

PSKW – Happurg: Planfeststellung Sanierung Oberwasserspeicher

Geologisch, geotechnischer Untersuchungsbericht

Dok.-Nr.:
HAP-OB-B-001

Rev:
00

Dateiname:
HAP-OB-B-001.docx

Uniper Kraftwerke GmbH

HAP/OB: Planfeststellung

Autor
Selami Güven
Hans Eichiner

Datum
22/12/2022

Mobil
+90 536 773 6108
E-mail
selami.gueven@afry.com

Projekt ID
119001685-001

Kunde
Uniper Kraftwerke GmbH

Inhaltsverzeichnis

1	Grundlagen	6
1.1	Allgemeines und Berichtsinhalt.....	6
1.2	Planungsunterlagen.....	6
1.2.1	Berichte.....	6
1.2.2	Pläne.....	7
1.2.3	Normen und Richtlinien	8
1.2.4	Anlage.....	8
1.2.5	Literatur	8
1.2.6	Software	8
2	Projektgebiet/Projektbeschreibung.....	9
3	Geologie	10
3.1	Allgemeine Geologie	10
3.2	Geologische und Geotechnische Erkundungen	13
3.2.1	Baugrunderkundungen vor 2011.....	13
3.2.2	Erkundungen 2011	14
3.2.3	Erkundungen 2012 im Ringdammbereich	15
3.2.4	Erkundungen 2012 - 2013	19
3.2.5	Erkundungen 2022	23
4	Geologisch/geotechnisches 3D Untergrundmodell.....	25
4.1	Modellerstellung	28
4.2	Darstellungen von Karstverfüllungen und Hohlräumen.....	28
4.3	Gebirgsarten und geologisch/geotechnische Einheiten	29
4.3.1	Tonbetondichtung wasserseitige Dammböschung und Lehmdichtung Beckensohle	29
4.3.2	Versturzzone / Lockergestein (Zone 1)	30
4.3.3	Malmkalk (Zone 2)	30
4.4	Geotechnische Charakterisierung der Gebirgsarten	32
4.4.1	Ausgeführte Materialprüfungen in 2011	32
4.4.2	Zusätzliche Materialprüfungen in 2022.....	34
4.4.3	Geotechnische Parameter für Planfeststellung 2022.....	35
4.5	Hydrogeologische Verhältnisse im Speicherbereich.....	36
4.5.1	Hydraulischen Bohrlochversuche.....	36
4.5.2	Grundwasserbeobachtungen	38
4.5.3	Grundwassermessungen im Bereich des Ornatentons.....	41
4.5.4	Grundwasserchemismus	45
5	Baugeologische Beschreibung.....	46
5.1	Dammaufstandsfläche	46
5.2	Beckensohle.....	46
5.3	Kontrollgang	47
6	Zusammenfassung	49
7	Anlage A	51

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildung 1: Luftbild des PSW Happurg Projekt Beriech (Bild aus Google-Earth).....	9
Abbildung 2: Ausschnitt aus der Geologischen Karte GK Blatt Nr. 6534 Happurg [L1]	11
Abbildung 3: Geotechnisches Untersuchungsprogramm (Anlage 2.1 aus [B2])	14
Abbildung 4: Erkundungsbohrungen für Dammaufstandsfläche – Norden (Bild aus [B3]) ..	16
Abbildung 5: Schnitt aus dem 3D Untergrundmodell in Dammaufstandsfläche – Norden ...	17
Abbildung 6: Erkundungsbohrungen auf der Dammaufstandsfläche – Westen (Bild aus [B3])	17
Abbildung 7: Schnitt aus dem 3D Untergrundmodell in Dammaufstandsfläche – Westen ...	18
Abbildung 8: Lage Erkundungsbohrungen im Bereich der Dammaufstandsfläche – Osten (Abbildung aus [B3])	18
Abbildung 9: Schnitt aus dem 3D Untergrundmodell in Dammaufstandsfläche – Osten	19
Abbildung 10: Erkundungsprogramm außerhalb der Versturzone (Plan aus [B4])	20
Abbildung 11: Ergänzende Erkundungen mit Vollbohrungen (Plan aus – [B5])	22
Abbildung 12: Beispiel aus dem Bohrprotokoll der Vollbohrung C080-F3.....	23
Abbildung 13: Lokationen der Bohrungen (Lageplan aus [B7])	24
Abbildung 14: 3D Untergrundmodell – Darstellung der berücksichtigten Bohrungen	25
Abbildung 15: Laserscan UTM-32, exportiert am 06.07.2021 und Luftbild.....	25
Abbildung 16: Berücksichtigte Bohrungen.....	26
Abbildung 17: Geophysikalische Untersuchungen/Interpretationen	27
Abbildung 18: 3D-Strukturen inklusive Höhenschichtenlinien Felsoberkante	27
Abbildung 19: Fertiggestelltes 3D-Untergrundmodell.....	28
Abbildung 20: Ausschnitt Darstellung Karsthohlraum und Karstverfüllung.....	28
Abbildung 21 Bohrprofile aus den Erkundungsbohrungen 2011 aus [B2]	29
Abbildung 22: Bohrkernabschnitt - Sohldichtung aus der Erkundungsbohrung BK 1/2021 (0m bis 2m).....	29
Abbildung 23: Malmkalke aus der Erkundungsbohrung BK 5/2021 (12 m bis 20 m)	30
Abbildung 24: Lageplan inkl. Darstellung Felsoberfläche mittels Höhenschichtenlinien (ISO- Linien) und Darstellung von Zone 1 und Zone 2.....	31
Abbildung 25: Bohrkern aus Versturzone, Erkundungsbohrung BK 4/2021 (12 m bis 20m)	32
Abbildung 26: Zusammenstellung der Ergebnisse der einaxialen Druckversuchsergebnisse über Tiefe (Felskerne, Kalkstein) [B1]	33
Abbildung 27: Geschätzter GSI Bereich für den unverwitterten Kalkstein [L2]	36
Abbildung 28: Tiefenabhängige Darstellung der aus den WD-Tests ermittelten Lugeon-Werte	38
Abbildung 29: Zusammenstellung sämtlicher Grundwassermessdaten (Betrachtungszeitraum 2013 – 2021).....	39
Abbildung 30: Grundwassermessungen im Nahbereich der Beckensohle, Betrachtungszeitraum 2013 - 2021	40
Abbildung 31: Grundwassermessungen im Bereich des Ornatentons, Betrachtungszeitraum 2013 - 2021.....	41
Abbildung 32: Lageplan inkl. Schnittführung (vgl. Abbildung 33 und Abbildung 34).....	42
Abbildung 33: Interpolierte Grundwasseroberflächen, Blickrichtung Norden (3D Untergrundmodell) – Schnitt 1-1	42
Abbildung 34: Interpolierte Grundwasseroberflächen, Blickrichtung Westen (3D Untergrundmodell) – Schnitt 2-2.....	43
Abbildung 35: Isolinien der GW-Oberfläche oberhalb des Ornatentons (1.03.2016)	44
Abbildung 36: Geologischer Längsschnitt entlang der Dammachse [P5].....	46
Abbildung 37: Geologischer Längsschnitt entlang 0+800 [P2]	47
Abbildung 38: Lageplan inkl. Felsoberfläche und Kontrollgangverlauf aus [A1]	47
Abbildung 39: Fundierung Kontrollgang in Zone 1	48
Abbildung 40 Bildschirmfoto [S1] mit Kontrollgang und Felsoberfläche.....	48

Tabelle 1: Untersuchungen vor 2011 (Tabelle aus [B1])	13
Tabelle 2: Zusammenstellung der Ergebnisse der einaxialen Druckversuche (Felskerne, Kalkstein) [B1]	33
Tabelle 3: Ergebnisse der Bohrlochseitendruckversuche (Seitendrucksonde) [B7]	34
Tabelle 4: Geotechnische Materialparameter	35
Tabelle 5: Ergebnisse der 2011 im Kalkstein ausgeführten WD-Versuche [B1]	37
Tabelle 6: Grundwassermessungen im Nahbereich der Beckensohle	40
Tabelle 7: Entnommene Wasserproben im Bereich des Oberbeckens mit gemessenen Feldparametern [B1]	45

Versionsverlauf

Ver.	Anmerkung	Erstellt	Datum	Geprüft	Datum
00	Erstausgabe	GüS/EiH	14.12.2022	SmM/VeM	18.12.22

1 Grundlagen

1.1 Allgemeines und Berichtsinhalt

Das PSW Happurg wurde in den Jahren 1954 bis 1957 errichtet. Für die Abdichtung des Oberbeckens wurde eine mineralische Dichtung (Tonbeton/Lehm) im Bereich der Beckensohle sowie auf den wasserseitigen Dammböschungen ausgeführt. Aufgrund der inhomogenen Gründungsverhältnisse und Wasserzutritte in den Untergrund (Undichtheiten Tonbetondichtung) kam es während des Betriebes immer wieder zu lokalen Sackungen (Schadensfällen). Diese Ereignisse führten dazu, dass die Anlage immer wieder, kurzfristig, außer Betrieb gesetzt wurde um Sanierungsarbeiten auszuführen. Nach dem Schadensereignis im Januar 2011 wurde das PSWK nicht wieder in Betrieb genommen.

Für die Planung einer nachhaltigen und sicheren Sanierung des Oberbeckens wurde basierend auf den vorhandenen Daten (siehe Abschnitt 3) ein geologisches 3D-Untergrundmodell erstellt. Im Zuge der Modellerstellung wurde der Untergrund geologisch/geotechnisch beurteilt bzw. interpretiert.

Dieser Bericht erläutert die Modellerstellung sowie die geologisch/geotechnische Interpretation, welche unter anderem die Zuteilung zu Gebirgsarten bzw. Zuweisung von geologisch/geotechnischen Parametern beinhaltet. Es wird sowohl auf die Böden/Gebirge als auch auf die Materialien, die für den Dammschüttkörper zu Anwendung kamen eingegangen. Dieser Untersuchungsbericht stellt eine Grundlage für die weiterführenden Geotechnischen Entwurfsberichte dar.

Der Bericht setzt auf den – im Folgenden angeführten – umfassenden Berichten und Gutachten auf, extrahiert und kondensiert relevante Inhalte und stellt eine Beurteilung und Interpretation der verfügbaren Daten und geologisch-geotechnischen Verhältnisse dar.

1.2 Planungsunterlagen

1.2.1 Berichte

Verweis Nr.	Inhalt
[B1]	Pumpspeicherkraftwerk Happurg Sanierung Oberbecken Untergrundsanie rung im Bereich der verfüllten Versturzzone, Baugrund und Sanierungsgutachten Professor Dr.-Ing. habil. Christian Moormann 31.01.2012 (Planfeststellung 22.12.2022, Anlage 3, [A3] aus HAP-OB-B-000, AFRY)
[B2]	Pumpspeicherkraftwerk Happurg Sanierung Oberbecken Untergrundsanie rung im Bereich der verfüllten Versturzzone, Baugrund und Sanierungsgutachtens Anlagen, Professor Dr.-Ing. habil. Christian Moormann 31.01.2012 (Planfeststellung 22.12.2022, Anlage 3, [A3] aus HAP-OB-B-000, AFRY)
[B3]	Ergänzende Kernbohrungen außerhalb der Versturzzone im Februar 2012, Prof Moormann, 16.03.2013 (Planfeststellung 22.12.2022, Anlage 3, [A8] aus HAP-OB-B-000, AFRY)
[B4]	Ergänzende Erkundung und Untergrundsanie rung außerhalb der Versturzzone- Ergänzung des Baugrund- und Gründungsgutachtens vom 31.01.2012, Prof. Moormann, 18.06.2012 (Planfeststellung 22.12.2022, Anlage 3, [A9] aus HAP-OB-B-000, AFRY)
[B5]	Erkundungsphase 6 - Rasterförmige Erkundung von Verdachtsflächen außerhalb der Versturzzone in der Beckensohle mittels Vollbohrungen. 4. Ergänzung zum

	Baugrund- und Gründungsgutachten vom 31.01.2012. Prof. Moormann, 15.09.2014 (Planfeststellung 22.12.2022, Anlage 3, [A7] aus HAP-OB-B-000, AFRY)
[B6]	Erkundungsphase 4 - Ergänzende Erkundung der Aufstandsfläche des Ringdammes außerhalb der Versturzzone. 2. Ergänzung zum Baugrund- und Gründungsgutachten vom 31.01.2012. Prof. Moormann, 01.03.2013 (Planfeststellung 22.12.2022, Anlage 3, [A10] aus HAP-OB-B-000, AFRY)
[B7]	Stellungnahme zu den ergänzenden Erkundungen 2022 – Boley Geotechnik GmbH 2022 (Planfeststellung 22.12.2022, Anlage 3, [A6] aus HAP-OB-B-000, AFRY)
[B8]	Evaluierung Grundwassersituation im Bereich des Oberbeckens – AFRY 2022 (Planfeststellung 22.12.2022, Anlage 3, [A16] aus HAP-OB-B-000, AFRY)
[B9]	Grundwasserstandsmessungen im Jahr 2012 - Dokumentation und Bewertung, Prof. Moormann, 10.05.2013 (Planfeststellung 22.12.2022, Anlage 3, [A17] aus HAP-OB-B-000, AFRY)
[B10]	Dokumentation der geodätischen Kontrollmessungen – Eon Wasserkraft 2010/11 (Planfeststellung 22.12.2022, Anlage 3, [A12] aus HAP-OB-B-000, AFRY)
[B11]	HAP-OB-B-002: Geotechnischer Entwurfsbericht - Bemessung Ringdamm – AFRY 2022 (Planfeststellung 22.12.2022, Anlage 1, [B2] aus HAP-OB-B-000, AFRY)
[B12]	Gutachten über den Untergrund unter dem Oberbecken des PSW Happurg – Bayrisches geologisches Landesamt (Seiten 16 - 18), 1962 (Planfeststellung 22.12.2022, Anlage 3, [A11] aus HAP-OB-B-000, AFRY)
[B13]	HAP-OB-B-004: Statik Kontrollgang (Planfeststellung 22.12.2022, Anlage 1, [B4] aus HAP-OB-B-000, AFRY)

1.2.2 Pläne

Verweis Nr.	Dok.-nr.	Inhalt
[P1]	HAP-OB-020	Geologischer Lageplan (Planfeststellung 22.12.2022, Anlage 2 aus HAP-OB-B-000, AFRY)
[P2]	HAP-OB-021	Geologischer Längsschnitt – 0+360 (Planfeststellung 22.12.2022, Anlage 2 aus HAP-OB-B-000, AFRY)
[P3]	HAP-OB-022	Geologischer Längsschnitt – 0+800 (Planfeststellung 22.12.2022, Anlage 2 aus HAP-OB-B-000, AFRY)
[P4]	HAP-OB-023	Geologischer Längsschnitt – 1+450 (Planfeststellung 22.12.2022, Anlage 2 aus HAP-OB-B-000, AFRY)
[P5]	HAP-OB-024	Geologischer Längsschnitt - entlang der Dammmachse (Planfeststellung 22.12.2022, Anlage 2 aus HAP-OB-B-000, AFRY)
[P6]	HAB-OB-070	Lageplan und Regelschnitt - Mess- und Kontrolleinrichtungen (Planfeststellung 22.12.2022, Anlage 2 aus HAP-OB-B-000, AFRY)
[P7]	HAB-OB-071	Längsschnitt Damm - Mess- und Kontrolleinrichtungen (Planfeststellung 22.12.2022, Anlage 2 aus HAP-OB-B-000, AFRY)

1.2.3 Normen und Richtlinien

Dok.-nr.	Titel
DIN 18196	Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke
DIN 18122	Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Zustandsgrenzen (Konsistenzgrenzen)
DIN 18121	Bestimmungen des Wassergehaltes
DIN 18122	Bestimmungen der Fließgrenze und der Ausrollgrenze
DIN 18123	Schlämmanalysen
DIN 18123	Siebanalysen
DIN 18141	Einaxiale Druckversuche

1.2.4 Anlage

Verweis Nr.	Titel
[A1]	3D geologisches Untergrundmodell
[A2]	Evaluierung Grundwassersituation im Bereich des Oberbeckens – AFRY 2022 (Planfeststellung 22.12.2022, Anlage A15)

1.2.5 Literatur

Verweis Nr.	Titel
[L1]	Geologische Karte von Bayern 1:25000, Blatt Nr. 6534 Happurg
[L2]	The Hoek-Brown failure criterion and GSI – 2018 edition, E. Hoek, E.T. Brown
[L3]	Geologische Karte von Bayern 1:25000, Erläuterungen zum Blatt Nr. 6534 Happurg
[L4]	Geologische Karte von Bayern 1:25000, Erläuterungen zum Blatt Nr. 6634 Altdorf
[L5]	Eydam, H. et al.: Überwachung des Oberbeckens des Pumpspeicherwerks Happurg. Sonderdruck aus Wasserwirtschaft 81 (1991). Franckh-Kosmos Verlags-GmbH, Stuttgart

1.2.6 Software

Verweis Nr.	Inhalt
[S1]	Leapfrog Works 2021.2.5, Seequent
[S2]	RocData (RocScience)

2 Projektgebiet/Projektbeschreibung

Das PSW Happurg liegt in Bayern, gut 30 km östlich von Nürnberg bzw. zirka 5 km südöstlich von Hersbruck an der Pegnitz. Das Unterbecken und das Kraftwerk liegen am südlichen Ortsrand von Happurg bei rund 366 mNN am Fuße der Fränkischen Alb. Das zugehörige Oberbecken liegt rund einen Kilometer südwestlich davon auf einer Höhe von zirka 570 mNN auf der Albhochfläche zwischen dem Deckersberg im Norden und der Ortschaft Deckersberg im Süden (Abbildung 1).



Abbildung 1: Luftbild des PSW Happurg Projekt Bereich (Bild aus Google-Earth)

3 Geologie

3.1 Allgemeine Geologie

Die Beschreibung der allgemeinen geologischen Verhältnisse im Projektgebiet beruht im Wesentlichen auf den umfassenden Erläuterungen aus [B1] und ist den Erfordernissen entsprechend zusammengefasst oder ergänzt:

Das Oberbecken des Pumpspeicherkraftwerkes Happurg befindet sich auf den Kalksteinen des Malm alpha (Oberer Jura). Diese bestehen aus mittel- bis dickbankigen Kalksteinen mit speziell im unteren Teil der Abfolge - einzelnen Zwischenlagen von Mergelkalkstein, Mergelstein, kalkigen Mergelstein und Mergelsteinen. Letztere sind unterschiedlich stark verwittert und können den Zustand eines halbfesten Tons erreichen. Abgelagert wurden die Kalke und Mergel in einem flachen Meer. Die Folge des Malm alpha erreicht eine Gesamtmächtigkeit von etwa 60 m und liegt dem sogenannten Ornatenton auf, der dem Dogger zeta zugeordnet ist und etwa 10 m mächtig sein dürfte. Es handelt sich um feingeschichtete dunkelgraue Tonsteine mit geringem Kalkgehalt. Während der Kreide- und der Tertiärzeit war das Gebiet Landoberfläche mit tropischen bis wüstenhaften klimatischen Bedingungen. Die Kalksteine waren während dieser etwa 140 Millionen Jahre langen Phase der Verwitterung, Abtragung und Verkarstung ausgesetzt. In den dabei entstehenden Oberflächenvertiefungen, Poljen, Karren und Karsttäler lagerten sich Residual-Lehme (als Reste der Kalklösung), Sand, Schluffe und Tone ab, in die immer wieder Kalkstein-Brocken oder Gerölle eingelagert sind. Ganz überwiegend sind diese Sedimente durchmischte und umgelagert, was sich am einfachsten durch murenartige Schlammströme und Rutschungen bei sporadischen Starkniederschlägen in einem Wüstenklima erklären lässt. Die Gesteine des Jura sind tektonisch schwach beansprucht und lagern im Bereich des Oberbeckens fast söhlig, i.e. in Ost-West-Richtung praktisch horizontal, in Nord-Süd-Richtung mit einer geringen Neigung von ca. 1° nach Süden. Die Schichtneigung des etwas welligen Malm-Kalkstein variiert zwischen 0 und 6 Grad. Die Kalksteine des Malm alpha weisen eine ausgeprägte Klüftung aus, die ganz überwiegend etwa senkrecht steht [B1].

Die Kalksteine der oberen zwei Drittel des Malm alpha sind mäßig bis stark verkarstet, d.h. die Klüfte sind durch Lösungsvorgänge häufig um mehrere Zentimeter aufgeweitet. Vereinzelt treten verfüllte Hohlräume von bis zu bis zu 18 m Höhe auf in tiefen Bereichen.

Die Füllung der erweiterten Klüfte besteht meist aus festem bis halbfestem kiesführendem Lehm (kantige Kalkstein-Fragmente). Die größeren Hohlräume sind manchmal mit schluffigen Sanden lockerer Lagerungsdichte bzw. sandigen Schluffen weicher bis steifer Konsistenz gefüllt, die höchstwahrscheinlich aus der Periode Kreide/Tertiär stammen. Das untere Drittel der Kalksteine des Malm alpha ist sicherlich wegen der zwischen-gelagerten Mergel- und Mergelkalksteine deutlich weniger verkarstet und somit weniger durchlässig. Die in diesem Bereich deutlich geringere Gebirgsdurchlässigkeit wird durch die Ergebnisse der hydraulischen Bohrlochversuche und der Lage des Grundwasserstandes in diesen Bereich bestätigt (s. auch Kapitel 4.5).

Ein Ausschnitt der geologischen Karte im Ausschnitt Happurg (Abbildung 2) zeigt, dass das Oberbecken im Wesentlichen in den Malm-Kalken $\text{ki } 1$: unteres Kimmeridge; $\text{ki } 2$: mittleres Kimmeridge, dolomitisiert lagert. Des Weiteren sind auch Lehm-Ablagerungen (L) dokumentiert, die an die unter dem Becken erkundeten kreidezeitlichen und tertiären Versturzhöhlen-Füllung anschließen [B1].

