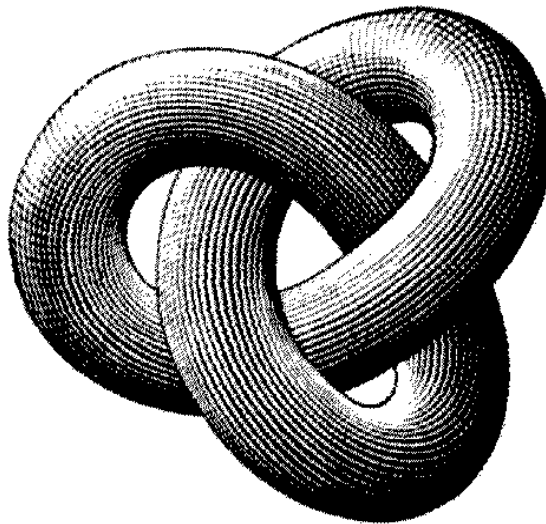


# **Gefahrenbeurteilung**

## **Sanierungsplanung Tempelhofer Freiheit Teilfläche „Alter Hafen“**



**vorgelegt von :**

**Susanne Schwabe (Dipl. Ingenieur)**

**Dezember 2013**

**IMAGO** Umwelt- Consult OHG  
Christburger Str. 4 ♦ 10405 Berlin  
Tel. : 030 - 44 38 54 - 0  
Fax.: 030 - 44 38 54 – 19

## INHALTSVERZEICHNIS

1	Anlass und Aufgabenstellung.....	3
2	Standortbeschreibung .....	3
2.1	Lage und Nutzung .....	3
2.2	Geologie und Hydrogeologie .....	5
3	Vorangegangene Untersuchungen.....	8
3.1	Übersicht über die bis einschließlich 2010 durchgeführten Untersuchungen .....	8
3.2	Schadstoffbelastung im Grundwasser.....	9
3.3	Untersuchungen zum mikrobiellen Abbaupotenzial .....	11
3.4	Boden .....	13
3.5	Bodenluft .....	14
3.6	Pumpversuch .....	14
4	Defizitanalyse und Untersuchungsprogramm.....	16
5	Feldarbeiten .....	19
5.1	Errichtung der Grundwassermessstellen.....	19
5.2	Grundwassermonitoring .....	22
5.3	Kostenvergleich .....	22
6	Ergebnisse der aktuellen Untersuchungen.....	23
6.1	Boden- und Grundwasseruntersuchungen während der Bohrarbeiten ....	23
6.2	Stichtagsmessungen .....	25
6.3	Schadstoffverteilung.....	26
6.4	Milieuparameter.....	27
7	Bewertung der Untersuchungsergebnisse hinsichtlich der Sanierungsplanung .....	29
8	Gefahrenbeurteilung.....	36
9	Literaturverzeichnis .....	37

## TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Teilflächen im Bereich „Alter Hafen“ (ALV10470) und Umgebung .....	4
Tabelle 2: Schematischer Untergrundaufbau.....	6

---

Tabelle 3: Zusammenfassung der im Bereich „Alter Hafen“ durchgeführten Untersuchungen .....	8
Tabelle 4: Kenndaten der 2007 durchgeführten Pumpversuche /G7/ .....	15
Tabelle 5: Untersuchungsprogramm und Kostenschätzung.....	19
Tabelle 6: Ausbau der neu errichteten Grundwassermessstellen .....	20
Tabelle 7: Vergleich von geschätzten und angefallenen Kosten.....	22
Tabelle 8: Ergebnisse der Liner - und teufenorientierten Grundwasserprobenahmen .....	23
Tabelle 9: Ergebnisse der Bodenuntersuchungen an GWMH /G4/.....	24
Tabelle 10: Ergebnisse der Siebanalysen.....	25
Tabelle 11: Abstandsgeschwindigkeiten .....	26
Tabelle 12: Chemisch – physikalische Eigenschaften der Hauptschadstoffe .....	34
Tabelle 13: Zusammenfassende Charakterisierung Sanierungsbereich.....	35

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Liner von 15 – 16 m u GOK aus GWMP .....	21
Abbildung 2: Zusammensetzung der BTEX im Schadenszentrum 2010 und 2013...31	

## ANLAGENVERZEICHNIS

Anlage 1:	Übersichtslageplan Untersuchungsgebiet
Anlage 2:	Übersichtsplan mit Aufschlüssen und Kontaminationsverdachtsflächen
Anlage 3:	Zusammenfassung der Grundwasseruntersuchungen
Anlage 4:	Kenndaten der Grundwassermessstellen
Anlage 5:	Geologischer Profilschnitt
Anlage 6:	Belastungskarten BTEX, Benzol, LCKW bis 2010
Anlage 7:	Belastungskarten BTEX, Benzol, Naphthalin aktuell 2013
Anlage 8:	Kostenschätzung für die Nacherkundungsarbeiten
Anlage 9:	Verteilungskarten der Milieuparameter
Anlage 10:	Grundwassergleichenpläne und Protokolle zu den Stichtagsmessungen vom 29.05.13, November 13 und 18.12.13
Anlage 11:	Prüfberichte und Probenahmeprotokolle zum Grundwassermonitoring
Anlage 12:	Bohrdokumentation

## 1 Anlass und Aufgabenstellung

Erste Grundwasseruntersuchungen im Bereich des „Alten Hafens“ fanden 1984 /G1/ statt. Im Ergebnis dieser Untersuchungen wurde eine Kontamination des Grundwassers mit Mineralölkohlenwasserstoffen festgestellt, deren Schwerpunkt im Bereich der Messstellen P5, P7, P47, P72, GWM A und GWM B lag. Anhand der aufgenommenen Infrarotspektren waren Hinweise auf Aromaten haltige Substanzen (u.a. BTEX) gegeben.

Im Zuge der Umwidmung des ehemaligen Flughafens Tempelhof zu einer Grün- und Freifläche wurde 2010 /G9/ im Bereich der Teilfläche „Alter Hafen“ eine Detailuntersuchung von Bodenluft, Boden und Grundwasser durchgeführt. Bei dieser Untersuchung wurde eine BTEX - sowie untergeordnet eine LCKW – Belastung des Grundwassers nachgewiesen.

Lt. Schreiben der zuständigen Ordnungsbehörde /G10/, des Bezirksamts Tempelhof –Schöneberg von Berlin, wurde anhand der hohen BTEX – und insbesondere Benzolkonzentrationen im Grundwasser sowie der räumlichen Ausdehnung der Kontamination ein „erheblicher Gewässerschaden nach § 23 a BWG eindeutig nachgewiesen“. „Um eine Verlagerung von Schadstoffen sicher auszuschließen sind Maßnahmen zur Gefahrenabwehr im Sinne des § 4 (3) BBodSchG erforderlich“ /G10/.

Die IMAGO OHG wurde von der Grün Berlin GmbH mit der Grundlagenermittlung und Defizitanalyse zur Sanierungsplanung, der Erarbeitung eines Untersuchungskonzepts, sowie der Ausschreibung und Begleitung ergänzender Untersuchungen beauftragt. Der vorliegende Bericht enthält im ersten Teil die Grundlagenermittlung, die Defizitanalyse und das Untersuchungskonzept, wie bereits in /G13/. Die Beschreibung der Geologie und Hydrogeologie unter Pkt. 2.2 wurde basierend auf den aktuell gewonnenen Erkenntnissen aktualisiert. Im zweiten Teil, ab Pkt. 5 werden die durchgeführten Untersuchungen dokumentiert und deren Ergebnisse bewertet.

## 2 Standortbeschreibung

### 2.1 Lage und Nutzung

Das Gelände des „Alten Hafens“ liegt im zentralen, nördlichen Teil des ehem. Flughafens Tempelhof, welcher sich etwa 4 km südlich des Berliner Stadtkerns, im Bereich des Zusammentreffens der Bezirke Tempelhof – Schöneberg, Kreuzberg und Neukölln befindet (s. Anlage 1).

Die Teilflächen KF 1 (östliche Flugzeugwerft) und KVF2 (Tanklager Werft Ost, Flughafenvorfeld östliche Werft), für welche die Sanierungsuntersuchung und –planung durchzuführen sind, liegen im Bezirk Tempelhof – Schöneberg und umfassen eine Fläche von etwa 43.000 m<sup>2</sup>.

Der „Alte Hafen“ war von 1923 – 1945 in Betrieb. Im Krieg wurde er stark zerstört und in den 50iger Jahren des letzten Jahrhunderts die Reste der Gebäude und

technischen Einrichtungen abgetragen, wobei die Oberflächenbefestigung des Vorfelds des „Alten Hafens“ sowie Gebäudereste unter einer mehrere Dezimeter mächtigen Bodenschicht noch vorhanden sind /G9/.

Aktuell wird das Gelände des ehem. „Alten Hafens“ als öffentliche Park- und Freizeitanlage (Tempelhofer Freiheit) genutzt. Änderungen dieser Nutzung sind gegenwärtig nicht vorgesehen.

Zurückzuführen ist die vorliegende BTEX – Grundwasserkontamination voraussichtlich auf einen Eintrag des bis zum 2. Weltkrieg verwendeten hochoktanigen Flugbenzins in den Untergrund. Zur Erhöhung der Klopfbarkeit wurde dem Flugbenzin 40 bis 70 % Benzol („BiBo“, Benzin – Benzol) beigemischt bzw. bestand dieses zu 81 – 84 % aus Benzol („Motorenbenzol“) /G2/, /U8/, was den hohen Benzolanteil der Kontamination von teilweise 50 % erklärt. Nach /G2/ sollen die Benzin und Benzol unterirdisch getrennt gelagert worden sein.

Ein konkretes Schadensereignis ist nicht bekannt, ebenso wurde bei der durchgeführten Detailuntersuchung /G9/ kein Eintragsort der BTEX im Boden aufgefunden. Möglicherweise sind im Zusammenhang mit den Kriegseignissen ausgelaufene Treibstoffe die Ursache der Grundwasserbelastung. Auf einer Karte in /G2/ sind zahlreiche Bombeneinschläge im Bereich „Alter Hafen“ verzeichnet.

In der folgenden Tabelle ist eine Übersicht der auf dem Gelände des Alten Hafens durch Vorgutachter identifizierten Kontaminationsverdachtsflächen (KVF) bzw. Kontaminationsflächen (KF) und der auf diesen zuletzt durchgeführten Untersuchungen enthalten.

**Tabelle 1: Teilflächen im Bereich „Alter Hafen“ (ALV10470) und Umgebung**

Nummer KF / KVF	Bezeichnung	untersucht in
KF 1	östliche Flugzeugwerft	DU CDM 24.11.10 /G9/
KVF 2	Tanklager, Flughafenvorfeld Werft Ost	DU CDM 24.11.10 /G9/
KVF 3	3 separat betriebene Tanklager, Tanklager östliche Werft	DU CDM 24.11.10 /G9/
KVF 4	zwei separat betriebene Tanklager	im Rahmen der OU Bundesflächen /G8/ als 9, 10, 17, 18 untersucht
KVF 5	öffentliche Tankstelle ehem. Eingangsbereich	DU CDM 24.11.10 /G9/
KVF 6	Tankbehälter 1930	nicht untersucht (nur kurzzeitiger Betrieb)
KVF 7	Tanklager, Flughafenvorfeld Werft West, Feuerlöschübungsgelände	DU CDM 24.11.10 /G9/
KVF 9	Olex - Tanklager	OU CDM 17.06.11 /G8/
KVF 10	BP Tanklager	OU CDM 17.06.11 /G8/
KVF 17	Flugzeughalle Wert Ost	OU CDM 17.06.11 /G8/
KVF 18	hölzerne Halle Werft Ost	OU CDM 17.06.11 /G8/
ALVF 10338 / 13	Löschteich „Alter Hafen“	DU GUD 20.12.11 /G12/

Nummer KF / KVF	Bezeichnung	untersucht in
ALVF 10347 / 1	Schießstand „Alter Hafen“	DU GUD 20.12.11 /G12/
KVF 10338/ 3	Gebäude 101, Öltank	OU CDM 17.06.11 /G8/
KVF 10338 / 10	Fasslager Friedhof / Columbiadam	OU CDM 17.06.11 /G8/

OU - Orientierende Untersuchung, DU - Detailuntersuchung

Die Lage der Kontaminationsverdachtsflächen ist in Anlage 2 skizziert. Ein weiterer Handlungsbedarf wurde nur für KF 1 sowie für die angrenzenden Bereiche der KVF 2 abgeleitet.

## 2.2 Geologie und Hydrogeologie

Das Gelände des ehem. Zentralflughafens Berlin Tempelhof befindet sich am südlichen Rand der Teltow – Hochfläche, am nördlichen Rand des Warschau – Berliner Urstromtals.

Die Geländehöhen im Bereich des „Alten Hafens“ liegen bei knapp 48 m NN.

In Anlage 5 ist ein unter Verwendung der Aufschlüsse aus den Voruntersuchungen und der Leitfähigkeitssondierung LF 2 interpretierter geologische Profilschnitt durch die Teilflächen KVF2 und KF1, entlang der Grundwasserfließrichtung enthalten.

Neben den Messstellen GWM G, H und N wurden in den Profilschnitt 1 in Anlage 5 auch die vermuteten Filterlagen der Messstellen P72 und P47 sowie die Probenahmehorizonte an der direct push – Sondierung DP12 aufgenommen.

Die Sohle des Grundwasserleiters wurde mit dem Feuerlöschbrunnen Süd (FB Süd) erbohrt, welcher sich etwa 160 m südwestlich der KF 1 befindet (nicht im Profilschnitt enthalten).

Von den aus den vorangegangenen Untersuchungen im Bereich der Grundwasserkontamination vorhandenen Aufschlüssen lagen nur für die seit 2004 /G4/ durchgeführten Bohrungen GWM C, D, E, F, G, H, L, M, N und O Schichtenverzeichnisse und Ausbaupläne vor. Diese Bohrungen wurden überwiegend zur Schadenseingrenzung am Rand des Hauptbelastungsbereichs durchgeführt und mit Ausnahme von GWM H (Endteufe 25 m u GOK) und GWM N (Endteufe 30,5 m u GOK), nur bis zum obersten Grundwasserhorizont bis etwa 2 – 3 m unter Grundwasseranschnitt abgeteuft.

Der Untergrundaufbau im Schadenszentrum und am nördlichen Schadensrand wurde mit den aktuellen Bohrungen GWMP – GWMT erkundet.

Unter Berücksichtigung der aktuell durchgeführten Messstellenbohrungen lässt sich der Untergrundaufbau in dem von der BTEX – Grundwasserkontamination betroffenen Bereich (KF1, KVF2) grob wie folgt charakterisieren:

**Tabelle 2: Schematischer Untergrundaufbau**

Horizont	Bodenart	stratigraphische Zuordnung nach /G9/
0,0 - 0,2 m u GOK	Mutterboden, teilweise Betonversiegelung	
- 1,5 m u GOK (teilweise)	Auffüllung, sandig	
0,5 – 3 bzw. 5 m u GOK	Schluff, Geschiebemergel	Weichsel - Kaltzeit
3 bzw. 5 bis zur Endteufe der jeweiligen Bohrung (max. 30,5 m GWMN)	Fein-, Mittel-, Grobsande zur Tiefe hin gröber	
16 bis 17 - 19, 2 m u GOK	Mergelband, an GWMR durchteuft, 1,3 m mächtig, nicht flächig vorhanden, teilweise durch Grobsande ersetzt	Übergang Weichsel- zur Saale – Kaltzeit bzw. Saalekaltzeit
bis 52,4 m u GOK (nur FB Süd)	Wechsellagerung aus Fein-, Mittel-, Grobsanden	
52,4 m u GOK (nur FB Süd)	Geschiebemergel, Ton	Holstein - Interglazial

An der Geländeoberfläche wurde überwiegend Mutterboden bzw. teilweise eine 0,2 m mächtige Oberflächenbefestigung aus Beton angetroffen und darunter eine Auffüllung aus Bauschutt und Ziegeln sowie Mittel- und Feinsanden.

