

HPC AG
Wilhelm-Herbst-Straße 5
28359 Bremen
Telefon: 0421 / 202430-13
Telefax: 0421 / 217010

BERICHT

 Projekt-Nr.

2194913

Ausfertigungs-Nr.

digital

Datum

17.03.2023

Tanklager Bremen-Farge – Verladebahnhof I Detailuntersuchung Phase IIb-3

 Auftraggeber

GESA
Gesellschaft zur Entwicklung und
Sanierung von Altstandorten mbH
Schöneberger Ufer 89-91
10785 Berlin

Inhaltsverzeichnis

Text	Seite
1. Anlass und Aufgabenstellung	5
2. Kenntnisstand vor Untersuchungsbeginn	7
2.1 Vorhandene Unterlagen und Berichte	7
2.2 Liegenschaftsbeschreibung	9
2.3 Standortsituation	11
2.3.1 Klima	11
2.3.2 Geologie	11
2.3.3 Hydrogeologie	11
2.3.4 Umgebungsnutzung	11
3. Grundlagen der Ergebnisbeurteilung	12
3.1 Eigenschaften relevanter Schadstoffe	12
3.2 Darstellung und Begründung der Beurteilungskriterien und -maßstäbe	14
3.2.1 Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV)	15
3.2.2 LAWA-Empfehlungen für die Erkundung und Bewertung von Grundwasserschäden	17
3.2.3 Geringfügigkeitsschwellen der LAWA	18
4. Methodik durchgeführter Untersuchungen	19
4.1 Feldarbeiten	19
4.1.1 Geländebegehungen, Vor-Ort-Messungen	19
4.1.2 Errichten von Aufschlüssen	19
4.1.2.1 Linerbohrungen	20
4.1.2.2 Rammkernsondierungen zur Bodenluftentnahme	20
4.1.3 Generelle Vorgehensweise bei den Probenahmen	20
4.1.3.1 Bodenprobenahme	20
4.1.3.2 Grundwasserprobenahme	21
4.1.3.3 Bodenluftentnahme	21
4.1.4 Vermessungsarbeiten	21
4.1.5 Geophysikalische Untersuchungen	22

4.2	Begleitender Arbeits- und Emissionsschutz	22
4.3	Sofortmaßnahmen	22
4.4	Chemische Analytik	22
4.5	Untersuchungen zur Bestimmung hydraulischer Parameter	23
4.6	Berechnungen, Modelle	23
4.7	Bodenmechanische Untersuchungen	23
5.	Untersuchungsergebnisse und Beurteilungen	24
5.1	Liegenschaftsbezogene Untersuchungen	24
5.2	Untersuchungen und Ergebnisse der KF Verladebahnhof 1	24
5.2.1	Kontaminationshypothese zur KF	24
5.2.2	Untersuchungsstrategie und Begründung der Vorgehensweise	24
5.2.3	Recherchen und Datenaufbereitungen	25
5.2.4	Boden- und Untergrundaufbau der KF	25
5.2.5	Hydrogeologische und hydrologische Besonderheiten der KF	29
5.2.6	Ergebnisse chemischer Analysen der KF	29
5.2.6.1	Untersuchungsergebnisse Bodenluft	30
5.2.6.2	Untersuchungsergebnisse Boden	31
5.2.6.3	Grundwasser	34
5.2.7	Auswertungen und Interpretationen	37
5.2.7.1	Boden	37
5.2.7.2	Grundwasser	39
5.2.7.3	Massenschätzung	42
6.	Empfehlungen für das weitere Vorgehen	42
6.1	Kontaminierte Flächen	42
6.2	Liegenschaft	44
7.	Zusammenfassung	44
8.	Literatur-/ Quellenverzeichnis	45

Anlagen

- 1 **Übersichtslageplan**
- 2 **Grundwassergleichenplan**
- 3 **Lagepläne mit Tabellen zur Schadstoffkonzentration in Boden und Grundwasser**
- 4 **Geländeschnitte zur Schadstoffausbreitung im Boden (Bezugspunkt Geländeoberkante)**
 - 4.1 Schnitt A-A‘
 - 4.2 Schnitt B-B‘
 - 4.3 Schnitt C-C‘
- 5 **Lagepläne zur Schadstoffausbreitung im Boden**
 - 5.1 Schadstoffgruppe MKW
 - 5.2 Schadstoffgruppe BTEX
- 6 **Lagepläne zur Schadstoffausbreitung im Grundwasser**
 - 6.1 Schadstoffgruppe MKW
 - 6.2 Schadstoffgruppe BTEX

Weitere Anlagen nur digital:

- 7 **Profilschnitte**
 - 7.1 Ergebniszusammenstellung der Linerbohrungen
 - 7.2 Schichtenverzeichnisse der Linerbohrungen
 - 7.3 Bodenprofile aus Kleinrammbohrungen
- 8 **Probenahmeprotokolle**
 - 8.1 Bodenluft
 - 8.2 Boden
 - 8.3 Grundwasser
- 9 **Prüfberichte des Labors**
 - 9.1 Bodenluft
 - 9.2 Boden
 - 9.3 Grundwasser
- 10 **Kampfmitteltechnische Freigabe**
- 11 **Vermessungsprotokolle**
- 12 **Arbeits- und Sicherheitsplan**
- 13 **Untersuchungskonzept zu Phase IIb-3**

1. Anlass und Aufgabenstellung

Projektnummer HPC: 2194913

Projektort: Tanklager Bremen-Farge Verladebahnhof I

Auftrag HPC: Durchführung einer Detailerkundung Phase IIb-3, Entnahme von Bodenproben, Auswertung der Ergebnisse aus Bodenluft-, Boden- und Grundwasseruntersuchungen

Angebot 1194913 vom: 04.11.2019

Auftrag vom: 18.11.2019

Auftraggeber: GESA
Gesellschaft zur Entwicklung und Sanierung von Altstandorten mbH
Schöneberger Ufer 89-91
10785 Berlin

Untersuchungszeitraum: Juli-November 2020

Es folgt eine Aufstellung der im Auftrag der GESA vergebenen, weiteren Leistungen im Rahmen dieses Projektes:

- KMB Kampfmittelbergung GmbH, Bremen (Kampfmittelfreigabe), Zeitraum: 22.07.2020 und 20.10.2020,
- Grisar Bohrtechnik, Kronshagen (DP-Sondierungen, Grundwasserprobenahme), Zeitraum: 23.07.2020-25.08.2020,
- Thade Gerdes GmbH, Norden (Liner-Bohrungen), Zeitraum: 14.09.2020-05.11.2020,
- Baugrunderkundung Nord, Bremen (Kleinbohrungen), Zeitraum: 31.08.2020,
- Nußbeck Consulting GmbH, Hamburg (Bodenluft-Entnahme), Zeitraum: 31.08.2020,
- Dr. Döring GmbH, Bremen (Analytik), parallel zur Probenahme,
- Nehlsen GmbH & Co.KG, Bremen (Entsorgung), im Anschluss an die Maßnahme.

Die GESA mbH wurde durch die BImA/ ZEPM 4 beauftragt, die Projektsteuerung für die Durchführung einer Detailuntersuchung Boden (Phase IIb-3) im Bereich Verladebahnhof 1 der Liegenschaft Tanklager Bremen-Farge wahrzunehmen.

Nach Erkundungsmaßnahmen der Phase II in den Jahren 2011-2014 und der Feststellung umfangreicher Boden- und Gewässerbelastungen, wird seit 2016 eine Grundwassersanierung am Verladebahnhof 1 betrieben. Dabei wird aus dem Kontaminationszentrum über 10 Sanierungsbrunnen Grundwasser gefördert, gereinigt und am Standort über eine Sickerrigole dem Grundwasser rückgeführt.

Die Sanierungsmaßnahmen erbrachten noch keinen wesentlichen Rückgang der Schadstoffgehalte im Bereich des Kontaminationszentrums. Daher sollte eine Prüfung möglicher Alternativen zur derzeitigen Sanierungsmaßnahme durchgeführt werden. Voraussetzung war zunächst eine Erweiterung der bisherigen Datengrundlage bezüglich der Schadstoffgehalte in Boden und Grundwasser auf der Liegenschaft.

Im Zuge der mit diesem Bericht dargestellten Detailuntersuchung der Phase IIb-3 war insbesondere die wasserungesättigte sowie die wassergesättigte Bodenzone und das Grundwasser im Verladebahnhof 1 im Hinblick auf eine genauere laterale und vertikale Eingrenzung der vorhandenen Kontaminationsbereiche und Quellen zu erkunden. Die bisherigen Erkenntnisse sollten durch zusätzliche Boden-, Bodenluft- und Grundwasseruntersuchungen am Standort ergänzt werden. Der Abstrom außerhalb der Liegenschaftsgrenze des Tanklagers Bremen-Farge wird im Rahmen der vorliegenden Detailuntersuchung nicht berücksichtigt.

Die erweiterten Informationen zum Bodenaufbau und zur Schadstoffverteilung aus Phase IIb-3 sollten auch dazu dienen, eine Abschätzung über die zu erwartenden Schadstoffmengen im ungesättigten und gesättigten Boden zu ermöglichen. Dabei war insbesondere der Schwankungsbereich des Grundwassers und die vorhandenen Leichtphasen sowie die Verfügbarkeit der hier relevanten Schadstoffgruppen (MKW, BTEX, PAK und MTBE) zu berücksichtigen.

Bedingt durch den geplanten Rückbau der baulichen Einrichtungen wird zukünftig eventuell eine gezieltere Behandlung der Schadensherde im gesättigten und ungesättigten Boden möglich sein.

Zusätzlich sollte daher auf der Basis der Erkundungsergebnisse folgendes dargestellt/diskutiert werden:

- Erfordernis weitergehender Untersuchungen/Erkundungen,
- Künftige Auswirkungen der Kontaminationen auf die Nutzung und die Umwelt,
- Möglichkeit von weiteren unterstützenden Maßnahmen zur Sicherung oder Beschleunigung der Sanierung,
- Alternativen zur derzeitigen Sicherung/Sanierung.

Über weitere Maßnahmenschritte, wie beispielsweise eine Sanierungsuntersuchung/ -planung wird nach Vorlage der Ergebnisse entschieden.

2. Kenntnisstand vor Untersuchungsbeginn

2.1 Vorhandene Unterlagen und Berichte

Im Bereich des Verladebahnhof 1 des Tanklager Farge in Bremen wurden bisher umfangreiche Erkundungsmaßnahmen durchgeführt.

Zu der Liegenschaft Tanklager Farge wurden im Hinblick auf die Ausführung der Phase IIb im Bereich des Verladebahnhofes I folgende Berichte erstellt:

- [1] Bericht der HPC AG vom 30.07.2010: *Tanklager Bremen-Farge LKNr. 220 038, Erfassung von kontaminationsverdächtigen Flächen KVF im Rahmen der Phase I*
- [2] Bericht der HPC AG vom 20.10.2011: *Orientierende Erkundung von Kontaminationsverdachtsflächen (Phase IIa) im Bereich Tanklager Bremen-Farge.*
- [3] Zwischenbericht HPC AG vom 18.09.2012: *Tanklager Farge; Untersuchung von KVF Phase IIb; Ergebnisse bisheriger DP-Sondierungen; Einrichten von Grundwassermessstellen*
- [4] Bericht der HPC AG vom 08.03.2013: *Tanklager Bremen Farge LKNr. 220 038, Erkundung von Kontaminationsverdachtsflächen (Phase IIb) im Bereich Tanklager Bremen Farge*
- [5] Bericht der HPC AG vom 27.02.2014: *Tanklager Bremen Farge LKNr. 220 038, Detailuntersuchungen von Kontaminationsverdachtsflächen (Phase IIb-2) im Bereich Tanklager Bremen Farge*
- [6] Bericht der HPC AG vom 22.05.2013: *Tanklager Bremen Farge LKNr. 220 038, Altlastenprogramm der Bundeswehr - Nachrecherche zur Nutzungshistorie*
- [7] Bericht der HPC AG vom 20.12.2013: *Tanklager Bremen Farge LKNr. 220 038, Orientierende Untersuchung von kontaminationsverdächtigen Flächen mit mittlerem Risiko (Phase IIa) im Bereich Tanklager Bremen Farge*
- [8] Bericht der HPC AG vom 20.07.2015: *Tanklager Bremen Farge LKNr. 220 038, Sanierungsuntersuchungen anhand von Pumpversuchen im Bereich Verladebahnhof I*
- [9] Bericht der HPC AG vom 28.08.2018: *Tanklager Bremen Farge LKNr. 220 038, 1. Sachstandsbericht zur Grundwassersanierung und Abstromsicherung im Bereich Verladebahnhof I (Zeitraum: November 2016 – Dezember 2017) sowie Monitoringuntersuchungen im Bereich Verladebahnhof I (Zeitraum : Januar 2017 – Dezember 2017)*

- [10] Bericht der HPC AG vom 15.08.2019: *Tanklager Bremen Farge LKNr. 220 038, 2. Sachstandsbericht zur Grundwassersanierung und Abstromsicherung im Bereich Verladebahnhof I sowie Monitoringuntersuchungen im Bereich Verladebahnhof I (Zeitraum : Januar 2018 – Dezember 2018)*
- [11] Bericht der HPC AG vom 09.03.2020: *Tanklager Bremen Farge LKNr. 220 038, 3. Sachstandsbericht zur Grundwassersanierung und Abstromsicherung im Bereich Verladebahnhof 1 sowie Monitoringuntersuchungen im Bereich Verladebahnhof I (Zeitraum : Januar 2019 – Dezember 2019)*
- [12] Bericht der HPC AG vom 21.04.2021: *Tanklager Bremen-Farge; 4. Sachstandsbericht zur Grundwassersanierung und Abstromsicherung im Bereich Verladebahnhof 1 (Januar 2020 – Dezember 2020) sowie Monitoringuntersuchungen im Bereich Verladebahnhof 1*
- [13] Bericht der HPC AG vom 11.07.2022: *Tanklager Bremen-Farge; 5. Sachstandsbericht zur Grundwassersanierung und Abstromsicherung im Bereich Verladebahnhof 1 (Januar 2021 – Dezember 2021) sowie Monitoringuntersuchungen im Bereich Verladebahnhof 1*

Gemäß [1] bis [7] sind in den Jahren 2011 bis 2014, vor dem Beginn der aktuell seit dem Jahr 2016 laufenden Grundwassersanierung im Bereich Verladebahnhof I, bereits umfangreiche Erkundungsmaßnahmen durchgeführt worden. Hierbei handelte es sich um Bodenuntersuchungen bis in 5,0 m Tiefe mittels Rammkernsondierungen sowie Erkundungen des wassergesättigten Bodens und des Grundwassers durch Direct-Push Sondierungen und Grundwassermessstellen.

Anhand der Ergebnisse aus den bisher durchgeführten Erkundungen wurden Kontaminationen von Boden und Grundwasser durch BTEX sowie untergeordnet durch MKW, PAK und MTBE lokalisiert und verschiedene Belastungsschwerpunkte ausgewiesen.