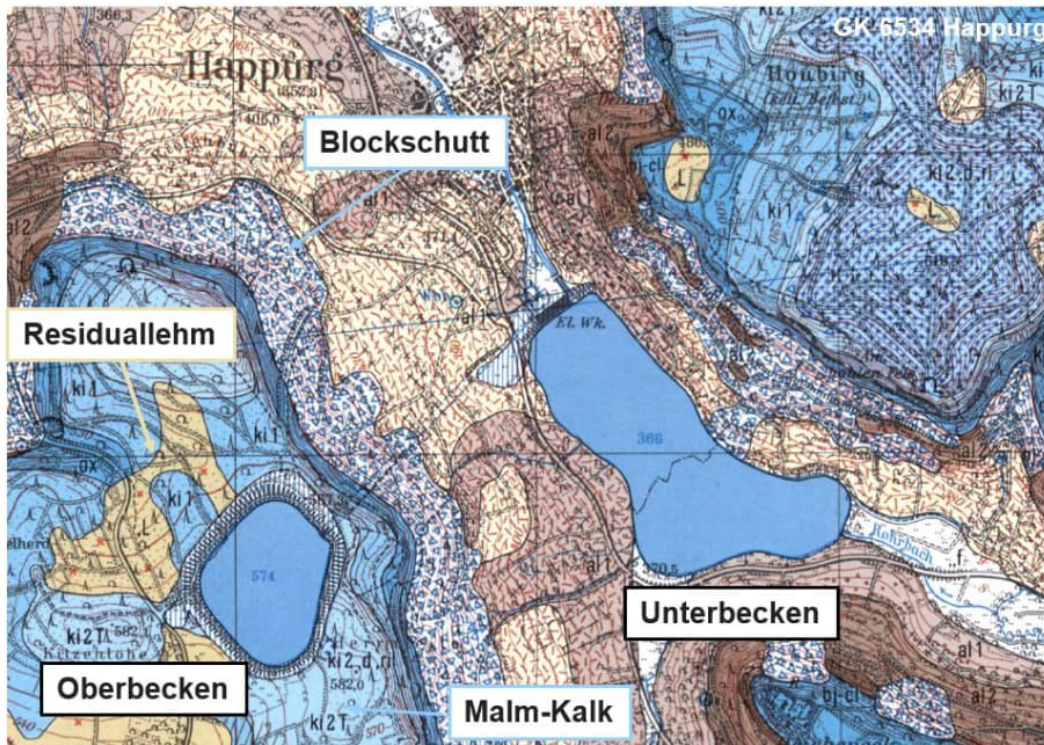


Abbildung 2: Ausschnitt aus der Geologischen Karte GK Blatt Nr. 6534 Happurg [L1]

Die lokalen geologischen Verhältnisse im Bereich des Ober- und Unterbeckens werden vom Bayerischen Landesamt für Umwelt, Referat 106: Ingenieurgeologie, Georisiken in einem Vermerk vom Oktober 2011 im Detail wie folgt erläutert [L1]:

„Der Bereich des Deckersbergs, auf dem das Oberbecken PSW Happurg liegt, wird von folgenden Schichtgliedern aufgebaut. Im Tal von Happurg steht Dogger Alpha (Opalinuston) an. Dieser ist überwiegend tonig bis schluffig ausgebildet und als sehr rutschanfällig bekannt. Darüber folgt der Dogger Beta (Eisensandstein), der basal als feinkörniger Glimmersandstein ausgebildet ist. Über diesem Sandstein liegen die Sandsteine des sog. Hauptwerksandsteins, die mindestens 15 Meter mächtig sind. Im oberen Abschnitt des Dogger Beta sind mit dem Disciteton schluffige, teils sandige Tone eingeschaltet. Darüber folgen die Schichten des Dogger Gamma bis Zeta, die eine Abfolge von Kalksandsteinen Mergelkalken bis zu den Mergeltonen des Ornatentons aufweisen. Der Ornatenton tritt im Bereich des Deckersbergs als Hauptgrundwasserstauer auf. Darauf lassen sich auch die zahlreichen Quellaustritte um den Deckersberg herum zurückführen (siehe Lageplan der Quellen in – [B9]). Ähnlich wie der Opalinuston ist auch der Ornatenton als sehr rutschanfällig bekannt. Die Mächtigkeit des Ornatentons liegt normalerweise zwischen 3,8 und 9,0 m, ist aber im Bereich Happurg aufgrund der vorliegenden Bohrungen eher an der unteren Grenze anzusiedeln. Über dem mittleren Jura (Dogger) liegt eine mächtige Abfolge von Kalken des Oberen Juras (Malm). Die dolomitische Fazies ist im Bereich des Deckersbergs kaum vertreten. In diese Kalke sind nur zweimal geringmächtige mergelreiche Partien eingeschaltet. Im tieferen Teil handelt es sich dabei um die sog. Platynota-Mergel und im oberen Abschnitt um die sog. Crussoliensis-Mergel. Beide Mergellagen gehören zum Malm Gamma und werden durch eine mächtigere Kalkabfolge („Ataxioceraten-Schichten“) getrennt. Der tiefere Anteil des Malm Delta ist wiederum als Kalk ausgebildet, der obere überwiegend dolomitische Teil ist im Bereich des Deckersbergs nicht aufgeschlossen.“

Die Kalke und untergeordnet auch Dolomite des oberen Juras (Malm) weisen generell eine intensive Klüftung und Verkarstung auf. Vor allem die Klüfte in den Malmkalken sind nur teilweise verfüllt, weshalb der Bereich oberhalb des Ornatentons insgesamt gesehen als

großer Kluftgrundwasserkörper dient. Eine Besonderheit im Bereich des Deckersbergs ist eine in der Literatur immer als „Störungszone“ bezeichnete Struktur, die in Nordsüdrichtung vor allem im Westteil des Oberbeckens PSW Happurg anzutreffen ist. Bei dieser Struktur handelt es sich um ein altes Karst/Höhlensystem, das in einer ersten Phase infolge einer langen tropischen Verkarstung während der Unterkreidezeit vor 100 bis 140 Millionen Jahren entstanden ist. Während der Oberkreide wurden diese Hohlräume mit den Sanden der sog. Schutzfelschichten verfüllt.

Danach folgte zum Beginn des Tertiärs vor etwa 65 Millionen Jahren wiederum eine lange tropische bis subtropische Verkarstungsphase mit der Entstehung von Hohlräumen. Auch diese wurden im jüngeren Tertiär bis heute wiederum zu einem großen Teil verfüllt. Bei den letzteren Ablagerungen handelt es sich aber überwiegend um dem Alblehm entsprechende Sedimente. Diese sind bevorzugt tonig bis schluffig ausgebildet, beinhalten aber auch als Residualrückstände Komponenten von Dolomiten und Hornsteinen. Zudem sind sowohl in die Sande als auch die Mergel (Alblehm) unterschiedlich große Karbonatblöcke eingelagert. Bei diesen handelt es sich um Blöcke, die infolge von Karsteinbrüchen oder auch Felsstürzen in diese Sedimente eingelagert wurden. Insgesamt gesehen ist dieses Karst-Höhlensystem mit sehr inhomogenen Sedimenten gefüllt, die als „Diamikt“ bezeichnet werden können. Im basalen Teil überwiegen in den insgesamt sehr inhomogen aufgebauten Sedimenten dieses Karst-/Höhlensystems die sandigen Ablagerungen, im oberen Teil ist der Diamikt überwiegend tonig bis schluffig ausgebildet.

Basierend auf dem 3D Untergrundmodell und den Planunterlagen [P1-P5] werden die geologisch/geotechnischen Verhältnisse im Bereich des Oberbeckens zusammenfassend wie folgt dargestellt:

- Das im Jurakalkstein liegende Becken wird von einer Versturzzone gequert, die zwischen 60 m und 80 m, teilweise auch bis zu 120 m breit ist und bis in eine Tiefe von in der Regel 15 m bis 22 m, lokal auch bis > 35 m Tiefe unter der aktuellen Beckensohle durch unsortierte Lockergesteine (Diamikte) verfüllt ist.
- Diese unsortierten Lockergesteine (Diamikte) sind außerordentlich inhomogen aufgebaut und lassen jede horizontale Schichtung oder gleichförmige Struktur vermissen. Das Korngrößenspektrum derselben umfasst nahezu sämtliche Abstufungen vom Ton, Schluff und Sand bis hin zur Blockgröße einzelner Gesteinsfragmente, wobei das Gefüge überwiegend matrixgestützt ist.
- Die Situation in der Versturzzone und ihrem Randbereich ist in Bezug auf Gesteins- bzw. Lockergesteinseigenschaften komplex und wechselhaft. Auch in sehr nahe beieinander liegenden Bohrungen wurden wiederholt völlig voneinander abweichende Aufschlüsse gewonnen, die nicht mit angrenzenden Verhältnissen korreliert werden können.
- Bei den Randbereichen bzw. den seitlichen Flanken der Versturzzone ist anzunehmen, dass die begrenzenden Oberflächen des Kalksteins überwiegend steil ausgeprägt sind, oft dabei nahezu senkrecht, lokal auch mit Überhängen (siehe 3D-Untergrundmodell [A1]). Bereichsweise kann der in den Flanken anstehende Kalkstein auch in Form von Blöcken und größeren Fragmenten im Verband gelockert und in Richtung Versturzzone verkippt sein, so dass sich unregelmäßige Übergänge ergeben.
- Darunter stehen die hellbeigen Kalksteine des Malm α als harter, kompakter Fels an. Die Kalksteine weisen eine ausgeprägte Klüftung auf, die überwiegend in etwa senkrecht orientiert steht.
- In zahlreichen Kernbohrungen wurden in den Kalken des Malm α offene, teilverfüllte und verfüllte Hohlräume angetroffen. Bei den Hohlraumfüllungen handelt es sich meist um stärker bindig ausgeprägte Lockergesteine in Form von sandigen Schluffen und sandigen/schluffigen Tonen, die als Sand-Ton-Gemische (ST*) und ausgeprägt

plastischer Ton (TA) nach DIN 18196 klassifiziert werden können. Hangabwärts geht die Felsgleitung in einen Kriechhang über. Die Felsgleitung bzw. das langsame Zergleiten der Karbonate auf dem mergeligen Untergrund werden durch die zahlreichen Nackentälchen angezeigt. Langjährige Messungen und aktuelle Begehungen lassen keine Anzeichen für eine Aktivität erkennen, so dass eine Auswirkung auf die Stabilität des Dammes des Oberbeckens derzeit nicht gegeben ist [B1].

Anmerkung: In der Dokumentation der geodätischen Kontrollmessungen/Ergebnisbewertung [10] wurde festgestellt, dass keine auffälligen Lageänderungen gemessen wurden. *“Der Ergebnisvergleich 2010/11 ergibt nur eine Zweimillimeterdifferenz bei einem Kontrollpunkt, ansonsten zeigt die Gegenüberstellung der beiden Messjahre nur Lagedifferenzen im Einmillimeterbereich. Die Ergebnisse werden durch die Inklino- metermessungen bestätigt. Wie schon die Vorjahre sind keine auffälligen Lageänderungen nachweisbar“.*

3.2 Geologische und Geotechnische Erkundungen

Die ausführliche Dokumentation der durchgeführten Baugrunderkundungen ist in den Gutachten und Anlagen [B1] von Prof. Moormann enthalten.

Es wurden eine Vielzahl an Kernbohrungen, Vollbohrungen und Schürfen sowie geophysikalischen Messungen (Geoelektrik, Refraktionsseismik) durchgeführt. Das primäre Ziel war, die Ausdehnung der vorhandenen Störzone und die darunterliegende Felsoberkante des Malmkalks zu erkunden.

Die ausgeführten Erkundungen sowie, der chronologische Ablauf bzw. deren Ergebnisse sind in Abschnitt 3.2 angeführt.

3.2.1 Baugrunderkundungen vor 2011

Bis einschließlich 2010 wurden fünf Erkundungsprogramme (1955, 1981, 2005, 2007 und 2010) ausgeführt. Die Lage der hierbei durchgeführten Erkundungen ist im Lageplan in Anlage 1.2 aus [B1] dargestellt. Tabelle 1 zeigt die vor 2011 ausgeführten Erkundungen.

Tabelle 1: Untersuchungen vor 2011 (Tabelle aus [B1])

Jahr	durchgeführt von	Erkundungen am Oberbecken		
		Anzahl / Bezeichnung		
		Kernbohrungen	Schürfe	Rammsondierungen
vor Bau 1955	Miller [A26]	20 201-219	-	-
1981	Behringer [A41]	6 B5,B7,G1, G7,G8,G13	-	-
2005	CDM [A47]	8 KB1-8	-	-
2007	LGA [A23]	-	11 S01-S11	48 A1-H7
2010	Fichtner [U09]	5 BK1-BK5	6 S1-S6	-

Die Erkundungsergebnisse vor 2011 erlaubten nur bedingt Aussagen bezüglich der Sohleinbrüche zu treffen. Zahlreiche Bohrungen haben lediglich eine geringe Aufschlusstiefe (wenige Meter). Daher wurden zusätzliche Erkundungen, insbesondere ergänzende Kernbohrungen mit durchgehender Kerngewinnung von Bodenproben erforderlich, um einerseits die Verfüllungen in der Verstorzone und andererseits die Eigenschaften des Kalksteins zu erkunden. Weiters sollten zusätzlich Informationen hinsichtlich der Grundwassersituation gewonnen werden.

3.2.2 Erkundungen 2011

Zur Klärung der Schadensursache für die im Januar 2011 aufgetretenen Sohleinbrüche und zur ergänzenden Erkundung der Baugrund- und Grundwassersituation wurden im Jahr 2011 umfangreiche Erkundungsmaßnahmen durchgeführt.

Die entsprechend dieser Erkundungsprogramme ausgeführten wichtigsten Untersuchungsmaßnahmen können im Überblick wie folgt zusammenfassend gegliedert werden:

- Ausführung von 56 Kernbohrungen mit vollständigem Kerngewinn (insgesamt 1.707 m Bohrmeter),
- Durchführung von optischen und akustischen Bohrlochscannermessungen in 49 Kernbohrungen und zwei Grundwassermessstellen (insgesamt 966,3 m Messstrecke) zur Erkundung des strukturellen Aufbaus des Kalksteins und möglicher Hohlräume,
- Durchführung von 49 hydraulischen Bohrlochversuchen (WD-Tests) in 20 Kernbohrungen in den Kalksteinen unter dem Becken;
- Entnahme von insgesamt 657 Boden- und Felsproben zur Durchführung von bodenmechanischen, felsmechanischen und umwelttechnischen Laborversuchen,
- umfangreiche geophysikalische Untersuchungen in zwei Messkampagnen zur Ermittlung der räumlichen Abmessungen der Versturzone und der Beschaffenheit der Versturzonfüllung (Goelektrik und Refraktionsseismik) sowie zur Überprüfung der Existenz möglicher Anomalien im Kalkstein außerhalb der Versturzone (Mikrogravimetrie),
- Durchführung von boden- und felsmechanischen Laborversuchen.

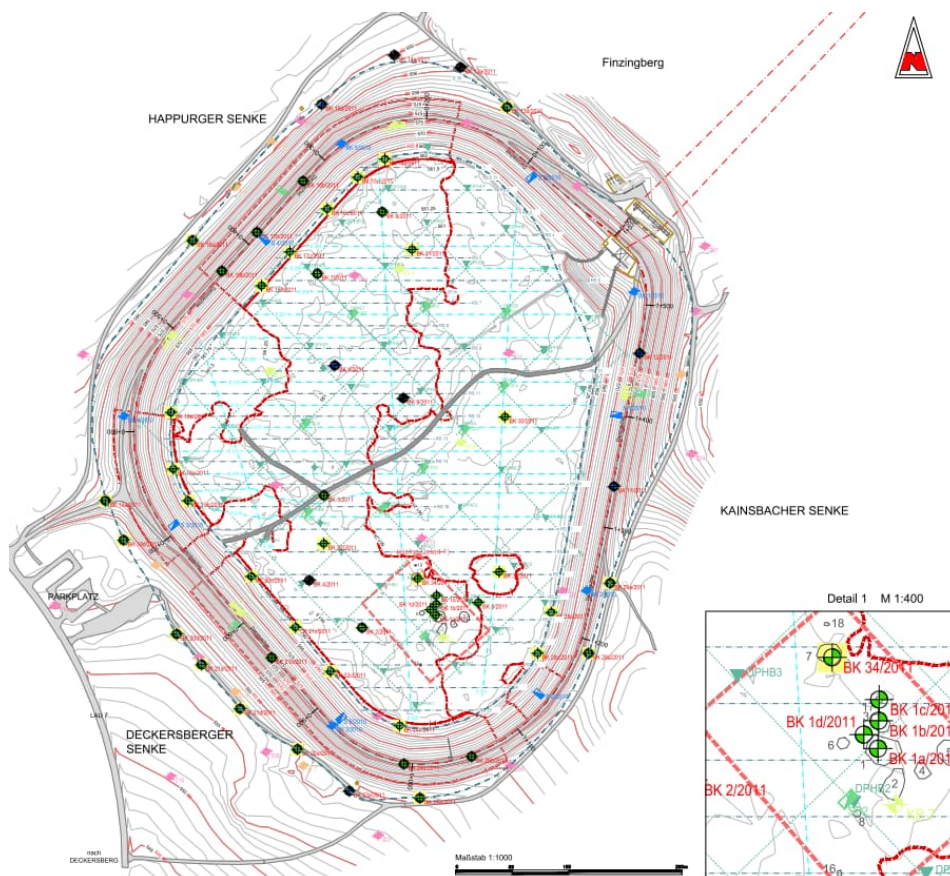


Abbildung 3: Geotechnisches Untersuchungsprogramm (Anlage 2.1 aus [B2])

Die Ergebnisse bzw. Erkenntnisse der Erkundungen 2011 und die Auswertungen der geophysikalischen Untersuchungen aus den zwei Messkampagnen zur Erkundung der geologischen Verhältnisse bzw. von Karststrukturen wurden in [B1] zusammengefasst. und werden im Folgenden zusammengefasst.

Das Oberbecken des PSW Happurg wird von einem mit Lockergesteinen gefüllten Bereich, nachfolgend einheitlich als (verfüllte) Versturzzone bezeichnet, gequert, dessen Tiefe mit den Kernbohrungen zu 3,0 m bis 36,0 m unter Oberkante der aktuellen Beckensohle aufgeschlossen wurde. Zumeist sind die Lockergesteine etwa 10 m bis 20 m mächtig, so dass die Felsoberfläche der anstehenden Kalksteine, also die Unterkante der Lockergesteine bei etwa 551 mNN bis 541 mNN liegt. Bereichsweise wurde die Felsoberfläche aber auch erst in 25 m oder knapp 30 m Tiefe unter Beckensohle angetroffen. Eine Tiefenlage der Felsoberfläche von > 30 m unter Beckensohle (entsprechend < 531,5 mNN) ist nach den Ergebnissen der direkten Baugrundaufschlüsse nur punktuell, z.B. in Spalten oder ähnlichen Strukturen zu erwarten (siehe 3D Untergrundmodell – [A1]).

In den im Rahmen der ersten Erkundungsphase abgeteuften Kernbohrungen wurden im Jura-Kalkstein über die offene Bohrlochsohle Wasserabpressversuche (WD-Versuche) durchgeführt, um die Durchlässigkeiten des Kluftsystems versuchstechnisch zu ermitteln.

In der Summe belegen die Ergebnisse der in den Jura-Kalksteinen unter dem Oberbecken durchgeführten hydraulischen Bohrlochversuche die hohe und sehr hohe Systemdurchlässigkeit dieses Kluftgrundwasserleiters. Nur lokal, in geringer geklüfteten Partien des Kalksteins ergeben sich geringere Systemdurchlässigkeiten.

Ein Einfluss von Schicht oder Grundwasser war ganz überwiegend nicht erkennbar. In der Summe der Grundwassermessungen ist festzustellen, dass in den Lockergesteinen der Versturzzone kein dauerhafter Grundwasserleiter vorhanden ist. Auch Hinweise auf Schichtwasservorkommen gibt es nur sehr begrenzt [B2], siehe auch Abschnitt 4.5.

3.2.3 Erkundungen 2012 im Ringdammbereich

Ziel der ergänzenden Erkundungsmaßnahmen in 2012 war die Tiefenlage der Oberfläche des Kalksteins des Oberen Jura in den außerhalb der Versturzzone liegenden Bereichen der Dammaufstandsfläche zu überprüfen

In Summe wurden vom Oktober bis Dezember 2012 im Bereich des Oberbeckens des Pumpspeicherkraftwerkes Happurg insgesamt 49 Kernbohrungen mit minimal 5,0 m und maximal 61,5 m Erkundungstiefe, in der Summe mit insgesamt 722,7 m laufenden Bohrmetern davon 536,5 m mit vollständigem Kerngewinn entsprechend DIN EN 22475-1:2007-01 niedergebracht.

Im Kalkstein wurden die Bohrungen unverrohrt ausgeführt, allerdings machte das Antreffen größerer gefüllter Hohlräume und gebräucher Partien in wenigen Einzelfällen das Nachführen einer Felsverrohrung erforderlich. Da während der Bohrarbeiten (außer BK 1/2012) kein Wasser angetroffen wurde, wurden die Kernbohrungen (außer BK 1/2012) nicht zu Grundwassermessstellen ausgebaut. Von diesen Bohrungen wurden keine Boden oder Felsproben entnommen, da umfangreiches Probenmaterial in den vorigen Erkundungsphasen gewonnen worden war und entsprechende boden- und felsmechanische Laborversuche durchgeführt wurden [3].

Ergebnisse der ergänzenden Kernbohrungen in 2012

Die Ergebnisse der im Zeitraum Oktober bis Dezember 2012 ergänzend ausgeführten Kernbohrungen sind im Bericht und Anlagen von [3] detailliert angeführt. Die zusammenfassenden Ergebnisse/Erkenntnisse sind nachstehend angegeben.

- Die Kernbohrungen stellen letztlich nur punktuelle Aufschlüsse dar, die nur begrenzte Aussagen zu der räumlichen Ausdehnung von Anomalien (Karststrukturen) zulassen.

