



# **Geotechnischer Bericht**

**Strecke 5320 Nürnberg – Treuchtlingen  
EÜ Entengraben km 54,409 und  
EÜ Überwerfungsbauwerk km 54,410**

**Leistungsphase 3/4**

**Projektnummer U-SD02012**

**DB InfraGO AG, Sandstraße 38 – 40, 90443 Nürnberg**

---

DB Engineering & Consulting GmbH

---

I.TV-S-U-T 1

---

Landsberger Straße 318

---

80687 München

---

15.07.2024

---

**Prüf- und Freigabezeichnung für die aktuell gültige Version**

Erstellt		Fachgeprüft	Layout geprüft	Fachlich freigegeben
Ort, Datum	15.07.2024	15.07.2024	15.07.2024	15.07.2024
Name	Gerald Bauer	Nicolas Runge	Josipa Govorko	Nicolas Runge
Organisation / Funktion	I.TV-S-U-T 1	I.TV-S-U-T 1	I.TV-S-U-T	I.TV-S-U-T 1
Unterschrift	i. A.	i. V.		i. V.

**Versionen**

Version	Datum	Autor	Änderungen
1	15.07.2024	Gerald Bauer	

Inhaltsverzeichnis		Seite
1.1	Unterlagen	8
1.2	Vorgang / Aufgabenstellung	11
1.3	Aufschlussarbeiten / Laboruntersuchungen	11
<b>2</b>	<b>Darstellung / Bewertung der Untersuchungsergebnisse</b>	<b>14</b>
2.1	Beschreibung der örtlichen Verhältnisse	14
2.2	Neubau	16
2.2.1	Bauwerke	16
2.2.2	Anschlussdämme	17
2.3	Geologie	17
2.4	Erkundete Baugrundverhältnisse	19
2.5	Hydrogeologische / wasserwirtschaftliche Verhältnisse	20
2.5.1	Allgemeines	20
2.5.2	Erkundete Grundwasserstände	22
2.5.3	Grundwassermessstellen	23
2.5.4	Pumpversuch	25
2.5.5	Wasserschutzgebiete	26
2.5.6	Überschwemmungsgebiete / Hochwasser	26
2.5.7	Bemessungswasserstände	27
2.6	Baugrundmodell und charakteristische Bodenkennwerte	28
2.6.1	Baugrundmodell	28
2.6.2	Charakteristische Bodenkennwerte	30
2.7	Rammfähigkeit / Vibrieren, Einpressen	33
2.8	Betonaggressivität / Stahlkorrosivität	35
2.9	Kampfmittel	35
2.10	Erdbebeneinwirkung	35
<b>3</b>	<b>Gründungstechnische Schlussfolgerungen / Empfehlungen</b>	<b>36</b>
3.1	EÜ Entengraben/EÜ Überwerfungsbauwerk	36
3.1.1	Allgemeines	36
3.1.2	Flachgründung	37
3.2	Stützwände	41
3.2.1	Allgemeines	41

3.2.2	Flachgründung	41
3.3	Oberleitungsanlagen und Schallschutzwände	42
3.3.1	Allgemeines	42
3.3.2	Tiefgründung mittels Fertigrammpfählen	43
3.3.3	Kennwerte für Pfahlmantelreibung und Pfahlspitzendruck von Rammpfählen	43
3.3.4	Bettungsverlauf der Pfahlgründung	46
3.4	Baugrubensicherung	46
3.4.1	Baugruben	46
3.4.2	Wahl der Baugrubensicherung	47
3.5	Wasserhaltung	48
3.6	Widerlagerhinterfüllungen	50
3.7	Anschlussdämme	51
3.7.1	Allgemeines	51
3.7.2	Neubau Dämme	51
3.8	Bestandsdämme mit Gradientenanhebung	53
3.8.1	Allgemeines	53
3.8.2	Standsicherheit Ist-Zustand und für geplante Maßnahmen nach Stellungnahme EBA-Gutachter /U 16/	54
3.8.3	Standsicherheit Bestandsdämme mit geplanter Gradientenanhebung	55
3.8.4	Sanierung Bestandsdämme	56
3.9	Versickerungsfähigkeit	58
3.10	Einfluss der Baumaßnahme auf angrenzende Bebauungen / Gleisanlagen	58
3.11	Bautechnische Wiederverwendbarkeit von Aushubmassen	59
<b>4</b>	<b>Abfalltechnische Untersuchungen</b>	<b>60</b>
<b>5</b>	<b>Homogenbereiche</b>	<b>60</b>
<b>6</b>	<b>Schlussbemerkungen und Hinweise</b>	<b>61</b>

Tabellen	Seite
Tabelle 1: Aufschlüsse	11
Tabelle 2: Erkundete Grundwasserstände	22
Tabelle 3: Transmissivität (T), Durchlässigkeitsbeiwert ( $k_f$ ) und Speicherkoeffizient S	26
Tabelle 4: Baugrundmodell	28
Tabelle 5: Charakteristische Bodenkennwerte	30
Tabelle 6: Rammfähigkeit	33
Tabelle 7: charakteristische Bettungsmoduln $k_{s,k}$	40
Tabelle 8: Spitzendruck und Mantelreibung für Rammpfähle gemäß EA-Pfähle /U 40/	44
Tabelle 9: Anpassungsfaktoren für Pfahlspitzendruck und Pfahlmantelreibung von Fertigrammpfählen nach Tab. 5.5 der EA Pfähle 2012 /U 40/	45
Tabelle 10: Abminderungsfaktoren bei Einsatz von Rammhilfen bei Rammpfählen (Erfahrungswerte)	46
Tabelle 11: Vorhandene Dammgeometrie	53
Tabelle 12: Ergebnisse Standsicherheitsberechnung	55

Abbildungen	Seite
Abbildung 1 – Übersichtsplan aus Onlinedienst BayernAtlas /U 23/	14
Abbildung 2 – Foto EÜ Entengraben, Blick Richtung Westen	15
Abbildung 3 – Foto Überwerfungsbauwerk und Stützwand Süd, Blick Richtung Norden	15
Abbildung 4 – Längsschnitt EÜ Entengraben und Überwerfungsbauwerk aus /U 11/	16
Abbildung 5 – Ansicht Stützwand Süd aus /U 12/	17
Abbildung 6 – Auszug aus der digitalen Geologischen Karte von Bayern /U 24/	18
Abbildung 7 – Auszug aus der Quartärmächtigkeitskarte, Grundwasserbericht 2017, Stadt Nürnberg, Anlage C /U 28/	18
Abbildung 8 – Auszug aus der Grundwassergleichenkarte, Grundwasserbericht 2023, Stadt Nürnberg, Anlage 1 /U 29/	21
Abbildung 9 – Ganglinie Grundwassermessstelle BS6, Zeitraum Juli 2015 bis Mai 2019	23
Abbildung 10 – Ganglinie Grundwassermessstelle BS6, Zeitraum August bis Dezember 2023	24
Abbildung 11 – Ganglinie Grundwassermessstelle GWM_N0223, Zeitraum September 2012 bis August 2023	24
Abbildung 12 – Hochwassergefahrenflächen HQ100 und HQextrem, Auszug aus UmweltAtlas Bayern /U 24/	27
Abbildung 13 – Bettungsspannungen ständige Lasten aus E-Mail /U 30/	38
Abbildung 14 – Bettungsspannungen ständige Lasten zzgl. veränderliche Lasten aus E-Mail /U 30/	39
Abbildung 15 – Hinterfüllung bei Strecken mit $v < 160$ km/h /U 34/	50
Abbildung 16 – Regelneigungen gemäß Bild 1 Ril 836.4102A01 /U 34/	51
Abbildung 17 – Höhenplan, Auszug aus Trassierungsentwurf /U 14/	53

Anlagen		Blatt
Anlage 1	Abkürzungsverzeichnis	1
Anlage 2	Lageplan	1
Anlage 3	Bohr- und Sondierprofile	2
Anlage 4	Schichtenverzeichnisse, Sondierdiagramme, Messstellenausbau	59
Anlage 5	Bohrkernfotos	11
Anlage 6	Laborversuche – Bodenmechanik	72
Anlage 7	Laborversuche – Chemie	16
Anlage 8	Grundbruch- und Setzungsberechnungen	3
Anlage 9	Vordimensionierung Wasserhaltung	2
Anlage 10	Stand sicherheitsberechnungen Dämme	8
Anlage 11	Homogenbereiche Einleitung	



## **1.1 Unterlagen**

Zur Ausarbeitung dieses Berichtes standen folgende Unterlagen zu Verfügung:

- /U 1/ Angebot OP-23-55423 Erkundung EÜ Entengraben / Kreuzungsbauwerk der DB Engineering & Consulting GmbH, Umwelt und Geo-Services, Region Süd, Geotechnik, Büro München, vom 10.03.2023.
- /U 2/ Nachtragsangebot OP-24-76807 Erkundung EÜ Entengraben / Kreuzungsbauwerk der DB Engineering & Consulting GmbH, Umwelt und Geo-Services, Region Süd, Geotechnik, Büro München, vom 14.05.2024.
- /U 3/ Leistungsvereinbarung LEIV Nr. ILV-AG0016-24015186-N01 der DB InfraGO AG, I.II-S-N-K, Sandstraße 38 - 40, Nürnberg, mit der DB Engineering & Consulting GmbH (I.TV-S-U-T 1), München, vom 07.06.2024.
- /U 4/ Bahnhofs- und Streckenpläne (IvI), Maßstab 1 : 1.000, DB Netz AG I.NA-S-I(D), Nürnberg, Abruf vom 20.10.2023.
- /U 5/ Vermessungsplan EÜ Entengraben, Maßstab 1 : 250, DB ProjektBau GmbH Süd, ohne Datum.
- /U 6/ Profile 5 - 9 und 11 - 12, Str.: 5320 Treuchtlingen - Nürnberg, Achse Gleis Treuchtlingen - Nürnberg, Maßstab 1 : 100/100, DB ProjektBau GmbH Süd, Nürnberg, vom 04.07.2016.
- /U 7/ Bestandsplan EÜ Entengraben km 54,409 und Überwerfungsbauwerk km 54,410, intermetric Gesellschaft für Ingenieurmessung und raumbezogene Informationssysteme mbH, Dresden, vom 10.01.2020.
- /U 8/ Bestandsplan EÜ Entengraben, km 54,3 - 54,6, Maßstab 1 : 500, intermetric Gesellschaft für Ingenieurmessung und raumbezogene Informationssysteme mbH, Dresden, vom 11.06.2024.
- /U 9/ Querprofile km 54,2+42.59, km 54,2+87.67, km 54,3+32.48, 54,4+64.57, km 54,5+21.22, 54,5+77.20, Maßstab 1 : 100, intermetric Gesellschaft für Ingenieurmessung und raumbezogene Informationssysteme mbH, Dresden, vom 06.06.2024.
- /U 10/ Bauwerksplan - Grundriss, Maßstab 1 : 100, Grassl Beratende Ingenieure Bauwesen, München, vom Juli 2023.
- /U 11/ Bauwerksplan - Schnitte, Maßstab 1 : 100, 1 : 50, Grassl Beratende Ingenieure Bauwesen, München, vom Juli 2023.
- /U 12/ Bauwerksplan - Stützwand Süd, Maßstab 1 : 100, 1 : 50, Grassl Beratende Ingenieure Bauwesen, München, vom Juli 2023.



- /U 13/Baustelleneinrichtungsplan, Maßstab 1 : 1.000, 1 : 50, Grassl Beratende Ingenieure Bauwesen, München, vom Juli 2023.
- /U 14/Trassierungsentwurf 5320 Treuchtlingen – Nürnberg Hbf, Erneuerung Kreuzungsbauwerk km 54,4+4, Maßstab d. L. 1 : 1000 DB InfraGO Region Süd, vom 16.02.2024
- /U 15/ Geotechnischer Bericht, EÜ Entengraben + Überwerfungsbauwerk, Erneuerung von 2 Brückenbauwerken, Treuchtlingen – Nürnberg Hbf, Strecke 5320: km 54,409 und 54,410, DB ProjektBau GmbH, München, vom 11.06.2015
- /U 16/Gutachterliche Stellungnahme zur Standsicherheit der Böschungen, Strecke 5320, Treuchtlingen – Nürnberg, ÜW Entengraben und Böschungen im Bereich von km 54,2+00 bis 54,5+75, Dr.-Ing. Lutz Vogt, EBA-Gutachter, Sachgebiet Geotechnik, c/o Baugrund Dresden, Dresden, vom 02.09.2016.
- /U 17/Geotechnischer Bericht (überarbeitete Fassung), EÜ Entengraben + Überwerfungsbauwerk, Erneuerung von 2 Brückenbauwerken, Treuchtlingen – Nürnberg Hbf, Strecke 5320: Km 54,409 und km 54,410, DB Engineering & Consulting GmbH, Regionalbereich Süd – Planung, I.TP-S-P-MÜ(V), München, vom 08.11.2016.
- /U 18/Geo- und Umwelttechnischer Bericht, EÜ Entengraben, Strecke 5320: km 54,409, gbm Gesellschaft für Baugeologie und -meßtechnik mbh, Garching, vom 06.06.2019.
- /U 19/Erläuterungsbericht Wasserhaltung EÜ Überwerfungsbauwerk / EÜ Entengraben, Nürnberg-Reichelsdorf, BGD ECOSAX GmbH, Dresden, vom 12.09.2019.
- /U 20/Stellungnahme EÜ Entengraben / Überwerfungsbauwerk – Flachgründung, U-SD02012, DB Engineering & Consulting GmbH, Umwelt & Geo-Services (I.TD-S-U-(T), vom 05.04.2023.
- /U 21/Vorplanung – Hydrogeologischer Bericht, EÜ Entengraben Str. 5320 km 54,410, Projektnummer U-SD02012, DB Engineering & Consulting GmbH, Umwelt & Geo-Services (I.TD-S-U-T1), vom 14.02.2024.
- /U 22/Geotechnische Stellungnahme, Standsicherheit Dämme Neubaubereich und Anschlussdämme, Projektnummer U-SD02012, DB Engineering & Consulting GmbH, Umwelt & Geo-Services (I.TD-S-U-T1), vom 19.02.2024.
- /U 23/BayernAtlas, Onlinedienst des Landesamtes für Digitalisierung, Breitband und Vermessung: <https://geoportal.bayern.de/bayernatlas/>, abgerufen am 19.12.2023.
- /U 24/UmweltAtlas, Onlinedienst Bayrisches Landesamt für Umwelt: [www.umweltatlas.bayern.de](http://www.umweltatlas.bayern.de), abgerufen am 17.04.2024.
- /U 25/GNRailNav, Version 4.42, bereitgestellt durch Geo++: [https://db.geopp.de/gnrailnav\\_servlet/GNOpenLayersV3](https://db.geopp.de/gnrailnav_servlet/GNOpenLayersV3), abgerufen am 17.04.2024.

