# Hydraulischer Bereich HB 16 Rath/Derendorf

# Am Gatherhof 41 Frigen-Schaden

# - Variantenscan Sanierung -

**Auftraggeber:** Stadt Düsseldorf, Umweltamt, Brinckmannstraße 7, 40225 Düsseldorf

**Auftragnehmer:** BFM Umwelt GmbH, Germaniastraße 21, 40223 Düsseldorf

**Projekt-Nr.:** P160802

**Bericht-Nr.:** B160802-02-17-2B_barrierefrei

**Seitenzahl:** 34 Seiten

**Anlagenzahl:** 3 Anlagen

Düsseldorf, den 19.09.2018

J. Weindl

Sachverständiger nach §18 BBodSchG

i.A. Dr. M. Wolf

# Inhaltsverzeichnis

1 Aufgabenstellung ....3
2 Literatur und verwendete Unterlagen ....4
3 Rahmenbedingungen am Untersuchungsstandort ....6
3.1 Hydrogeologische Bedingungen ....6
3.2 Hydraulische Bedingungen ....6
3.3 Hydrochemische Bedingungen ....8
3.4 Schadstoffverteilung ....9
3.5 Schadstoffinventar ....14
3.6 Bisherige und zukünftige Nutzung ....14
4 Bisherige Maßnahmen ....16
4.1 Durchgeführte Untersuchungskampagnen ....16
4.2 Durchgeführte Sanierungsmaßnahmen ....16
5 Variantenbetrachtung ....18
5.1 Hydraulische Sanierung ....18
5.1.1 Variante H1: Aktuell laufende hydraulische Sicherung ....18
5.1.2 Variante H2: Optimierung der hydraulischen Sanierung ....20
5.1.3 Variante H3: Zirkulationsbrunnen ....22
5.2 Dekontaminationsmaßnahmen ....25
5.2.1 Variante D1: Bodenaushub ....25
5.2.2 Variante D2: Thermische Verfahren ....27
5.2.3 Variante D3: Air Sparging ....29
5.2.4 Variante D4: Biologische Verfahren ....29
5.2.5 Variante D5: Chemische Verfahren ....30
6 Zusammenfassende Beurteilung der Varianten ....31
7 Empfehlungen zum weiteren Vorgehen ....33
8 Anlagen ....34

# 1 Aufgabenstellung

Im Hydraulischen Bereich HB 16 liegen im Nordteil des Grundstücks Am Gatherhof 41 in den Kompartimenten Boden und Grundwasser erhebliche Belastungen mit Trichlorfluormethan (Frigen R11) vor. Sowohl im quartären als auch im tertiären Aquifer ist das Grundwasser mit Frigen beaufschlagt.

Die BFM Umwelt GmbH Beratung-Forschung-Management (BFM) wurde am 11.08.2017 vom Umweltamt der Stadt Düsseldorf (UAD) mit der Erarbeitung eines Sanierungsvariantenscans für den Frigen-Schadens im Bereich des Eintragsgrundstücks Am Gatherhof 41 beauftragt (A160802-NA03A). Dabei sollen die über die derzeit laufende Pump-and-Treat hinausgehenden technischen Möglichkeiten einer Sanierung dieses tiefliegenden Frigen-Schadens untersucht, dargestellt und bewertet werden

Im vorliegenden Bericht werden zunächst die bisher vorliegenden Untersuchungsergebnisse zum Schadensfall hinsichtlich der Hydrogeologie, Hydraulik und Hydrochemie aufbereitet und ausgewertet. Unter Berücksichtigung der ausgewerteten Ergebnisse wird in diesem Bericht eine Zusammenstellung und Bewertung von möglichen Sanierungsvarianten sowie eine Abschätzung der Kosten vorgenommen.

# 2 Literatur und verwendete Unterlagen

/1/ Geologisches Landesamt Nordrhein-Westfalen: „Geologische Karte Nordrhein-Westfalen 1:100.000, C4706 Düsseldorf Essen.“ Krefeld, 1980

/2/ Hydraulischer Bereich HB 16: „Projektdatenbank.“

/3/ ahu AG Wasser Boden Geomatik: „HB16: Auswertung der Direct-Push-Untersuchungen auf dem Gelände PAGUAG.“ Aachen, 17.01.2007

/4/ Fugro Consult GmbH: „Kurzbericht Auswertung der Direct-Push-Untersuchungen auf dem Gelände C.F.Gomma (April 2008).“ Aachen, 05.05.2008

/5/ Fugro Consult GmbH: „Bericht Auswertung der Direct-Push- und MIP-Untersuchungen auf dem Gelände Am Gatherhof 41 (Nov./Dez. 2008).“ Aachen, 28.01.2009

/6/ Reducta GmbH, Beratende Ingenieure: „B-Plan 5781/038 Nördlich Westfalenstraße. Industriehistorische Nutzungsrecherche.“ Düsseldorf, 23.03.2011

/7/ Reducta GmbH, Beratende Ingenieure: „B-Plan 5781/038 Nördlich Westfalenstraße - Ergänzende Detailuntersuchung Gesamtfläche.“ Düsseldorf, 18.10.2016

/8/ Reducta GmbH, Beratende Ingenieure: „B-Plan 5781/038 Nördlich Westfalenstraße - Ergänzende Detailuntersuchung Frigen-Schaden Gebäude R.“ Düsseldorf, 02.09.2016

/9/ HPC AG: „Prüfgutachten zum Sanierungskonzept REDUCTA GmbH (2016) sowie Neubewertung von Analysendaten im Zusammenhang mit dem B-Plangebiet (B5781/38) „Nördlich Westfalenstraße“ Nordteil C.F. GOMMA-Gelände Stadtgebiet Düsseldorf-Rath.“ Duisburg, 16.03.2017

/10/ HPC AG: „Fachgutachterliche Bearbeitung von schädlichen Bodenveränderungen und davon ausgehenden Grundwasserverunreinigungen im Stadtgebiet Düsseldorf. LOS 2, HB16, Düsseldorf-Rath / Derendorf; Teilbereich Grundstück Am Gatherhof 41; Jahresbericht 2016.“ Duisburg, 27.04.2017

/11/ HPC AG: „Fachgutachterliche Bearbeitung von schädlichen Bodenveränderungen und davon ausgehenden Grundwasserverunreinigungen im Stadtgebiet Düsseldorf. LOS 2, HB16, Düsseldorf-Rath / Derendorf; Jahresbericht 2016.“ Duisburg, 21.06.2017

/12/ Terra-, Aqua- und Sanierungskompetenzzentrums – TASK: „Leitfaden Thermische in situ-Sanierungsverfahren (TISS) zur Entfernung von Schadensherden aus Boden und Grundwasser.“ Leipzig, 2012.

/13/ BFM Umwelt GmbH: „Hydraulischer Bereich 55 Eller / Bilk; Erlebnisbericht zum Pumpversuch an der tertiären Grundwassermessstelle 14563T am Rangierbahnhof Eller.“ Bericht Nr. B0001-02-11-4A; Düsseldorf; 19.07.2017.

/14/ Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA): „Empfehlung für die Erkundung, Bewertung und Behandlung von Grundwasserschäden.“1994

# 3 Rahmenbedingungen am Untersuchungsstandort

## 3.1 Hydrogeologische Bedingungen

Gemäß vorliegender geologischer Kartenwerke /1/ befindet sich der Untersuchungsstandort im Bereich der holozänen Niederterrasse des Rheins. An der Oberfläche finden sich hier quartäre sandig-tonige Hochflutlehme, die von sandig-kiesigen Lockersedimenten unterlagert werden. Darunter folgende die feinsandigen Ablagerungen des Tertiärs (Grafenberger Schichten).

Der geologische Aufbau im Bereich des Frigen-Schadens kann im Detail wie folgt skizziert werden: Unter einem Auffüllungshorizont mit Einlagerungen von Beton und Ziegelbruch bis in eine maximale Tiefe von 1,5 m u. GOK folgen bis zu einer Tiefe von 12 – 14,5 m u. GOK z.T. kiesige Fein- bis Grobsande der quartären Terrassenablagerungen. Bis zu einer Tiefe von ca. 15,5 m u. GOK nimmt der Anteil an Kiesen deutlich zu. Darunter folgen bis zu einer Tiefe von mindestens 30 m u. GOK (max. Bohrendteufe) die feinsandigen Sedimente des Tertiärs, die bisher am Standort nicht durchteuft wurden.

Einige typische Schichtenprofile im Bereich des Frigen-Schadens sind aus Anlage 3 zu entnehmen.

Der Grundwasserflurabstand im Projektgebiet beträgt im langjährigen Mittel ca. 6,5 m u. GOK /2/.

## 3.2 Hydraulische Bedingungen

Im Zuge von langjährigen Stichtagsmessungen lässt sich für den Untersuchungsstandort eine großräumige natürliche Grundwasserfließrichtung nach West-Südwest ableiten (siehe Abbildung 3-1). Abstromig zum Grundstück Am Gatherhof wird eine westliche bis westnordwestliche Fließrichtung beobachtet.

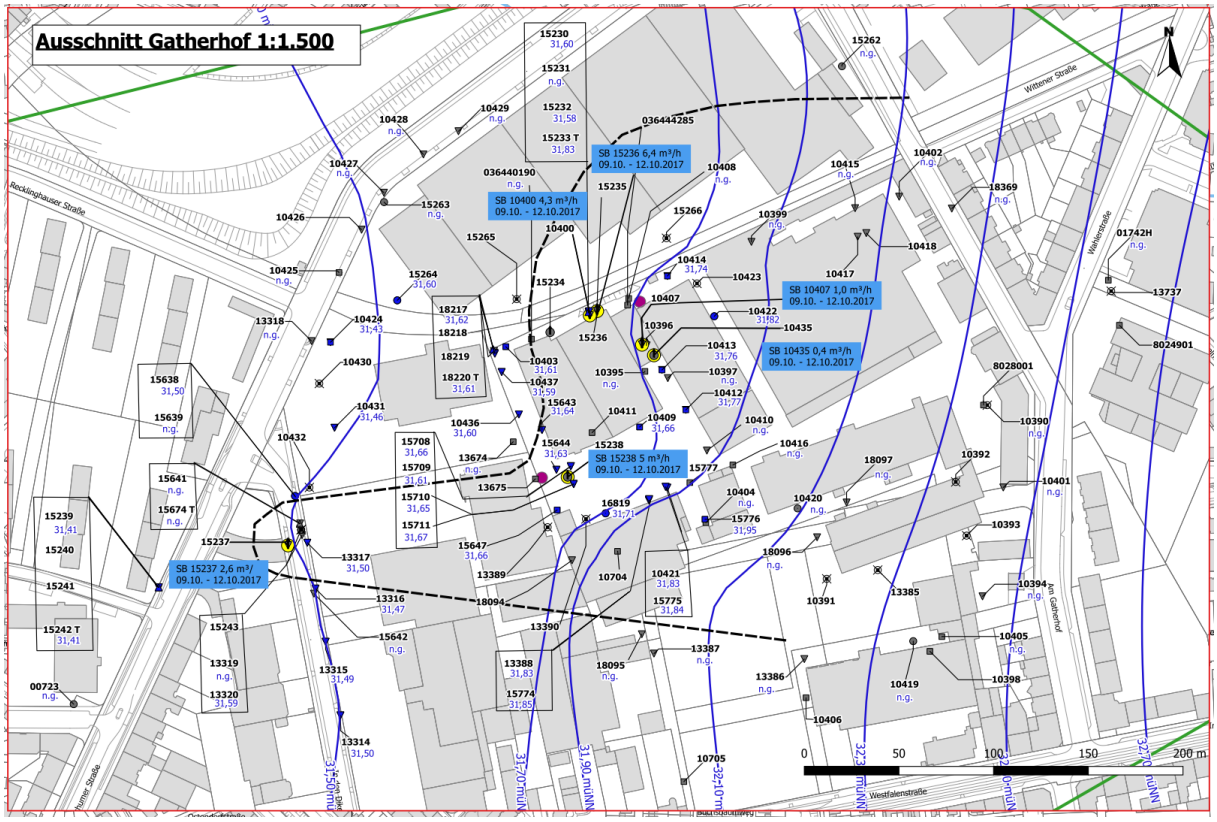



Abbildung 3-1: Grundwassergleichenplan Stichtagsmessung Oktober 2017

Auf dem Gelände Am Gatherhof 41 wird die gegebene Grundwasserfließrichtung durch die Grundwasserentnahmen der in Betrieb befindlichen Sanierungsbrunnen (SB 10400, SB 10407, SB 10435, SB 15236, SB 15238) hydraulisch beeinflusst (siehe Abbildung 3-1). Im Bereich des Frigen-Schadens werden aktuell zwei Entnahmebrunnen (SB 15237: Sollförderrate 5m³/h; SB 15238: Sollförderrate 5 m³/h) betrieben.

Im Jahr 2017 betrug das hydraulische Gefälle über das Grundstück Am Gatherhof 41 ca. 0,0028 m/m. Eine lokale Versteilung des natürlich anzutreffenden Gefälles tritt nur kleinräumig im Umfeld der Entnahmebrunnen auf, mit entsprechend ausgebildeten Entnahmetrichtern.

Die durchschnittliche Abstandsgeschwindigkeit im HB 16 kann im Quartär mit 0,3 m/d angegeben werden /11/.

