



Sachverständigenbüro für Altlasten, Baugrund und Hydrogeologie

AGUA GmbH, NL Kiel, Fraunhoferstraße 13, D-24118 Kiel

**German LNG Terminal GmbH
Elbehafen**

25541 Brunsbüttel

- **ALTLASTEN**
- **BAUGRUND**
- **HYDROGEOLOGIE**
- **DEPONIE**
- **ENTSORGUNG**
- **FLÄCHENRECYCLING**

Unser Zeichen: li
Ihr Zeichen:
Ort: Kiel
Datum: 30.09.2022

**K031-21: LNG-Terminal Brunsbüttel
Abschätzung der Grundwasserentnahme für die Baugruben-
entwässerung eines Regenwasser-Rückhaltebeckens**

Unsere Standorte:

Hauptsitz Angermünde
Niederlassung Kiel
Büro Berlin
Büro Güstrow
Büro Oberhausen

Vorgang

Die German LNG Terminal GmbH plant die Entwicklung eines multifunktionalen LNG Terminals in Brunsbüttel (Schleswig-Holstein), bestehend aus einem Prozessanlagenbereich und einer Rohrleitungstrasse. Auf dem Gelände ist u.a. ein Regenwasserrückhaltebecken (RRB) geplant, für den Bau des Beckens ist eine Baugruben-Grundwasserabsenkung erforderlich.

**SiGeKo RAB-30 BaustellIV
Asbestsanierung TRGS-519
Abfallmakler §50 KrWG**

**BDG, DGGT, DA, ITVA,
DVGW, FH-DGG**

AGUA GmbH wurde mit Mail vom 25.08.2022 vorab durch die German LNG Terminal GmbH mit der Abschätzung der Wassermengen beauftragt.

Diplom-Geologin
Andrea Dunkel

Verwendete Unterlagen

Für die Bearbeitung standen folgende Daten und Unterlagen zur Verfügung:

- Karte mit Lage und Abmessungen RRB.
- FUGRO 2021: Geotechnisches Baugrundgutachten.- Bericht, 132 Seiten zzgl. Anlagen.
- IGB 2008: Geotechnischer Vorbericht – Baugrunderkundung Schritt 1.- Bericht, 18 Seiten, zzgl. Anlage 2.3 und 3.2.
- AGUA 2022: Grundwassermonitoring auf dem LNG-Terminalgelände Brunsbüttel.- Zwischenbericht, 19 Seiten zzgl. Anlagen.
- AGUA 2022b: Grundwassermonitoring auf dem LNG-Terminalgelände Brunsbüttel.- monatliche Datenreports, Grafiken.

Anerkannt als Sachverständige nach
§18 BBodSchG für die Sachgebiete
1 (historische Erkundung)
2 (Gefährdungsabschätzung
Boden-Gewässer)
5 (Sanierung)
SH, BB, NW, BE, MV, SN

öffentlich bestellte und vereidigte Sach-
verständige gem. §36 GewO für Altlasten
und Bodenschutz durch
IHK Ostbrandenburg

Brandenburgische Ingenieurkammer

Diplom-Geologe
Dr. Martin Lilienfein

Hydrogeologie
Grundwassermodelle

Ingenieur- und Handelskammer zu Kiel

Geologie

In den Berichten zur Baugrund-Vorerkundung für ein Kohlekraftwerk (IGB 2008), zur Baugrunderkundung des LNG-Terminals (FUGRO 2021) sowie für den Grundwassermessstellenbau (AGUA 2022) sind verschiedene Bodenaufschlüsse auf dem Baufeld dokumentiert. Der geologische Aufbau bis zum ersten Grundwasserleiter ist relativ homogen (Schichtzuweisungen nach FUGRO 2021):

Unter einer 1,0 bis 2,4 m mächtigen feinsandigen, z. Teil auch schluffig-tonigen Auffüllung (Einheit 0) folgt bis in eine Tiefe von 18 m unter Gelände (uG) Klei, in den eine 0,7 bis maximal 2 m mächtige Torf- und Beckenschluffschicht eingeschaltet ist. Der Klei wird als schwach toniger und schwach feinsandiger Schluff mit Organikanteilen beschrieben, der lagenweise stark feinsandig sein und in tieferen Bereichen vereinzelt auch Feinsandlagen enthalten kann (Einheit 1a). Darunter folgen zunächst Fein- bis Mittelsande (Einheit 1b).