Sowohl sensorisch als auch analytisch waren bei den vorherigen Bodenuntersuchungen Schadstoffbelastungen ab ca. 3,0-4,0 m u. GOK feststellbar. Vorangegangene Recherchen (Phase I und Nachrecherche [1][6]) haben ergeben, dass das ursprünglich genutzte Rohrsystem (vor 1970) Leckagen aufwies, u.a. an der Pumpstation 1 und im Bereich der Trasse Süd (KVF 29). Zum Teil waren diese Beschädigungen korrosionsbedingt, Kriegsschäden (1945) können jedoch auch zu Schadstoffeinträgen beigetragen haben. Somit ist ein potenzieller Schadstoffeintrag bereits im Laufe der 40er Jahre möglich. Vor der Erneuerung des Rohrleitungssystems wurden Flugbenzine und reines Benzol umgeschlagen. Die Behälterblöcke im Tanklager konnten jedoch für unterschiedliche Treibstoffe genutzt werden, Gasöl wurde potenziell im gesamten Tanklager gelagert und der Lagerort für Benzin in den 1970er und 80er Jahren ist ebenfalls nicht hinreichend bekannt. Somit sind Schadstoffeinträge diesbezüglich auch an Verladebahnhof 1 nicht auszuschließen.

Ein weiterer potenzieller Quellbereich liegt direkt am Verladebahnhof (KVF 4). Es war üblich in den Kesselwagen verbliebene Restmengen abzulassen. Hier war eine direkte Versickerung von Kraftstoffen über die beschädigte Betonwanne bis zur Sanierung derselbigen 1966-68 möglich. Während der Nutzung durch die US Army fand die Entleerung auch außerhalb des Gleiswannenbereiches statt. Somit sind mögliche Eintragspunkte, und damit Quellbereiche, in unmittelbarer Umgebung der Gleiswanne, aber auch an anderen Stellen entlang der Gleise zu erwarten.

Ein weiterer Eintragsort ist am Benzinabscheider (KVF 119) zu vermuten, welcher zur Entwässerung der Gleiswanne am Verladebahnhof genutzt wurde.

Die umgeschlagenen bzw. gelagerten Produkte umfassen gemäß den vorliegenden Unterlagen Gasöl, F-34 und F-40 sowie Benzin (Zusammensetzung der US Army-Produkte nicht bekannt). Seit den 1970er Jahren soll der Verladebahnhof 1 nicht mehr für den Kraftstoffumschlag genutzt worden sein. In den frühen 1990er Jahren (bis 1995) wurde er zumindest temporär genutzt, da sich der Verladebahnhof 2 im Umbau befand [6].

Die Voruntersuchungen am Boden waren auf die ersten 5 m u. GOK begrenzt.

Bezüglich des Grundwassers zeigen sich Belastungsschwerpunkte im Umfeld der Pumpstationen 1 und 2 sowie im Gleisbereich und am alten Abscheider. Bei früheren Direct-Push-Sondierungen konnten ab einer Tiefe von ca. 23 m u. GOK abnehmende BTEX-Konzentrationen festgestellt werden.

Aus den Ergebnissen der bis zum Jahr 2016 durchgeführten Erkundungsmaßnahmen war unter Berücksichtigung der ermittelten BTEX-Gehalte im Schadenszentrum sowie ermittelter Phasenkörper im Bereich des Verladebahnhofs 1 und 2 des Tanklager Bremen-Farge das Erfordernis für Sanierungsmaßnahmen gegeben, wobei durch entsprechende Maßnahmen insbesondere der Schadstoffabstrom von der Liegenschaft zu minimieren war. Entsprechende Untersuchungen zur Sanierungsvorbereitung wurden in [8] dargestellt.

Die im Anschluss an die Erkundungskampagnen konzipierte Sanierungsmaßnahme am Verladebahnhof 1 wird seit dem Jahr 2016 betrieben und wurde bisher in fünf Berichten [9]-[13] dokumentiert.

2.2 Liegenschaftsbeschreibung

Das Tanklager Bremen-Farge liegt im Nordwesten der Hansestadt Bremen. Die Landesgrenze zu Niedersachsen (Landkreis Osterholz) verläuft durch den nordöstlichen Teil der Liegenschaft. Das Gelände ist durch eine vollständige Umzäunung und Bewachung durch die Bundeswehr gesichert. Bis zur technischen Stilllegung des Standortes ist das gesamte Areal als explosionsgefährdeter Bereich ausgewiesen. Eine Stilllegung und der

Rückbau des Gebäudebestandes ist in den kommenden Jahren geplant. Nach derzeitigem Planungsstand ist eine Renaturierung des Geländes vorgesehen.

Aufgrund der nachgewiesenen Altlastenbelastungen innerhalb und im Abstrom der Liegenschaft sind damit verbundene Maßnahmen im öffentlichen Fokus.

Die unterirdische Lagerkapazität des Tanklagers Bremen-Farge umfasst insgesamt ca. 312.000 m³ in 78 Tanks, welche in 16 Behältergruppen zusammengefasst sind. Auf dem Gelände wurden Kraftstoffe bzw. Kraftstoffkomponenten verladen, gelagert und aus Einzelkomponenten verschiedene Kraftstoffe hergestellt. Es gibt zwei Verladebahnhöfe und eine TKW-Befüllung. An der Weser befand sich bis 2020 der Hafenbereich des Tanklagers, welcher für den Umschlag von Kraftstoffen auf Schiffe genutzt wurde. Die Gesamtfläche umfasst 330 ha, wovon 2/3 auf bremischem und 1/3 auf niedersächsischem Gebiet liegen.

Bekannte Kontaminationsflächen umfassen die beiden Verladebahnhöfe sowie eine Altablagerungsfläche im nordöstlichen Teil der Liegenschaft (Gebiet Niedersachsen). Es bestehen weitere Kontaminationsverdachtsflächen, welche jedoch zum jetzigen Zeitpunkt als nicht grundwasserrelevant eingestuft werden.

Tabelle 1: Historische Entwicklung des Tanklagers:

Ereignis	Zeitraum
Errichtung	1935-1943
Umschlag und Produkteinlagerung	ab 1941
Luftangriff RAF	27.03.1945
Pipelineanschluss nach Oldenburg	1970-2013
Betrieb durch Bundeswehr	1960-2016
Übergabe Eigentum an BImA	Nach Stilllegung (geplant)

Die Liegenschaft ist aufgrund der Bombardierung während des zweiten Weltkriegs als Kampfverdachtsfläche ausgewiesen. Bohr- und Sondierleistungen sind somit kampfmitteltechnisch zu begleiten. Die Zufahrt zum Gelände erfolgt über die Betonstraße, 28777 Bremen-Farge.

2.3 Standortsituation

2.3.1 Klima

Die Liegenschaft befindet sich innerhalb der gemäßigten Zone. Der mittlere Jahresniederschlag beträgt 732 mm, die Durchschnittstemperatur 8,8 °C. Der Wind kommt vorwiegend aus nordwestlicher Richtung.

2.3.2 Geologie

Oberflächennah sind vorwiegend Lockersedimente aus dem Pleistozän vorhanden. Unterhalb von künstlichen Auffüllungen liegt Mittel- bis Feinsand vor. Es handelt sich um den sogenannten Ritterhuder Sand (Lauenburger Schichten), Beckensedimente aus der Elster-Kaltzeit. Es sind geringmächtige schluffig-tonig ausgeprägte Lagen sowie mäßig zersetzte Torfe eingeschaltet. In ca. 60-90 m u. GOK ist die Basis des Schichtkomplexes zu erwarten.

2.3.3 Hydrogeologie

Das Grundwasser steht bei ca. 3 m NHN an. Je nach Höhenlage der Geländeoberfläche beträgt der Flurabstand im Tanklager Farge 5-15 m, am Verladebahnhof 1 liegt die Grundwasseroberfläche ca. 5 m u. GOK. Die Fließrichtung am Verladebahnhof 1 verläuft südlich zum Vorfluter Unterweser. Die Unterweser steht mit dem Hauptgrundwasserleiter in hydraulischer Verbindung.

Bedingt durch die Sanierungsmaßnahme an den Verladebahnhöfen 1 und 2, welche eine Grundwasserrückgewinnung und -reinigung beinhaltet, wird die natürliche Fließrichtung im oberen Grundwasserabschnitt kleinräumig verändert. Die durch die Förderung erzielten Absenkrichter dienen der Verminderung des Abstroms von verunreinigtem Grundwasser aus der Liegenschaft.

Zwecks Überwachung der Sanierungsmaßnahme sind innerhalb sowie im Abstrom der Liegenschaft zahlreiche Grundwassermessstellen eingerichtet worden. Die Positionen und Messdaten sind den Berichten [9]-[13] sowie dem Messstellenkataster des Geologischen Dienstes Bremen zu entnehmen.

2.3.4 Umgebungsnutzung

Das Gelände des Tanklagers Bremen-Farge befindet sich innerhalb der Trinkwasserschutzzone III des südöstlich gelegenen Wasserwerks Blumenthal. Der nördliche Teil des Tanklagers liegt in der Zone IIIb, der südliche Teil in der Zone IIIa. Das Untersuchungsgebiet des Verladebahnhof 1 beginnt ca. 300 m westlich der Zone IIIb. Der auf dem Gebiet der Stadt

Bremen befindliche Teil der Liegenschaft Tanklager Farge ist seit 2015 als Naturschutzgebiet ausgewiesen.

Im Westen und Süden des Tanklagers schließen Wohngebiete an.

3. Grundlagen der Ergebnisbeurteilung

3.1 Eigenschaften relevanter Schadstoffe

Tabelle 2 zeigt eine Zusammenfassung der umweltrelevanten Eigenschaften der am Standort vorhandenen Schadstoff(-gruppen). Insbesondere wird auf die Verteilung und Persistenz im Untergrund eingegangen.

Tabelle 2: Eigenschaften der am Standort relevanten Schadstoffe

Schadstoff	Einstufung der Mobilität
Mineralölkohlenwasserstoffe (MKW)	<p>geringe Mobilität: langkettige Kohlenwasserstoffe (C 20 bis C 40), Schmieröl, Heizöl</p> <p>mittlere Mobilität: Diesel, Heizöl, Trafoöl</p> <p>hohe Mobilität: kurzkettige Kohlenwasserstoffe (bis C 20), Ottokraftstoffe, Kerosin</p> <p>Kohlenwasserstoffe sind untereinander mischbar, daher ergibt sich häufig ein Mobilitätskontinuum.</p>
Wirkung auf den Menschen	Verhalten im Untergrund
<p>aromatische Verbindungen sind als genotoxisch und karzinogen zu bewerten</p> <p>mögliche Anreicherung bestimmter Verbindungen, Leberschäden</p> <p>inhalativ: chronische Lungenfunktionsveränderung</p>	<p>Kohlenwasserstoffe sind im Wesentlichen hydrophob, jedoch in geringem Umfang in Wasser löslich. Dabei ist für den Transport im Untergrund insbesondere ihre geringe Dichte relevant. Aufgrund der Dichte bildet sich häufig eine separate, aufschwimmende Ölphase aus.</p> <p>Die Ölphase kann als nicht fließfähige Restsättigung oder als freies Öl vorliegen. Bei aufschwimmender Leichtphase auf dem Kapillarsaum des Grundwassers, wechselt das Verhältnis zwischen Restsättigung und fließfähigem Öl. Öl besitzt in der ungesättigten Zone ein geringeres Rückhaltepotenzial als in der gesättigten Zone.</p> <p>Für Treibstoffe beträgt die Restsättigungskonzentration in der ungesättigten Bodenzone ca. 4.500 mg/kg, in der gesättigten Zone etwa doppelt so viel.</p> <p>Wassergefährdende Eigenschaften in Abhängigkeit vom Produkt und den möglicherweise zugesetzten Additiven. Diesel und Heizöl sind als wassergefährdend, Ottokraftstoffe als stark wassergefährdend einzustufen.</p>
Abbaubarkeit:	
<p>Die Abbaubarkeit ist abhängig von der Zusammensetzung. Alkane und Alkene sind aerob gut bis mäßig abbaubar. Die Länge der Schadstofffahnen im Grundwasser bei Diesel- und Heizölschäden ist in der Regel < 100 m. Bei einer zu hohen Konzentration von kurzkettigen Aliphaten werden die abbauenden Mikroorganismen geschädigt und der Abbau verlangsamt sich bis zur Stagnation.</p>	

Schadstoff	Einstufung der Mobilität
Benzol, Toluol, Xylol, Ethylbenzol (BTEX)	geringe Viskosität, aber hoher Dampfdruck hohe Mobilität (in Abhängigkeit des Einzelstoffes) leicht flüchtig
Wirkung auf den Menschen	Verhalten im Untergrund
Benzol ist krebserregend Toluol, Xylol und Ethylbenzol sind als gesundheitsschädlich zu bewerten inhalativ: chronische Lungenfunktionsveränderung	BTEX dringen relativ schnell in den Untergrund ein. Die Löslichkeit dieser Stoffgruppe, insbesondere von Benzol, bedingt Schadstofffahnen von mehreren 100 m im Grundwasser. Wassergefährdend.
Abbaubarkeit:	
Benzol ist als persistent zu bewerten. Die anderen Einzelstoffe sind mikrobiologisch abbaubar.	
Schadstoff	Einstufung der Mobilität
Methyl-tert-butylether (MTBE) und Ethyl-tert-butylether (ETBE)	MTBE hoch ETBE leichter flüchtig als MTBE, geringere Mobilität
Wirkung auf den Menschen	Verhalten im Untergrund
MTBE ist als gesundheitsschädlich (Entzündungserscheinungen) zu bewerten potenziell kanzerogen	MTBE ist gut wasserlöslich und dringt daher unter Ausbildung von mehreren 100 m langen Schadstofffahnen auch in den tieferen Grundwasserleiter ein. ETBE adsorbiert an der Bodenmatrix. Somit ist für diesen Stoff ein Eintrag in das Grundwasser geringer. Schädlich für Wasserorganismen, Wassergefährdungsklasse 1
Abbaubarkeit:	
MTBE ist als persistent zu bewerten. Mikrobiologisch ist MTBE nur schwer abbaubar.	
Schadstoff	Einstufung der Mobilität
Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe [PAK]	mittlere Mobilität: Naphthalin (2er-Ring), Acenaphthen, Acenaphthylen, Anthracen, Fluoren, Phenanthren (3-er Ring), geringe Mobilität: sonstige PAK (4-er und 5-er Ring)
Wirkung auf den Menschen	Verhalten im Untergrund
Toxisch Krebserzeugende PAK sind Naphthalin, Benzo(a)anthracen, Chrysen, Benzo(b)fluoranthren, Benzo(k)fluoranthren, Benzo(a)pyren, Dibenzo-ah-anthracen; möglicherweise krebserzeugend ist Indeon-1,2,3-cd-pyren;	Naphthalin nimmt unter den PAK eine Sonderstellung ein, da es wesentlich wasserlöslicher als andere PAK ist. Naphthalin ist jedoch wesentlich geringer wasserlöslich als BTEX und die Wasserlöslichkeit entspricht etwa der von Heizöl. PAK weisen lipophile bzw. hydrophobe Eigenschaften auf. Sie adsorbieren leicht an Bodenpartikeln (vorrangig an Tonmineralen und Huminstoffen). Die Wasserlöslichkeit und Flüchtigkeit ist gering. Die Mobilität nimmt mit steigender Ringzahl ab. PAK können in das Grundwasser

für Benzo-ghi-perylen fehlen noch Daten zur Kanzerogenität	gelangen, wenn sie (adsorbiert an Kolloiden) mit dem Sickerwasser verfrachtet werden oder wenn Tenside oder Lösungsvermittler (z.B. BTEX) im Boden vorliegen. Die Grundwassergefährdung ist i.d.R. gering. Aufgrund der weitgehenden Immobilität im Untergrund, der geringen Wasserlöslichkeit sowie durch Sorption und Abbau sind bei PAK-Schadensfällen in der Regel kurze bis stationäre Kontaminationsfahnen im Grundwasser ausgebildet.
Abbaubarkeit:	
Naphthalin ist unter aeroben Bedingungen mäßig abbaubar. 3er- und 4er-Ringe sind nur sehr eingeschränkt abbaubar. Die Abbaubarkeit der höher kondensierten Ringe kann in der Regel vernachlässigt werden. Der PAK-Abbau erfolgt über eine Transformation zu Phenolen bzw. Brenzkatechin, dann eine Ringöffnung und dann eine rasche Mineralisierung.	