Darunter wurde an allen Bohrungen eine 2 bis 4 m mächtige Schluff- bzw. Mergelschicht erbohrt (Weichselgeschiebemergel).

Im Liegenden folgt Mittelsand mit anfangs starkem Feinsand- bzw. zur Tiefe hin zunehmendem Grobsandanteil.

An einigen Bohrungen (GWM D, F, G) wurde im Grundwasserschwankungsbereich ab 15 m u GOK bzw. im obersten Grundwasserhorizont erneut eine Feinsandschicht, teilweise mit schluffigen Beimengungen erbohrt.

An den Messstellenbohrungen GWM E, GWM L, GWM M wurde ab 16 bzw. 17 m u GOK sowie an der 2013 abgeteuften Bohrung GWMR ab 19,2 m u GOK erneut ein Schluff bzw. Mergel nachgewiesen (Saalegeschiebemergel). Diese Mergelschicht wurde an den Bohrungen aus den Voruntersuchungen über etwa 0,5 m nachgewiesen und die Messstellen über dieser Schicht ausgebaut. An der aktuellen Bohrung GWM R wurde die Mergelschicht von 19,2 – 20,5 m u GOK durchteuft. An den restlichen Bohrungen, an welchen dieser Mergel nicht angetroffen wurde, wurden im entsprechenden Horizont teilweise Kies- bzw. Grobsandlagen (GWM N) festgestellt, was als Indiz dafür gelten kann, dass die bindige Schicht in diesem Bereich ausgeräumt wurde /G9/.

An der Leitfähigkeitssondierung LF 2 wurde in einem vergleichbaren Horizont, vom Grundwasseranschnitt bei etwa 15 m u GOK an bis zur Endteufe dieser Sondierung bei 30 m u GOK ein Schluffhorizont interpretiert. Ein ähnlicher Untergrundaufbau wurde nur noch an der Bohrung GWM R angetroffen, an welcher von 19,2 – 20,5 m u GOK eine Mergelschicht und darunter von 21,5 – 25,2 m u GOK ein stark schluffiger Feinsand (Schluff- und Geschiebemergellagen) erbohrt wurde. Aufgrund der geringen Ergiebigkeit konnte bei der Bohrung GWM R aus dem Horizont von 20



– 21 m u GOK auch keine Grundwasserprobe bei den teufenorientierten Probenahmen während der Bohrarbeiten gewonnen werden, was auf eher gering durchlässiges Material hinweist. Beide Aufschlüsse liegen im südöstlichen Teil des Untersuchungsgebiets.

An den anderen Bohrungen, insbesondere an GWM H, GWM N und GWM P, welche bis in eine ähnliche Tiefe durchgeführt wurden, wurde im entsprechenden Horizont Mittel- bzw. Grobsand erbohrt. Am Feuerlöschbrunnen Süd wurde dieser gering leitende Horizont ebenfalls nicht nachgewiesen.

Da insgesamt die Schichtenansprache an den Bohrungen als höherwertig, als die Interpretation der Leitfähigkeitssondierung einzuschätzen ist, handelt es sich bei dem gering durchlässigen Horizont im Grundwasserleiter vermutlich eher um schluff- bzw. Geschiebemergellagen, als um eine kompakte Schluff- / Mergelscholle, wie an der Leitfähigkeitssondierung LF2 interpretiert.

Der Flurabstand des Grundwassers beträgt ca. 15 m u GOK. Von Vorgutachtern /G6/, /G9/ wurde anhand der durchgeführten Stichtagsmessungen für den Bereich der KF1 und KVF2 eine nach Nordost bzw. Nordnordost gerichtete Grundwasserströmung angegeben. Das Gefälle und vor allem die ermittelten Abstandsgeschwindigkeiten unterscheiden sich zwischen der Gefährdungsabschätzung aus 2005 /G6/ mit Gefälle  $J = 0,075 \%$  und Abstandsgeschwindigkeit  $v_a = 67 \text{ m/a}$  und der Detailuntersuchung aus 2010 /G9/ mit  $J = 0,015 \%$  und  $v_a = 3,2 \text{ m/a}$  im Mittelsand bzw.  $0,5 \text{ m/a}$  in schluffigen Sanden sehr deutlich, sodass die Grundwasserströmungsverhältnisse erneut mit weiteren Stichtagsmessungen überprüft wurden (s. Pkt. 6.2).

Bis Ende der 80iger Jahre wurde nach /G6/ mehrfach eine nordwestliche bzw. nördliche Grundwasserfließrichtung festgestellt, was auf Wasserhaltungsmaßnahmen in der Umgebung (Umfeld Anhalter Bahnhof, Yorkstraße, Kleistpark, Breitscheidpark) zurückzuführen gewesen sein soll.

Als weitere Ursache für eine nordwestliche Grundwasserfließrichtung ist auch die ursprünglich hohe Wasserentnahme im Wasserwerk des Flughafens denkbar.

Das betriebseigene Wasserwerk des Flughafens Tempelhof befindet sich nordwestlich des Alten Hafens, in einer Entfernung von ca. 1.300 m. Das Wasserwerk ging 1938 in Betrieb und förderte mit 4 Tiefbrunnen (WW1 – WW4) Grundwasser aus 40 – 50 m Tiefe /G6/. Nach /G6/ konnte die Wassergewinnungsanlage bis zu  $500 \text{ m}^3/\text{h}$  Grundwasser fördern. 1987 war das Wasserwerk noch mit einer Entnahmemenge von  $800.000 \text{ m}^3/\text{a}$  in Betrieb. Bis 2004 erfolgte eine deutliche Reduzierung der Wasserentnahme auf  $65.000 \text{ m}^3/\text{a}$ . Gegenwärtig wird Grundwasser überwiegend nur noch zum Betrieb der Feuerlöschringleitung gefördert.



### 3 Vorangegangene Untersuchungen

#### 3.1 Übersicht über die bis einschließlich 2010 durchgeführten Untersuchungen

Die folgende Tabelle enthält eine Übersicht über die im Bereich des Alten Hafens durchgeführten Untersuchungen, welche im Rahmen der Grundlagenermittlung /G13/ ausgewertet wurden.

**Tabelle 3: Zusammenfassung der im Bereich „Alter Hafen“ durchgeführten Untersuchungen**

Quelle	Grundwasser	Boden	Bodenluft
G1	16x Grundwassermessstellen: P5, P6 etc. errichtet, keine Schichtenverzeichnisse, keine Ausbaupläne, MKW nach DIN 38 409 H18 analysiert	-	-
G3	Bestandsaufnahme, Funktionsprüfung und Beprobung von 10 aus 1984 /G1/ vorhandenen GWM, Analytik LCKW, BTEX, MKW	-	-
G4	6x GWM C, D, E, F, G, H errichtet, noch vorhandene GWM und neu errichtete auf BTEX und MKW analysiert	3 RKS I, J, K bis 16 m u GOK, Bodenprobenahme bei RKS und bei Errichtung GWM H, Analytik BTEX, MKW	
G6	2x GWM L, M errichtet, zusammen mit 16 vorhandenen und Testbrunnen TB 01 – TB 04, Brunnen 2 beprobt und auf BTEX, PAK, MKW, Milieu- bzw. Nährstoffparameter und teilweise Abbauprodukte analysiert (Σ 23 Stk.)	-	-
Macholz <sup>1</sup> 05/07	Analytik GWMB – GWMO auf MKW	-	-
G7	Hydrochemischer Pumpversuch an den Messstellen P47, P72 und GWMB	-	-
G9	21 Grundwasserprobenahmen, Analytik auf Monoaromaten, LCKW, PAK; 4 GWM NA – Parameter und Kohlenwasserstoffindex 21 direct push Grundwassersondierungen davon 14 Stk. bis 30 und 7 Stk. bis 50 m u GOK, je 4 bis 6 Probenahmen je Sondierung, Analytik auf BTEX und LCKW sowie teilweise PAK, MKW, Milieuparameter	4 Schürfe, davon 3 in KVF2 Analytik Programm nach BBodschV – Wirkungspfad Boden - Mensch /U6/ von 0,0 – 0,35 m u GOK, LAGA /U7/, Berliner Liste /U1/ bis 3,0 m u GOK 10 KRB bis 5 m u GOK 2 Oberflächenmischproben MP2-1 aus KRB 1, 2, 3, 4, 5, 6 und MP2-2 aus KRB 7, 8, 9, 10 7 LF - Sondierungen	5 Bodenluftsondierungen, Analytik BTEX, bis auf BL2 auch LCKW
G8 (Olex u. BP– Tanklager, Flugzeughalle u. höl-)	GWM 3/2011, GWM 02/2011 beprobt, Analytik auf BTEX PAK, MKW, Wasserbeschaffenheit	1 Schürf, 8 KRB Analytik auf BTEX, LCKW, PAK, MKW	6 Bodenluftsondierungen, 6 Stk. Analytik

Quelle	Grundwasser	Boden	Bodenluft
zerne Halle Werft Ost)			BTEX, 2 Stk. LCKW
G12 (Löschteich u. Schieß- stand „Alter Hafen)	-	6 KRB durchgeführt, Analytik Programm nach BBodsSchV – Wirkungspfad Boden - Mensch /U6/ von 0,0 – 0,3 m u GOK, LAGA /U7/, Berliner Liste /U1/ bis 5 bzw. 6 m u GOK	-

<sup>1</sup> Bericht liegt nicht vor

### 3.2 Schadstoffbelastung im Grundwasser

Erste Grundwasseruntersuchungen wurden Anfang der 80iger Jahre /G1/ durchgeführt. Schwerpunkt war die Untersuchung der Mineralöl – Belastung, deren Zentrum an den Messstellen P5, P7, P47, P72, GWM A und GWM B festgestellt wurde. Anhand des IR – Spektrums der Grundwasserproben waren bereits Hinweise auf aromatische Kohlenwasserstoffe gegeben.

2003 wurde durch die Fa. Analytech /G3/ eine Funktionsprüfung der noch aus den 80iger Jahren vorhandenen Grundwassermessstellen durchgeführt, diese beprobt und auf BTEX, LCKW und MKW analysiert. Bei MKW wurden sowohl der Kohlenwasserstoffindex nach DIN EN ISO 10301 (C<sub>10</sub> – C<sub>40</sub>), als auch die kurz-kettige Kohlenwasserstoffe < C10 analysiert, da deren Vorhandensein aufgrund der Nutzungsgeschichte anzunehmen war. An den Grundwassermessstellen P5, P38, P39, P72 und P78, an welchen eine BTEX – Belastung festgestellt wurde, wurde eine Kontrolluntersuchung durchgeführt und der BTEX – Befund bestätigt bzw. bei der zweiten Untersuchung ein höherer Gehalt festgestellt.

Die höchsten BTEX – Konzentrationen wurden 2003 an P72 mit 20.000 µg/l und P78 (GWM B) mit 14.830 µg/l nachgewiesen.

2004 erfolgten eine erneute Untersuchung auf BTEX an den vorhandenen Grundwassermessstellen sowie die Errichtung und Untersuchung von 6 neuen Messstellen zur Eingrenzung der Grundwasserkontamination durch die Fa. Terracon /G4/. Das Belastungsmaximum mit Konzentrationen > 10.000 µg/l BTEX wiesen bei dieser Untersuchung die Messstelle P5, P39, P47 sowie erneut P72 (41.724 µg/l) und P78 ((GWM B), 35.743 µg/l) auf.

Eine weitere Untersuchung des Grundwassers fand 2005 /G6/ statt. Neben einer erneuten Analytik der Schadstoffparameter BTEX, MKW und PAK wurde auch das NA – Potenzial bewertet. Die Zusammenfassung der Untersuchungen zum mikrobiellen Schadstoffabbau ist unter Pkt. 3.3 enthalten.

Als Hauptbelastungsparameter wurden im Grundwasser erneut die BTEX bestätigt. Die Verunreinigung mit MKW und PAK ist demgegenüber wesentlich geringer. Die höchsten BTEX - Konzentrationen wurden wiederum an den Messstellen P47 (10.164 µg/l), P72 (19.296 µg/l) und P78 / GWM B (27.670 µg/l) nachgewiesen.

Im Rahmen der 2005 durchgeführten Untersuchungen wurde außerdem die Ökotoxizität des Grundwassers mittels Leuchtbakterien - Test und Test der Fischeitoxizität untersucht. In den Messstellen P47 und GWM B, welche das Schadenszentrum charakterisieren, waren der Leuchtbakterien - Test und in GWM B zusätzlich die Fischeitoxizität auffällig. Daneben zeigte die Messstelle P74, welche anstromig der Grundwasserbelastung liegt, beim Leuchtbakterien – Test einen auffälligen Wert, welcher darauf hinweist, dass im Grundwasser ggf. toxische Abbauprodukte der BTEX vorliegen (Aldehyde nachgewiesen, s. /G6/).

Im Mai 2007 wurden ausgewählte Grundwassermessstellen erneut auf MKW analysiert. Da der Bericht hierzu nicht vorliegt, wurden die Analysenergebnisse vom Vorgutachter /G9/ übernommen. Diese bestätigten die bekannte geringe MKW – Belastung.

2007 wurde an den Messstellen P47, P72 und GWMB außerdem ein hydrochemischer Pumpversuch durchgeführt. Dessen Ergebnisse sind unter Pkt. 3.6 dokumentiert.

Eine weitere Untersuchung aller Grundwassermessstellen im Belastungsbereich fand 2010 /G9/ statt, wobei BTEX und weitere Monoaromaten, LCKW, der Kohlenwasserstoffindex und PAK analysiert wurden. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurde außerdem erneut das natürliche Abbaupotenzial bewertet (s. Pkt. 3.3).

Die Schadstoffverteilung und das Belastungsniveau der vorangegangenen Untersuchungen, mit den höchsten BTEX – Konzentrationen an P47 (10.652 µg/l) und P72 (16.596 µg/l), wurden hierbei erneut bestätigt.

Außerdem wurden 2010 Grundwasserprobenahmen mittels direct push – Sondierungen (DP) zur horizontalen und vertikalen Eingrenzung der BTEX – Grundwasserkontamination durchgeführt.

Eine horizontale Eingrenzung wurde mit den DP – Sondierungen DP02, DP15, DP16, DP17, DP18, DP20 und DP21 am südlichen, östlichen und westlichen Schadensrand erreicht, an welchen keine bzw. nur geringe BTEX – Konzentrationen nachgewiesen wurden (s. Anlage 6). Eine leicht oberhalb des sanierungsbedürftigen Schadenswerts (SSW, /U1/) für BTEX von 100 µg/l liegende BTEX – Konzentration wurde nur an DP14 südlich des Schadensbereichs festgestellt.