- Der unter der Felsoberfläche folgende Kalkstein entspricht hinsichtlich seines Erscheinungsbildes und seines Trennflächengefüges grundsätzlich den 2011 in den zahlreichen Kernbohrungen gemachten Beobachtungen und Feststellungen.
- Grundwasser oder Schichtwasserhorizonte wurden während der Bohrarbeiten nicht angetroffen. Alle Kernbohrungen waren bis zur jeweiligen Endteufe trocken (außer BK 1/2012).

Bereich Nord (von 0+000 bis 0+240):

Von den Bohrungen im Bereich Nord wurde nur bei km 0+160 (BK N8b/2012) ein kleinerer Hohlraum von ca. 30cm angetroffen Abbildung 5. Die Ergebnisse der Bohrungen zeigen, dass die Dammaufstandsfläche sowohl aus Fels als auch aus Lockergestein aufgebaut ist.

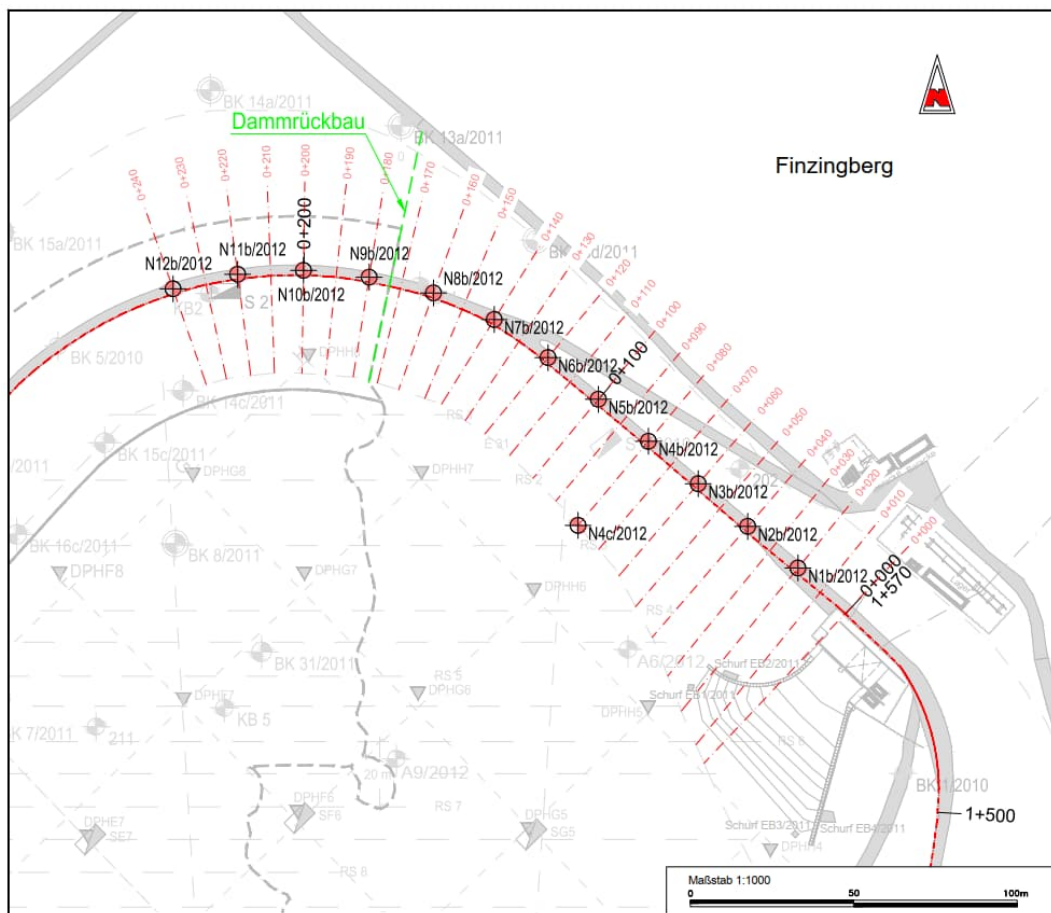


Abbildung 4: Erkundungsbohrungen für Dammaufstandsfläche – Norden (Bild aus [B3])

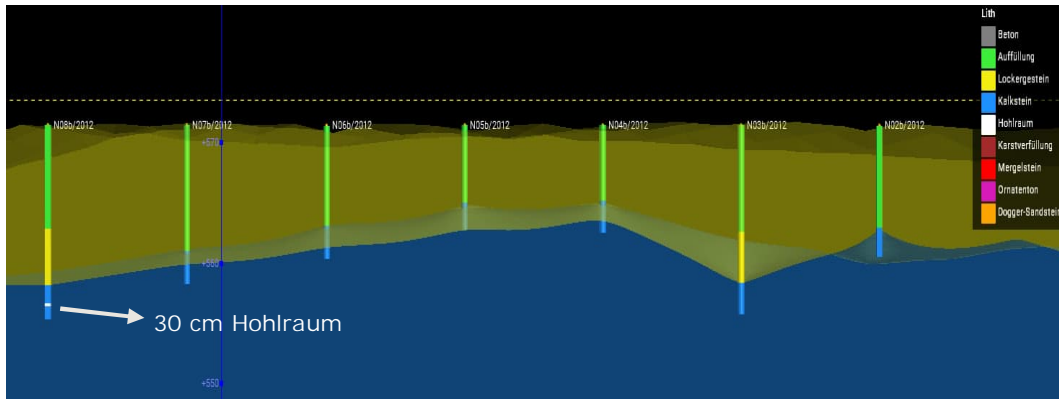


Abbildung 5: Schnitt aus dem 3D Untergrundmodell in Dammaufstandsfläche – Norden

Bereich West (von O+460 bis O+550):

Von den Bohrungen im westlichen Bereich wurden keine wesentlichen Karststrukturen angetroffen (Ausnahme: BK W03b/2012 mit gefüllter Karststruktur bei 15,0 m bis 15,6 m und BK W04b/2012 mit gefüllter Karststruktur bei 14,0 – 15,3). Auch in diesem Bereich ist zu sehen, dass die Dammaufstandsfläche sowohl auf Fels und als auch auf Lockergestein fundamementiert sein kann (siehe Abbildung 7)

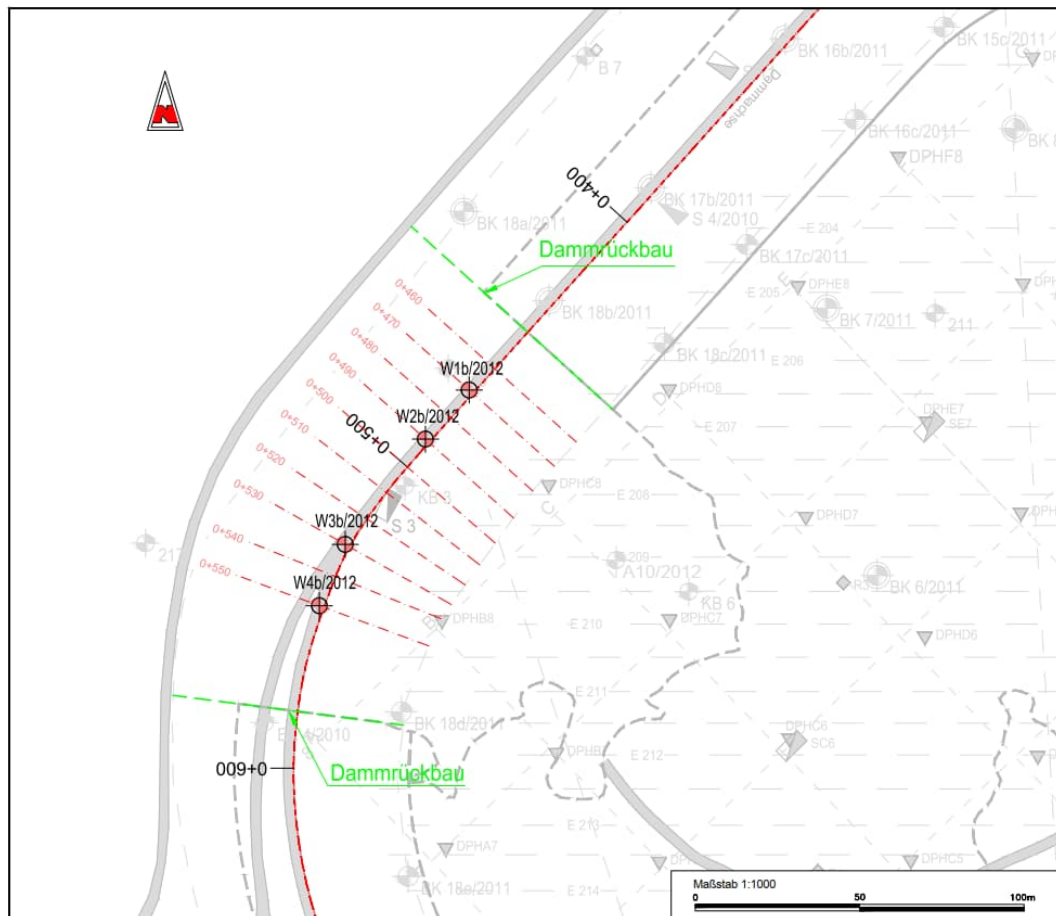


Abbildung 6: Erkundungsbohrungen auf der Dammaufstandsfläche – Westen (Bild aus [B3])

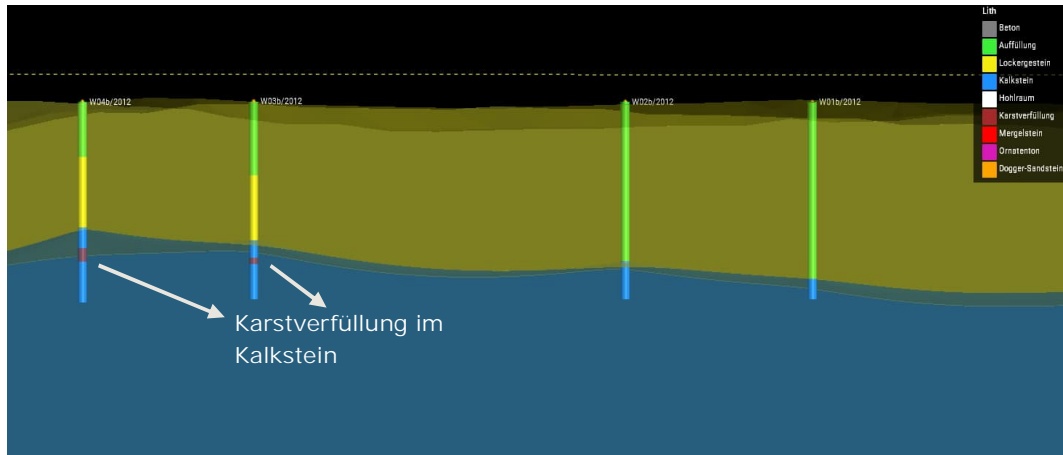


Abbildung 7: Schnitt aus dem 3D Untergrundmodell in Dammaufstandsfläche – Westen

Bereich Ost (von 1+100 bis 1+500):

Im Bereich der Kainsbacher Senke ist der Kalkstein insgesamt stark geklüftet, zudem wurden zahlreiche lockergesteinsgefüllte Karststrukturen bis mind. 13 m unter Beckensohle nachgewiesen; es existiert aber offenkundig keine durchlaufende, d.h. den Ringdamm querende „Versturzzone“. Dennoch ist die Qualität des Kalksteins hier hinsichtlich Zerlegung und Klüftung auffällig schlechter als in den übrigen Bereichen der außerhalb der Versturzzone liegenden Aufstandsflächen des Ringdamms [B4].

Wie aus Abbildung 9 erkennbar ist nimmt die Mächtigkeit der Lockergesteinslage unter dem Damm in Richtung Kainsbacher Senke zu. Aus den Kernbohrungen ergeben sich keine Hinweise auf größere zusammenhängende Karststrukturen oder Hohlräume unter der Aufstandsfläche des Ringdamms.

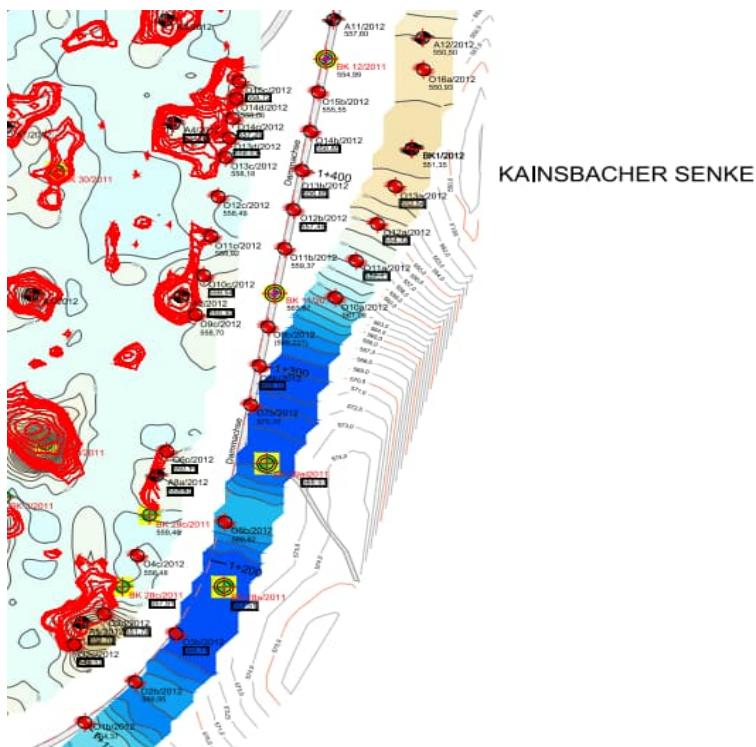


Abbildung 8: Lage Erkundungsbohrungen im Bereich der Dammaufstandsfläche – Osten (Abbildung aus [B3])

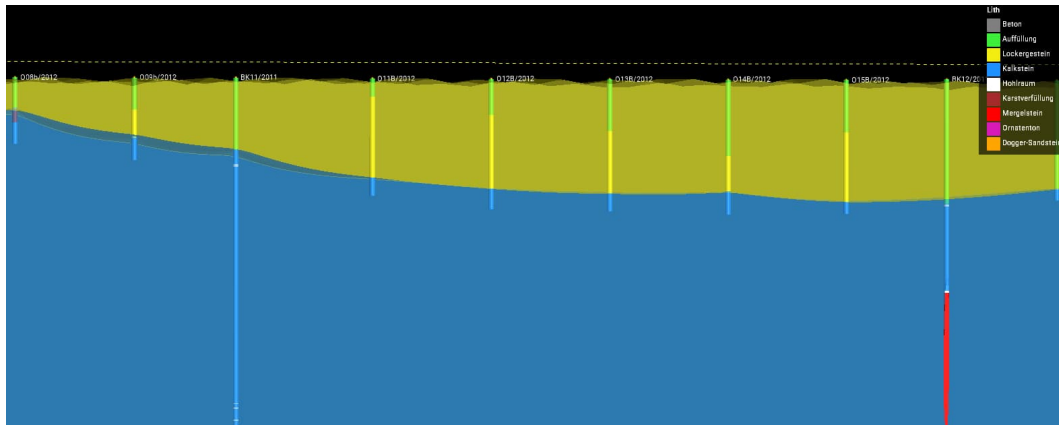


Abbildung 9: Schnitt aus dem 3D Untergrundmodell in Dammaufstandsfläche – Osten

3.2.4 Erkundungen 2012 - 2013

Ergänzende Kernbohrungen (A1/2012 bis A12/2012 - Abbildung 10) ausgeführt. Die Ergebnisse dieser Kernbohrungen sind in [B4] dokumentiert. Danach wurden in nahezu allen ausgeführten Kernbohrungen Karststrukturen mit Lockergesteinsfüllungen angetroffen.

Im Bereich der Beckensohle außerhalb der Versturzzone bestand damit basierend auf den in zwei Phasen flächig ausgeführten geophysikalischen Untersuchungen und den punktuell ergänzenden direkten Aufschlüssen ein Kenntnisstand, der es erlaubte, lokale Anomalien und potentielle flächige Schwächezonen (‘Verdachtsflächen’) zu identifizieren. Großräumige nicht gefüllte Hohlräume oder gar Höhlenstrukturen unterhalb der Beckensohle können außerhalb der Versturzzone innerhalb des von den geophysikalischen Messungen erfassten Tiefenbereiches, überwiegend mindestens 20 m unter aktueller Beckensohle, sicher ausgeschlossen werden [B4].

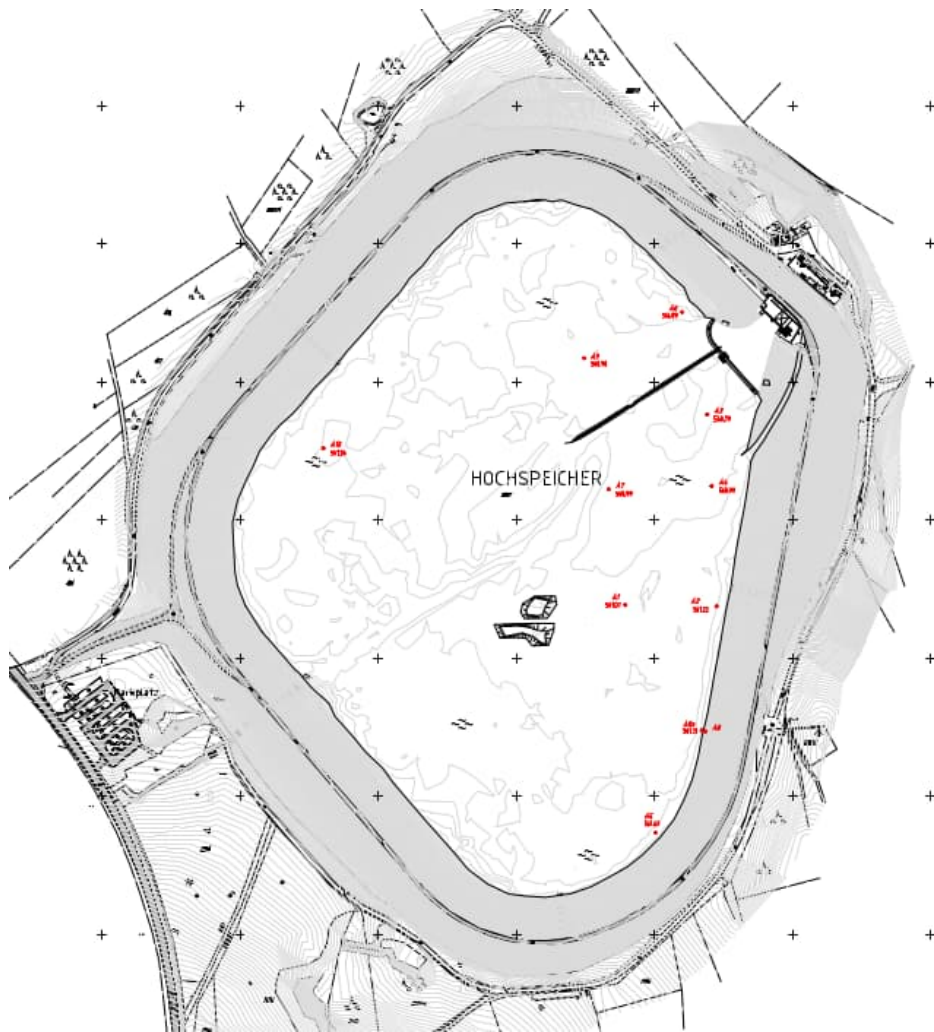


Abbildung 10: Erkundungsprogramm außerhalb der Versturzzone (Plan aus [B4])

Damit verbleiben im Hinblick auf das für das Oberbecken seitens des Betreibers vorgegebene Sanierungsziel für die außerhalb der Versturzzone liegenden Bereiche der Beckensohle zwei Aspekte, die durch die bisher durchgeführten Erkundungen nicht vollständig abgedeckt werden können [B4]:

a) Derzeit können kleinräumige Anomalien bzw. Karststrukturen, wie etwa Spalten oder schlotartige Strukturen mit Ausdehnung im Dezimeterbereich bis hin zu wenigen Metern nicht identifiziert werden, da sie hinsichtlich ihrer kleinräumigen Ausdehnung mit den geophysikalischen Verfahren nicht aufgelöst werden können. Zur Überprüfung dieser kleinräumigen, bis an die Beckensohle heranreichenden Anomalien ist unter technischen und ökonomischen Gesichtspunkten vorgesehen, im Zuge der Ausführung der Untergrundsanierung die Beckendichtung (inklusive Schutzschicht und Dränagesand) im gesamten Beckenbereich, d.h. nicht nur in der Versturzzone, temporär zu entfernen und den im Planum erwarteten Kalkstein flächig freizulegen, um diesen dann ingenieurgeologisch zu kartieren. Auf diese Weise können auch kleinräumige Karststrukturen in Höhe des Planums der Beckensohle zuverlässig erkannt und erforderlichenfalls saniert werden [B4].

b) Ferner weist die die Ergebnisse der bisherigen Untersuchungen zusammenfassende Faktenkarte im Beckenbereich außerhalb der Versturzzone Verdachtsflächen aus, in denen es „Hinweise auf Lockermaterial bzw. Verwitterung unterhalb der Felslinie“ wobei dies als Hinweise auf starke Klüftung teils mit verstärktem Lockergesteinsbesatz interpretieren, bzw. bei denen es sich um „Entfestigte Bereiche außerhalb der Störzone in Oberflächennähe mit

Verdacht auf lokal stark verminderte Kalksteinmächtigkeit“ handelt. Hierbei könnte es sich um lokale Karststrukturen handeln, die, so deutet es ihre Anordnung an, auch unterirdisch miteinander verbunden sein könnten [B4].

Im Hinblick auf den zweiten Aspekt aus [B4], der möglichen Existenz von stark entfestigten bzw. geklüfteten Kalksteinbereichen bzw. Lockergesteinszonen unter einer im Planum des Beckens anstehenden, aber nur geringmächtigen Kalksteindecke, wird die zuvor unter a) beschriebene und als Teil der Sanierungsarbeiten geplante visuelle Kontrolle des Planums der Beckensohle bzw. der Felsoberfläche zu keinen weiteren Erkenntnissen führen. Erforderlich ist vielmehr eine zusätzliche Überprüfung der (Mindest-) Mächtigkeit des anstehenden, bezüglich seiner Oberfläche einer optischen Überprüfung zugänglichen Kalksteins.