- /U 26/Online-Erdbebenzonenkarte des GeoForschungsZentrums (Helmholtz-Zentrum Potsdam), [https://www.gfz-potsdam.de/din4149\\_erdbebenzonenabfrage](https://www.gfz-potsdam.de/din4149_erdbebenzonenabfrage), abgerufen am 17.04.2024.
- /U 27/Karte der Frosteinwirkungszonen, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Juli 2012.
- /U 28/Grundwasserbericht 2017, Stadt Nürnberg, Referat für Umwelt und Gesundheit, 09.2018.
- /U 29/Grundwasserbericht 2023, Stadt Nürnberg, Referat für Umwelt und Gesundheit, 09.2023.
- /U 30/E-Mail M22302 EÜ Entengraben - Anfrage Lastangaben, Ingenieurbüro Grassl GmbH, 26.06.2024
- /U 31/ Programm „Hydrotec 7.5.2.0 Pro“, GeoLogik Software, Braunfels 2016.
- /U 32/Eurocode 7, DIN EN 1997-1: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik – Teil 1: Allgemeine Regeln, Deutsches Institut für Normung e.V., 1997.
- /U 33/DIN 1054, Baugrund – Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau - Ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-1, April 2021.
- /U 34/Handbuch 83601: Erdbauwerke und sonstige geotechnische Bauwerke planen, bauen und instand halten, 8. Aktualisierung, 01.05.2022.
- /U 35/ZTV E-StB 17 Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau, FGSV, Ausgabe 2017
- /U 36/DIN 4084, Baugrund – Geländebruchberechnungen, November 2021.
- /U 37/DIN 4019, Baugrund – Setzungsberechnungen, Mai 2015.
- /U 38/DWA-A 138 - Planung, Bau und Betrieb von Anlagen zur Versickerung von Niederschlagswasser, März 2006
- /U 39/Empfehlungen des Arbeitskreises „Baugruben“ (EAB), Deutsche Gesellschaft für Geotechnik, 6. Auflage, April 2021
- /U 40/Empfehlungen des Arbeitskreises „Pfähle“ (EA Pfähle), Deutsche Gesellschaft für Geotechnik, 2. Auflage, Januar 2012
- /U 41/GGU STABILITY, Version 14.19, GGU-Software, Stand 11.03.2024.
- /U 42/GGU SETTLE, Version 7.01, GGU-Software, Stand 09.02.2024.
- /U 43/GGU FOOTING, Version 10.08, GGU-Software, Stand 11.03.2024.
- /U 44/GGU DRAWDOWN, Version 5.06, GGU-Software, Stand 11.04.2024

Außerdem kommen die gegenwärtig gültigen Normen und Vorschriften des Erd- und Grundbaus zur Anwendung.

## 1.2 Vorgang / Aufgabenstellung

Die DB InfraGO AG (I.II-S-N-K) beauftragte die DB Engineering & Consulting GmbH, Umwelt und Geo-Services, Region Süd, Geotechnik, Büro München, mit Leistungsvereinbarung vom 07.06.2024 /U 3/ mit Geotechnischen Beratungsleistungen im Zuge der Entwurfs- und Genehmigungsplanung (Lph 3/4).

Für den Neubau der Bauwerke EÜ Entengraben km 54,409 und Überwerfungsbauwerk km 54,410 liegen Geotechnische Berichte der DB Engineering & Consulting GmbH (/U 15/ und /U 17/), eine Gutachterliche Stellungnahme zu den Bestandsböschungen vom EBA Sachverständigen Dr.-Ing. Lutz Vogt /U 16/ sowie ein Bericht des Büros gbm /U 18/ vor. Zur Fragestellung der Möglichkeit einer Flachgründung des Neubaus auf Grundlage des Geotechnischen Berichts /U 15/ wurde durch uns die Stellungnahme /U 20/ erstellt. Zu hydrogeologischen Fragestellungen wurde im Bericht /U 21/ Stellung genommen und zur Standsicherheit der Anschlussdämme in der Geotechnischen Stellungnahme /U 22/.

Der vorliegende Bericht stellt die bisherigen Untersuchungsergebnisse in einem Geotechnischen Bericht zusammen und macht Empfehlungen für die Gründung und Bauausführung der Bauwerke für den Planstand der Leistungsphasen 3/4.

Der vorliegende Bericht ersetzt die bisherigen Berichte und Stellungnahmen der DB Engineering & Consulting GmbH, Umwelt und Geo-Services, Region Süd, Geotechnik, Büro München.

## 1.3 Aufschlussarbeiten / Laboruntersuchungen

Zur Beurteilung der Baugrundverhältnisse im Bereich der EÜs stehen Aufschlüsse zur Verfügung, welche im Zuge der Erstellung der Berichte /U 15/ und /U 17/ sowie /U 21/ und /U 22/ ausgeführt wurden. In Tabelle 1 sind die für den aktuellen Bericht verwendeten Aufschlüsse hinsichtlich Lage, Ansatzhöhe und Aufschlusstiefe zusammengestellt:

Tabelle 1: Aufschlüsse

Tabelle 1: Aufschlüsse						
Aufschluss	Datum	Lage GK bzw. DB Ref		Ansatz- höhe [m NHN]	Aufschlusstiefe	
		Rechtswert	Hochwert		[m u. AP]	[m NHN]
aus /U 15/ und /U 17/						
BK1	16.12.2014	4430489,90	5473087,45	309,82	15,00	294,82
BK2	16.12.2014	4430494,98	5473100,71	309,83	18,00	291,83
BK3	14.12.2014	4430489,08	5473071,13	316,80	25,30	291,50
BK DPH 3	12.12.2014				13,00	303,80
BK4	14.12.2014	4430493,94	5473117,77	316,79	16,30	300,49
BK DPH 4	13.12.2014				10,00	306,79

Aufschluss	Datum	Lage GK bzw. DB Ref		Ansatz- höhe [m NHN]	Aufschlusstiefe	
		Rechtswert	Hochwert		[m u. AP]	[m NHN]
BS 1	16.12.2014	4430472,64	5473033,30	310,15	9,20	300,95
BS DPH 1	15.12.2014				6,00	304,15
BS 2	16.12.2014	4430480,33	5473058,81	309,89	10,00	299,89
BS DPH 2	15.12.2014				0,60	309,29
BS 4	16.12.2014	4430484,68	5473082,11	309,88	10,00	299,88
BS DPH 4	15.12.2014				10,00	299,88
BS 6 (GWM)	16.12.2014	4430498,11	5473093,64	309,61	10,00	299,61
BS DPH 6	16.12.2014				10,0	299,61
BS 9	14.12.2014	4430508,64	5473148,53	310,07	6,00	304,07
BD DPH 9	14.12.2019				6,00	304,07
BS 10	12.12.2014	4430485,87	5473046,78	316,48	10,00	306,48
BS DPH 10	12.12.2014				10,00	306,48
BS 11	13.12.2014	4430495,22	5473135,81	316,67	10,00	306,67
BS DPH 11	14.12.2014				10,00	306,67
BS 20/16	07.06.2016	- 1)	- 1)	310,13	8,00	302,13
DPH 20/16					8,00	302,13
BS 25/16	07.06.2016	- 1)	- 1)	309,88	9,00	300,88
DPL 25/16					9,70	300,18
BS 27/16	08.06.2016	- 1)	- 1)	309,87	9,00	300,87
DPL 27/16					5,80	304,17
BS 31/16	06.07.2016	- 1)	- 1)	-	6,32	- 2)
DPL 31/16					6,40	
BS 32/16	06.07.2016	- 1)	- 1)	-	8,79	- 2)
DPL 32/16					7,50	
BS 35/16	05.07.2016	- 1)	- 1)	-	7,20	- 2)
DPL-5 35/16					6,90	
BS 44/16	07.06.2016	- 1)	- 1)	311,54	4,00	307,54
DPH 44/16					5,80	305,74
BS 45/16	-	- 1)	- 1)	310,15	2,00	308,15
DPH 45/16					2,00	308,15
BS 46/16	28.04.2016	- 1)	- 1)	311,09	4,00	307,09
DPH 46/16					3,00	308,09
BS 48/16	28.04.2016	- 1)	- 1)	309,64	2,00	307,64
DPH 48/16					2,00	307,64
aus /U 21/ und /U 22/						
KRB1	10.05.2023	4430524,86	5473163,84	309,51	10,00	299,51
DPH1					10,50	299,01
KRB2	10.05.2023	4430515,53	5473170,49	309,49	10,00	299,49
DPH2					9,50	299,99
KRB3	11.09.2023	4430502,97	5473172,74	315,55	9,30	306,25

Aufschluss	Datum	Lage GK bzw. DB Ref		Ansatz- höhe [m NHN]	Aufschlusstiefe	
		Rechtswert	Hochwert		[m u. AP]	[m NHN]
DPH3					12,00	303,55
KRB5	13.09.2023	4430467,01	5473033,06	310,00	6,30	303,70
DPH5	12.09.2023				9,10	301,90
KRB6	13.09.2023	4430474,62	5473027,98	310,34	6,80	303,54
KRB7	12.09.2023	4430479,84	5473026,95	316,25	7,60	308,65
DPH7	11.09.2023				8,60	307,65
RFP1 (GWM)	10.05.2023	4430520,00	5473138,38	309,42	7,00	302,42
RFP2 (GWM)	11.05.2023	4430512,54	5473171,23	309,49	7,00	302,49

BK: Kernbohrung

BS/KRB: Kleinrammbohrung

RFP: Rammfilterpegel

DPH: Schwere Rammsondierung

DPL: Leichte Rammsondierung (Spitzenquerschnitt 10 cm²)

(GWM): Grundwassermessstelle

<sup>1)</sup> in /U 17/ keine Koordinaten vorhanden, Lage aus Lageplan entnommen<sup>2)</sup> in /U 17/ keine Höhe vorhanden, Geländehöhe nach Vermessungsplan /U 8/ abgeschätzt

In den Bohrungen BK2, BK3 und BK4 wurden Bohrlochrammsondierungen (Standard Penetration Tests) durchgeführt.

Die Lage der Aufschlussansatzpunkte ist in Anlage 2 dargestellt. Die Baugrund- und Sondierprofile sind bezogen auf die Lage und Höhe in Anlage 3 aufgetragen. In Anlage 4 sind die Schichtenverzeichnisse und Sondierdiagramme, in Anlage 5 die Bohrkernfotos aus /U 17/ zusammengestellt. Es liegen folgende bodenmechanischen Laboruntersuchungen vor:

aus /U 17/ (nur teilweise verwendet)

- 25 x Nass- und Trockensiebung nach DIN 18123
- 8 x kombinierte Sieb-/Schlämmanalyse nach DIN 18123
- 6 x natürlicher Wassergehalt nach DIN EN ISO 17892-1
- 2 x Bestimmung der Konsistenzgrenzen nach DIN 18122-1
- 6 x Dichtebestimmung nach DIN 18125
- 4 x Bestimmung Korndichte nach DIN 18124
- 7 x Kompressionsversuch nach DIN 18135
- 4 x Rahmenscherversuch nach DIN 18137-3

aus /U 22/

- 9 x Nass- und Trockensiebung nach DIN EN ISO 17892-4
- 1 x Bestimmung der Konsistenzgrenzen nach DIN EN ISO 17892-12

Die Prüfberichte aus /U 17/ und /U 22/ sind der Anlage 6 zu entnehmen.

## 2 Darstellung / Bewertung der Untersuchungsergebnisse

### 2.1 Beschreibung der örtlichen Verhältnisse

Die DB InfraGO AG plant an der Strecke 5320 Nürnberg – Treuchtlingen die Erneuerung der Eisenbahnüberführungen Entengraben bei km 54,409 und Überwerfungsbauwerk bei km 54,410 im Süden von Nürnberg. Die Bauwerke befinden sich im Nürnberger Stadtteil Reichelsdorf, westlich des Hafengebietes und östlich der Walter-Flex-Straße, siehe Abbildung 1.



Abbildung 1 – Übersichtsplan aus Onlinedienst BayernAtlas /U 23/

Die Geländeoberkante fällt großflächig leicht nach Westen zum Rednitztal hin ab. Das Bahngelände, der im Osten parallel dazu verlaufende Frankenschnellweg (Kreisstraße N4) sowie das Hafengelände sind geprägt durch künstliche Auffüllungen und Straßen- bzw. Bahndämme.

Die EÜ Entengraben überführt die Strecke 5320 über den Entengraben. Darüber befindet sich die EÜ Überwerfungsbauwerk, auf der das Gleis in Richtung Nürnberg über das Gleis in Richtung Treuchtlingen geführt wird. Es handelt sich dabei nach Angaben in /U 17/ um Bauwerke aus dem Jahr 1907.

Nach /U 17/ besitzt die EÜ Entengraben eine lichte Weite von 4,00 m und eine lichte Höhe von 1,54 m. Die Widerlager sind als flach gegründete Betonschergewichtsmauern beidseits des Entengrabens ausgebildet. Die Gründungssohlen befinden sich auf ca. 306,00 müNN.





Abbildung 2 – Foto EÜ Entengraben, Blick Richtung Westen

Das vorhandene Überwerfungsbauwerk weist nach Angaben in /U 17/ eine Breite von 7,92 m und ein Lichtraumprofil von 5,65 m auf. Es gründet flach auf ca. 308,00 müNN. An das Überwerfungsbauwerk schließen im Norden und Süden Stützwände an, die den Höhenprung zum Damm des hochliegenden Gleises sichern. Diese haben Längen von 34,90 m bzw. 34,85 m und Höhen von ca. 0,45 m bis 6,74 m und gründen ebenfalls flach auf ca. 308,00 müNN.