3.2 Darstellung und Begründung der Beurteilungskriterien und -maßstäbe

Flächennutzung

Bei der von der Untersuchung betroffenen Kontaminationsfläche (KF) „Verladebahnhof 1“ handelt es sich um einen Teilbereich des Tanklagers Bremen-Farge. Die Fläche wird derzeit nicht mehr genutzt. Teile der KF sind vom vorhandenen Gebäudebestand (über- und unterirdisch), der umlaufenden Zufahrtsstraßen sowie dem mit einer Auffangwanne versehenen Gleisbereich überbaut. Angrenzend an die Bebauung sind Rasenflächen und kleinere Waldabschnitte vorhanden. Der Zutritt zum Gelände wird von dem Wachpersonal gesteuert. Die Liegenschaft ist der Öffentlichkeit nicht zugänglich. Im Rahmen der Überwachung und Instandhaltung finden nur vereinzelte Eingriffe in den Untergrund statt (z.B. Arbeiten an Leitungen).

Bodenspezifisches Rückhaltevermögen

Für die angetroffenen vorwiegend fein- bis mittelsandigen Böden ist das bodenspezifische Rückhaltevermögen als hoch anzunehmen.

Beeinflussung durch Fremdverursacher und Umgebungsnutzung

Auswirkungen von außen auf die Liegenschaft, z.B. Schadstoffeinträge durch Fremdverursacher oder die Umgebungsnutzung, sind derzeit nicht bekannt.

Wirkungspfade

Nutzungsbedingt ist auf der Liegenschaft der Wirkungspfad Boden-Grundwasser zu betrachten.

Der Wirkungspfad Boden-Mensch ist bei der derzeitigen Nutzung der Liegenschaft nur eingeschränkt relevant. Gegenüberstellungen der Analyseergebnisse mit der BBodSchV und LAWA erfolgen vorwiegend im Sinne eines grundsätzlichen Bewertungsmaßstabes, d.h. dafür, ob auffällige Befunde und ein weiterer Handlungsbedarf vorliegen. Daher erfolgte im Zuge der Detailuntersuchung keine nutzungsorientierte Beprobung gemäß BBodSchV.

Bei den vorliegenden Untersuchungen auf MKW, BTEX, MTBE, ETBE und PAK erfolgt eine orientierende Gegenüberstellung der Analyseergebnisse mit der LAWA. Für die Einzelstoffe MTBE und ETBE liegen keine Prüfwerte vor. Bezüglich PAK sind in der BBodSchV Prüfwerte vorgegeben. Hier wird der Einzelparameter Benz(a)pyren verwendet.

3.2.1 Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV)

Am 17. Juli 1999 ist die Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) in Kraft getreten. Sie ist das Kernstück des untergesetzlichen Regelwerks zum Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG) vom 17. März 1998, dessen wesentliche Bestandteile zum 1. März 1999 in Kraft getreten sind. Zweck des Bodenschutzes des Bundes ist es, nachhaltig die Funktionen des Bodens zu sichern oder wiederherzustellen. Hierzu sind schädliche Bodenveränderungen abzuwehren, der Boden und Altlasten sowie hierdurch verursachte Gewässerverunreinigungen zu sanieren und Vorsorge gegen nachteilige Einwirkungen auf den Boden zu treffen.

Die Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) enthält die Anforderungen an die Untersuchung und Bewertung von Verdachtsflächen und altlastverdächtigen Flächen und regelt die Anforderungen an die Sanierung von schädlichen Bodenveränderungen und Altlasten. Der Anhang 2 der Verordnung gibt Maßnahmen-, Prüf- und Vorsorgewerte vor, welche den Indikator für die Erfordernis von Prüfungen, Gefahrenabwehr- und Sanierungsmaßnahmen oder zu treffende Vorsorgemaßnahmen darstellen.

Für den Wirkungspfad **Boden-Mensch** (direkter Kontakt) werden die folgenden vier Nutzungsarten unterschieden:

- Kinderspielflächen
- Wohngebiete
- Park- und Freizeitanlagen sowie
- Industrie- und Gewerbegrundstücke.

In der BBodSchV sind für Benzo(a)pyren, nicht aber für PAK im Boden Prüfwerte festgelegt. Für die Parameter MTBE und ETBE liegen keine Prüfwerte vor.

Die Prüfwerte der BBodSchV haben für die vorliegende Untersuchung nur orientierenden Charakter, da die Beprobungstiefen der Detailuntersuchung sich nicht an den Tiefenintervallen der BBodSchV orientiert. Bezüglich der

Beurteilung werden die Prüfwerte für Industrie- und Gewerbegrundstücke herangezogen, um Befunde bezüglich ihrer Auffälligkeit zu bewerten.

Die Prüfwerte gemäß BBodSchV gelten für die Analytik der Feinfraktion. Die Bodenansprache vor Ort (gemäß DIN EN ISO 22475-1 sowie Bodenkundlicher Kartieranleitung, 4. Auflage) sowie die orientierenden Siebanalysen im Labor (Proben der Linerbohrungen LB3 und LB20) ergaben für die gewonnenen Proben einen Feinkornanteil von nahezu 100%. Bei Auftreten von größeren Bestandteilen wurden diese vor der Probenahme entfernt bzw. es erfolgte eine Siebung des Materials vor der Durchführung der Analytik. Für einige Proben wurden die Fein- und Grobfraktion getrennt untersucht. Diese Trennung konnte nicht für leichtflüchtige Schadstoffe erfolgen, da bei der Siebung methodenbedingt mit erheblichen Verlusten dieser Bestandteile zu rechnen ist. Die Analytik erfolgte, sofern nicht anders verzeichnet, an der Feinfraktion.

Prüfwert (BBodSchV) Benzo(a)pyren: 5 mg/kg

Bewertungsmaßstäbe Bodenluft

Bezüglich der Bewertung von leichtflüchtigen Schadstoffen in der Bodenluft existieren keine bundeseinheitlichen Regelungen und auch keine Prüf- oder Maßnahmenwerte in der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV). Als Bewertungskriterien können jedoch die Prüf- und Maßnahmenwerte der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA-Empfehlung 1/94) herangezogen werden. Für die Gruppe der LHKW gibt die LAWA-Empfehlung 1/94 einen Prüfwertbereich von 5 - 10 mg/m³ und einen Maßnahmenwert von 50 mg/m³ Bodenluft an. Diese sind gemäß LAWA mit Einschränkung auch auf die Stoffgruppe der BTEX-Aromaten übertragbar.

Prüfwert (LAWA) Benzol: 5-10 mg/m³

Maßnahmenschwellenwert (LAWA) Benzol: 50 mg/m³

Orientierend können zur Bewertung von flüchtigen Stoffen in der Bodenluft auch die Hinweise des Ständigen Ausschuss Altlasten der Bund/ Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO, 2009) herangezogen werden (Wirkungspfad Boden-Bodenluft-Mensch).

Benzol: 10 mg/m³

Xylol: 1.000 mg/m³

Wirkungspfad Boden – Grundwasser

Das BBodSchG definiert als Zweck auch die Sanierung von Gewässerverunreinigungen, die durch schädliche Bodenveränderungen verursacht sind. Da sich die Prüfwerte für die Beurteilung des Wirkungspfades **Boden-Grundwasser** der BBodSchV auf den Ort der Beurteilung, d.h. den Übergang von der wasserungesättigten zur gesättigten Bodenzone, beziehen, wurde im Zuge der Detailuntersuchung auf horizontalisierte Grundwasserentnahmen zurückgegriffen.

Für den Wirkungspfad Boden-Grundwasser gibt die BBodSchV Prüfwerte für BTEX (auch Benzol als Einzelparameter), MKW sowie PAK (15) und dem Einzelparameter Naphthalin an.

Tabelle 3: Prüfwerte Wirkungspfad Boden-Grundwasser

Parameter	Prüfwert BBodSchV Boden-Grundwasser [µg/l]
MKW C10-C40	200
BTEX	20
Benzol	1
PAK (15)	0,2
Naphthalin	2

3.2.2 LAWA-Empfehlungen für die Erkundung und Bewertung von Grundwasserschäden

Die LAWA-Empfehlungen (1993) wurden orientierend herangezogen.

Die Werte sind wie folgt definiert:

Prüfwerte: Werte, bei deren Unterschreitung der Gefahrenverdacht in der Regel als ausgeräumt gilt. Bei Überschreitung ist eine weitere Sachverhaltsermittlung geboten.

Maßnahmenschwellenwerte: Werte, deren Überschreitung in der Regel weitere Maßnahmen, z. B. Sicherung oder Sanierung, auslöst.

Die Prüf- und Maßnahmenschwellenwerte der LAWA sind Orientierungswerte, die rechtlich nicht verbindlich sind. Sie stellen als Vergleichsmaßstab eine Hilfe bei der Beurteilung, z.B. eines Verunreinigungsgrades, einer Belastung, eines Sanierungszieles u.a. dar und sind Ausgangspunkt für eine auf die örtlichen Bedingungen abgestimmte Einzelfallbewertung.

Zusätzlich zu den Prüfwerten der BBodSchV (Wirkungspfad Boden-Grundwasser) werden die Prüf- und Maßnahmenschwellenwerte der LAWA als Orientierungswerte für Bodenbelastungen herangezogen. Die LAWA-Empfehlungen enthalten Prüf- und Maßnahmenschwellenwerte für die hier relevanten Parametergruppen der MKW, BTEX sowie für PAK (15) und dem Einzelparameter Naphthalin.

3.2.3 Geringfügigkeitsschwellen der LAWA

Da nach wie vor ein bundeseinheitlicher Maßstab für die Bewertung von Grundwasserverunreinigungen fehlt, sind durch die LAWA (Länderarbeitsgemeinschaft Wasser) im Jahr 2016 die als geeignet angesehenen Geringfügigkeitsschwellen (GFS) für das Grundwasser publiziert worden. Diese haben zurzeit ähnlich wie die Prüf- und Maßnahmenschwellenwerte der LAWA empfehlenden Charakter.

Die GFS wird definiert als Konzentration, bei der trotz einer Erhöhung der Stoffgehalte gegenüber regionalen Hintergrundwerten keine relevanten ökotoxischen Wirkungen auftreten können und die Anforderungen der Trinkwasserverordnung oder entsprechend abgeleiteter Werte eingehalten werden.

Die Werte dienen als Maßstab, bis zu welchen Stoffkonzentrationen anthropogene, räumlich begrenzte Änderungen der chemischen Beschaffenheit des Grundwassers als geringfügig einzustufen sind und ab welcher Konzentration eine Grundwasserverunreinigung vorliegt.

Die GFS sind zur Beurteilung lokal eng begrenzter Schadstoffeinträge abgeleitet worden und dürfen daher nicht mit Qualitätszielen für das Grundwasser gleichgesetzt werden.

Tabelle 4: Prüfwertbereich und Geringfügigkeitsschwellenwerte der LAWA

Parameter	Prüfwertbereich LAWA Boden-Grundwasser [µg/l]	Geringfügigkeits- schwellenwerte (GFS) LAWA [µg/l]
MKW C10-C40	100-200	100
BTEX	10-30	20
Benzol	1-3	1
MTBE		5
PAK (15)	0,1-0,2	0,01
Naphthalin	1-2	
Anthracen		0,1
Benzo(a)pyren		0,01
Benzo(b,k)fluoranthen		0,03
Dibenz(a,h)anthracen		0,01

4. Methodik durchgeführter Untersuchungen

4.1 Feldarbeiten

4.1.1 Geländebegehungen, Vor-Ort-Messungen

Die Bauanlaufbesprechung fand im Rahmen eines Ortstermins am 01.07.2020 gemeinsam mit der GESA (Projektsteuerung), der KMB Kampfmittelbergung, dem Bohrunternehmen Thade Gerdes und der HPC AG statt.

Bedingt durch die unklare Leitungslage im Verladebahnhof 1 waren für alle Bohransatzpunkte Vorschachtungen bis in ca. 2 m Tiefe vorzunehmen. Die Vorschachtungen wurden vor Abteufen der jeweiligen Bohrung durchgeführt. Sofern Bohrhindernisse vorlagen, wurden die betroffenen Punkte geringfügig versetzt. LB 21 musste um einige Meter versetzt werden, da sich im Untergrund ein größeres Hindernis aus Beton befand. Der Punkt LB4 war bedingt durch die Nähe zur Straße und einer parallel dazu verlaufenden Starkstromleitung nicht wie geplant abzuteufen. Der unmittelbar angrenzende Wald wäre in Teilen zu roden gewesen, um ein Versetzen des Bohrpunktes zu ermöglichen. Daher wurde in Absprache mit dem Auftraggeber auf diese Bohrung verzichtet.

Vor Beginn der Bohrarbeiten war je Ansatzpunkt eine kampfmitteltechnische Freigabe vorzunehmen, da auf der Liegenschaft Bombenblindgänger zu erwarten sind. Die Freigabe erfolgte am 22.07.2020 durch die Firma KMB aus Bremen. Da eine Linerbohrung (LB21) wegen eines Bohrhindernisses zu versetzen war, wurde hier die Ersatzbohrung am 20.10.2020 durch KMB freigemessen. Insgesamt wurden 15 Tiefensondierbohrungen à 8 m Tiefe, durchgeführt. Die Punkte LB3, LB4, LB8, DP9 (Leitungen im Untergrund), LB26 (Bodenplatte), DP1 (Gebäudenähe), DP8 (Störung durch Beleuchtungsmast), und DP17 (bei Gleiskörper) waren vorzuschachten und per Bohrlochsondierung zu überprüfen. Für die verbleibenden Punkte konnte eine Oberflächensondierung durchgeführt werden. Die Freigabeprotokolle befinden sich in Anlage 10.

4.1.2 Errichten von Aufschlüssen

Die Ausführung der Arbeiten erfolgte auf Basis einer zuvor durchgeführten Ausschreibung in direktem Auftrag der GESA. Eine Übersicht der beteiligten Firmen ist Kapitel 1 zu entnehmen. Die Nummerierung der Rammkernsondierungen entspricht den benachbarten Liner-Bohrungen und ist daher nicht fortlaufend. Liner-Bohrungen sind in den Protokollen mit „LB“, Rammkernsondierungen mit „KB“ bezeichnet.