Eine vertikale Eingrenzung der BTEX – Belastung erfolgte anhand der Sondierung DP12, an welcher mit 4.059 µg/l BTEX von 19 – 20 m eine hohe BTEX – Belastung nachgewiesen wurde, welche bis 29 – 30 m u GOK auf 121 µg/l abnimmt.

Bei den DP – Sondierungen wurde außerdem eine LCKW – Belastung, mit Schwerpunkten an DP03 (449 µg/l), DP11 (397 µg/l) und DP18 (600 µg/l) bis 30 m u GOK festgestellt (s. Anlage 6.3). Die unterhalb der Bestimmungsgrenze bzw. unterhalb des SSW (Sanierungsbedürftiger Schadenswert /U1/, für LCKW 100 µg/l) liegenden LCKW – Konzentrationen an den weiteren DP – Sondierungen und Grundwassermessstellen weisen auf lokale, punktuelle Belastungen hin. Eine

kleinräumige Abgrenzung der LCKW – Verunreinigung ist anhand der vorliegenden Untersuchungen allerdings nicht möglich.

Da die an den direct push Sondierungen DP03, DP11 und DP18 festgestellten LCKW – Befunde nur punktuell aufgetreten sind und die Maximalkonzentration nur das 6fache des SSW beträgt, sind keine weiteren Maßnahmen zur Erkundung bzw. Sanierung der LCKW – Belastung erforderlich. An den im Rahmen der vorgeschlagenen Nachuntersuchungen (s. Pkt. 4) neu errichteten Grundwassermessstellen sollten die LCKW zur Überprüfung dennoch einmalig analysiert werden.

Neben den BTEX, bei welchen zuletzt Überschreitungen des SSW um mehr als das 100 fache auftraten, wurden mehrfach Überschreitungen des Schadenswerts für Naphthalin bzw. PAK oder MKW, um max. das 6 fache für Naphthalin und MKW an P72 nachgewiesen. Diese erhöhten Konzentrationen wurden an den Messstellen P5, P7, P39, P47, P72, GWM A, GWM B und GWM M sowie an DP12 analysiert, welche im Bereich des BTEX – Schadens liegen, sodass es sich um typische Co – Kontaminationen des BTEX – Schadens handelt, welche bei dessen Sanierung mit erfasst werden.

An den Messstellen im Schadensbereich wurden max. 1 – 2 mm aufschwimmende Leichtphase gemessen, wobei eine Überprüfung der Phasenmächtigkeit an den Messstellen im Schadenszentrum aufgrund der voraussichtlich unterhalb des Grundwasserspiegels liegenden Filterstrecken nur begrenzt aussagefähig ist.

In Anlage 3 sind die Analysenergebnisse der seit 2003 durchgeführten Grundwasseruntersuchung zusammengefasst. Auf die Erfassung der Analysen aus 1984 /G1/ wurde verzichtet, da mit der verwendeten Methode DIN 38 409 H18 unspezifisch alle Kohlenwasserstoffe erfasst werden und es bei der Probenaufbereitung bei leichtflüchtigen Kohlenwasserstoffen zu deutlichen Verlusten kommen kann.

Anlage 6.1 zeigt die zuletzt 2010 nachgewiesene Schadstoffverteilung der BTEX und die bisherigen Konzentrationsverläufe an den Messstellen.

Insgesamt waren die Schadstoffverteilung und das Konzentrationsniveau des Hauptbelastungsparameters BTEX bei den bis 2010 durchgeführten Untersuchungen annähernd vergleichbar.

In Anlage 4 ist eine Übersicht über den Ausbau der aus den vorangegangenen Untersuchungen vorhandenen Grundwassermessstellen enthalten. Außerdem wurden die aktuell errichteten Messstellen GWMP – GWMT aufgenommen. Bei den 1984 errichteten Grundwassermessstellen wurde der geplante Ausbau angegeben, da keine Pläne zum tatsächlich durchgeführten Ausbau vorliegen.

### **3.3 Untersuchungen zum mikrobiellen Abbaupotenzial**

Eine erste Bewertung des Abbaupotenzials wurde 2005 /G6/ durchgeführt und hierzu folgende Parameter analysiert:

- Nitrat, Nitrit, Ammonium, Chlorid, Phosphat ges., Sulfat, Schwefelwasserstoff, elementarer Schwefel, Hydrogencarbonat, Säure- Basenkapazität, Carbonat, Carbonathärte, Gesamthärte, Mangan, Eisen III, Eisen II, Methan, Ethan, Propan, Butan, AOX, DOC / TOC

Durch /G6/ wurde eingeschätzt, dass die erhöhten Hydrogencarbonat-, Mangan-, Eisen II- und Methangehalte im Schadensbereich auf natural attenuation Prozesse hinweisen.

Außerdem wurde das Gesamtabbaupotenzial, als Summe der ablaufenden Redoxreaktionen, bezogen auf Benzol, nach /U2/ berechnet. Hierzu wurden der Verbrauch von Sauerstoff, Nitrat und Sulfat (Elektronenakzeptoren) sowie die Bildung von Eisen II und Methan im Schadensbereich im Vergleich zum Grundwasseranstrom ermittelt. Basierend auf dem stöchiometrischen Verbrauch der Elektronenakzeptoren und der Bildung der Reaktionsprodukte im Vergleich zum Anstrom wurde das Gesamtabbaupotenzial (etwa 50 - 85 mg/l) berechnet und da dieses die max. Schadstoff – Gesamtkonzentration (29 mg/l BTEX an GMW B) überschreitet abgeleitet, dass ein ausreichendes Abbaupotenzial vorhanden ist.

Außerdem wurden Metabolite des MKW-, PAK- und BTEX – Abbaus untersucht und anhand des Nachweises der Abbauprodukte von BTEX und PAK, vor allem an den Messstellen P39, P47 und P66, der stattfindende Abbau belegt.

Weiterhin wurden die Koloniebildenden Einheiten im Grundwasser bestimmt und an P39 und GWM B deutlich erhöhte Koloniezahlen nachgewiesen.

Insgesamt wurde in /G6/ eingeschätzt, dass die vorhandene Restkontamination an Alkylmonoaromaten (d.h. Monoaromaten ohne Benzol) durch Abbauprozesse wirksam gemindert wird.

Fraglich ist in diesem Zusammenhang, ob ein signifikanter Abbau von Benzol unter anaeroben Bedingungen tatsächlich stattfindet oder vorwiegend die anderen, weniger toxischen Monoaromaten abgebaut werden.

Im Rahmen der 2010 durchgeführten Detailuntersuchung /G9/ wurden erneut die stattfindenden NA – Prozesse, insbesondere der mikrobielle Abbau, anhand eines Vergleichs der folgender Nährstoff – und Milieuparameter im Anstrom (GWM G), im Schadensbereich (GWM B, P72) und im Abstrom (GWM D) bewertet:

- Nitrat, Nitrit, Ammonium, Chlorid, Phosphat ges., Sulfat, Schwefelwasserstoff, Gesamtstickstoff, Hydrogencarbonat, Säure- Basenkapazität, Carbonat, Carbonathärte, Gesamthärte, Mangan, Eisenges., Eisen III, Eisen II, Methan, DOC / TOC

Die Zunahme von Methan, Sulfid, Mangan und Eisen II sowie die Abnahme von Sulfat bestätigten die mikrobielle Stoffwechselaktivität im Schadensbereich.

Aus den ebenfalls erneut bestimmten Koloniezahlen für 20°C und 36°C im Grundwasser ist nach /G9/ mikrobielle Tätigkeit am Standort abzuleiten.

Zusätzlich wurde an den exemplarisch untersuchten Messstellen GWM G, GWM B, P72 und GWM D das Isotopenverhältnis untersucht und festgestellt, dass eine



Anreicherung der C13 – Isotope stattgefunden hat und es sich daher um einen älteren, bereits durch mikrobiellen Abbau veränderten BTEX – Schaden handelt.

### 3.4 Boden

Erste Bodenuntersuchungen sind mit den RKS I, J, K, welche bis 16 m u GOK durchgeführt wurden, aus 2004 dokumentiert /G4/. Bei diesen wurden an RKS J von 15,4 bis 16 m u GOK 31,9 mg/kg BTEX und an RKS K von 15,7 bis 16,0 m u GOK 0,02 mg/kg BTEX nachgewiesen. In allen anderen Bodenproben lag die BTEX – Konzentration unter der Bestimmungsgrenze.

Außerdem wurden Bodenproben bei der Errichtung der Messstelle GWM H entnommen und hier maximal 73,4 mg/kg BTEX bei 17,2 – 18,2 m u GOK nachgewiesen.

Die höchsten MKW – Konzentration wurde mit 98 bzw. 76 mg/kg an RKS G von 7,5 – 8,5 bzw. von 12,5 – 13,5 m u GOK und an RKS J mit 60,7 bzw. 66 mg/kg von 14,3 – 14,9 bzw. von 15,4 bis 16 m u GOK analysiert.

Die erhöhten BTEX – und vorwiegend auch MKW - Konzentrationen wurden damit im Grundwasserschwankungsbereich nachgewiesen.

Im Rahmen der Detailuntersuchung 2010 /G9/ wurden erneut Rammkernsondierungen sowie zusätzlich Schürfe durchgeführt.

Im Ergebnis wurden sowohl in den Schürfen, als auch in den Bodenproben, welche aus den Kleinrammbohrungen gewonnen wurden (jeweils Mischproben MP1, MP2 aus benachbarten Kleinrammbohrungen s. Tabelle 3) bei der Beurteilung des Horizonts von 0,0 – 0,35 m u GOK nach BBodschV /U6/ keine Überschreitungen der Prüfwerte festgestellt.

Bei einer Bewertung anhand der Beurteilungswerte für Boden, Schutzziel Grundwasser, Flurabstand > 5 m u GOK der Berliner Liste /U1/, wurden an den Schürfen Überschreitung lediglich für PAK (Beurteilungswert 12 mg/kg /U1/) im Schurf SCH 2-1 von 0,35 – 1 m u GOK und in SCH 2-4 von 1 – 2 m u GOK mit 40,7 mg/kg bzw. 237,2 mg/kg festgestellt.

Bei LHKW wurden maximal Konzentrationen von 0,5 mg/kg und bei MKW max. 70 mg/kg, ebenfalls in SCH 2-4 nachgewiesen, welche unterhalb der Beurteilungswerte (MKW: 1.200 mg/kg, LCKW: 12 mg/kg /U1/) liegen. Insgesamt wurden für LHKW und MKW überwiegend Konzentrationen unter der Bestimmungsgrenze analysiert.

In den Kleinrammbohrungen wird der Beurteilungswert für das Schutzziel Grundwasser lediglich punktuell für Kupfer und PCB überschritten.

In der KRB 2-1 wurden im Horizont von 0,35 – 1,0 m u GOK 1.000 mg/kg Kupfer nachgewiesen (Beurteilungswert 720 mg/kg). Die weiteren Kupfer – Konzentrationen betragen maximal 27 mg/kg und liegen somit weit unter diesem Befund.

Der maximale PCB – Gehalt beträgt 13,2 mg/kg an KRB 3-1 bei 0,37 – 1,0 m u GOK (Beurteilungswert 0,6 mg/kg). Bis auf Spuren (0,135 mg/kg) an PCB an der

Mischprobe MP 2-1 liegen alle anderen PCB – Befunde unter der Bestimmungsgrenze.

Für LHKW wurden an nahezu allen Sondierungen jeweils Spuren (max. 0,165 mg/kg an KRB 2-5a) von 1 – 2 bzw. von 2 – 3 m u GOK nachgewiesen. Auch die nachgewiesene Maximalkonzentration liegt nur bei etwa einem 1/100 des Beurteilungswerts /U1/ von 12 mg/kg. Bei den im Boden nachgewiesenen LCKW handelt es sich überwiegend um Tetrachlorethen.

Die MKW – Konzentrationen in den Kleinrammbohrungen liegen ebenfalls überwiegend unter der Bestimmungsgrenze. Die höchste Konzentration wurde mit 170 mg/kg von 0,35 – 1,0 m u GOK an der Sondierung KRB 2-5a nachgewiesen und unterschreitet deutlich den Beurteilungswert der Berliner Liste von 1.200 mg/kg.

Die BTEX – Konzentrationen in den Bodenproben aus den Schürfen und den Kleinrammbohrungen liegen durchgehend unter der Bestimmungsgrenze.

Bei den weiteren 2011 /G12, G8/ außerhalb der KF1 und KVF2 durchgeführten Bodenuntersuchungen wurden ebenfalls keine relevanten Bodenbelastungen festgestellt.

Da im Boden keine Hinweise zu ursprünglichen Eintragsorten oder noch aktiven Schadstoffquellen der BTEX – Grundwasserkontamination aufgefunden wurden, wurden die in den Voruntersuchungen durchgeführten Bodenanalysen nicht erfasst. Die Ansatzpunkte der Untersuchungen sind jedoch aus Anlage 2 ersichtlich.

### **3.5 Bodenluft**

Bei den 2010 /G9/ durchgeführten Bodenluftuntersuchungen lagen die BTEX – Konzentrationen, bis auf eine niedrige Konzentration von 0,1 mg/m<sup>3</sup> BTEX an BL 5 bei 1,5 m u GOK (Gefahrenwert der Berliner Liste /U1/ 50 mg/m<sup>3</sup>) durchgehend unter der Bestimmungsgrenze. LCKW wurden ebenfalls nur mit äußerst geringen Konzentrationen von 0,13 mg/m<sup>3</sup> an BL 7 und 0,07 mg/m<sup>3</sup> an BL 8 nachgewiesen.

Auch anhand der Bodenluftuntersuchungen wurden damit keine weiteren Erkenntnisse zur Lage eines Eintragsorts der Schadstoffe oder einer Schadstoffquelle im ungesättigten Bodenhorizont gewonnen. Die Analysen wurden daher nicht erfasst. Die Lage der Ansatzpunkte wurde in Anlage 2 dargestellt.

### **3.6 Pumpversuch**

2007 /G7/ wurden im Schadenszentrum, an den am höchsten mit BTEX belasteten Grundwassermessstellen hydrochemische Pumpversuche durchgeführt. In der folgenden Tabelle sind die Kenndaten dieses Pumpversuchs zusammengefasst.