In diesem Gutachten wurde daher empfohlen, in den durch die geophysikalischen Untersuchungen identifizierten ‘Verdachtsflächen’ in einem regelmäßigen Raster vertikale Bohrungen abzuteufen, mit denen nachzuweisen ist, dass der im Planum erwartete Kalkstein des Oberjura, stratigraphisch als Untere Kimmeridge-Schichten und Werkkalke (Malm) einzuordnen sind. Für jene Bereiche außerhalb der Versturzone, welche nicht mit einem systemischen Raster durch Vollbohrungen erkundet wurden, wurde im Zuge der Geophysikalischen Erkundung keine Schwachstellen im Untergrund ermittelt.

Somit wurden in Summe vom 15.10.2012 bis 22.05.2013 in der Beckensohle insgesamt 1.514 Vollbohrungen mit Bohrlängen von 5,49 m bis 52,40 m, in der Summe mit insgesamt 20.250,4 m laufenden Bohrmeterern niedergebracht [B5].



Abbildung 11: Ergänzende Erkundungen mit Vollbohrungen (Plan aus – [B5])

Die detaillierten Ergebnisse der Vollbohrungen (Bohrberichte mit der Information von Bohrfortschrittsgeschwindigkeit, Drehmoment, Bodenwiderstand, Bemerkungen, Verfüllprotokolle von jeder Bohrung, usw.) sind in den Anhängen von [B5] enthalten. Ein Beispiel ist in Abbildung 12 gegeben.

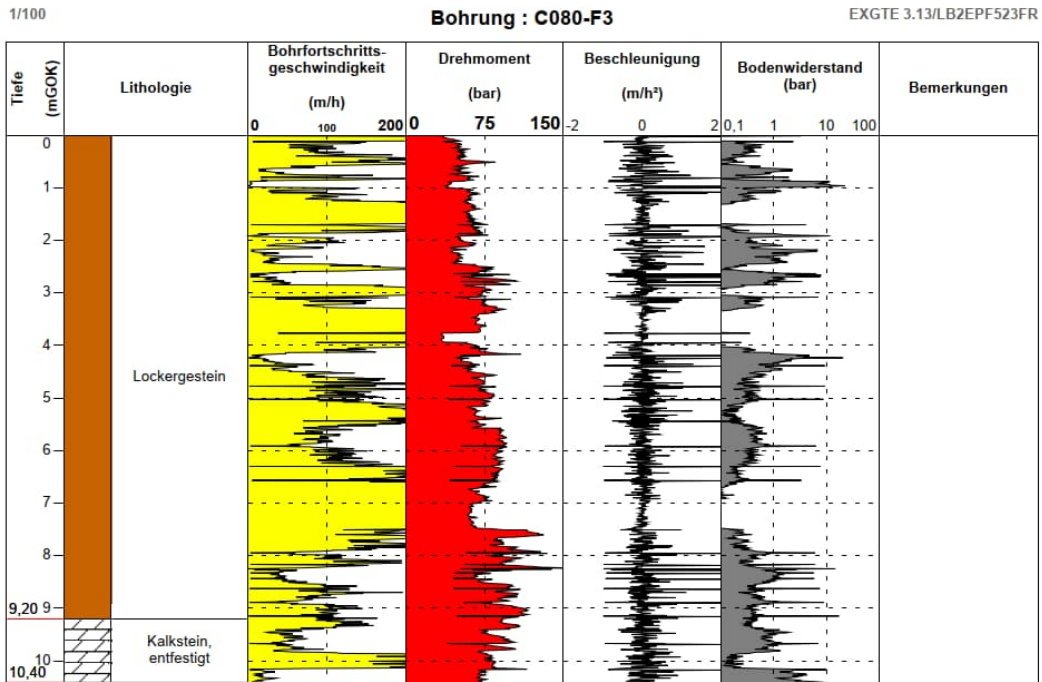


Abbildung 12: Beispiel aus dem Bohrprotokoll der Vollbohrung C080-F3

3.2.5 Erkundungen 2022

Um die vorherigen Erkundungsergebnisse hinsichtlich der Steifemoduli zu vervollständigen bzw. zu verifizieren, wurden im Zeitraum zwischen 21.02.2022 und 07.03.2022 sieben weitere Erkundungsbohrungen inklusive einer Vielzahl an Bohrlochaufweitungsversuchen zur in-situ Bestimmung der Steifigkeit ausgeführt [B7].

Es wurden insgesamt sieben Bohrungen mit durchgehendem Kerngewinn abgeteuft. Um das Gebirge bzw. die feinkörnige Karstverfüllung in einem möglichst ungestörten Zustand testen zu können, wurden die Bohrungen mittels Rammkernbohrung (ohne Spülung) ausgeführt. Die Bohrungen mit einer ursprünglich geplanten Tiefe von jeweils 20 m wurden im Falle des Antreffens der Felsoberkante (Malmkalk) nach weiteren ca. 1,5 m – 3,0 m vorzeitig abgebrochen. Grund dafür war zum einen das ausschließliche Interesse an der Karstverfüllung bzw. der Dokumentation der Schichtgrenze, zum anderen die Schwierigkeit bei der Durchörterung des harten Kalksteins mittels Rammkernbohrung. Alle Dokumentationsunterlagen (Bohrprofile, Schichtverzeichnisse) können in den Anlagen von [B7] eingesehen werden.



Abbildung 13: Lokationen der Bohrungen (Lageplan aus [B7])

Im Zuge der Erkundungsarbeiten wurden 17 Bohrlochaufweitungsversuche (BAV) nach DIN 4094-5 bzw. DIN EN ISO 22476-7:2013-03 mittels Seitendrucksonde in den Bohrungen BK 2, BK 3, BK 4, BK 5, BK 6 und BK 7 ausgeführt. Mittels der Bohrlochaufweitungsversuche können Aussagen zur in-situ Baugrundsteifigkeit und dem Verformungsverhalten des anstehenden Gebirges gemacht werden. Die Versuche wurden vorwiegend in den Sedimenten der Karstverfüllung, d.h. in den Tonen, Schluffen und Sanden in Tiefen zwischen 2,7 m und 17,0 m ausgeführt. Die Ergebnisprotokolle der Seitendruckversuche sind in Anlage A.3 von [B7] enthalten. Die Laborversuchsergebnisse und bodenmechanische Kennwerte sind ebenfalls in [B7] zu finden.

4 Geologisch/geotechnisches 3D Untergrundmodell

Für eine bessere Interpretation der Vielzahl der vorhandenen Erkundungsergebnisse (siehe Abschnitt 3.2) sowie für eine übersichtliche Darstellung der geologisch-/geotechnischen Verhältnisse wurde mittels der Software Leapfrog [S1] ein detailliertes dreidimensionales geologisch/geotechnisches Untergrundmodell (siehe Abbildung 14) erstellt.

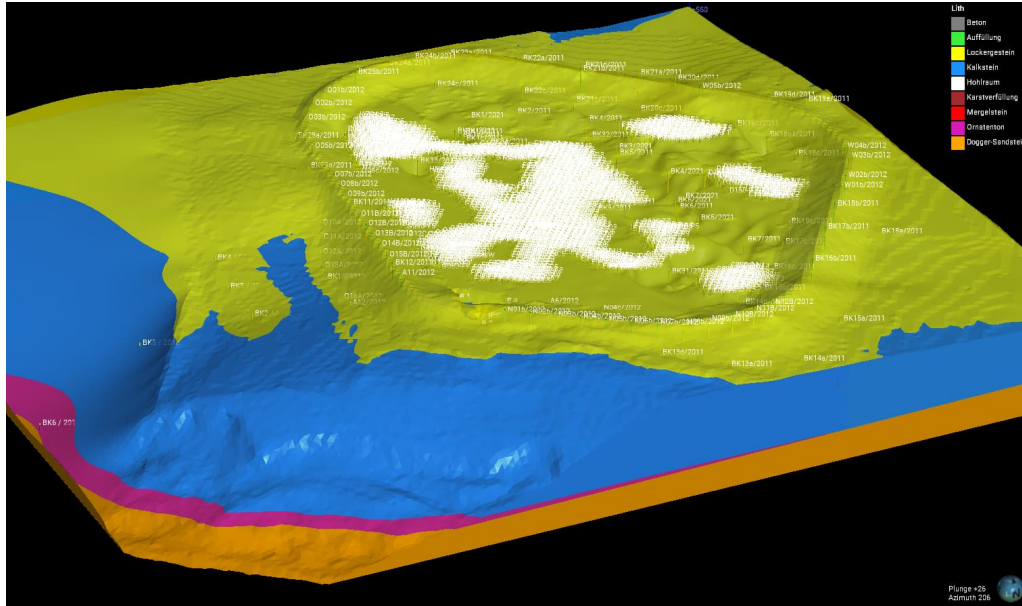


Abbildung 14: 3D Untergrundmodell – Darstellung der berücksichtigten Bohrungen

Für die Modellerstellung wurden folgende Unterlagen, Daten, Erkundungsergebnisse und Erkenntnisse aus Kartierungen und Geländebegehungen berücksichtigt.

- 3D Oberfläche des Projektgebiets (Laserscan) und Luftbild

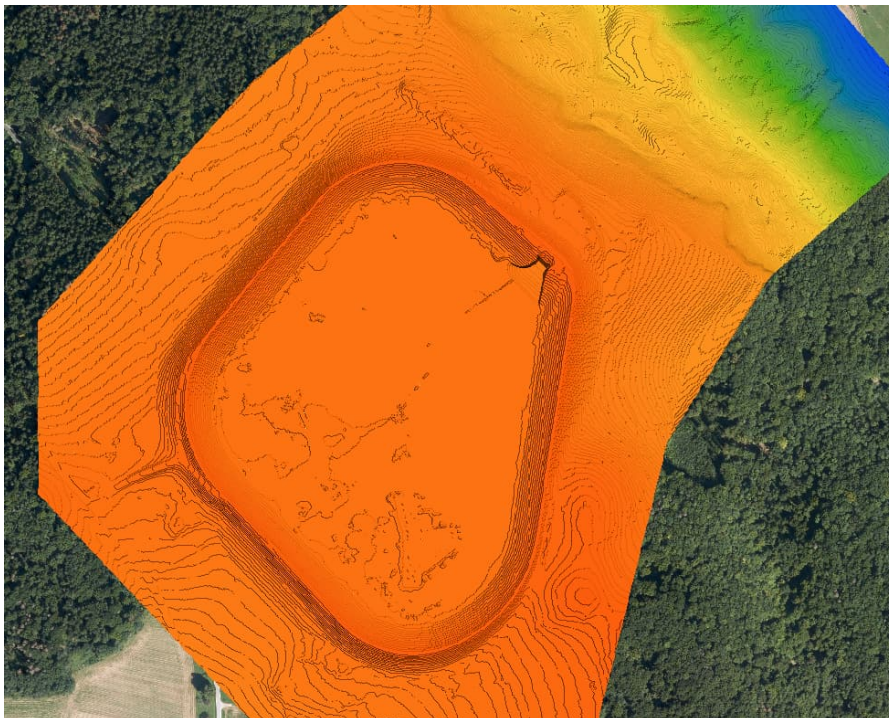


Abbildung 15: Laserscan UTM-32, exportiert am 06.07.2021 und Luftbild

- Geologische Lagepläne und Schnitte aus vorangegangenen Bearbeitungen
 - Lageplan und 6 Geologische Schnitte, Fichtner - 18.05.2012
 - Lageplan der Geophysikalischen Untersuchungen, Fichtner – 25.02.2013
 - Geologische Karte von Bayern, Blatt 6534 Happurg (https://www.lfu.bayern.de/geologie/geo_karten_schriften/dgk25_uab/index.htm)
 - Lagepläne der ausgeführten Kernbohrungen
 - Lageplan der Schadstellen
- Informationen aus den Kernbohrungen (zirka 200 Bohrungen)
 - 2011: Oberbecken Happurg Baugrund und Sanierungsgutachten Moormann, Anlagen
 - 2012: PSW HAP Erkundung Phase 4: Ringdamm - Teil 1 + Teil 2
 - 2022: Stellungnahme zu den ergänzenden Erkundungen 2022
- Informationen aus den Vollbohrungen (zirka 1600 Bohrungen)

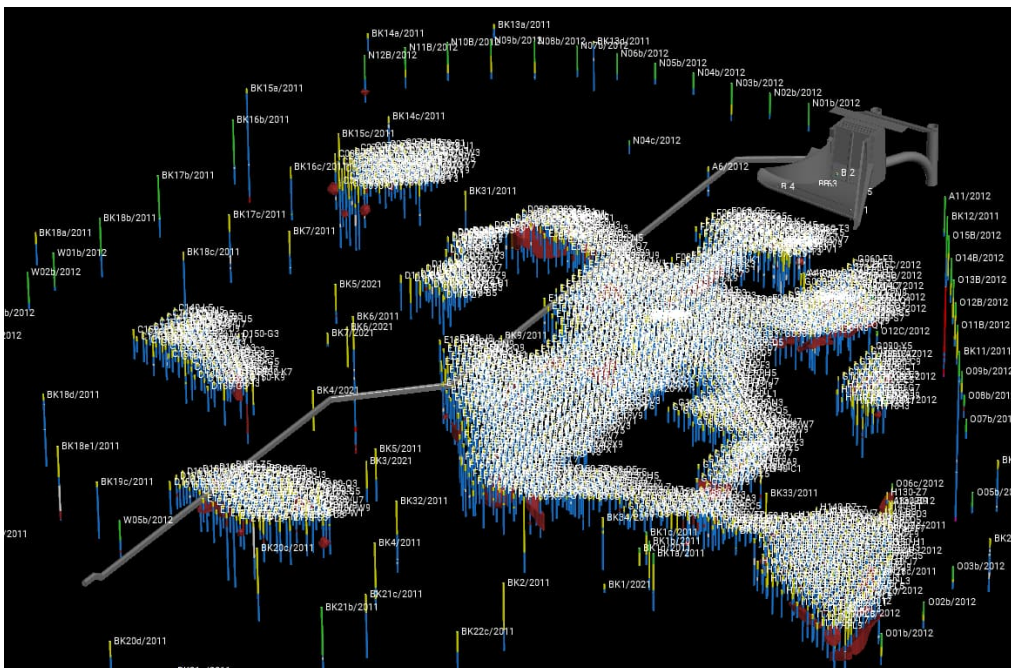


Abbildung 16: Berücksichtigte Bohrungen

- Geophysikalische Untersuchungen – 2D Darstellungen und 3D Felslinie Auswertung
 - Erste Messkampagne (April/Mai 2011), Geoelektrik/Refraktionsseismik
 - Zweite Messkampagne (Oktober/November 2011), Geoelektrik/Refraktionsseismik/Mikrogravimetrie

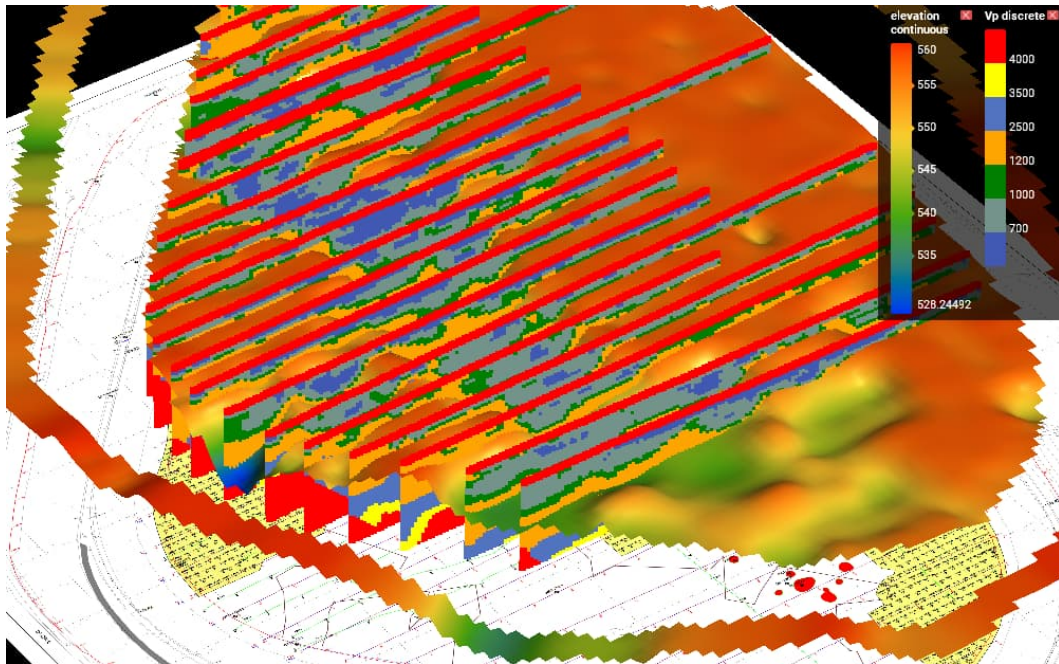


Abbildung 17: Geophysikalische Untersuchungen/Interpretationen

- 3D-Strukturen Beckensanierung (Damm, Einlaufbauwerk, Beckensohle, etc.)
- Ausgewählte Grundwasserstände (von 01.09.2013, 01.03.2016, 01.02.2018)
- Iso-linien von der felsoberfläche

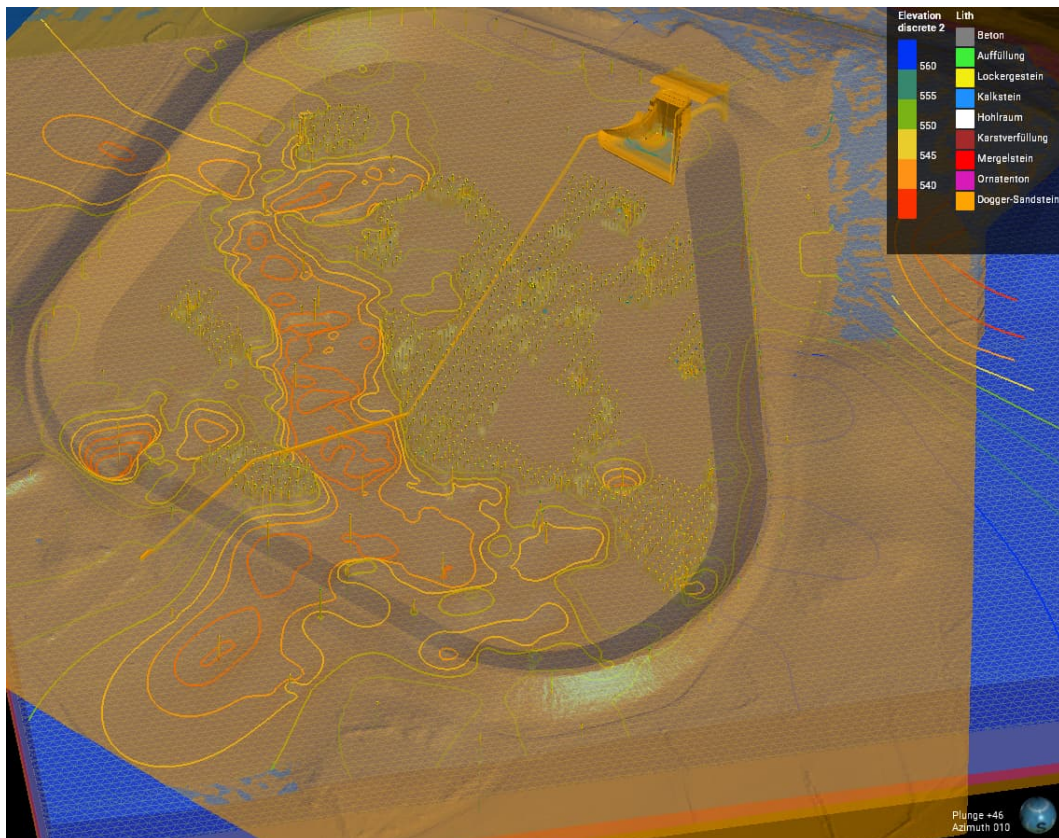


Abbildung 18: 3D-Strukturen inklusive Höhengschichtenlinien Felsoberkante

4.1 Modellerstellung

Sämtliche zuvor beschriebenen Daten wurden als Punkt-, Linien- oder Flächeninformationen in die Software im UTM-32 Koordinatensystem eingegeben. In einem ersten Schritt wurde die Prioritäten, Grenzwerte, sowie Trendlinien definiert. Diese Inputs werden für die 3D Modellerstellung mittels Softwarealgorithmus benötigt. Den direkten Aufschlüssen, wie z.B.: Bohrungen wurde die höchste Priorität zugeordnet.

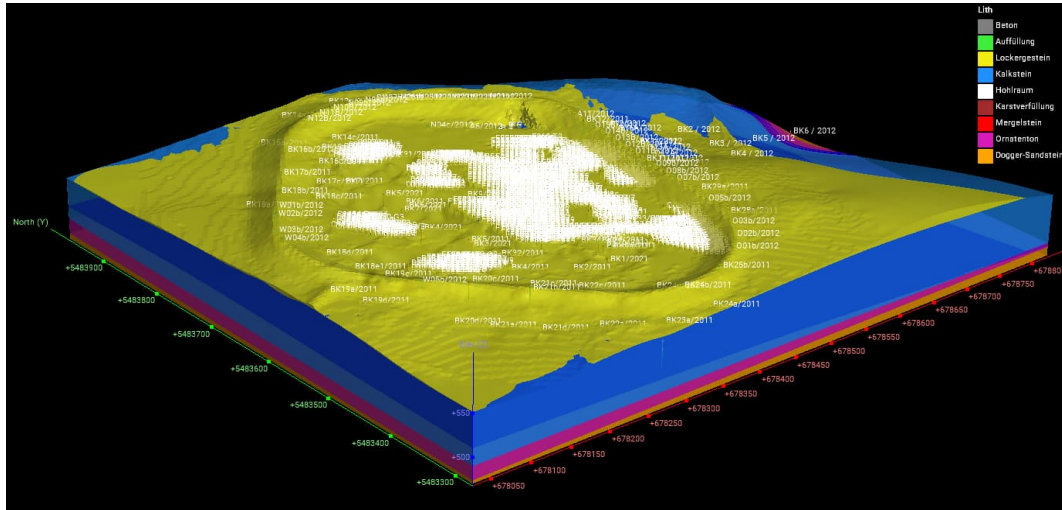


Abbildung 19: Fertiggestelltes 3D-Untergrundmodell

4.2 Darstellungen von Karstverfüllungen und Hohlräumen

Die aufgeschlossenen Karsthohlräume (aus Erkundungsbohrungen, etc.) wurden im 3D Untergrundmodell mittels Volumenelementen dargestellt (siehe Abbildung 20). Wurden Karsthohlräume in ähnlichen Höhenlagen bzw. nebeneinanderliegend angetroffen wurden diese verbunden bzw. als zusammenhängender Hohlraum dargestellt. Nicht verfüllte bzw. offene Karsthohlräume sind in Weiß dargestellt. Verfüllte Karsthohlräume/Karstverfüllung in Braun.