Aus Korngrößenanalysen im Bereich des Frigen-Schadens wurde an der Basis des Quartärs, an der Oberkante des Tertiärs sowie im tieferen Tertiär kf-Werte abgeleitet. Die Ergebnisse können der Tabelle 3-1 entnommen werden.

Tabelle 3-1: Übersicht der kf-Werte aus Korngrößenanalysen

| | Basis Quartär | Oberkante Tertiär | tieferes Tertiär |
|---|---|---|---|
| kf-Werte in m/s | 1,84 - 3,91 x $10^{-3}$ | 6,37 – 7,1 x $10^{-6}$ | 6,16 x $10^{-6}$ |

## 3.3 Hydrochemische Bedingungen

Nachfolgend soll auf den allgemeinen Grundwasserchemismus am Untersuchungsstandort eingegangen werden, wobei auf Parameter abgestellt wird, die im Falle von technischen und oder mikrobiellen Sanierungsmaßnahmen u.E. wichtig erscheinen. Auf das Schadstoffspektrum wird in Abschnitt 3.4 eingegangen.

### Relevante Parameterübersicht

Die nachfolgende Tabelle 3-2 zeigt ausgewählte hydrochemische Parameter aus den Sanierungsbrunnen SB 15237 und SB 15238.

Tabelle 3-2: Hydrochemische Daten SB 15237 und SB 15238 (minimale und maximale Messwerte; Quelle: Projektdatenbank HB 16, /2/)

| Parameter | Brunnen 15237 | Brunnen 15238 |
|---|---|---|
| pH-Wert | 6,7 – 8,2 | 6 - 8 |
| Sauerstoff (mg/l) | 0,4 – 6,8 | 0,8 – 5,7 |
| Redoxspannung (mV) | 250 - 480 | 270 - 470 |
| Eisen (mg/l) | <0,01 – 0,058 | <0,01 – 0,63 |
| Mangan (mg/l) | <0,005 – 0,51 | < 0,005 – 0,025 |
| Sulfat (mg/l) | 66 - 76 | 70 - 87 |
| Nitrat (mg/l) | 9,6 - 13 | 7,5 - 12 |
| Ammonium (mg/l) | <0,05 | <0,05 |
| Phosphat (mg/l) | 0,02 – 0,08 | 0,01 – 0,02 |
| Magnesium (mg/l) | 11 - 14 | 11 - 12 |
| Calcium (mg/l) | 79 - 100 | 80 - 98 |

| Parameter | Brunnen 15237 | Brunnen 15238 |
|---|---|---|
| Kalium (mg/l) | 4,5 – 6,5 | 4,6 - 7 |
| Natrium (mg/l) | 16 - 23 | 13 - 21 |

## 3.4 Schadstoffverteilung

Da sich aufgrund oben dargestellter Sanierungsmaßnahmen das Schadensbild seit 2005 verändert hat, wird der historische Verlauf der Schadstoffverteilung hier nicht betrachtet. Es soll lediglich auf die aktuelle Situation eingegangen werden.

Die Beschreibung der Schadstoffsituation in der gesättigten Zone erfolgt auf Basis von Ergebnissen aus Direkt-Push- (DP) und MIP-Sondierungen /3/, /4/ und /5/ sowie von regelmäßig stattfindenden Grundwasserbeprobungen /2/. In Anlage 1 ist eine schematische Darstellung der Ergebnisse der DP- und MIP-Sondierungen sowie der Grundwasserbeprobungen dargestellt. Außerdem findet sich in Anlage 2 ein Querschnitt mit den Ergebnissen aus Boden- und Grundwasseruntersuchungen.

Direkt-Push-Sondierungen aus den Jahren 2006 /3/ und 2008 /4/ zeigten in der gesättigten Bodenzone ab einer Tiefe von 7 – 8 m u. GOK bereits erhebliche Gehalte an Frigen an (bis 9.800 µg/l; DP 06-08). Mit zunehmender Tiefe stiegen die Frigen-Konzentrationen weiter an und erreichten in einer Tiefe von 20 – 21 m u. GOK mit 1.300.000 µg/l ihr Maximum (DB 06-08). Eine Tiefenabgrenzung der Belastung in der gesättigten Bodenzone konnte mit den DP-Sondierungen nicht getroffen werden.

Aus den beiden im Profil A – A‘ liegenden MIP-Sondierungen (Anlage 1) lediglich eine quantitative Abschätzung der Frigen-Gehalte möglich. Hier wurden bis zu einer Tiefe von 13 – 14 m u. GOK Konzentrationen < 100  mg/l detektiert (MIP 19). Bis zu einer Tiefe von 19 – 20 m u. GOK wurden Konzentrationen > 5.000 µg/l detektiert (MIP 19), welche bis zu einer Tiefe von 24 – 25 m u. GOK auf < 1.000 µg/l abnahmen (MIP 19). Eine Tiefenabgrenzung des Frigen-Schadens in der gesättigten Bodenzone konnte mit den Ergebnissen der MIP-Sondierungen ebenfalls nicht getroffen werden.

Aus Anlage 1 und Anlage 2 ist für die Grundwassermessstellen die Schadstoffbelastung entlang der jeweiligen Filterstrecke dargestellt. Der Sanierungsbrunnen 15238 ist  von 2 – 18 m u. GOK verfiltert (Quartär bis oberes Tertiär). Im Brunnen konnten im Jahr 2017 Frigen-Konzentrationen zwischen 400 – 790 µg/l ermittelt werden. In der im Quartär ausgebauten Grundwassermessstelle (GWM) 15710 konnten im Jahr 2017 maximal 0,7 µg/l Frigen analysiert werden. Die höchsten Frigen-Gehalte zeigte im Jahr 2017 die GWM 15711 mit 1.200 – 1.700 µg/l. Die GWM 15711 ist gemäß Ausbauplan von 14 – 20 m u. GOK verfiltert, das Tertiär beginnt hier gemäß Schichtenverzeichnis bei 18,8 m u. GOK, sodass diese GWM sowohl im unteren Quartär als auch im oberen Tertiär verfiltert ist.

An der Fahnenspitze befindet sich der Sanierungsbrunnen 15237. Der SB 15237 ist bis zu einer Tiefe von 22 m u. GOK vollkommen im Quartär verfiltert. Im Jahr 2017 konnten Frigen-Konzentrationen zwischen 4,8 – 23 µg/l ermittelt werden.

Die Schadstofffahne des Frigen-Schadens erstreckte sich zur Fahnenaufnahme 2017 auf einer Länge von ca. 180 m und einer maximalen Breite von ca. 20 m (Isokonze > 10 µg/l). Die Fläche der Verunreinigungsfahne > 10 µg/l betrugt in etwa 2.500 m² (Abbildung 3-2).

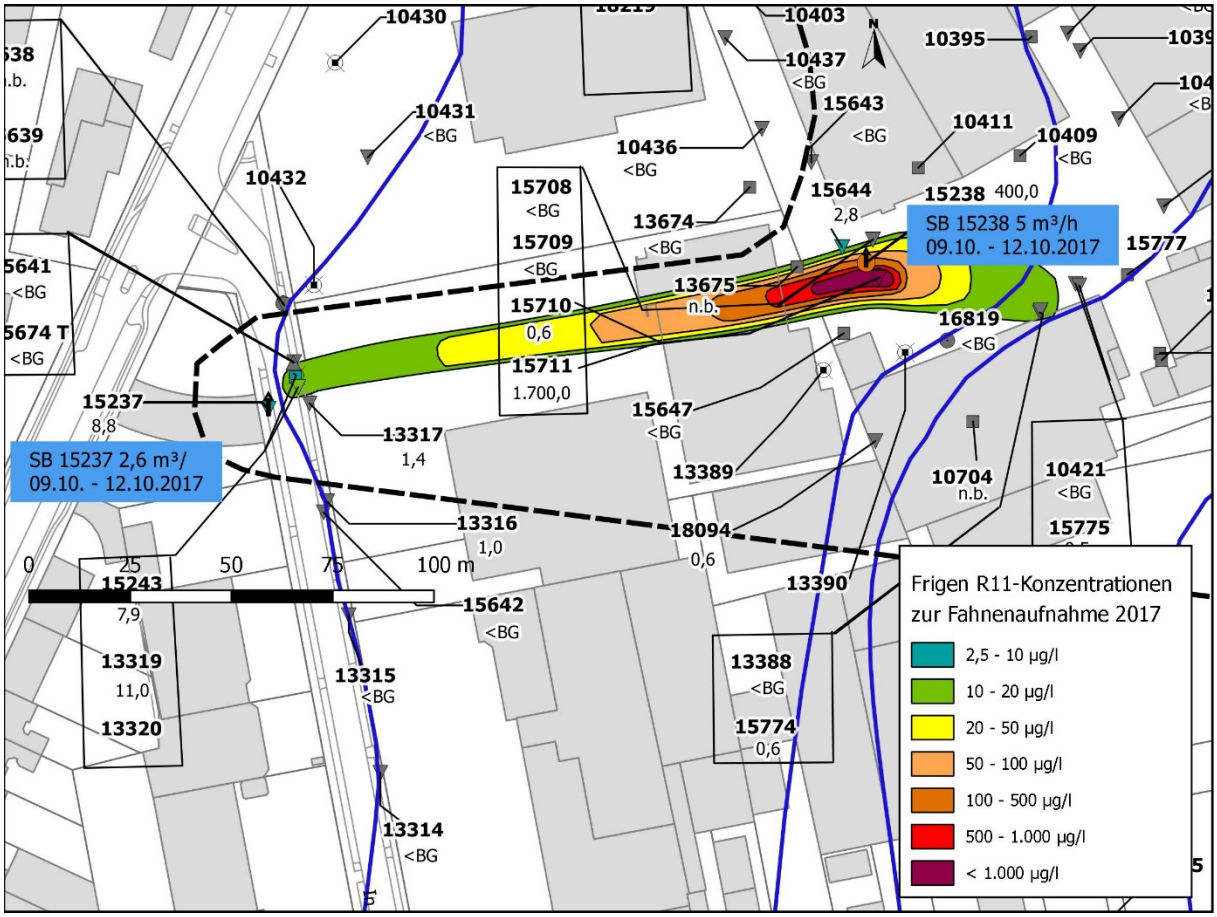



Abbildung 3-2: Ausbreitung der Frigen-Fahne zur Fahnenaufnahme 2017.

Zur vertikalen und horizontalen Abgrenzung des Frigen-Schadens wurden durch die REDUCTA GmbH aus Düsseldorf (Reducta) in den Jahren 2016 /8/ und 2017 insgesamt 11 Inlinerbohrungen (max. Endteufe: 30 m u. GOK) niedergebracht. Zusätzlich wurden im November 2017 durch die GEOtec GmbH aus Neuss zwei Kleinrammbohrungen bis zu einer Endteufe von 17 m u. GOK niedergebracht.

Aus den Bohrungen aus den Jahren 2016 und 2017 kann die Schadstoffsituation in der ungesättigten Bodenzone wie folgt skizziert werden:

Bis zur Grenze Quartär/Tertiär (14 – 15,5 m u. GOK) fanden sich im Boden nur geringe Anteile an Frigen. Maximal wurden 5,9 mg/kg Frigen bis zu einer Tiefe von 2 m u. GOK detektiert (ILB 16.3).

Ab dem Übergang des Quartärs zum Tertiär nahmen die Frigen-Gehalte zu und erreichten in einer Tiefe von 16 – 17 m u. GOK ihre Maximalkonzentration von

180 mg/kg (ILB 16.2). Mit fortschreitender Tiefe nahmen die Gehalte wieder ab. Ab ca. 22 m u. GOK wurden noch Konzentrationen von < BG bis 1,9 mg/kg analysiert.

In Abbildung 3-3 ist in einem Schnitt die Schadstoffverteilung im Feststoff dargestellt.

Zur Beurteilung der Schadstoffsituation in der Bodenluft wurden im Jahr 2016 insgesamt 4 neue Doppel-Bodenluft-Messstellen durch die Reducta errichtet /8/. Die Ergebnisse der Bodenluftuntersuchung werden hier kurz dargestellt, für eine detaillierte Beschreibung sei hier auf die Berichte der Reducta verwiesen (/7/, /8/).