**Tabelle 4: Kenndaten der 2007 durchgeführten Pumpversuche /G7/**

	<b>P47</b>	<b>P72</b>	<b>GWM B / P78</b>
Pumpbeginn	16.05.07, 11:57 Uhr	14.05.07, 13:50 Uhr	24.05.07, 13:49 Uhr
Pumpende	24.05.07, 10:08 Uhr	15.05.07, 13:50 Uhr	06.06.07, 12:14 Uhr
Dauer	191 h / 8 Tage	24 h / 1 Tag	311 h/ 13 Tage (davon 2 d Ausfall der Pumpe)
Förderraten der Pumpstufen	0,18 l/s; 0,07 l/s 0,65 m <sup>3</sup> /h; 0,25 m <sup>3</sup> /h	0,34 l/s; 0,45 l/s; 0,57 l/s 1,2 m <sup>3</sup> /h; 1,6 m <sup>3</sup> /h; 2,1 m <sup>3</sup> /h	0,33 l/s; 0,27 l/s 1,2 m <sup>3</sup> /h, 0,97 m <sup>3</sup> /h
Grundwasserentnahme	7,8 m <sup>3</sup> ; 45 m <sup>3</sup> ; $\Sigma$ 53 m <sup>3</sup>	9,8 m <sup>3</sup> ; 13 m <sup>3</sup> ; 16 m <sup>3</sup> ; $\Sigma$ 39 m <sup>3</sup>	bei 0,3 l/s: 284 m <sup>3</sup>
Startkonzentrationen C <sub>Start</sub>	11.260 µg/l $\Sigma$ Monoaromaten	21.490 µg/l $\Sigma$ Monoaromaten	23.287 µg/l $\Sigma$ Monoaromaten
Endkonzentration C <sub>Ende</sub>	12.923 µg/l $\Sigma$ Monoaromaten	25.990 µg/l $\Sigma$ Monoaromaten	14.996 µg/l $\Sigma$ Monoaromaten
Schadstoffaustrag	~640 g Monoaromaten	~ 970 g Monoaromaten	~4.850 g Monoaromaten
Endteufe GWM	21,02 m u GOK	18,85 m u GOK	21,01 m u GOK
Wasserstand Start	15,26 m u GOK	15,49 m u GOK	15,28 m u GOK
max. Absenkung s	2,27 m	1,3 m	3,47 m
Durchlässigkeit kf	2,8 x 10 <sup>-5</sup> m/s	4,6 x 10 <sup>-4</sup> m/s	3,6 x 10 <sup>-5</sup> m/s

Die ursprünglich vorgesehene Grundwasserentnahme von 0,8 l/s (2,9 m<sup>3</sup>/h) konnte an keiner Messstelle erreicht werden.

Die Wasserstandsganglinie an P72 bei der höchsten Pumpstufe von 2,1 m<sup>3</sup>/h zeigte bis zum Versuchende einen Rückgang des Wasserspiegels, sodass kein stationärer Zustand erreicht wurde. Eine Förderrate von 2 m<sup>3</sup>/h ist damit im Dauerbetrieb voraussichtlich nicht zu realisieren.

An der Messstelle P47 wurde eine kolmatisierte Filterstrecke der Messstelle vermutet, was die Pumpversuchsauswertung ebenfalls verfälscht.

Weiterhin erfolgte an der Messstelle GWM B über die 13 Tage Pumpversuchsdauer ein allmählicher Rückgang des Wasserspiegels und der Förderrate und wurden damit ebenfalls keine stationären Verhältnisse erreicht.

Auch wenn davon auszugehen ist, dass bei in größeren Bohrdurchmessern neu errichteten Sanierungsbrunnen die limitierenden Effekte verockerter Filterstrecken und ggf. aufgequollenen PVC – Ausbaumaterials nicht auftreten, ist aufgrund der im obersten Grundwasserhorizonts vorliegenden Schadstoffbelastung, bei welcher für eine wirksame Abreinigung die Absenkung im Umfeld der Sanierungsbrunnen minimiert werden muss und der beim Pumpversuch festgestellten, vergleichsweise niedrigen Durchlässigkeiten, davon auszugehen, dass nicht mehr als 1 – 2 m<sup>3</sup>/h Grundwasser im Dauerbetrieb je Sanierungsbrunnen entnommen werden können.

Bei keinem der Pumpversuche wurde eine Absenkung an den benachbarten Messstellen gemessen, was bei Entfernungen von 17 – 25 m auf eine geringe Reichweite der Grundwasserentnahme hinweist.

Wird die Reichweite R aus den beim Pumpversuch ermittelten Durchlässigkeiten nach Sichardt ( $R = 3000 \times s \times \text{Wurzel}(kf)$ ); s – Absenkungsbetrag im Brunnen [m]) grob abgeschätzt ergeben sich hierfür Werte von 36 – 84 m, welche nicht annähernd erreicht wurden.

Die Durchlässigkeit des Aquifer konnte nur aus der Absenkung im Förderbrunnen berechnet werden. In obiger Tabelle sind die für die einzelnen Pumpversuchsbrunnen gewonnenen Mittelwerte abgegeben. Es zeigt sich ein großer Unterschied in den Durchlässigkeiten zwischen der westlichsten Messstelle P72 und den östlich von dieser gelegenen P47 und GWM B.

Da die aus den Durchlässigkeiten ermittelten theoretischen Reichweiten von 36 – 84 m deutlich über den beim Pumpversuch tatsächlich erreichten ( $R < 17$  m) liegen, erscheinen gegenwärtig die niedrigen Werte für die Durchlässigkeit am realistischsten. Zudem ist die Pumpversuchsauswertung aufgrund der nicht erreichten, stationären Verhältnisse nur bedingt belastbar. Weiterhin ist eine Beeinflussung des Absenkungsverlaufs durch die verwendete Messstelle selbst nicht auszuschließen, sodass die ermittelten Aquiferparameter insgesamt mit Unsicherheiten behaftet sind.

Während des Pumpversuchs wurde Wasseraktivkohle zur Reinigung des Grundwassers eingesetzt. Es traten Probleme mit Ausfällungen und dem aus den Brunnen geförderten Feinkorn auf den Filtern auf. Im Abwasser nach der Wasseraktivkohle wurden bis zu 9.410 µg/l bzw. 8.904 µg/l BTEX bei den Pumpversuchen an P72 bzw. GWMB nachgewiesen. Dies zeigt, dass die Beladepkapazität der eingesetzten Wasseraktivkohle offensichtlich erschöpft bzw. die Filter zu klein dimensioniert (Verweilzeit zu niedrig) waren. Angaben zur eingesetzten Menge an Wasseraktivkohle wurden nicht gemacht, sodass die erreichte Beladepkapazität nicht überprüft werden kann.

An keiner Messstelle wurde während des Pumpversuchs eine Konzentrationsabnahme festgestellt und insgesamt, trotz niedriger Förderraten, ein hoher Schadstoffaustrag erreicht, was für eine vergleichsweise hohe Schadstoffmenge und deren gute Verfügbarkeit für eine p & t Maßnahme spricht.

#### **4 Defizitanalyse und Untersuchungsprogramm**

Der Untergrundaufbau im Grundwasserbelastungsbereich wurde bis 2010 /G4/ nur durch die Bohrung GWM H und indirekt durch die Leitfähigkeitssondierung LF 2, am Schadensrand untersucht. Kenntnisse der Schichtenfolge, insbesondere zum Vorhandensein bindiger Horizonte im Schadenszentrum sind für die Sanierungsplanung jedoch unbedingt erforderlich.

An der Bohrung GWM H wurde mit 73 mg/kg von 17,2 – 18,2 m u GOK eine hohe BTEX – Konzentration im Boden analysiert, welche ein hohes Schadstoffpotenzial am Bodenkorn vermuten lässt.

Zudem zeigen die Pumpversuchsergebnisse /G7/ hinsichtlich der Durchlässigkeit des Aquifer große Unterschiede und sind nur bedingt belastbar.

Weitere Aufschlüsse im Zentrum des Schadensbereichs zur Untersuchung des Untergrundaufbaus und der BTEX – Menge waren daher unbedingt notwendig.

Da ein hydraulisches Verfahren mit großer Sicherheit Bestandteil der empfohlenen Sanierungsvariante sein wird, sind ohnehin Brunnen für die Grundwasserförderung erforderlich.

Weitere Erkundungsbohrungen im Schadenszentrum sollten daher bereits in einem als Sanierungsbrunnen geeigneten Durchmesser und Ausbau niedergebracht und ausgebaut werden.

Unterhalb der Grundwasserkontamination sind vermutlich bis etwa 50 m u GOK keine flächig aushaltenden stauenden Schichten im Grundwasserleiter vorhanden. Da in der Vergangenheit das Wasserwerk des Flughafens aus diesem Grundwasserleiter mit einer sehr hohen Entnahmemenge förderte, sollte die vertikale Eingrenzung der BTEX – Belastung an den Bohrungen im bekannten Schadenszentrum, zusätzlich zu der bereits vorhandenen direct push – Sondierung DP12, überprüft werden.

Vorgeschlagen wurde /G13/, drei Bohrungen (GWM P, Q, R, s. Anlage 7) bis in den Horizont, in welchem der Saalegeschiebemergel erwartet wird abzuteufen und wenn dieser bis 18 m u GOK nicht erbohrt wird, alle 3 m teufenorientierte Grundwasserprobenahmen (17 – 18, 20 – 21, optional: 23 – 24 m u GOK) durchzuführen, um die vertikale Eingrenzung an der direct – push Sondierung DP12 zu bestätigen.

Zur tiefenorientierten Probenahme wird die Bohrung zunächst bis an die Unterkante des vorgesehenen Probenahmehorizonts abgeteuft, das Bohrgestänge aus- und ein 2“ Pegel mit 1 m Filterstrecke in die Hilfsverrohrung eingebaut. Im Anschluss wird ca. 1 m Filterkies geschüttet und die Rohrtour 1 m angezogen. Die genauen Probenahmehorizonte werden in Abhängigkeit von der angetroffenen Schadstoffbelastung und Schichtenfolge abgestimmt.

Die eigentliche Grundwasserprobenahme erfolgt mittels Unterwassermotorpumpe (z.B. MP1) bei Konstanz der Vorortparameter (pH-Wert, Leitfähigkeit, Redoxpotenzial und Sauerstoffgehalt) und nachdem mindestens 200 l Grundwasser vorgepumpt wurden.

Nach erfolgter Probenahme werden die Pumpe und der Pegel ausgebaut und die Bohrung bis zum nächsten Probenahmehorizont um etwa 4 m vertieft (1 m Filterkies +3 m) und wie bereits beschrieben fortgefahren.

Abhängig vom Schichtenaufbau (Vorhandensein einer bindigen Schicht bei 17 m u GOK) und der festgestellten vertikalen Schadstoffverteilung werden die Bohrungen

mit 4 bzw. 3 m Filterstrecke ausgebaut. Um den Zutritt von Luftsauerstoff zur Filterstrecke der Sanierungsbrunnen zu reduzieren, werden diese unterhalb des Grundwasseranschnitts verfiltert. Um dennoch das Vorhandensein einer aufschwimmenden Leichtphase im Schadenszentrum prüfen zu können, was mit den vorhandenen Messstellen im Schadenszentrum voraussichtlich nicht möglich ist, sollten in die Brunnen oberhalb des Grundwasserspiegels verfilterte Peilrohre eingebaut werden.

An den Schürfen SCH 2-1 und SCH 2-4 wurde bei der Detailerkundung 2010 /G9/ eine Auffüllung mit hohem Bauschutt- und Metallschrottanteil festgestellt, bei welchen Fundamente der ehem. Flugzeugwerft vermutet wurden. Zudem wurde an den Kleinrammbohrungen KRB 2-3a, KRB 2-09, KRB 2-10 K 2-5a Oberflächenversiegelung aus Teer bzw. Beton angetroffen, sodass vor Ausführung der Bohrungen vorgeschachtet werden muss und ggf. eine Oberflächenbefestigung zu durchörteren ist.

An den Bohrungen im Schadenszentrum sollten außerdem Linerproben entnommen und an diesen BTEX -, TOC - und Sieb- / Schlämmanalysen aus dem Grundwasserhorizont durchgeführt werden, um das Schadstoffpotenzial, die Adsorption der Schadstoffe am Bodenmaterial und die Durchlässigkeit des Aquifer zu untersuchen.

Hierzu werden je 3 Linerprobenahmen mit zugehöriger Analytik je Bohrung empfohlen.

Weitere Bodenproben werden bei sensorischen Auffälligkeiten entnommen und auf BTEX bzw. zusätzlich auf MKW analysiert.

Zur Untersuchung des Konzentrationsverlaufs im nahen Abstrom des Schadenszentrums der BTEX und Überwachung der künftigen Konzentrationsentwicklung während der Sanierungsmaßnahme sollten zwei weitere Bohrungen etwa 50 m nördlich des Schadenszentrums niedergebracht werden.

Um diese Bohrungen im Rahmen der späteren Grundwassersanierung bei Bedarf als Infiltrationsbrunnen nutzen zu können, sollten diese ebenfalls in einem Durchmesser von 324 mm abgeteuft werden.

Deren Ausbau wird anhand der Schichtenfolge und der bei den Bohrungen im Schadenszentrum festgestellten vertikalen Ausdehnung der BTEX – Belastung festgelegt. Für die Kostenschätzung in Anlage 8.1 wurde von einer Tiefe von 19 m u GOK und einer Filterstrecke von 14,5 – 18,5 m u GOK ausgegangen.

Nach Errichtung der zusätzlichen Messstellen soll ein erneutes Grundwassermonitoring mit Stichtagsmessung zur Überprüfung der Grundwasserfließverhältnisse an den bereits vorhandenen und den neu errichteten Grundwassermessstellen durchgeführt werden.

Zur Untersuchung der Schadstoffbelastung bzw. seit 2010 eingetretener Veränderungen sollen die Belastungsparameter BTEX und weitere Monoaromaten sowie MKW und PAK untersucht werden. Aufgrund der nachgewiesenen

mikrobiellen Abbauaktivität im Untersuchungsgebiet ist hierzu eine Konservierung der Proben nach DIN EN ISO 5667-3 unbedingt erforderlich.

Neben dem Kohlenwasserstoffindex (C<sub>10</sub> – C<sub>40</sub>) sollten bei den MKW auch die kurzkettigen Substanzen < C<sub>10</sub> ausgewertet werden.

Um aktuelle Ergebnisse zur Grundwasserbeschaffenheit als Grundlage der Sanierungsplanung und für die Ausschreibung der Sanierungsmaßnahme zu erhalten sollten folgende Parameter an allen Messstellen analysiert werden:

- Hydrogencarbonat, Gesamthärte, Mangan, Eisen ges., Eisen II und Säure- / Basenkapazität

Um das NA – Potenzial erneut zu bewerten, sollten zusätzlich die Parameter analysiert werden, an welchen bei den vorangegangenen Untersuchungen eine mikrobielle Abbauaktivität zu erkennen war:

- Methan, Sulfat, Sulfid, Nitrat

In der folgenden Tabelle ist eine Übersicht über die vorgeschlagenen Untersuchungen enthalten. Anlage 8 enthält die zugehörige Kostenschätzung.

**Tabelle 5: Untersuchungsprogramm und Kostenschätzung**

Maßnahme	Ausführung	Kosten
3x Bohrungen im Schadenszentrum GWM P, GWM Q und GWM R zur Untersuchung von Untergrundaufbau und Schadstoffpotenzial sowie Bestätigung der vertikalen Schadenseingrenzung	verrohrte Trockenbohrung, Bohrdurchmesser 324 mm, Endteufe 19 bzw. 25 m u GOK je nach vertikaler Schadstoffverteilung, Ausbau 140 x 8 mm 2x teufenorientierte Grundwasserprobenahmen je Bohrung, Analytik BTEX 3 x Liner je Bohrung mit Untersuchung BTEX, TOC und Sieb- / Schlämmanalyse	31.000 €
2x Bohrungen im nahen Abstrom GWM S, GWM T zur Untersuchung des Untergrundaufbaus und Bestätigung der horizontalen Schadenseingrenzung	Bohrdurchmesser 324 mm, Endteufe 19 bzw. 25 m u GOK je nach vertikaler Schadstoffverteilung	
Grundwassermonitoring an neu errichteten und vorhandenen GWM	Probenahme an 21 vorhandenen und 5 neu errichteten Grundwassermessstellen Parameterumfang: BTEX, MKW, PAK, Hydrogencarbonat, Gesamthärte, Mangan, Eisen ges., Eisen II und Säure- / Basenkapazität, Methan, Sulfat, Sulfid, Nitrat, 6 x LCKW an neu errichteten GWM und P 39	7.400 €
	<b>Summe</b>	<b>38.000 €</b>

## 5 Feldarbeiten

### 5.1 Errichtung der Grundwassermessstellen

Mit der Durchführung der Bohrarbeiten wurde im Ergebnis einer beschränkten Ausschreibung die Fa. Schüler GmbH & Co. Baugrund und Bohrunternehmen KG

beauftragt. Am 23.08.13 fand eine Anlaufberatung mit Einweisung vor Ort statt, am 03.09.13 wurde mit den Bohrarbeiten an der Messstelle GWMR begonnen. Zuerst wurden die Bohrungen GWMP, GWMQ und GWMR mit begleitenden Boden- und Grundwasseruntersuchungen im Schadenszentrum durchgeführt, um anhand der hierbei gewonnenen Erkenntnisse zur Schichtenfolge und zur vertikalen Schadstoffverteilung den Ausbau der Bohrungen GWMS und GWMT am Schadensrand festlegen und diese ggf. versetzen zu können.

