

INHALTSVERZEICHNIS

1	Anlass und Aufgabenstellung.....	3
2	Standortbeschreibung	3
2.1	Lage und Nutzung	3
2.2	Geologie und Hydrogeologie	5
3	Bisher durchgeführte Untersuchungen.....	7
3.1	Übersicht über die durchgeführten Untersuchungen.....	7
3.2	Schadstoffbelastung im Grundwasser.....	8
3.3	Untersuchungen zum mikrobiellen Abbaupotenzial	11
3.4	Boden	12
3.5	Bodenluft	13
3.6	Pumpversuch	14
4	Bewertung der bisherigen Untersuchungen hinsichtlich Sanierungsplanung	16
5	Defizitanalyse und Untersuchungsprogramm.....	21
6	Literaturverzeichnis	25

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Teilflächen im Bereich „Alter Hafen“ (ALV10470).....	4
Tabelle 2: Schematischer Untergrundaufbau.....	5
Tabelle 3: Zusammenfassung der im Bereich „Alter Hafen“ durchgeführten Untersuchungen.....	7
Tabelle 4: Kenndaten der 2007 durchgeführten Pumpversuche /G7/	14
Tabelle 5: Chemisch – physikalische Eigenschaften der Hauptschadstoffe	20
Tabelle 6: Zusammenfassende Charakterisierung Sanierungsbereich.....	20
Tabelle 7: Untersuchungsprogramm und Kostenschätzung.....	24

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Zusammensetzung der BTEX im Schadenszentrum 2010.....	17
--	----

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
- Anlage 7: Vorgeschlagene Ansatzpunkte der neu zu errichtenden Grundwassermessstellen
- Anlage 8: Kostenschätzung für die Nacherkundungsarbeiten

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 sowie der Erarbeitung eines Untersuchungskonzepts beauftragt, welche Gegenstand des vorliegenden Berichts sind. Die weiteren Leistungen zur Sanierungsuntersuchung und -planung wurden optional angeboten.

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 m².

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 Klopfestigkeit 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/
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 / Columbiadamm	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 ca. 48 m NN.

In Anlage 5 ist ein unter Verwendung der vorhandenen Messstellenbohrungen und der Leitfähigkeitssondierung LF 2 interpretierter geologischer Profilschnitt durch die KVF2 und KF1, entlang der Grundwasserfließrichtung enthalten.

Neben den Messstellen GWM G, H und N wurden in den Profilschnitt 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 im Bereich der Grundwasserkontamination vorhandenen Aufschlüssen liegen 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.

In dem von der BTEX – Grundwasserkontamination betroffenen Bereich (KF1, KVF2) lässt sich der Untergrundaufbau 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 – 16 bzw. 17 m u GOK	Fein-, Mittel-, Grobsande zur Tiefe hin gröber	
ab etwa 16 bis 17 m u GOK, Mächtigkeit nicht bekannt an LF2 15 m Mächtigkeit (s. u.)	Schluff bzw. Geschiebemergel, nicht durchteuft, 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. 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 C, D, F, G) wurde im Grundwasserschwankungsbereich erneut eine Feinsandschicht erbohrt.

An den Messstellenbohrungen GWM E, GWM L und GWM M wurde ab 16 bzw. 17 m u GOK erneut ein Schluff bzw. Mergel nachgewiesen (Saalegeschiebemergel). Diese Mergelbank wurde an den genannten Bohrungen über etwa 0,5 m erbohrt und die Messstellen über dieser Schicht ausgebaut. 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 dieser Mergel (hier als Schluff interpretiert) vom Grundwasseranschnitt bei etwa 15 m u GOK an bis zur Endteufe dieser Sondierung bei 30 m u GOK angesprochen. An den Bohrungen, insbesondere an GWM H und GWM N, 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.

Insgesamt ist die Schichtenansprache an den Bohrungen als höherwertig, als die Interpretation der Leitfähigkeitssondierung einzuschätzen, bei welcher es sich um ein indirektes Verfahren handelt.

Da es für eine Grundwassersanierung von großer Bedeutung ist, ob die Durchlässigkeit des Grundwasserleiters durch eine ggf. lokal auftretende Schluffbank verringert wird, bzw. in dieser ein Reservoir an Schadstoffen adsorbiert vorliegt, sollte der Untergrundaufbau im Schadenszentrum anhand weiterer Bohrungen überprüft werden (s. Pkt. 5).

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 einer Stichtagsmessung überprüft werden sollten.

