen Gründen deutlich einschränkt.

Inwieweit das beispielsweise in GWM 1 und GWM 5/2007 angetroffene Grundwasser tatsächlich fließfähiges Grundwasser darstellt oder ob es sich zum überwiegenden Teil um Schichtwasser (durch Niederschläge gebildetes, lokal fixiertes Sickerwasser) handelt, ist noch nicht hinreichend geklärt. Zumindest das innerhalb der Felsersatzzone angetroffene, gespannte Wasser scheint einen Grundwasserleiter darzustellen.

Für die mit LCKW belastete ungesättigte Bodenzone (einschl. des Stauwassers) existieren nur eine verhältnismäßig geringe Anzahl anwendbarer Sanierungsverfahren. Dazu zählen:

- Bodenaustausch,
- Bodenluftabsaugung,
- Thermische Mobilisierung und Extraktion.

Andere Verfahren wie z.B. in-situ chemische Oxidation (ISCO) scheitern, weil das Oxidationsmittel im betroffenen ungesättigten Boden nicht hinreichend gleichmäßig verteilt werden kann. Der mikrobielle Abbau der LCKW würde die Einstellung anaerober Bedingungen erfordern, was in der ungesättigten, mit Bodenluft gefüllten Bodenzone ebenfalls nicht gelingt. Weitere Verfahren wie Hochvakuumextraktion oder Spülung der ungesättigten Zone mit Lösungsvermittlern gehören in den Bereich der Forschung und erlangen kurzfristig weder eine Marktreife noch einen Entwicklungszustand, der ein Pilotversuch rechtfertigen würde. Folgerichtig wurden in der Variantenstudie [U 13] auch nur die drei oben genannten Verfahren betrachtet.

Der Austausch des gesamten belasteten Bodens (mindestens bis in eine Tiefe von 6 m u. GOK) durch konventionelle Verfahren oder durch großkalibrige Bohrungen ist bei der Dichte der Bebauung technisch nicht realisierbar. Zudem hätten die sich unterhalb der Gebäude befindlichen LCKW damit nicht entfernt werden können. Alternativ hätten für einen vollständigen Bodenaustausch die beiden denkmalgeschützten Gebäude Eppsteiner Straße 11 und 13 abgerissen

werden müssen. Dies hätte vermutlich die Enteignung der Eigentümer erfordert, was aber angesichts der Tatsache, dass In-situ-Verfahren zur Verfügung stehen, die einen Erhalt der Gebäude erlauben, unter dem Aspekt der Verhältnismäßigkeit als chancenlos erachtet wird.

Ein Austausch nur des oberflächennahen Bodens (bis 1 oder 2 m u GOK) hätte weder den Wirkungspfad der Schadstoffe „Boden → Innenraumluft → Mensch“ noch den Wirkungspfad „Boden → Grundwasser“ dauerhaft unterbrochen. Wie in der Variantenstudie [U 13] richtigerweise festgestellt, sind Bodenaustauschmaßnahmen als alleinige Verfahren nicht zur Sanierung des Standortes geeignet.

Letztlich wurde aber dennoch der oberste Bodenmeter ausgetauscht. Wir halten diese Maßnahme für angemessen und insbesondere vor dem Hintergrund des Anwohnerschutzes nachvollziehbar aus folgenden Gründen:

- Dieser Bodenbereich weist neben den LCKW lokal noch weitere Schadstoffe in Gehalten oberhalb der Prüfwerte für den Direktpfad „Boden → Mensch“ auf (dies wäre nur im Falle einer Entsiegelung der Oberfläche relevant) wie z.B. PCB und Mineralöle.
- Der Oberboden (0 – 1 m u. GOK) ist bereichsweise sehr hoch mit LCKW belastet. Sowohl die kalte als auch thermisch unterstützte Bodenluftabsaugung sind in diesem Bereich weniger wirksam. Dies gilt für die tatsächlich realisierte thermisch unterstützte Bodenluftabsaugung im besonderen Maße, da wegen der Wärmeabstrahlung in die Umgebung es in der Regel nicht gelingt, diesen obersten Bodenbereich ausreichend zu erwärmen.
- Der Bodenaustausch ermöglicht den leichteren Einbau der für das DLI-Verfahren benötigten Sanierungsinfrastruktur. Ferner wird dadurch eine Abdichtung des zu sanierenden Areals zur Atmosphäre hin erreicht.