In zwei Bohrungen ist der liegende Grundwasserleiter vollständig bis 54 m uG aufgeschlossen, er besteht aus nach unten bis knapp 30 m uG zunächst gröber werdenden Sanden (Einheit 2). Im Liegenden folgen dann überwiegend Grob- und Mittelsande (Einheit 3) mit einzelnen Kieslagen zwischen 25 und 35 m.

Hydrogeologie

Das Umfeld der Untersuchungsreiches ist eingedeicht und weiträumig entwässert, ca. 90 m nördlich des geplanten RRB verläuft einer der Haupt-Entwässerungsgraben mit einem Wasserstand von ca. -0,65 m NHN. Das Baugelände für das LNG-Terminal ist mehr oder minder von Meliorationsgräben durchzogen und 50 m nördlich des geplanten RRB verläuft der Sammelgraben des Geländes.

Das Grundwasser in Schicht 1b, 2 und 3 ist ausweislich der beiden tief verfilterten Messstellen gespannt, das Grundwasser in Schicht 0 dagegen nicht: der Tidenhub paust sich in keiner der vier in ca. 1 bis 5 m uG verfilterten flachen Grundwassermessstellen durch (AGUA 2022). Dagegen ist in den beiden tiefen Grundwassermessstellen mit Filterstellung um 20 m uG der Tidenhub bis an die Nordgrenze des LNG-Terminalgeländes in abgeschwächter Form zu beobachten (AGUA 2022, GWM 5). Die geringe mittlere Wasserstandshöhe in GWM 5 von ca. -0,5 mNHN liefert einen Hinweis darauf, dass sich das Druckpotenzial des Haupt-Entwässerungsgrabens in den liegenden Grundwasserleiter durchpaust.

Aus den in FUGRO (2021) enthaltenen Siebanalysen wurden nach Ablesung der Daten aus der Siebkurve die Durchlässigkeitsbeiwerte der Einheiten 0, 1a, 1b und 2 nach verschiedenen Verfahren berechnet (Tabelle 1).

Tabelle 1 Berechnete Durchlässigkeitsbeiwerte k_f der Einheiten 0, 1a, 1b und 2 in [m/s]

Bez.	Tiefe	geol. Einheit	BEYER	KAUBISCH	Max ohne Bialas	Bialas
BH2-ST1	3,0-3,5 m	1a	$6,0 \cdot 10^{-9}$	k.B.	$6,0 \cdot 10^{-9}$	$4,5 \cdot 10^{-7}$
BH2-ST2	11,5-12,0 m	1a	$1,5 \cdot 10^{-9}$	k.B.	$1,5 \cdot 10^{-9}$	$4,5 \cdot 10^{-10}$
BH3-ST1	1,5-2,0 m	1a	k.B.	k.B.	-	$9,2 \cdot 10^{-11}$
BH3-ST2	3,5-4,0 m	1a	k.B.	$1,4 \cdot 10^{-9}$	$2,2 \cdot 10^{-9}$	$2,2 \cdot 10^{-9}$
BH3-ST3	9,5-10,0 m	1a	$1,5 \cdot 10^{-9}$	k.B.	$1,5 \cdot 10^{-9}$	$8,3 \cdot 10^{-10}$
BH4-ST1	2,0-2,5 m	1a	k.B.	k.B.	-	$4,5 \cdot 10^{-10}$
BH4-ST2	6,0-6,5 m	1a	$8,0 \cdot 10^{-7}$	$6,6 \cdot 10^{-8}$	$8,0 \cdot 10^{-7}$	$2,6 \cdot 10^{-6}$
BH4-ST3	10,0-10,3 m	1a	$6,0 \cdot 10^{-11}$	k.B.	$6,0 \cdot 10^{-11}$	$9,2 \cdot 10^{-11}$
Bez.	Tiefe	geol. Einheit	BEYER	HAZEN/ZIE-SCHANG	Max ohne Seelheim	SEELHEIM
BH4-B28	18-19 m	1b	$1,9 \cdot 10^{-4}$	$2,3 \cdot 10^{-4}$	$2,3 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$
BH4-B34	24-25m	2	$1,9 \cdot 10^{-4}$	$2,6 \cdot 10^{-4}$	$2,6 \cdot 10^{-4}$	$1,9 \cdot 10^{-4}$
BH4-B37	27-27,6m	2	$5,8 \cdot 10^{-4}$	$8,1 \cdot 10^{-4}$	$8,1 \cdot 10^{-4}$	$8,2 \cdot 10^{-4}$
BH4-B39-41	28-31m	3	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{-3}$	$2,6 \cdot 10^{-3}$
BH4-B46	35-36m	3	$5,0 \cdot 10^{-4}$	$6,3 \cdot 10^{-4}$	$6,3 \cdot 10^{-4}$	$3,9 \cdot 10^{-4}$
BH4-B63	49-50m	3	$2,1 \cdot 10^{-4}$	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$2,4 \cdot 10^{-4}$