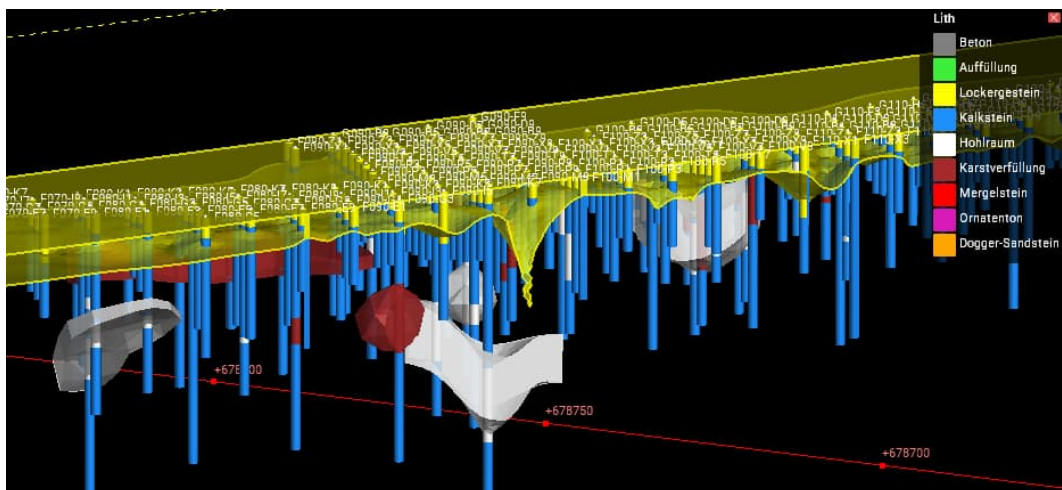


Abbildung 20: Ausschnitt Darstellung Karsthohlraum und Karstverfüllung

4.3 Gebirgsarten und geologisch/geotechnische Einheiten

4.3.1 Tonbetondichtung wasserseitige Dammböschung und Lehmdichtung Beckensohle

Wie bereits eingangs erwähnt, wurde das bestehende Becken mittels Lehmdichtung in der Beckensohle bzw. Tonbetondichtung in den Dammböschungen gedichtet. Abbildung 22 zeigt die in BK 1/2021 angetroffene Lehmdichtung. Laut [B1] besteht das Bestandsdichtsystem aus einer im Beckensohle ca. 0,6 m und an den Dammböschungen ca. 1,5-2,0 m mächtigen Dichtungsschicht sowie einer ca. 0,2 m mächtigen Filtersandschicht, die durchgehend erkundet wurde. Weiters wurden in den Bohrungen Bereiche mit Steinen (Kalkstein) und Kiesen angesprochen.

Die Kernbohrungen in Beckensohle zeigen, dass die Schichtstärke der Lehmdichtung teilweise beträchtlich variiert. Siehe zum Beispiel die Bohrprofile von den Bohrungen BK 4/2011 und BK 5/2011 (Abbildung 21), die nahe beieinander liegen. Die Lehmdichtung ist in BK 4/2011 in einer Tiefe zwischen 0,5 m bis 1,45 m erkundet und in BK5/2011 zwischen 1,0 m und ist 3,4 m zwischen Lagerungen.

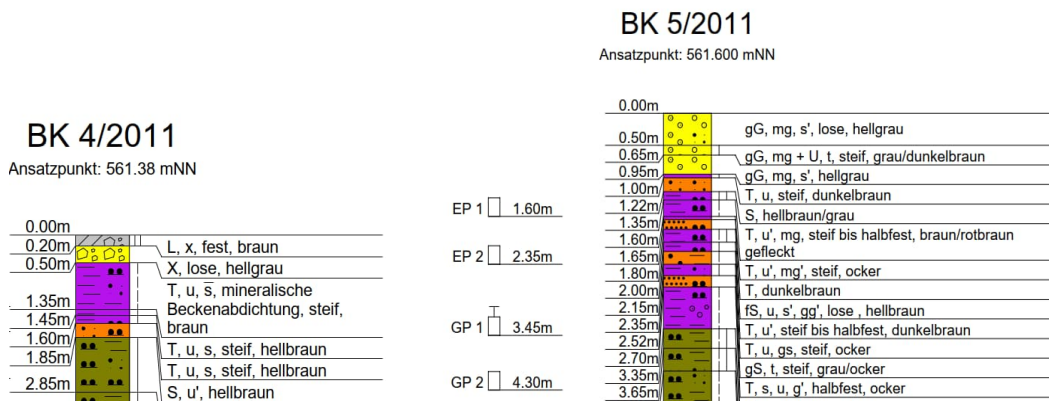


Abbildung 21 Bohrprofile aus den Erkundungsbohrungen 2011 aus [B2]



Abbildung 22: Bohrkernabschnitt - Sohldichtung aus der Erkundungsbohrung BK 1/2021 (0m bis 2m)

Die Materialeigenschaften der Lehmdichtung in Beckensohle wurden anhand von drei Proben im Labor bestimmt. Der natürliche Wassergehalt beträgt 17 % bis 20 %. An zwei Proben wurde die Fließgrenze zu $w_L = 42$ % und die Ausrollgrenze zu $w_P = 16$ % bestimmt. Mit einer Plastizitätszahl $I_P = 25,7$ % bzw. 27,6 % und einer Konsistenzzahl $I_c = 0,83$ bzw. 0,97 hatten beide Proben eine steife bzw. bereits im Übergang zu halbfest liegende Konsistenz. Unter Berücksichtigung der an einer Probe bestimmten Kornverteilung (TU/S/G = 29/42/28/1 Gew.-%) und der zuvor ermittelten Plastizitätseigenschaften ist die Lehmdichtung an der Beckensohle als mittelplastischer Ton (TM) nach DIN 18196 zu klassifizieren [B1].

4.3.2 Versturzzone / Lockergestein (Zone 1)

Das Oberbecken wird von Nord nach Süd von einer ausgedehnten Rinnenstruktur (im Projekt als Versturzzone benannt) mit einer mächtigen Karstverfüllung (Kreidesande, Residuallehme) durchzogen. Im Bereich dieser Zone bzw. in den Übergangsbereichen traten die Schadensfälle in der Vergangenheit gehäuft auf. Diese Zone, dargestellt in Abbildung 24, wird im Folgenden als Zone 1 bezeichnet. Die Zone ist in der Regel 15 m bis 20 m tief (lokal bis zu 35 m) und besitzt eine Breite von zirka 60 m bis 80 m (lokal bis zu 120 m). Ein entsprechender Lageplan mit iso-linien des felsoberflaches ist in [P1] zu finden.

Im Bereich dieser Zone 1 wurden unterhalb des Dichtungssystems die Sedimente der Karstverfüllung in Mächtigkeiten zwischen 1 m bis > 30 m erkundet. Die Karstverfüllung ist sehr heterogen aufgebaut und beinhaltet in kleinräumiger Wechsellagerung schwach bis stark sandige Tone und Schluffe, schwach bis stark tonig-schluffige Sande bzw. Schluff-/Ton-Sandgemische. Kieskomponenten können hier ebenfalls auftreten. Die Ergebnisse der Borlochweiterungsversuche und Laborversuche von den Untersuchungen in der Versturzzone sind unter 4.4.2 gegeben.

4.3.3 Malmkalk (Zone 2)

Westlich und östlich der Versturzzone (Zone 1) gibt es die Bereiche, in denen die Festgesteinsoberkante des Malmkalks direkt unter der Beckensohle erkundet wurde (Zone 2). Der Malmkalk weist im Bereich des Oberbeckens eine nahezu horizontale Schichtung auf. Neben den Schichtflächen wird ein ausgeprägtes, orthogonales Kluftsystem dokumentiert, (Abbildung 23).



Abbildung 23: Malmkalke aus der Erkundungsbohrung BK 5/2021 (12 m bis 20 m)

Der Malmkalk ist mäßig bis stark verkarstungsanfällig, so dass die Klüfte durch Lösungsvorgänge aufgeweitet und folglich mit Residuallehm wiederverfüllt wurden. Demnach ist in Zone 2 mit lokalen Karststrukturen, wie zum Beispiel verfüllten oder auch unverfüllten Spalten zu rechnen, welche auch im 3D Untergrundmodell dargestellt sind.

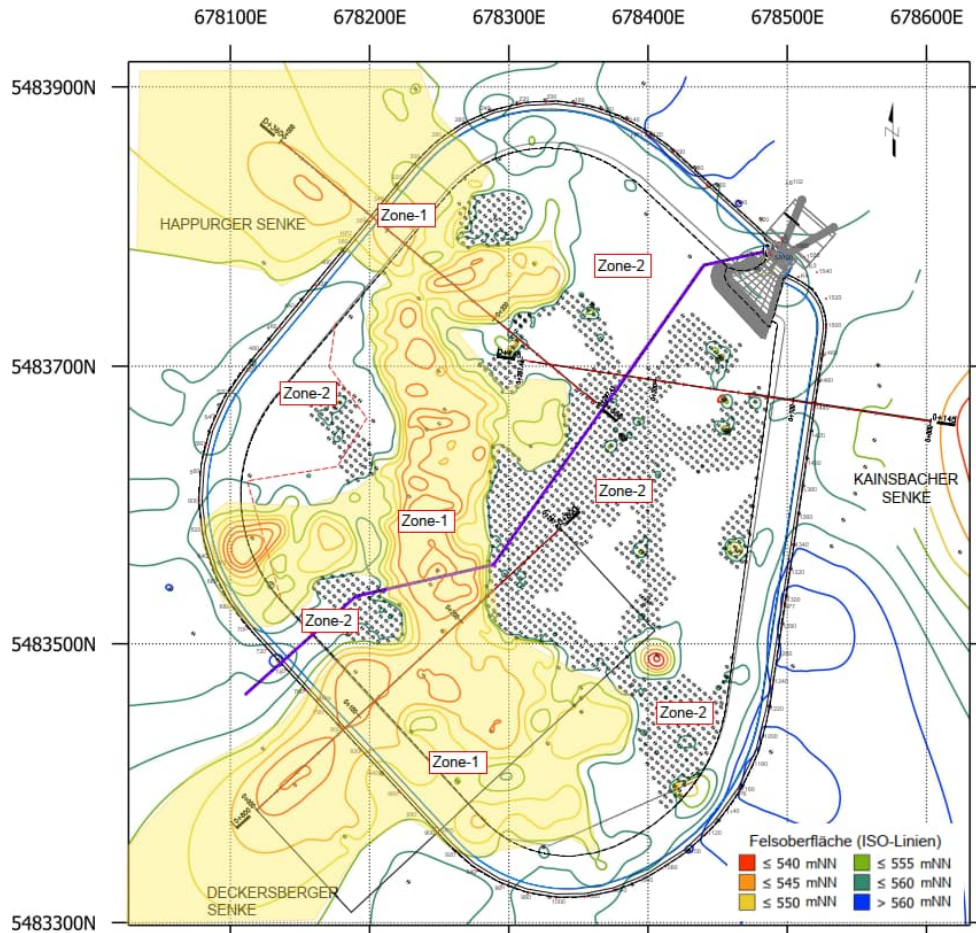


Abbildung 24: Lageplan inkl. Darstellung Felsoberfläche mittels Höhengschichtenlinien (ISO-Linien) und Darstellung von Zone 1 und Zone 2

Die Karstverfüllungen im anstehenden Kalksteingebirge sind heterogen aufgebaut und bestehen vorwiegend aus Sand-Schluff bzw. Sand-Ton-Gemischen mit steifer bis halbfester Konsistenz. Vereinzelt treten auch enggestufte Sande auf (vergleiche Abbildung 25). Anhand der geophysikalischen Messungen konnten isolierte Kalksteinblöcke bzw. -türme als lokale Festigkeitsmaxima innerhalb der Karstverfüllung detektiert werden.

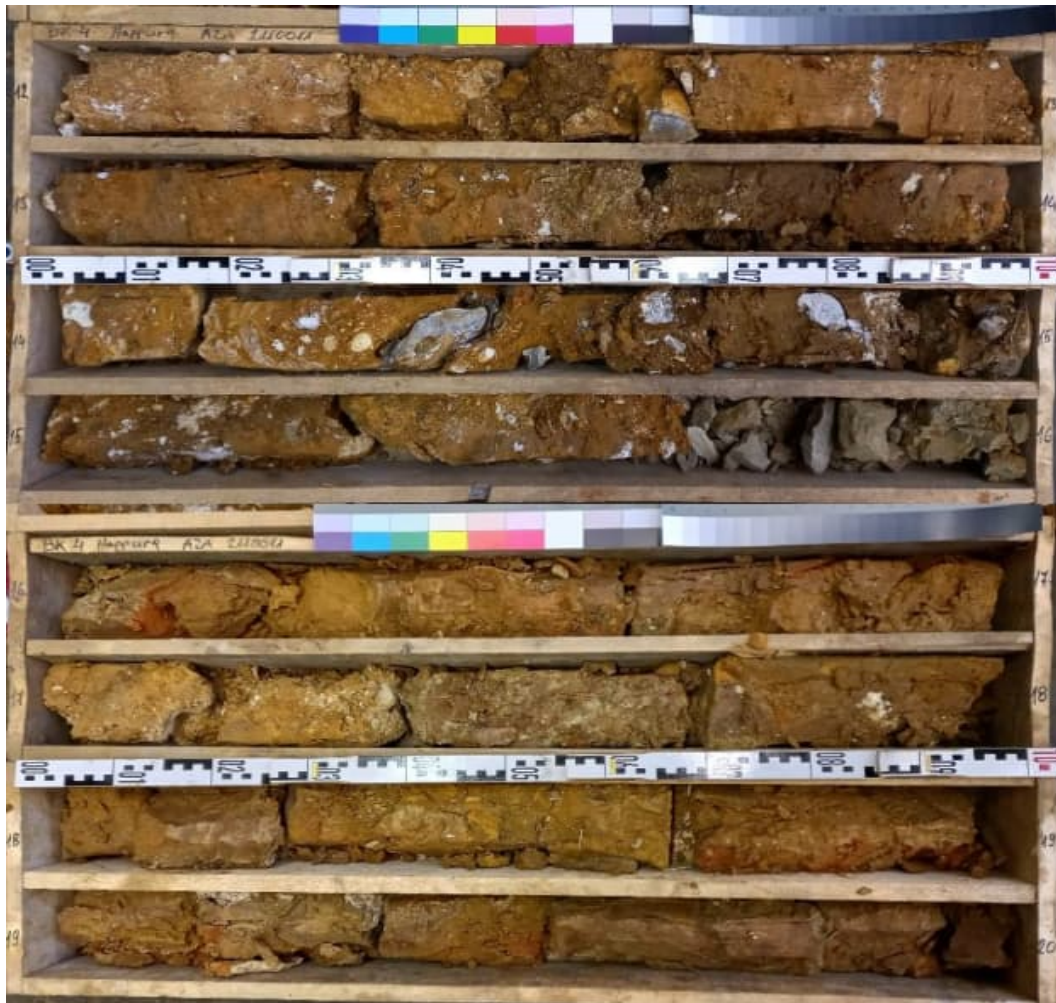


Abbildung 25: Bohrkerne aus Versturzone, Erkundungsbohrung BK 4/2021 (12 m bis 20m)

4.4 Geotechnische Charakterisierung der Gebirgsarten

Neben der Bohrkernansprache wurden Feld- und Laborversuche zur Bestimmung von Materialparametern ausgeführt.

4.4.1 Ausgeführte Materialprüfungen in 2011

Folgende Laboruntersuchungen wurden im Zuge der Erkundungen 2011 durchgeführt:

- 208 Bestimmungen des Wassergehaltes gem. DIN 18121
- 47 Bestimmungen der Fließgrenze und der Ausrollgrenze gem. DIN 18122
- 83 Schlämmanalysen (Aräometerversuch) gem. DIN 18123
- 63 Siebanalysen, bis 10 mm Größtkorn, gem. DIN 18123
- 25 Siebanalysen, Größtkorn > 10 mm, gem. DIN 18123
- 39 Einaxiale Druckversuche gem. DIN 18141

Tabelle 2 zeigt exemplarisch Ergebnisse der ausgeführten einaxialen Druckversuche an intakten Gesteinsproben. Weitere Testergebnisse sind [B1] zu entnehmen. Diese parameter wurden als Brückenschlag zu Sanierungsplanung genommen.

Tabelle 2: Zusammenstellung der Ergebnisse der einaxialen Druckversuche (Felskerne, Kalkstein) [B1]

Aufschluss	BK1a / 2011	BK1c / 2011	BK2 / 2011	BK2 / 2011	BK4 / 2011	BK5 / 2011	BK6 / 2011	BK7 / 2011
Tiefe [m]	19,3 – 19,6	12,5 – 12,7	6,3 – 6,6	10,55 – 11,0	22,65 – 22,85	17,4 – 17,6	21,5 – 21,7	19,6 – 19,9
Dichte ρ [g/cm ³]	2,590	2,510	2,584	2,599	2,566	2,591	2,621	2,614
Durchmesser \varnothing [mm]	101,5	101,2	101,4	101,3	101,6	101,5	101,6	101,3
Höhe h [mm]	202,9	165,6	182,5	189,4	163,4	169,3	155,9	187,8
Dehnungsgeschwindigkeit [$^{\circ}$ /min]	0,275	0,441	0,328	0,325	0,422	0,375	0,412	0,280
Bruchspannung σ_{max} [MN/m ²]	149,0	101,8	109,5	101,1	138,3	121,9	164,20	159,0
Bruchdehnung ϵ [$^{\circ}$]	3,23	5,12	3,86	3,14	6,51	3,35	6,98	4,55
Druckfestigkeit q_u [MN/m ²]	148,99	99,04	107,99	100,22	134,21	118,94	158,2	157,64
E-Modul [MN/m ²]	45103	23535	34447	35502	22592	34103	25906	32,083

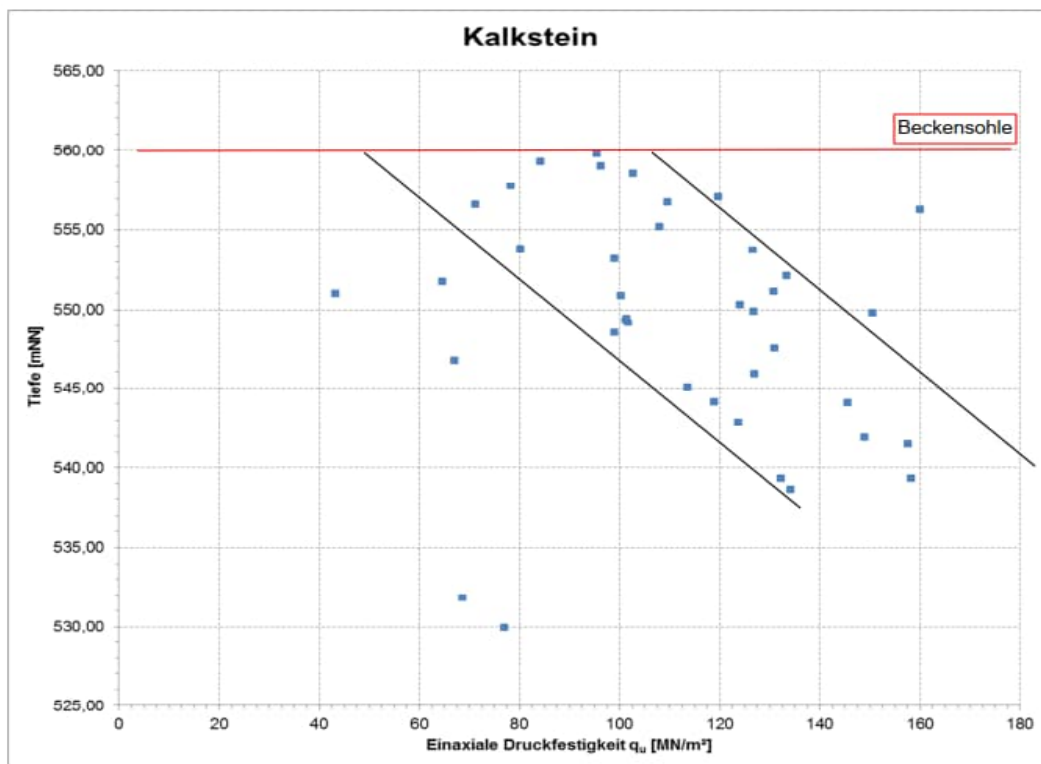


Abbildung 26: Zusammenstellung der Ergebnisse der einaxialen Druckversuchsergebnisse über Tiefe (Felskerne, Kalkstein) [B1]

Gemäß den Ergebnissen weisen die Kalksteine im Nahbereich der Oberfläche einaxiale Druckfestigkeiten im Bereich zwischen 60-100 MN/m² auf, im tieferen Bereich zwischen 100-140 MN/m². Dies könnte ein Indikator sein, dass der Verwitterungsgrad mit der Tiefe abnimmt.