Abbildung 3 – Foto Überwerfungsbauwerk und Stützwand Süd, Blick Richtung Norden



## 2.2 Neubau

### 2.2.1 Bauwerke

Die Ersatzneubauten sollen an gleicher Stelle wie der Bestand errichtet werden. Die EÜ Entengraben wird nach /U 10/ und /U 11/ in das Überwerfungsbauwerk integriert, siehe nachfolgenden Längsschnitt aus /U 11/:

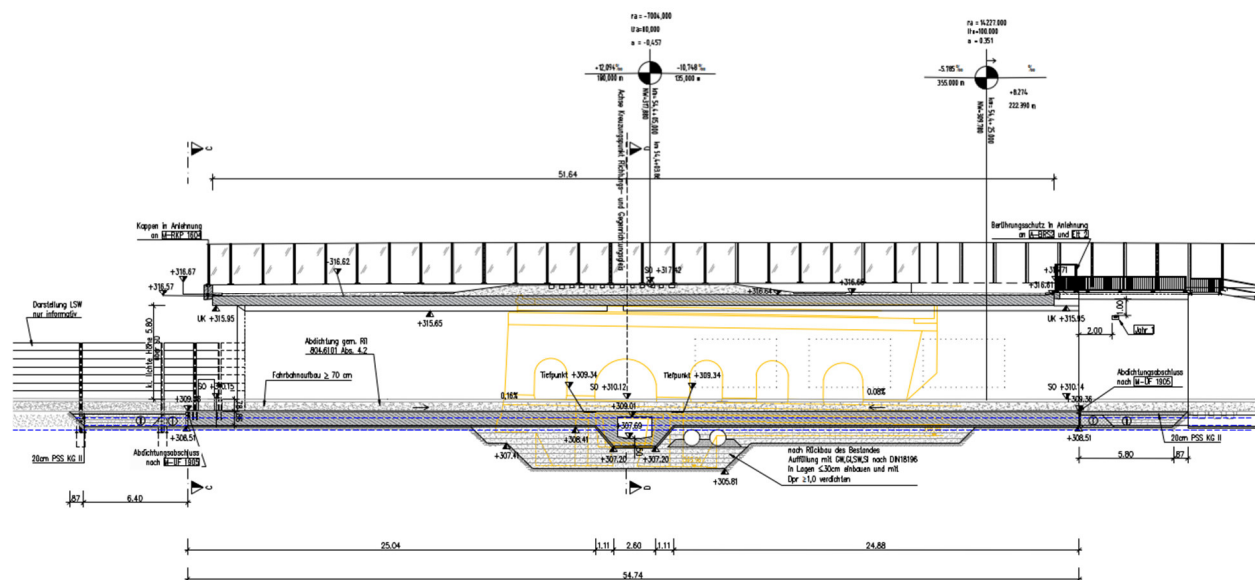


Abbildung 4 – Längsschnitt EÜ Entengraben und Überwerfungsbauwerk aus /U 11/

Die Bauwerke sind als Stahlbetonrahmen geplant und erhalten nach /U 10/ und /U 11/ die nachfolgenden geometrischen Abmessungen:

EÜ Entengraben

- Stützweite ( $\angle$ ) 2,35 m
- Lichte Weite 2,10 m
- Kleinste lichte Höhe 1,32 m
- Kreuzungswinkel 107,6 gon
- Gerinnesohle 307,69 m NHN

## EÜ Überwerfungsbauwerk

- Stützweite (△) 7,63 m
- Lichte Weite 6,63 m
- Kleinste lichte Höhe 6,57 m
- Kreuzungswinkel 184,36 gon
- Breite zwischen Geländern 7,21 m (variabel)
- Oberkante Bodenplatte 309,34 m NHN
- Länge Unterbau 69,27 m

Die Schienenoberkante befindet sich nach /U 11/ in der Hochlage auf dem Überwerfungsbauwerk auf rd. 317,41 bis 317,43 m NHN und in der Tieflage auf rd. 310,14 bis 310,15 m NHN.

Die im Norden und Süden anschließenden Stützwände sind als Winkelstützwände geplant. Die Stützwand Süd erhält nach /U 12/ eine Länge von 43,48 m und eine Höhe von bis 7,49 m. Für die Stützwand Nord liegen zum Zeitpunkt der Berichterstellung keine Planunterlagen vor.

Ansicht Stützwand Süd M 1:100

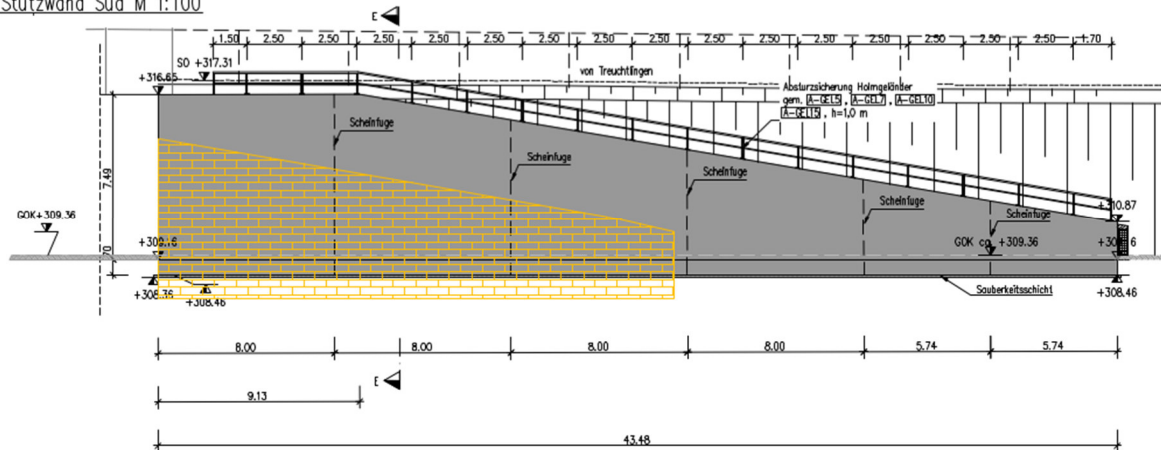


Abbildung 5 – Ansicht Stützwand Süd aus /U 12/

### 2.2.2 Anschlussdämme

Im Zuge der Maßnahme wird nach /U 14/ die Gradiente der Anschlussdämme (Richtungsgleis Nürnberg, Hochlage) zwischen km 54,070 und km 54,540 um bis zu 41 cm (am Kreuzungsbauwerk) angehoben.

Die Bestandsdämme weisen nach den vorliegenden Unterlagen /U 5/ bis /U 9/ zwischen km 54,070 und km 54,540 Höhen von etwa 2,0 m bis 7,0 m und Böschungsneigungen von etwa 1 : 1,3 bis 1 : 2,6 auf.

## 2.3 Geologie

Die digitale Geologische Karte von Bayern (Maßstab 1 : 25.000) /U 24/ zeigt für den Bereich des Bauvorhabens pleistozäne bis holozäne, polygenetische oder fluviatile Talfüllungen. Nach Süden hin sind pleistozäne Flugsande verzeichnet, nach Osten pleistozäne Flussschotter. Die quartären Sedimente werden von Sandsteinen mit Lettenlagen aus dem mittleren Keuper, unterlagert, die dem Blasensandstein  $k_{Bl}$  zuzurechnen sind. Die Keuperschichten sind an der Oberkante zu Lockergestein, Sand oder Ton, verwittert. Das Projektgebiet

befindet sich im Bereich einer Urrinne der Rednitz mit besonders großer Quartärmächtigkeit bis zu 10 m, siehe Auszug aus der Quartärmächtigkeitskarte im Grundwasserbericht 2017 der Stadt Nürnberg /U 28/ (Abbildung 7).

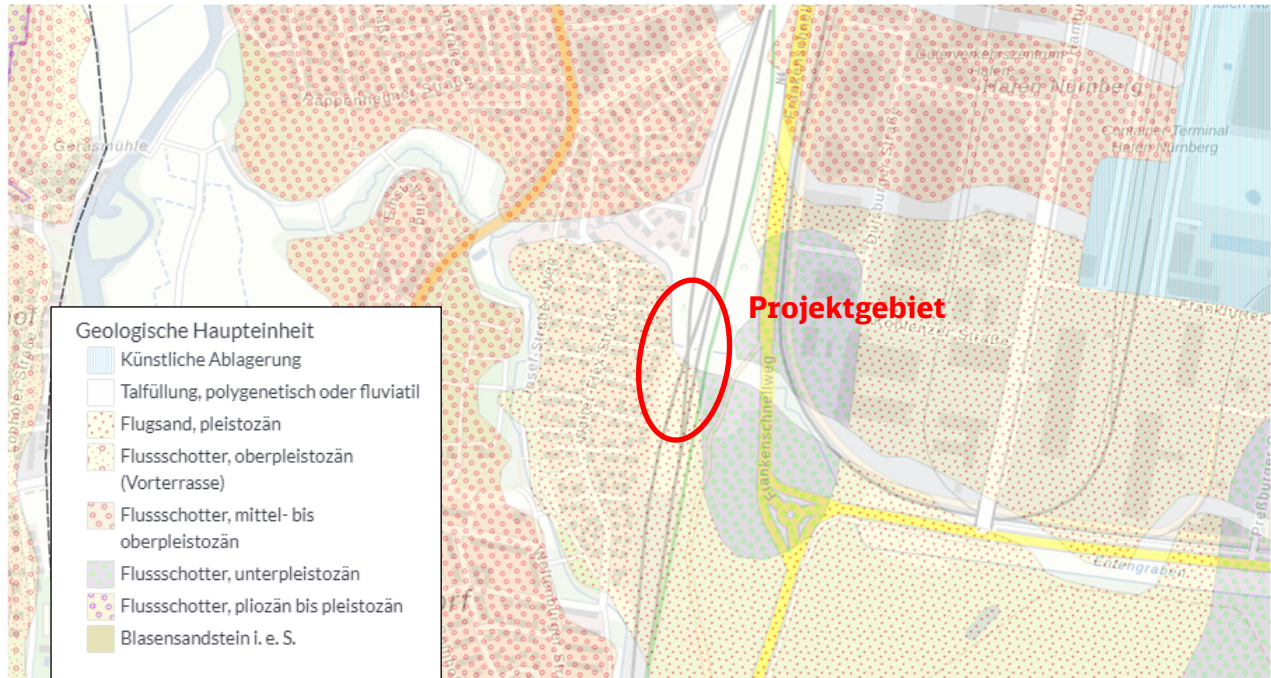


Abbildung 6 – Auszug aus der digitalen Geologischen Karte von Bayern /U 24/

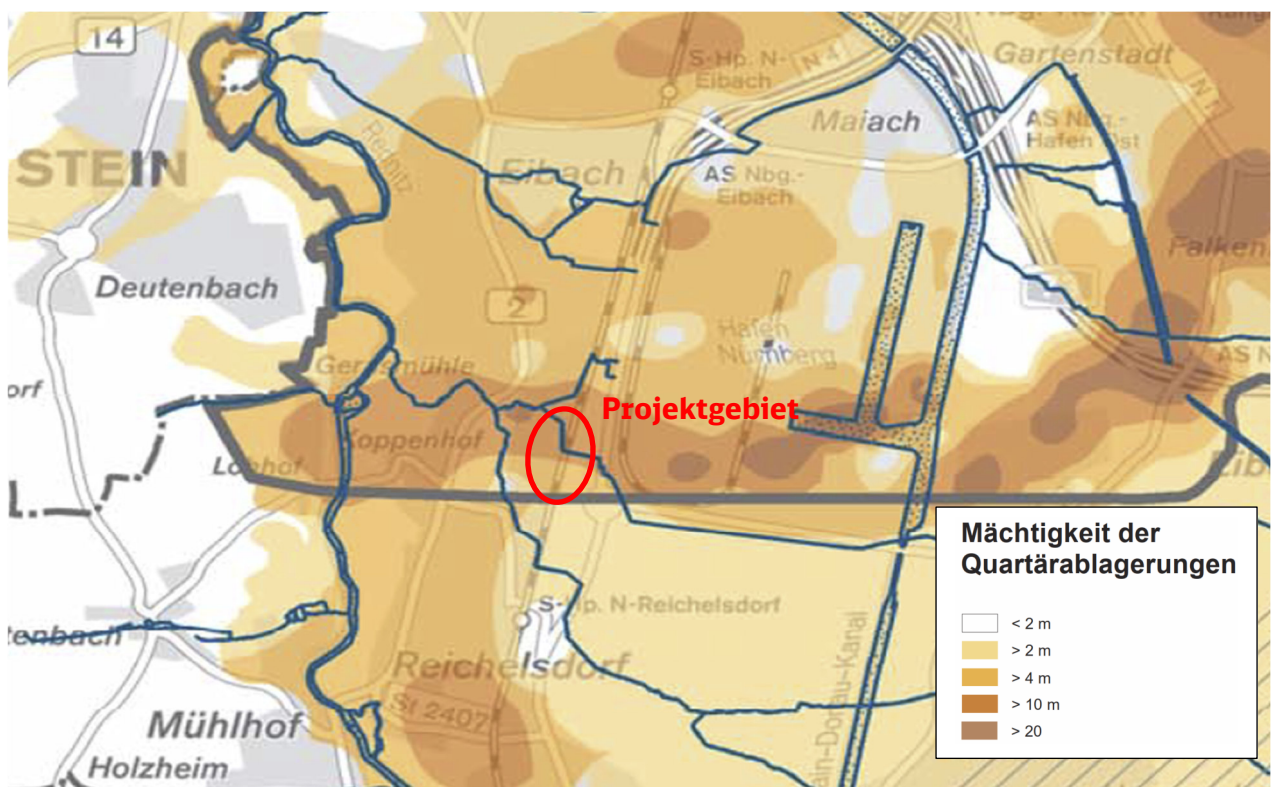


Abbildung 7 – Auszug aus der Quartärmächtigkeitskarte, Grundwasserbericht 2017, Stadt Nürnberg, Anlage C /U 28/

Durch die bestehenden Bahnanlagen ist in allen Bereichen mit anthropogenen Auffüllungen bzw. Bodenveränderungen zu rechnen.

Die anhand der Literatur zu erwartenden Untergrundverhältnisse wurden durch die Baugrundaufschlüsse bestätigt.

## **2.4 Erkundete Baugrundverhältnisse**

Zur Beurteilung der Baugrundverhältnisse werden die in Tabelle 1 zusammengestellten Bestandsaufschlüsse herangezogen. Aus den vorliegenden Untersuchungsergebnissen ergeben sich in Zusammenschau mit den Berichten /U 17/ und /U 22/ folgende Untergrundverhältnisse:

### **Gleisschotter und Packlagen**

Gleisschotter wurde nach /U 17/ in den Bohrungen BK3 und BK4 sowie auch in Schürfen, die im vorliegenden Bericht nicht aufgeführt sind, aufgeschlossen. Im Bereich der Gleishochlage (Richtungsgleis Nürnberg) weist der Gleisschotter eine Stärke von rd. 0,6 bis über 2,5 m auf (vgl. Bohrung BK4). Demnach ist im Dammbereich mit Schottersäcken zu rechnen. In Tieflage (Richtungsgleis Treuchtlingen) wurden unter der 45 bis 62 cm dicken Gleisschotterschicht eine etwa 20 bis 40 cm mächtige Packlagen aus blockigem Material (BK1, BK2) angetroffen. Die Packlage besteht nach /U 17/ aus einer Art blockiger Festgesteinspflasterung (zumeist Kalkstein), dessen Zwischenräume mit einer feinkörnigen Matrix mit halbfester und fester Konsistenz verfüllt sind.

### **Auffüllung Dämme**

Die Dämme sind heterogen zusammengesetzt. Überwiegend bestehen diese aus eng- und weitgestuften Sanden [SE, SU, ST, SU\*, ST\*]. Bereichsweise sind auch leicht bis ausgeprägt plastische Tone und Schluffe [TL, TM, TA, UL, UM] mit steifer und halbfester Konsistenz sowie nicht bindige, schwach bindige und bindige Kiese [GE, GI, GW, GU, GU\*] vorhanden. Die Lagerungsdichte der nicht bindigen Böden kann mit überwiegend locker, teilweise locker bis mitteldicht, teilweise sehr locker angegeben werden.

### **Auffüllungen (außerhalb Bahndämme)**

Außerhalb der Bahndämme bzw. -anlagen zeigen sich zuoberst unter dem Oberboden überwiegend aufgefüllte Sande mit wechselnden Feinkornanteilen [SE, SU, SU\*, ST\*]. Die Auffüllungen ähneln oft den anstehenden Böden und lassen sich von diesen nur schwer abgrenzen.