Bis Ende der 80iger Jahre wurden nach /G6/ mehrfach eine nordwestliche bzw. nördliche Grundwasserfließrichtung festgestellt, was auf Wasserhaltungs-

maßnahmen 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 m³/h Grundwasser fördern. 1987 war das Wasserwerk noch mit einer Entnahmemenge von 800.000 m³/a in Betrieb. Bis 2004 erfolgte eine deutliche Reduzierung der Wasserentnahme auf 65.000 m³/a. Gegenwärtig wird Grundwasser überwiegend nur noch zum Betrieb der Feuerlöschringleitung gefördert.

3 Bisher durchgeführte Untersuchungen

3.1 Übersicht über die durchgeführten Untersuchungen

Die folgende Tabelle enthält eine Übersicht über die im Bereich des Alten Hafens durchgeführten Untersuchungen, welche im Rahmen der Grundlagenermittlung 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 ¹ 05/07	Analytik GWMB – GWMO auf MKW	-	-
G7	Hydrochemischer Pumpversuch an den Messstellen P47, P72 und GWMB	-	-

Quelle	Grundwasser	Boden	Bodenluft
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 BBodsSchV – 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. hölzerne Halle Werft Ost)	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 BTEX, 2 Stk. LCKW
G12 (Löschteich u. Schießstand „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	-

¹ 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 (C₁₀ – C₄₀), 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. 5) 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 bisherigen Untersuchungen annähernd vergleichbar.

In Anlage 4 ist eine Übersicht über die aus den vorangegangenen Untersuchungen vorhandenen Grundwassermessstellen enthalten. 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 Koloniebildende 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 Schürf 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/m³ BTEX an BL 5 bei 1,5 m u GOK (Gefahrenwert der Berliner Liste /U1/ 50 mg/m³) durchgehend unter der Bestimmungsgrenze. LCKW wurden ebenfalls nur mit äußerst geringen Konzentrationen von 0,13 mg/m³ an BL 7 und 0,07 mg/m³ 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/

	P47	P72	GWM B / P78
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 ³ /h; 0,25 m ³ /h	0,34 l/s; 0,45 l/s; 0,57 l/s 1,2 m ³ /h; 1,6 m ³ /h; 2,1 m ³ /h	0,33 l/s; 0,27 l/s 1,2 m ³ /h, 0,97 m ³ /h
Grundwasserentnahme	7,8 m ³ ; 45 m ³ ; Σ 53 m ³	9,8 m ³ ; 13 m ³ ; 16 m ³ ; Σ 39 m ³	bei 0,3 l/s: 284 m ³
Startkonzentrationen C _{Start}	11.260 µg/l Σ Monoaromaten	21.490 µg/l Σ Monoaromaten	23.287 µg/l Σ Monoaromaten
Endkonzentration C _{Ende}	12.923 µg/l Σ Monoaromaten	25.990 µg/l Σ Monoaromaten	14.996 µg/l Σ 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 ⁻⁵ m/s	4,6 x 10 ⁻⁴ m/s	3,6 x 10 ⁻⁵ m/s

Die ursprünglich vorgesehene Grundwasserentnahme von 0,8 l/s (2,9 m³/h) konnte an keiner Messstelle erreicht werden.

Die Wasserstandsganglinie an P72 bei der höchsten Pumpstufe von 2,1 m³/h zeigte bis zum Versuchende einen Rückgang des Wasserspiegels, sodass kein stationärer Zustand erreicht wurde. Eine Förderrate von 2 m³/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 m³/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 Beladepazität 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 Beladepazität 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 Bewertung der bisherigen Untersuchungen hinsichtlich Sanierungsplanung

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

Der Grundwasserleiter im Bereich der 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 und GWM M erbohrt wurden, wurde kein flächig aushaltender stauender Horizont oberhalb des Grundwassergeringleiters des Holstein – Interglazial (etwa 50 m u GOK) nachgewiesen.

Eine hohe BTEX – Belastung wurde an der direct push – Sondierung DP12 von 15 - 20 m u GOK ($\approx 4.000 \mu\text{g/l}$) bzw. Konzentrationen oberhalb des sanierungsbedürftigen Schadenswerts (SSW /U1/) mit $468 \mu\text{g/l}$ bzw. $121 \mu\text{g/l}$ bis 30 m u GOK nachgewiesen. Der belastete Horizont besteht aus Grobsand bzw. Mittel- und Feinsanden, im Grundwasserschwankungsbereich teilweise mit Feinsandlagen.