Die Frigen-Gehalte in der Bodenluft schwankten zwischen 0,9 – 5,9 mg/m³, wobei bei sechs Proben der Prüfwert der LAWA (5 mg/m³, /14/) leicht überschritten wird. Alle ermittelten Bodenluftgehalte liegen jedoch deutlich unterhalb des Maßnahmenschwellenwertes von 50 mg/m³ der LAWA /14/.

| ILB 16.1 | | RKS 17.4 | | RKS 16.2 | | ILB 16.2 | | ILB 16.3 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0-1m | 0 mg/kg | 0-1m | 0 mg/kg | 0-1m | 0,7 mg/kg | 0-1m | 0 mg/kg | 0-1m | 0,3 mg/kg |
| 1-2m | 0 mg/kg | 1-2m | 0,1 mg/kg | 1-2m | 0,6 mg/kg | 1-2m | 0 mg/kg | 1-2m | 5,9 mg/kg |
| 2-3m | 0 mg/kg | 2-3m | 0 mg/kg | 2-3m | 0 mg/kg | 2-3m | 0 mg/kg | 2-3m | 0 mg/kg |
| 3-4m | 0 mg/kg | 3-4m | 0 mg/kg | 3-4m | 0 mg/kg | 3-4m | 0 mg/kg | 3-4m | 0 mg/kg |
| 4-5m | 0 mg/kg | 4-5m | 0 mg/kg | 4-5m | 0 mg/kg | 4-5m | 0 mg/kg | 4-5m | 0 mg/kg |
| 5-6m | 0 mg/kg | 5-6m | 0 mg/kg | 5-6m | 0 mg/kg | 5-6m | 0 mg/kg | 5-6m | 0 mg/kg |
| 6-7m | 0 mg/kg | 6-7m | 0 mg/kg | 6-7m | 0 mg/kg | 6-7m | 0 mg/kg | 6-7m | 0 mg/kg |
| 7-8m | 0 mg/kg | 7-8m | 0 mg/kg | 7-8m | 0 mg/kg | 7-8m | 0 mg/kg | 7-8m | 0 mg/kg |
| 8-9m | 0 mg/kg | 8-9m | 0 mg/kg | 8-9m | 0 mg/kg | 8-9m | 0 mg/kg | 8-9m | 0 mg/kg |
| 9-10m | 0 mg/kg | 9-10m | 0 mg/kg | 9-10m | 0 mg/kg | 9-10m | 0 mg/kg | 9-10m | 0 mg/kg |
| 10-11m | 0 mg/kg | 10-11m | 0 mg/kg | 10-11m | 0 mg/kg | 10-11m | 0 mg/kg | 10-11m | 0 mg/kg |
| 11-12m | 0 mg/kg | 11-12m | 0 mg/kg | 11-12m | 0 mg/kg | 11-12m | 0 mg/kg | 11-12m | 0 mg/kg |
| 12-13m | 0 mg/kg | 12-13m | 0 mg/kg | 12-13m | 0 mg/kg | 12-13m | 0 mg/kg | 12-13m | 0 mg/kg |
| 13-14m | 0 mg/kg | 13-14m | 0 mg/kg | 13-14m | 0 mg/kg | 13-14m | 0,1 mg/kg | 13-14m | 0 mg/kg |
| 14-15m | 89 mg/kg | 14-15m | 34 mg/kg | 14-15m | 96 mg/kg | 14-15m | 58 mg/kg | 14-15m | 0 mg/kg |
| 15-16m | 70 mg/kg | 15-16m | 3,8 mg/kg | 15-16m | 120 mg/kg | 15-16m | 130 mg/kg | 15-16m | 0 mg/kg |
| 16-17m | 19 mg/kg | 16-17m | 40 mg/kg | 16-17m | 160 mg/kg | 16-17m | 180 mg/kg | 16-17m | 0 mg/kg |
| 17-18m | 6 mg/kg | | | | | 17-18m | 171 mg/kg | 17-18m | 0 mg/kg |
| 18-19m | 0,4 mg/kg | | | | | 18-19m | 160 mg/kg | 18-19m | 0 mg/kg |
| 19-20m | 0 mg/kg | | | | | 19-20m | 34 mg/kg | 19-20m | 0 mg/kg |
| 20-21m | 0 mg/kg | | | | | 20-21m | 1,2 mg/kg | 20-21m | 0 mg/kg |
| 21-22m | 0 mg/kg | | | | | 21-22m | 7,6 mg/kg | 21-22m | 0 mg/kg |
| 22-23m | 0 mg/kg | | | | | 22-23m | 0 mg/kg | 22-23m | 0 mg/kg |
| 23-24m | 0 mg/kg | | | | | 23-24m | 1,9 mg/kg | 23-24m | 0 mg/kg |
| 24-25m | 0 mg/kg | | | | | 24-25m | 1,1 mg/kg | 24-25m | 0 mg/kg |
| | | | | | | 25-26m | 0 mg/kg | 25-26m | 0 mg/kg |

| mg/kg | |
|---|---|
| | < 1 |
| | 1-10 |
| | > 10 |

Quartär
Tertiär

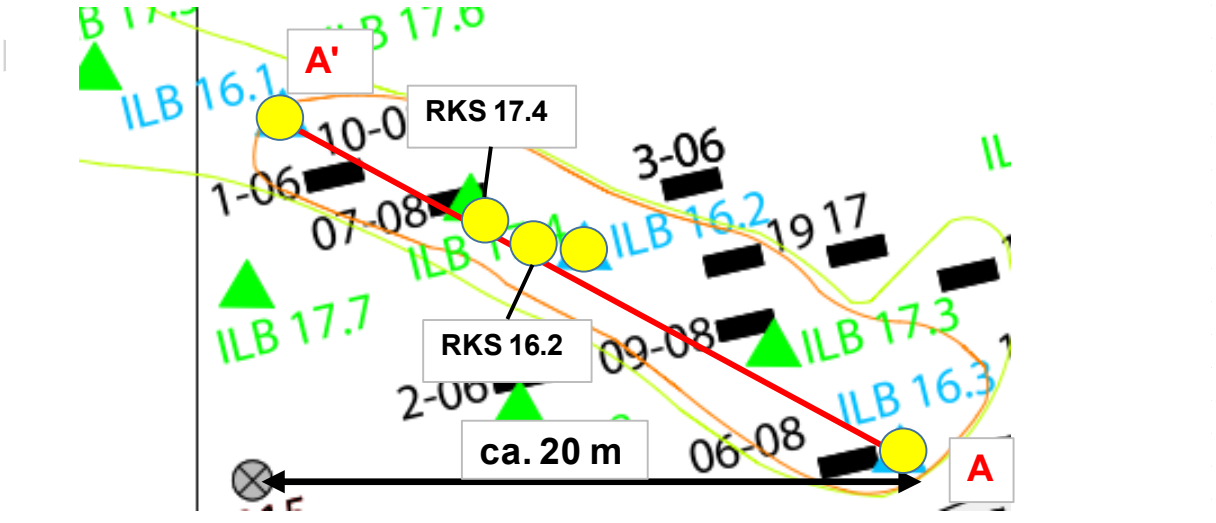



Abbildung 3-3: Schematische Darstellung der Schadstoffverteilung im Boden.

## 3.5 Schadstoffinventar

Eine Quantifizierung des Schadstoffpotentials an Frigen ist auf Basis der vorliegenden Ergebnisse schwierig und mit hohen Unsicherheiten behaftet.

Folgende Abschätzungen können getroffen werden:

- Die belastete Bodenkubatur schätzen wir auf etwa 4.000 m³ ab. Als hoch belastet erachten wir etwa 1.000 m³. Der Belastungsbereich ist dabei zu erheblichen Teilen mit unbelastetem Boden überdeckt.
- Die höchsten festgestellten Belastungen lagen für den Feststoff bei 180 mg/kg (2016, /8/), für das Grundwasser bei 1,3 mg/l (2008, /4/). Die Wasserlöslichkeit für Frigen liegt bei etwa 1,5 g/l. Die Ergebnisse deuten somit darauf hin, dass auch Schadstoffphasen nicht ausgeschlossen werden können.
- Nimmt man für den hoch belasteten Bodenbereich eine durchgängige Belastung mit den vorstehend angeführten Schadstoffgehalten an, so ergibt sich ein Schadstoffpotential von etwa 700 kg für diesen Bereich. Dieser Wert ist hinsichtlich der festgestellten Schadstoffgehalte als hoch gegriffen einzuschätzen. Berücksichtigt man die Tatsache, dass das Vorliegen von Schadstoffphasen nicht ausgeschlossen werden kann, ist der Wert als nicht unrealistisch anzusehen.
- Die restlichen ca. 3.000 m³ Boden dürften ein deutlich geringeres Schadstoffpotential beinhalten. Es wird auf etwa 10-20% der vorstehenden Masse abgeschätzt.
- Unter Berücksichtigung aller Unwägbarkeiten halten wir ein Schadstoffinventar von mindestens 500-1.000 kg für realistisch.

## 3.6 Bisherige und zukünftige Nutzung

Der Nordteil des Geländes Am Gatherhof 41 wurde im Zeitraum von 1896 – 2007 intensiv industriell genutzt. Die Fläche diente vor allem als Betriebsgelände für die Firmen ANONYM (Vulkanisation/Automobilzulieferer) und ANONYM (Schaumstoffherstellung). Die Gebäude sind derzeit ungenutzt. Seitens der Reducta wurde im Jahr 2011 eine industriehistorische Nutzungsrecherche durchgeführt /6/. Für eine detaillierte Beschreibung der Nutzung sei an dieser Stelle auf den Bericht der Reducta /6/ verwiesen.

Zukünftig ist für das Gelände eine Wohnbebauung mit mehrgeschossigen Wohnhäusern, Reihen- und Doppelhäusern geplant (B-Plangebiet „Nördliche Westfalenstraße“; B5781/38) vorgesehen.

# 4 Bisherige Maßnahmen

## 4.1 Durchgeführte Untersuchungskampagnen

Die Historie der Schadenserkundung und -bewertung kann aus vorliegenden Unterlagen wie folgt zusammengefasst werden:

Tabelle 4-1: Vorliegende Erkundungs- und Bewertungshistorie Frigen-Schaden Am Gatherhof 41

| Referenz | Maßnahmen |
|---|---|
| ahu 2007 /3/ | Niederbringung von sechs Direct-Push-Sondierungen bis ins Tertiär mit Entnahme von Grundwasserproben im Abstand von zwei Metern |
| Fugro 2008 /4/ | Niederbringung von sieben Direct-Push-Sondierungen bis ins Tertiär mit Entnahme von Grundwasserproben im Abstand von zwei Metern |
| Fugro 2009 /5/ | Niederbringung von sieben Direct-Push-Sondierungen bis ins Tertiär mit Entnahme von grundwasserproben im Abstand von zwei Metern. Niederbringung von sechs MIP-Sondierungen mit chemischer in-situ Messung |
| Reducta 2011 /6/ | Historische Nutzungsrecherche Gesamtfläche |
| Reducta 2016 /7/, /8/ | Detailuntersuchung zur vertikalen / horizontale Abgrenzung Frigen-Schaden mittels drei Inlinerbohrungen und Bodenluftuntersuchungen. |
| HPC 2017 /9/ | Prüfgutachterliche Neubewertung der Ergebnisse aus /7/, /8/ |
| REDUCTA / UAD 2017 | Horizontale und vertikale Eingrenzung mittels Inlinerbohrungen aktuelles Schadenszentrum |
| Geotec / BFM | Niederbringung von Kleinrammbohrungen zur Plausibilitätsüberprüfung |

## 4.2 Durchgeführte Sanierungsmaßnahmen

Im Bereich des Frigen-Schadens wurden in der ungesättigten Bodenzone bisher keine Sanierungsmaßnahmen durchgeführt.

In der gesättigten Bodenzone wird die Grundwasserbelastung mit Frigen seit 2005 hydraulisch saniert bzw. gesichert. Im Bereich des Schadenszentrum findet sich der

Sanierungsbrunnen 15238 (Sollförderrate: 5 m³/h), an der Fahnenspitze liegt der Sanierungsbrunnen 15237 (Sollförderrate: 5 m³/h) /10/.

# 5 Variantenbetrachtung

Im Folgenden werden die grundsätzlich für geeignet gehaltenen Sanierungsvarianten dargestellt und hinsichtlich ihrer möglichen Wirksamkeit, technischen Umsetzbarkeit und zu erwartenden Kosten bewertet. Von besonderer Bedeutung ist dabei, dass offensichtlich insbesondere im Tertiär hohe Schadstoffgehalte festzustellen sind. Sanierungsmaßnahmen sollten daher sowohl im quartären als auch im tertiären Aquifer eine Schadstoffentfrachtung bewirken.

Im Sinne eines vollständigen Variantenscans und damit einer umfassenden Begründung einer Vorzugsvariante werden nachfolgend auch Sanierungsvarianten betrachtet, die möglicherweise schon dem Anschein nach nicht geeignet sind.

Soweit für die Umsetzung von Varianten Kosten angegeben sind, handelt es sich um Schätzkosten. Diese verstehen sich jeweils zzgl. MwSt. sowie Gutachter- und Planungshonorare sowie der Aufwendungen für das hydraulische Monitoring.

## 5.1 Hydraulische Sanierung

### 5.1.1 Variante H1: Aktuell laufende hydraulische Sicherung

**Beschreibung**

Aktuell wird der Frigen-Schaden durch zwei Sanierungsbrunnen mittels Pump-and-Treat hydraulisch saniert bzw. gesichert. Der Sanierungsbrunnen 15238 liegt im nahen Abstrom des Schadenszentrums, der Sanierungsbrunnen 15237 liegt derzeit an der Fahnenspitze. Beide Brunnen haben eine Sollförderrate von 5 m³/h. Das geförderte Wasser beider Brunnen wird einer einstufigen Strippkolonne zugeleitet, durch welche bereits wesentliche Teilmengen der geförderten Schadstofffracht aus dem Grundwasser desorbiert werden. Die Prozessluft mit den ausgestrippten Schadstoffen wird danach über eine zweistufige Luftaktivkohlefilteranlage geleitet und dort vollständig abgereinigt. Bei einer defekten oder unzureichenden Strippung besteht im Bedarfsfall die Möglichkeit, das Prozesswasser einem der Strippkolonne nachgeschalteten einstufigen Nassaktivkohlefilter zuzuführen, sodass noch im Prozesswasser verbliebene Restschadstoffe vollständig adsorbiert werden können.