## **Quartäre Sande**

Unterhalb der anthropogenen Auffüllungen zeigen sich quartäre Sedimente in Form von überwiegend nicht bindigen und schwach bindigen, teilweise schwach feinkiesigen bis feinkiesigen Sanden (SE, SW, SU, ST). Vereinzelt können wenige cm-dünne Schluffbänder vorhanden sein. Die Sande sind überwiegend mittel- bis grobkörnig, untergeordnet auch feinkörnig und besitzen eine mitteldichte, mit der Tiefe teilweise mitteldichte bis dichte Lagerung. Örtlich weisen die Schlagzahlen (z. B. bei BS DPH9) auf eine nur lockere bis knapp mitteldichte Lagerung hin. Im Übergangsbereich von den anthropogenen Auffüllungen zu den Sanden wurden in den Rammsondierungen lokal deutliche Schlagzahlanstiege entsprechend einer dichten Lagerung festgestellt, die eventuell auf eine Nachverdichtung der Dammaufstandsfläche hindeuten. Eventuell wurde hier auch ein Bodenaustausch mit anstehendem Sandmaterial vorgenommen, der aufgrund der ähnlichen Zusammensetzung und Farbe organoleptisch nicht von den geogenen Böden unterschieden werden kann. Die quartären Sande reichen bis etwa 10 m unter Geländeoberkante am Dammfuß. An der Quartärbasis wurden oft dünne Steinlagen festgestellt.

## **Sandsteinersatz**

Ab etwa 10 m unter Gelände folgt zu schwach bindigen und bindigen, untergeordnet nicht bindigen Sanden (SU, ST, SU\*, ST\*, SE) verwitterter Sandstein. Teilweise sind Lagen aus mittel- oder ausgeprägt plastischen Tonen oder Schluffen (TM, UM, TA, UA) vorhanden. Die Sande weisen eine mindestens mitteldichte, mit der Tiefe dichte bis sehr dichte (siehe Ergebnisse Standard Penetration Tests) Lagerung auf. Stellenweise sind die Sande sandsteinartig verfestigt. Die Konsistenz der Tone bzw. Schluffe ist mindestens steif bzw. halbfest (eine breiig weiche Schicht in BK3 ist bohrtechnisch bedingt). Mit der Tiefe sind erfahrungsgemäß mindestens mürbe Sandsteine zu erwarten (bis Bohrendtiefe nicht aufgeschlossen).

## **2.5 Hydrogeologische / wasserwirtschaftliche Verhältnisse**

### **2.5.1 Allgemeines**

Der Entengraben gehört zu einem System von Bächen und Gräben, die den südlichen Bereich von Nürnberg oberflächennah in westlicher Richtung in die Vorflut, die Rednitz, entwässern. Der Entengraben entspringt im Wald westlich des Autobahnkreuzes Nürnberg-Süd, quert den Main-Donau-Kanal, verläuft entlang der Südseite des Hafengeländes und fließt dann in nordwestlicher Richtung zur Rednitz, in die der Entengraben nördlich Gerasmühle mündet. Der heutige Grabenverlauf wurde vermutlich im Zuge des Bahnbaus im 19. Jahrhundert künstlich angelegt. Nach der historischen Karte im Bayernatlas /U 23/ lag der ursprüngliche,

natürliche Bachlauf etwa 130 m nördlich des heutigen Grabens. Auch östlich des Projektgebiets wurde der Graben, vermutlich im Zuge des Hafenneubaus, nach Süden umverlegt. Der Entengraben ist östlich des Bauvorhabens im Bereich der S-Bahnstrecke und des Frankenschnellwegs verrohrt.

Im Projektgebiet treten als oberes Grundwasserstockwerk die Schichten des Sandsteinkeupers mit den darüber liegenden quartären Ablagerungen auf. Da beide Wasserleiter hydraulisch miteinander verbunden sind, werden sie zu einem Grundwasserstockwerk zusammengefasst.

Gemäß der „Grundwassergleichenkarte für mittlere Grundwasserstände“ im Grundwasserbericht 2023 der Stadt Nürnberg /U 29/ befindet sich der Grundwasserspiegel des obersten Grundwasserstockwerks im Projektgebiet bei rd. 308 m NHN, siehe Abbildung 8. Die Grundwasserfließrichtung ergibt sich nach der Karte von Südost bis Ost nach Nordwest bis West, Richtung Rednitz.

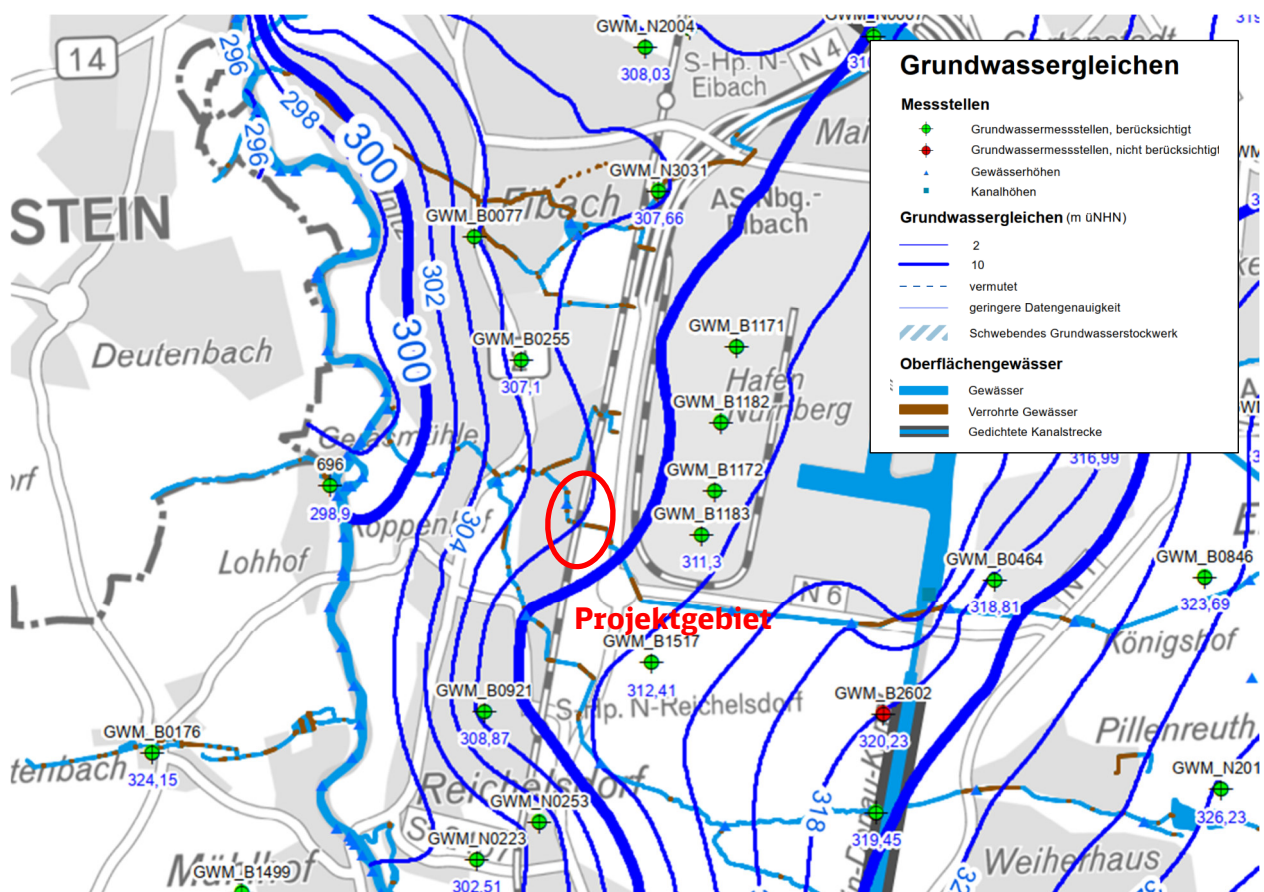


Abbildung 8 – Auszug aus der Grundwassergleichenkarte, Grundwasserbericht 2023, Stadt Nürnberg, Anlage 1 /U 29/

## 2.5.2 Erkundete Grundwasserstände

In den Schichtenverzeichnissen bzw. Bohrprofilen sind in /U 17/ und /U 22/ folgende Wasserstände für den Zeitpunkt der Baugrunduntersuchungen angegeben:

Tabelle 2: Erkundete Grundwasserstände

Aufschluss	Datum	Ansatzpunkt	Grundwasserstand		Bemerkung
		[m NHN]	[m unter AP]	[m NHN]	
BK1	16.12.2014	309,82	2,20	307,62	Ruhewasserstand
BK2	16.12.2014	309,83	2,00 2,20	307,83 307,63	Grundwasser angetroffen Ruhewasserstand
BK3	14.12.2014	316,80	8,00 9,50	308,80 307,30	Grundwasser angetroffen Ruhewasserstand
BK4	14.12.2014	316,79	9,80 10,40	306,99 306,39	Grundwasser angetroffen Ruhewasserstand
BS 1	16.12.2014	310,15	2,50 2,50	307,65 307,65	Grundwasser angetroffen Ruhewasserstand
BS 2	16.12.2014	309,89	2,00	307,89	Ruhewasserstand
BS 4	16.12.2014	309,88	2,50 2,50	307,38 307,38	Grundwasser angetroffen Ruhewasserstand
BS 6 (GWM)	16.12.2014	309,61	1,80 1,80	307,81 307,81	Grundwasser angetroffen Ruhewasserstand
BS 9	14.12.2014	310,07	2,40	307,77	Ruhewasserstand
BS 10	12.12.2014	316,48	-	-	kein Grundwasser
BS 11	13.12.2014	316,67	-	-	kein Grundwasser
BS 20/16	07.06.2016	310,13	1,93	308,20	Grundwasser nach Bohrende
BS 25/16	07.06.2016	309,88	1,75	308,13	Grundwasser nach Bohrende
BS 27/16	08.06.2016	309,87	1,90	307,97	Grundwasser nach Bohrende
BS 31/16	06.07.2016	-	-	-	kein Grundwasser
BS 32/16	06.07.2016	-	-	-	kein Grundwasser
BS 35/16	05.07.2016	-	3,26	-	Grundwasser nach Bohrende
BS 44/16	07.06.2016	-	2,60	-	Grundwasser nach Bohrende
BS 45/16	-	-	-	-	kein Grundwasser
BS 46/16	28.04.2016	311,09	3,25	307,84	Grundwasser nach Bohrende
BS 48/16	28.04.2016	309,64	1,60	308,04	Grundwasser nach Bohrende
KRB1	10.05.2023	309,51	2,00	307,51	Grundwasser angetroffen
KRB2	10.05.2023	309,49	1,83	307,66	Grundwasser angetroffen
KRB3	11.09.2023	315,55	-	-	kein Grundwasser einmessbar
KRB5	13.09.2023	310,00	-	-	kein Grundwasser einmessbar



Aufschluss	Datum	Ansatzpunkt	Grundwasserstand		Bemerkung
		[m NHN]	[m unter AP]	[m NHN]	
KRB6	13.09.2023	310,34	-	-	kein Grundwasser einmessbar
KRB7	12.09.2023	316,25	-	-	kein Grundwasser einmessbar
RFP1 (GWM)	10.05.2023	309,42	1,80	307,62	Grundwasser angetroffen
RFP2 (GWM)	11.05.2023	309,49	1,85	307,64	Grundwasser angetroffen

### 2.5.3 Grundwassermessstellen

Die Bohrung BS6 wurde 2014 als Grundwassermessstelle ausgebaut, siehe /U 17/. In die Messstelle wurde 2015 ein Datenlogger zur Aufzeichnung der Grundwasserstände eingebaut. Es liegen Messwerte für den Zeitraum von Juli 2015 bis Mai 2019 und August bis Dezember 2023 vor. Die Ganglinien zeigen die nachfolgenden Abbildungen 9 und 10.

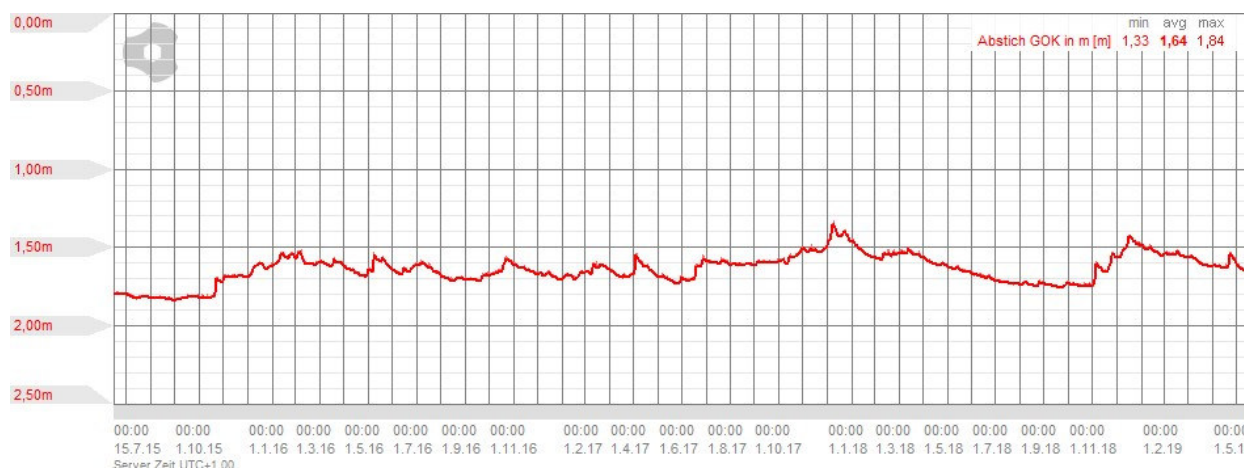


Abbildung 9 – Ganglinie Grundwassermessstelle BS6, Zeitraum Juli 2015 bis Mai 2019

Im Zeitraum Juli 2015 bis Mai 2019 wurden in der Messstelle BS6 Grundwasserspiegelhöhen zwischen 1,84 m und 1,33 m unter Geländeoberkante gemessen.

D. h. ausgehend von einer Geländehöhe bei BS6 von 309,61 m NHN ergeben sich Grundwasserspiegel zwischen 307,77 und 308,28 m NHN, ein Mittelwert von 307,97 m NHN und eine maximale Wasserspiegelschwankung von 0,61 m.

Ab August 2023 wurde der Datenlogger wieder in Betrieb genommen. Hierfür stehen bei Berichterstellung die folgenden Daten zur Verfügung, siehe Abbildung 10.