Die Wirksamkeit der kalten Bodenluftabsaugung wurde im Rahmen des Projektes umfangreich untersucht. Trotz der Tatsache, dass der Boden der ungesättigten Zone als Sand/Kies angesprochen wurde, war seine Durchlässigkeit wegen eines sehr breiten Kornspektrums gering. Entsprechend betrug die erzielbare Reichweite (Radius) der Absaugung nur 3 m. Die ermittelten monatlichen Austragsraten von 1,8 kg (1. Versuch) bzw. 10 kg (2. Versuch) hätten unter Berücksichtigung des in Kapitel 2.3.5 abgeschätzten LCKW-Inventars und linearer Extrapolation zu Sanierungszeiten zwischen 5,3 und 30 Jahren geführt¹². Nach der Durchführung des Pilotversuches wurde ein um eine Größenordnung größeres LCKW-Inventar abgeschätzt (Kapitel 4.6). Entsprechend hätte sich die Sanierungsdauer der angenommenen kalten Bodenluftabsaugung verzehnfacht. Erschwerend kommt hinzu, dass sich in ca. 8 – 9 m Tiefe eine Schluffschicht

¹² Worst Case-Annahmen, da nicht das gesamte kontaminierte Areal abgesaugt wurde.

befindet. Auch wenn die analytische Untersuchung keine hohe Belastung ergab, ist es doch wahrscheinlich, dass die LCKW oberflächennah in hohen Konzentrationen in diese Schluffschicht eingedrungen sind¹³. Während der Sanierung diffundieren diese LCKW sehr langsam zurück in besser durchlässige Bereiche und führen dazu, dass die geschätzten Sanierungszeiten oft deutlich überschritten werden.

Darüber hinaus wäre es bei der geringen Reichweite der Bodenluftabsaugung schwierig gewesen, die sich unterhalb der Bebauung befindlichen Schadstoffe zu entfernen. Möglicherweise hätten aber Schrägbohrungen, wie sie auch bei dem thermischen Verfahren angewandt wurden, zu einer ausreichenden Behandelbarkeit dieses Bodenbereiches geführt. Zusammenfassend kann aber festgestellt werden, dass auch die kalte Bodenluftabsaugung nicht zur Sanierung des Standortes geeignet ist.

Die thermisch unterstützte Bodenluftabsaugung ist entsprechend dem bisherigen Kenntnisstand [U 25][U 26] gerade für die Sanierung von Standorten geeignet, die eine komplexe geologische Struktur und eine erhebliche Belastung mit leichtflüchtigen Schadstoffen, wie den LCKW aufweisen. Es gibt eine Reihe unterschiedlicher Verfahren, den Untergrund aufzuheizen.

Zu den weniger bekannten Verfahren gehören das Erhitzen des Untergrundes mittels Radiofrequenzen (RF) und das sogenannten *Electrical Resistance Heating* (ERH). Bei dem, dem Mikrowellenofen ähnlichen RF-Verfahren werden Radiowellen mit Hilfe von Elektroden in den Boden eingeleitet. Durch die dadurch erzeugte Schwingung in den Molekülen entsteht die gewünschte Wärme. An der Oberfläche ist es aus Gründen der Sicherheit erforderlich, die Antennen zur Abschirmung der starken Radiowellen umfangreich einzukapseln. Das RF-Verfahren ist für einen Einsatz im Grundwasser (hier: Schichtwasser) nicht geeignet, da dessen Reichweite der Radiowellen im Wasser zu gering ist. Beim ERH-Verfahren wird eine elektrische Spannung über Stahl-Elektroden im Boden angelegt. Durch den elektrischen Widerstand des Bodens entsteht die Hitzebildung. Der am Standort vorliegende Sand hat eine geringe elektrische Leitfähigkeit. Daher ist es schwieriger, in solchen Böden ausreichend hohe Temperaturen aufrecht zu erhalten. Sowohl wegen den in Deutschland geringen Erfahrungen zu beiden Verfahren, der eingeschränkten Anwendbarkeit unter den gegebenen Standortbedingungen als auch wegen der erhöhten Gefährdung der Anwohner (starke Radiostrahlung bzw. elektrischer Strom) werden diesen beiden Verfahrensvarianten ausgeschlossen.