k.B.: keine Berechnung

Quellen: BEYER (1964), für Sande sehr gut geeignet

KAUBISCH, FISCHER & PETZOLD (1989), ergänzt BEYER in schluffigen Sedimenten

BIALAS (1970): einfaches Verfahren für gering durchlässige Sedimente

HAZEN-ZIESCHANG (1961): ausschließlich für geringe Ungleichförmigkeitsgrade

SEELHEIM (1880): einfaches Verfahren

Die Verfahren nach Bialas und Seelheim sind stark überschlägige Verfahren, die Ergebnisse werden daher nur hilfsweise herangezogen. Die Einheit 1a (Klei) ist nach Siebanalysen mit Werten von $8 \cdot 10^{-7}$ bis $6 \cdot 10^{-11}$ m/s als gering bis sehr gering durchlässig einzuschätzen. Die Einheit 1b und 2 (Grundwasserleiter) dagegen mit $2 \cdot 10^{-4}$ bis $6 \cdot 10^{-4}$ m/s und Einheit 3 mit $2 \cdot 10^{-4}$ bis $1 \cdot 10^{-3}$ m/s als gut durchlässig. Probe BH4-ST2 zeigt für den Klei einen ungewöhnlich hohen k_f -Wert, dies ist wahrscheinlich auf die Beimengung von Feinsand i.H. von 60 % aus einer wie oben erwähnten Sandlage zurückzuführen.

Einordnung der geologisch-hydrogeologischen Daten in ein Datenmodell

Die ca. 2 m mächtige Auffüllung ist überwiegend sandig und war im Winter 2021/2022 nahezu vollständig wassererfüllt, im Frühjahr sank der Grundwasserstand um ca. 1,5 m. Der Wasserstand in den tiefen Grundwassermessstellen Die Wasserführung in der Auffüllung ist hydraulisch offensichtlich von der des tiefen Grundwasserleiters abgekoppelt. Der Durchlässigkeitsbeiwert für diese Einheit wird mit $1 \cdot 10^{-5}$ m/s angenommen.

Der ca. 16 m mächtige Klei ist sehr gering durchlässig, es ist jedoch mit Sandlagen zu rechnen, die aller Wahrscheinlichkeit nach jedoch nur lokal ausgebildet sind und nur ein sehr geringes Risiko einer hydraulisch wirksamen Vernetzung aufweisen. Die hydraulische Durchlässigkeit dieser Einheit wird mit $5 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$ angenommen. Diese Annahme fällt etwas höher aus als aus Tabelle 1 ableitbar, da der Klei mit sandigen Partien und feinsandlagen beschrieben wird. Wegen (Fein-)Schichtung von Sedimenten ist der vertikale Durchlässigkeitsbeiwert in den meisten Fällen um Faktor 5 bis 10 geringer als der horizontale Durchlässigkeitsbeiwert.