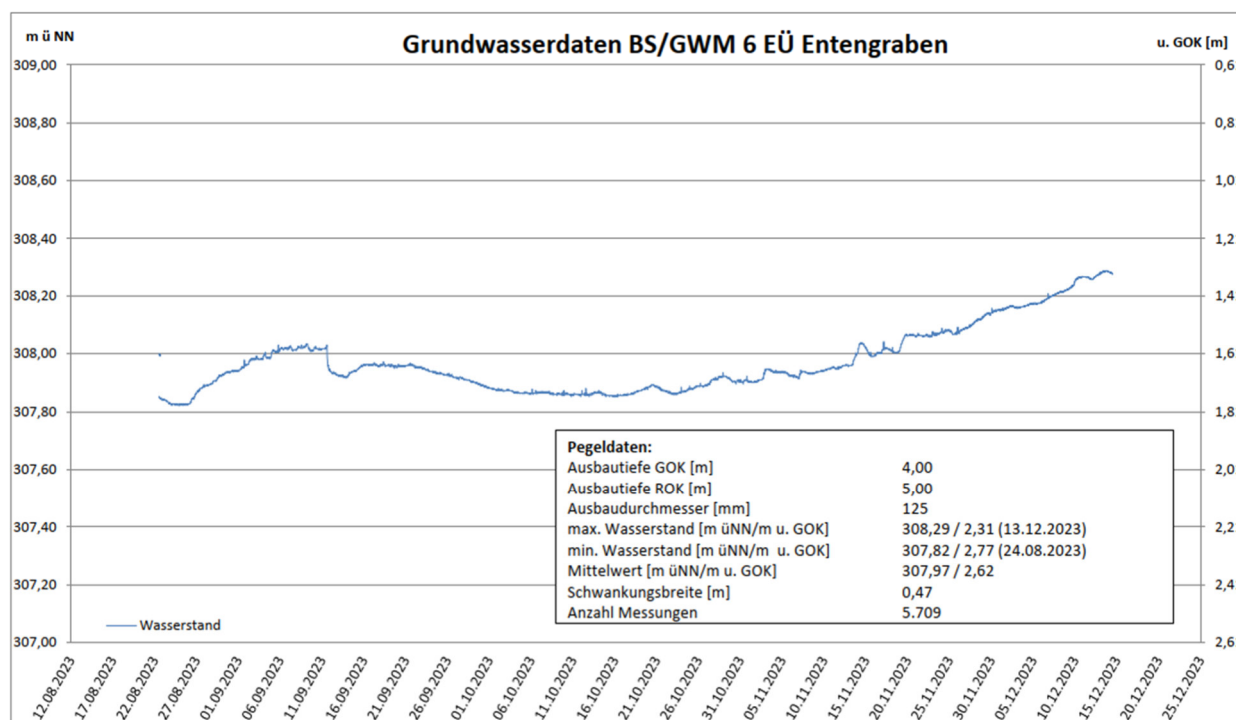


Abbildung 10 – Ganglinie Grundwassermessstelle BS6, Zeitraum August bis Dezember 2023

Im Zeitraum August bis Dezember 2023 wurden Grundwasserstände zwischen 307,82 und 308,29 m NHN ermittelt, der Mittelwert liegt bei 307,97 m NHN und die Schwankung bei 0,47 m.

Südwestlich des Bauvorhabens, in etwa 1,8 km Entfernung befindet sich an der Schalkhaußerstraße in Reichelsdorf die städtische Grundwassermessstelle GWM\_N0223, die ebenfalls in den quartären Sanden verfiltert ist.

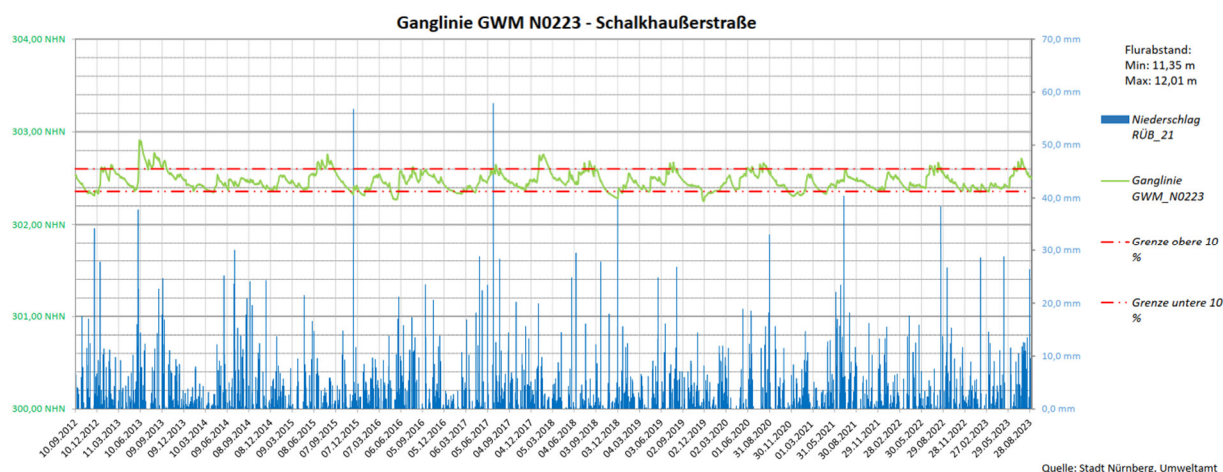


Abbildung 11 – Ganglinie Grundwassermessstelle GWM\_N0223, Zeitraum September 2012 bis August 2023

Für die Grundwassermessstelle wird über das Online-Portal der Stadt Nürnberg ([https://www.nuernberg.de/internet/umweltamt/gw\\_messprogramm.html](https://www.nuernberg.de/internet/umweltamt/gw_messprogramm.html)) eine Ganglinie für den Zeitraum September 2012 bis August 2023 zur Verfügung gestellt, siehe Abbildung 11. Die Grundwassermessstelle misst den Grundwasserspiegel im obersten, quartären Grundwasserstockwerk.

Im Beobachtungszeitraum zeigt sich eine Grundwasserspiegelschwankung um 0,66 m, d. h. ähnlich wie in der Messstelle BS6.

#### **2.5.4 Pumpversuch**

Gemäß /U 21/ wurde am 22.08.2023 durch die DB Engineering & Consulting GmbH, Umwelt & Geoservice in der Grundwassermessstelle BS6 ein Pumpversuch durchgeführt:

- Die Grundwassermessstelle BS6 besitzt einen Filterrohrdurchmesser DN40 und ist zwischen 2 und 4 m unter Gelände verfiltert.
- Der Ruhewasserspiegel vor Pumpbeginn lag bei 1,62 m unter Geländeoberkante (307,99 m NHN).
- Der Pumpversuch wurde über 6 Stunden mit einer gemittelten Förderrate von 0,833 l/s durchgeführt.
- Während des Pumpversuchs wurde der Wasserstand mittels Datenlogger kontinuierlich aufgezeichnet.
- Die maximale Absenkung betrug nach /U 21/ 1,09 m
- Die Absenkung des Pumpversuchs wurde nach THEIS hydraulisch mit der Software „Hydrotec“ /U 31/ ausgewertet.

Nach Beendigung des Pumpversuchs war innerhalb von wenigen Minuten ein Wiederanstieg auf das ungefähre Ausgangsniveau des Grundwasserspiegels vor dem Pumpversuch zu beobachten.

Die Versuchsergebnisse können im Detail /U 21/ entnommen werden.

Ziel des Versuchs war es, Informationen über die hydraulischen Eigenschaften des Grundwasserleiters zu erlangen. Im Ergebnis des Pumpversuchs und auf der Grundlage der Kenntnis der räumlichen Ausdehnung des Grundwasserleiters (Lage, Mächtigkeit, Begrenzungen) und weiteren Randbedingungen kann auf die Parameter:

- Transmissivität (T) [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]
- Durchlässigkeitsbeiwert ( $k_f$ ) [ $\text{m}/\text{s}$ ]

geschlossen werden.

Die Auswertung nach THEIS ergibt für die Transmissivität (T), den Durchlässigkeitsbeiwert ( $k_f$ ) und den Speicherkoeffizienten (S) folgende Ergebnisse:

Tabelle 3: Transmissivität (T), Durchlässigkeitsbeiwert (kf) und Speicherkoeffizient S

Bezeichnung/Auswertmethode	T [m <sup>2</sup> /s]	k <sub>f</sub> [m/s]	S
THEIS (Absenkung)	1,12*10 <sup>-3</sup>	1,03*10 <sup>-3</sup>	3,84*10 <sup>-6</sup>
THEIS (Wiederanstieg)	5,06*10 <sup>-3</sup>	4,64*10 <sup>-4</sup>	---
<b>Durchschnitt:</b>	3,09*10 <sup>-3</sup>	7,47*10 <sup>-4</sup>	3,84*10 <sup>-6</sup>

Die Auswertung des Speicherkoeffizienten ist aufgrund der zu geringen Entnahmemenge nicht aussagekräftig.

### 2.5.5 Wasserschutzgebiete

Das Projektgebiet liegt in keinem ausgewiesenen Trinkwasserschutzgebiet.

### 2.5.6 Überschwemmungsgebiete / Hochwasser

Südöstlich des Projektgebiets bzw. östlich der S-Bahnstrecke ist eine Hochwassergefahrenfläche HQ100 am Entengraben ausgewiesen, östlich des Frankenschnellwegs befindet sich das festgesetzte Überschwemmungsgebiet „Entengraben“.

Laut der Begrenzung des festgesetzten Überschwemmungsgebietes „Entengraben“ für ein Hochwasser HQ100 (gemäß /U 24/) tritt der Entengraben im Projektgebiet nicht über die Ufer, siehe Abbildung 13.

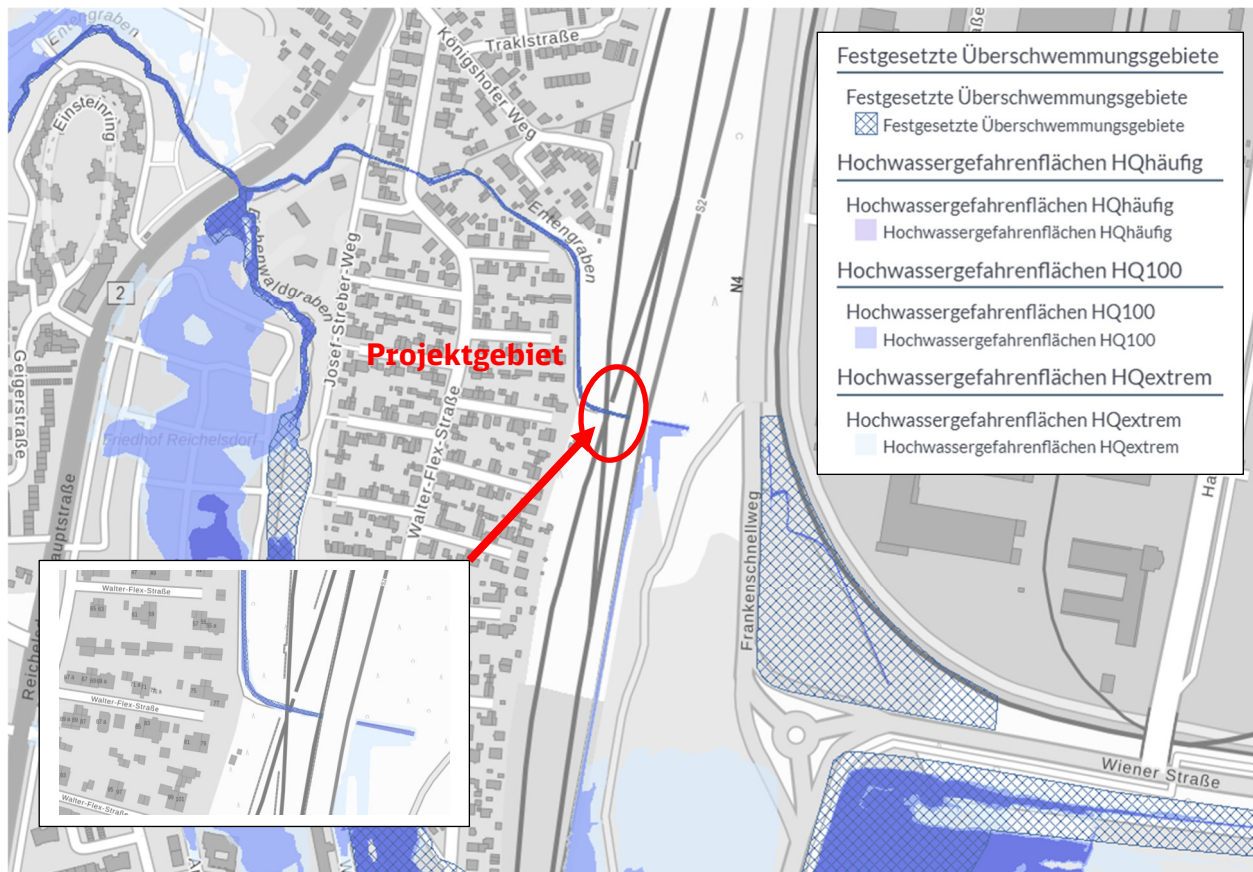


Abbildung 12 – Hochwassergefahrenflächen HQ100 und HQextrem, Auszug aus UmweltAtlas Bayern /U 24/

### 2.5.7 Bemessungswasserstände

Im Projektgebiet wurden im Zeitraum von Dezember 2014 bis Dezember 2023 im obersten Grundwasserstockwerk in den quartären Sanden Grundwasserstände zwischen etwa 307,6 und 308,3 m NHN gemessen, mit einem Mittelwert bei etwa 308,0 m NHN, siehe Kapitel 2.5.2 und 2.5.3. Dies entspricht einer Schwankung des Grundwasserspiegels um etwa 0,7 m. Dies entspricht ebenso etwa dem Schwankungsbereich einer städtischen Grundwassermessstelle südwestlich des Projektgebietes für den Zeitraum September 2012 bis August 2023, siehe Kapitel 2.5.3. Der Wasserspiegel im Entengraben wird durch den Querschnitt der Verrohrung unter dem S-Bahn-Gelände begrenzt. Der Entengraben tritt bei einem Abfluss HQ100 nicht über die Ufer.

Basierend auf den vorliegenden Grundwasserbeobachtungen ist daher, analog wie in /U 17/ empfohlen, der **bauzeitliche Bemessungswasserstand**, auf **308,5 m NHN** anzunehmen (mittlerer Wasserstand + 0,5 m) und der **Bemessungswasserstand** auf **309,00 m NHN** (mittlerer Wasserstand + 1,0 m).

## 2.6 Baugrundmodell und charakteristische Bodenkennwerte

### 2.6.1 Baugrundmodell

Aus den Ergebnissen der Baugrunderkundungen und der bodenmechanischen Untersuchungen aus /U 17/ und /U 22/ lässt sich für den Untersuchungsbereich in Zusammenschau mit dem ursprünglichen Baugrundmodell in /U 17/ ein Baugrundmodell entwickeln, welches für die Bewertung der Baugrundverhältnisse herangezogen werden kann.

Die angetroffenen Böden können als Schichten mit jeweils annähernd gleichen bodenphysikalischen und bodenmechanischen Eigenschaften zusammengefasst werden (s. Tabelle 4).