¹³ Solche Effekte können nur durch eine sehr hochauflösende Beprobung und Analytik erkannt werden. Dies erfordert eine spezielle Probenahme (Liner-Bodenproben). Die im Rahmen des Projektes aus dem Bohrgut der Sondierungen gewonnenen Proben lassen eine hochauflösende Beprobung nicht zu.

In Deutschland liegen dagegen besonders mit den folgenden beiden Verfahren umfassende Kenntnisse vor:

- Feste Wärmequellen,
- Dampf-Luft-Injektion.

Beim Verfahren der festen Wärmequellen werden zylinderförmige Heizelemente in den Untergrund eingebaut. Durch die „trockene“ Erhitzung kommt es zu einer Austrocknung des Bodens mit dem Ergebnis der Zunahme der pneumatischen Durchlässigkeit. Ferner erfolgt der Wärmetransport konduktiv. Dies bedeutet, dass gering durchlässige Bodenbereiche nahezu gleich schnell aufgeheizt werden wie besser durchlässige Bereiche. Nachteil der Austrocknung ist, dass quellfähige Tone schrumpfen und es hierdurch zu erheblichen Setzungen kommen kann. Durch den Wärmeeintrag gehen die Schadstoffe bevorzugt in die Gasphase über, aus der sie mittels Bodenluftabsaugung abgesaugt und eliminiert werden können.

Bei der Dampf-Luft-Injektion (DLI) wird die Wärmeenergie durch den Dampf, der im Boden kondensiert, zugeführt. Ein Austrocknen des Bodens wird damit vermieden. Eine Erhöhung des Wassergehaltes des ungesättigten Bodens kann aber dazu führen, dass die quellfähigen Tone vermehrt quellen und es zu einer Hebung des Bodens kommt. Voraussetzung für die Machbarkeit der DLI ist eine ausreichende Durchlässigkeit des Bodens.

Die Anforderungen an den Inhalt einer Sanierungsuntersuchung sind detailliert in der Bundesbodenschutzverordnung (BBodSchV) [U 24] festgelegt. Die im 2009 durchgeführte Variantenstudie [U 13] genügt in ihrer Ausgestaltung weitestgehend den Anforderungen der BBodSchV.

Wesentliches Kriterium für die Entscheidung zu dem DLI-Verfahren war offensichtlich die Minimierung von möglichen Setzungen des Bodens. Während Quellungen des Tons (und damit eine Hebung des Geländes) im Rahmen der DLI im wesentlich geringeren Umfang auftreten, können Setzungen sehr erheblich sein. Im Rahmen des Aufbaus der Sanierungsinfrastruktur wurden röntgenrefraktometrische Untersuchungen des Bodens (Ort der Probenahme ist nicht dokumentiert) durchgeführt. Diese zeigten trotz eines vergleichsweise hohen Tonmineralgehalts im Untergrund einen nur geringen Anteil von 3 % an quellfähigen 3-Schicht-Tonmineralen auf; ein übermäßiges Quellen des Tones war daher nicht zu befürchten (Kapitel 4.5). Daraus könnte man ableiten, dass auch ein Schrumpfen weniger zu befürchten gewesen wäre. Allerdings haben unsere Erfahrungen gezeigt, dass aus Bodenuntersuchungen im Labor nur unzureichend auf das Verhalten (Setzen/Heben) des Bodens im technischen Maßstab geschlossen werden kann. Inso-

fern war die Entscheidung, kein Risiko hinsichtlich möglicher Setzungen und damit einer Gefährdung der denkmalgeschützten Bebauung einzugehen, richtig und nachvollziehbar. Die Erprobung der DLI im Pilotmaßstab hat letztlich auch gezeigt, dass die Hebung des Bodens im tolerierbaren Bereich liegt [U 21].

Die die Pilotsanierung begleitenden häufigen und regelmäßigen Messungen der LCKW-Konzentrationen in der Innenraumluft haben zudem gezeigt, dass durch die Absaugung der ungesättigten Bodenzone in Verbindung mit der nach wie vor noch laufenden Raumlufreinigung ein anhaltendes Eindringen der LCKW in die Innenräume unterbunden wurde.