Einheit 1b, 2 und 3 repräsentieren die liegenden Sande mit einer Mächtigkeit von ca. 34 m, die hydraulische Durchlässigkeit wird mit einem k_f -Wert von $2 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ angenommen.

Randbedingungen

Das Gelände um das geplante RRB ist von flachen Meliorationsgräben durchzogen, die das Oberflächenwasser nach Norden in einen ebenfalls flachen Graben ableiten (geschätzte Sohlhöhe 1,0 mNHN). Im Winter staute sich das Wasser nach Starkniederschlägen bis zur Geländeoberkante (GOK) auf und bildete z.T. flache Oberflächengewässer. Im Frühjahr und überwiegend trockenen Sommer 2022 fand eine Entwässerung der Schicht 0 eher durch Evaporation und Oberflächenabfluss als durch Passage des grundwassergeleitenden Kleis statt.

Die Grundwasserneubildung ist daher nur als geringer Betrag in Höhe von 0 bis 50 mm/a anzunehmen, die Drainagegräben sind daher im Modell nicht im Einzelnen berücksichtigt.

Die Regenwasserspende wird separat betrachtet: Im Mai 2022 wurde im Rahmen des Grundwasserstands-Monitorings die seit November 2021 maximale Niederschlagsmenge von 12 mm/Tag und 10 mm/Tag an den DWD-Stationen in Wacken und Cuxhaven verzeichnet.

Geplante Baugrube

Das RRB soll eine Fläche von $91 \times 31 \text{ m}$ (2.820 m^2) umfassen, die Sohle des Beckens ist bei -2,5 mNHN geplant. Weder die Auffüllung noch der Klei können auf Grundlage der Bohrprofile als standfest bewertet werden, daher wird eine allseitig dichte Baugrubenumschließung erforderlich sein. Die umschlossene Fläche wird mit $40 \times 100 \text{ m}$ (3.900 m^2) angenommen.

Eine Baugrubenentwässerung durch Brunnen ist wegen des gering durchlässigen Kleis ausgeschlossen, daher ist mit offener Wasserhaltung innerhalb der Baugrubenumschließung zu verfahren.

Gewähltes Berechnungsverfahren und Zellbelegung

Für die Abschätzung der zu hebenden Wassermengen wurde als Modellprogramm das finite-Elemente-Strömungsmodell MicroFem 4.10 von CEMS BV (Hemker & deBoer 2021) gewählt. Mit einem finite Elemente Modell lassen sich Strukturdetails gut realistisch nachbilden.

Die Modellränder mit festem Druckpotenzial bilden der Kanal (-0,6 mNHN), die Elbe (0,0 mNHN) sowie ausreichend entfernte Zuggräben (0,1 mNHN), die Größe des Prinzipmodell-Gebietes beträgt knapp 940 ha.

Insgesamt wurden 5 Modellschichten berücksichtigt:

- +1,5- 0 m NHN: Schicht 0 als sandige Auffüllung,
- 0 - -3,5 m NHN: Schicht 1a (Klei) bis Absenkziel
- -3,5 - -10 m NHN: Schicht 1a (Klei) bis Basis Spundwand
- -10 - -18 m NHN: Schicht 1a (Klei) ohne Spundwand
- -18 - -54 m NHN: Schicht 1b, 2 und 3 (Sande) als 1. Grundwasserleiter bis zur Basis

Die Grundwasserneubildung wurde mit 50 mm/a berücksichtigt, der horizontale Durchlässigkeitsbeiwert wurde gemäß dem o.g. Datenmodell berücksichtigt. Für den vertikalen Durchlässigkeitsbeiwert wurden zwei Varianten gewählt: der gleiche (und nicht um Faktor 5 abgeminderte k_f) sowie eine um Faktor 4 erhöhte vertikale Wegsamkeit.

Die Baugrubenabsenkung wurde durch ein Festpotenzial 1 m unter Baugrubensohle bei -3,5 mNHN realisiert.