Im Vorfeld der Bohrarbeiten wurden die Ansatzpunkte ausgepflockt und auf Kampfmittelfreiheit überprüft. Im Ergebnis wurde der Ansatzpunkt GWMP etwas versetzt.

Außerdem wurde die Leitungsfreiheit der Ansatzpunkte anhand der übergebenen Bestandspläne sowie mittels Vorschachten überprüft.

An keinem der Ansatzpunkte wurde eine Oberflächenbefestigung festgestellt.

Die Bohrung GWMT musste aufgrund eines Steinhindernisses bei 2 m u GOK versetzt werden.

Die folgende Tabelle enthält die Ausbaudaten der neu errichteten Grundwassermessstellen. Aus Anlage 2 und 6 ist deren Lage ersichtlich.

**Tabelle 6: Ausbau der neu errichteten Grundwassermessstellen**

Bezeichnung	Ausbau HDPE Ø [mm]	Bohr Ø [mm]	Filterkies [m u GOK]	Filterrohr [m u GOK]	Ton [m u GOK]	Endteufe, (gebohrt) [m u GOK]	Abschluss
<b>Grundwassermessstellen:</b>							
GWMP	140 x 8	324	15,0 – 21,5	17,04 – 21,04	2,0 – 5,0	28	rechteckige Straßenkappe
	63 x 5,8			15,15 – 17,15			
GWMQ	140 x 8	324	14,5 – 21,5	17,07 – 21,07	2,0 – 4,0	24	rechteckige Straßenkappe
	63 x 5,8			15,35 – 17,35			
GWMR	140 x 8	324	14,5 – 18,7	16,53 – 18,53	1,0 – 4,0	26	rechteckige Straßenkappe
	63 x 5,8			15,01 – 17,01	18,7 – 22,0		
GWMS	140 x 8	324	14,5 – 22,0	17,02 – 21,02	1,0 – 4,5	22	rechteckige Straßenkappe
	63 x 5,8			15,17 – 17,17			
GWMT	140 x 8	324	14,5 – 22,0	17,02 – 21,02	1,0 – 4,0	22	rechteckige Straßenkappe
	63 x 5,8			15,37 – 17,37			

Die Bohrungen wurden als verrohrte Trockenbohrung mit einem Durchmesser von Ø 324 mm durchgeführt und mit HDPE - Material, jeweils mit einem Pegelrohr im Durchmesser von 140 x 8 mm sowie einem Peilrohr im Durchmesser von 63 x 5,8 mm pro Bohrung ausgebaut. Die vollständige Bohrdokumentation ist in Anlage 12 enthalten.

Während der Bohrarbeiten wurden, wie vorgesehen, an den Bohrungen GWMP, GWMQ und GWMR im Schadenszentrum Linerproben und teufenorientierte Grundwasserproben während des Bohrfortschritts nach dem unter Pkt. 4



beschriebenen Prozedere entnommen und analysiert. Die Ergebnisse sind in Tabelle 8 zusammengefasst. Die Probenahmeprotokolle und Prüfberichte enthält Anlage 12.

Da an allen Bohrungen bei den teufenorientierten Grundwasserprobenahmen zur Tiefe hin ein deutlicher Rückgang der BTEX – Konzentration und das Belastungsmaximum im Horizont von 17 – 18 m u GOK festgestellt wurden, wurde der Ausbau der Bohrungen im Horizont ab 17 m u GOK, mit einer Filterstrecke von 4 m, bis 21 m u GOK festgelegt.

Eine Ausnahme stellt die Bohrung GWMR mit einem abweichenden Schichtenaufbau dar, an welcher bei 19,2 – 20,5 m u GOK eine gering mächtige Mergelschicht erbohrt wurde. Die Messstelle GWMR wurde oberhalb dieses Mergels von 16,5 – 18,5 m u GOK verfiltert.

Der Versuch unmittelbar unter dieser Mergelschicht von 20 – 21 m u GOK eine Wasserprobe zu entnehmen, musste aufgrund der geringen Ergiebigkeit abgebrochen werden. Die weiteren Probenahmen während des Bohrfortschritts wurden, wie geplant, durchgeführt.

Aufgrund sensorischer Auffälligkeiten (teerähnlicher Geruch, schwarzes, plastisches Material im Liner von 15,0 – 15,5 m u GOK aus der Bohrung GWMP, s. Abbildung 1) wurden zusätzlich zu den vorgesehenen BTEX – Analysen, Untersuchungen auf MKW durchgeführt.

#### **Abbildung 1: Liner von 15 – 16 m u GOK aus GWMP**



Am 15.10.13 wurden die Messstellen klargepumpt. Das Klarpumpwasser wurde über Wasseraktivkohle gereinigt und in einen Regenwasserkanal vor Ort eingeleitet.

Nach Fertigstellung wurden die neu errichteten Messstellen nach Lage und Höhe eingemessen. Die Vermessungsprotokolle sind in Anlage 12 enthalten.

Die Deklarationsanalytik des Bohrguts ergab, dass dieses der Kategorie Z0 zuzuordnen ist. Das Bohrgut wurde daraufhin vom Bohrunternehmen übernommen und der Verwertung zugeführt. Die Deklarationsanalytik und die Übernahmescheine enthält Anlage 12.



## 5.2 Grundwassermonitoring

Das Grundwassermonitoring wurde vom 04.11. bis 07.11.13 durch die Fa. LWU Labor für Wasser und Umwelt GmbH, Bad Liebenwerda durchgeführt, welche im Ergebnis einer beschränkten Ausschreibung beauftragt wurde.

Die Beprobungsreihenfolge, die Einbautiefen der Probenahmepumpe und die vorzupumpenden Volumina wurden durch die IMAGO vorgegeben und durchgehend eingehalten. Es wurde in Reihenfolge ansteigender BTEX – Konzentrationen, beginnend mit den Messstellen GWMD, GWML, GWMM, GWMC, GWMN und GWMO am Schadensrand beprobt.

An den Messstellen im Schadenszentrum wurde vor Beginn der Grundwasserprobenahme das Vorhandensein einer aufschwimmenden Leichtphase überprüft.

Die Grundwasserprobenahme erfolgte mittels MP1 - Unterwassermotorpumpe. Die eigentliche Probenahme wurde nach Vorpumpen des in der Ausschreibung vorgegebenen Volumens und bei Konstanz der Vorortparameter pH-Wert, Redoxpotenzial, Leitfähigkeit, Sauerstoffgehalt und Temperatur durchgeführt.

An allen Grundwassermessstellen wurden, wie vorgesehen, folgende Parameter analysiert:

- Belastungsparameter: BTEX, MKW, PAK
- Milieuparameter: Hydrogencarbonat, Nitrat, Eisen ges., Eisen II, Mangan, Sulfat, Sulfid, Methan, Säure-, Basenkapazität, Härtegrad

An den neu errichteten Grundwassermessstellen GWMP – GWMT sowie an P39 wurden zusätzlich LCKW analysiert.

Um Hinweise auf das Vorhandensein kurzkettiger MKW mit einer Kettenlänge  $< C_{10}$  zu erhalten, wurde, zusätzlich zum Kohlenwasserstoffindex nach DIN EN ISO 9377-2 H53 ( $C_{10} - C_{40}$ ), die Fraktion von  $C_5 - C_{10}$  nach DIN 38 407 F9 analysiert.

Anlage 11 enthält die Prüfberichte und Probenahmeprotokolle zum aktuellen Monitoring.

Das Vorpumpwasser wurde nach Reinigung über Aktivkohle abgeleitet.

## 5.3 Kostenvergleich

In der folgenden Tabelle wurden die im Vorfeld der Nachuntersuchungen für diese abgeschätzten Kosten den tatsächlich angefallenen gegenübergestellt:

**Tabelle 7: Vergleich von geschätzten und angefallenen Kosten**

	<b>Kostenschätzung (s. Anlage 8)</b>	<b>abgerechnete Kosten</b>
Grundwassermessstellenbohrungen (Fa. Schüler)	31.053,00 € netto	31.141,26 € netto
Grundwassermonitoring (Fa. LWU)	7.433,00 € netto	5.295,78 € netto
Summe	38.486,00 € netto	36.437,04 € netto

Der Vergleich zeigt, dass die ursprünglich abgeschätzten Kosten leicht unterschritten wurden.

## 6 Ergebnisse der aktuellen Untersuchungen

### 6.1 Boden- und Grundwasseruntersuchungen während der Bohrarbeiten

Zur Untersuchung des Untergrundaufbaus und der vertikalen Schadstoffverteilung wurden an den drei Bohrungen im Schadenszentrum Linerproben und teufenorientierte Grundwasserproben während des Bohrfortschritts entnommen und untersucht.

Die Ergebnisse der Untersuchungen an den Linern und der teufenorientierten Grundwasserprobenahmen sind in folgender Tabelle zusammengefasst.

**Tabelle 8: Ergebnisse der Liner - und teufenorientierten Grundwasserprobenahmen**

GWMP	Boden			Bodenart	Wasser		
	Prüfwert	4*	400*		[m u GOK]	100 **	
	[m u GOK]	[mg/kg] BTEX	[Gew. %] TOC	[mg/kg] MKW		[m u GOK]	[µg/l] BTEX
	15,0 – 15,5	0,86	0,08	< 100	mS, gs, fs, u		
	15,5 – 16,0	< BG	0,03	-	mS, gs, fs, u`		
	18,0 – 19,0	<b>27,1</b>	-	< 100	-mS, fs, gs, u`	17,0 – 18,0	<b>18.846</b>
	21,0 – 22,0	0,75	0,06	-	mS, gs, fs, u`	20,0 – 21,0	<b>9.449</b>
						23,0 – 24,0	<b>663</b>
						27,0 – 28,0	<b>425</b>
GWMQ	Boden				Wasser		
	[m u GOK]	[mg/kg] BTEX	[Gew. %] TOC	[mg/kg] MKW		[m u GOK]	[µg/l] BTEX
	15,0 – 16,0	<b>5,16</b>	0,06	-	mS,gs,fs,g`		
	18,0 – 19,0	<b>15,2</b>	0,10	-	mS, gs, g, sx`	17,0 – 18,0	<b>16.977</b>
	20,0 – 21,0	<b>11,4</b>	0,10	-	mS, fs, gs, u`	20,0 – 21,0	<b>11.784</b>
						23,0 – 24,0	<b>835</b>
GWMR	Boden				Wasser		
	[m u GOK]	[mg/kg] BTEX	[Gew. %] TOC	[mg/kg] MKW		[m u GOK]	[µg/l] BTEX
	15,0 – 16,0	< BG	0,03	-	mS, fs, gs, g		
	17,0 – 18,0	<b>1.255</b>	0,04	-		17,0 – 18,0	<b>28.020</b>
	19,0 – 20,0	<b>64,0</b>	0,05	-	U, s, g		
	25,0 – 26,0	< BG	0,09	-	mS, fs, u	25,0 – 26,0	<b>9.429</b>

\* Beurteilungswert für Boden der Berliner Liste /U1/, Flurabstand < 5 m (da im Grundwasserhorizont nachgewiesen), **rot** – Überschreitung

\*\* SSW – sanierungsbedürftiger Schadenswert der Berliner Liste /U1/ für alkylierte Benzole, **rot** – Überschreitung

In obige Tabelle wurde die Bodenart gemäß Schichtenansprache durch das Bohrunternehmen bzw. die ingenieurtechnische Begleitung mit aufgenommen.

Auffällig ist, dass die höchsten BTEX – Konzentrationen an den entnommenen Linerproben nicht im Horizont des Grundwasseranschnitts bei etwa 15 – 16 m u

GOK sondern in den darunter liegenden Bodenmetern analysiert wurden. Die höchste BTEX – Konzentration wurde an der Bohrung GWMR von 17 – 18 m u GOK mit 1.255 mg/kg nachgewiesen.

Im Ergebnis der Untersuchungen an den Linerproben erstreckt sich der mit BTEX belastete Horizont mit BTEX – Konzentrationen > 4 mg/kg von etwa 15 m bis etwa 21 m (GWMQ).

Zur Tiefe hin gehen die BTEX – Konzentrationen der Linerproben aus allen Bohrungen zurück. Eine signifikante Anreicherung der BTEX in Horizonten mit einem höheren Schluffanteil (jeweils tiefster Liner aus den Bohrungen GWMQ und GWMR, s. Tabelle 10) zeichnet sich nicht ab.

In der folgenden Tabelle wurden zum Vergleich die 2004 /G4/ an der Bohrung GWMH am nördlichen Schadensrand durchgeführten BTEX - und MKW – Bodenanalysen zusammengefasst.

**Tabelle 9: Ergebnisse der Bodenuntersuchungen an GWMH /G4/**

Intervall [m u GOK]	16,2 – 17,2	17,2 – 18,2	18,2 – 19,2	21,2 – 22,2	24,2 - 25
BTEX [mg/kg]	9,93	73,4	11,12	0,20	7,86
MKW [mg/kg]	52,5	52,7	23,6	21,2	10,3

Auch an der Bohrung GWMH wurden die höchsten Schadstoffkonzentrationen im Horizont von 17 – 18 m u GOK, einige Meter unterhalb des Grundwasserspiegels nachgewiesen, sodass die Ergebnisse beider Untersuchungskampagnen übereinstimmen. Möglicherweise lag der Grundwasserspiegel zur Zeit des Schadenseintritts tiefer als aktuell.

MKW wurden trotz sensorischer Auffälligkeiten an der Bohrung GWMP im Boden nicht nachgewiesen. Auch die MKW- und PAK – Konzentrationen im Grundwasser an der ausgebauten Messstelle sind gering (s. Pkt. 6.3).

Der TOC – Gehalt zeigt die typischen niedrigen Werte, obwohl an den Bohrungen GWMP und GWMQ kohlige Bestandteile („Kohleflitter“) angetroffen wurden.

Die BTEX - Grundwasserbelastung erstreckt sich im Ergebnis der teufenorientierten Grundwasserprobenahmen an GWMP bis zu einer Tiefe von etwa 28 m u GOK. Dieser Befund stimmt mit dem an der DP – Sondierung DP12 überein, an welcher von 15 – 16 m u GOK bis 29 - 30 m u GOK ein Rückgang von 3.768 µg/l auf 121 µg/l BTEX festgestellt wurde (s. Anlage 3).

Im Grundwasser ist damit von einem belasteten Horizont von etwa 13 m Mächtigkeit auszugehen.