Reinluft und Reinwasser werden in die Umgebung bzw. in die Betriebskanalisation abgeführt.

### Eignung und Machbarkeit

Die laufende hydraulische Sicherung ist nachweislich geeignet, ein Abströmen von Schadstoffen vom gegenständlichen Grundstück zu unterbinden. Die Grundwasserbelastung ist während des Betriebs der Abstromsicherung weitgehend auf das Grundstück begrenzt. Anlagenstörungen in der Vergangenheit haben relativ schnell zur Ausbildung einer Abstromfahne geführt.

### Sanierungsdauer

Aktuell werden durch die laufende hydraulische Sicherung ca. 20-30 kg Frigen pro Jahr geborgen. Es ist davon auszugehen, dass sich die Entfrachtungsrate mit der Zeit verringert. Unter Berücksichtigung des in Abschnitt 3.5 abgeschätzten Schadstoffinventars ist davon auszugehen, dass die hydraulische Abwehrmaßnahme ohne weitergehende Sanierungsmaßnahmen noch mehrere Jahrzehnte erforderlich ist.

### Kosten

Die Kosten für den laufenden Betrieb der Sanierungsanlage nach dem PaT-Verfahren sind in nachfolgender Tabelle 5-1 dargestellt. Für den Fall einer langfristigen Kostenprognose sind ggf. Ersatzinvestitionen für die Neuanschaffung einer Anlage bzw. für den Austausch von Anlagenkomponenten zu berücksichtigen.

Tabelle 5-1: monatliche Kosten der laufenden PaT-Maßnahme

| **Kostenstelle** | **Bedarf pro Jahr** | **Kosten € pro Monat** |
|---|---|---|
| Betrieb, Wartung und Instandsetzung | - | 1.200 € |
| Luftaktivkohle | 6.000 kg | 1.300 € |
| Wasseraktivkohle | 2.250 kg | 600 € |
| Strom | 48.000 kWh | 750 € |
| Wassereinleitung | 88.000 m³ | 2.000 € |
| Reparaturen über 250,-- € (geschätzt) | | 250,-- € |
| **Summe:** | | **ca. 6.100 €** |

### 5.1.2 Variante H2: Optimierung der hydraulischen Sanierung

**Beschreibung**

Nachdem davon auszugehen ist, dass der überwiegende Teil der Schadstoffe im Tertiär eingelagert ist, bestünde eine Optimierung der hydraulischen Sanierung in der Installation und dem Betrieb von Sanierungsbrunnen im Tertiär. Diese sind zur hydraulischen Sicherung nicht erforderlich und dienten einer Intensivierung der Schadstoffentfrachtung. Die oben angeführte Sicherungsmaßnahme würde damit zu einer Dekontaminationsmaßnahme erweitert.

**Eignung und Machbarkeit**

In der Vergangenheit wurden im Stadtgebiet Düsseldorf Versuche zur Sanierung eines in das Tertiär eingelagerten CKW-Schadens durch eine Grundwasserentnahme im Tertiär durchgeführt /13/. Aufgrund der niedrigen Durchlässigkeit im Bereich des Aquifers konnten erwartungsgemäß nur sehr geringe Entnahmeraten in einer Größenordnung von etwa 0,08 – 0,14 l/s realisiert werden, weil der Brunnen andernfalls trocken fiel. Aufgrund der hohen Schadstoffkonzentrationen im Tertiär konnten jedoch relativ hohe Entfrachtungsraten realisiert werden.

Die Situation halten wir im gegenständlichen Vorhaben für vergleichbar. Wir gehen daher davon aus, dass auch hier in signifikantem Umfang Schadstoffe durch die Entnahme von Grundwasser aus dem Tertiär entfernt werden können. Eine Quantifizierung ist nicht möglich, da im Schadensbereich bisher kein Tertiärbrunnen vorhanden ist.

Die vorhandene Grundwasserreinigungsanlage ist zur Abreinigung des anfallenden Grundwassers ausreichend dimensioniert. Nachdem bisher keine tertiären Grundwassermessstellen im Umgriff des Frigenschadens vorhanden sind, können Aussagen zum Chemismus des tertiären Grundwassers nur anhand von Messstellen getroffen werden, die sich im Bereich des CKW- / PAK-Schadens befinden, getroffen werden (siehe Tabelle 5-2). Die Eisengehalte liegen über den im Quartär festgestellten, sind jedoch noch in einem Wertebereich, der hinsichtlich einer

Wasseraufbereitung grundsätzlich als nicht problematisch einzustufen ist. Als erhöht sind zumindest in GWM 18220 T die Mangankonzentrationen einzustufen, eine Ablagerung von Mangandioxid (Braunstein) in Anlagenkomponenten, insbesondere der Strippeinheit, kann nicht ausgeschlossen werden. Sollte dieser Effekt auftreten, kann erfahrungsgemäß in der Folge auch bei geringen Gehalten Eisen ausfallen. Es ist daher nicht ausgeschlossen, dass bei einer Aufbereitung von Grundwasser aus den tertiären Sedimenten erhöhte Aufwendungen beim Betrieb der Anlage resultieren.

Tabelle 5-2: Hydrochemische Daten der Tertiärmessstellen 15233 T und 18220 T (minimale und maximale Messwerte; Quelle: Projektdatenbank HB 16, /2/)

| **Parameter** | **GWM 15233 T** | **GWM 18220 T** |
|---|---|---|
| pH-Wert | 6,7 – 7,6 | 7,0 – 8,0 |
| Sauerstoff (mg/l) | 0,1 – 4,0 | 0,1 – 3,1 |
| Redoxspannung (mV) | 0 - 250 | -68 - 257 |
| Eisen (mg/l) | 0,05 – 3,5 | 1,3 – 1,6 |
| Mangan (mg/l) | 0,01 – 0,33 | 0,58 – 2,2 |
| Sulfat (mg/l) | nicht analysiert | 14*) |
| Nitrat (mg/l) | nicht analysiert | < 1*) |
| Ammonium (mg/l) | nicht analysiert | < 0,05*) |
| Phosphat (mg/l) | nicht analysiert | 0,02*) |
| Magnesium (mg/l) | nicht analysiert | 13*) |
| Calcium (mg/l) | nicht analysiert | 94*) |
| Kalium (mg/l) | nicht analysiert | 3,9*) |
| Natrium (mg/l) | nicht analysiert | 5,5*) |

*) einmalige Analyse im Oktober 2015

**Sanierungsdauer**

Auch hier ist die Sanierungsdauer nur sehr schwer abzuschätzen. Wir gehen jedoch davon aus, dass die aus dem Tertiär realisierbare Schadstoffentfrachtungsrate mindestens vergleichbar mit der aus dem Quartär ist. Daher erachten wir eine Halbierung oder noch weitergehende Verkürzung der erforderlichen Sanierungsdauer für möglich.

**Kosten**

Zur Optimierung der hydraulischen Sanierung mittels Entnahme von Grundwasser aus dem Tertiär sollte u.E. zunächst 1 Tertiärbrunnen im Schadenszentrum mit Brunnenpumpe und Verrohrung zur bestehenden Wasseraufbereitungsanlage installiert werden. Eine Erweiterung der Anlage wird aufgrund der geringen im Tertiär realisierbaren Entnahmeraten für nicht erforderlich erachtet. Die Investitionskosten hierfür werden auf ca. 20.000,-- € geschätzt. Die Betriebskosten für Strom und Aktivkohle sollten aufgrund der höheren Schadstoffkonzentrationen im geförderten Wasser günstiger als bei der reinen Förderung im Quartär sein. Zudem ist eine Reduktion der erforderlichen Sanierungsdauer zu erwarten.

### 5.1.3 Variante H3: Zirkulationsbrunnen

Die Möglichkeiten einer Sanierung des Frigenschadens mittels Grundwasserzirkulationsbrunnen wurden intensiv mit der Gesellschaft für Boden- und Grundwassersanierung mbH (GfS) erörtert, die auf den Bau und Betrieb dieser Brunnentechnologie spezialisiert ist. Der GfS wurden hierfür anonymisierte Daten zum Standort (Geologie und Schadstoffsituation) zur Verfügung gestellt. Seitens der GfS wurde ein grundsätzliches Konzept für den Einsatz eines Grundwasserzirkulationsbrunnens entwickelt.

**Beschreibung**

Ausgehend von der Geologie und der Schadstoffsituation im zu vermutenden Schadenszentrum (Umfeld ILB 17.3) wurde seitens der GfS ein Brunnen mit einer Endteufe von 27 m vorgeschlagen, der über insgesamt drei Filterstrecken verfügt. Der Betrieb des Brunnens ist bzgl. der Entnahme und Infiltrationsbereiche in

unterschiedlichen Varianten denkbar. Hierdurch ist eine Intensivierung des Schadstoffaustrags, insbesondere auch aus dem Tertiär, möglich. Reichweitenberechnungen haben gezeigt, dass zunächst ein Brunnen als ausreichend erachtet wird. Die Entnahmerate wurde unter Berücksichtigung der Durchlässigkeiten im Tertiär auf etwa 0,6 m³/h abgeschätzt.

Zusätzlich zur hydraulischen Sanierung kann die Sanierung beschleunigt werden, indem dem zu reinfiltrierenden Wasser Reagenzien zugegeben werden, die eine reduktive Dehalogenierung oder eine Oxidation der Schadstoffe bewirken. Alternativ kann durch Zugabe von Nährstoffen und die gezielte Einstellung eines geeigneten Redoxmilieus die mikrobiologische, reduktive Halogenierung von Frigen stimuliert werden.

Für die Errichtung eines Grundwasserzirkulationsbrunnens mit drei Filterstrecken wird eine Bohrung mit einem Durchmesser von 800 mm benötigt. Eine Freisetzung von Frigen aus dem Bohrgut ist dabei nahezu unvermeidbar.

In diese Bohrung wird dann eine Verrohrung mit Packersystemen und Pumpen eingebaut. Pro Filterstrecke sind zwei eine Vor- und eine Rücklaufleitung zur Aufbereitungsanlage erforderlich. Nachdem die Wasseraufbereitungsanlage überwiegend Grundwasser aus der hydraulischen Abwehrmaßnahme im Quartär aufbereitet, muss ein Teilstrom des gereinigten Wasser in den Zirkulationsbrunnen rückgeführt werden. Hierfür ist eine Regeleinrichtung im Ablauf der Wasseraufbereitungsanlage erforderlich.

**Eignung und Machbarkeit**

Grundsätzlich wird der Einsatz von Grundwasserzirkulationsbrunnen zu Beschleunigung der Sanierungsmaßnahme für geeignet erachtet. Die vorhandene Grundwasserreinigungsanlage ist zur Abreinigung des anfallenden Grundwassers ausreichend dimensioniert. Nachdem bisher keine tertiären Grundwassermessstellen auf dem Areal vorhanden sind, können keine Aussagen zum Chemismus des tertiären Grundwassers getroffen werden. Hinsichtlich möglicher Schwierigkeiten bei der Aufbereitung des aus dem Tertiär geförderten Wassers sei auf die Ausführungen in Abschnitt 5.1.2 verwiesen.

Gegenüber der reinen Grundwasserentnahme aus dem Tertiär bietet die Technologie den Vorteil, dass auch Reagenzien zugegeben werden können, die zu einer Beschleunigung der Sanierung führen. Schadstoffe werden dann in-situ abgebaut, ein Transport zum Brunnen ist nicht erforderlich. Ein Abströmen der Reagenzien ist aufgrund der Kreislaufführung im Brunnen nicht zu erwarten. Zudem ist die Fahne aktuell durch einen Brunnen an der Fahnenspitze gesichert. Vor einem Einsatz von Reagenzien muss geprüft werden, ob diese ggf. zu einer Beeinträchtigung der Funktionsfähigkeit der Aufbereitungsanlage führen können.

**Sanierungsdauer**

Berechnungen haben ergeben, dass die Reichweite der Fassung im Tertiär nach einem Jahr bei etwa 25-30 m liegt. Zudem ist davon auszugehen, dass aufgrund der hohen Schadstoffbelastungen ein mehrfacher Austausch des Grundwassers in den Schadensbereichen erforderlich ist. Auch bei Einsatz eines Zirkulationsbrunnens ist daher mit einer Sanierungsdauer von Jahren zu rechnen, allerdings beschleunigt gegenüber der reinen hydraulischen Abwehr im Quartär.

Eine Verkürzung der Sanierungsdauer ist durch die Zugabe von Reagenzien und die Erhöhung der Anzahl der installierten Zirkulationsbrunnen möglich.

**Kosten**

Die Kosten für die Einrichtung und den Betrieb eines Grundwasserzirkulationsbrunnens lassen sich grob wie folgt abschätzen:

- Bohrung DN 800 incl. Baustelleinrichtung: 20.000,-- €
- Vorschacht / Ausbau / Verrohrung: 25.000,-- €
- Pumpen / Packersysteme:25.000,-- €
- Leitungsanbindung an die GWRA: 10.000,-- €
- Umbauarbeiten an der GWRA: 10.000,-- €
- Elektronische Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik: 15.000,-- €
- ggf. Schaltcontainer: 5.000,-- €

Insgesamt ist mit Installationskosten von über 100.000,-- € zu rechnen. Bei einer geplanten Verlegung des Anlagenstandorts ist die Verrohrung entsprechend nachzuziehen.