Die reine Berechnung erfolgt stationär, d.h. nach Einstellen des hydraulischen Gleichgewichts, also dem Erreichen und Halten des Absenkungsziels. Der Absenkungsvorgang ist dagegen instationär, d.h. es sind höhere Entnahmemengen erforderlich, um das Grundwasser auf das Absenkungsziel zu bringen. Darüber hinaus ist der Niederschlag in Form einer Regenspende zu berücksichtigen.

Berechnungsergebnisse

Im Modell beträgt der Ruhewasserstand im Objektgebiet in Schicht 1 1,35 mNHN, was in etwa dem mittleren Wasserstand der GWM 3, 4 und 6 im März und April 2022 entspricht (Variante 0). Im Grundwasserleiter liegt der Wasserstand bei ± 0 mNHN. Das Wasser strömt demnach unter Nichtberücksichtigung der Dränggräben in Richtung Elbe und Kanal (Abbildung 1).

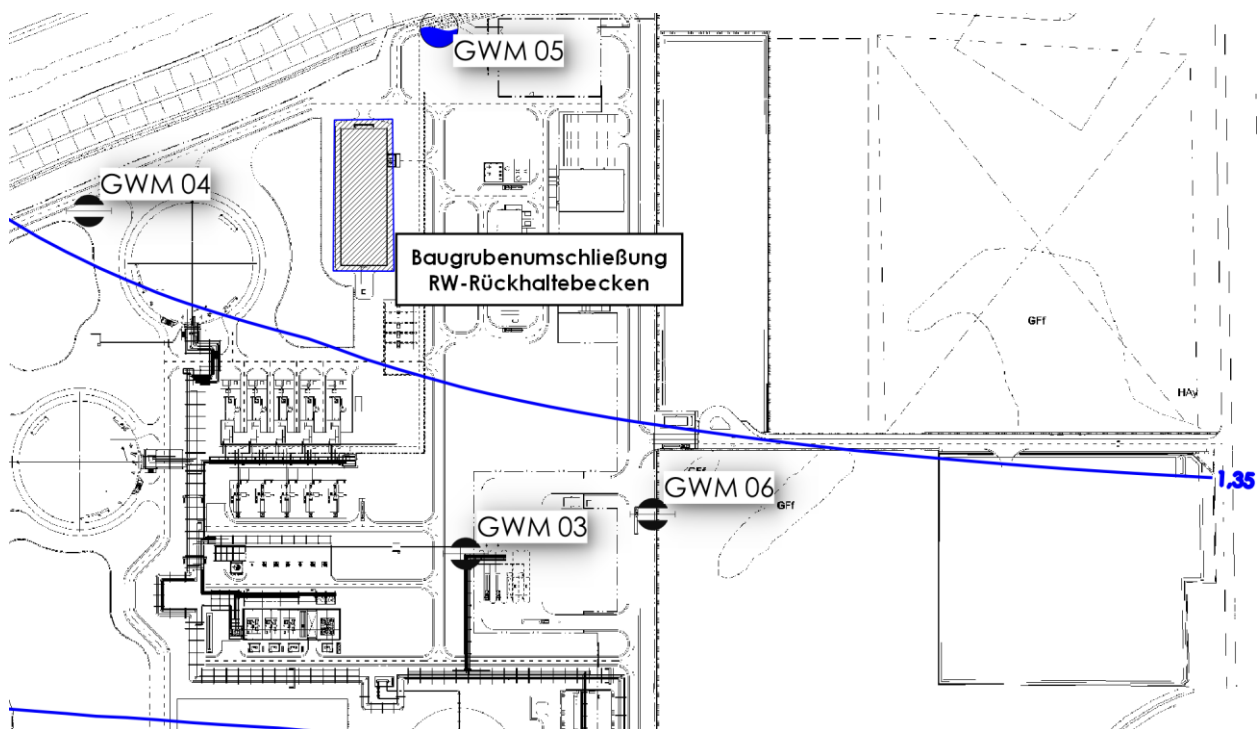


Abbildung 1 Lage des RW-Rückhaltebeckens und der umliegenden Grundwassermessstellen und berechnete Grundwassergleichen 1,35 mNHN (oben) und 1,30 mNHN