Tabelle 4: Baugrundmodell

Beschreibung	Schichtnummer	Lagerungsdichte	Konsistenz	Boden- gruppe nach DIN 18196	Frost- empfind- lichkeit nach ZTVE-StB 17	Durchläs- sigkeits- beiwert [m/s]
<b>Gleisschotter</b>						
Gleisschotter	0.1.1	-	-	-	-	-
<b>Auffüllungen / Oberboden</b>						
Packlage	1.0.1	-	-	-	-	-
Oberboden, Sand, Kies, Schluff, humose Beimengungen	1.1.1	lo	-	[OH], OH	-	-
Auffüllung, Sand, eng- bis weitgestuft	1.2.1	lo	-	[SW, SI, SE]	F1	$1 \times 10^{-4}$ bis $5 \times 10^{-4}$ m/s
Auffüllung, Kies, eng- bis weitgestuft	1.3.1	lo	-	[GW, GI, GE]	F1	$1 \times 10^{-4}$ bis $1 \times 10^{-2}$ m/s
Auffüllung, Sand, schwach tonig / schwach schluffig	1.4.1	lo	-	[SU, ST]	F2, F3	$5 \times 10^{-5}$ bis $1 \times 10^{-4}$ m/s
	1.4.2	md	-			$3 \times 10^{-5}$ bis $8 \times 10^{-5}$ m/s
Auffüllung, Kies, schwach tonig / schwach schluffig	1.5.1	lo	-	[GU, GT]	F2, F3	$5 \times 10^{-5}$ bis $1 \times 10^{-4}$ m/s
	1.5.2	md	-			$3 \times 10^{-5}$ bis $8 \times 10^{-5}$ m/s
Auffüllung, Sand, tonig / schluffig	1.6.1	lo	-	[SU*, ST*]	F3	$5 \times 10^{-6}$ bis $1 \times 10^{-5}$ m/s
	1.6.2	md	-			$1 \times 10^{-6}$ bis $8 \times 10^{-6}$ m/s
Auffüllung, Ton / Schluff, leicht- bis mittelpastisch	1.7.1	-	w	[TL, TM, UL, UM]	F3	< $1 \times 10^{-8}$ m/s
	1.7.2	-	st			



Beschreibung	Schicht- nummer	Lager- ungs- dichte	Konsis- tenz	Boden- gruppe nach DIN 18196	Frost- empfind- lichkeit nach ZTVE-StB 17	Durchläs- sigkeits- beiwert  [m/s]
Auffüllung, Ton / Schluff, ausgeprägt plastisch	1.8.2	-	st	[TA, UA]	F3	< 1x10 <sup>-10</sup> m/s
	1.8.3	-	hf			
Quartär						
Sand, eng gestuft	2.1.1	lo	-	SE	F1	3x10 <sup>-4</sup> bis 1x10 <sup>-3</sup>
	2.1.2	md	-			2x10 <sup>-4</sup> bis 8x10 <sup>-4</sup>
	2.1.3	d	-			1x10 <sup>-4</sup> bis 6x10 <sup>-4</sup>
Sand, weit- und intermittierend gestuft	2.2.2	md	-	SW, SI	F1	2x10 <sup>-4</sup> bis 8x10 <sup>-4</sup>
	2.2.3	d	-			1x10 <sup>-4</sup> bis 6x10 <sup>-4</sup>
Sand, schwach tonig / schwach schluffig	2.3.1	lo	-	SU, ST	F2, F3	5x10 <sup>-5</sup> bis 1x10 <sup>-4</sup>
	2.3.2	md	-			4x10 <sup>-5</sup> bis 9x10 <sup>-5</sup>
	2.3.3	d	-			3x10 <sup>-5</sup> bis 8x10 <sup>-5</sup>
Sand, tonig / schluffig	2.4.1	lo	-	SU*, ST*	F3	6x10 <sup>-6</sup> bis 2x10 <sup>-5</sup>
	2.4.2	md	-			5x10 <sup>-6</sup> bis 1x10 <sup>-5</sup>
	2.4.3	d	-			1x10 <sup>-6</sup> bis 8x10 <sup>-6</sup>
Ton / Schluff, leicht- bis mittelplastisch	2.5.2	-	st	TL, TM, UL, UM	F3	1x10 <sup>-8</sup> bis 1x10 <sup>-10</sup>
	2.5.3	-	hf			
Kies, Steine	2.6.2	md	-	-	-	5x10 <sup>-5</sup> bis 1x10 <sup>-3</sup>
	2.6.3	d	-			7x10 <sup>-5</sup> bis 8x10 <sup>-4</sup>
Sandsteinersatz						
Kies, Sand, eng- bis weit ge- stuft	3.1.2	md	-	GE, GW, SE, SW	F1	2x10 <sup>-4</sup> bis 8x10 <sup>-4</sup>
	3.1.3	d	-			1x10 <sup>-4</sup> bis 6x10 <sup>-4</sup>
Sand, schwach schluffig / schwach tonig	3.2.2	md	-	SU, ST	F2, F3	4x10 <sup>-5</sup> bis 9x10 <sup>-5</sup>
	3.2.3	d	-			3x10 <sup>-5</sup> bis 8x10 <sup>-5</sup>
Sand, tonig / schluffig	3.3.2	md	-	SU*, ST*	F3	5x10 <sup>-6</sup> bis 1x10 <sup>-5</sup>
	3.3.3	d	-			1x10 <sup>-6</sup> bis 8x10 <sup>-6</sup>



Beschreibung	Schicht- nummer	Lager- ungs- dichte	Konsis- tenz	Boden- gruppe nach DIN 18196	Frost- empfind- lichkeit nach ZTVE-StB 17	Durchläs- sigkeits- beiwert  [m/s]
Ton / Schluff, leicht- bis mittelplastisch	3.4.2	-	st	TL, TM, UL, UM	F3	1x10 <sup>-8</sup> bis 1x10 <sup>-10</sup>
	3.4.3	-	hf			
	3.4.4	-	f			
Sandstein						
Sandstein, mürbe	4.1.1	-	-	-	-	1x10 <sup>-7</sup> bis 1x10 <sup>-5</sup>

lo = locker; md = mitteldicht, d = dicht, sd = sehr dicht; we = weich, st = steif, hf = halbfest, f = fest

## 2.6.2 Charakteristische Bodenkennwerte

Den anstehenden Schichten können auf Grundlage der im Rahmen der Baugrunduntersuchungen für /U 17/ und /U 22/ durchgeführten Laborversuche und unter Berücksichtigung von Erfahrungswerten für erdstatische Berechnungen, in Anlehnung an /U 17/ (die Werte aus /U 17/ wurden im Sinne der DIN EN 1997-1, EC7 kritisch gewürdigt) die in Tabelle 5 angegebenen charakteristischen Bodenkennwerte zugeordnet werden:

Tabelle 5: Charakteristische Bodenkennwerte

Beschreibung	Schicht- nummer	Lagerungs- dichte, Konsistenz	Boden- gruppe nach DIN 18196	$\gamma_k$	$\gamma_k$	$\phi'_k$	$c'_k$	$E_{s,100}^{1)}$
				kN/m³	kN/m³	°	kN/m²	MN/m²
Auffüllungen								
Gleisschotter	0.1.1	-	-	22,0	12,0	35,0	0,0	-
Auffüllung, Sand, eng- bis weitge- stuft	1.2.1	lo	[SW, SI, SE]	18,0	10,5	30,0	0,0	15,0 – 25,0
Auffüllung, Kies, eng- bis weitge- stuft	1.3.1	lo	[GW, GI, GE]	18,0	10,5	33,0	0,0	15,0 – 25,0
Auffüllung, Sand, schwach tonig / schwach schluffig	1.4.1	lo	[SU, ST]	18,0	10,5	30,0	0,0	10,0 – 20,0
	1.4.2	md		19,0	11,0	32,5	0,0	25,0 – 40,0
Auffüllung, Kies, schwach tonig / schwach schluf- fig	1.5.1	lo	[GU, GT]	18,0	10,5	33,0	0,0	10,0 – 20,0
	1.5.2	md		19,0	11,0	35,0	0,0	25,0 – 40,0

Beschreibung	Schicht- nummer	Lagerungs- dichte, Konsistenz	Boden- gruppe nach DIN 18196	$\gamma_k$	$\gamma_k$	$\phi'_k$	$c'_k$	$E_{s,100}^{1)}$
				kN/m³	kN/m³	°	kN/m²	MN/m²
Auffüllung, Sand, tonig / schluffig	1.6.1	lo	[SU*, ST*]	19,0	9,5	27,5	1,0	10,0 – 15,0
	1.6.2	md		20,0	10,5	30,0	2,0	15,0 – 20,0
Auffüllung, Ton / Schluff, leicht- bis mittelplas- tisch	1.7.1	w	[TL, TM, UL, UM]	19,0	9,0	25,0	0,0	3,0
	1.7.2	st		19,5	9,5	25,0	2,0	5,0
Auffüllung, Ton / Schluff, ausgeprägt plas- tisch	1.8.2	st	[TA, UA]	19,0	9,0	20,0	5,0	4,0
	1.8.3	hf		20,0	10,0	20,0	10,0	8,0
Quartär								
Sand, eng ge- stuft	2.1.1	lo	SE	18,0	10,0	32,0	0,0	30,0
	2.1.2	md		18,5	10,5	34,0	0,0	50,0
	2.1.3	d		19,0	11,0	36,0	0,0	60,0
Sand, weit- und intermittierend gestuft	2.2.2	md	SW, SI	18,5	10,5	34,0	0,0	60,0
	2.2.3	d		19,0	11,0	36,0	0,0	70,0
Sand, schwach tonig / schwach schluffig	2.3.1	lo	SU, ST	18,5	10,5	30,0	0,0	30,0
	2.3.2	md		19,0	11,0	32,5	0,0	40,0
	2.3.3	d		19,5	11,5	35,0	0,0	50,0
Sand, tonig / schluffig	2.4.1	lo	SU*, ST*	19,0	10,0	30,0	0,0	20,0
	2.4.2	md		19,5	10,5	31,0	0,0	30,0
	2.4.3	d		20,0	11,0	32,5	0,0	40,0
Ton / Schluff, leicht- bis mit- telplastisch	2.5.2	st	TL, TM, UL, UM	20,0	10,0	25,0	5,0	5,0
	2.5.3	hf		20,5	10,5	25,0	10,0	8,0
Kies, Steine	2.6.2	md	-	21,0	12,0	35,0	0,0	60,0
	2.6.3	d		21,5	12,5	37,5	0,0	80,0
Sandsteinersatz								
Kies, Sand, eng- bis weit gestuft	3.1.2	md	GE, GW, SE, SW	19,0	11,0	32,5	0,0	40,0
	3.1.3	d		19,5	10,5	35,0	0,0	50,0
Sand, schwach schluffig / schwach tonig	3.2.2	md	SU, ST	19,5	10,5	32,5	0,0	50,0
	3.2.3	d		20,0	11,0	35,0	0,0	60,0

Beschreibung	Schicht- nummer	Lagerungs- dichte, Konsistenz	Boden- gruppe nach DIN 18196	$\gamma_k$	$\gamma_k$	$\phi'_k$	$c'_k$	$E_{s,100}^{1)}$
				kN/m³	kN/m³	°	kN/m²	MN/m²
Sand, tonig / schluffig	3.3.2	md	SU*, ST*	20,0	10,5	30,0	0,0	30,0
	3.3.3	d		20,5	11,5	32,5	0,0	40,0
Ton / Schluff, leicht- bis mit- telplastisch	3.4.2	st	TL, TM, UL, UM	20,0	10,0	22,5	5,0	6,0
	3.4.3	hf		21,0	11,0	22,5	10,0	10,0
	3.4.4	f		21,5	11,5	22,5	15,0	15,0
Sandstein								
Sandstein, mürbe	4.1.1	-	-	22,0	12,0	35,0	20,0	80,0

lo = locker; md = mitteldicht, d = dicht, sd = sehr dicht; we = weich, st = steif, hf = halbfest, f = fest

<sup>1)</sup> Die Angaben für den Steifemodul  $E_{s,100}$  gelten bei einer Spannung  $\sigma=100$  kN/m<sup>2</sup>, die Ermittlung des spannungsabhängigen Steifemoduls  $E_{s,k}$  ergibt sich nach der Gleichung:

$$E_s = E_{s,100} \left( \frac{\sigma}{100 \text{ kN/m}^2} \right)^w, \text{ wobei } w \text{ ein Parameter ist und } \sigma \text{ die betrachtete Spannung.}$$

Der Parameter  $w$  ist in Abhängigkeit von der Bodenart zu wählen:

Organische Böden:  $w = 0,85 - 1,0$   
Tone:  $w = 0,85 - 1,0$   
Schluffe:  $w = 0,80 - 0,95$   
Sand / Kies:  $w = 0,55 - 0,70$

## 2.7 Rammfähigkeit / Vibrieren, Einpressen

Die Rammfähigkeit der erkundeten Böden ist in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst. Eine Klassifizierung der Böden hinsichtlich ihrer Rammfähigkeit (z.B. nach DIN-Norm) gibt es nicht. Die nachfolgende Einschätzung der Tabelle basiert auf der Grundlage der erkundeten Bodenarten, Lagerungsdichten bzw. Konsistenzen und den Erfahrungen des Baugrundgutachters bzw. in Anlehnung an die Angaben in /U 17/.