4.1.2.1 Linerbohrungen

Als Bohrverfahren wurde auf Linerbohrungen mit einem Mindestdurchmesser von 80 mm zurückgegriffen. Mit diesem Verfahren können weitgehend ungestörte, horizontierte Bodenproben entnommen werden. Insbesondere im Hinblick auf leichtflüchtige Schadstoffgruppen wie BTEX und kurzkettige MKW ist hier nur mit geringen Verlusten vor der Probenahme zu rechnen. Linerbohrungen können in dem vor Ort anstehenden Fein- bis Mittelsand ohne größeren Aufwand abgeteuft werden.

Zunächst wurden mit einer Hohlbohrschnecke (Außendurchmesser 205 mm) Bohrungen durchgeführt. Anschließend wurde, zur Gewinnung der Kerne ein PVC-Liner mit einem Durchmesser von ca. 120 mm mit einem Fallgewicht, vorausgesetzt es traten keine Bohrhindernisse auf, bis in eine Tiefe von 10 m u. GOK in den Untergrund gerammt. Zur Entnahme der Liner wurde das jeweilige Kernrohr mit der Hohlbohrschnecke überbohrt und der Kern gezogen. Die einzelnen Kunststoffliner von jeweils 1 m Länge wurden bei sichtbarem Materialverlust zunächst mit einem verschlossenen Beutel Füllsand aufgefüllt, um ein Verrutschen des Bohrkerns zu unterbinden, und anschließend mit Abschlusskappen verschlossen und bis zur Probenahme gelagert.

Die Bohrlöcher wurden mit sauberem Sand verfüllt (wo erforderlich auch mit Bentonit).

4.1.2.2 Rammkernsondierungen zur Bodenluftentnahme

Da der wasserungesättigte Bereich ca. 3-5 m u. GOK liegt, wurden zur Entnahme von Bodenluftproben nach VDI 3865 zunächst Rammkernsondierungen (Durchmesser 50 mm) bis in eine Tiefe von 3 m durchgeführt. Die Ansprache des aufgeschlossene Bohrgutes erfolgte gemäß DIN EN ISO 22475-1 sowie der bodenkundlichen Kartieranleitung. Der Bodenaufbau wurde in Schichtenverzeichnissen gemäß DIN EN ISO 14688 und Bohrprofilen gemäß DIN 4023 dokumentiert.

4.1.3 Generelle Vorgehensweise bei den Probenahmen

Die Probenahmeprotokolle sind in Anlage 8 einzusehen. Die Schichtenverzeichnisse und Bodenprofile befinden sich in Anlage 7. Anlage 9 enthält die Prüfberichte des Labors.

4.1.3.1 Bodenprobenahme

Die Liner wurden zunächst mittels Trennscheibe aufgeschnitten. Die Probenahme erfolgte durch den begleitenden Fachgutachter der HPC AG. Die Proben wurden anhand der organoleptischen Befunde gewählt sowie bei

Schichtwechsel bzw. bei durchgängigen Schichten meterweise entnommen. Als erstes wurden Proben für die Bestimmung der leichtflüchtigen Parameter in Gefäße mit Methanol-Vorlage überführt. Die Ansprache des aufgeschlossenen Bohrgutes erfolgte gemäß DIN EN ISO 22475-1 sowie der bodenkundlichen Kartieranleitung. Der Bodenaufbau wurde in Schichtenverzeichnissen gemäß DIN EN ISO 14688 und Bohrprofilen gemäß DIN 4023 dokumentiert.

Anschließend wurde die Probenahme für alle weiteren Parameter durchgeführt. Das verbleibende Bohrgut sowie nicht benötigtes Bodenmaterial wurde in einem Container gesammelt, nach den Anforderungen der LAGA untersucht und der Entsorgung zugeführt. Die zu analysierenden Bodenproben wurden arbeitstäglich kühl und dunkel in das Labor überführt. Die Analytik erfolgte durch das akkreditierte Labor Dr. Döring GmbH in Bremen.

4.1.3.2 Grundwasserprobenahme

Die Grundwasserprobenahme erfolgte im Zuge von Direct-Push-Sondierungen. Bei dem Direct-Push-Verfahren wird zunächst eine geschlossene Filtersonde mit einem nachfolgenden Hohlbohrgestänge bis zur gewünschten Endtiefe in den Grundwasserleiter vorgetrieben und der Filter dann freigezogen. Die Wasserentnahme erfolgt vom tiefsten Probenahmehorizont zu den höher gelegenen mittels Schlauchpumpe, wobei der Schlauch durch das Hohlgestänge geführt wird. Vor der jeweiligen Probenahme werden die relevanten Vor-Ort-Parameter elektr. Leitfähigkeit, Redoxpotential, Temperatur, pH und Sauerstoffgehalt gemessen. Bei Konstanz dieser Parameter erfolgt die Probenahme.

4.1.3.3 Bodenluftentnahme

Im Anschluss an die Ausführung der Rammkernsondierung wurde die Bodenluft-Entnahmesonde mit Packer in das Bohrloch eingebracht. Nach erfolgtem luftdichten Verschluss (Dichtigkeitsprüfung nach VDI 3865, Blatt 2) wurde bis zur Konstanz der Vor-Ort-Parameter O₂, CO₂, CH₄, H₂S (Totvolumen- austausch) Bodenluft abgesogen. Je Probe wurden im Anschluss 2 l Bodenluft auf einem Aktivkohleröhrchen (Dräger Typ G) angereichert.

4.1.4 Vermessungsarbeiten

Die Vermessungsarbeiten (gemäß Anforderung BFR) erfolgten jeweils im Anschluss an die Bohrarbeiten bzw. Direct-Push-Sondierungen. Die Ansatzpunkte wurden nach Lage (GPS) und Höhe (Nivellement) eingemessen. Die Vermessungsdaten können für die Direct-Push-Sondierungen in Anlage 11 eingesehen werden und bilden die Grundlage für

den Grundwassergleichenplan in Anlage 2. Die Vermessungsdaten für die Kleinbohrungen lagen bei Erstellung des Berichtes noch nicht vor und werden, sobald verfügbar, nachgereicht.

4.1.5 Geophysikalische Untersuchungen

Nicht vorgesehen.

4.2 Begleitender Arbeits- und Emissionsschutz

Vor der Ausführung der Bohrarbeiten wurde durch die HPC AG eine Gefährdungsbeurteilung gemäß Arbeitsschutzgesetz für die Ausführung der Arbeiten durchgeführt. Der Arbeits- und Sicherheitsplan liegt dem Gutachten als Anlage 12 bei. Er enthält eine Gefährdungsbeurteilung und die daraus resultierenden Schutzmaßnahmen. So war u.a. eine Absaugvorrichtung an den Bohrlöchern vorzuhalten sowie persönliche Schutzausrüstung vorzuhalten bzw. zu tragen.

Während der Ausführung der Arbeiten wurde durch den begleitenden Geologen der HPC AG die Einhaltung der Arbeitsschutzvorgaben überwacht.

4.3 Sofortmaßnahmen

Es waren keine Sofortmaßnahmen notwendig.

4.4 Chemische Analytik

Die Analytik erfolgte durch das akkreditierte Labor Dr. Döring GmbH. Die verwendeten Messverfahren können den Prüfberichten entnommen werden. In Tabelle 5 sind für die einzelnen Parameter die jeweiligen Bestimmungsgrenzen verzeichnet.

Der Parameterumfang orientierte sich an den Erkenntnissen aus vorangegangenen Untersuchungen. Sowohl für die Bodenproben als auch für die Grundwasserproben wurden die Schadstoffgruppen der BTEX, MKW (C5-9, C10-22 und C10-40) und PAK sowie die Einzelstoffe MTBE und ETBE berücksichtigt. BTEX und langkettige MKW wurden dabei an allen, die übrigen Parameter nur an einzelnen, besonders im Hauptbelastungsbereich entnommenen Proben, untersucht. Zusätzlich wurden an ausgewählten Proben die Korngrößenverteilung mittels Sieb- und Schlämmanalysen sowie der Gehalt an TOC bestimmt. Diese Untersuchungen ermöglichen eine Einschätzung zur Schadstoffverfügbarkeit und Mobilität im Boden.

Tabelle 5: Untersuchte Parameter inkl. Bestimmungsgrenzen

Parameter	Bestimmungsgrenze	
	Boden [mg/kg]	Wasser [µg/l]
KW-Index	5	100
C5-C9	5	100
BTEX (je Einzelsubstanz)	0,05	0,1
MTBE	0,1	1
ETBE		1
PAK (je Einzelsubstanz)	0,001	0,01
TOC	0,1 [Masse%]	-

Gemäß BBodSchV ist bei der Untersuchung von Bodenproben die Fraktion < 2 mm zu berücksichtigen. Der im Untersuchungsgebiet anstehende Boden im Tiefenbereich 9,0-10,0 m u. GOK enthält jedoch z.T. vorwiegend kiesige Bestandteile. Um eine vertikale Abgrenzung der Schadstoffausbreitung im Boden analytisch zu ermöglichen, wurden in der vorliegenden Untersuchung einzelne Proben auf ihren MKW-Gehalt in der Fein- und der Grobfraction untersucht.

4.5 Untersuchungen zur Bestimmung hydraulischer Parameter

Nicht Bestandteil des Untersuchungsumfangs.

4.6 Berechnungen, Modelle

Nicht Bestandteil des Untersuchungsumfangs.

4.7 Bodenmechanische Untersuchungen

In zwei Linerbohrungen (LB3 und LB20) wurden Sieb- und Schlämmanalysen an den gewonnenen Bodenproben durchgeführt. Dabei wurden je Bohrung 5 Proben für die tiefenorientierte Korngrößenanalyse ausgewählt. Die Untersuchung erfolgte durch die Chemisches Untersuchungsamt Emden GmbH (im Auftrag des Labors Dr. Döring) gemäß DIN 18123: 2011-04. Die Ergebnisse sind in Anlage 9.2 enthalten.

5. Untersuchungsergebnisse und Beurteilungen

5.1 Liegenschaftsbezogene Untersuchungen

Ziel der Untersuchung war die KF des Verladebahnhof 1, daher entfällt eine Beurteilung der Gesamtliegenschaft an dieser Stelle.

5.2 Untersuchungen und Ergebnisse der KF Verladebahnhof 1

5.2.1 Kontaminationshypothese zur KF

Der Verladebahnhof 1 wurde in der Zeit von den 1940er Jahren bis 2013 als Umschlagsplatz bzw. für die Lagerung von Kraftstoffen genutzt. Die bereits in vorherigen Untersuchungen nachgewiesenen Schadstoffgehalte in Boden und Grundwasser sind dabei nicht nur auf Handhabungsverluste zurückzuführen. Es ist anzunehmen, dass während bzw. im direkten Anschluss an den 2. Weltkrieg episodisch gezielt Kraftstoffe aus Tankkesselwagen/ Eisenbahnkesselwagen abgelassen wurden [6]. Havarien nach erfolgtem Bombardement können ebenfalls zu kurzfristig hohen Schadstoffeinträgen in den Boden und damit auch (zeitversetzt) in das Grundwasser geführt haben. Auch sind Leckagen in den zahlreichen Leitungen auf der Liegenschaft als mögliche Schadstoffquellen zu berücksichtigen.

Je nach Löslichkeit der eingetragenen Stoffe, hat sich im Verlauf der Zeit eine Schadstofffahne in Richtung des Grundwasserabstroms ausgebildet. Lokal liegen an der Grundwasseroberfläche Leichtphasenkörper vor. Diese wurden in Mächtigkeiten von z.T. > 0,5 m im Bereich der Pumpstation 1 und entlang des Verladebahnhofs nachgewiesen.

5.2.2 Untersuchungsstrategie und Begründung der Vorgehensweise

Die Untersuchungsstrategie ist im Detail dem Untersuchungskonzept in Anlage 13 zu entnehmen. Grundsätzlich war eine Erweiterung bzw. Verdichtung des bisherigen Beprobungsrasters vorgesehen. Hierbei sollte auch die bisherige Erkundungstiefe ausgedehnt werden. Dies sollte eine laterale und vertikale Eingrenzung der Schadstofffahne ermöglichen sowie Hot-Spot-Bereiche und damit mögliche Eintragsorte genauer definieren.

Der bisherige Analytikumfang sollte um einige Parameter ergänzt werden. Zum einen waren zusätzliche Schadstoffe wie ETBE und kurzkettige MKW zu bestimmen, zum anderen sollte durch Sieb- und Schlämmanalysen und die Bestimmung des TOC-Gehaltes das Rückhaltevermögen des Bodens genauer beurteilt werden.

5.2.3 Recherchen und Datenaufbereitungen

Die Untersuchungsfläche befindet sich im südwestlichen Teil des Tanklagers Bremen-Farge und hat eine Größe von ca. 9,3 ha, wobei die Probenahmen nur in einem Teilbereich stattgefunden haben. Ein Übersichtslageplan des Tanklagers befindet sich in Anlage 1. Mit Ausnahme der durch Gebäudebestand, Gleisanlagen (mit Betonwannen) und Umfahrungsstraßen versiegelten Flächen ist das Gelände unversiegelt und mit Gras bzw. Bäumen bewachsen. Die KF wird nicht genutzt. Sie befindet sich vollständig innerhalb der Umzäunung des Tanklagers.

5.2.4 Boden- und Untergrunderbau der KF

Bohrhindernisse und Auffälligkeiten (Linerbohrungen)

Insgesamt wurden 28 Linerbohrungen für die Gewinnung von Bodenproben und 13 Rammkernsondierungen zur Bodenluftentnahme abgeteuft. Die Ansatzpunkte sind den Anlagen 2 und 3 zu entnehmen. Die Vermessungsdaten sind in Anlage 11 ersichtlich.

Bei der Gewinnung der Liner-Bohrungen sind stellenweise Kernverluste aufgetreten. Diese wurden in den Protokollen vermerkt. Auch konnten zwei Linerbohrungen (LB12 und LB21) nicht bis in die gewünschte Tiefe ausgeführt werden. Von den 28 Linerbohrungen wurden 25 bis in eine Tiefe von 10 m u. GOK abgeteuft. LB12 wurde bis 8,5 m u. GOK und LB21 wurde bis 9,0 m u. GOK gebohrt. LB21 war bereits vorher wegen eines großen Beton-Hindernisses versetzt worden. Bei LB28 erfolgte eine Liner-Entnahme bis 10,4 m u. GOK, da in dieser Bohrung ein größerer Stein zur zwischenzeitigen Unterbrechung und erneutem Ansetzen bei 9,4 m u. GOK geführt hatte.

Während der Linerbohrung LB 2 wurde ein Kabel der Zaunüberwachung beschädigt. Dieses wurde nach Freilegung durch die Bohrfirma Thade Gerdes von einem Mitarbeiter des örtlichen Wachdienstes (WPD) wieder instand gesetzt. Da die betroffene Bohrung als eine der ersten abgeteuft wurde, waren in Rücksprache mit dem WPD alle weiteren Bohrungen bis in 2 m u. GOK Tiefe vorzuschachten.

Der aufgeschlossene Boden war vielfach organoleptisch auffällig, insbesondere im Grundwasserschwankungsbereich. Es war sowohl stellenweise ein öliger Film auf den Einzelkörnern, als auch ein auf Kraftstoff(-komponenten) zurückzuführender Geruch bei der Beprobung wahrnehmbar. Der ölige Film war in einzelnen Bohrungen bereits durch eine dunklere Färbung des Bodens visuell erkennbar (LB 9, LB 12, LB 21 und LB 24). Der kraftstoffartige Geruch nimmt mit zunehmender Tiefe ab ca. 6-7 m u. GOK deutlich ab.