Zum Halten der Absenkung auf -3,5 mNHN sind rechnerisch 4 m³/d erforderlich, wobei von einer idealen Baugrubenumschließung ausgegangen wird (Hauptvariante 1). Bei einer besseren vertikalen Durchlässigkeit ($k_f \cdot 4$) steigt die Zustrommenge zum Halten der Absenkung auf knapp 10 m³/d. In Abbildung 2 ist die berechnete Absenkung mit Baugrubenumschließung dargestellt, in Abbildung 3 nur zum hypothetischen Vergleich ohne jegliche Baugrubensicherung.

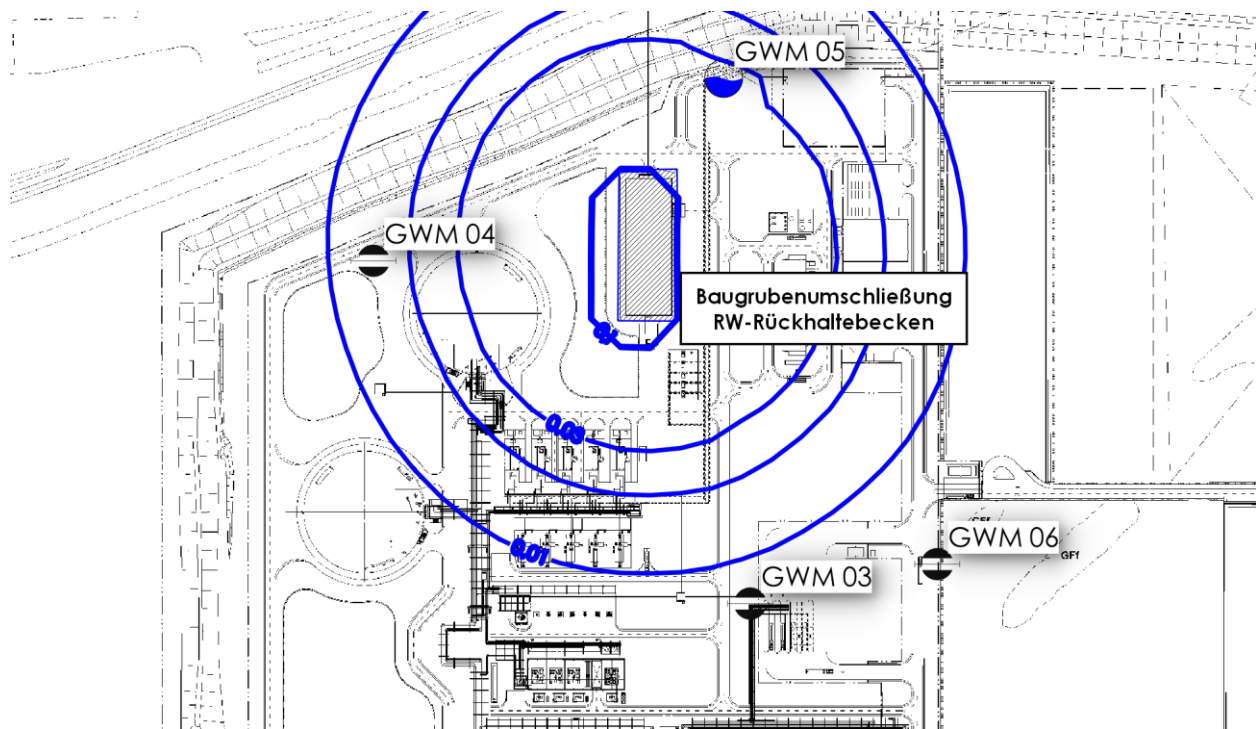


Abbildung 2 Berechnete Absenkung mit wasserdichter Baugrubenumschließung (Variante 1)