Durch die Kondensation des Dampfes wird im Untergrund vermehrt Wasser gebildet. In diesem lösen sich die LCKW. Damit könnte man argumentieren, dass Schadstoffe in das Grundwasser eingetragen werden. Andererseits wurde das anfallende kontaminierte Grundwasser abgepumpt und einer Reinigung zugeführt. Im Endergebnis sind die Konzentrationen gelöster LCKW im Grundwasser um 2 – 3 Größenordnungen gesunken (vgl. Abbildung 12). Insofern wurde durch die Ausgestaltung des DLI-Verfahrens die Belastungssituation des Grundwassers erheblich verbessert. In den verschiedenen Unterlagen zur Dokumentation des Verfahrens wurde die Frage, ob eine hydraulisch wirksame Grundwassersicherung bzw. –sanierung grundsätzlich möglich sei, kontrovers beurteilt. Mit dem Verständnis, dass damit eine Grundwasserentnahme abstromig des Sanierungsareals gemeint sei, lässt sich anhand der gemessenen Konzentrationen der LCKW im Grundwasser auch feststellen, dass dies – abgesehen von einer generellen Machbarkeit – nicht erforderlich ist.

Zusammenfassend unterbindet das DLI-Verfahren in der gewählten Ausführungsform zuverlässig die relevanten Wirkungspfade Boden → Innenraumluft und Boden → Grundwasser und Setzungen oder Hebungen des Bodens liegen im tolerablen Bereiches; Sekundärschäden entstehen somit nicht.

Zudem zeigt die Dokumentation der durchgeführten Maßnahmen (Kapitel 4.5), dass das Verfahren sorgfältig geplant und von allen erforderlichen Vorabuntersuchungen zur Erhöhung der Verfahrenssicherheit begleitet wurde.

Auch wenn die Entscheidung zum DLI-Verfahren im Wesentlichen aus dem Schutz der denkmalgeschützten Bebauung beruhte, blieb die Frage, ob DLI bei den gegebenen Durchlässigkeiten erfolversprechend angewendet werden kann. Erste Modellierungsergebnisse zeigten, dass dies durchaus der Fall ist, aber einer Verifizierung bedurfte. Daher wurde, auch wegen der möglichen Bodenhebung, ein Pilotversuch durchgeführt. Der Pilotversuch wurde im Rahmen des

TASK¹⁴-Forschungsprogrammes gefördert, so dass der Mehraufwand, der sich aus der Tatsache ergibt, dass DLI bei derartigen geologischen Verhältnissen erstmals in Deutschland eingesetzt wurde, durch die finanzielle Förderung aufgefangen wurde. Im Ergebnis des Pilotversuches wurde seitens der Universität Stuttgart festgestellt: „Die Wirksamkeit der DLI bleibt hinter den Erwartungen einer Austragssteigerung um eine Größenordnung zurück“ [U 21]. Als Ursachen dafür werden angeführt:

- das gegenüber der ersten Schätzung deutlich höhere Schadstoffinventar (bereits während des Pilotversuches wurden 490 kg des ursprünglich geschätzten Inventars von 640 kg entfernt) und
- die geringe Durchlässigkeit, die sich auch nach Erhitzen des Bodens nicht verbesserte.

Basierend auf den Ergebnissen des Pilotversuches konnte aber abgeschätzt werden, dass die Sanierung im technischen Maßstab erfolgreich sein wird, allerdings um den Preis einer um den Faktor 2 – 3 verlängerten Sanierungsdauer. Die Wirksamkeit des DLI-Verfahren unter den gegebenen hydrogeologischen Bedingungen wird deutlich mit dem erzielten Schadstoffaustrag belegt.

Die während des Pilotversuches ermittelten thermischen Reichweiten im Bereich zwischen 4,5 – 5,5 m liegen höher als die mittels fester Wärmequellen erzielten thermischen Reichweiten. Insofern ist die erforderliche Aufwärmung unterhalb der Gebäude besser realisierbar als mit festen Wärmequellen.