4.4.2 Zusätzliche Materialprüfungen in 2022

Um die bereits vorliegenden, umfangreichen Erkundungsergebnisse hinsichtlich der Steifemoduli zu vervollständigen bzw. zu verifizieren, wurden im Zeitraum zwischen 21.02.2022 und 07.03.2022 sieben weitere Erkundungsbohrungen inklusive einer Vielzahl an Bohrlochaufweitungsversuchen zur in-situ Bestimmung der Steifigkeit ausgeführt.

4.4.2.1 Bohrlaufweitungsversuche

Im Zuge der Erkundungsarbeiten wurden 17 Bohrlochaufweitungsversuche (BAV) nach DIN 4094-5 bzw. DIN EN ISO 22476-7:2013-03 mittels Seitendrucksonde in den Bohrungen BK 2, BK 3, BK 4, BK 5, BK 6 und BK 7 ausgeführt. Die Versuche wurden vorwiegend in den Sedimenten der Karstverfüllung, d.h. in den Tonen, Schluffen und Sanden in Tiefen zwischen 2,7 m und 17,0 m ausgeführt [B7].

Mit Hilfe der Be- und Entlastungsmoduli kann unter Berücksichtigung der Querdehnzahl ($\nu=0,25$) der Steifemodul berechnet werden. In Anlehnung an die DIN 4094 entspricht der im mittleren Bereich des Entlastungsastes bestimmte Entlastungsmodul unter Berücksichtigung der Poissonzahl dem Steifemodul des Bodens. Tabelle 2 zeigt die Steifemoduli sowohl für die Erstbelastung und Entlastung als auch für die Wiederbelastung. Diese Werte haben in der Evaluierung/Festlegung der Materialparameter Eingang gefunden.

Tabelle 3: Ergebnisse der Bohrlochseitendruckversuche (Seitendrucksonde) [B7]

Bohrung	Versuchstiefe [m u. GOK]	Lithologie/Stratigraphie	Lastbereich [kN/m ²] Entlastung	Steifemodul (Erstbelastung) [MN/m ²]	Steifemodul (Entlastung) [MN/m ²]	Steifemodul (Wiederbelastung) [MN/m ²]
BK 2/2021	4,0		240 - 160	6	98	43
BK 3/2021	3,0	U, s, g' (Injektionsbereich)	240 - 160	13	167	68
BK 3/2021	8,0		340 - 260	16	1.359	989
BK 4/2021	6,0	T, s*	480 - 320	16	354	137
BK 5/2021	4,0	T, s*, g'	240 - 160	3	87	28
BK 5/2021	6,0	T, s*	240 - 160	3	45	24
BK 5/2021	11,0	U,s,g'	381 - 220	21	175	92
BK 6/2021	2,7	T, ms', mg', fs'	290 - 211	9	518	187
BK 6/2021	4,5	U, s*, t'	189 - 107	11	190	72
BK 6/2021	7,4	T, s*	260 - 140	12	118	58
BK 6/2021	12,0	T, u, s'	416 - 237	9	75	40
BK7/2021	3,5	T, s, fg'	113 - 61	4	61	30
BK 3/2021	12,0	gS, ms*, t', fs', u'	480 - 321	54	308	246
BK 4/2021	4,0	mS, t', fs, gs', u	381 - 220	13	135	62
BK 4/2021	12,0	mS, t', fs, u, gs'	480 - 320	20	401	178
BK 4/2021	17,0	T, s*/S, u	480 - 320	7	116	58
BK 6/2021	17,0	mS, fs, t', u, gs'	394 - 187	5	45	28

4.4.2.2 Laborversuche

Für die bodenmechanischen Laborversuche wurden aus den Bohrkernen der sieben Bohrungen insgesamt 25 Bodenproben in Form von gestörten Eimerproben entnommen und hinsichtlich der Korngrößenverteilung und der Zustandsgrenzen analysiert. Die Ergebnisse der durchgeführten Laborversuche sind in den Anlagen von [B7] dokumentiert.

Die Karstverfüllung kann nach DIN 18196 hauptsächlich den Bodengruppen TM, TA, UM, UL, SU* und ST* zugeordnet werden. Der Feinkornanteil wurde mit 26 % bis 95 % bestimmt. Der Sandanteil liegt bei 4 % bis 71 %. Die Proben weisen einen Kiesanteil von 0% bis 23 % auf. Es ist zu beachten, dass der hohe Kiesanteil z.T. durch das Auftreten von Kalkkonkretionen beeinflusst werden kann. Die hohen Schwankungsbereiche der jeweiligen Anteile zeigen einmal mehr die Heterogenität der Karstverfüllung.

Für die Karstverfüllung lag die Konsistenz der Proben im steif bis halbfesten Bereich mit einer Konsistenzzahl zwischen 0,7 und 1,2 (Median = 1,0). Anzumerken ist, dass durch den Probentransport und die Lagerung die Konsistenz durch geringfügiges Austrocknen verändern kann. Im Feld wurden die Tone und Schluffe vereinzelt auch als weich bzw. weich bis steif angesprochen. Die Plastizitätszahl schwankt zwischen 15,1 und 58,9 % (Median = 32,7 %).

4.4.3 Geotechnische Parameter für Planfeststellung 2022

Für die im Zuge der Planfeststellung ausgeführten geotechnischen Berechnungen wurden die in Tabelle 4 dargestellten geotechnischen Parameter, basierend auf den vorhandenen In-situ und Laborprüfungsergebnissen sowie auf Erfahrungswerten, festgelegt.

Tabelle 4: Geotechnische Materialparameter

Geotechnische Einheit	g [kPa]	g_{sat} [kPa]	E [kN/m ²]	n [-]	GSI [-]	UCS [kN/m ²]	m_i [-]		
Geotechnische Einheit	g [kPa]	g_{sat} [kPa]	E_s [kN/m ²]	E [kN/m ²]	n [-]	c [kN/m ²]	f [°]	y [°]	
Kalkstein Weißjura unverwittert	25	25	1560000	0.25	30	80 000	10		
Trennflächen d. Kalkstein	-	-	-	-	-	30	20	-	
Versturzonenverfüllung/ Karsthohlraumverfüllung	19	19	40000	29700	0.3	5	27.5	0	
Steinschüttung, lehmhaltig	21	21	50000	37143	0.3	5	32.5	0	
Dammschüttung, Stützkörper (Steinschüttung mit wenig Lehm)	22	22	80000	59429	0.3	0	37.5	0	
Lehmiger Talschotter	19	20	5000	3714	0.3	5	27.5	0	
Sand	19	21	20000	14857	0.3	0	32.5	0	
Dammdichtung, Tonbeton	19	20	10000	7429	0.3	0	32.5	0	
Ausgleichsschicht/Auffüllung	20	-	-	30000	0.3	0	30	0	
Flächenfilter 4/32	21.5	21.5	-	45000	0.3	0	37.5	0	
Sand	19	21	20000	14857	0.3	0	32.5	0	
Flächenfilter	21.5	21.5	-	45000	0.3	0	37.5	0	
Steinschüttung (Mindestanforderung)	21.5	21.5	-	45000	0.3	0	37.5	0	
Tragschicht	21.5	21.5	-	45000	0.3	0	37.5	0	
Rüttelstopfsäule	19	19	80000	59429	0.3	0	43	0	

Bestand Untergrund
Bestand Ringdammmaterialien
Neubau

Hoek und Brown (1997) führten den GSI Wert für eine einfache, schnelle und dennoch zuverlässige Klassifizierung, die auf einer visuellen Inspektion der geologischen Bedingungen basiert. Hoek und Brown (1997) schlugen eine solche praktische Klassifizierung zur Schätzung des GSI allein auf der Grundlage einer visuellen Inspektion vor bei Bewertung des Flächen Bedingungen vs. Strukturbedingungen (Abbildung 27). Für die unverwitterten Kalkstein im Oberbecken beriech von Happurg PSKW wurde der unten angezeigte Bereich als GSI Wert gewählt.


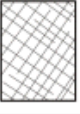




Rock Type: Basic Observational 2000 GSI: <input type="text"/>		SURFACE CONDITIONS				
		VERY GOOD	GOOD	FAIR	POOR	VERY POOR
STRUCTURE		DECREASING SURFACE QUALITY →				
	INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities	90	80	70	N/A	N/A
	BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets		60	50		
	VERY BLOCKY - interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets			40		
	BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity				30	
	DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces					20
	LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes	N/A	N/A			10

Abbildung 27: Geschätzter GSI Bereich für den unverwitterten Kalkstein [L2]

4.5 Hydrogeologische Verhältnisse im Speicherbereich

4.5.1 Hydraulischen Bohrlochversuche

Da in der Versturzone kein zusammenhängender Grundwasserleiter angetroffen wurde (Abschnitt 7.8 von [B1]), die Lockergesteine also nicht wassergesättigt sind, wurde auf die Durchführung von hydrogeologischen Versuchen in der Vergangenheit in der Versturzone verzichtet, da in erdfeuchten bzw. teilgesättigten Böden Versuche zur Bestimmung der in-situ-Durchlässigkeit wie Infiltrationsversuche erfahrungsgemäß weniger verlässliche Ergebnisse liefern.

Für die Ermittlung der Durchlässigkeiten des Kluftsystems wurden im Rahmen der ersten Erkundungsphase Kernbohrungen im Jura-Kalkstein abgeteuft und über die offene Bohrloch-sole Wasserabpressversuche (WD-Versuche) durchgeführt. Die Versuche wurden im Zuge

der Bohrarbeiten gegen die Bohrlochsohle mit Einfachpackern ausgeführt. In den tiefen Bohrungen wurden bis zu 7 Versuche über die im Kalkstein verlaufende Erkundungsstrecke verteilt ausgeführt, um auch tiefenabhängige Effekte ermitteln zu können [B1].

In Tabelle 5 sind die maßgebenden Ergebnisse der hydraulischen Bohrlochversuche zusammengestellt. Die Versuche zeigen eine große Variabilität der Gebirgsdurchlässigkeit des Kalksteins, die primär durch das Trennflächengefüge und hier die steil einfallenden partiell offenen oder offenen Klüfte bestimmt wird.

Tabelle 5: Ergebnisse der 2011 im Kalkstein ausgeführten WD-Versuche [B1]

Kernbohrung	Bohrlochdurchmesser [mm]	Sitz oberer Packer [m]	Bohrlochsohle [m]	max. Druckstufe p_{max} [bar]	Rate Q [l/s]	Rate pro m bei p_{max} [l/min/m]	Lugeon-Wert [l/min/m]	Anmerkung
BK1a/2011	146	23,9	28,0	1,14	3,0	43,9	385,1	Gebirgsumläufigkeiten
BK1b/2011	146	20,2	24,0	2,00	3,38	53,4	265,3	
BK1c/2011	146	14,1	16,0	4,20	0,02	0,6	1,5	kompakter Kst
BK2/2011	146	25,1	28,0	0,75	2,95	61,0	813,8	
BK2/2011	146	31,2	33,0	0,55	3,05	101,7	1.855,2	
BK3/2011	146	5,2	8,0	0,20	3,0	64,3	3.214,3	
BK4/2011	146	30,6	32,0	3,63	1,13	48,4	133,4	Erosion/Kluftöffnung
BK5/2011	146	22,4	26,0	3,0	0	0	0	kompakter Kst
BK6/2011	146	34,3	35,8	0,88	3,04	121,6	1.389,7	
BK6/2011	146	44,6	47,0	3,0	1,93	48,3	162,1	Gebirgsumläufigkeit
BK6/2011	146	48,3	51,2	3,1	0,14	2,9	9,5	
BK6/2011	146	59,0	63,0	2,3	3,36	50,4	219,1	
BK6/2011	146	63,0	67,7	3,2	0	0	0	kompakter Kst/Mst
BK6/2011	146	66,5	68,5	3,7	0	0	0	kompakter Mst
BK7/2011	146	17,6	2,0	0,7	3,0	40,9	586,1	
BK9/2011	146	12,6	14,0	3,0	0,17	7,3	24,2	kompakter Kst
BK11/2011	146	16,7	19,0	0,72	3,0	78,3	1.090,0	Kluftöffnung
BK11/2011	146	23,9	26,0	3,8	0	0	0	sehr kompakter Kst
BK11/2011	146	32,8	36,9	2,9	0,29	4,2	14,5	kompakter Kst
BK11/2011	146	37,0	42,8	3,5	1,99	20,6	58,8	weitg.kompakter Kst
BK11/2011	146	72,7	76,7	3,14	1,47	22,1	70,2	Gebirgsumläufigkeit
BK11/2011	146	82,9	85,1	3,8	0	0	0	kompakter Mst
BK12/2011	146	24,2	26,0	0,25	3,74	124,7	4.986,7	
BK12/2011	146	47,5	49,5	3,2	1,7	51,0	159,4	Freispüleeffekte
BK12/2011	146	52,6	55,0	2,3	3,41	85,3	368,6	
BK12/2011	146	55,6	60,0	2,8	3,37	46,0	165,6	
BK12/2011	146	60,0	67,6	3,3	3,51	27,7	84,0	
BK12/2011	146	70,6	74,0	1,9	3,72	65,7	345,5	
BK12/2011	146	74,7	79,0	3,7	0,08	1,12	3,0	kompakter Mst
BK12/2011	146	80,0	82,0	3,3	0	0	0	kompakter Mst
BK15a/2011	146	8,0	11,3	0,48	2,99	54,7	1.151,5	kompakter Kst

In der Summe belegen die Ergebnisse der in den Jura-Kalksteinen unter dem Oberbecken durchgeführten hydraulischen Bohrlochversuche die hohe und sehr hohe Systemdurchlässigkeit dieses Kluftgrundwasserleiters. Nur lokal, in geringer geklüfteten Partien des Kalksteins ergeben sich geringere Systemdurchlässigkeiten. Eine unmittelbare Tiefenabhängigkeit ist nicht erkennbar (Abbildung 28), doch liegen die besonders hohen Lugeon-Werte ($Lu > 100$) auf den ersten 30 m unter Beckensohle.

In der BK 11/2011, der BK 12/2011 und der BK 23/2011 wurde der tiefste WD-Versuch jeweils bereits im Ornaten-Ton durchgeführt. Eine Fließrate konnte hier bei Drücken ≥ 3 bar nicht gemessen werden. Dies belegt die sehr geringe Durchlässigkeit dieser geologischen Formation, die als Grundwasserstauer des überlagernden Kluft-Grundwasserleiters wirkt.

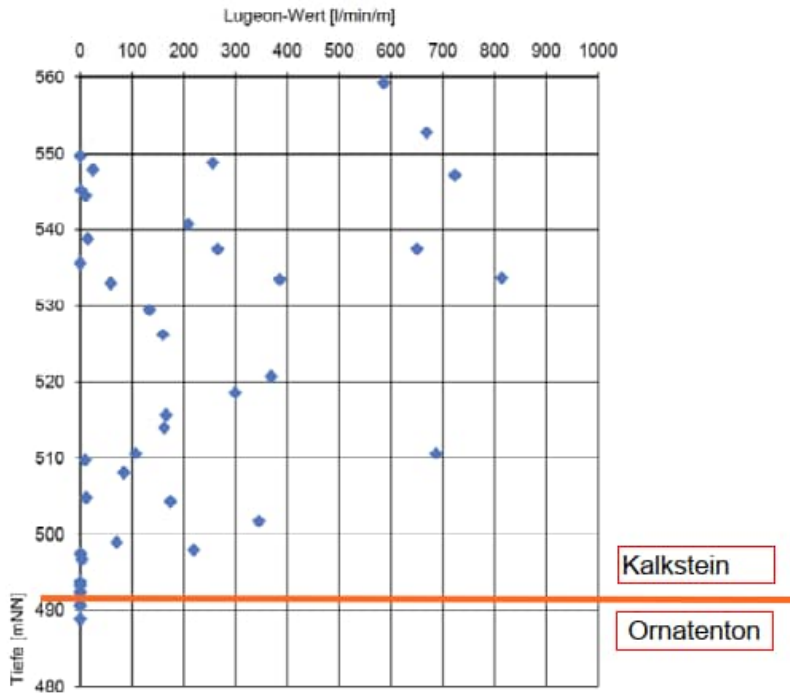


Abbildung 28: Tiefenabhängige Darstellung der aus den WD-Tests ermittelten Lugeon-Werte

4.5.2 Grundwasserbeobachtungen

Die Ergebnisse der Grundwasserbeobachtungen von 2011 sind in [B1] wie folgend bewertet:

- In der Summe bestätigen die bei den Bohrarbeiten gemachten Beobachtungen, dass die Lockergesteine in der Versturzzone insbesondere die schluffigen Sande nicht unter einem Grundwassersaum liegen
- In lediglich einer der 56 Kernbohrungen wurde innerhalb der Lockergesteine ein Wasserzutritt beobachtet, der zudem nahe der Felsoberfläche lag. In allen anderen Bohrungen blieb das Bohrloch in den Lockergesteinen trocken.
- An der Basis der Kalksteine auf dem als Stauer wirkenden Ornatenton hat sich ein Grundwasserleiter ausgebildet. Dessen freie Oberfläche liegt zwischen 495 mNN und > 515 mNN und variiert in Abhängigkeit von Niederschlagsereignissen.
- In der Summe ist festzustellen, dass in den Lockergesteinen der Versturzzone kein aushaltender Grundwasserleiter vorhanden ist. Auch Hinweise auf Schichtwasservorkommen gibt es nur sehr begrenzt.

Die Grundwassermessdaten im Betrachtungszeitraum 2013 – 2022 im Bereich des Oberbeckens wurden detailliert in [B8] bewertet und die Ergebnisse sind im Folgenden zusammengefasst. Im speziellen wird darauf eingegangen welche Grundwassermessstände (im weiteren GW-Messstände) bemessungsrelevant für die Sanierungsplanung sind. Abbildung 29 zeigt eine Zusammenstellung sämtlicher in den Dokument [B8] betrachteter GW-Messungen/-Daten.

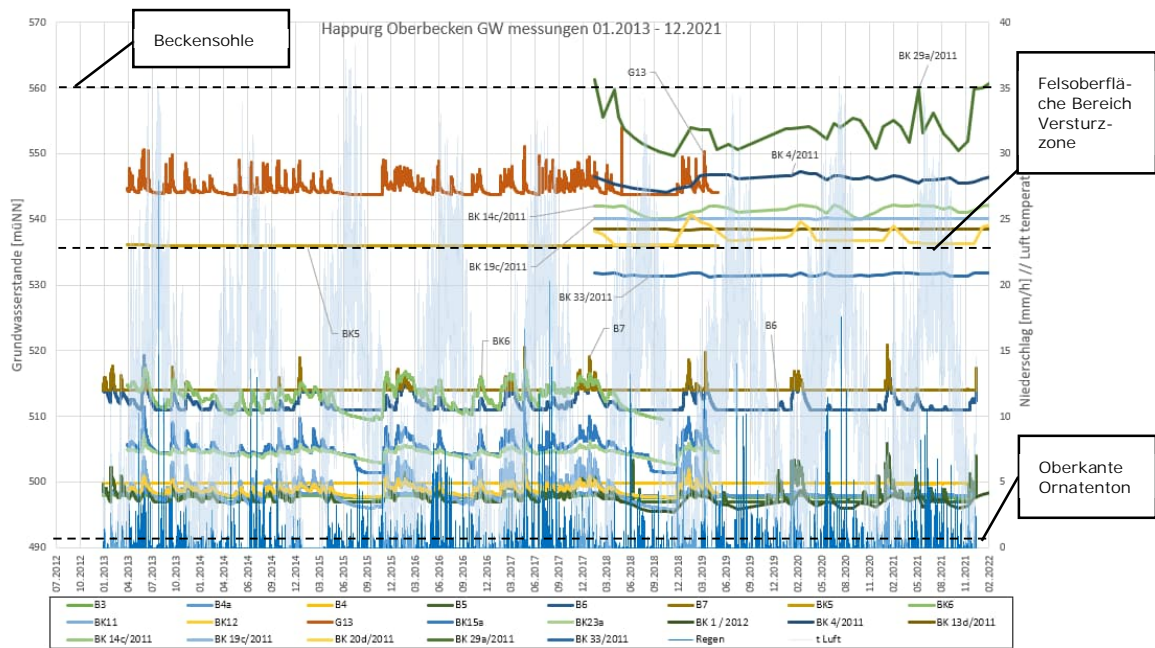


Abbildung 29: Zusammenstellung sämtlicher Grundwassermessdaten (Betrachtungszeitraum 2013 – 2021)

Um die Übersichtlichkeit zu verbessern (Visualisierung) wurden zwei getrennte Diagramme für i. Grundwassermessungen im Nahbereich der Beckensohle (Abbildung 30) und ii. Grundwassermessungen im Bereich des Ornatentons (Abbildung 31) erstellt.

4.5.2.1 Grundwassermessungen im Nahbereich der Beckensohle

Bei den Grundwassermessungen im Nahbereich der Beckensohle (Grundwassermessungen über 530mNN) wurde in den meisten GW-Messstellen ein Wasserstand im Nahbereich des Bohrloch-/Brunnentiefsten (Bohrlochgrund abgedichtet mit Ton) festgestellt. Zur Herstellung der GW-Messstellen wurden Bohrlöcher in einer gewählten Tiefenlage mittels Ton verpresst/abgedichtet und anschließend wurde im darüberliegenden Bereich (bis Oberkante Bohrung) ein PVC Rohr eingebracht.