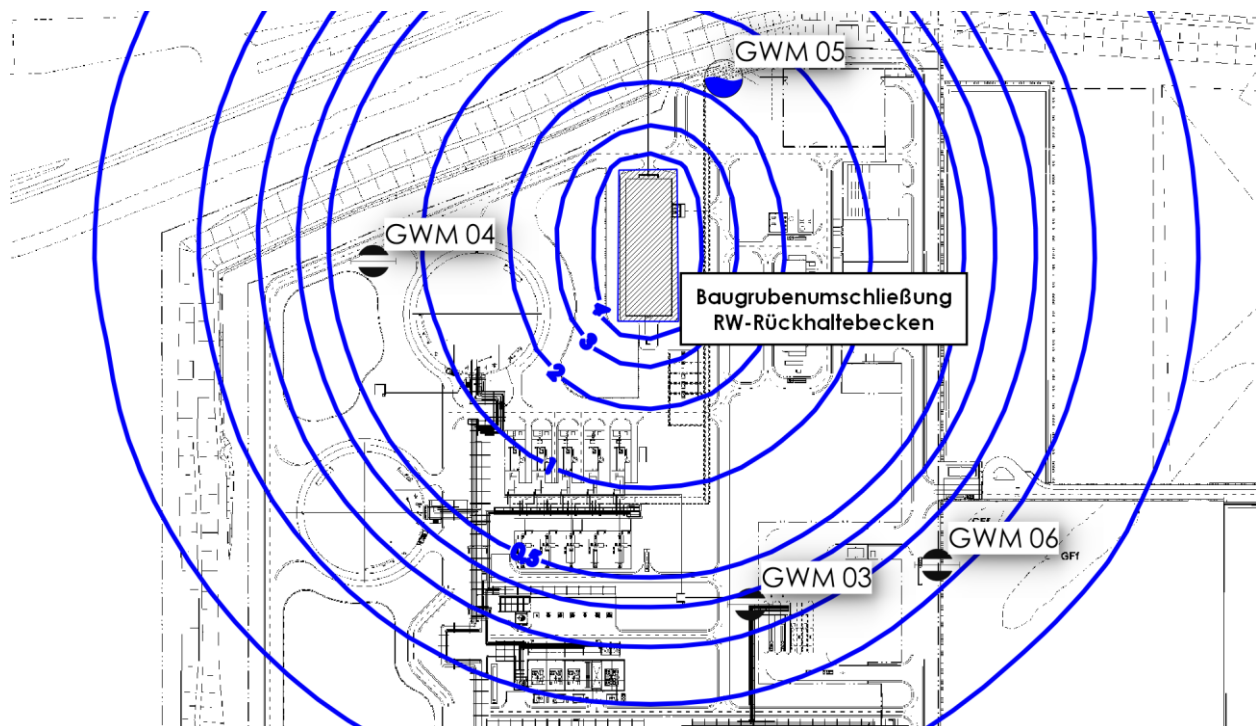


Abbildung 3 Berechnete, rein hypothetische Absenkung ohne Baugrubenumschließung
Diese Variante ist eine reine Vergleichsvariante, ohne Baugrubenumschließung ist ein Aushub in den weichen Sedimenten ausgeschlossen

Die Absenkung außerhalb der wasserdichten Baugrubenumschließung ist gering, rechnerisch beträgt die Absenkung ca. 10 cm unmittelbar außerhalb der Umschließung und 1 cm in ca. 200 m Abstand.

Die in Abbildung 3 berechnete Variante ist rein hypothetisch, ohne Baugrubenumschließung ist ein Aushub in den weichen Sedimenten ausgeschlossen. Die Böschungsneigung wäre unkalkulierbar, rutschungsgefährdet und allein aus Arbeitsschutzgründen nicht genehmigungsfähig.

Wassermengenberechnung

Im Schutz einer wasserdichten Umschließung ist mit geringen Wassermengen $<1 \text{ m}^3/\text{h}$ aus dem Liegenden zu rechnen. Relevant für die Wasserhaltung sind

- Grundwasserzutritt über Baugrubensohle,
- austretendes Porenwasser im Rahmen des Aushubs,
- Niederschlag und
- Zutritt über undichte Stellen der Baugrundumschließung.