## 5.2 Dekontaminationsmaßnahmen

### 5.2.1 Variante D1: Bodenaushub

**Beschreibung**

Eine Entfernung des Schadenszentrums mittels Bodenaustausch ist entweder mittels überschnittener Austauschbohrungen oder als konventioneller Aushub in einer verbauten Grube unter Absenkung des Grundwassers möglich. Beide Verfahren sind aufgrund der erforderlichen Aushubtiefe als äußerst aufwendig einzustufen.

**Eignung und Machbarkeit**

Im Hinblick auf die Erreichung akzeptabler Grundwasserverhältnisse ist die Sanierung des Schadens mittels Bodenaustausch grundsätzlich geeignet. Auch die tiefbautechnischen Herausforderungen sind lösbar, wenn auch mit sehr hohem Aufwand.

Erhebliche Probleme sind hinsichtlich der Emission von Frigen während der Sanierungsmaßnahme zu erwarten. Frigen R11 ist mit einem Siedepunkt von etwa 24°C äußerst flüchtig. Ein Handling des Materials (Aushub und Transport) ohne Abdampfen eines erheblichen Teils der Schadstoffe in die Atmosphäre ist nahezu unmöglich. Um dies zu unterbinden, müsste der Boden vor dem Ausbohren vereist werden, was zu erheblichen Mehrkosten führt.

Als Verbau für einen konventionellen Aushub müsste u.E. eine Bohrpfahlwand gewählt werden. Diese müsste deutlich unter das Aushubniveau von 25 m geführt werden, da sonst die erforderliche Auflast im Sohlbereich nicht vorhanden ist. Zudem müsste die Baugrube über 4-5 rückverankerte oder ausgesteifte Gurtlagen gesichert werden. Über die Baugrubensohle ist mit einem erheblichen Grundwasserandrang zu rechnen. Somit ist zusätzlich eine Abdichtung der Baugrubensohle mittels Injektionssohle erforderlich. Aufgrund der flächigen Öffnung des kontaminierten Bereichs ist gegenüber Austauschbohrungen von einer nochmals erhöhten

Problematik an Schadstoffemissionen in die Luft zu rechnen. Aus diesen Gründen wird ein konventioneller Aushub gegenüber Austauschbohrungen als technisch und finanziell ungünstiger eingeschätzt und nicht weiter betrachtet.

Eine Deponierung des Materials ist nicht möglich, da dies zu einer vollständigen Freisetzung des Frigens in die Atmosphäre führt. Möglich wäre eine Lagerung und Umwälzung in Bodenaufbereitungshallen mit kontrollierter Entlüftung über Filteranlagen.

**Sanierungsdauer**

Eine Sanierung des Schadens mittels Bodenaustausch sollte in einem Zeitrahmen von etwa 6 Monaten realisierbar sein.

**Kosten**

Der exakte Umgriff des Schadens ist uns nicht bekannt, insofern haben wir den Preis zunächst je m² Schadensfläche angegeben. Realistisch sind u.E. mindestens 200-300 m² Grundfläche der Schadstoffquelle.

Bisher ist es uns nicht gelungen, valide Preis für die Entsorgung Frigen-haltiger Böden zu ermitteln. Die Schwankungsbreite geht von etwa 100 €/t (Lagerung in Mieten innerhalb kontrolliert entlüfteter Hallen) bis hin zu Größenordnungen von 500 €/t. Realistisch erachten wir eine Größenordnung von 200 €/t. Schwierig bleibt der Transport und das Handling.

Den kontaminierten Bereich haben wir in einer Tiefe von 15-25 m unter GOK angenommen. Die Bohrtiefe ist auf etwa 25 m limitiert, da ansonsten die Kosten erheblich ansteigen.

Die erforderlichen Kosten für einen Bodenaustausch mittels überschnittenen Großbohrungen lassen sich wie folgt abschätzen

Tabelle 5-3: Auflistung der erforderlichen Kosten für einen Bodenaustausch mittels überschnitten Großlochbohrungen

| Position | Menge | Einheit |
|---|---|---|
| Bohrtiefe: | 25 | m |

| Position | Menge | Einheit |
|---|---|---|
| Überschnitt: | 30,00 | % |
| Preis Austauschbohrung gem. Reducta | 130,00 | € |
| Zuschlag Bohrtiefe bis 25 m: | 40,00 | % |
| Bohrvolumen: | 32,50 | m³/m² |
| **Kosten Austauschbohrung:** | **5.915,00** | **€/m²** |
| Anteil kontaminiert (15-25 m): | 40,00 | % |
| Zu entsorgen: | 13,00 | m³/m² |
| Kosten Materialhandling (BK2-Mulden): | 50,00 | €/m³ |
| **Kosten Materialhandling:** | **650,00** | **€/m³** |
| **Kosten Wasseraustausch Bohrloch:** | **150,00** | **€/m²** |
| Planung, Bauleitung, Gutachter, Analytik: | 15,00 | % |
| **Kosten Planung, Bauleitung, Gutachter, Analytik:** | **1.007,25** | **€/m²** |
| **Sanierungskosten ohne Entsorgung:** | **7.7225,25** | **€/m²** |
| **Entsorgungskosten:** | 200,00 | €/t |
| **Entsorgungskosten:** | **5.200,00** | **€/m²** |
| **Gesamtkosten:** | **12.922,25** | **€/m²** |

Zusatzkosten für eine Bodenvereisung lassen sich auf etwa 600 €/m³ abschätzen. Bei angenommenen 13 m³/m² kontaminierten Bodenvolumens ergeben sich weitere Kosten in Höhe von 7.800,-- €/m².

Je m² Schadensfläche lassen sich die Sanierungskosten somit auf eine Größenordnung von 13.000,-- €/m², mit Vereisung auf etwa 20.000,-- €/m² abschätzen. Unter Annahme eines Kontaminationsbereichs mit einer Mächtigkeit von etwa 10 m bedeutet dies Sanierungskosten von mehr als 1.000,-- € je m³ belasteten Bodens.

### 5.2.2 Variante D2: Thermische Verfahren

**Beschreibung**

Thermische Verfahren beruhen darauf, Schadstoffe durch Erwärmung in die Gasphase zu überführen und anschließend über eine Bodenluftabsaugung zu entfernen. Im Ausnahmefall können die Schadstoffe in das Grundwasser überführt und dort hydraulisch geborgen werden.

Hinsichtlich der Beheizung wird zwischen festen Heizelementen und der Injektion von Dampf-Luftgemischen unterschieden.

**Eignung und Machbarkeit**

Die Möglichkeiten des Einsatzes thermischer Verfahren zur Sanierung des Schadens haben wir intensiv mit der Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung VEGAS an der Universität Stuttgart diskutiert.

Günstig ist sicherlich die sehr niedrige Siedetemperatur von Frigen R11, so dass relativ moderate Aufheiztemperaturen ausreichend sind. Die bei der aktuell durchgeführten Erkundung ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte sind hinsichtlich einer Dampf-Luft-Injektion grenzwertig niedrig. Zumindest ergäben sich sehr lange Aufheizzeiten. Alternativ hierzu ist eine Erwärmung des kontaminierten Bereichs mittels fester Heizelemente möglich. Nachteilig hierbei sind die hohen Energiekosten, da die Heizelemente i.d.R. elektrisch betrieben werden.

Grundsätzlich ist beim Einsatz thermischer Verfahren eine ausreichende Grundwasserabsenkung vorteilhaft. Diese ist im Bereich des Tertiärs aufgrund des überlagernden und hydraulisch nicht abgetrennten Quartärs nicht möglich.

Eine Aufheizung des Bodens ist zwar auch im gesättigten Zustand denkbar, erfordert jedoch einen deutlich höheren Energieeinsatz. Mobilisierte Schadstoffe werden in diesem Fall in das Grundwasser überführt und müssen hydraulisch entfernt werden. Aufgrund der geringen Durchlässigkeit des Aquifers in den tertiären Sedimenten kann dies nicht sicher gewährleistet werden.

In Direct-Push-Sondierungen wurden Grundwasserbelastungen festgestellt, die die Löslichkeitsgrenze von Frigen R11 erreichten. Bei Vorliegen von Phasen kann es zu einer nicht kalkulierbaren Mobilisierung von Schwerphasen kommen.

Insgesamt sind wir in Diskussion mit dem VEGAS zu dem Ergebnis gekommen, dass der Einsatz thermischer Verfahren aufgrund der Gefahr einer unkontrollierten Verschleppung von Schadstoffen nicht zielführend ist.

**Sanierungsdauer**

Auf die Angabe einer Sanierungsdauer sei aufgrund der vorstehend beschriebenen Risiken verzichtet.

**Kosten**

Die Kosten für den Einsatz thermischer Verfahren liegen zwischen 300,-- und 500,-- € je m³ zu sanierendem Boden.

### 5.2.3 Variante D3: Air Sparging

**Beschreibung**

Air Sparging ist eine Technologie, die insbesondere bei Kontaminationen mit leichtflüchtigen Schadstoffen angewandt werden kann. Durch Injektion von Luft in den Grundwasserleiter unterhalb des kontaminierten Bereichs entsteht eine aufwärts gerichtete Strömung von Luftblasen, welche bei der Passage des belasteten Bereichs Schadstoffe aufnehmen und in die ungesättigte Bodenzone überführen. Dort wird die mit Schadstoffen angereicherte Bodenluft abgezogen und einer Reinigung zugeführt.

**Eignung und Machbarkeit**

Aufgrund der sehr niedrigen Siedetemperatur von Frigen R11 und der daraus resultierenden Flüchtigkeit, ist Air Sparging zur Sanierung von Frigenschäden grundsätzlich als geeignet einzustufen. Im gegenständlichen Vorhaben ist die Anwendung aufgrund der geringen Durchlässigkeiten im Tertiär nicht möglich.

**Sanierungsdauer**

Entfällt, da nicht umsetzbar.

**Kosten**

Entfällt, da nicht umsetzbar.

### 5.2.4 Variante D4: Biologische Verfahren

Der Literatur ist zu entnehmen, dass Frigen R11 unter anaeroben Bedingungen zumindest teilweise dechloriert werden kann. Im Labor wurde die Umsetzung zu R21 sowie weiter zu R31 nachgewiesen. Inwieweit insbesondere R31 weiter abgebaut werden kann, ist nicht bekannt. Am wahrscheinlichsten ist ein weiterer Abbau zu Fluormethan, allerdings ist dieser nicht durch Literaturdaten gesichert.

R31 ist als karzinogen Kategorie III eingestuft. Fluormethan ist brennbar, zur Toxikologie sind keine validen Daten verfügbar.

Festzuhalten ist somit, dass beim Abbau von R11 Abbauprodukte mit erheblicher toxikologischer Relevanz (R31) entstehen, deren Persistenz nicht bekannt ist. Bei dieser Datenlage halten wir In-situ-Sanierungsmaßnahmen, die auf eine reduktive Dehalogenierung abzielen für nicht vertretbar.

### 5.2.5 Variante D5: Chemische Verfahren

Uns liegen keine Untersuchungen zur in-situ-chemischen Oxidation von Frigen R11 vor. Insofern können wir nicht bewerten, ob, ggf. mit welchem Oxidationsmittel und zu welchen Zwischen- und Endprodukten R11 chemisch oxidierbar ist. Aufgrund der festgestellten, teils sehr hohen Schadstoffkonzentrationen ist zumindest davon auszugehen, dass Permanganate als Oxidationsmittel ausscheiden, da die Schadstoffdepots durch Bildung von Mangandioxid kapseln würden. Aus diesen Depots würden weiterhin Schadstoffe in das Grundwasser diffundieren.

Eine Verteilung von Oxidationsmitteln dürfte sich aufgrund der sehr geringen Durchlässigkeit des Aquifers als schwierig bis unmöglich gestalten. Hier können Zirkulationsbrunnen zwar unterstützend wirken, dennoch bleibt fraglich, ob sich die Oxidationsmittel über längere Zeiträume stabil im Boden verteilen lassen.

Aufgrund der technischen Schwierigkeiten und des nicht abweisbaren Risikos einer Bildung von Metaboliten halten wir ISCO für nicht geeignet.

# 6 Zusammenfassende Beurteilung der Varianten

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass von den in Abschnitt 5.2 angeführten Verfahren zur Dekontamination der Frigen-Verunreinigung allenfalls ein Austausch des Bodens ein technisch geeignetes Verfahren darstellt. Aus folgenden Gründen wird eine Umsetzung nicht empfohlen:

- Während des Ausbohrens der belasteten Bodenbereiche verdunstet der überwiegende Teil der Schadstoffe und wird dabei in die Atmosphäre freigesetzt. Obgleich die Sanierung von Boden nicht unter Tätigkeiten der ChemOzonSchichtV fällt, sollte aus ökologischen Gründen die Freisetzung von Frigen R11 aufgrund des Ozonabbaupotentials (ODP = 1) sowie des hohen Treibhauspotentials (4.750) minimiert oder verhindert werden. Dies kann nur durch das Vereisen des Bodens verhindert werden, was extrem hohe Kosten verursacht.
- Auch ohne Vereisungsmaßnahmen ist der Bodenaustausch als extrem teuer anzusehen, so dass u.E. eine Angemessenheit der Maßnahme nicht gegeben ist. Auch mittelfristig ergeben sich keine Vorteile gegenüber der derzeit laufenden hydraulischen Abwehrmaßnahme.