An GWM F, GWM O und GWM N wurde im obersten Grundwasserhorizont Kohle angetroffen, was für eine starke Rückhaltung der Schadstoffe am Aquifermaterial spricht.

Es ist von einer eher geringen Durchlässigkeit von etwa $3 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ auszugehen, wobei die Pumpversuchsergebnisse (s. Pkt. 3.6) diesbezüglich nicht eindeutig sind.

An der Leitfähigkeitssondierung LF 2 wurde für den gesamten Grundwasserhorizont eine Schluffschicht interpretiert. Anhand der vorhandenen Bohrungen kann jedoch weder deren Vorhandensein bestätigt noch deren horizontale Ausdehnung beschrieben werden. Für die Durchlässigkeit des Grundwasserleiters und die Schadstoffrückhaltung ist das Vorhandensein bindiger Schichten im Grundwasserhorizont von großer Bedeutung.

Im Ergebnis der 2010 /G9/ durchgeführten Stichtagsmessung ist von einem sehr geringen Gefälle $J = 0,015 \%$ und demzufolge von einer sehr geringen Abstandsgeschwindigkeit $v_a = 3,2 \text{ m/a}$ (Mittelsand) bzw. $0,5 \text{ m/a}$ (Schluff) auszugehen, welche auf quasistationäre Grundwasserströmungsverhältnisse hinweist.

Dieses Ergebnis unterscheidet sich allerdings deutlich von der 2005 durchgeführten Stichtagsmessung /G6/, sodass eine Überprüfung zu empfehlen ist.

Bei den bisherigen Boden- und Bodenluftuntersuchungen wurde keine Schadstoffquelle im ungesättigten Bodenhorizont aufgefunden, sodass es sich vermutlich um einen kleinräumigen Eintrag handelt, welcher mit verhältnismäßigen Mitteln nicht aufzufinden ist.

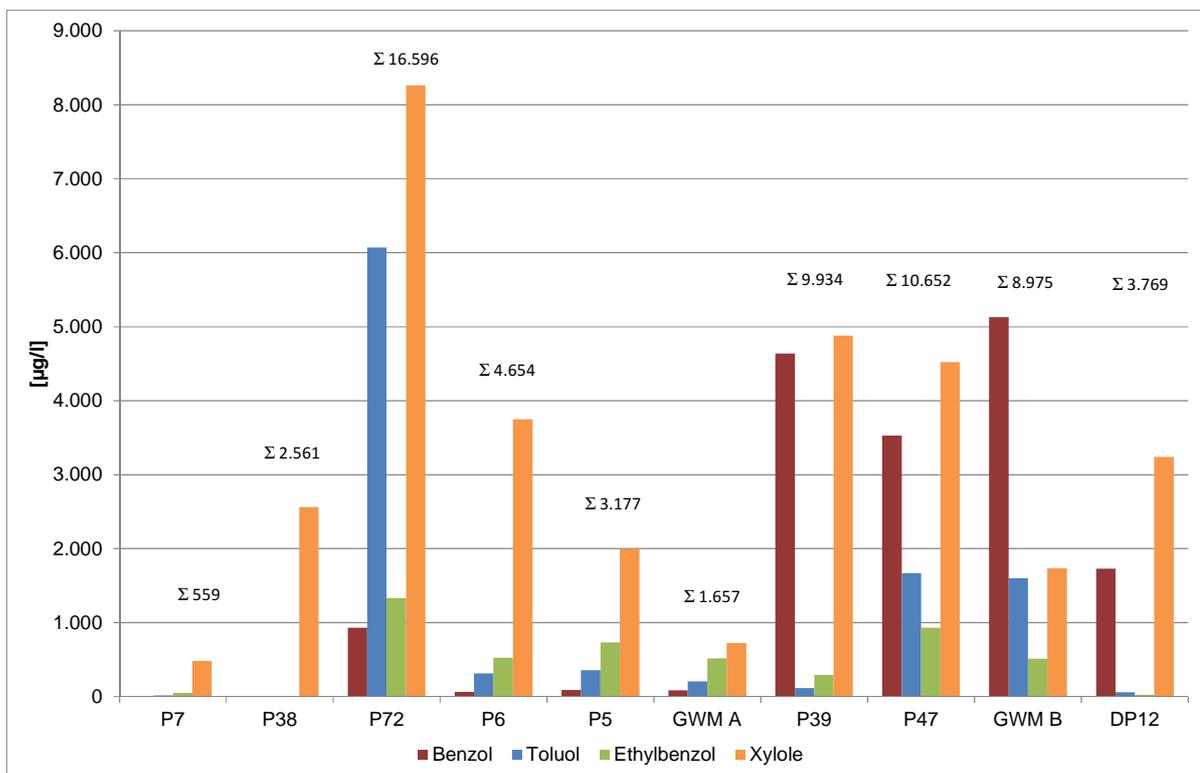
Die vorgesehene Sanierungsmaßnahme umfasst daher allein den grundwassergesättigten Horizont.