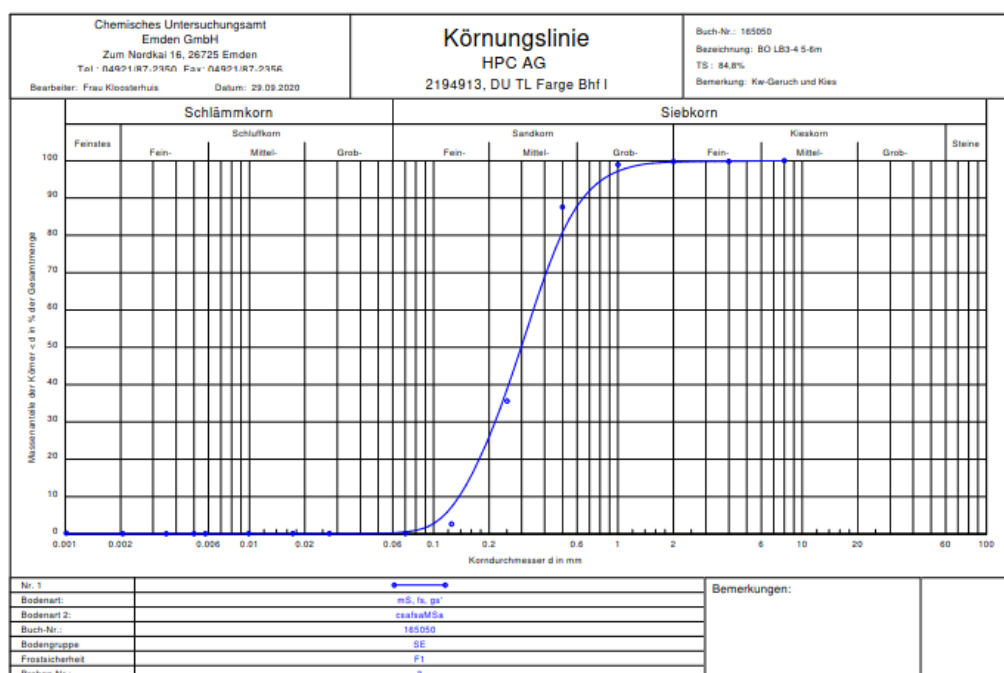
Schichtenfolge

Bedingt durch die Arbeiten zur Errichtung des Gebäudebestandes und der technischen Einrichtungen auf der Liegenschaft sind oberflächennah flächendeckend künstliche Auffüllungen anzunehmen. In den Bodenaufschlüssen konnten die Auffüllungen jedoch meist nicht visuell als solche identifiziert und vom gewachsenen Boden unterschieden werden. Vermutlich wurde das anstehende Bodenmaterial im Zuge der Baumaßnahmen lediglich umgelagert. Bauschuttbestandteile liegen westlich der Pumpstation 1 sowie entlang der Gleise bis in ca. 0,6 m Tiefe vor. Am östlichen Ende der Gleise sind Schlackeablagerungen ab 1,1 m u. GOK angetroffen worden. Vereinzelte Schlackereste reichen dort bis in ca. 3 m u. GOK Tiefe.

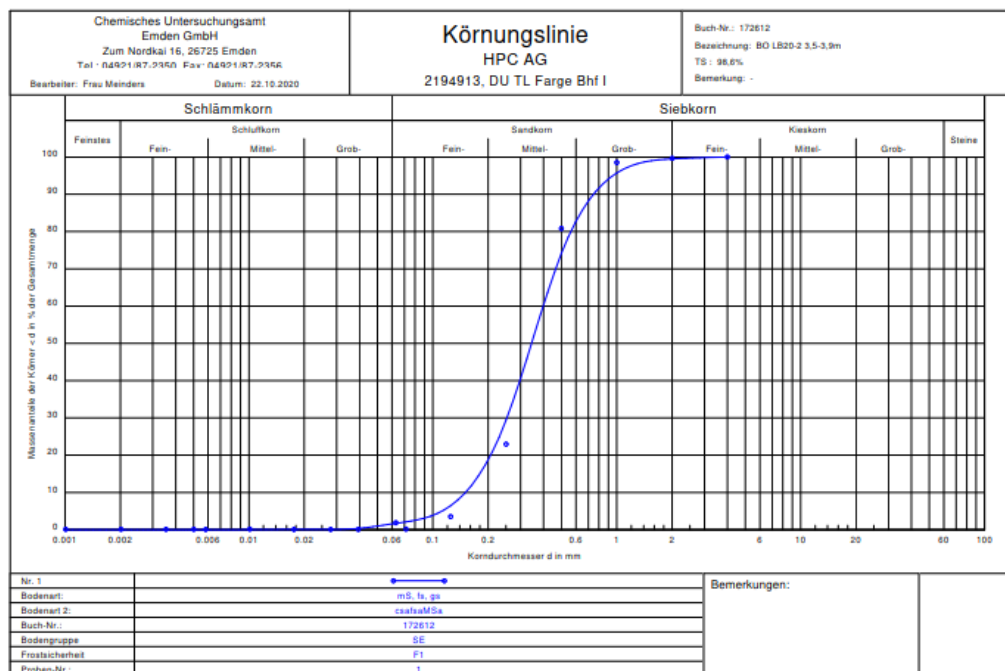
Der aufgeschlossene Boden besteht im Wesentlichen aus feinsandigem Mittelsand bis mittelsandigem Feinsand mit wechselnden Anteilen von Schluff. Bis ca. 2 m u. GOK sind Wurzelreste und humose Beimengungen vorhanden. Der Boden ist kalkfrei. Er enthält z.T. Glimmerbestandteile. In einigen Bohrungen sind feine Schluff- oder Kieslagen (< 5 cm) in die Sande eingeschaltet.

Die Sieb- und Schlämmanalysen an den Linerbohrungen LB3 und LB20 haben für den Boden einen Feinkornanteil (< 2 mm) von mehr als 99% ergeben. Die kf-Werte liegen bei $1,93\text{--}2,63 \cdot 10^{-4}$ m/s. Die kiesführenden Sande zeigen mit $1,68 \cdot 10^{-4}$ m/s eine höhere Durchlässigkeit, stark schluffführende Sande sind mit $3,77 \cdot 10^{-5}$ m/s weniger durchlässig. Abbildung 1 zeigt exemplarisch die Korngrößenverteilung der Mittelsande in ca. 3,5 bis 4,0 m u. GOK.

Abbildung 1: Kumulierte Korngrößenverteilung für die Proben LB3-2 (3,3-4,0 m u. GOK) und LB20-2 (3,5-3,9 m u. GOK)



Fortsetzung Abbildung 2:



Schluffhorizonte sind in den Bohrungen nördlich der Gleisanlage in ca. 9-10 m u. GOK als 0,11 (LB4) bis 0,66 m mächtiger Horizont ausgebildet (LB8, Basis des Horizontes bei 10 m u. GOK noch nicht erreicht).

In einigen Bohrungen (LB1, LB4, LB6 und LB27) sind zwei Schluffhorizonte zu finden. In LB1 und LB4 liegen beide Horizonte mindestens 9 m u. GOK. In LB6 und LB27 befindet sich der obere Horizont im Bereich der Vorschachtungen < 2 m u. GOK.

Westlich der LB 8 und am westlichen (LB15, LB16 und LB17) sowie am östlichen Ende der Gleisanlagen (LB27) steht der Schluffhorizont in Tiefen von ca. 7,25-8,86 m u. GOK an.

Die Schluffhorizonte sind nicht flächig ausgebildet. Ein Einfluss auf die hydraulischen Bedingungen im Untersuchungsgebiet ist somit nicht gegeben.

Im westlichen Bereich des Untersuchungsgebietes (nördlich und südlich der Gleisanlage) tritt ein kiesig-schluffiger Horizont auf. Die Mächtigkeit dieses Horizonts beträgt zwischen 0,13 m (LB15) und 1,58 m (LB20). Auch am östlichen Ende der Gleise ist dieser Kieshorizont mit ca. 1,5 m Mächtigkeit stark ausgeprägt. Dort wo Schluff- und Kieshorizonte gemeinsam auftreten, liegt der Schluff, mit Ausnahme von LB16, direkt oberhalb des Kieshorizontes. Dies betrifft die Bohrungen LB15, LB19, LB20 und LB26.

In den meisten Bohrungen ist eine Torfschicht vorhanden. Der Torf ist vorwiegend mäßig zersetzt. Die Mächtigkeiten schwanken dabei zwischen 0,1 m (LB7, LB10, LB13) und 0,45 m (LB20). Generell nimmt die Mächtigkeit der

Torfschicht in Richtung Süden leicht zu. Die Torfschicht ist im Tiefenbereich von 6,68-8,45 m u. GOK anzutreffen.

Eine Zusammenfassung der lokal angetroffenen Schluff-, Kies- und Torfhorizonte ist Tabelle 6 zu entnehmen.

Tabelle 6: Tiefenlagen der vom vorherrschenden Fein- bis Mittelsand abweichenden Horizonte

LB	Schluff (Tiefe in m u. GOK)	Kies-Schluff (Tiefe in m u. GOK)	Torf (Tiefe in m u. GOK)
1	9,00-9,15 9,60-9,80		
2	9,80-10,00+?		
3		9,39-9,70	7,78-8,00
4	9,24-9,35 9,58-10,00+?		8,30-8,42
5	9,24-9,70		7,80-8,00
6	0,70-1,00 9,13-9,32		7,20-7,54
7			7,90-8,00
8	9,34-10,00+?		
9	8,76-9,00		8,30-8,45
10	8,16-8,75		
11		7,50-7,70	6,90-7,00
12			7,86-8,00
13		8,40-9,73	7,64-7,74
15	8,50-9,00	9,00-9,13	
16	8,40-8,65	9,00-10,00 Endtiefe des Horizonts nicht erreicht	
17	8,62-8,86		
18		7,20-7,68	
19	7,40-7,90	7,90-8,76	6,68-6,83
20	7,90-8,00	8,00-9,58	7,10-7,55
21			6,70-7,00
22			6,74-6,95
23		7,70-9,22	6,62-6,80 7,07-7,12
24		8,80-9,20 9,42-9,80	8,07-8,20
25		8,66-10,00 Endtiefe des Horizonts nicht erreicht	7,39-7,70
26	8,88-9,15	9,15-9,40	7,86-8,00
27	0,90-1,40 7,25-7,31		7,72-7,94
28		7,90-8,64	7,27-7,45
29		8,40-8,80	6,70-7,00

5.2.5 Hydrogeologische und hydrologische Besonderheiten der KF

Bohrhindernisse und Auffälligkeiten (DP-Sondierungen)

Insgesamt wurden 18 Direct-Push-Sondierungen zur Grundwasserprobenahme abgeteuft. Die Erkundung war bis in eine Tiefe von 30 bzw. 40 m (DP 3, DP12, DP13, DP18) u. GOK vorgesehen. Aufgrund von Bohrhindernissen wurden DP3, DP 12, DP13 bis 35 m u. GOK, DP7 bis 25 m u. GOK und DP 18 bis 20 m u. GOK abgeteuft. Das entnommene Grundwasser war z.T. stark organoleptisch auffällig, insbesondere im oberen Teil des aufgeschlossenen Grundwasserleiters. Es war ein auf Kraftstoff(-komponenten) zurückzuführender Geruch wahrnehmbar.

Wassergesättigter Boden

Die Fein- bis Mittelsande im Untersuchungsgebiet stellen einen freien Grundwasserleiter dar (siehe Schichtaufbau Kapitel 5.2.1.4). Der Grundwasserflurabstand beträgt je nach Geländehöhe etwa 3,38-6,16 m. Dies entspricht einem Grundwasserspiegel von 3,29-3,95 m NHN. Die Grundwasserfließrichtung verläuft nach Südwesten zum Vorfluter Unterweser (siehe Anlage 2).

5.2.6 Ergebnisse chemischer Analysen der KF

Art und Anzahl der Analysen

Es wurden insgesamt:

- 85 Analysen auf C5-9 (davon 42 Grundwasserproben),
- 409 Analysen auf C10-22 und C10-40 (davon 108 Grundwasserproben),
- 355 Analysen auf BTEX, Styrol, Cumol (davon 108 Grundwasserproben und 13 Bodenluftproben),
- 240 Analysen auf MTBE (davon 108 Grundwasserproben),
- 29 Analysen auf ETBE (davon 10 Grundwasserproben),
- 241 Analysen auf PAK (davon 108 Grundwasserproben),
- und 17 Analysen auf TOC durchgeführt.

Art und Anzahl der Rückstellproben

Da die Untersuchung aller aufgeschlossenen Bodenabschnitte nicht vorgesehen und zur Eingrenzung der Schadstoffausbreitung auch nicht

notwendig war, sind nicht alle entnommenen Bodenproben zur Analyse gekommen. Es wurden für jeden Horizont, bzw. dort wo durchgängige Horizonte vorlagen für alle 0,5 Bohrmeter Bodenproben gewonnen und in das Labor überführt. Nicht untersuchte Proben wurden im Labor als Rückstellprobe aufbewahrt.

5.2.6.1 Untersuchungsergebnisse Bodenluft

Eine Gegenüberstellung der Ergebnisse aus der Bodenluftanalytik mit den Vergleichswerten aus LABO (2009) und LAWA (1993) ist Tabelle 7 zu entnehmen.

Tabelle 7: BTEX-Gehalte in der Bodenluft

RKS	BTEX [µg/m³]	Benzol [µg/m³]	Toluol [µg/m³]	Ethylbenzol [µg/m³]	Xylol [µg/m³]	Trimethylbenzole [µg/m³]
2	144	< 20	< 20	24	< 20	120
3	264	< 20	< 20	200	< 20	64
4	274	42	< 20	46	56	130
5	134	< 20	< 20	24	< 20	110
6	n.n.	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20
14	212	< 20	< 20	30	32	150
19	n.n.	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20
20	128	< 20	< 20	48	40	40
21	980	20	< 20	260	420	280
22	n.n.	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20
24	1.180	260	< 20	260	370	290
26	284	28	< 20	72	130	54
27	22	< 20	< 20	22	< 20	< 20

Orientierende Hinweise für flüchtige Stoffe in der Bodenluft (LABO 2009)						
Wohngebiete	--	10.000	--	--	1.000.000	--
LAWA-Empfehlungen						
Prüfwert	5.000-10.000	--	--	--	--	--
MSW	50.000	--	--	--	--	--

MSW = Maßnahmschwellenwert

n.n. = nicht nachgewiesen, die Werte liegen unterhalb der stoffspezifischen Nachweisgrenze

n.a. = nicht analysiert

Von den 13 Bodenluftproben sind in drei keine BTEX nachweisbar (RKS 6, RKS 19 und RKS 22). Die BTEX-Gehalte der anderen Proben liegen zwischen 22 und 1.180 µg/m³. Der Einzelstoff Toluol wurde in keiner der Proben nachgewiesen. Die vorherrschenden Stoff(-gruppen) sind Ethylbenzol (insbesondere RKS 3, RKS 21 und RKS 24), Xylole (insbesondere RKS 21,

RKS 24 und RKS 26) und TMB (insbesondere RKS 2, RKS 4, RKS 5, RKS 14, RKS 21, RKS 24). Benzol tritt nur vereinzelt auf. In RKS 24, welche auch die höchste Konzentration an BTEX aufweist, wurde eine Konzentration von 1.180 µg/m³ ermittelt, davon 260 µg/m³ Benzol. Die Proben RKS 4, RKS 21 und RKS 26 enthalten ebenfalls Benzol, jedoch in einer erheblich geringeren Konzentration.