Die in Abschnitt 5.1 beschriebenen hydraulischen Sanierungsmaßnahmen bewerten wir wie folgt:

- Variante H2: Die Unterstützung der laufenden hydraulischen Sanierungsmaßnahme durch die Entnahme von Grundwasser aus dem tertiären Grundwasserleiter im Bereich des Schadenszentrums halten wir für geeignet, die Sanierung des Frigenschadens deutlich zu beschleunigen. Die Kosten halten wir für überschaubar. Insbesondere ist zu erwarten, dass die spezifischen Sanierungskosten im Tertiär deutlich niedriger als im Quartär sind.
- Variante H3: Der Einsatz von Grundwasserzirkulationsbrunnen kann die Schadstoffentfrachtung gegenüber konventionellen Tertiärbrunnen nochmals erhöhen. Zudem bietet sich grundsätzlich die Möglichkeit, Reagenzien zum Schadstoffabbau im Aquifer zu verteilen. Allerdings halten wir mit jetzigem Kenntnisstand weder mikrobiologische noch chemische Verfahren zum In-situ-Abbau der Schadstoffe geeignet (siehe Varianten D4 und D5). Vor dem

Einsatz derartiger Verfahren wären weitergehende Labor- und ggf. Felduntersuchungen erforderlich.

Aufgrund der großen Bohrdurchmesser fällt bei Grundwasserzirkulationsbrunnen gegenüber konventionellen Brunnen etwa die 7-fache Menge an Bohrgut an. Damit wird auch die 7-fache Menge an Schadstoffen an die Atmosphäre abgegeben.

Nachteilig an Grundwasserzirkulationsbrunnen sind zudem die hohen Investitionskosten.

# 7 Empfehlungen zum weiteren Vorgehen

Grundsätzlich erachten wir lediglich eine Intensivierung der hydraulischen Sanierung durch zusätzliche Tertiär- oder Grundwasserzirkulationsbrunnen für zielführend.

Im Frigenschadensbereich gibt es bisher nur geringe Kenntnisse hinsichtlich der hydrogeologischen Verhältnisse sowie der Schadstoffsituation. Auch die Auswirkungen einer Einmischung von Wasser aus dem tertiären Grundwasserleiter auf die Grundwasseraufbereitungsanlage kann nicht abschließend abgeschätzt werden.

Wir empfehlen daher, im ersten Schritt im Schadenszentrum eine Grundwassermessstelle im Tertiär auszubauen. Die Verfilterung sollte dabei oberhalb des bekannten Verunreinigungsbereichs enden, um eine Verlagerung von Schadstoffen zur Tiefe zu Vermeiden. Diese Grundwassermessstelle sollte anschließend in Form eines Pumpversuchs abgepumpt werden. Auf Basis der dabei gewonnenen Ergebnisse kann dann über das weitere Vorgehen (Bau weiterer Tertiärbrunnen oder Bau von Grundwasserzirkulationsbrunnen) entschieden werden.

# 8 Anlagen

Anlage 1: Schematische Darstellung der Ergebnisse aus DP-, MIP- und Grundwasseruntersuchungen

Anlage 2: Schematische Darstellung der Ergebnisse aus Boden- und Grundwasseruntersuchungen

Anlage 3: Schichtenprofile

# Anlage 1: Schematische Darstellung der Ergebnisse aus DP-, MIP- und Grundwasseruntersuchungen

# Schematische Darstellung der Schadstoffverteilung im Grundwasser

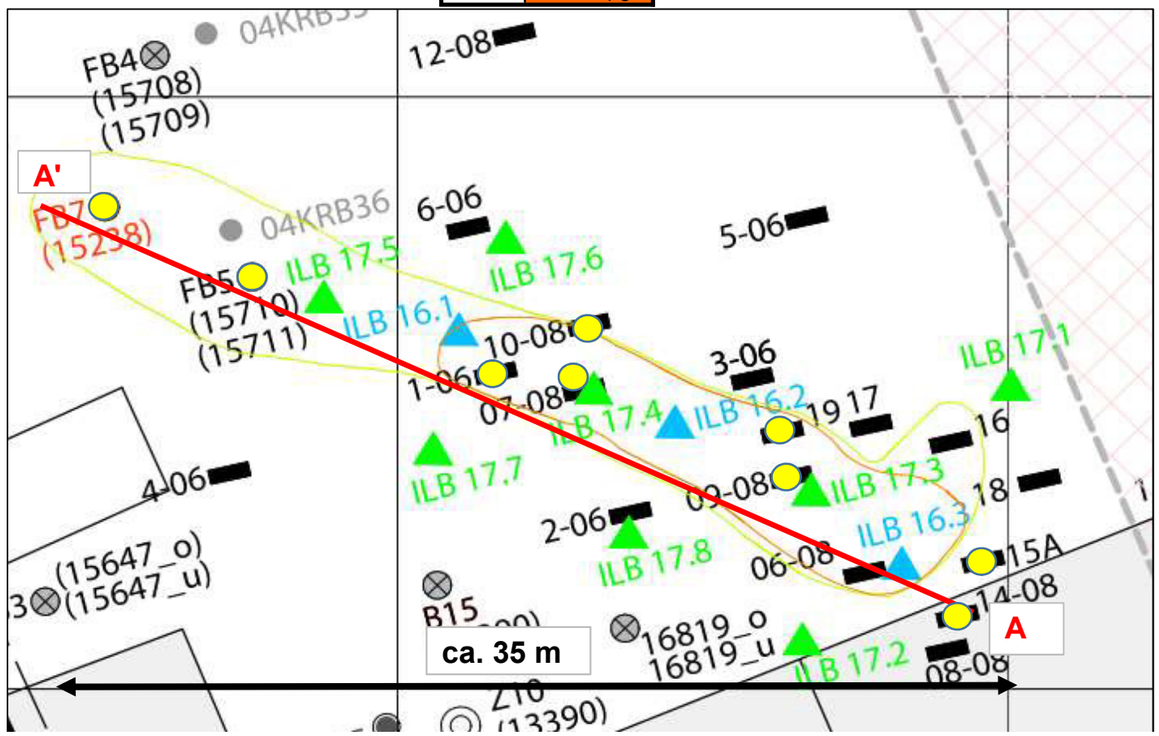
bfm.umwelt
BERATUNG • FORSCHUNG • MANAGEMENT • GMBH

**A'** ← **Grundwasserfließrichtung** **A**

| GWM 15238 | | GWM 15710 | | GWM 15711 | | DP 1-06 | | DP 10-08 | | DP 07-08 | | MIP 19 | | DB 09-08 | | DP 06-08 | | DP 14-08 | | MIP 15 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0-1m | | 0-1m | | 0-1m | | 0-1m | | 0-1m | | 0-1m | | 0-1m | < 100 µg/l | 0-1m | | 0-1m | | 0-1m | | 0-1m | < 100 µg/l |
| 1-2m | | 1-2m | | 1-2m | | 1-2m | | 1-2m | | 1-2m | | 1-2m | < 100 µg/l | 1-2m | | 1-2m | | 1-2m | | 1-2m | < 100 µg/l |
| 2-3m | 2017: 400 - 790 µg/l | 2-3m | | 2-3m | | 2-3m | | 2-3m | | 2-3m | | 2-3m | < 100 µg/l | 2-3m | | 2-3m | | 2-3m | | 2-3m | < 100 µg/l |
| 3-4m | | 3-4m | | 3-4m | | 3-4m | | 3-4m | | 3-4m | | 3-4m | < 100 µg/l | 3-4m | | 3-4m | | 3-4m | | 3-4m | < 100 µg/l |
| 4-5m | | 4-5m | | 4-5m | | 4-5m | | 4-5m | | 4-5m | | 4-5m | < 100 µg/l | 4-5m | | 4-5m | | 4-5m | | 4-5m | < 100 µg/l |
| 5-6m | | 5-6m | | 5-6m | | 5-6m | | 5-6m | | 5-6m | | 5-6m | < 100 µg/l | 5-6m | | 5-6m | | 5-6m | | 5-6m | < 100 µg/l |
| 6-7m | | 6-7m | 2017: <0,5 - 0,7 µg/l | 6-7m | | 6-7m | | 6-7m | | 6-7m | | 6-7m | < 100 µg/l | 6-7m | | 6-7m | | 6-7m | | 6-7m | < 100 µg/l |
| 7-8m | | 7-8m | | 7-8m | | 7-8m | 96 µg/l | 7-8m | 120 µg/l | 7-8m | 1.900 µg/l | 7-8m | < 100 µg/l | 7-8m | | 7-8m | 9.800 µg/l | 7-8m | <1,0 µg/l | 7-8m | < 100 µg/l |
| 8-9m | | 8-9m | | 8-9m | | 8-9m | | 8-9m | | 8-9m | 8.200 µg/l | 8-9m | < 100 µg/l | 8-9m | | 8-9m | 20.000 µg/l | 8-9m | <1,0 µg/l | 8-9m | < 100 µg/l |
| 9-10m | | 9-10m | | 9-10m | | 9-10m | 20 µg/l | 9-10m | 75 µg/l | 9-10m | | 9-10m | < 100 µg/l | 9-10m | 640 µg/l | 9-10m | | 9-10m | <1,0 µg/l | 9-10m | < 100 µg/l |
| 10-11m | | 10-11m | | 10-11m | | 10-11m | | 10-11m | | 10-11m | 14.000 µg/l | 10-11m | < 100 µg/l | 10-11m | | 10-11m | 22.000 µg/l | 10-11m | <1,0 µg/l | | |
| 11-12m | | | | 11-12m | | 11-12m | 420 µg/l | 11-12m | 130 µg/l | 11-12m | | 11-12m | < 100 µg/l | 11-12m | 960 µg/l | 11-12m | | 11-12m | <1,0 µg/l | | |
| 12-13m | | | | 12-13m | | 12-13m | | 12-13m | | 12-13m | 39.000 µg/l | 12-13m | < 100 µg/l | 12-13m | | 12-13m | 28.000 µg/l | 12-13m | <1,0 µg/l | | |
| 13-14m | | | | 13-14m | | 13-14m | 11.000 µg | 13-14m | 100 µg/l | 13-14m | | 13-14m | < 100 µg/l | 13-14m | 1.900 µg/l | 13-14m | | 13-14m | <1,0 µg/l | | |
| 14-15m | | | | 14-15m | 2017: 1.200 - 1.700 µg/l | 14-15m | | 14-15m | | 14-15m | 83.000 µg/l | 14-15m | > 5.000 µg/l | 14-15m | | 14-15m | 72.000 µg/l | 14-15m | <1,0 µg/l | | |
| 15-16m | | | | 15-16m | | 15-16m | 22 µg/l | 15-16m | 270 µg/l | 15-16m | | 15-16m | > 5.000 µg/l | 15-16m | 6.300 µg/l | 15-16m | | 15-16m | <1,0 µg/l | | |
| 16-17m | | | | 16-17m | | 16-17m | | 16-17m | | 16-17m | 110.000 µg/l | 16-17m | > 5.000 µg/l | 16-17m | | 16-17m | 200.000 µg/l | 16-17m | <1,0 µg/l | | |
| 17-18m | | | | 17-18m | | 17-18m | 19 µg/l | 17-18m | 250 µg/l | 17-18m | | 17-18m | > 5.000 µg/l | 17-18m | 12.000 µg/l | 17-18m | | 17-18m | <1,0 µg/l | | |
| | | | | 18-19m | | | | 18-19m | | 18-19m | 1.900 µg/l | 18-19m | > 5.000 µg/l | 18-19m | | 18-19m | 1.100.000 µg/l | 18-19m | <1,0 µg/l | | |
| | | | | 19-20m | | | | 19-20m | 430 µg/l | | | 19-20m | > 5.000 µg/l | 19-20m | 76.000 µg/l | 19-20m | | 19-20m | <1,0 µg/l | | |
| | | | | | | | | 20-21m | | | | 20-21m | < 1.000 µg/l | 20-21m | | 20-21m | 1.300.000 µg/l | 20-21m | <1,0 µg/l | | |
| | | | | | | | | 21-22m | 350 µg/l | | | 21-22m | < 1.000 µg/l | 21-22m | 44.000 µg/l | 21-22m | | 21-22m | <1,0 µg/l | | |
| | | | | | | | | 22-23m | | | | 22-23m | < 1.000 µg/l | 22-23m | | 22-23m | 730.000 µg/l | 22-23m | <1,0 µg/l | | |
| | | | | | | | | 23-24m | 510 µg/l | | | 23-24m | < 1.000 µg/l | 23-24m | 48.000 µg/l | | | 23-24m | <1,0 µg/l | | |
| | | | | | | | | | | | | 24-25m | < 1.000 µg/l | | | | | | | | |