Die Bodenbelastung von 73 mg/kg BTEX, welche an der Messstelle GWM H von 17,2 – 18,2 m u GOK in einem Mittelsand (feinkiesig, Geröllschicht, Messstelle unterhalb dieses Horizonts ausgebaut) nachgewiesen wurde zeigt, dass hier ein signifikantes Schadstoffpotenzial im Grundwasserhorizont vorhanden ist (s.u.).

Das Schadenszentrum der BTEX – Grundwasserkontamination mit Konzentrationen von etwa 10.000 µg/l bzw. darüber wurde bei den bisher seit 2003 durchgeführten Untersuchungen durchgehend an den Messstellen P72, P39, P47 und GWM B nachgewiesen. Insgesamt waren die Schadstoffverteilung und das Konzentrationsniveau während dieser Untersuchungen vergleichsweise konstant.

Die folgende Abbildung zeigt die Zusammensetzung der BTEX, welche 2010 /G9/ im Schadenszentrum sowie weiteren hoch mit BTEX belasteten Messstellen und an der direct push – Sondierung DP12 analysiert wurde.

Abbildung 1: Zusammensetzung der BTEX im Schadenszentrum 2010



Die sehr hoch mit BTEX belasteten Messstellen P39, P47, GWM B und die direct push Sondierung DP 12 weisen eine ähnlich Schadstoffzusammensetzung, mit Benzol und den Xylole als Hauptbestandteilen von 30 – 50 % auf. Hiervon unterscheiden sich die etwas westlich von diesen gelegenen P72, P5, P6 und GWM A, an welchen ein wesentlich geringerer Benzol - Anteil sowie an P72 ein deutlich höherer Toluol – Anteil vorliegt.

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

In /G9/ wurde die im Grundwasser gelöste BTEX - Menge mit 204 kg bzw. die gesamte Schadstoffmenge im grundwassergesättigten Horizont mit einem Zuschlag von 100 % mit 408 kg abgeschätzt. Der Abschätzung liegt eine Fläche von 17.000 m² zugrunde, welche bis in eine Tiefe von 8 m mit 10.000 µg/l BTEX kontaminiert ist. Diese angesetzte Fläche überschreitet deutlich die innerhalb der 10.000 µg/l – Isokonze von nur etwa 1.000 m², weshalb im Folgenden eine erneute Mengenabschätzung vorgenommen wird:

Fläche innerhalb der 100 µg/l bzw. 1.000 µg/l Isokonze: 7.000 m² / 5.000 m²

kontaminierter Horizont (aus /G9/ beibehalten): 8 m

kontaminiertes Gesamtvolumen: 56.000 m³ / 40.000 m³

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

kontaminiertes Grundwasservolumen: 8.400 m³ / 6.000 m³

durchschnittliche BTEX – Konzentration (Mittelwerte der innerhalb der 100 µg/l / 1.000 µg/l Isokonze analysierten Konzentrationen): 6.000 µg/l / 7.000 µg/l

im Grundwasser gelöste BTEX – Menge: 50 kg / 42 kg

Die aktuell abgeschätzte, im Grundwasser gelöste BTEX – Menge ist aufgrund der kleineren angesetzten kontaminierten Fläche und der niedrigeren Konzentrationen wesentlich geringer als in /G9/.

Zu dieser gelösten BTEX – Menge kommen jedoch ein am Bodenkorn adsorbierter und vermutlich ein im Grundwasserschwankungsbereich / Kapillarsaum angereicherter Anteil dazu.

Einen Hinweis auf die Bodenbelastung im Grundwasserhorizont gibt die BTEX – Konzentration von 73 mg/kg, welche bei der Errichtung der Messstelle GWM H von 17,2 – 18,2 m u GOK analysiert wurde.