An allen Bohrungen, bei welchen teufenorientierte Grundwasserprobenahmen durchgeführt wurden, ebenso wie bei der DP – Sondierung DP12, gehen die BTEX - Konzentrationen zur Tiefe hin deutlich zurück.

Neben den BTEX-, MKW- und TOC – Analysen wurde an den Linerproben die Korngrößenverteilung bestimmt. Die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle enthalten.

**Tabelle 10: Ergebnisse der Siebanalysen**

Bohrung	Liner [m u GOK]	Bodenart	kf – Wert (Beyer) m/s	kf – Wert (Hazen) m/s	U
GWMP	15,0 – 16,0	Mittelsand, grobsandig, feinsandig	$3,0 \times 10^{-4}$	$3,7 \times 10^{-4}$	3,3
	21,0 – 22,0	Mittelsand, schwach feinsandig, schwach grobsandig	$5,5 \times 10^{-4}$	$7,0 \times 10^{-4}$	1,74
GWMQ	15,0 – 16,0	Mittelsand, grobsandig, feinsandig	$2,6 \times 10^{-4}$	$2,0 \times 10^{-4}$	4,0
	18,0 – 19,0	Grobsand, mittelsandig, kiesig	$2,9 \times 10^{-3}$	$2,3 \times 10^{-3}$	3,54
	20,0 – 21,0	Feinsand, mittelsandig, schwach schluffig	$5,3 \times 10^{-5}$	$4,2 \times 10^{-5}$	3,49
GWMR	15,0 – 16,0	Grobsand, mittelsandig, feinsandig	$2,7 \times 10^{-4}$	$3,4 \times 10^{-4}$	4,26
	17,0 – 18,0	Mittelsand, schwach feinsandig, schwach grobsandig	$5,1 \times 10^{-4}$	$6,6 \times 10^{-4}$	1,8
	19,0 – 20,0	Mittelsand, kiesig, grobsandig, feinsandig	$2,8 \times 10^{-4}$	$3,6 \times 10^{-4}$	4,03
	25,0 – 26,0	Feinsand, Mittelsand	$7,1 \times 10^{-5}$	$1,0 \times 10^{-4}$	2,94

Mit Durchlässigkeitsbeiwerten von  $4,2 \times 10^{-5}$  m/s –  $2,9 \times 10^{-3}$  m/s weist das Bodenmaterial im Grundwasserhorizont überwiegend eine starke Durchlässigkeit auf.

Die anhand der Korngrößenverteilung bestimmten Durchlässigkeitsbeiwerte liegen überwiegend über den anhand der Pumpversuche /G7/ ermittelten. Da bei den Pumpversuchen erhebliche Probleme aufgetreten sind (s. Pkt. 3.6), wird davon ausgegangen, dass die anhand der Korngrößenverteilung ermittelte hydraulische Durchlässigkeit des Grundwasserhorizonts repräsentativer ist.

## 6.2 Stichtagsmessungen

Am 29.05. und 18.12.13 wurden Stichtagsmessungen der Grundwasserstände im Untersuchungsgebiet durchgeführt. Außerdem wurden im Rahmen des Grundwassermonitorings vom 04. bis 07.11.13 die Grundwasserstände an den Messstellen gemessen. In Anlage 10 sind die zugehörigen Grundwassergleichpläne dargestellt.

Diese zeigen, wie bisher, die bekannte nördliche bzw. nordnordöstliche Grundwasserfließrichtung im Bereich der Flächen KF1 und KVF2, mit einem sehr geringen Gefälle.

Die Unterschiede in den Grundwasserständen der 330 m voneinander entfernt gelegenen Messstellen GWMG und GWMD betragen nur 4 cm - 5 cm (November, Dezember 13) und der 229 m voneinander entfernten Messstellen P74 und GWMD 4,0 cm (November, Dezember 13) – 8,5 cm (Mai 13).

Die 2013 gemessenen Grundwasserstände im Untersuchungsgebiet lagen bei Ø 32,74 m NN und zeigen keine wesentlichen Unterschiede zwischen den im Mai und November / Dezember 2013 durchgeführten Stichtagsmessungen. 2010 /G9/ wurden im Bereich des alten Hafens Grundwasserstände von 72,72 – 72,74 m NN

gemessen, welche nahezu den aktuellen 2013 entsprechen und ein Gefälle von 0,00015 m/m ermittelt.

In der folgenden Tabelle sind die anhand der 2013 durchgeführten Stichtagsmessungen und aus den Sieblinien bestimmten  $k_f$  – Werte ermittelten Abstandsgeschwindigkeiten ( $v_a = k_f \cdot J / n_{eff}$ ) angegeben.

Für die  $k_f$  – Werte wurden folgende Werte angesetzt (s. Tabelle 10):

- $3 \times 10^{-4}$  m/s (Mittel- / Grobsand)
- $5 \times 10^{-5}$  m/s (Feinsand, schluffig)

Die effektive Porosität ( $n_{eff}$ ) wurde, wie in /G9/ abgeschätzt, mit 0,15 für Mittelsand bzw. 0,1 für schluffige Sande beibehalten.

**Tabelle 11: Abstandsgeschwindigkeiten**

Stichtagsmessung			
29.05.13	P74 - GWMD	GWMH - GWMD	
J [m/m]	0,085/229 = 0,00037	0,075/145 = 0,00052	
$v_a$ [m/a]	23,3 / 5,8	32,8 / 8,1	
November 13	GWMG - GWMD	P74 - GWMD	GWMH - GWMD
J [m/m]	0,04/330 = 0,00012	0,04/229 = 0,00017	0,02/145 = 0,00014
$v_a$ [m/a]	13,2 / 1,9	10,7 / 2,7	8,8 / 2,2
18.12.13	GWMG - GWMD	P74 - GWMD	GWMH – GWMD
J [m/m]	0,05/330 = 0,00015	0,045/229 = 0,0002	0,025/145 = 0,00017
$v_a$ [m/a]	9,5 / 2,4	12,6 / 3,2	10,7 / 2,7

Das bei der Stichtagsmessung vom Mai 2013 ermittelte Gefälle ist etwa 3 x so hoch, wie das im Mai 2010 ermittelte von 0,00015 m/m /G9/.

Hieraus resultiert, dass auch die für Mai 2013 für die Teilflächen KF1 und KVF2 ermittelten Abstandsgeschwindigkeiten über der 2010 /G9/ berechneten liegen. Allerdings sind auch die aktuell berechneten Abstandsgeschwindigkeiten von etwa 10 – 20 m/a für Mittelsand und 2 – 6 m /a für schluffige Sande weiterhin als niedrig einzustufen.

Für November und Dezember 2013 entspricht das Grundwassergefälle etwa dem 2010 /G9/ ermittelten. Aufgrund der aus den Sieblinien bestimmten hydraulischen Durchlässigkeit, welche höher ist, als die 2010 für die Berechnung der Abstandsgeschwindigkeit angesetzte, sind die die aktuell ermittelten Abstandsgeschwindigkeiten höher als 2010.

### 6.3 Schadstoffverteilung

Die höchsten BTEX – Konzentrationen von > 10.000 µg/l wurden auch beim aktuellen Monitoring, wie bisher, an den bereits vorhandenen Messstellen P39, P47, P72 und GWMB analysiert. Eine vergleichbare BTEX – Belastung weisen die neu errichteten Messstellen GWMQ (12.226 µg/l) und GWMR (14.299 µg/l) auf.

Durch die hohen Konzentrationen an GWMQ und GWMR vergrößert sich die Nord – Südausdehnung des bekannten Schadenszentrums im östlichen Teil (Vergleich Anlage 6.1 und 7.1).

An den neu errichteten Messstellen GWMS und GWMT im nahen nördlichen Abstrom wurde mit 247 µg/l bzw. 1.180 µg/l eine Abgrenzung des Belastungsschwerpunkts nach Norden erreicht.

Die Konzentrationsverteilung und das –niveau gleichen stark den bei den vorangegangenen Untersuchungen festgestellten.

An den Messstellen P5, P7, P39, P47, P72, GWMB, GWMQ und GWMR, welche hohe BTEX – Konzentrationen aufweisen, wurden ebenfalls Überschreitungen des sanierungsbedürftigen Schadenswerts (SSW, s. /U1/) von 5 µg/l für Naphthalin nachgewiesen (s. Anlage 7.2). Diese fallen mit max. 21.8 µg/l an P47 (4 x SSW) jedoch wesentlich geringer aus, als bei den BTEX mit max. 15.475 µg/l an P72 (155 x SSW (100 µg/l)), sodass die BTEX, wie bisher, den Hauptschadstoff darstellen.

Der Kohlenwasserstoffindex überschreitet nur an P72 leicht den sanierungsbedürftigen Schadenswert (SSW) von 0,5 mg/l und liegt ansonsten überwiegend unter der Bestimmungsgrenze.

Bei den kurzkettigen Kohlenwasserstoffen von C<sub>5</sub> – C<sub>10</sub> wird auch bei Abzug der Monoaromaten – Konzentration, welche ebenfalls bei dieser Bestimmung mit erfasst werden, der SSW an P5, P6, GWMA, GWMH und der neu errichteten Messstelle GWMT leicht (max. 9 x SSW für Kohlenwasserstoffe an P5) überschritten.

LCKW wurden bei den aktuellen Grundwasseruntersuchungen nicht nachgewiesen.

#### 6.4 Milieuparameter

Der mikrobielle Abbau der BTEX geschieht vorzugsweise unter Nutzung von Sauerstoff als terminalem Empfänger (Akzeptor) der Reduktionsäquivalente (Elektronen).

Ist der im Grundwasser enthaltene Sauerstoff verbraucht, können auch alternative Elektronenakzeptoren („Sauerstoffträger“) zum BTEX – Abbau genutzt werden. In der Reihenfolge der Nutzung für diese „anaeroben Atmungen“ bei fallendem Redoxpotenzial sind dies: Nitrat → Eisen III / Mangan → Sulfat → Kohlendioxid.

Die Geschwindigkeit des Abbaus der vorhandenen Hauptschadstoffe, der Monoaromaten, nimmt dabei in folgender Reihenfolge ab:

Atmung (aerob) > Nitratatmung (anaerob) > Eisen (III) / Mangan (IV/III) Reduktion (anaerob) > Sulfatatmung (anaerob) > Methanogenese (anaerob)

Anhand der Verteilung der Milieuparameter im Untersuchungsgebiet (Abnahme möglicher Elektronenakzeptoren (Sauerstoff, Nitrat, Eisen III, Manganoxide, Sulfat) und / oder Zunahme der Reduktionsäquivalente (Eisen II, Mangan II, Sulfid, Methan) im Bereich des BTEX – Schadens im Vergleich zu unbelasteten Messstellen wird üblicherweise der biologische Abbau nachgewiesen.

Außerdem kann eine Hydrogencarbonat - Konzentration ab einem Faktor 2 über den Hintergrundgehalten als Indiz für mikrobiellen Abbau gewertet werden /U9/, /U3/, da



sowohl durch aeroben, als auch durch anaeroben Abbau Kohlendioxid gebildet wird, welches sich im Gleichgewicht mit dem Hydrogencarbonat im Grundwasser befindet.

Die vorangegangenen Untersuchungen zeigten, dass im Untersuchungsgebiet im Bereich der BTEX – Belastung die Eisen II -, Mangan-, und Methankonzentrationen erhöht sind, wohingegen für Sulfat eine Senke vorliegt. Die Verteilung dieser Milieuparameter sowie die niedrigen Sauerstoffgehalte (P5, P39, P47, P72, GWMB, GWMQ – GWMT) und Redoxpotenziale an den mit BTEX belasteten Messstellen weisen auf einen BTEX – Abbau unter anaerobe Bedingungen hin.

Die analysierten Konzentrationen an Hydrogencarbonat liegen im Bereich von 323 mg/l bis 500 mg/l und zeigen damit nur vergleichsweise geringe Unterschiede.

Im Vergleich zu den Nitratgehalten an den östlich, westlich und südlich außerhalb der BTEX – Belastung liegenden Messstellen, welche Nitratkonzentrationen von 10 – 20 mg/l aufweisen, zeigen P39, P72, GWMB, GWMQ und GWMR im Zentrum der BTEX - Belastung mit Konzentrationen < Bestimmungsgrenze einen vollständigen Verbrauch an Nitrat (s. Anlage 9.1).

Bereits am südlichen, abstromigen Schadensrand an GWMS, GWMT und P66 ist Nitrat wieder nachweisbar und steht für einen mikrobiellen Abbau zur Verfügung.

Auffällig sind die hohen Nitratkonzentration an den Messstellen GWMA und GWMP, welche auf einen lokalen Eintrag, möglicherweise durch einen alten Abwasserkanal hinweisen könnten.

Im südwestlichen Abstrom, außerhalb der BTEX – Belastung, an GWMN/O ist ebenfalls ein Verbrauch von Nitrat erkennbar.

Bei dem im Grundwasser gelösten Eisen zeichnet sich im Bereich der BTEX – Belastung eine Mobilisierung durch Reduktion des am Bodenkorn gebundenen Eisen III ab (s. Anlage 9.2). Die Konzentrationen im BTEX – Belastungsbereich liegen mit 1,1 (GWMA, P6) - 8,85 mg/l (P38) weit über den Hintergrundgehalten von 0,03 (GWMC) – 0,06 mg/l (GWME).

Auffällig ist die niedrige Eisen – Konzentration an GWMH (0,28 mg/l), welche möglicherweise darauf zurückzuführen ist, dass diese Messstelle unterhalb des maximal mit BTEX belasteten Horizonts ausgebaut ist.

Auch beim gelösten Eisen ist ein weiterer Bereich, in welchem dieses gebildet wird an den Messstellen GWMN/O zu erkennen.

Wie bei Nitrat, existiert bei Sulfat ebenfalls eine Senke an den Messstellen P38, P39, P47, P72, GWMB und GWMQ im Bereich BTEX – Belastung mit niedrigen Konzentrationen < 10 mg/l (s. Anlage 9.3).

Außerhalb der BTEX – Belastung liegen die Sulfatgehalte bei 25,5 mg/l (GWMG) bis 151 mg/l an GWMN.

An den Messstellen, welche eine Zehrung von Sulfat zeigen, ist erwartungsgemäß auch das Produkt der Sulfatreduktion, Sulfid, nachweisbar. Die Hintergrundgehalte für Sulfid liegen unter der Bestimmungsgrenze (s. Anlage 9.4).



In Anlage 9.5 ist die Verteilung von Methan dargestellt. Auffällig ist, dass die höchsten Methankonzentrationen von  $> 10.000 \mu\text{g/l}$  außerhalb der BTEX – Kontamination an GWME, GWMF, GWMN, GWMC nachgewiesen wurden.

Im Bereich des BTEX – Schadens an P5, P6, P38, P47, GWMA, GWMB, GWMP, GWMQ, GWMR sind die Methankonzentrationen mit  $> 5.000 \mu\text{g/l}$  ebenfalls hoch und liegen deutlich über den im An- und Abstrom an GWMG und GWMG analysierten Hintergrundgehalten von  $< 10 \mu\text{g/l}$ .

Wie bei den vorangegangenen Untersuchungen, bildet sich auch bei den aktuellen der mikrobielle Kohlenwasserstoffabbau im BTEX – Schadensbereich in der Verteilung der Milieuparameter ab.