µgl/l
- < 20
- 20-100
- > 100

Quartär
Tertiär



# Anlage 2: Schematische Darstellung der Ergebnisse aus Boden- und Grundwasseruntersuchungen

Schematischer Profilschnitt A-A'
Frigen-Schaden

bfm.umwelt
BERATUNG • FORSCHUNG • MANAGEMENT • GMBH

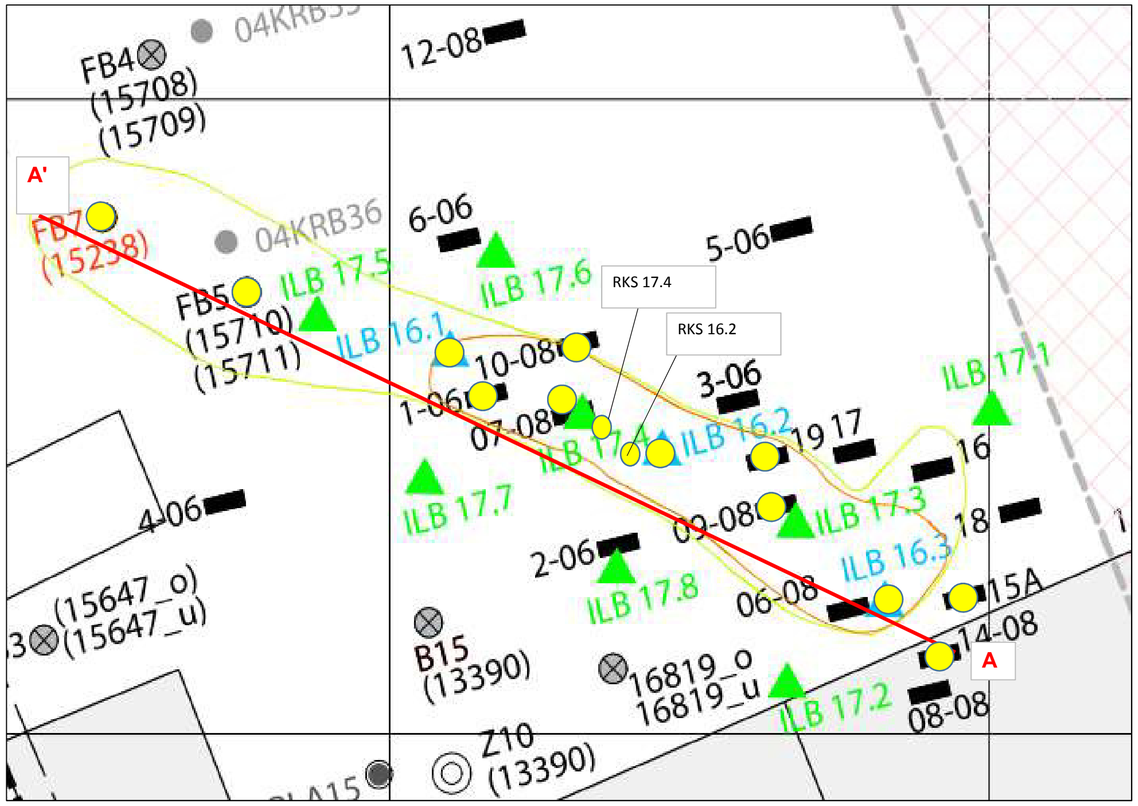
**A** — Grundwasserfließrichtung — **A'**

| GWM 15238 | | GWM 15710 | | GWM 15711 | | ILB 16.1 | | DP 1-06 | | DP 10-08 | | DP 07-08 | | RKS 17.4 | | RKS 16.2 | | ILB 16.2 | | MIP 19 | | DB 09-08 | | DP 06-08 | | ILB 16.3 | | DP 14-08 | | MIP 15 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0-1m | | 0-1m | | 0-1m | | 0-1m | 0 mg/kg | 0-1m | | 0-1m | | 0-1m | | 0-1m | 0 mg/kg | 0-1m | 0,7 mg/kg | 0-1m | 0 mg/kg | 0-1m | < 100 µg/l | 0-1m | | 0-1m | | 0-1m | 0,3 mg/kg | 0-1m | | 0-1m | < 100 µg/l |
| 1-2m | | 1-2m | | 1-2m | | 1-2m | 0 mg/kg | 1-2m | | 1-2m | | 1-2m | | 1-2m | 0,1 mg/kg | 1-2m | 0,6 mg/kg | 1-2m | 0 mg/kg | 1-2m | < 100 µg/l | 1-2m | | 1-2m | | 1-2m | 5,9 mg/kg | 1-2m | | 1-2m | < 100 µg/l |
| 2-3m | | 2-3m | | 2-3m | | 2-3m | 0 mg/kg | 2-3m | | 2-3m | | 2-3m | | 2-3m | 0 mg/kg | 2-3m | 0 mg/kg | 2-3m | 0 mg/kg | 2-3m | < 100 µg/l | 2-3m | | 2-3m | | 2-3m | 0 mg/kg | 2-3m | | 2-3m | < 100 µg/l |
| 3-4m | | 3-4m | | 3-4m | | 3-4m | 0 mg/kg | 3-4m | | 3-4m | | 3-4m | | 3-4m | 0 mg/kg | 3-4m | 0 mg/kg | 3-4m | 0 mg/kg | 3-4m | < 100 µg/l | 3-4m | | 3-4m | | 3-4m | 0 mg/kg | 3-4m | | 3-4m | < 100 µg/l |
| 4-5m | | 4-5m | | 4-5m | | 4-5m | 0 mg/kg | 4-5m | | 4-5m | | 4-5m | | 4-5m | 0 mg/kg | 4-5m | 0 mg/kg | 4-5m | 0 mg/kg | 4-5m | < 100 µg/l | 4-5m | | 4-5m | | 4-5m | 0 mg/kg | 4-5m | | 4-5m | < 100 µg/l |
| 5-6m | | 5-6m | | 5-6m | | 5-6m | 0 mg/kg | 5-6m | | 5-6m | | 5-6m | | 5-6m | 0 mg/kg | 5-6m | 0 mg/kg | 5-6m | 0 mg/kg | 5-6m | < 100 µg/l | 5-6m | | 5-6m | | 5-6m | 0 mg/kg | 5-6m | | 5-6m | < 100 µg/l |
| 6-7m | | 6-7m | | 6-7m | | 6-7m | 0 mg/kg | 6-7m | | 6-7m | | 6-7m | | 6-7m | 0 mg/kg | 6-7m | 0 mg/kg | 6-7m | 0 mg/kg | 6-7m | < 100 µg/l | 6-7m | | 6-7m | | 6-7m | 0 mg/kg | 6-7m | | 6-7m | < 100 µg/l |
| 7-8m | | 7-8m | 2017: | 7-8m | | 7-8m | 0 mg/kg | 7-8m | 96 µg/l | 7-8m | 120 µg/l | 7-8m | 1.900 µg/l | 7-8m | 0 mg/kg | 7-8m | 0 mg/kg | 7-8m | 0 mg/kg | 7-8m | < 100 µg/l | 7-8m | | 7-8m | 9.800 µg/l | 7-8m | 0 mg/kg | 7-8m | <1,0 µg/l | 7-8m | < 100 µg/l |
| 8-9m | | 8-9m | <0,5 - | 8-9m | | 8-9m | 0 mg/kg | 8-9m | | 8-9m | | 8-9m | 8.200 µg/l | 8-9m | 0 mg/kg | 8-9m | 0 mg/kg | 8-9m | 0 mg/kg | 8-9m | < 100 µg/l | 8-9m | | 8-9m | 20.000 µg/l | 8-9m | 0 mg/kg | 8-9m | <1,0 µg/l | 8-9m | < 100 µg/l |
| 9-10m | 2017: | 9-10m | 0,7 µg/l | 9-10m | | 9-10m | 0 mg/kg | 9-10m | 20 µg/l | 9-10m | 75 µg/l | 9-10m | | 9-10m | 0 mg/kg | 9-10m | 0 mg/kg | 9-10m | 0 mg/kg | 9-10m | < 100 µg/l | 9-10m | 640 µg/l | 9-10m | | 9-10m | 0 mg/kg | 9-10m | <1,0 µg/l | 9-10m | < 100 µg/l |
| 10-11m | 400 - | 10-11m | | 10-11m | | 10-11m | 0 mg/kg | 10-11m | | 10-11m | | 10-11m | 14.000 µg/l | 10-11m | 0 mg/kg | 10-11m | 0 mg/kg | 10-11m | 0 mg/kg | 10-11m | < 100 µg/l | 10-11m | | 10-11m | 22.000 µg/l | 10-11m | 0 mg/kg | 10-11m | <1,0 µg/l | | |
| 11-12m | 790 µg/l | | | 11-12m | | 11-12m | 0 mg/kg | 11-12m | 420 µg/l | 11-12m | 130 µg/l | 11-12m | | 11-12m | 0 mg/kg | 11-12m | 0 mg/kg | 11-12m | 0 mg/kg | 11-12m | < 100 µg/l | 11-12m | 960 µg/l | 11-12m | | 11-12m | 0 mg/kg | 11-12m | <1,0 µg/l | | |
| 12-13m | | | | 12-13m | | 12-13m | 0 mg/kg | 12-13m | | 12-13m | | 12-13m | 39.000 µg/l | 12-13m | 0 mg/kg | 12-13m | 0 mg/kg | 12-13m | 0 mg/kg | 12-13m | < 100 µg/l | 12-13m | | 12-13m | 28.000 µg/l | 12-13m | 0 mg/kg | 12-13m | <1,0 µg/l | | |
| 13-14m | | | | 13-14m | | 13-14m | 0 mg/kg | 13-14m | 11.000 µg/l | 13-14m | 100 µg/l | 13-14m | | 13-14m | 0 mg/kg | 13-14m | 0 mg/kg | 13-14m | 0,1 mg/kg | 13-14m | < 100 µg/l | 13-14m | 1.900 µg/l | 13-14m | | 13-14m | 0 mg/kg | 13-14m | <1,0 µg/l | | |
| 14-15m | | | | 14-15m | 2017: | 14-15m | 89 mg/kg | 14-15m | | 14-15m | 270 µg/l | 14-15m | 83.000 µg/l | 14-15m | 34 mg/kg | 14-15m | 96 mg/kg | 14-15m | 58 mg/kg | 14-15m | > 5.000 µg/l | 14-15m | | 14-15m | 72.000 µg/l | 14-15m | 0 mg/kg | 14-15m | <1,0 µg/l | | |
| 15-16m | | | | 15-16m | 1.200 - | 15-16m | 70 mg/kg | 15-16m | 22 µg/l | 15-16m | | 15-16m | | 15-16m | 3,8 mg/kg | 15-16m | 120 mg/kg | 15-16m | 130 mg/kg | 15-16m | > 5.000 µg/l | 15-16m | 6.300 µg/l | 15-16m | | 15-16m | 0 mg/kg | 15-16m | <1,0 µg/l | | |
| 16-17m | | | | 16-17m | 1.700 | 16-17m | 19 mg/kg | 16-17m | | 16-17m | | 16-17m | 110.000 µg | 16-17m | 40 mg/kg | 16-17m | 160 mg/kg | 16-17m | 180 mg/kg | 16-17m | > 5.000 µg/l | 16-17m | | 16-17m | 200.000 µg/l | 16-17m | 0 mg/kg | 16-17m | <1,0 µg/l | | |
| 17-18m | | | | 17-18m | µg/l | 17-18m | 6 mg/kg | 17-18m | 19 µg/l | 17-18m | 250 µg/l | 17-18m | | | | | | 17-18m | 171 mg/kg | 17-18m | > 5.000 µg/l | 17-18m | 12.000 µg/l | 17-18m | | 17-18m | 0 mg/kg | 17-18m | <1,0 µg/l | | |
| | | | | 18-19m | | 18-19m | 0,4 mg/kg | | | 18-19m | | 18-19m | 1.900 µg/l | | | | | 18-19m | 160 mg/kg | 18-19m | > 5.000 µg/l | 18-19m | | 18-19m | 1.100.000 µg/l | 18-19m | 0 mg/kg | 18-19m | <1,0 µg/l | | |
| | | | | 19-20m | | 19-20m | 0 mg/kg | | | 19-20m | 430 µg/l | | | | | | | 19-20m | 34 mg/kg | 19-20m | > 5.000 µg/l | 19-20m | 76.000 µg/l | 19-20m | | 19-20m | 0 mg/kg | 19-20m | <1,0 µg/l | | |
| | | | | | | 20-21m | 0 mg/kg | | | 20-21m | | | | | | | | 20-21m | 1,2 mg/kg | 20-21m | < 1.000 µg/l | 20-21m | | 20-21m | 1.300.000 µg/l | 20-21m | 0 mg/kg | 20-21m | <1,0 µg/l | | |
| | | | | | | 21-22m | 0 mg/kg | | | 21-22m | 350 µg/l | | | | | | | 21-22m | 7,6 mg/kg | 21-22m | < 1.000 µg/l | 21-22m | 44.000 µg/l | 21-22m | | 21-22m | 0 mg/kg | 21-22m | <1,0 µg/l | | |
| | | | | | | 22-23m | 0 mg/kg | | | 22-23m | | | | | | | | 22-23m | 0 mg/kg | 22-23m | < 1.000 µg/l | 22-23m | | 22-23m | 730.000 µg/l | 22-23m | 0 mg/kg | 22-23m | <1,0 µg/l | | |
| | | | | | | 23-24m | 0 mg/kg | | | 23-24m | 510 µg/l | | | | | | | 23-24m | 1,9 mg/kg | 23-24m | < 1.000 µg/l | 23-24m | 48.000 µg/l | | | 23-24m | 0 mg/kg | 23-24m | <1,0 µg/l | | |
| | | | | | | 24-25m | 0 mg/kg | | | | | | | | | | | 24-25m | 1,1 mg/kg | 24-25m | < 1.000 µg/l | | | | | 24-25m | 0 mg/kg | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | 25-26m | 0 mg/kg | | | | | | | 25-26m | 0 mg/kg | | | | |