Schwerpunkte der BTEX-Gehalte in der Bodenluft liegen im Bereich der Pumpstation 1 (RKS 2 – RKS 5, vorwiegend Ethylbenzol und TMB) sowie südlich der Gleise auf gleicher Höhe (RKS 21 und RKS 24, Gemisch aus Benzol, Ethylbenzol, Xylolen und TMB). Hier war bereits in den früheren Untersuchungen die Ausbreitung einer Schadstofffahne im Boden (MKW und BTEX) nachgewiesen worden. RKS 19 und RKS 22 enthalten keine BTEX mehr und stellen somit auf der Südseite der Gleisanlage das Ende der Schadstoffausbreitung in der Bodenluft dar.

Die BTEX-Maxima liegen im Hauptkontaminationsbereich entlang der Verladegleise. Die Ausbreitung der BTEX in der Bodenluft reicht nicht wesentlich über die kontaminierten Bereiche im wassergesättigten Boden hinaus. Die Höhe der Werte, auch der im Quellbereich befindlichen RKS 3-5 sowie RKS 24, liegt deutlich unter den zur Orientierung herangezogenen Vergleichswerten der LAWA und LABO. Ein handlungsrelevanter Transfer von BTEX aus der Bodenluft in die Umgebungsluft ist nicht zu erwarten.

5.2.6.2 Untersuchungsergebnisse Boden

Die Konzentrationen der untersuchten Parameter sind in Anlage 3 im Lageplan des Untersuchungsgebietes verzeichnet und in den Lageplänen in Anlage 5 tiefenbezogen dargestellt. Aufgrund des Umfangs der Analysenergebnisse werden an dieser Stelle nur exemplarische Auszüge der Analytik dargestellt.

Kohlenwasserstoffe

Mineralölkohlenwasserstoffe konnten in allen Bohrungen nachgewiesen werden. Hierbei ist ein deutlicher Unterschied zwischen dem wasserungesättigten und wassergesättigten Boden erkennbar (Beispiel Tabelle 8). Eine Korrelation zwischen Bodenaufbau und Schadstoffgehalt ist nicht erkennbar.

Tabelle 8: Typische Schadstoff-Verteilung am Beispiel der Bohrung LB5

Entnahmetiefe		TOC	KW C10-22	KW C10-40	KW C5-9	MTBE	ETBE	BTEX	PAK (EPA)	
										von
[m u. GOK]		%	[mg/kg] TS	[mg/kg] TS	[mg/kg] TS	[mg/kg] TS	[mg/kg] TS	[mg/kg] TS	[mg/kg] TS	
wasser- ungesättigt	0	0,6	n.b.	< 5	24	n.b.	< 0,1	n.b.	n.b.	0,184
	1,2	2	n.b.	< 5	15	n.b.	< 0,1	n.b.	n.b.	0,052
	2,2	3	n.b.	10	30	8	< 0,1	n.b.	n.n.	0,089
	3	3,55	0,49	140	200	< 5	< 0,1	< 0,1	n.n.	0,043
wasser- gesättigt	4	4,45	n.b.	1.000	1.300	n.b.	< 0,1	n.b.	0,3	0,095
	4,5	5	n.b.	3.200	3.500	n.b.	< 0,1	n.b.	163,6	0,823
	5	5,35	n.b.	520	600	440	< 0,1	n.b.	45,53	0,228
	6	7	n.b.	50	61	n.b.	< 0,1	n.b.	0,63	0,018
	7,25	7,8	< 0,1	16	30	8	< 0,1	< 0,1	0,12	0,005
	8,4	9	n.b.	< 5	6	n.b.	< 0,1	n.b.	n.n.	n.n.
	9,4	10	n.b.	7	18	8	< 0,1	n.b.	n.n.	0,003

Die an der Gleiswanne gelegene LB24 ist eine der Bohrungen mit besonders hohen MKW-Konzentrationen (10.000 mg/kg in 4,44-5,00 m u. GOK) wobei nach einem Rückgang der Belastung mit zunehmender Tiefe in ca. 7,5 m u. GOK ein weiteres Maximum mit 1.200 mg/kg MKW im Boden erreicht wird. Weitere, auffällig hohe MKW-Gehalte liegen in den Linerbohrungen LB16 und LB29 vor. Hier wurden im Grundwasserschwankungsbereich ≥ 10.000 mg/kg MKW nachgewiesen. Die Schadensszentren decken sich mit den in den bisherigen Untersuchungen ausgewiesenen Quellbereichen an der Pumpstation 1, dem Verladebahnhof und den Gleisen in unmittelbarer Nähe.

Alle anderen Linerbohrungen weisen geringere MKW-Konzentrationen auf, die mit zunehmender Entfernung zu den Eintragsquellen abnehmen.

Für die Bohrungen im Grundwasserschwankungsbereich wurde entsprechend dem Beispiel in Tab. 8 festgestellt, dass mit Ausnahme der LB8 (110 mg/kg) und LB27 (380 mg/kg), Werte ≥ 1.000 mg/kg für MKW vorliegen. Oberhalb des Grundwasserspiegels liegen die MKW-Gehalte zwischen < 5 und 460 mg/kg, wobei meist weniger als 100 mg/kg erreicht wurden. Mit zunehmender Tiefe nehmen die Konzentrationen von MKW deutlich ab. Ca. 2 m unterhalb der Grundwasseroberfläche ist das Konzentrationsniveau in den meisten Bohrungen auf Werte unterhalb von 500 mg/kg MKW gesunken. Ausnahmen bilden hier die Bohrungen in den ausgewiesenen Quellbereichen: LB6, LB7, LB18, LB19 und LB25 enthalten 2 m unterhalb der Grundwasseroberfläche noch 600-750 mg/kg. LB12, LB16 und LB17 weisen in diesem Tiefenintervall > 1.000 mg/kg MKW auf.

Bezüglich der Verteilungsmuster der kurz- (C10-22) und langkettigen (C22-40) Kohlenwasserstoffe zeigt sich ein Schwerpunkt bei den kurzkettigen KW. Meist liegt der Anteil kurzkettiger KW bei über 90%.

Leicht flüchtige MKW (C5-9) wurden in insgesamt 9 Bohrungen (je 5 Entnahmetiefen) untersucht. In LB13, LB17, LB20 und LB29 wurden keine leichtflüchtigen MKW ermittelt. In zwei der untersuchten Linerbohrungen wurden nur geringe Gehalte an leichtflüchtigen MKW festgestellt: LB3 (9 mg/kg; 7,5 m u. GOK) und LB15 (Maximum von 35 mg/kg in 3,5 m u. GOK).

Drei der untersuchten Linerbohrungen enthalten mehr als 400 mg/kg C5-9: LB5, LB6 und LB24. Das Maximum tritt jeweils im Grundwasserschwankungsbereich auf. Die betroffenen Bohrungen liegen in bzw. nahe der ausgewiesenen Quellbereiche für MKW (siehe auch Anlage 5.1).

BTEX

Diese Stoffgruppe konnte in 18 der 28 abgeteufte Linerbohrungen nachgewiesen werden. In den meisten Proben waren BTEX nur in Konzentrationen < 1 mg/kg nachweisbar, d.h. die Ausdehnung dieser Schadstoffgruppe ist abgegrenzt. Höhere Konzentrationen bis 256 mg/kg wurden in den Bohrungen LB4-LB7, LB21, LB22, LB24-LB26 und LB28 ermittelt (siehe auch Anlage 5.2). Der Schwerpunkt für diese Stoffgruppe liegt somit im Boden südlich der Pumpstation 1 sowie im Bereich der Verladegleise am östlichen Ende des Untersuchungsgebietes. Der bereits in vorherigen Untersuchungen ausgewiesene Quellbereich nahe der Pumpstation 1 kann durch die aktuellen Befunde bestätigt und deutlicher begrenzt werden. Das Belastungsmaximum bei den Gleisen im Osten konnte noch nicht vollständig abgegrenzt werden.

Hinsichtlich der Tiefe im Boden liegen die jeweiligen Maximalkonzentrationen im Grundwasserschwankungsbereich und nehmen in größerer Tiefe deutlich ab. Bis auf wenige Ausnahmen (LB7: 0,07 mg/kg; LB11: 0,16 mg/kg; LB24: 0,42 mg/kg; LB27: 0,07 mg/kg) sind BTEX ab einer Tiefe von 9 m u. GOK nicht mehr nachweisbar. Das Konzentrationsniveau liegt hier nur knapp oberhalb der Nachweisgrenze von 0,05 mg/kg.

Die vorherrschenden Einzelstoffe bzw. Stoffgruppen sind TMB und Xylole. Ethylbenzol und Toluol, Styrol und Cumol treten nur untergeordnet auf. Benzol konnte nur in der Linerbohrung LB24 sowie in einer Probe der LB7 (geringfügig oberhalb der Nachweisgrenze) nachgewiesen werden.

MTBE und ETBE

MTBE wurde in insgesamt 13 Linerbohrungen untersucht. MTBE konnte in keiner der untersuchten Bodenproben nachgewiesen werden. ETBE wurde in Proben von insgesamt 6 Bohrungen untersucht. Lediglich in LB7 ergab sich ein positiver Befund. Die Konzentrationen in den Horizonten 7,3-7,8 m u. GOK

und 9,4-9,9 m u. GOK liegen mit 0,1 mg/kg knapp oberhalb der Nachweisgrenze.

PAK

Von den 28 Linerbohrungen wurden insgesamt 14 auf eine mögliche PAK-Belastung im Boden untersucht. Sofern PAK nachgewiesen wurden, liegen die Konzentrationen dieser Stoffgruppe in den meisten Bodenproben weit unterhalb von 1 mg/kg (ohne Naphthalin). Das Maximum der PAK (15) liegt bei 2,4 mg/kg (LB21, Grundwasserschwankungsbereich). Auch in LB13 wurden mehr als 1 mg/kg PAK (15) nachgewiesen. Hier beträgt die Konzentration 1,67 mg/kg. Für den Einzelstoff Naphthalin wurden nur in LB15 (max. 1,77 mg/kg) und LB21 (2,19 mg/kg) Konzentrationen oberhalb 1 mg/kg ermittelt. Die auffälligen PAK-Befunde decken sich mit den bekannten Quellbereichen.

TOC

Für den Parameter TOC liegen Ergebnisse aus insgesamt 10 Linerbohrungen vor. Dabei wurde vorwiegend der Grundwasserschwankungsbereich sowie ein weiterer Horizont in ca. 7-8 m u. GOK untersucht. Der TOC-Gehalt liegt in allen untersuchten Proben unterhalb von 0,5 Masse%. Hohe Gehalte sind für die Proben aus dem lokal auftretenden Torfhorizont zu erwarten. Dieser liegt jedoch weit unterhalb der schadstoffbelasteten Bodenhorizonte. Das erhöhte Schadstoffrückhaltevermögen dieser Schicht wird daher im vorliegenden Gutachten nicht weiter berücksichtigt.

5.2.6.3 Grundwasser

Übersichtspläne inklusive der nachgewiesenen MKW- und BTEX-Gehalte im Grundwasser können nach Tiefenlage gegliedert in Anlage 6 eingesehen werden.

Kohlenwasserstoffe

Mit Ausnahme von DP3 (westlich der Unterkünfte) und DP9 (südlich der Pumpstation 2, an der Straße) wurden an allen Sondierpunkten MKW im Grundwasser nachgewiesen. Belastungshotspots konnten in den Sondierungen DP8 (3.200 µg/l; südlich der Unterkünfte, an der Straße) und DP17 (8.100 µg/l; am östlichen Ende des Untersuchungsgebietes) ermittelt werden (Quellbereich Gleiswanne/ -trasse). Der obere Maßnahmenschwellenwert der LAWA (400 µg/l) wurde in den DP-Sondierungen südwestlich der beiden Pumpstationen (DP1, DP2, DP5, DP6, DP9) sowie unmittelbar entlang und im Grundwasserabstrom der Gleise (DP11, DP12, DP13, DP15) überschritten (KF 4). Zusätzlich sind hohe Konzentrationen im Bereich des alten Abscheiders vorhanden (DP18, KVF 119). Die höchsten MKW-Gehalte sind somit in den ausgewiesenen Quellbereichen (Vergleich Kapitel 2) und dem jeweiligen Abstrom zu finden. In den Randbereichen liegen die

Konzentrationen niedriger. Direkt südlich der Gleiswanne (DP14) ist die Schadstofffahne dabei weniger ausgedehnt als im Südwesten (DP11 und DP12). Eine laterale Abgrenzung der Schadstoffausbreitung auf der Liegenschaft ist nur für Teilbereiche erfolgt (siehe Kapitel 5.2.7.1).

Die jeweiligen Maximalkonzentrationen der Stoffgruppe der MKW sind im Wesentlichen im obersten Grundwasserabschnitt zu finden. Ausnahmen bilden hier die Sondierungen DP4, DP6 und DP11. Hier liegt der Schwerpunkt der Belastung in ca. 14-15 m u. GOK (DP4) bzw. 19-20 m u. GOK (DP6 und DP11).

Die MKW-Konzentration nimmt meist mit zunehmender Beprobungstiefe ab. In einigen Sondierungen nehmen die Schadstoffgehalte jedoch nicht kontinuierlich ab (siehe Beispiel DP10 in Tabelle 9, auffällige KW-Gehalte in 5-6 m sowie in 19-20 m u. GOK). Dies betrifft insbesondere die Sondierungen in bzw. nahe der Quellbereiche.

Tabelle 9: Schadstoff-Gehalte in der Sondierung DP10

Entnahmetiefe		BTEX	KW C5-9	KW C10-22	KW 22-40	KW C10-40
von	bis					
[m u. GOK]		[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]	[µg/l]
5	6	17,80	630,00	510,00	30,00	540,00
9	10	187,90	520,00	< 100	< 100	< 100
14	15	35,70	280,00	< 100	< 100	< 100
19	20	84,80	440,00	< 100	< 100	410,00
24	25	45,10	260,00	< 100	< 100	< 100
29	30	86,00	520,00	< 100	< 100	< 100

Mit Ausnahme der Proben aus DP2 (südlich Pumpstation 1), DP4 (südöstlich Pumpstation 2) und DP11 (westliches Ende des Untersuchungsgebietes) handelt es sich fast ausschließlich um kurzkettinge MKW (C10-C22).

Der Gehalt von leicht flüchtigen Kohlenwasserstoffen (C5-C9) wurde an Proben aus insgesamt 7, vorwiegend in den bekannten Quellbereichen befindlichen Sondierungen untersucht. Die Konzentrationen liegen z.T. weit oberhalb der Gehalte längerkettinger Kohlenwasserstoffe. C5-9 treten in unterschiedlichen Tiefenabschnitten auf, wobei die höchsten Konzentrationen nahe der Grundwasseroberfläche vorkommen. Hier werden zwischen 630 (DP10) und 10.000 µg/l (DP8) erreicht. Weitere Konzentrationsmaxima wurden in den Tiefenintervallen 19-20 m u. GOK und 29-30 m u. GOK festgestellt. Insgesamt deckt sich die laterale und vertikale Verteilung mit den Befunden der MKW mit Kettenlängen zwischen C10-C40.