Tabelle 6: Rammfähigkeit

Beschreibung	Schichtnummer	Boden- gruppe nach DIN 18196	Lager- ungs- dichte	Konsis- tenz	Rammfähigkeit
<b>Gleisschotter</b>					
Gleisschotter	0.1.1	-	-	-	mittelschwer
<b>Auffüllungen / Oberboden</b>					
Packlage	1.0.1	-	-	-	nicht rammbar
Oberboden, Sand, Kies, Schluff, humose Beimengungen	1.1.1	[OH], OH	lo	-	leicht
Auffüllung, Sand, eng- bis weitgestuft	1.2.1	[SW, SI, SE]	lo	-	leicht bis mittelschwer
Auffüllung, Kies, eng- bis weitgestuft	1.3.1	[GW, GI, GE]	lo	-	leicht bis mittelschwer
Auffüllung, Sand, schwach tonig / schwach schluffig	1.4.1	[SU, ST]	lo	-	leicht bis mittelschwer
	1.4.2		md	-	mittelschwer bis schwer
Auffüllung, Kies, schwach tonig / schwach schluffig	1.5.1	[GU, GT]	lo	-	leicht bis mittelschwer
	1.5.2		md	-	mittelschwer bis schwer
Auffüllung, Sand, tonig / schluffig	1.6.1	[SU*, ST*]	lo	-	leicht bis mittelschwer
	1.6.2		md	-	mittelschwer bis schwer
Auffüllung, Ton / Schluff, leicht- bis mittelplastisch	1.7.1	[TL, TM, UL, UM]	-	w	leicht bis mittelschwer
	1.7.2		-	st	mittelschwer bis schwer
Auffüllung, Ton / Schluff, ausgeprägt plastisch	1.8.2	[TA, UA]	-	st	mittelschwer bis schwer
<b>Quartär</b>					
Sand, eng gestuft	2.1.1	SE	lo	-	leicht bis mittelschwer
	2.1.2		md	-	mittelschwer bis schwer
	2.1.3		d	-	schwer <sup>1)</sup>

Beschreibung	Schicht- nummer	Boden- gruppe nach DIN 18196	Lager- ungs- dichte	Konsis- tenz	Rammfähigkeit
Sand, weit- und intermittierend gestuft	2.2.2	SW, SI	md	-	mittelschwer bis schwer
	2.2.3		d	-	schwer bis sehr schwer <sup>1)</sup>
Sand, schwach tonig / schwach schluffig	2.3.1	SU, ST	lo	-	leicht bis mittelschwer
	2.3.2		md	-	mittelschwer bis schwer
	2.3.3		d	-	schwer bis sehr schwer <sup>1)</sup>
Sand, tonig / schluffig	2.4.1	SU*, ST*	lo	-	leicht bis mittelschwer
	2.4.2		md	-	mittelschwer bis schwer
	2.4.3		d	-	schwer bis sehr schwer <sup>1)</sup>
Ton / Schluff, leicht- bis mittelplas- tisch	2.5.2	TL, TM, UL, UM	-	st	mittelschwer bis schwer
	2.5.3		-	hf	schwer bis sehr schwer <sup>1)</sup>
Kies, Steine	2.6.2	-	-	-	schwer bis sehr schwer <sup>1)</sup>
	2.6.3	-	-	-	sehr schwer <sup>1)</sup>
Sandsteinersatz					
Kies, Sand, eng- bis weit gestuft	3.1.2	GE, GW, SE, SW	md	-	mittelschwer bis schwer
	3.1.3		d	-	schwer <sup>1)</sup>
Sand, schwach schluffig / schwach tonig	3.2.2	SU, ST	md	-	mittelschwer bis schwer
	3.2.3		d	-	schwer bis sehr schwer <sup>1)</sup>
Sand, tonig / schluffig	3.3.2	SU*, ST*	md	-	mittelschwer bis schwer
	3.3.3		d	-	schwer bis sehr schwer <sup>1)</sup>
Ton / Schluff, leicht- bis mittelplas- tisch	3.4.2	TL, TM, UL, UM	-	st	mittelschwer bis schwer
	3.4.3		-	hf	schwer bis sehr schwer <sup>1)</sup>
	3.4.4		-	f	schwer bis sehr schwer <sup>1)</sup>
Sandstein					
Sandstein, mürbe	4.1.1	-		-	nicht rammbar <sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Ggfs. Vorbohren / Einsatz einer Rammhilfe erforderlich

Zur Festlegung der Rammtechnologie bzw. der Geräte empfehlen wir vor Ausführung der Rammarbeiten Proberammungen durchzuführen. Für die Rammarbeiten sind Vorbohr-  
richtungen zur Beseitigung von Rammhindernissen vorzuhalten.

Bei Rammungen in locker gelagerten Böden sowie weichen Tonen/Schluffen ist mit Verdichtungssetzungen zu rechnen. Wir empfehlen die Gleislage während der Rammarbeiten vermessungstechnisch zu beobachten.

## **2.8 Betonaggressivität / Stahlkorrosivität**

Hinsichtlich Betonaggressivität und Stahlkorrosivität sind in /U 17/ folgende Angaben enthalten, die nach wie vor Gültigkeit besitzen:

*Die entsprechenden Grenzwerte nach DIN 4030 wurden eingehalten. Das Grundwasser ist als „nicht betonangreifend“ einzustufen.*

*Ebenso wurde die Stahlaggressivität unterhalb und über dem Grundwasser betreffend Loch- und Muldenkorrosion sowie Flächenkorrosion für unlegierte Stähle anhand der Analytik als „sehr gering“ unter Wasser, bzw. im Wasser- Luftbereich „gering“ bewertet.*

*Die bei der Nacherkundung genommene Probe aus dem Brunnen des westlich der Herstelllage gelegenen Grundstücks ergab eine „schwache“ Betonaggressivität und eine „sehr geringe“ Stahlkorrosion für unlegierte bis niedrig legierte Stähle unter Wasser als auch am Übergang Boden- zu Luft betreffend Mulden- und Lochkorrosion als auch flächenhafte Korrosion. Die Mischbodenprobe ergab praktisch keine Korrosion.*

*Für die Gesamtmaßnahme ist auch angesichts des vorherrschenden Quarzanteils in den Sanden eine „schwache“ Betonaggressivität und eine „sehr geringe“ Stahlkorrosion anzusetzen.*

Die Versuchsprotokolle sind in Anlage 7 beigelegt.

## **2.9 Kampfmittel**

Nach /U 17/ wurden, da eine Kampfmittelfreiheit aufgrund möglicher Bombenabwürfe aus dem 2. Weltkrieg nicht gänzlich ausgeschlossen werden kann, an allen Aufschlusspunkten Kampfmittelfreimessungen durchgeführt.

## **2.10 Erdbebeneinwirkung**

Das Projektgebiet befindet sich nach DIN EN 1998-1/NA:2011-01 bzw. /U 26/ in keiner Erdbebenzone.

### **3 Gründungstechnische Schlussfolgerungen / Empfehlungen**

#### **3.1 EÜ Entengraben/EÜ Überwerfungsbauwerk**

##### **3.1.1 Allgemeines**

Die bestehenden EÜs Entengraben und Überwerfungsbauwerk werden durch einen Neubau an derselben Stelle ersetzt. Die EÜ Entengraben wird nach /U 10/ und /U 11/ in das Überwerfungsbauwerk integriert. Das Bauwerk ist als Stahlbetonrahmen geplant. Die genaue Bauwerksgeometrie ist im Detail in Kapitel 2.2.1 beschrieben.

Das Bauwerk wird in einer Sperrpause errichtet. Der Bestand wird komplett inklusive Gründung rückgebaut.

Die Unterkante der Gründungsplatte des Überwerfungsbauwerks wird nach /U 11/ auf rd. 308,5 m NHN angeordnet, die Unterkante des angevouteten Durchlasses für den Entengraben auf rd. 307,2 m NHN.

Nach den vorliegenden Untersuchungsergebnissen stehen in Höhe der Gründungsunterkanten mindestens mitteldicht gelagerte, teilweise schwach kiesige bis kiesige, teilweise schwach bindige, quartäre Sande (SE, SW, SU, ST) an. Vereinzelt sind dünne Schlufflagen (TL, TM) vorhanden, örtlich zuoberst auch schluffige Sande (SU\*). Die quartären Ablagerungen werden in größerer Tiefe von zu schwach bindigen und bindigen Sanden (SU, ST, SU\*, ST\*) verwittertem Sandstein unterlagert. Die Schichtgrenze befindet sich in den Bohrungen zwischen rd. 299,6 m NHN (BK3) und rd. 301,4 m NHN (BS1). Im Sandsteinersatz sind teilweise steife und halbfeste Schluff- bzw. Tonlagen (TL, TM) vorhanden. Die Sande sind mitteldicht und dicht gelagert. Teilweise sind Übergänge zu mürbem Sandstein vorhanden. Mit der Tiefe folgt Sandsteinfels.

Das geplante Bauvorhaben ist gemäß DIN EN 1997-1, ergänzt durch DIN 4020 und DIN 1054, der geotechnischen Kategorie GK 2 zuzuordnen.

Gemäß /U 27/ liegt das Untersuchungsgebiet innerhalb der Frosteinwirkungszone II, dementsprechend ist mit Frosteinwirkungstiefen von bis zu 1,20 m unter GOK zu rechnen.

Das neue Bauwerk erhält größere Grundrissabmessungen als der Bestand. Die Gründungssohle liegt also teilweise in durch das Bestandsbauwerk und die Anschlussdämme vorbelasteten Bereichen, teilweise in noch unbelastetem bzw. nur durch Verkehrslasten belastetem Baugrund.

Die nach /U 11/ vorgesehene Unterkante der Gründungsplatte des Überwerfungsbauwerks befindet sich auf Höhe des bauzeitlichen Bemessungswasserstandes (308,50 m NHN, siehe



Kapitel 2.5.7), die Gründungssohle im Bereich Entengraben bindet ausgehend vom bauzeitlichen Bemessungswasserstand etwa 1,3 m in das Grundwasser ein.

Die anstehenden Böden besitzen eine ausreichende Tragfähigkeit für eine Flachgründung. Für die Gründungsarbeiten, insbesondere beim Rückbau des Bestands und beim Bau der EÜ Entengraben werden Wasserhaltungsmaßnahmen erforderlich.

Nachfolgend werden im Kapitel 3.1.2 Angaben für eine Flachgründung gemacht.

### **3.1.2 Flachgründung**

#### Gründungsmaßnahmen

Bei Ausführung einer Flachgründung auf einer Platte mit integriertem Durchlass für den Entengraben ist das Bestandsbauwerk komplett, inklusive Gründung rückzubauen.

Die entstehenden Baugruben sind mit gut tragfähigem, nicht bindigem Material qualifiziert zu verfüllen. Als Verfüllmaterial sollte ein weitgestuftes Schottergemisch beispielsweise der Körnung 0/32 mm oder 0/56 mm verwendet werden. Hierbei ist ausschließlich güteüberwachtes und verifiziertes Material zu verwenden. Der Einbau des Verfüllmaterials hat lagenweise und mit einer Verdichtung der einzelnen Lagen auf  $D_{Pr} \geq 100 \%$  zu erfolgen. Die zulässige Stärke der einzelnen Einbaulagen ist abhängig vom Größtkorn des Einbaumaterials und den verwendeten Gerätschaften zur Verdichtung zu wählen (siehe hierfür ZTV E-StB 17 /U 35/). Für Schottermaterial sind Einbaustärken von  $\leq 0,3$  m vorzusehen. Der Verdichtungsgrad ist durch Dichtebestimmungen bzw. durch Plattendruckversuche nachzuweisen. Auf den Lagen ist ein  $E_{vd} \geq 45 \text{ MN/m}^2$  bzw. ein  $E_{v2} \geq 120 \text{ MN/m}^2$  nachzuweisen.

Außerhalb des Rückbaubereichs anstehende aufgefüllte bzw. natürliche bindige Böden sowie bindige Sande und Kiese sind auszuheben und gegen das oben beschriebene Schottermaterial zu ersetzen. Die Verdichtungsanforderungen gelten analog.

In Höhe Gründungssohle anstehende natürliche und aufgefüllte, nicht und schwach bindige Sande sind gut nachzuverdichten. Um eine erfolgreiche Nachverdichtung der anstehenden nicht bindigen Sande zu gewährleisten ist zuoberst eine 0,3 m dicke Schicht aus dem oben beschriebenen Schottermaterial anzuordnen. In Höhe Oberkante der Schotterschicht sind die oben genannten Verformungsmoduln nachzuweisen.

Voraussetzung für die oben beschriebenen Austausch- bzw. Nachverdichtungsmaßnahmen ist, dass der Grundwasserspiegel mindestens 0,5 m unter der Austauschsohle liegt bzw. entsprechend abgesenkt wird, siehe Wasserhaltungsmaßnahmen in Kapitel 3.5.

Der Bodenaustauschkörper ist mit einem seitlichen Überstand so breit auszuführen, dass eine Ausbreitung der Bodenpressungen innerhalb des Polsters mit einem 45°-Winkel möglich ist.

Für das ausreichend verdichtete Kiespolster können die folgenden charakteristischen Bodenkennwerte angesetzt werden:

- Wichte über Wasser  $\gamma_k = 20 \text{ kN/m}^3$
- Wichte unter Auftrieb  $\gamma'_k = 12 \text{ kN/m}^3$
- Reibungswinkel  $\varphi'_k = 37,5^\circ$
- Kohäsion  $c'_k = 0 \text{ kN/m}^2$
- Steifemodul  $E_{s,k} = 80 \text{ MN/m}^2$

### Nachweise der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit

Gemäß einer E-Mail des Ingenieurbüros Grassl vom 26.06.2024 /U 30/ sind charakteristische Lasten in einer Größenordnung von rd. 52.700 kN (Ständige Lasten) bzw. 59.300 kN (Ständige Lasten zzgl. Veränderliche Lasten) zu erwarten. Hieraus ergeben sich für die ständigen (bzw. ständigen + veränderlichen) Lasten Bettungsspannungen von rd. 94 bis 165 kN/m<sup>2</sup> (bzw. rd. 96 bis 229 kN/m<sup>2</sup>) beim Überwerfungsbauwerk und von rd. 220 bis 277 kN/m<sup>2</sup> (bzw. rd. 223 bis 357 kN/m<sup>2</sup>) im Bereich des Durchlasses Entengraben. Die Bettungsspannungen wurden vom Büro Grassl auf Grundlage der Annahmen zu den Bettungsmoduln in /U 20/ ermittelt.