µg/l < 20 / 20-100 / > 100

mg/kg < 1 / 1-10 / > 10

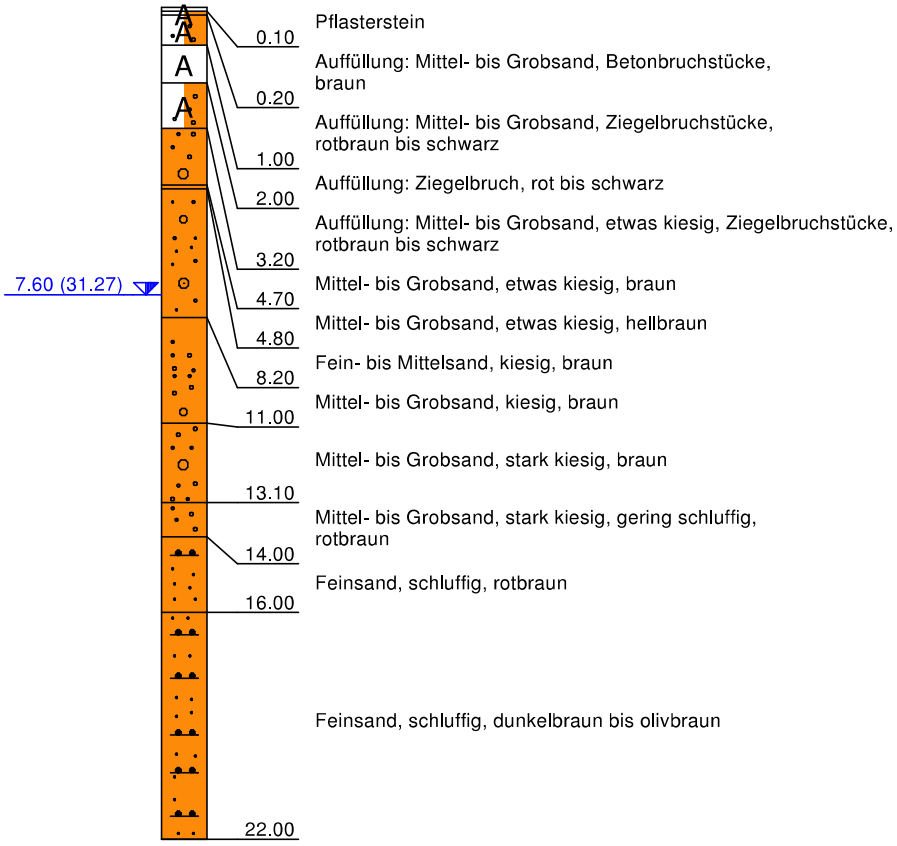
Quartär
Tertiär



# Anlage 3: Schichtenprofile

# ILB 17.1

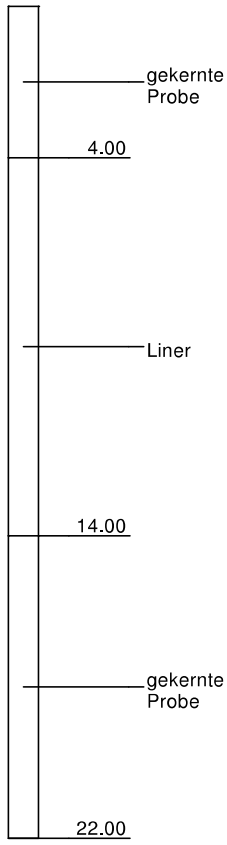
38,87 m NN





# ILB 17.1

38,87 m NN

# ILB 17.3

38,86 m NN

Pflasterstein

Auffüllung: Mittel- bis Grobsand, kiesig, Ziegelbruchstücke, Schotter, Schlacke, grau

Auffüllung: Mittel- bis Grobsand, kiesig, Ziegelbruchstücke, z. T. Betonbruch, Schotter, Schlacke, schwarz bis braun

Mittel- bis Grobsand, kiesig, dunkelbraun

Mittel- bis Grobsand, dunkelbraun

Mittel- bis Grobsand, kiesig, dunkelbraun

Mittel- bis Grobsand, braun

Mittel- bis Grobsand, kiesig, dunkelbraun

Mittel- bis Grobsand, kiesig, steinig, dunkelbraun

Mittel- bis Grobsand, kiesig, z. T. feinsandig, dunkelbraun bis rotbraun

Mittel- bis Grobsand, kiesig, dunkelbraun

Mittel- bis Grobsand, kiesig, braun

Mittel- bis Grobsand, etwas kiesig, braun

Feinsand, schluffig, rotbraun

Feinsand, schluffig, dunkelbraun

Feinsand, schluffig, dunkelbraun bis grau

Feinsand, schluffig, dunkelbraun mit rötlichen Einschlüssen

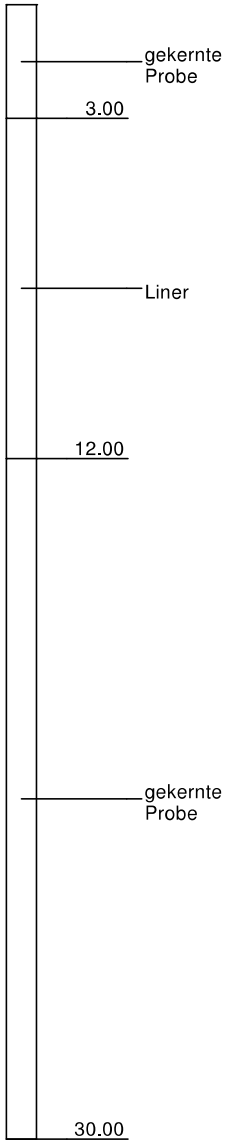
Feinsand, schluffig, graubraun mit rotbraunen Marmorierungen

Feinsand, schluffig, graubraun

Feinsand, schluffig, dunkelgrau

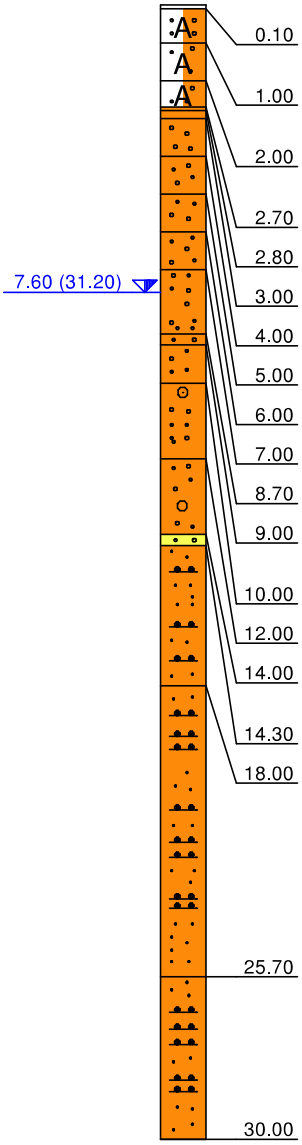
# ILB 17.3

38,86 m NN



# ILB 17.6

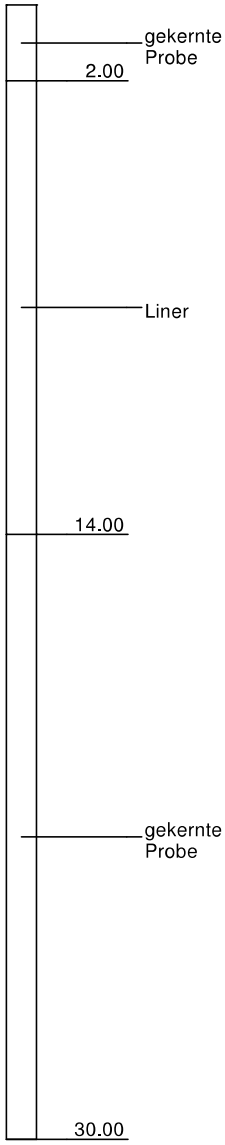
38,80 m NN




| | |
|---|---|
| 0.10 | Pflasterstein |
| 1.00 | Auffüllung: Mittel- bis Grobsand, Ziegelbruchstücke, z.T. Betonbruchstücke, Schlacke, schwarz, rot, braun |
| 2.00 | Auffüllung: Grob- bis Mittelsand, z.T. Ziegelbruchstücke, braun, rot |
| 2.70 | Auffüllung: Mittel- bis Grobsand, kiesig, z.T. Ziegelbruchstücke, dunkelbraun |
| 2.80 | Mittel- bis Grobsand, braun |
| 3.00 | Mittel- bis Grobsand, kiesig, graubraun |
| 4.00 | Grobsand, kiesig, braun |
| 5.00 | Mittel- bis Grobsand, feinkiesig, graubraun |
| 6.00 | Mittel- bis Grobsand, sehr schwach feinkiesig, braun |
| 7.00 | Mittel- bis Grobsand, sehr schwach kiesig, braun |
| 8.70 | Mittel- bis Grobsand, etwas kiesig, braun |
| 9.00 | Mittel- bis Grobsand, fein- bis mittelkiesig, braun |
| 10.00 | Mittel- bis Grobsand, feinkiesig, etwas mittelkiesig, braun |
| 12.00 | Mittel- bis Grobsand, etwas kiesig, braun |
| 14.00 | Mittel- bis Grobsand, stark kiesig, braun |
| 14.30 | Feinkies, mittel- bis grobsandig, kiesig, steinig, braun |
| 18.00 | Feinsand, gering schluffig, rotbraun |
| | Feinsand, gering schluffig, olive-braun |
| 25.70 | |
| | Feinsand, gering schluffig, grau |
| 30.00 | |

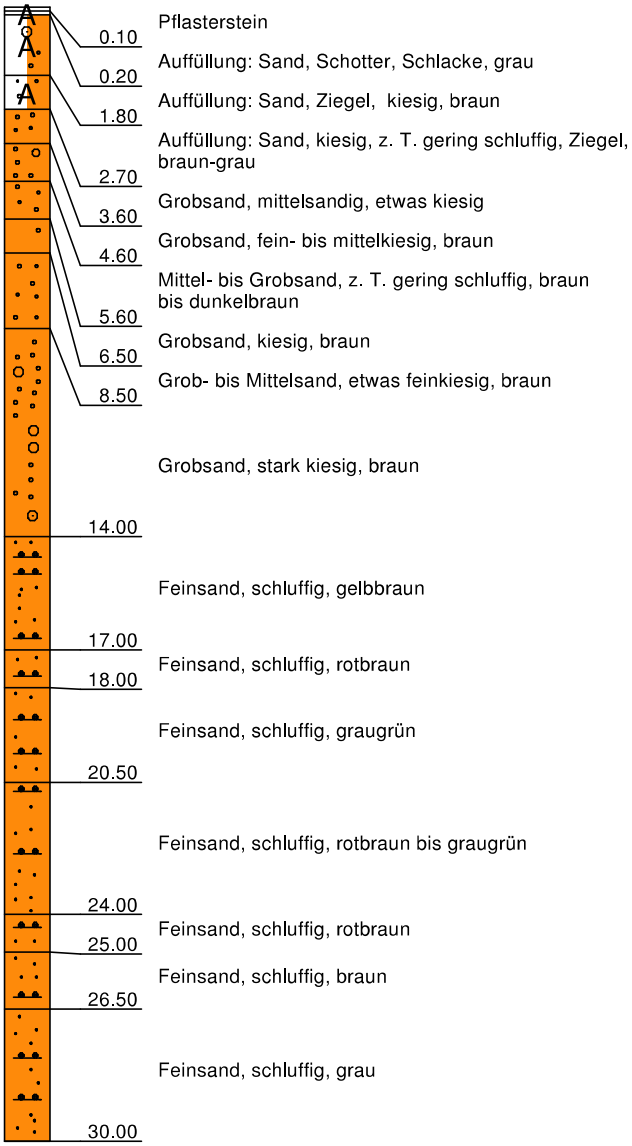

# ILB 17.6

38,80 m NN

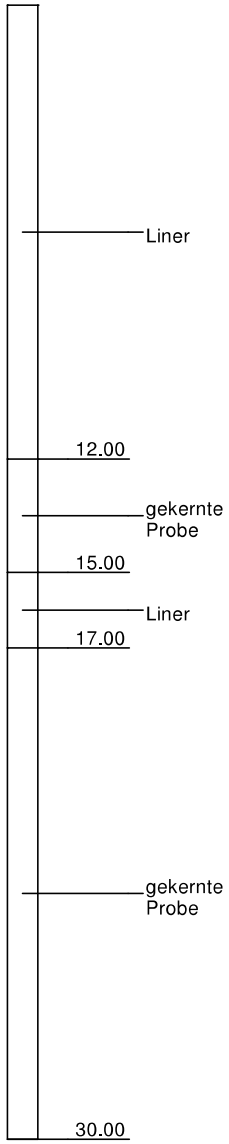



# ILB 17.7

38,80 m NN





# ILB 17.7

38,80 m NN