BTEX

Die Schadstoffgruppe der BTEX wurde in allen Direct-Push-Sondierungen nachgewiesen. Die Konzentrationen schwanken dabei von $< 0,1 \mu\text{g/l}$ (Einzelprobe DP6-4 aus 19-20 m u. GOK; südwestlich Pumpstation 2) bis $3.578 \mu\text{g/l}$ (DP2-1 aus 5-6 m u. GOK; südlich Pumpstation 1). Im Wesentlichen liegen die Konzentrationen zwischen 50 und $200 \mu\text{g/l}$.

Die jeweiligen BTEX-Maximalwerte innerhalb der Direct-Push-Sondierungen überschreiten überwiegend den Maßnahmenschwellenwert und liegen in unterschiedlichen Tiefen vor. Südwestlich der Pumpstation 1, sowohl nördlich als auch südlich der Gleiswanne (DP1, DP2, DP8, DP15), sind die höchsten BTEX-Gehalte in den Sondierungen nahe der Grundwasseroberfläche (ca. 5-6 m u. GOK) ermittelt worden. Südlich der Pumpstation 2 liegt das Maximum bei ca. 9-10 m u. GOK (DP3, DP5, DP9), am westlichen Ende des Untersuchungsgebietes sowie am alten Abscheider liegen Maxima in noch größerer Tiefe vor (DP10-DP12, DP18). Einen Überblick zur vertikalen Schadstoffverteilung geben die Lagepläne in Anlage 6.

Die Einzelstoffbetrachtung der BTEX ergibt einen hohen Anteil an Xylenen und Trimethylbenzolen. Eine Verschiebung zu höheren Anteilen von Benzol liegt, insbesondere in den obersten Grundwasserproben, der Sondierungen DP2-DP5 (zwischen den Pumpstationen, KF 4), DP10-DP13 (westliches Ende des Untersuchungsgebietes, Quellbereich Gleistrasse), DP15, DP16 (südlich bzw. südwestlich der Gleiswanne, KF 4) und DP18 (nahe des alten Abscheiders, KVF 119) vor. Die betroffenen Sondierungen befinden sich alle innerhalb bzw. in unmittelbarer Nähe zu den Quellbereichen (Vergleich Kapitel 2).

BTEX konnten in Tiefen bis über 30 m u. GOK nachgewiesen werden. Für die Sondierungen DP5, DP9, DP10, DP11 und DP12 ergab die Analytik Konzentrationen oberhalb von $50 \mu\text{g/l}$ für den Tiefenabschnitt 29-30 m u. GOK. Diese Sondierungen liegen im südwestlichen Abschnitt des Untersuchungsgebietes. Eine laterale Abgrenzung der BTEX-Belastung im Grundwasser ist für die Ausdehnung Richtung Nordwesten (DP7) und Südosten (vorherige Untersuchungskampagnen) erfolgt.

MTBE/ETBE

Die MTBE-Konzentrationen liegen zwischen $< 1 \mu\text{g/l}$ und $13 \mu\text{g/l}$. Die höchsten MTBE-Gehalte sind in den Sondierungen an bzw. südwestlich der Gleisanlage festzustellen (z.B. DP8, DP12-DP14). ETBE wurde in 4 Sondierungen untersucht. Die Analytik ergab Konzentrationen unterhalb der Nachweisgrenze dieses Einzelstoffes.

PAK

Die Schadstoffgruppe der PAK wurde mit Ausnahme der Proben aus DP16 und den oberen Grundwasserproben der DP11 (bis 15 m u. GOK) in allen Sondierungen in mindestens einem Tiefenabschnitt nachgewiesen. Die PAK-

15-Gehalte (ohne Naphthalin) liegen zwischen $< 0,01 \mu\text{g/l}$ und $5,28 \mu\text{g/l}$ (DP5). Die Naphthalin-Konzentrationen liegen im Wesentlichen unterhalb von $20 \mu\text{g/l}$. Besonders hohe Werte wurden in den oberflächennahen (ca. 5-6 m u. GOK) Proben der Sondierungen südwestlich der Pumpstation 1 (DP1, DP2, DP8), südlich der Pumpstation 2 (DP9) und am östlichen Ende des Untersuchungsgebietes (DP17) nachgewiesen. Es sind also vorwiegend die bereits ermittelten Quellbereiche betroffen. In der DP17 wurde der höchste Naphthalin-Gehalt ermittelt ($163 \mu\text{g/l}$). Hier lagen noch keine Befunde aus früheren Untersuchungen vor. Der Einzelstoff Benzo(a)pyren ist nicht bzw. nur in geringen Konzentrationen im Grundwasser vorhanden. Das Maximum von $0,19 \mu\text{g/l}$ liegt in der DP5 (9-10 m u. GOK) vor.

5.2.7 Auswertungen und Interpretationen

5.2.7.1 Boden

Die TOC-Gehalte im Boden liegen unterhalb von 0,5 Masse%. Daher ist eine Schadstofffestlegung an organischer Substanz nur von untergeordneter Bedeutung. Das Rückhaltevermögen für Schadstoffe wird im Untersuchungsgebiet im Wesentlichen von der Korngrößenzusammensetzung des Bodens bestimmt, welche relativ homogen fein- bis mittelsandig ausgeprägt ist. Die Sande sind gut durchlässig (k_f bei ca. $2,0\text{-}2,5 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$). Weniger durchlässige stark schluffige Horizonte treten erst in Tiefen von ca. 9-10 m u. GOK auf.

Kohlenwasserstoffe / BTEX

Der KW-Index umfasst Verbindungen unterschiedlicher Mobilität. Die kurzkettigen Mineralölkohlenwasserstoffe (C10-22) besitzen eine höhere Mobilität als die langkettigen MKW (bis C40). Stärker lösliche und leicht flüchtige Kohlenwasserstoffverbindungen sind MKW-Verbindungen mit Kettenlängen von C5-9 sowie die Stoffgruppe der BTEX. Da der Anteil an C10-22 in den Bodenproben überwiegt, ist für die vorhandenen Schadstoffe eine erhöhte Mobilität anzunehmen. Das Transportverhalten im wassergesättigten Untergrund wird maßgeblich von der geringen Dichte der MKW bestimmt. Eine Verlagerung innerhalb des wassergesättigten Bodens erfolgt über Lösungsprozesse.

Die MKW-Gehalte im ungesättigten Boden lassen auf einen durch Niederschlag bedingten Transport von der unversiegelten Geländeoberfläche in das Grundwasser schließen. Die geringe Dichte der MKW bedingt eine Aufkonzentration dieser Stoffgruppe im Bereich der Grundwasseroberfläche. In größerer Tiefe nehmen die Gehalte deutlich ab. Die in einigen Bohrpunkten beobachtete größere vertikale Ausdehnung des mit MKW belasteten Bodenabschnitts könnte auf Effekte aus der laufenden Sanierungsmaßnahme zurückzuführen sein. Die betroffenen Bohrungen befinden sich alle in unmittelbarer Nähe zu den Förderbrunnen GWMS 11/13 (LB4), GWMS 12/13

(LB12), GWMS 4/12 und 5/12 (LB16), GWMS 1/12-3/12 (LB17) sowie GWMS 16/13 (LB24). Die in diesen Teilbereichen des Untersuchungsgebietes durch die Grundwasserförderung induzierte Grundwasserabsenkung könnte für einen größeren Grundwasserschwankungsbereich und somit für eine Verlagerung von MKW über einen größeren Bodenabschnitt verantwortlich sein. Die Lage der Förderbrunnen wurde jedoch auch so gewählt, dass sie sich im Bereich der höchsten Schadstoffkonzentrationen befinden. Es ist daher zu vermuten, dass die größere vertikale Ausdehnung der Schadstoffe in Zusammenhang mit der Schadstoffmenge und ggf. einer lokal auftretenden Leichtphase (Überstau Produktphase) steht.

Die in der LB24 beobachtete Zunahme der MKW-Konzentrationen mit der Tiefe ist im Hinblick auf das Transportverhalten von MKW als auffällig zu bewerten. Der Bodenaufbau in dieser Bohrung weicht nicht wesentlich von dem der umliegenden Sondierpunkte ab, jedoch befindet sich der Bohrpunkt in unmittelbarer Nähe zur Gleiswanne. Es ist denkbar, dass die Gleiswanne eine Beschädigung aufweist und somit MKW in größere Tiefen eingedrungen sind.

Insgesamt sind mehrere Hot-Spots bezüglich MKW im Boden des Untersuchungsgebietes erkennbar. Diese befinden sich:

- südlich der Gleiswanne in LB24 (KF 4, mit erneutem Auftreten höherer MKW-Belastung in der Tiefe),
- am westlichen Ende der Gleise bei LB16 (Quellbereich Gleistrasse),
- südlich der Pumpstation 2 bei LB 11 und LB13,
- westlich der Pumpstation 1 bei LB3 (Quellbereich Leitungsschaden, KF 4),
- am östlichen Bahnsteig bei LB26 (Quellbereich Gleistrasse),
- und nahe des Abscheiders bei LB29 (KVF 119).

In diesen Hot-Spots, welche zusammengekommen eine Fläche von ca. 3.500 m² umfassen, werden in Einzelproben des Grundwasserschwankungsbereichs (bei ca. 3,5-5,5 m NHN) bei 4.000 bis > 10.000 mg/kg MKW erreicht. BTEX-Konzentrationen > 10 mg/kg werden in Einzelproben auf einer Fläche von ca. 2.800 m² erreicht. Insbesondere im Umfeld der Bohrungen LB16, LB24 und LB29 ist aufgrund des Konzentrationsniveaus im Boden von dem Vorhandensein eines Leichtphasenkörpers auszugehen. Von den Quellbereichen ausgehend, ist lateral eine wesentliche Verringerung der Belastung mit MKW im Grundwasserschwankungsbereich erkennbar. Die Fläche des in diesem Tiefenabschnitt (ca. 2,5-4,5 m NHN) mit ca. 1.000 bis 4.000 mg/kg MKW beaufschlagten Bodens beträgt weitere ca. 4.000 m².

Dass es sich bei den oben genannten Quellbereichen um separate Eintragsorte von MKW handelt, wird durch Befunde wie in LB8 (maximal 110 mg/kg), LB27 (380 mg/kg) und LB28 (1.100 mg/kg) deutlich, welche jeweils genau zwischen zwei Hot-Spots gelegen sind. Die Geländeschnitte in Anlage 4 verdeutlichen die Schadstoffverteilung westlich der Pumpstation 1 (Schnitt C-C'), südlich der Pumpstation 2 (Schnitt A-A') und auf Höhe der Unterkünfte (Schnitt B-B') jeweils in von Norden nach Süden verlaufender Ausrichtung.

Eine laterale Abgrenzung der Hauptschadstoffbelastung mit MKW im oberen wassergesättigten Boden ist mit der vorliegenden Untersuchung für die Quellbereiche erfolgt. Die jeweilige Schadstoffausdehnung in den Tiefenabschnitten oberhalb, innerhalb und unterhalb des Grundwasserschwankungsbereiches ist in Anlage 6 erkennbar. Die vertikale Abgrenzung ist ab einer Tiefe von ca. 9-10 m u. GOK erreicht. In den Bohrungen südlich der Pumpstation 1 (LB2, LB3, LB5, LB6), am westlichen (LB16) und östlichen (LB21 und LB24) Ende der Gleisanlage bzw. -wanne sind MKW noch bis 10 m u. GOK in Konzentrationen von bis zu 59 mg/kg (LB24) nachweisbar. Die Maximalkonzentrationen sind auf den Grundwasserschwankungsbereich in einem ca. 1 m umfassenden Tiefenintervall beschränkt. Aufgrund der geringen MKW-Konzentrationen innerhalb der wasserungesättigten Zone ist hier nicht von einem relevanten Austrag von MKW in größere Tiefen auszugehen.

Der Schwerpunkt der C5-9 liegt südlich der Pumpstation 1 (LB 5, LB6 und LB24). Somit bestätigen die Befunde die ausgewiesenen Belastungsschwerpunkte.

MTBE/ ETBE

Im Untersuchungsgebiet wurden MTBE und ETBE nur in sehr geringen Mengen in einzelnen Bodenproben nachgewiesen. Es bestehen keine Hinweise auf einen relevanten Eintrag dieser Stoffe in das Grundwasser.

PAK

Lediglich am westlichen Ende (LB15) und südlich der Gleiswanne (LB21) wurden PAK bzw. Naphthalin in Konzentrationen nachgewiesen, die den unteren (bei LB21 auch den oberen) Prüfwert gemäß LAWA überschreiten. Insgesamt kommen PAK im Boden der Liegenschaft nur untergeordnet vor.

5.2.7.2 Grundwasser

Der wassergesättigte Boden besteht im Wesentlichen aus Fein- bis Mittelsand mit einem Durchlässigkeitsbeiwert von $1,93-2,63 \cdot 10^{-4}$ m/s. Es sind lokal schluffige und kiesige Horizonte sowie geringmächtige Torfe ausgebildet. Durchgängige Stauhorizonte wurden bis 10 m u. GOK nicht angetroffen, somit ist eine Verlagerung vorhandener Schadstoffe innerhalb des wassergesättigten Bodens sowohl vertikal als auch in Grundwasserfließrichtung zum Vorfluter Unterweser möglich. Der laufende

Pumpbetrieb an den Förderbrunnen der seit 2016 betriebenen Sanierungsanlage verhindert den ungehinderten Abstrom des schadstoffbelasteten Grundwassers von der Liegenschaft.

Kohlenwasserstoffe / BTEX

Wie aufgrund der geringeren Dichte der MKW zu erwarten, sind die höchsten MKW-Gehalte im obereren Bereich des Grundwassers anzutreffen. Die Schwerpunkte der Belastung im Grundwasser decken sich mit den Bodenbelastungen. So sind am östlichen Ende des Untersuchungsgebietes (DP17), am alten Abscheider (DP18) und am westlichen Ende der Gleise (DP11) besonders hohe MKW-Gehalte nachgewiesen worden. Die in der Nähe der Gleiswanne befindliche DP15 weist zwei Tiefenintervalle mit $> 1.000 \mu\text{g/l}$ MKW auf. Dies deckt sich mit den Ergebnisse aus der Linerbohrung LB24, in der ebenfalls zwei ausgeprägte Konzentrationsmaxima (bei 2,65-5,00 m und 7,20-7,77 m) für MKW festgestellt wurden. Die Konzentrationsmaxima sind nicht durch einen Schichtenwechsel begründet, sondern treten innerhalb eines Bodenhorizontes auf.