Im Zentrum der Belastung geschieht der BTEX – Abbau unter eisenreduzierenden, sulfidogenen und methanogenen Bedingungen, im nahen Abstrom (GWMS, GWMT, P66) sind bereits die Bedingungen für die effizientere Nitratatmung gegeben.

Die Verteilung der Milieuparameter zeigt weiterhin, dass auch außerhalb der BTEX – Kontamination die mikrobielle Aktivität erhöht ist und weitere Stoffumsetzungen, möglicherweise mit geogenen Kohlenstoffquellen stattfinden.

## **7 Bewertung der Untersuchungsergebnisse hinsichtlich der Sanierungsplanung**

Hinsichtlich der Sanierungsplanung sind im Wesentlichen folgende Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen von Bedeutung:

### Untergrundbeschaffenheit

Der Grundwasserleiter im Bereich BTEX – Kontamination auf den Teilflächen KF1 und KVF2 ist im überwiegenden Teil ungegliedert. Mit Ausnahme der Leitfähigkeitssondierung LF2 (s.u.) sowie vereinzelter Reste des Saalegeschiebemergels, welche an den Messstellen GWM E, GWM L, GWM M und GWM R erbohrt wurden, wurde kein flächig aushaltender stauender Horizont oberhalb des Grundwassergeringleiters des Holstein – Interglazial (52,40 m u GOK an FB Süd) nachgewiesen.

Die an der Leitfähigkeitssondierung LF 2 für den gesamten Grundwasserhorizont von 15 – 30 m u GOK interpretierte Schluffschicht wurde bei den vorangegangenen und aktuellen Messstellenbohrungen nicht angetroffen, sodass davon ausgegangen wird, dass im Sanierungsbereich keine aushaltende Mergelbank, sondern lediglich lokal gering mächtige Schichten bindigen Materials (GWMR: 19,2 – 20,50 m u GOK Geschiebemergel, 21,5 – 25,2 m u GOK: Schluff- und Geschiebemergellagen) vorhanden sind.

Anhand der aktuellen Bestimmung der hydraulischen Durchlässigkeit ist von durchlässigem bis stark durchlässigem Material, überwiegend bestehend aus Mittel- und Grobsanden, teilweise mit Feinsandlagen im Grundwasserhorizont auszugehen (s. Pkt. 6.1). Aufgrund der während der Pumpversuche aufgetretenen Probleme werden die aktuellen Untersuchungsergebnisse der Linerproben für belastbarer

gehalten, als die Pumpversuchsergebnisse. Folgende Durchlässigkeitsbeiwerte wurden anhand der Sieblinien ermittelt (s. Tabelle 10):

- $2,6 \times 10^{-4}$  bis  $2,3 \times 10^{-3}$  m/s (Mittel- / Grobsand)
- $4,2 \times 10^{-5}$  bis  $5,3 \times 10^{-5}$  m/s (Feinsand, schluffig)

An einer Reihe von Bohrungen wurde im Grundwasserhorizont Kohle („Kohlegestein“, „Kohleflitter“) angetroffen, was für eine starke Rückhaltung der Schadstoffe am Aquifermaterial spricht.

Ähnlich zu der 2010 /G9/ durchgeführten Stichtagsmessung, ist von einem geringen Gefälle von  $J = 0,00016$  m/m (November, Dezember 13) bis  $J = 0,0004$  m/m (Mai 13) und demzufolge von einer geringen Abstandsgeschwindigkeit  $v_a = 11 - 28$  m/a (Mittelsand) bzw.  $2,5 - 7$  m/a (Schluff) im Untersuchungsgebiet auszugehen.

#### Horizontale und vertikale Ausdehnung und Zusammensetzung der BTEX - Belastung

Bei den bisherigen Boden- und Bodenluftuntersuchungen wurde keine Schadstoffquelle im ungesättigten Bodenhorizont aufgefunden, ebenso wurden bei den aktuellen Bohrungen keine sensorischen Auffälligkeiten oberhalb des Grundwasserspiegels festgestellt. Es handelt sich vermutlich um einen kleinräumigen Eintrag, welcher mit verhältnismäßigen Mitteln nicht aufzufinden ist.

Die vorgesehene Sanierungsmaßnahme umfasst daher allein den grundwasser-gesättigten Horizont.

Im Ergebnis der Untersuchungen an den Linerproben erstreckt sich der mit BTEX belastete Horizont im Boden mit BTEX – Konzentrationen  $> 4$  mg/kg von etwa 15 m bis etwa 21 m u GOK (GWMQ) über 6 m.

Die hohen BTEX – Konzentrationen, welche an den Linerproben analysiert wurden, zeigen, dass von einem hohen am Bodenkorn adsorbierten Schadstoffpotenzial auszugehen ist.

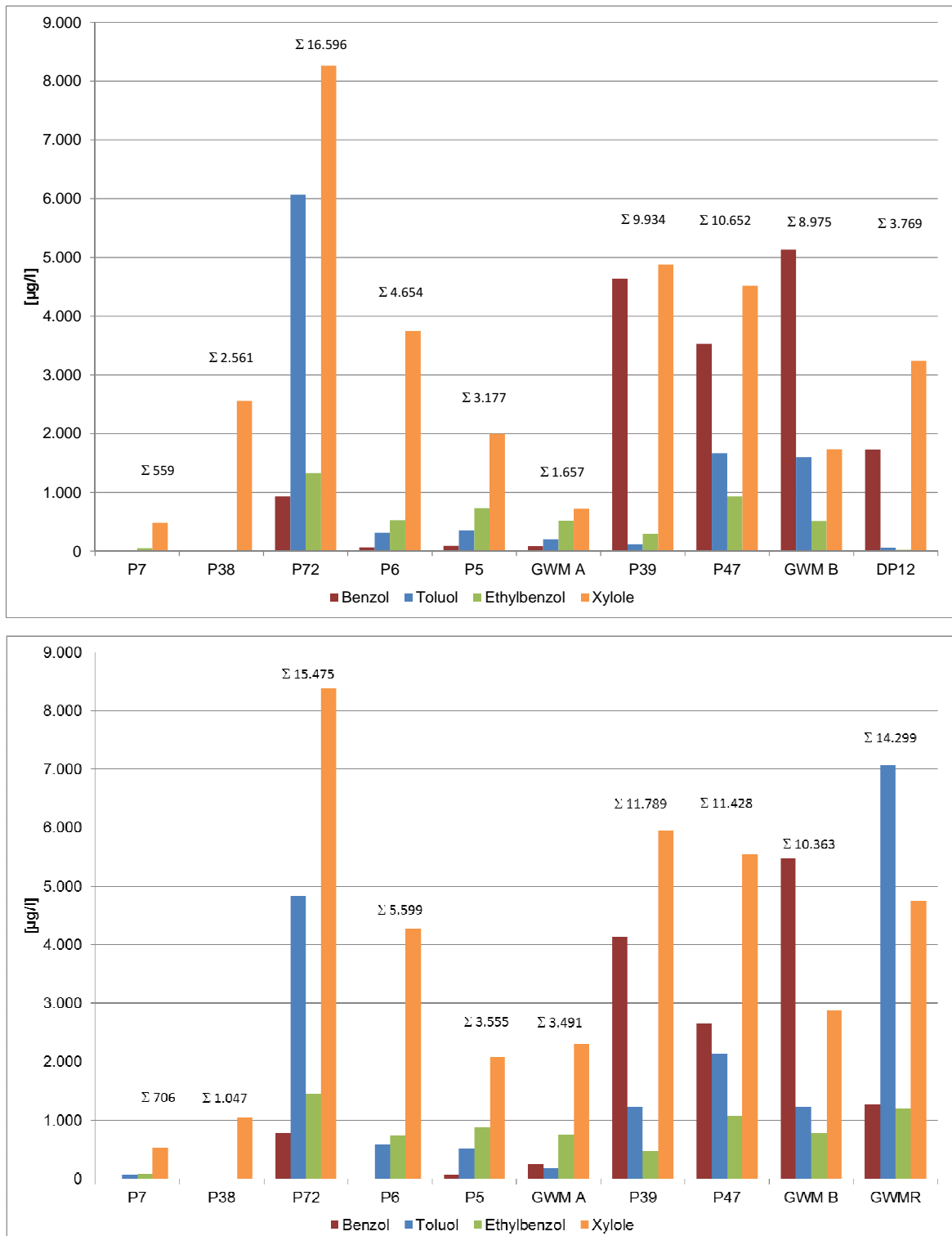
Die höchsten Konzentrationen am Boden wurden nicht, wie erwartet, im Grundwasseranschnittshorizont ab 15 m u GOK, sondern von 17 – 18 m u GOK (GWMR: 1.255 mg/kg Konzentrationsmaximum GWMH) bzw. 18 – 19 m u GOK (GWMP, GWMQ) nachgewiesen. Ursache ist möglicherweise ein niedrigerer Grundwasserspiegel bei Schadenseintritt.

Die BTEX - Grundwasserbelastung erstreckt sich im Ergebnis der teufenorientierten Grundwasserprobenahmen an GWMP bis zu einer Tiefe von etwa 28 m u GOK. Eine sehr hohe Konzentration wurde noch bis zu einer Tiefe von 25 – 26 m u GOK mit  $9.429 \mu\text{g/l}$  BTEX an GWMR nachgewiesen. Dieser Befund stimmt mit dem an der DP – Sondierung DP12 überein, an welcher von 15 – 16 m u GOK bis 29 - 30 m u GOK ein Rückgang von  $3.768 \mu\text{g/l}$  auf  $121 \mu\text{g/l}$  BTEX festgestellt wurde (s. Anlage 3).

Im Grundwasser ist damit insgesamt von einem kontaminierten Horizont von etwa 13 m bzw. von einem hoch belasteten Horizont von 10 m Mächtigkeit auszugehen.

Das Schadenszentrum der BTEX – Grundwasserkontamination mit Konzentrationen von etwa 10.000 µg/l bzw. darüber wurde bei den seit 2003 durchgeführten Untersuchungen durchgehend an den Messstellen P39, P47, P72 und GWM B nachgewiesen. Die neu errichteten Grundwassermessstellen GWMQ und GWMR vergrößern das bekannte Schadenszentrum im östlichen Teil nach Norden und Süden (vgl. Anlage 6.1 und 7.1). Insgesamt waren die Schadstoffverteilung und das Konzentrationsniveau während der bisherigen Untersuchungen vergleichsweise konstant.

**Abbildung 2: Zusammensetzung der BTEX im Schadenszentrum 2010 und 2013**



Die obige Abbildung zeigt die Zusammensetzung der BTEX für 2010 /G9/ und 2013. Für 2010 wurde die direct push – Sondierung DP12 und für 2013 die neu errichtete Messstelle GWMR in die Darstellung aufgenommen.

Ein Vergleich der Diagramme zeigt, dass sowohl die 2013 analysierten BTEX – Konzentrationen, als auch deren Zusammensetzung stark den 2010 Festgestellten ähneln.

An P7 und P38 sind die BTEX – Konzentrationen etwas niedriger und an GWMA höher, als bei der zuletzt 2010 durchgeführten Untersuchung.

Wie 2010, unterscheiden sich auch aktuell die Zusammensetzungen der hoch (>10.000 µg/l) mit BTEX belasteten Messstellen mit einem hohen Toluol – Anteil an der westlichen Messstelle P72 und hohen Benzol – Anteilen an den östlich hiervon gelegenen Messstellen P39, P47 und GWMB.

Die Zusammensetzung an der neu errichteten Messstelle GWMR, ebenfalls im östlichen Teil der BTEX – Belastung ähnelt wiederum der Messstelle P72 mit einem hohen Anteil an Toluol.

Neben Toluol oder Benzol machen die Xylole an allen Messstellen den Hauptbestandteil der BTEX aus.

Ursache für die Unterschiede in der BTEX – Zusammensetzung könnten verschiedene Schadensursachen oder mikrobieller BTEX – Abbau sein, bei welchem die einzelnen BTEX unterschiedlich gut abgebaut werden.

### Mengenabschätzung

Im Folgenden wird eine erneute Mengenabschätzung basierend auf den aktuell durchgeführten Untersuchungen vorgenommen:

Fläche innerhalb der 100 µg/l bzw. 1.000 µg/l Isokonze: 11.500 / 6.800 m<sup>2</sup>

hoch kontaminierter Horizont im Grundwasser (von 15 – 25 m u GOK, an GWMR bei 25 – 26 m noch 9.429 µg/l BTEX): 10 m

kontaminiertes Gesamtvolumen: 115.000 m<sup>3</sup> / 68.000 m<sup>3</sup>

nutzbares Porenvolumen (für Mittelsand aus /G9/ beibehalten): 15 %

kontaminiertes Grundwasservolumen: 17.250 m<sup>3</sup> / 11.200 m<sup>3</sup>

durchschnittliche BTEX – Konzentration (Mittelwerte der innerhalb der 100 µg/l / 1.000 µg/l Isokonze analysierten Konzentrationen): 6.100 µg/l / 8.000 µg/l

im Grundwasser gelöste BTEX – Menge: 105 kg / 82 kg

Die aktuell abgeschätzte, im Grundwasser gelöste BTEX – Menge ist aufgrund der Vergrößerung des Belastungsbereichs durch die Befunde an den aktuellen Bohrungen etwa doppelt so hoch, wie in der Grundlagenermittlung /G13/.

Zu dieser im Grundwasser gelöst vorliegenden BTEX – Menge kommt ein am Bodenkorn adsorbierter Anteil der Schadstoffe dazu.

Die im Schadenszentrum (Fläche innerhalb der 1.000 µg/l Isokonze, 17 - 19 m u GOK) am Bodenkorn gebunden vorliegende BTEX – Menge wird anhand der Bodenkonzentrationen an den Messstellenbohrungen GWMH, GWMP – GWMR abgeschätzt:

Annahme: hoch mit BTEX belasteter Bodenhorizont (Mächtigkeit: 2 m) erstreckt sich über die gesamte Fläche innerhalb der 1.000 µg/l Isokonze (6.800 m<sup>2</sup>), als Ø Schadstoffkonzentration werden 50 mg/kg angesetzt: 1,2 t BTEX

Die im gesamten belasteten Grundwasservolumen am Bodenkorn adsorbiert vorliegende BTEX – Menge wird aus der im Wasser gelösten Schadstoffkonzentration  $C_W$  über den Sorptionskoeffizienten des Bodens ( $K_D$  – Wert) wie folgt abgeschätzt:

$$C_{ads} = C_W * K_D = (0,000008 \text{ g/g}) * 0,09 = 0,0000007 \text{ g/g} = 0,72 \text{ mg/kg}$$

- mittlere Grundwasserkonzentration  $C_W = 8.000 \text{ µg/l}$  innerhalb der 1.000 µg/l – Isokonze stellt eine Gleichgewichtskonzentration dar
- die BTEX sind vorwiegend an der organischen Substanz im Boden adsorbiert, die Sorption an der Bodenmatrix ist daher proportional zu deren Gehalt an organischer Substanz:
- zur Vereinfachung wird ein mittlerer  $K_{OC}$  – Wert von 150 (Mittelwert Benzol / Xylole s. Tabelle 12) angenommen

$$K_D = K_{OC} * f_{OC} = 0,09$$

$K_{OC}$  - Verteilungskoeffizient zwischen organischem Kohlenstoff und Wasser s. Tabelle 12

$$K_{OC} = 150$$

$f_{OC}$  - Gehalt des Bodens an organischem Kohlenstoff [g/g Trockenmasse],

$$f_{OC} = 0,0006 \text{ g/g (Mittelwert der aktuellen TOC – Analysenergebnisse, s. Tabelle 8)}$$

Als Bodenmenge, in welcher diese Gleichgewichtskonzentration vorliegt, wurde der Bereich innerhalb der 1.000 µg/l – Isokonze (68.000 m<sup>3</sup> / 115.600 t) angesetzt.

am Bodenkorn adsorbierte BTEX – Menge: 83 kg

In Summe ergibt sich eine Gesamtschadstoffmenge von etwa 1,4 t BTEX, welche die 2010 /G9/ abgeschätzte deutlich und die in der Grundlagenermittlung /G13/ abgeschätzte leicht überschreitet.