Die Gesamtwassermenge im Substrat dürfte bei einem Aushubvolumen von ca. 18.000 m^3 bei ca. 7.500 m^3 liegen (Porenvolumen ca. 40%), wobei ca. 50 % mit dem Aushub entnommen wird. Bei 2 Wochen Aushubzeit fallen hierdurch ca. $370 \text{ m}^3/\text{d}$ Wasser im Rahmen der Aushubarbeiten zzgl. der ausblutenden Wassermenge an.

Der Niederschlag wird mit einer Tages-Regenspende von $100 \text{ mm}/\text{d}$ berücksichtigt, hierdurch ergibt sich eine zu entwässernde maximale Regenmenge von $390 \text{ m}^3/\text{d}$.

Die berechnete Gesamtfördermenge würde damit im Rahmen der Aushubphase rund $800 \text{ m}^3/\text{d}$ betragen, einschl. Sicherheitszuschlag wird eine vorzuhaltende Förderkapazität von $50 \text{ m}^3/\text{h}$ empfohlen, die auf mehrere Pumpen aufzuteilen wäre. Zum Halten des Wasserstands sind unter Berücksichtigung der maximalen Tages-Regenmenge ca. $400 \text{ m}^3/\text{d}$, mit Sicherheitszuschlag $30 \text{ m}^3/\text{h}$ vorzuhalten.

Bewertung und Empfehlung

Eine wasserdichte Baugrubenumschließung ist aufgrund des wenig standfesten Kleis, der zudem noch zumindest in tieferen Abschnitten Sandlagen aufweist, unverzichtbar. Die

Wasserhaltung kann ausschließlich als offene Wasserhaltung mit Pumpensäugern betrieben werden.

Die Förderrate zum Halten des Wasserstands ist bei wasserdichter Umschließung (kein seitlicher Wasserzutritt) mit $< 1 \text{ m}^3/\text{h}$ als gering einzuschätzen, maßgeblich in der Absenkungsphase sind Porenwasser und Niederschlag. In der Absenkungsphase wird eine vorzuhaltende Förderkapazität von $50 \text{ m}^3/\text{h}$ und zum Halten der Absenkung von $30 \text{ m}^3/\text{h}$ empfohlen. Undichtigkeiten der Umschließung sind als Aufschläge zu berücksichtigen.

Die erforderliche Wasserhaltung für hier betrachtete größte Baugrube mit den Abmessungen $91 \times 31 \text{ m}$ im Baufeld beispielhaft berechnet. Ausweislich der Bohrergebnisse der Grundwassermessstellen und Baugrundbohrungen ist flächenhaft mit einem geringen Wasserzutritt aus dem gespannten Grundwasserleiter unterhalb des Kleis zu rechnen.

Hinweise

Die Einleitung des Wassers ist genehmigungspflichtig, zuständig ist die untere Wasserbehörde des Kreises Dithmarschen. Die Trübe im geförderten Wasser ist vor der Einleitung über Absetzbecken oder Kiesfilter zu entfernen, ggf. ist eine chemische Überwachung und ein Einleitbauwerk (Prallbleche o.ä.) vorzusehen.

Bei der Planung des Wasserbeckens ist darüber hinaus

- eine dichte Baugrubenumschließung,
- die Auftriebssicherheit des Beckens sowie
- die Vermeidung eines hydraulischen Grundbruchs

während der Aushubarbeiten und der Bauphase zu berücksichtigen. Dies gilt ebenso für kleinere Baugruben, wobei in kleinen Baugruben bei sehr geringen Aushubtiefen und niedrigen Grundwasserständen ggf. auf die feste Umschließung verzichtet werden kann.

Aufgestellt in Kiel, 17.09.2022

Überarbeitet am 30.09.2022

gez. ppa. Dr. Martin Lilienfein
- Geschäftsführer NL Kiel -