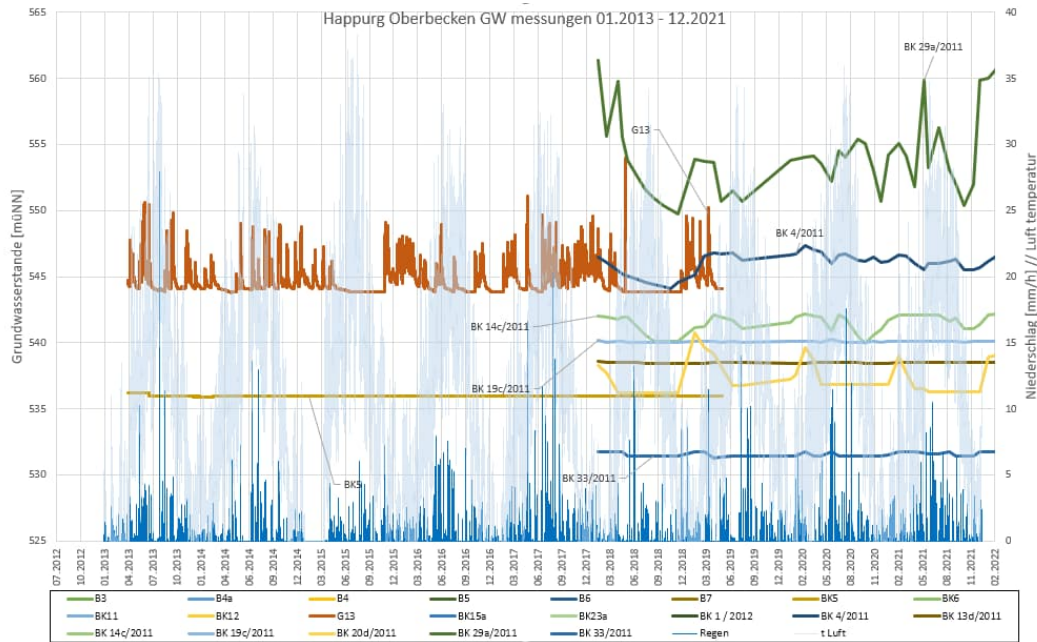


Abbildung 30: Grundwassermessungen im Nahbereich der Beckensohle, Betrachtungszeitraum 2013 - 2021

Die meisten GW-Messstellen befinden sich im Kalksteingebirge, in dem aufgrund der hohen Gebirgsdurchlässigkeit (Abschnitt 4.5.1) tendenziell kein hoher Grundwasserstand zu erwarten ist. Die in [A2] dargestellten Auswertungen zeigen, dass in den meisten GW-Messstellen ein GW-Stand knapp über dem GW-Messstellengrund gemessen wird (letzte Spalte). Unter Berücksichtigung der Messstellenausführung und der Ergebnisse der Datenauswertung ist davon auszugehen, dass diese gemessenen GW-Stände keine natürlichen GW-Stände darstellen und somit nicht repräsentativ sind.

Tabelle 6: Grundwassermessungen im Nahbereich der Beckensohle

Bohrung	Datenquelle	Endtiefe Bohrung [m]	Endtiefe GW-Messstelle oder Tonabdichtung [m]	Geologie im Bereich der Endtiefe GW-Messstelle	Länge Aufsatzrohr über GOK [m]	GW-Messstellentiefe (Tiefe von Aufsatzrohrbranke zu Endtiefe GW-Messstelle) [m]	GW - gemessen [m] (05.2013)	GW-Stand über GW-Messstellentiefe [m]
BK 4	Anlage 4-07 BK4-2011	32,0	16,0	Schluff, tonig	1,00	17,00	16,81	0,19
BK 13d	Anlage 4-16 BK13d-2011	26,0	25,0	Kalkstein	1,00	26,00	25,48	0,52
BK 14c	Anlage 4-18 BK14c-2011	22,0	20,7	Kalkstein	1,00	21,70	19,50	2,20
BK 19a	Anlage 4-31 BK19a-2011	20,0	20,0	Kalkstein	0,00	20,00	trocken	trocken
BK 19c	Anlage 4-32 BK19c-2011	27,7	23,0	Kalkstein	0,96	23,96	21,80	2,16
BK 20d	Anlage 4-35 BK20d-2011	20,0	20,0	Kalkstein	1,00	21,00	19,82	1,18
BK 29a	Anlage 4-49 BK29a-2011	25,0	13,0	Kalkstein	0,98	13,98	14,18	-0,20
BK 33	Anlage 4-54 BK33-2011	32,0	30,8	Kalkstein	1,09	31,89	29,32	2,57
G13/198 1	Anlage7 versickerungsversuch	10,0	10,0	-	0,00	10,00	9,18	0,82

4.5.3 Grundwassermessungen im Bereich des Ornatentons

Abbildung 31 zeigt die GW-Messdaten im Bereich des Ornatentons.

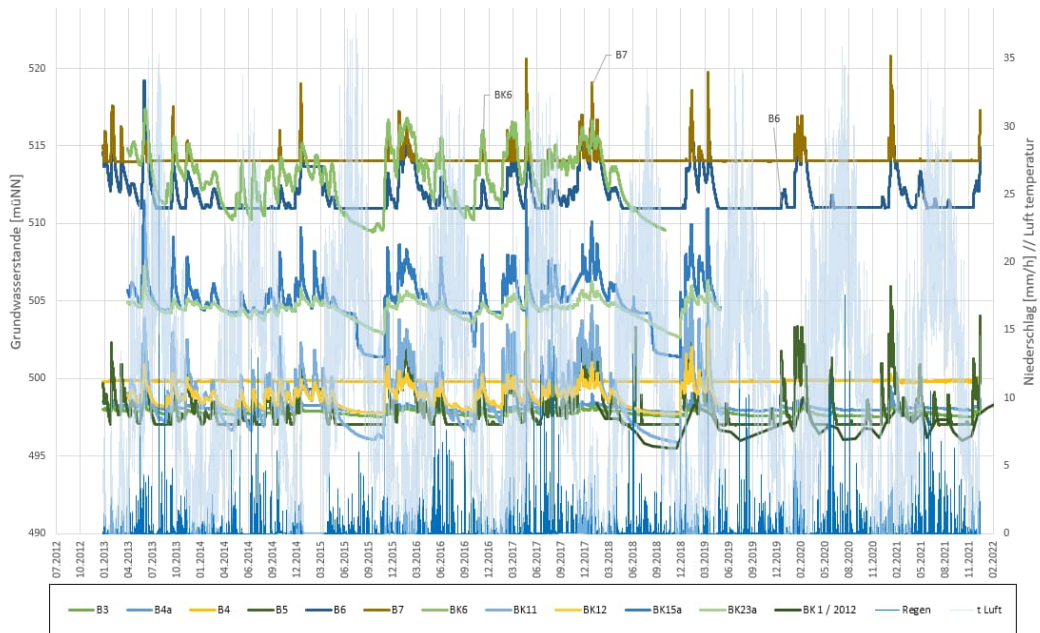


Abbildung 31: Grundwassermessungen im Bereich des Ornatentons, Betrachtungszeitraum 2013 - 2021

Basierend auf den vorhandenen Daten (Grundwassermessungen zwischen 490 - 520 mNN) kann tendenziell von einem „leichten“ Gefälle (Orientierung W → O) der Grundwasseroberfläche (Hauptgrundwasserkörper) ausgegangen (dargestellt in den geologischen Schnitten bzw. im 3D Modell, vgl. Abbildung 33 und Abbildung 34) werden (Schnittführung siehe Abbildung 32). Diese gemessenen Grundwasserstände liegen mindestens 40 m unter der Beckensohle bzw. 20 m unter dem Sohlbereich der Verstorzone.

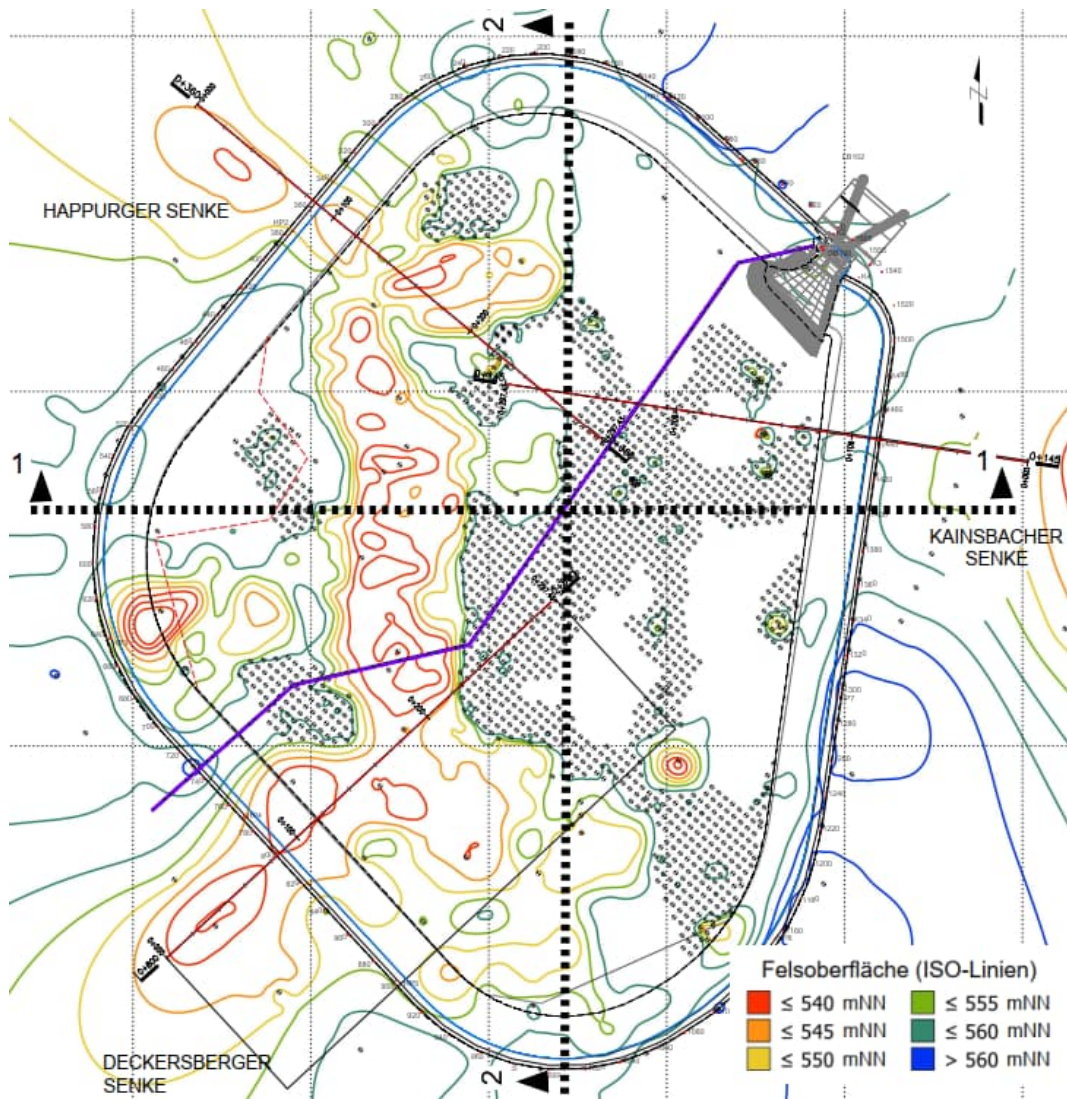


Abbildung 32: Lageplan inkl. Schnittführung (vgl. Abbildung 33 und Abbildung 34)

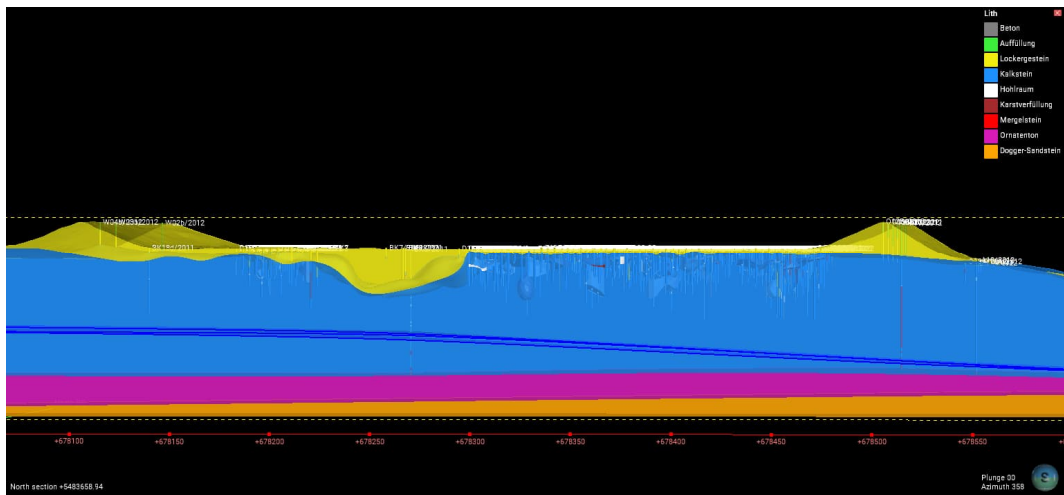


Abbildung 33: Interpolierte Grundwasseroberflächen, Blickrichtung Norden (3D Untergrundmodell) – Schnitt 1-1

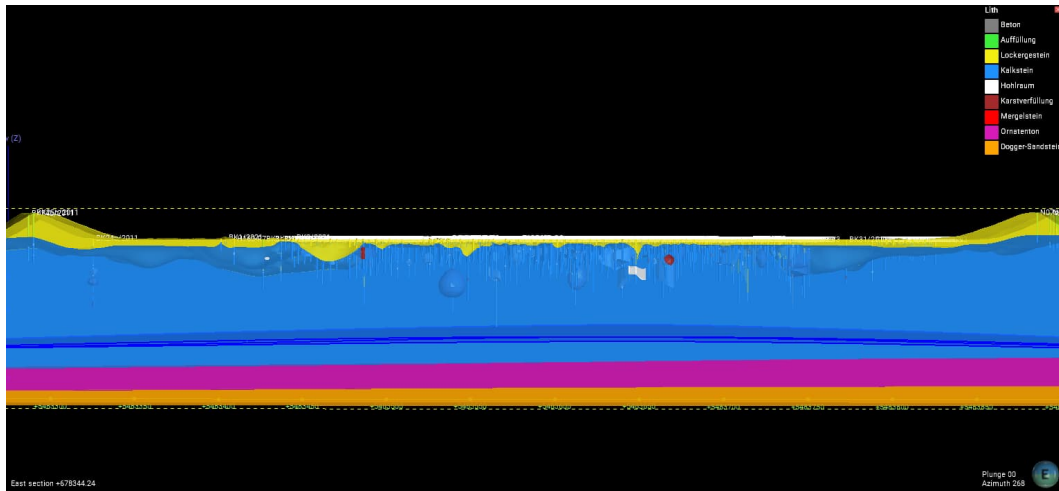


Abbildung 34: Interpolierte Grundwasseroberflächen, Blickrichtung Westen (3D Untergrundmodell) – Schnitt 2-2

Diese Auswertungen zeigen, dass kein zweiter Grundwasserkörper/-horizont im Nahbereich der Beckensohle nachgewiesen werden kann. Die GW-Messdaten implizieren einen Grundwasserkörper (Hauptgrundwasserkörper), welcher durch den Grundwasserstauer (Ornatenon - Seehöhe zirka 495mNN) begrenzt wird. Die detaillierte Betrachtung der GW-Messdaten im Nahbereich des Beckensohle (siehe Abschnitt 4.5.3), welche in der Vergangenheit dazu führten dass ein zweiter oberflächennaher Grundwasserkörper (Schichtengrundwasser) vermutet wurde, zeigte dass die gemessenen GW-Stände mit hoher Wahrscheinlichkeit keine natürlichen Grundwasserständen zeigen. Vielmehr werden gesammelte Wässer aus Niederschlag, etc. in den GW-Messstellentiefsten detektiert. In Bezug auf den Hauptgrundwasserkörper zeigen die erstellten GW-Isolinien Karten (siehe Abbildung 35) einen Grundwasserstrom Richtung Nord-Ost (tendenziell rechtwinkelig auf die Versturzone). Die angesprochenen Grundwassermessungen bzw. der dadurch abgegrenzte Grundwasserkörper bzw. dessen Oberfläche liegt in allen Bereichen zirka mindestens 20m unterhalb der Felsoberfläche und beeinflusst somit nicht die baulichen Maßnahmen am Oberbecken.

Das nicht Vorhandensein eines Schichtengrundwasserkörpers nahe der Oberfläche unterstützt auch die Theorie, dass in der Vergangenheit die Verstürze durch Lockergesteinserosion, bedingt durch Wasserzutritten aus dem möglicherweise nicht 100% dichten Becken (4.3.1), hervorgerufen wurden. Dies scheint insofern plausibel da die eintretenden Wässer entsprechende Gradienten (Staudruck) aufwiesen.

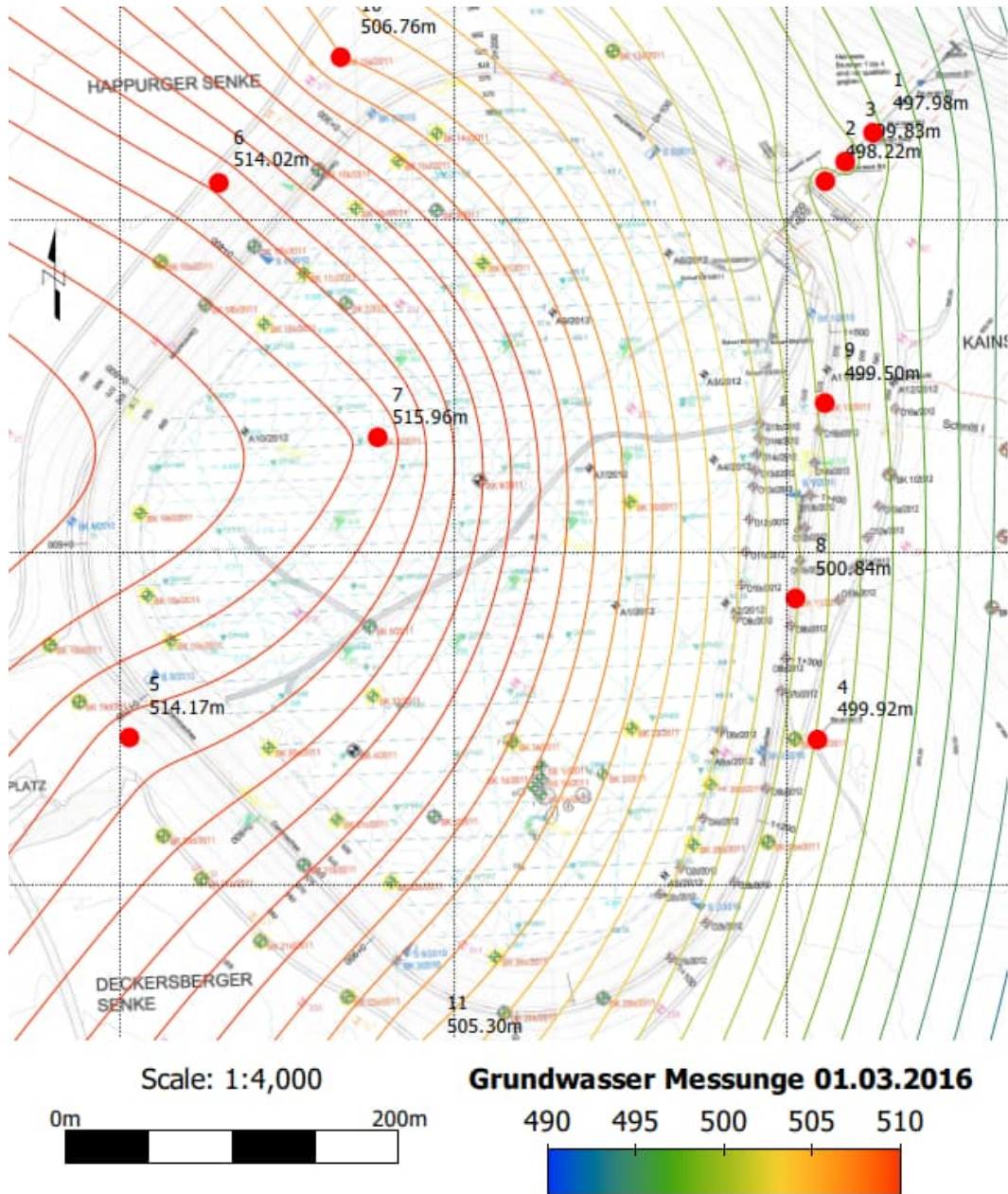


Abbildung 35: Isolinien der GW-Oberfläche oberhalb des Ornatentons (1.03.2016)

Wie in Abbildung 35 liegt der Druckhöhenunterschied zwischen den westlich gelegenen Messstellen und den östlich gelegenen Messstellen in einem Bereich von max. 515,96 m und min. 497,98 m, d.h. der maximale Druckhöhenunterschied beträgt 17,98 m. Auf eine geschätzte Strecke bzw. Fließlänge von zum Beispiel ca. 250 m zwischen Messstelle 7 und 9 oder Messstelle 7 und 8 ergeben sich so sehr niedrige hydraulische Gradienten in einem Wertebereich $< 0,1$. Das und auch die Abstände und Scharung der Isohypsen deuten ebenfalls auf sehr hohe Durchlässigkeitswerte im gesamten Bereich hin, unabhängig von potentiellen lokal ausgebildeten hemmenden Horizonten wie die Crussoliensis Mergel oder die Platynota Schichten, wie auch in [L3, L4] beschrieben.

4.5.4 Grundwasserchemismus

Am 18.11.2011 wurden aus drei zu Grundwassermessstellen ausgebauten Kernbohrungen Wasserproben entnommen und im chemischen Labor auf betonangreifende Eigenschaften untersucht. Die Wasserproben wurden aus den Grundwassermessstellen BK 5/2011 und BK 19c/2011 mit einer Unterwasserpumpe entnommen, während aus der Grundwassermessstelle BK 33/2011 eine Schöpfprobe entnommen wurde. Die Kennwerte der Grundwassermessstellen und die bei der Grundwasserprobenentnahme nach DIN 38402 protokollierten Parameter der Feldmessungen sind in Tabelle 7 zusammengefasst [B1].