Die Frage, ob mit dem Verfahren fester Wärmequellen der Sanierungsstandort effektiver und kostengünstiger zu sanieren gewesen wäre, lässt sich theoretisch nicht beantworten. Für den Vorteil einer Verbesserung der Durchlässigkeit im Laufe der Sanierung müssen die Nachteile vermehrter Setzungen und einer geringeren thermischen Reichweite in Kauf genommen werden. Eine abschließende Entscheidung, ob die festen Wärmequellen zu einem kostengünstigeren und technisch erfolgreicher verlaufenden Verfahren führt, hätte die Durchführung zweier vergleichender, in der Regel sehr kostenintensiver Pilotversuche erfordert. Die Frage, ob das DLI-Verfahren unter technischen und ökonomischen Gesichtspunkten das am besten geeignete Verfahren lässt sich somit nicht abschließend beantworten. Sicherlich ist aber die Vorgehensweise, sich für ein Verfahren zu entscheiden, dieses zu ertüchtigen und dann im technischen Maßstab durchzuführen kostengünstiger als zwei Verfahren im Pilotmaßstab zu vergleichen.

¹⁴ Terra-, Aqua- und SanierungsKompetenzzentrum, Leipzig

Insgesamt kann damit die DLI als ein geeignetes Verfahren zur Sanierung des Standort Eppsteiner Straße angesehen werden.

6 Zusammenfassung

Der Standort Eppsteiner Straße 11–13, Oberursel (Taunus) ist erheblich mit leichtflüchtigen Kohlenwasserstoffen (LCKW) kontaminiert. Die Belastung bezieht sich im Wesentlichen auf den ungesättigten Boden und ein Schichtwasservorkommen. Das Grundwasser ist in geringerem Maße betroffen. Zur Sanierung des Schadens wurde ein thermisches Verfahren ausgewählt. Dieses umfasst eine Injektion eines Dampf-Luft-Gemisches (DLI) in den Untergrund. Die Schadstoffe werden dadurch in die Gasphase überführt, die aus dem Untergrund abgesaugt und gereinigt wird. Das DLI-Verfahren wurde zunächst in einem Pilotversuch erprobt. Diese Pilotanierung ist nach einer ersten Bewertung der Sanierungsergebnisse positiv verlaufen. Die Sanierung steht derzeit in erheblichem öffentlichem Interesse. Unter anderem wird bezweifelt, dass das gewählte Sanierungsverfahren für die vorliegende Kontamination angemessen und unter den gegebenen örtlichen und hydrogeologischen Randbedingungen geeignet sei. Unsere Prüfung der spezifischen Standortgegebenheiten sowie der Machbarkeit verschiedener Sanierungsverfahren kam zu folgendem Ergebnis:

- Das DLI-Verfahren unterbindet in der gewählten Ausführungsform zuverlässig die relevanten Wirkungspfade Boden → Innenraumluft und Boden → Grundwasser.
- Es entstehen keine Setzungen des Bodens, die beobachteten Hebungen liegen innerhalb eines tolerablen Bereiches; Sekundärschäden entstehen somit nicht.
- Unsere Auswertungen haben gezeigt, dass es generell neben den thermischen Verfahren keine Alternative gab. Als einzige Alternativen zum DLI-Verfahren hätte die Möglichkeit bestanden, den Boden mit Hilfe des Verfahrens fester Wärmequellen aufzuheizen, welches jedoch zu anderen Nachteilen als die DLI führt (vermehrt Setzungen, geringere thermische Reichweite). Daher wäre auch hierbei die Durchführung eines (in der Regel sehr kostenintensiven) Pilotversuches erforderlich gewesen. Die Frage, ob das DLI-Verfahren unter technischen und ökonomischen Gesichtspunkten das am besten geeignete Verfahren lässt sich somit nicht abschließend beantworten. Sicherlich ist aber die Vorgehensweise, sich für ein Verfahren zu entscheiden, dieses zu ertüchtigen und dann im technischen Maßstab durchzuführen kostengünstiger als zwei Verfahren im Pilotmaßstab zu vergleichen.
- Abschließend kann das DLI-Verfahren unter den gegebenen hydrogeologischen Bedingungen als erfolgsversprechend anwendbar bezeichnet werden.
- Die Bearbeitungszeit des Projektes liegt in einem für einen derart komplexen Sachverhalt üblichen Zeitrahmen.

Wir empfehlen daher die Fortführung des Verfahrens Sanierung des Gesamtstandortes (technischen Maßstab).

i. V. 

Dipl. Geol. Uwe Werner

i. V. 

Dr. Thomas Held

Verteiler

Magistrat der Stadt Oberursel (Taunus)

1 x Original, 1 x Kopie, 1 x PDF