Annahme: hoch mit BTEX belasteter Bodenhorizont (1 m) erstreckt sich über die gesamte Fläche innerhalb der 1.000 µg/l Isokonze (5.000 m²): 620 kg BTEX

Die im gesamten belasteten Grundwasserhorizont 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:

$$C_{ads} = C_W * K_D = (0,000007 \text{ g/g}) * 0,45 = 0,000003 \text{ g/g} = 3 \text{ mg/kg}$$

- mittlere Grundwasserkonzentration $C_W = 7.000 \text{ µg/l}$ 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 5) angenommen

$$K_D = K_{OC} * f_{OC} = 0,45$$

K_{OC} - Verteilungskoeffizient zwischen organischem Kohlenstoff und Wasser s. Tabelle 5

$$K_{OC} = 150$$

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

$f_{OC} = 0,003$ g/g (für ähnliche Böden ermittelt)

Als Bodenmenge, in welcher diese Gleichgewichtskonzentration vorliegt, wurde der Bereich innerhalb der 1.000 µg/l – Isokonze (40.000 m³ / 68.000 t) angesetzt.

am Bodenkorn adsorbierte BTEX – Menge: 204 kg

In Summe ergibt sich eine Gesamtschadstoffmenge von etwa 900 kg BTEX, welche die 2010 /G9/ abgeschätzte überschreitet. Da an dieser Gesamtschadstoffmenge die BTEX – Menge im hoch mit BTEX belasteten Bodenhorizont von 17,2 – 18,2 m u GOK an GWM H einen wesentlichen Anteil ausmacht und hierzu nur eine Analyse aus 2004 /G4/ vorliegt, sollten weitere Untersuchungen der BTEX – Konzentrationen an Bodenmaterial aus dem grundwassergesättigten Horizont durchgeführt werden.

Die bisherigen Untersuchungen /G6/, /G9/ 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 enthält eine Zusammenfassung der chem. phys. Eigenschaften der Hauptschadstoffe.

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 Xylolen 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 von dem geringsten rebound – Effekt auszugehen.

Tabelle 5: Chemisch – physikalische Eigenschaften der Hauptschadstoffe

Substanz	Wasserlöslichkeit [mg/l]	Siedepunkt [°C]	Henry – Koeffizient [-]	Adsorbierbarkeit an C _{org} (K _{oc})	Wassergefährdungsklasse
Benzol	1.780	80	0,23	ca. 80	3
Toluol	550	111	0,26	ca. 100	2
Xylol	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 verbliebene Restschadstoffmenge mittels technisch unterstütztem bzw. natürlichem mikrobiellen Abbau 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 6: Zusammenfassende Charakterisierung Sanierungsbereich

Untergrund- aufbau	Bodenbeschaffenheit	Grobsand bzw. Mittelsand und Feinsand , teilweise Feinsandschicht im Grundwasserschwankungsbereich, an GWMN, O Kohle
	hydraulische Parameter (Pumpversuche /G7/)	Durchlässigkeit, k _f – Wert: 3 x 10 ⁻⁵ m/s Reichweiten (gemessene): < 17 m Abstandsgeschwindigkeit: 67 m/a /G6/, 3,2 bzw. 0,5 m/a /G9/
Ausdehnung	Horizont	Grundwasseranschnitt (15 m u GOK) bis etwa 23 m u GOK an DP12
	Mächtigkeit	etwa 8 m an DP12
	Fläche	ca. 7.000 m ² , entspricht 100 µg/l Isokonze in Anlage 6.1
	Bodenmenge	56.000 m ³ , 95.200 t
	Grundwasservolumen	bei 15 % Porosität: 8.400 m ³

Belastung	Konzentrationen	Ø 6.000 µg/l 559 µg/l (P 7) – max. 16.596 µg/l (P72) Schadenszentrum
	BTEX-Menge	50 kg BTEX gelöst, 800 kg am Bodenkorn adsorbiert
	Einzelsubstanzen	30 - 50 % Benzol, 40 – 50 % Xylole im Schadenszentrum
Besonderheiten		mikrobieller Schadstoffabbau auf Stufe der Methanogenese nachgewiesen bei Pumpversuchen kein Rückgang der BTEX - Konzentrationen

5 Defizitanalyse und Untersuchungsprogramm

Der Untergrundaufbau im Grundwasserbelastungsbereich wurde bisher 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 sind 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 wird, 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, Redoxpotential 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 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 durchhörtern 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 wird 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 Abbauprodukte im Untersuchungsgebiet ist hierzu eine Konservierung der Proben nach DIN EN ISO 5667-3 unbedingt erforderlich.

Neben dem Kohlenwasserstoffindex ($C_{10} - C_{40}$) sollten bei den MKW auch die kurzkettigen Substanzen $< C_{10}$ 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 Abbauprodukte 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 7: 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 €
	Summe	38.000 €

6 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

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