Tabelle 7: Entnommene Wasserproben im Bereich des Oberbeckens mit gemessenen Feldparametern [B1]

		BK 5/2011	BK 19c/2011	BK 33/2011
Lage		Beckensohle, ca. Mitte Versturzzone	Beckensohle, südwestlicher 'Ausläufer' Versturzzone, wasserseitiger Dammfuss	Beckensohle, in Anomalie in südöstlichem Bereich
OK Pegel	[mNN]	562,35	582,84	562,19
Filterstrecke ¹⁾	[m]	21,25-26,75	18,5-24,0	26,89-33,09
UK (Sumpf-)Rohr ¹⁾	[m]	26,75	27,96	31,89
Ø Pegel		2"	2"	2"
gelotete Tiefe ¹⁾	[m]	26,80	28,09	30,80
Ruhewasserspiegel ¹⁾	[m]	24,46	21,18	29,70
Art der Probennahme		pumpen	pumpen	schöpfen
Gw-Temperatur	[°C]	10,7	11,6	10,4
pH-Wert	[-]	7,8	7,9	7,9
Leitfähigkeit	[µS/cm]	370	516	240
O ₂ -Gehalt	[mg/l]	3,2	6,0	5,4
Organoleptische Auffälligkeiten		trüb, braun	schwach trüb, farblos	trüb, ocker

Die entnommenen Wasserproben wurden im chemischen Labor auf betonangreifende Eigenschaften untersucht. Alle drei untersuchten Wasserproben wurden als nicht betonangreifend im Sinne der DIN 4030:2008-06 bzw. der DIN EN 206-1:2001-07 eingestuft [B1].

5 Baugeologische Beschreibung

5.1 Dammaufstandsfläche

Der ca. 1,5 km lange Ringdamm ist nach den vorliegenden Aufschlüssen und Untersuchungen teilweise auf Lockergestein, teilweise auf Kalkstein gegründet. Die genaue Höhenlage der Dammaufstandsfläche ist aus der Baudokumentation nicht eindeutig feststellbar, wurde aber auf Grundlage der vorhandenen Bohrungen bzw. den vorhandenen Regelquerschnitten abgeschätzt und entsprechend in Abbildung 36 dargestellt. (siehe [P5]).

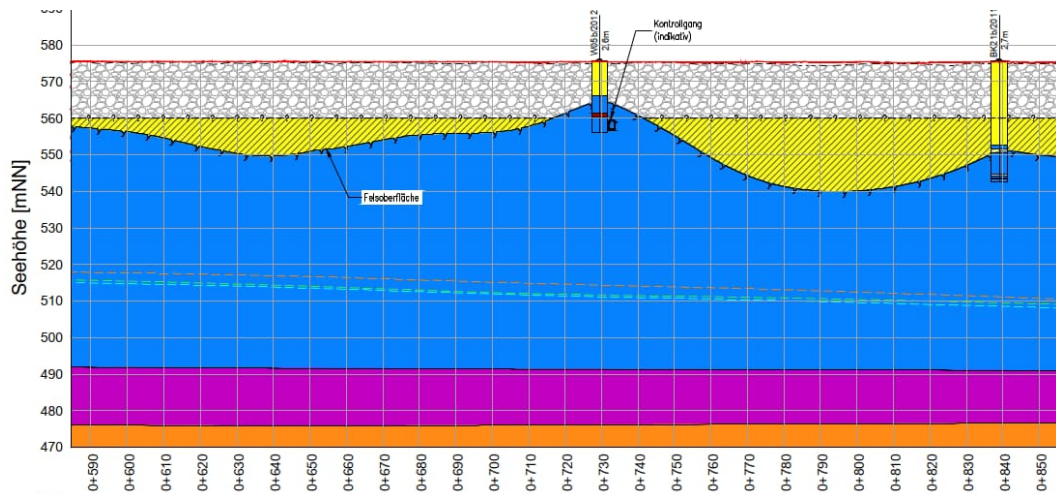


Abbildung 36: Geologischer Längsschnitt entlang der Dammachse [P5]

Die Dämme queren die kartierte Versturzzone ca. im Bereich von km 0+180 – 0+400, km von 0+620 – 0+700 und von 0+740 – 0+1040 [P1]. In den entlang der Dammachse abgeteufte Bohrungen wurden keine größeren Hohlräume im Lockergestein bzw. keine Karsthohlräume (bzw. verfüllte Karsthohlräume) aufgeschlossen.

Da jedoch die meisten vorhandenen Bohrungen im Bereich des Kalksteins ausgeführt wurden, wird für die Ausführungsphase eine zusätzliche Bohrkampagne zur Erkundung möglicher Hohlräume im Bereich des Lockergestein unter der wasserseitigen Dammböschung vorgesehen. Die Erkundungsbohrungen werden in der wasserseitigen Dammböschung von etwa 564 mNN in einem Abstand von 10 m und einer Länge von 20 m ausgeführt. Sollten Hohlräume detektiert werden, ist geplant diese mit Injektionsgut zu verfüllen. Weiters ist beim Antreffen von Hohlräumen im Lockergestein in Abstimmung mit dem Geotechniker vor Ort das Erkundungsraster entsprechen zu verfeinern (split-spacing). Um die Anlagensicherheit zu erhöhen ist eine Verformungsmessung sowie eine zusätzliche Grundwassermessungen mittels Piezometer vorgesehen (siehe [P6 und P7]).

5.2 Beckensohle

Folgend der Abbildung 24 ist die Beckensohle in Zone 1 (Versturzzone), in der die Lockergesteinsmächtigkeiten ca. 10 – 30 m (teilweise darüber) betragen bzw. Zone 2 situiert (Lockergesteinsmächtigkeiten 1 – 3 m). In Zone 2 gibt es zusätzlich Stellen an denen es zu lokal tieferen Karsthohlräume (bzw. verfüllte Karsthohlräume) geben kann. Als ein Beispiel kann diese Situation in einem Ausschnitt von [P2] bei km 0+800 Blickrichtung Nordwest gesehen werden (Abbildung 37). Die aus dem Bestand vorhandene Lehmdichtung wird für die Schaffung der neuen Beckengeometrie ausgehoben. Das neue Dichtungskonzept, bestehend aus einem zweiseitigen Aufbau, wird in Zone 1 auf einer tiefreichenden Bodenverbesserung mittels Rüttelstopfsäulen bzw. in Zone 2 auf Fels bzw. entsprechend tragfähigem Lockergesteinsmaterial gegründet. Weitere Details sind im Geotechnischen Entwurfsbericht [B11] angegeben.

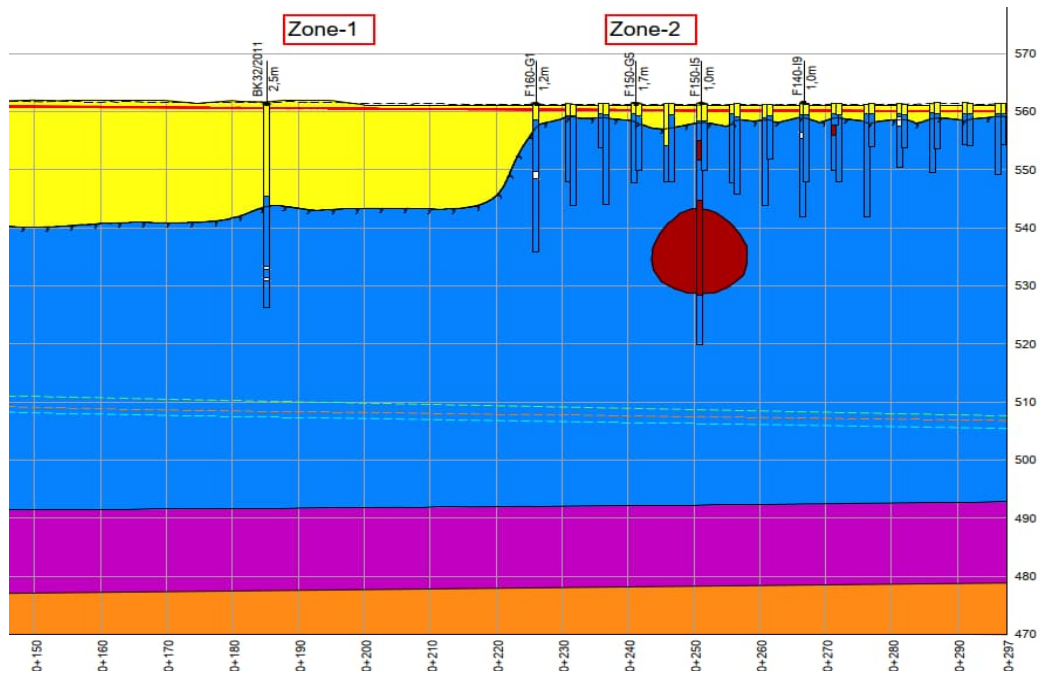


Abbildung 37: Geologischer Längsschnitt entlang 0+800 [P2]

5.3 Kontrollgang

Abbildung 38 zeigt die ermittelten Felsoberflächen sowie den Verlauf des Kontrollganges. Die Linienführung wurde so gewählt, dass dieser hauptsächlich auf Fels gegründet wird und auf möglichst kurzer Distanz die Versturzzone quert. Im Bereich der Zone 1 wird der Kontrollgang durch ein zusätzliches Magerbetonfundament in Kombination mit der Bodenverbesserung mittels Rüttelstopfsäulen auf ausreichend tragfähigen Untergrund gebettet (siehe Abbildung 39 und [B13]).

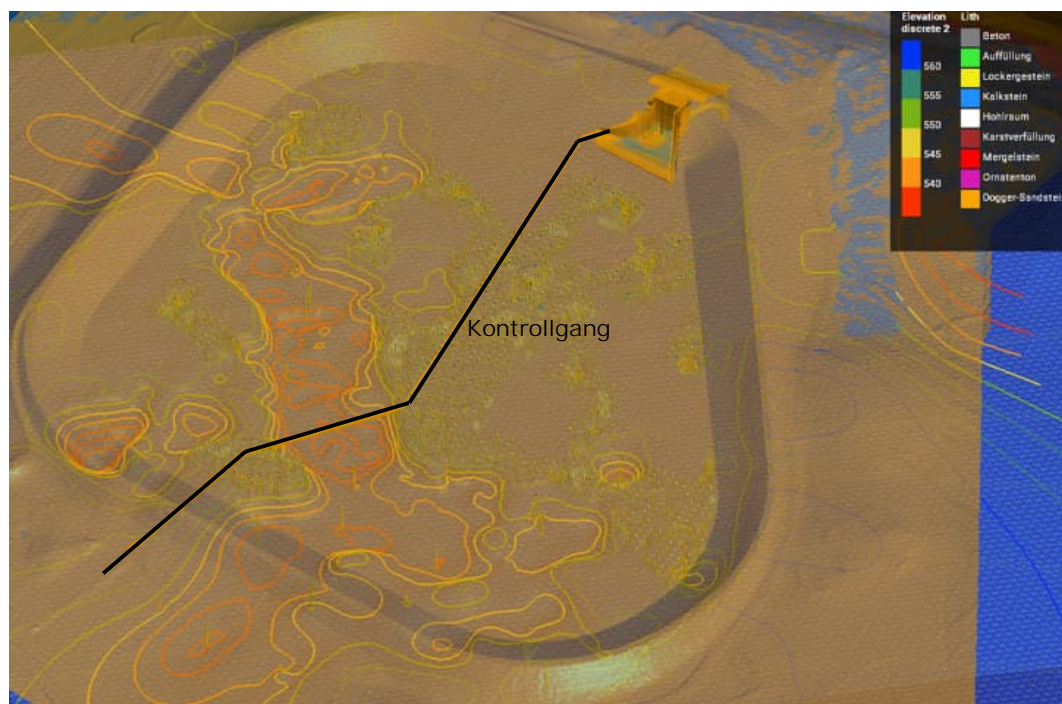


Abbildung 38: Lageplan inkl. Felsoberfläche und Kontrollgangverlauf aus [A1]

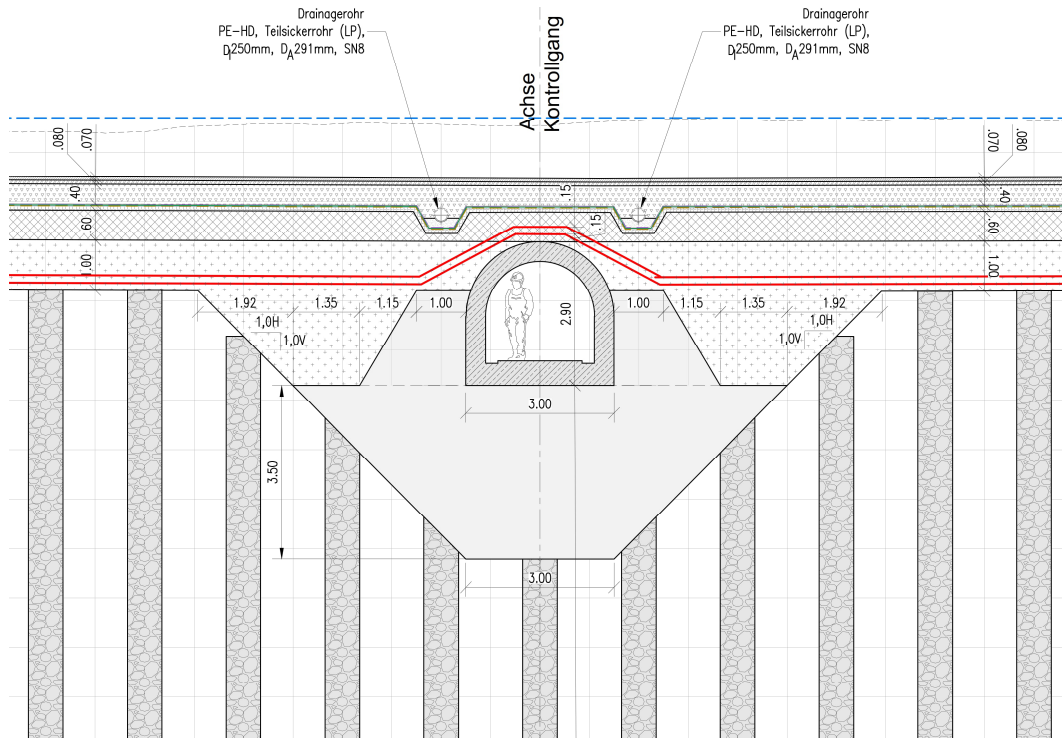


Abbildung 39: Fundierung Kontrollgang in Zone 1

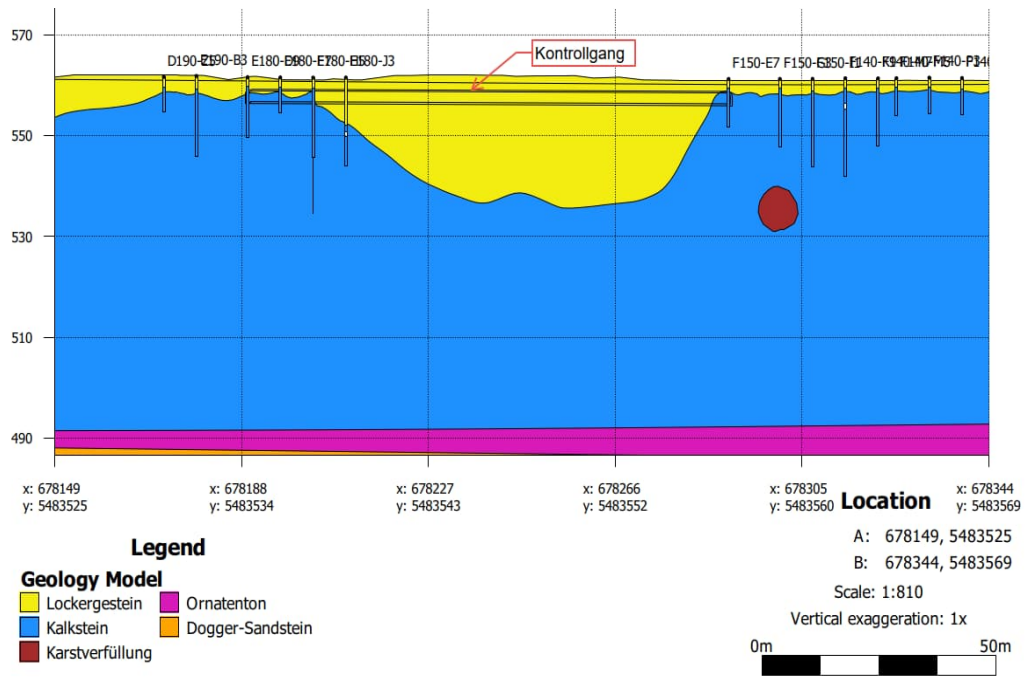


Abbildung 40 Bildschirmfoto [S1] mit Kontrollgang und Felsoberfläche

6 Zusammenfassung

Dieser Bericht erläutert in Kombination mit dem erstellten 3D-Untergrundmodell die komplexe geologisch/geotechnische Situation im Bereich des Oberwasserspeichers des PSW – Happurg.

Das Oberbecken des PSW Happurg ist im zirka 60 m mächtigen Kalksteinen des Malm alpha (Oberer Jura) situiert, der sogenannten Ornatenton überlagert ist. Die Kalksteine der oberen zwei Drittel des Malm alpha sind mäßig bis stark verkarstet, d.h. die Klüfte sind durch Lösungsvorgänge häufig um mehrere Zentimeter aufgeweitet. Die Kalksteine sind im Bereich des Oberbeckens durch Lockergestein mit Mächtigkeiten von wenigen Metern bis zu zirka 30 m im Bereich der Versturzzone überlagert.

Aufgrund der inhomogenen Gründungsverhältnisse und der in der Vergangenheit aufgetretenen Wasserzutritte in den Untergrund kam es während des Betriebes im Oberbecken immer wieder zu lokalen Sackungen (Schadensfällen).

Folgend den so genannten Schadensereignissen wurden zahlreiche Erkundungen, wie Kernbohrungen, Vollbohrungen, Schürfen sowie geophysikalische Messungen (Geoelektrik, Refraktionsseismik etc.) durchgeführt. Die ausgeführten Erkundungen, der chronologische Ablauf sowie deren Ergebnisse sind in Abschnitt 3.2 angeführt.

Für eine bessere Interpretation der Vielzahl der vorhandenen Erkundungsergebnisse sowie für eine übersichtliche Darstellung der geologisch-/geotechnischen Verhältnisse wurde mittels der Software Leapfrog [S1] ein detailliertes dreidimensionales geologisch/geotechnisches Untergrundmodell (3D-Untergrundmodell) erstellt [A1].

Die im 3D-Untergrundmodell dargestellte Felslinie sowie die Abgrenzung der Versturzzonenbereiche basiert auf einer Auswertung aller vorhandenen Daten. In den Bereichen außerhalb der Versturzzone sind in verschiedenen Tiefenlagen bzw. Volumina detektierte Hohlräume und Karstverfüllungen dargestellt. Im Bereich der Versturzzone im Lockergestein wurden keine großräumigen unverfüllten Hohlräume detektiert.

Die hydrogeologischen Evaluierungen zeigen, dass der Ornatenton den Hauptgrundwasserkörper nach unten begrenzt (Grundwasserstauer). Im Bereich des Speicherbeckens liegt dieser auf zirka 495 mNN. Weiters zeigen die Auswertungen, dass es keine Hinweise auf so genannten Schichtgrundwasserleiter im Bereich bzw. Nahbereich der Beckensohle gibt.

Die in [L5] beschriebene Oberbeckenüberwachung mit Messbrunnen, die 1976/1978 in den Grundwasserhorizont oberhalb des Ornatentons abgeteuft wurden, zeigen eine deutliche Korrelation der Pegelstände mit dem Betriebsniveau im Oberbecken; im höchsten Betriebsniveau wurden über Feinpegelmessungen so Leckagen mit ca. 28 l/s ermittelt.

Des Weiteren wird auch hier der Einfluss des Oberbeckens als „Regenschirm“ gegenüber den Niederschlägen erläutert, wobei die in Beckennähe niedergegangenen Niederschläge schnell zum Grundwasserhorizont abströmen können.

Aus geologischer Sicht ist der Untergrund gegen erneuten Wasserzutritt aus dem Oberbecken zu schützen, umso weiteren Erosionen/Sackungen vorzubeugen. Bei einer zweischaligen dichten Oberbeckenkonstruktion ist davon auszugehen, dass Erosionsvorgänge unterhalb des Beckenbereiches in verfüllten bzw. teilverfüllten Karststrukturen maximal reduziert sind. Erdfall anfällige Strukturen werden im Zuge der Baumaßnahmen in den Bereichen mit freigelegter Felsoberfläche kartiert/dokumentiert und adäquat ertüchtigt; in Bereichen, in denen die Felsoberfläche bedeckt bleibt, wird mit dynamischen Vorbelastungen (20 to Walze) der Zustand der Beckenaufstandsfläche geprüft und nach Bedarf verbessert.

Ein Wissensdefizit besteht noch in den Bereichen, in denen der Ringdamm auf der Versturzone gegründet ist, da das Vorhandensein latenter Hohlräume unter dem Damm nicht per se ausgeschlossen werden kann, auch wenn diese als unwahrscheinlich betrachtet werden. Daher sollen in diesen Bereichen Erkundungsbohrungen entlang der Dammaufstandsflächen ausgeführt werden um mögliche latente Hohlräume, im Bereich der wasserseitigen Dammaufstandsflächen zu erkunden. Ein Erkundungsraster von 10 m wird hierfür zunächst als zielführend angesehen.

Im Bereich der Versturzone im Becken werden durch die geplante qualifizierte Bodenverbesserung mittels Rüttelstopfsäulen auch die möglichen - aber als unwahrscheinlich angenommenen - vorhandenen Hohlräume im Lockergestein im Nahbereich der zukünftigen Beckensohle verschlossen. Diese Vorschläge liegen weitgehend im Einklang mit den Schlussfolgerungen in [B12] *Als Voraussetzung für die Standfestigkeit des Dammes ist also zu fordern, das sämtliche derzeit feststellbaren Hohlräume unter den Damm einwandfrei verfüllt werden und die Bildung neuer Hohlräume durch Verhinderung von Wasseraustritten aus dem Becken in den Untergrund des Dammes vermieden wird.*

7 Anlage A

Die ausgeführten Erkundungen, der chronologische Ablauf bzw. deren Ergebnisse sind in Abschnitt 3.2 angeführt.

Das 3D Untergrundmodell (AFRY, 29.11.2022) kann mittels der Leapfrog Viewer Software geöffnet und betrachtet werden. Die Software kann unter folgendem Link kostenlos heruntergeladen werden.

Download: <https://my.seequent.com/products/leapfrog-viewer/latest>