An dieser Gesamtschadstoffmenge an BTEX macht die am Bodenkorn im Schadenszentrum gebundene Menge den wesentlichen Anteil aus. Abhängig davon, welche Ausdehnung das an der Bohrung GWMR mit 1.255 mg/kg BTEX nachgewiesene Belastungsmaximum aufweist, können zu der abgeschätzten Schadstoffmenge noch 0,7 t - 3 t (1/4 – 1/1 Anteil der Fläche innerhalb der 10.000 µg/l Isokonze von 1.300 m<sup>2</sup>, 1 m Horizont) dazu kommen.

#### Natürliche Schadstoffminderungsprozesse (NA)

Die durchgeführten Untersuchungen (/G6/, /G9/, s. Pkt. 6.4) haben einen Abbau der BTEX nachgewiesen, welcher aufgrund der Art der Schadstoffe und des Alters des Schadens auch zu erwarten war.

Nach /U3/ sind Toluol und Ethylbenzol für einen anaeroben Abbau am besten geeignet, was möglicherweise die Ursache der geringen Anteile dieser Substanzen an den belasteten Messstellen ist. Allerdings ist auch die Zusammensetzung der Ausgangssubstanz nicht bekannt.

Xylole, insbesondere o- und p – Xylol werden dagegen etwas schlechter verwertet.

Auch für Benzol wurde mittlerweile ein anaerober Abbau nachgewiesen, allerdings sind die Angaben in der Literatur hierzu widersprüchlich.

Generell erfolgt ein aerober BTEX – Abbau wesentlich schneller, als der vorliegende anaerobe, welcher jedoch bei Kohlenwasserstoffschäden der verbreitetste ist, da die Sauerstoffzehrung durch die mikrobielle Abbauaktivität schnell zu anaeroben Verhältnissen führt. Im Rahmen einer technischen Sanierungsmaßnahme ist dagegen der aerobe BTEX – Abbau bedeutsamer.

Die folgende Tabelle 12 enthält eine Zusammenfassung der chem. phys. Eigenschaften der Hauptschadstoffe.

Die niedrigen Siedepunkte und hohen Henry – Koeffizienten (mit Ausnahme von Naphthalin) der vorliegenden Schadstoffe zeigen, dass neben dem mikrobiellen Abbau eine allmähliche Ausgasung in die Bodenluft zur Minderung der Gesamtschadstoffmenge beitragen kann.

Neben der unterschiedlichen mikrobiellen Abbaubarkeit unter den vorliegenden anaeroben Bedingungen sind für die Sanierungsplanung vor allem die großen Unterschiede in der Wasserlöslichkeit und Adsorbierbarkeit an organischem Material von Bedeutung, die zur Folge haben, dass bei vergleichbaren Konzentrationen im Grundwasser bei Xylole eine wesentlich höhere Menge am Bodenkorn adsorbiert vorliegt, als bei Benzol. Die Verfügbarkeit von Benzol für eine pump & treat Maßnahme ist dagegen am höchsten und nach deren Einstellung für diese Substanz von dem geringsten rebound – Effekt auszugehen.

**Tabelle 12: Chemisch – physikalische Eigenschaften der Hauptschadstoffe**

Substanz	Wasserlöslichkeit [mg/l]	Siedepunkt [°C]	Henry – Koeffizient [-]	Adsorbierbarkeit an C <sub>org</sub> (K <sub>oc</sub> )	Wassergefährdungsklasse
Benzol	1.780	80	0,23	ca. 80	3
Toluol	550	111	0,26	ca. 100	2
Xylole	175 – 198	138 – 144	0,21 – 0,28	ca. 210	2
Ethylbenzol	168	136	0,35	ca. 200	1
Tetrachlorethen	150	121	0,84	300	3
Naphthalin	31	218	0,084	1.300	2

aus /U4/, /U5/

Die Zielstellung einer Sanierungsmaßnahme sollte daher sein, einen Großteil der Schadstoffmenge, insbesondere des Benzols, welches den toxikologisch relevantesten und auch mobilsten der vorhandenen Stoffe darstellt, mittels p & t zu entfernen, sodass für die verbliebene Restschadstoffmenge mittels technisch



unterstütztem (ENA - enhanced natural attenuation) bzw. natürlichem mikrobiellen Abbau (MNA – monitored natural attenuation) eine weitere Reduzierung erfolgen kann.

Die Überleitung von einer aktiven Sanierung in MNA könnte erfolgen, wenn davon auszugehen ist, dass Risiko eine Schadstoffausbreitung minimiert ist, d.h. das Angebot an alternativen Elektronenakzeptoren im Grundwasser für die verbliebene Restschadstoffmenge ausreicht. Zu diesem Zeitpunkt sollte die Stationarität der BTEX – Fahne mehrfach nachgewiesen worden sein.

In der folgenden Tabelle sind die wesentlichen Charakteristika des Sanierungsbereichs zusammengefasst.

**Tabelle 13: Zusammenfassende Charakterisierung Sanierungsbereich**

<b>Untergrund- aufbau</b>	Boden- beschaffenheit	Mittelsand / Grobsand bzw. Feinsandlagen vereinzelt schluffig, an GWME, GWML, GWMM und GWMR geringmächtige Geschiebemergelschicht, teilweise Kohle angetroffen
	hydraulische Parameter	Durchlässigkeit: $k_f = 2,6 \times 10^{-4}$ bis $2,3 \times 10^{-3}$ m/s (Mittel- / Grobsand) $k_f = 4,2 \times 10^{-5}$ bis $5,3 \times 10^{-5}$ m/s (schluffiger Feinsand)  Reichweiten (gemessene): < 17 m (Pumpversuch /G6/)  Abstandsgeschwindigkeit: 11 – 28 m/a (Mittelsand), 2,5 – 7 m/a (schluffiger Feinsand)
<b>Ausdehnung</b>	Horizont	Grundwasseranschnitt 15 m u GOK bis etwa 28 m u GOK GWMP bzw. 30 m u GOK DP12 > 100 µg/l BTEX (SSW /U1/ für Monoaromaten), bis etwa 26 m u GOK > 1.000 µg/l an GWMR
	Mächtigkeit	etwa 13 m, Belastungsmaximum etwa 10 m
	Fläche	ca. 11.500 m <sup>2</sup> , entspricht 100 µg/l Isokonze in Anlage 7.1
	Bodenmenge	115.000 m <sup>3</sup> , 195.500 t
	Grundwasservolumen	bei 15 % effektiver Porosität: 17.250 m <sup>3</sup>
<b>Belastung</b>	Konzentrationen	Ø 6.100 µg/l 247 µg/l (GWMS) – max. 15.475 µg/l (P72) Schadenszentrum
	BTEX-Menge	105 kg BTEX gelöst, 1.300 kg am Bodenkorn adsorbiert, Σ 1,4 t BTEX (möglicherweise + 700 kg bis + 3.000 kg aus Belastungszentrum um GWMR)
	Einzelsubstanzen	30 - 50 % Benzol, 40 – 50 % Xylole im Schadenszentrum, 30% -50% Toluol an P72 und GWMR
<b>Besonderheiten</b>		mikrobieller Schadstoffabbau auf Stufe der Eisenreduktion, Sulfidogenese und Methanogenese im Schadenszentrum nachgewiesen, am Schadensrand Nitratatmung  bei Pumpversuchen kein Rückgang der BTEX - Konzentrationen



## 8 Gefahrenbeurteilung

Die aus den seit 2003 /G3/ durchgeführten Untersuchungen bekannte Grundwasserkontamination mit BTEX sowie untergeordnet mit weiteren Monoaromaten (Trimethylbenzole), Naphthalin und kurzkettigen Kohlenwasserstoffen wurde erneut in Ausdehnung und Konzentrationsniveau bestätigt.

Mit BTEX – Konzentrationen von aktuell bis zu 15.475 µg/l wurde eine schädliche Grundwasserverunreinigung damit mehrfach nachgewiesen. Hauptbelastungsparameter sind die Xylole und Toluol sowie das toxikologisch besonders relevante Benzol.

Der Sanierungsbedürftige Schadenswert von 100 µg/l für alkylierte Benzole bzw. von 5 µg/l für Benzol wird auf einer Fläche von etwa 6.800 m<sup>2</sup> bzw. 5.000 m<sup>2</sup> deutlich, um etwa das 10 fache überschritten.

Die BTEX – Kontamination ist horizontal und vertikal eingegrenzt. Weiterhin ist keine Ausbreitungstendenz erkennbar.

Es wurde allerdings eine sehr hohe Schadstoffmenge für den grundwassergesättigten Horizont von 1,4 t BTEX abgeschätzt, sodass, auch wenn das Grundwasser in der Umgebung nicht genutzt wird, eine potenzielle Gefährdung der Verunreinigung bisher unbelasteten Grundwassers langfristig bestehen bleibt.

Die nachhaltig hohen, seit Beginn der BTEX - Untersuchungen 2003 im Wesentlichen unveränderten BTEX – Konzentrationen zeigen, dass die natürlich ablaufenden schadstoffmindernden Prozesse zwar ausreichen, um eine Ausbreitung der BTEX – Belastung zu verhindern, aber in diesem Zeitraum nicht zu einer wesentlichen Reduzierung der im Grundwasserhorizont vorhandenen Schadstoffmenge geführt haben.

Ziel einer Sanierungsmaßnahme sollte es daher sein, mit verhältnismäßigen Mitteln die Schadstoffmenge im Grundwasserhorizont soweit zu reduzieren, dass für die verbleibende Restschadstoffmenge eine weitere Reduzierung durch natürlich ablaufende schadstoffmindernde Prozesse prognostiziert werden kann.

Eine Gefährdung über den Wirkungspfad Boden – Mensch durch die BTEX ist nicht gegeben. Aufgrund der hohen Grundwasserüberdeckung von 15 m und der gegenwärtigen Nutzung als Grünfläche ist keine Ausgasung in Gebäude (Kellerräume) zu befürchten.

## 9 Literaturverzeichnis

### Gutachten und Unterlagen

Lfd. Nr.	Datum	Gutachter / Quelle	Titel
G1	16.08.84	Ingenieurbüro für Umweltschutz Laboratorium für Geotechnik Dipl. Ing. H. Knausenberger	Bericht 1858 – Grundwasseruntersuchungen Flughafen Tempelhof
G2	31.10.94	WIB Ingenieurgesellschaft mbH	Erfassung, Bewertung und Gefährdungsabschätzung von Altlastenverdachtsflächen im Bereich des Flughafens Tempelhof
G3	30.06.03	AnalyTech GmbH	Ergebnisbericht: Zur Funktionsprüfung und Beprobung von Grundwassermessstellen sowie zur Untersuchung der Grundwasserproben auf MKW, BTEX und LHKW im Bereich des Flughafens Tempelhof
G4	10 / 2004	Terracon Laboratorium für Umwelt- und Pestizidanalytik GmbH	BV Technische Erkundung im Rahmen der Gefährdungsabschätzung Flughafen Berlin – Tempelhof – „Alter Hafen“
G5	01.08.05	Prof. Dr. Macholz Umweltprojekte GmbH	Kurzfassung – Gefährdungsabschätzung 2005 – Alter Hafen, Flugplatz Tempelhof
G6	13.09.05	Prof. Dr. Macholz Umweltprojekte GmbH	Gefährdungsabschätzung nach Sanierungsuntersuchung – Alter Hafen, Flugplatz Tempelhof
G7	25.08.07	Prof. Dr. Macholz Umweltprojekte GmbH	Abschlussbericht – Pumpversuch und Schlussfolgerungen für die Planung Alter Hafen, Flugplatz Tempelhof
G8	17.06.11	CDM Consult GmbH	Orientierende Untersuchung Phase II a - Ehem. Flughafen Berlin Tempelhof - frühere Bundesflächen, Liegenschaftsnummer 5097
G9	24.11.10	CDM Consult GmbH	Altlastenuntersuchungen Flughafen Berlin Tempelhof – Fläche des Landes Berlin – Teilfläche Alter Hafen -
G10	13.01.11	BZA Tempelhof - Schöneberg	Schreiben: Flughafen Tempelhof, Detailuntersuchungen „Alter Hafen“, Gutachten der Fa. CDM vom 24.11.10
G11	29.01.10	CDM Consult GmbH	Orientierende Altlastenuntersuchungen Flughafen Berlin Tempelhof – Fläche des Landes Berlin
G12	20.12.11	GuD Geotechnik und Dynamik Consult GmbH	Endbericht – Altlastenuntersuchungen auf dem Gelände Tempelhofer Freiheit (ehemaliger Flughafen Tempelhof) in 12101 Berlin
G13	Dezember 12	IMAGO Umwelt Consult oHG	Sanierungsplanung Tempelhofer Freiheit, Teilfläche „Alter Hafen“ / Grundlagenermittlung, Defizitanalyse und Untersuchungskonzept

## Literatur

- /U1/ Bewertungskriterien für die Beurteilung von Grundwasserverunreinigungen in Berlin, Berliner Liste 2005, ABI. 35 / 22.07.2005
- /U2/ Entscheidungsgrundlagen für Sicherungs- und Sanierungskonzepte für militärische Tanklager, Band 1 und 2, Dr. Andreas Agel, Eckhard Löbel, Alstom Environmental Consult GmbH Stuttgart, Umweltbundesamt Berlin April 1999
- /U3/ Leitfaden Natürliche Schadstoffminderungsprozesse bei mineralölkontaminierten Standorten; Kora – Themenverbund 1: Raffinerien, Tanklager, Kraftstoffe / Mineralöl, MTBE, Helmholtz Zentrum für Umweltschutz UFZ, August 2008
- /U4/ Arbeitshilfe Sickerwasserprognose bei orientierenden Untersuchungen; LABO/ALA Unterausschuss Sickerwasserprognose, Juli 2003
- /U5/ Fachliche Grundlagen zur Beurteilung von flüchtigen organischen Substanzen in der Bodenluft bei Altlasten; Schriftenreihe der Hessischen Landesanstalt für Umwelt, Umweltplanung, Arbeits- und Umweltschutz, Heft 263, Wiesbaden 1999
- /U6/ Bundes – Bodenschutz – und Altlastenverordnung (BBodSchV), 12.07.1999
- /U7/ Mitteilung der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA), Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Abfällen, Teil II: Technische Regeln für die Verwertung 1.2 Bodenmaterial (TR Boden), Stand 05.11.2004
- /U8/ Chemie.de, Entwicklung der Ottokraftstoffe
- /U9/ Leitfaden „Biologische Verfahren zur Bodensanierung“, J. Michels, T. Track, U. Gehrke, D. Sell; Dechema e.V., Umweltbundesamt, Fachgebiet III, 3.6