Betrachtet man die jeweiligen Anteile kurz- und langkettiger MKW, wäre ein höherer Anteil von schwerer löslichen, langkettigen MKW an der Grundwasseroberfläche zu erwarten. In den DP2, DP6, DP11 und DP15 liegen jedoch überwiegend kurzkettige MKW in der Nähe der Grundwasseroberfläche und die langkettigen in größerer Tiefe vor. Diese Sondierungen befinden sich in den bereits ausgewiesenen Hot-Spots. Hier ist somit von einer Eintragsquelle von MKW in größerer Tiefe auszugehen, da das Verteilungsmuster im Grundwasser allein durch niederschlagsinduzierte Transporte innerhalb des wassergesättigten Bodens nicht zu erklären ist. Der Leitungsverlauf der Treibstoffleitungen (vor 1970) von den Behälterblöcken 11-15 in Richtung der Pumpstation 2 befindet sich in unmittelbarer Nähe zu LB 15. Es könnte sich an dieser Stelle somit um eine lokale Belastung durch einen Leitungsschaden handeln, der aufgrund der größeren Tiefe vom Quellbereich der beschädigten Gleiswanne zu trennen ist.

Die mit MKW belasteten Grundwasserbereiche sind, wie Anlage 6 zu entnehmen, in der Tiefe abgegrenzt worden. Auch lateral ist eine Abgrenzung der Schadstofffahne erfolgt.

Südlich der Pumpstation 2 und am westlichen Rand des Untersuchungsgebietes konnte die MKW-Belastung aktuell in der Tiefe nicht vollständig abgegrenzt werden. In der Nähe der Gleisanlagen liegt vorwiegend eine oberflächennahe MKW-Belastung vor.

Wie in den tiefenbezogenen Darstellungen der BTEX- und MKW-Gehalte ersichtlich (Anlage 6) treten beide Schadstoffgruppen im oberen Grundwasserleiter vorwiegend südwestlich der Pumpstation 1, südlich der Pumpstation 2 sowie entlang der Gleise und am alten Abscheider auf. Es ist somit anzunehmen, dass ein BTEX-Eintrag aus mehreren Quellen erfolgt ist. Mit zunehmender Tiefe nehmen die Konzentrationen der mobileren BTEX

entlang der Gleisanlage stark ab, bzw. diese Stoffgruppe ist nicht mehr nachweisbar. Im Südwesten des Untersuchungsgebietes konnten bis in die jeweilige Endtiefe der Sondierungen hohe Konzentrationen von BTEX ermittelt werden (DP10 - DP12). Somit findet im Abstrom der ermittelten Quellbereiche eine Verlagerung der Schadstoffe in die Tiefe statt. Vermutlich ist dies durch einen zunehmenden hydraulischen Gradienten in Grundwasserfließrichtung bedingt.

Der hohe Anteil von Xylolen und Trimethylbenzolen an der Gesamtkonzentration der BTEX sowohl im Boden als auch im Grundwasser kann auf die schlechte biologische Abbaubarkeit dieser Stoffe zurückgeführt werden. Der Einzelstoff Benzol ist nur dort vorherrschend, wo die Konzentration der BTEX insgesamt sehr hoch ist (Grundwasserschwankungsbereich bzw. im oberen Grundwasserabschnitt), d.h. der biologische Abbau durch die Schadstoffbelastung vermutlich gebremst wird.

MTBE/ETBE

MTBE wurde im Grundwasser nur untergeordnet festgestellt. Die höchste Konzentration wurde in der DP15 nachgewiesen. Hier liegt die MTBE-Konzentration bei 13 µg/l und damit oberhalb des für das Grundwasser bestehenden Geringfügigkeitsschwellenwertes der LAWA (5 µg/l). Ein Eintrag von ETBE ist nicht festzustellen. Das Verteilungsbild der MTBE im Grundwasser hat sich gegenüber früheren Untersuchungen wenig verändert. Die MTBE-Fahne erstreckt sich von der Pumpstation 1 in Richtung Südwesten bis über die Liegenschaftsgrenze hinaus. Das Konzentrationsniveau im Bereich des Verladebahnhofs hat gegenüber 2014 [5] deutlich abgenommen. Aufgrund seiner persistenten Eigenschaften ist ein Weitertransport in Abstromrichtung anzunehmen.

PAK

Die Schadstoffgruppe der PAK tritt im oberflächennahen Grundwasser flächendeckend in Konzentrationen weit oberhalb der Prüfwerte der BBodSchV bzw. Geringfügigkeitsschwellenwerte der LAWA auf. Schwerpunkte befinden sich an den für die Schadstoffgruppen der MKW und BTEX ermittelten Hot-Spots, insbesondere im Abstrom der Pumpstation 1 und am westlichen Ende der Gleisanlage.

PAK sind gegenüber den Schadstoffgruppen der BTEX und MKW nur untergeordnet vorhanden. Trotz der Überschreitung der Geringfügigkeitsschwellenwerte, sind PAK im Hinblick auf die vorhandenen Schadstoffmengen und den konkreten Handlungsbedarf von geringerer Bedeutung. Die PAK werden auch bei ggf. späteren, alternativen Sanierungsverfahren mit erfasst, da sie mit den BTEX- und MKW-Belastungen in der Lage identisch sind.

5.2.7.3 Massenschätzung

Die folgende Massenschätzung stellt lediglich eine grobe Abschätzung unter Vereinfachung der vorliegenden Schadstoffgeometrie dar. Die ermittelte Schadstoffmenge der MKW ist als Maximalwert anzusehen, da sich die Restsättigung auf die Summe der Schadstoffe bezieht und sich die Schadstoffzonen der MKW und BTEX im Untersuchungsgebiet überschneiden.

Im Untersuchungsgebiet können die oberen 2,5 m u. GOK als unbelastet angenommen werden. Die MKW- und BTEX-Beaufschlagung beschränkt sich im Wesentlichen auf den Tiefenabschnitt von 2,5-5,0 m u. GOK (Grundwasserschwankungsbereich) in Abhängigkeit von der Geländehöhe, wobei der Schwerpunkt auf ein Tiefenintervall von ca. 1 m beschränkt ist.

Die Flächengröße des stark mit MKW belasteten Bodens beträgt ca. 3.500 m² bei einer durchschnittlichen Konzentration von ca. 5.000 mg/kg. Weitere 4.000 m² sind mit durchschnittlich ca. 2.000 mg/kg MKW beaufschlagt.

Es ergibt sich für den Grundwasserschwankungsbereich eine maximale Schadstoffmenge von ca.:

3.500 m² Fläche x 1 m Mächtigkeit x 9 kg/m³ Restsättigung = 31,5 t (Dichte Boden: 1,8 t/m³)

Bei MKW-Gehalten oberhalb der Restsättigungskonzentrationen ist die Ausbildung einer freien Ölphase anzunehmen. Hiervon sind insgesamt ca. 1.000 m² Fläche betroffen. Die Höhe wird mit 0,01 m angenommen, was bei einem Porenanteil von 25% etwa 2,5 m³ Phase entspricht.

Es ergibt sich für den Leichtphasenanteil eine Schadstoffmenge von ca.:

1.000 m² Fläche x 0,01 m Mächtigkeit x 0,25 x 1 t/m³ = 2,5 t (Dichte Öl: angenommen mit 1 t/m³)

Insgesamt ergibt sich überschlägig eine Schadstoffmenge von ca. 35 t.

6. Empfehlungen für das weitere Vorgehen

6.1 Kontaminierte Flächen

Die Untersuchungsergebnisse der Linerbohrungen, Direct-Push-Sondierungen und Bodenluftmessungen haben ergeben, dass sowohl die Schadstoffbelastung im Boden als auch im Grundwasser in westlicher, östlicher und südlicher Richtung nicht vollständig abgegrenzt sind. Hier sollten weitergehende Untersuchungen insbesondere östlich der LB 25 und südlich der LB 21 erfolgen, um eine hinreichende Abgrenzung zu ermöglichen. Im

Süden des Untersuchungsgebietes ist die Ausdehnung der Grundwasserbelastung über die Liegenschaftsgrenze hinaus bekannt. Die in den vorangegangenen Untersuchungen ausgewiesenen Quellbereiche wurden mit den vorliegenden Ergebnissen bestätigt und insbesondere tiefenorientiert abgegrenzt.

Die seit dem Jahr 2016 laufende Sanierungsmaßnahme am Verladebahnhof 1 verhindert derzeit ein weiteres Abströmen der Schadstoffe von der Liegenschaft. Der Abschluss einer Sanierung über die fortlaufende Förderung und Reinigung des Grundwassers im aktuellen Umfang wird jedoch voraussichtlich Jahrzehnte in Anspruch nehmen.

Auf Basis der aktuellen Untersuchungen sind alternative Verfahren zur Sanierung der Schadstoffbelastung im Untersuchungsgebiet möglich. Ziel einer solchen alternativen Sanierungsmaßnahme wäre die Beseitigung der Schadstoffquellen, welche in der Tiefe vorliegen. Dafür kommen verschiedene Verfahren in Frage.

Mögliche Maßnahmen umfassen z.B. ISCO- (in-situ chemical oxidation) oder ISBO-Verfahren (in-situ biological oxidation). Sollte ein solches ENA-Verfahren (enhanced natural attenuation) angestrebt werden, so wären weitere, umfangreiche Untersuchungen am Standort erforderlich, da zusätzliche Parameter, wie beispielsweise der Schwermetallgehalt und das Vorhandensein geeigneter Mikroorganismen überprüft werden müssten. Für ein ENA-Verfahren ist, wie sich bei Vorversuchen im Abstrom der Liegenschaft bereits gezeigt hat, eine gezielte Zuführung von Mikroorganismen oder Substanzen (Nährstoffe, pH-Anpassung), die den Abbau beschleunigen, erforderlich. Zur Injektion und Überwachung der Maßnahme könnten z.T. bereits bestehende Grundwassermessstellen genutzt werden, die um weitere Injektionsbrunnen zu ergänzen wären. Es wäre zu prüfen ob der biologische Abbau der vorhandenen Schadstoffe von den z.T. sehr hohen Kohlenwasserstoffkonzentrationen und den lokal erhöhten PAK-Gehalten gehemmt würde.

Eine weitere Option stellt ein gezielter Bodenausbau im Bereich der Schadstoffquellen dar. Die Aushubtiefe beträgt dabei je nach Geländehöhe 4-7 m. Der Bodenausbau wäre unter Betrieb einer Wasserhaltung mit anschließender Grundwasserreinigung durchzuführen (Synergien mit bestehender Sanierungsanlage wären zu prüfen). Die MKW-, BTEX- und PAK-Belastungen, welche lokal begrenzt in größeren Tiefen des Grundwassers nachgewiesen wurden, könnten z.B. mit Großlochbohrungen gezielt erfasst werden. Weitere Untersuchungen an den Randbereichen des Untersuchungsgebietes wären in Verbindung mit dem Bodenaustausch überall dort durchzuführen, wo die Ausdehnung der schadstoffbeaufschlagten Boden- und Grundwasserabschnitte nicht vollständig bekannt ist.

Alternative In-situ-Verfahren für Schadstoffbelastungen in der gesättigten Bodenzone umfassen z.B. die Dampf-Luft-Injektion, welche die Schadstoffe im gesättigten Boden in die Gasphase überführt. Die Entfernung der

gasförmigen Schadstoffe aus dem ungesättigten Boden erfolgt dann über eine Bodenluftabsaugung. Gleichzeitig ergänzt die hydraulische Sicherung die Maßnahme durch eine Aufbereitung des Grundwassers vor der Ableitung. Zur Reichweitenabschätzung der Injektionsbrunnen und Bodenluftabsaugung sind vorab Pumpversuche und Gastracer-Versuche durchzuführen.

6.2 Liegenschaft

Die Betrachtung der Gesamtliegenschaft entfällt.

7. Zusammenfassung

Die vorliegende Detailuntersuchung ist als Ergänzung zu den bereits vorhandenen Untersuchungsergebnissen zu verstehen. Die Ergebnisse haben insgesamt fünf separate Eintragsorte von Schadstoffen ergeben, wobei Schwerpunkte im Bereich der PS1 und der Verladegleise liegen.

Die Quellbereiche sind lateral und tiefenbezogen erfasst. Eine auf die Liegenschaft bezogene Abgrenzung der Schadstoffausbreitung im Boden ist in westlicher, östlicher und südlicher Richtung noch nicht komplett erfolgt. Auch steht eine tiefenbezogene Abgrenzung für die Bereiche südlich der Pumpstation 1 sowie für das westliche und östliche Ende der Gleisanlage aus. Weitergehende Untersuchungen dieser Teilbereiche wären jedoch erst im Rahmen weiterer, über den aktuellen Umfang der Sanierung hinausgehende Maßnahmen, sinnvoll.

Der Grundwasserschwankungsbereich ist über eine Fläche von insgesamt ca. 7.500 m² mit hohen bis sehr hohen MKW- und BTEX Konzentrationen belastet. Der vorhandene Schadstoffvorrat beträgt für diese beiden Stoffgruppen etwas mehr als 50 t.

Zur Verminderung des Schadstoffvorrats am Verladebahnhof 1 wäre ein Bodenaustausch in den Quellbereichen möglich, wobei großflächiger offener Bodenaushub mit dem Verfahren der Großlochbohrungen je nach Aushubtiefe zu kombinieren wäre. Eine Reinigung des geförderten Wassers für die im Rahmen des Aushubs benötigte Grundwasserabsenkung würde eine erneute Beaufschlagung des neu eingebauten, unbelasteten Bodens verhindern.

Weitere mögliche Maßnahmen zur Optimierung der laufenden Grundwassersanierung umfassen Verfahren der Enhanced Natural Attenuation (ISCO, ISBO). Alternativ kann für MKW und BTEX auch eine Dampf-Luft-Injektion durchgeführt werden. Hier sind jedoch Kosten für weitere Untersuchungen der benötigten Randbedingungen und die technische Umsetzung (z.B. Injektionsbrunnen, Absauganlagen) zu planen.

8. Literatur-/ Quellenverzeichnis

[1]-[11] sind dem Textteil des Berichtes zu entnehmen

- [12] Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG), 17.03.1998, BGBl. I 1998.
- [13] Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV), 12.07.1999, BGBl. I 1999.
- [14] Baufachliche Richtlinien Boden- und Grundwasserschutz (BFR BoGwS), Merkblatt zur Dokumentation der Erfassung im Rahmen der Phase I, A-1.2-1, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) und des Bundesministeriums der Verteidigung (BMVg), Juni 2010
- [15] Geologische Karte von Niedersachsen M 1: 25.000 Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG), Geozentrum Hannover, NIBIS Kartenserver
- [16] Ingenieurgeologische Karte von Niedersachsen M 1: 50.000 Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG), Geozentrum Hannover, NIBIS Kartenserver
- [17] Hydrogeologische Karte von Niedersachsen M 1: 50.000 Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG), Geozentrum Hannover, NIBIS Kartenserver
- [18] Lage von Schutzgebieten, Umweltkarten-Niedersachsen, Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz, GlobalNetFXUmweltkarten
- [19] Orientierende Hinweise für flüchtige Stoffe in der Bodenluft nach LABO: Bewertungsgrundlagen für Schadstoffe in Altlasten Informationsblatt für den Vollzug; des Ständigen Ausschuss Altlasten der Bund/ Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO), Stand 1.9.2008.

Bearbeiter:



i.V. O. Böcker (Dipl.-Geol.)



N. Schroth (M.Sc. Geowiss.)

Sachverständiger für Bodenschutz und Altlasten nach §18
Bundes-Bodenschutzgesetz
Öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger für
Kontaminationen von Boden-, Bodenluft und Grundwasser