Bild 1: Bettungsspannungen – LF 2901, Ständige Lasten, Pz = 52685 kN

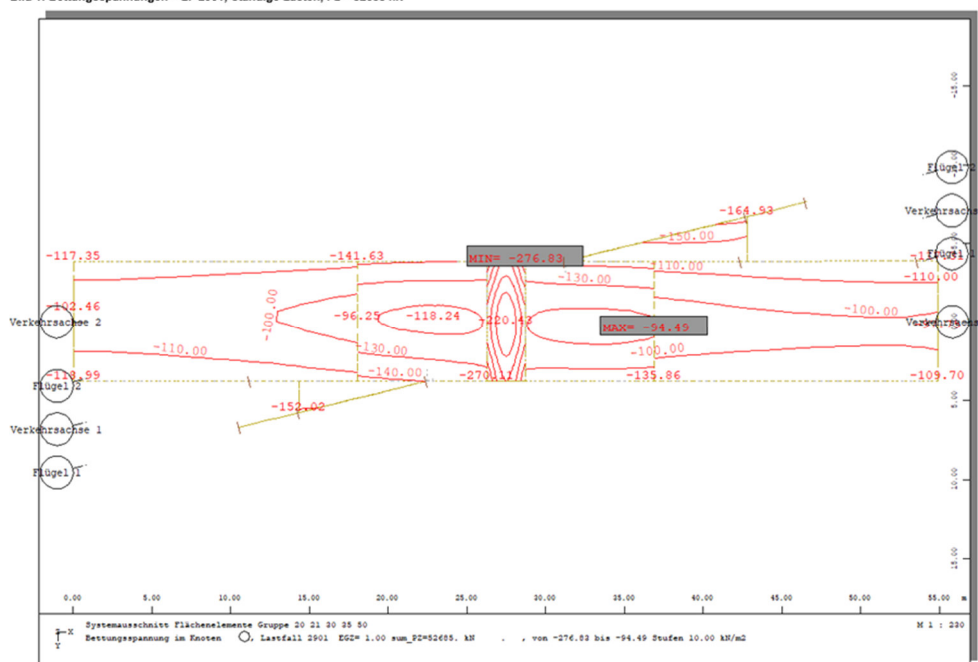


Abbildung 13 – Bettungsspannungen ständige Lasten aus E-Mail /U 30/

Bild 2: Bettungsspannungen – LF 2900, Ständige Lasten zzgl. veränderliche Lasten, Pz = 59309 kN:

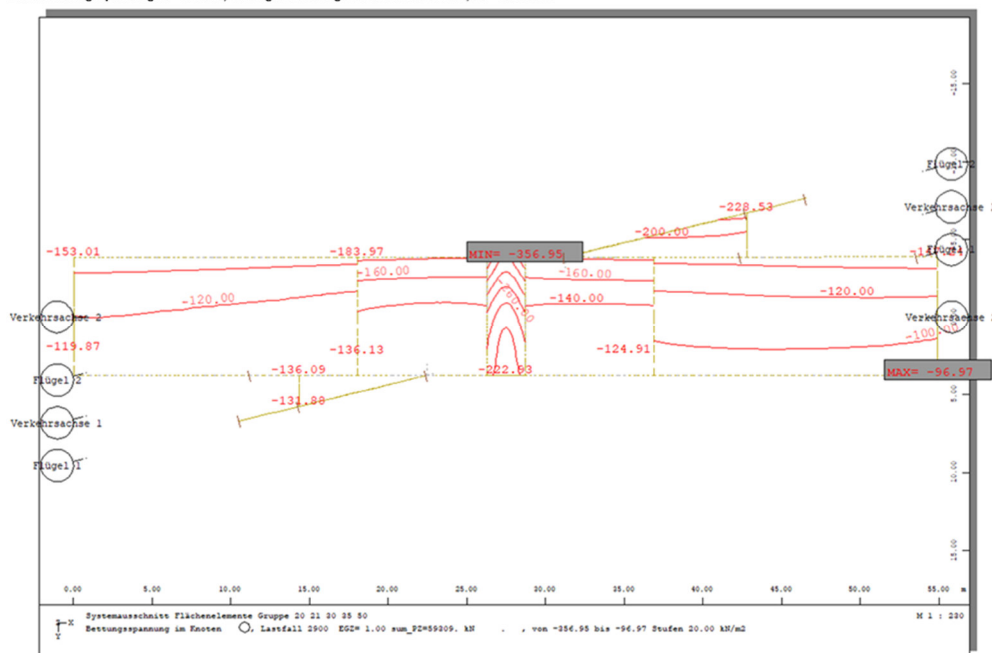


Abbildung 14 – Bettungsspannungen ständige Lasten zzgl. veränderliche Lasten aus E-Mail /U 30/

Das neue Überwerfungsbauwerk ist größer als der Bestand. Die Gründungsplatte erstreckt sich auf vormals mit dem Bestandsbauwerk überbaute Bereiche, auf durch die Anschlussdämme vorbelastete Bereiche und auf nur durch Verkehrslasten aus der Tieflage vorbelastete Bereiche. Daher sind unterschiedliche Bettungsmoduln für bereits vorbelastete und für weitgehend unbelastete Bereiche anzusetzen.

Zur Abschätzung der Bettungsmoduln wurde mit den oben genannten Bettungsspannungen für ständige Lasten zzgl. veränderliche Lasten (d. h. auf der sicheren Seite) eine Setzungsabschätzung mit dem Programm GGU Settle /U 42/ durchgeführt, siehe Anlage 8. Dabei wurde von folgenden Annahmen ausgegangen:

- Die Gründung erfolgt flach über eine Gründungsplatte mit integriertem Durchlass für den Entengraben.
- Die Fundamentgeometrie wurde dem „Grundriss Unterbauten“ in /U 10/ entnommen siehe Anlage 8. Die Geometrie wurde in GGU Settle mit Dreiecksfundamenten modelliert. Die Gründungssohle liegt beim Überwerfungsbauwerk nach /U 11/ auf 308,51 mNHN und beim Durchlass Entengraben auf 307,20 m NHN.
- Der Bestand wird komplett rückgebaut. Die entstehenden Baugruben werden bis in Höhe Gründungssohle des Neubaus mit dem in Kapitel 3.1.1 angegebenen Austauschmaterial verfüllt.

- Die Untergrundverhältnisse wurden gemäß Bohrung BK1 angenommen.
- Die Vorbelastung wird im Bereich des bestehenden Überwerfungsbauwerks mit ca. 100 kN/m<sup>2</sup>, im Bereich der EÜ Entengraben mit ca. 250 kN/m<sup>2</sup> und im Bereich der Anschlussdämme mit ca. 120 kN/m<sup>2</sup> angenommen.
- Der Wiederbelastungsmodul entspricht nach /U 17/ dem 5fachen Wert des Steifemoduls bei Erstbelastung.

Aus der Setzungsberechnung ergeben sich folgende charakteristische Bettungsmoduln  $k_{s,k}$ :

Tabelle 7: charakteristische Bettungsmoduln  $k_{s,k}$

Bauwerksbereich	(vorläufige) Bettungsspannung (ständige zzgl. veränderliche Lasten) nach /U 30/ [kN/m <sup>2</sup> ]	Setzung [cm]	charakteristischer Bettungsmodul $k_{s,k}$ [MN/m <sup>2</sup> ]
Durchlass Entengraben	ca. 220 – 360	ca. 1,0 – 2,5	<b>15,0 – 25,0</b>
Überwerfungsbauwerk (Vorbelastung durch Bestandsbauwerk)	ca. 100 – 180	ca. 1,0 – 1,5	<b>10,0 – 15,0</b>
Überwerfungsbauwerk (Vorbelastung durch Anschlussdämme)	ca. 120 – 230	ca. 0,5 – 1,5	<b>15,0 – 20,0</b>
Überwerfungsbauwerk (nicht vorbelastet)	ca. 100 – 150	ca. 1,0 – 2,0	<b>8,0 – 10,0</b>

Eine überschlägige Berechnung der Grundbruchsicherheit mit dem Programm GGU Footing /U 43/ ergibt für eine Bodenschichtung gemäß Bohrung BK1, einem Grundwasserstand in Höhe des Bemessungswasserstandes bei 309,0 mNHN und Fundamentabmessungen von 54,75 m x 8,60 m (Überwerfungsbauwerk nach /U 10/) in der Bemessungssituation BS-P **ohne Begrenzung der Setzungen** einen **Bemessungswert des Sohlwiderstand  $\sigma_{R,d}$  von 963,5 kN/m<sup>2</sup>**, siehe Anlage 8. Für das Durchlassbauwerk Entengraben errechnet sich mit den selben Annahmen und Fundamentabmessungen von 2,6 m x 8,6 m ein **Bemessungswert des Sohlwiderstand  $\sigma_{R,d}$  von 1.306,4 kN/m<sup>2</sup>**, siehe Anlage 8.

Zur Begrenzung der Verformungen (Gebrauchstauglichkeit) sollten diese Bemessungswerte des Sohlwiderstands jedoch nicht ausgenutzt werden.

Die Annahmen zu den Bettungsmoduln und zu den Sohlpressungen sind im Zuge der weiteren Planungen bzw. statischen Berechnungen mit dem Sachverständigen für Geotechnik abzustimmen.

## **3.2 Stützwände**

### **3.2.1 Allgemeines**

Die Stützwände zur Sicherung der Anschlussdämme der Hochlage südlich und nördlich des Überwerfungsbauwerks sollen nach /U 12/ als Winkelstützwände ausgebildet werden. Die freie Höhe der südlichen Wand beträgt nach den Planunterlagen maximal etwa 6,1 m, die Länge 43,48 m. Zur nördlichen Wand liegen bei Berichterstellung keine Unterlagen vor. Die Gründungssohle der südlichen Wand wird planmäßig auf 308,46 m NHN angeordnet. Für die nördliche Wand wird von einer ähnlichen Gründungshöhe ausgegangen.

In Höhe der Gründungsunterkanten sind, analog wie in Kapitel 3.1.1 beschrieben, mindestens mitteldicht gelagerte, teilweise schwach kiesige bis kiesige, örtlich schwach bindige, quartäre Sande (SE, SW, SU, ST) zu erwarten. In Tiefen zwischen rd. 299,6 m NHN (BK3) und rd. 301,4 m NHN (BS1) folgt zu schwach bindigen und bindigen Sanden (SU, ST, SU\*, ST\*) verwitterter Sandstein. Im Sandsteinersatz sind teilweise steife und halbfeste Schluff- bzw. Tonlagen (TL, TM) vorhanden. Die Sande sind mitteldicht und dicht gelagert. Teilweise sind Übergänge zu mürbem Sandstein vorhanden.

Die im Kapitel 3.1.1 zu geotechnischer Kategorie und Frosteinwirkungstiefe gelten analog.

Die in /U 12/ angegebenen planmäßigen Gründungssohlen befindet sich knapp unter dem bauzeitlichen Bemessungswasserstand.

Die anstehenden Böden besitzen eine ausreichende Tragfähigkeit für eine Flachgründung. Für die Gründungsarbeiten werden Wasserhaltungsmaßnahmen erforderlich.

Nachfolgend werden im Kapitel 3.2.2 Angaben für eine Flachgründung gemacht.

### **3.2.2 Flachgründung**

#### Gründungsmaßnahmen

Die im Kapitel 3.1.1 beschriebenen Austausch- und Nachverdichtungsmaßnahmen sowie die Angaben zum Verfüllmaterial und zu den Verdichtungsanforderungen gelten analog. Bauwerks- und Fundamentreste vom Bestand sind komplett rückzubauen.

Voraussetzung für die oben beschriebenen Austausch- bzw. Nachverdichtungsmaßnahmen ist, dass der Grundwasserspiegel mindestens 0,5 m unter der Austauschsohle liegt bzw. entsprechend abgesenkt wird, siehe Wasserhaltungsmaßnahmen in Kapitel 3.5.

### Nachweise der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit

Die Winkelstützwände sind nach Ril 836.4301 Kapitel 4 (3) /U 34/ als verformungsarme Stützkonstruktion auszubilden und mit erhöhtem aktiven Erddruck mit mindesten 50%-Erdruhedruckanteil nach DIN 4085 zu bemessen.

Nachweise der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit sind nach Ril 836.2001 und 836.3001 /U 34/ zu führen. Zum Nachweis der äußeren Standsicherheit ist neben den Sicherheiten gegen Kippen und Gleiten die Sicherheit gegen Grundbruch nach DIN 4017 sowie gegen Geländebruch nach DIN 4084 /U 36/ zu ermitteln.

## **3.3 Oberleitungsanlagen und Schallschutzwände**

### **3.3.1 Allgemeines**

Im Zuge der Baumaßnahme werden Oberleitungsmasten neu angeordnet und Schallschutzwände ergänzt bzw. neu errichtet. Detaillierte Planunterlagen hierzu liegen bei Berichterstellung nicht vor. Die Masten bzw. die Lärmschutzwände werden voraussichtlich teilweise in den Anschlussdämmen der Hochlage und teilweise in Höhe der derzeitigen Geländeoberkante entlang der Tieflage errichtet.

Grundsätzlich kommen für die Gründung von OLA-Masten und Schallschutzwänden folgende Gründungen in Betracht:

- Rammpfahlgründungen (Tiefgründung)
- Bohrpfahlgründungen (Tiefgründung)
- Stufen- oder Blockfundamente als Ortbetongründungen (Flachgründung).

Erfahrungsgemäß gilt eine Tiefgründung der OLA-Masten bzw. Schallschutzwände mittels Rammpfählen als Vorzugsvariante. Dies gilt angesichts der vorliegenden Gelände-, Untergrund- und Grundwasserverhältnissen auch hier. Eine Tiefgründung mittels Rammrohrgründung ist aus geotechnischer Sicht möglich. Gegebenenfalls sind stellenweise Vorbohrungen/Auflockerungsbohrungen notwendig. Wir empfehlen daher Vorbohrereinrichtungen beizubehalten.

Im nachfolgenden Abschnitt wird der Untergrund in Bezug auf die Gründung der OLA-Masten bzw. Schallschutzwände bewertet. Es werden Angaben zur Tiefgründung mittels Rammpfählen gemacht. Die grundsätzlich auch mögliche Flachgründung bzw. eine Tiefgründung mittels Bohrpfählen wird nicht ausführlich dargestellt.



### 3.3.2 Tiefgründung mittels Fertigrammpfählen

Die Hinweise zur Rammfähigkeit der einzelnen Schichten können dem Kapitel 2.7 entnommen werden. Das Einbringen der Rammpfähle sollte erschütterungsarm erfolgen, um Schäden an der Gleisanlage sowie an bereichsweise vorhandenen Nachbarbebauungen zu vermeiden. Durch die Rammarbeiten ist mit Verdichtungssetzungen in locker gelagerten Auffüllungen (z. B. Dammschüttungen) zu rechnen. Beim Rammen, Rütteln oder Einvibrieren der Rammpfähle sind zusätzlich Geräte zur Hindernisbergung bzw. -beseitigung (z. B. Fundamentreste, Packlagen) vorzuhalten.

Um die auftretende Vibrationseinwirkung in den Baugrund sowie die Lärmbelästigung zu reduzieren, wäre die Möglichkeit des Vorbohrrens gegeben. Diese Bohrung muss dann mindestens 1,0 m über dem Pfahlfuß enden, um eine ausreichende Einbindung des Pfahlfußes in den tragfähigen Boden zu gewährleisten.

Aufgrund der zum Teil schwer rammbaren Böden empfehlen wir generell für die Rammrohrgründung Vorbohrreinrichtungen vorzuhalten. Sofern zum Erreichen der statisch erforderlichen Pfahllängen Auflockerungsbohrungen durchgeführt werden müssen, empfehlen wir auf der sicheren Seite liegend, für die Berechnung die Bodenkennwerte der entsprechenden lockeren bzw. steifen Schichten anzusetzen.

Die geotechnische Bemessung soll nach unseren Erfahrungen in der Regel nach dem Berechnungsverfahren nach Blum erfolgen. Die für die Berechnung erforderlichen charakteristischen Bodenkennwerte sind Kapitel 2.6.2 angegeben.

Tragfähige Schichten nach EA-Pfähle /U 40/ stellen mindestens mitteldicht gelagerte aufgefüllte oder natürlich anstehende Sande mit ausreichender Mächtigkeit dar (Schichten 1.4.2, 1.5.2, 1.6.2, 2.1.2, 2.2.2, 2.2.3, 2.3.2, 2.3.3, 2.4.2, 2.4.3, 2.5.2, 2.5.3, 2.6.2, 2.6.3, 3.1.2, 3.1.3, 3.2.2, 3.2.3, 3.3.2, 3.3.3, 3.4.2, 3.4.3, 3.4.4, 4.1.1).

### 3.3.3 Kennwerte für Pfahlmantelreibung und Pfahlspitzendruck von Rammpfählen

Die Pfahllänge und die Einbindetiefe in tragfähige Schichten sind durch den Statiker so nachzuweisen, dass die auftretenden Kräfte schadfrei in den Untergrund abgeleitet werden können.

Bei Planung nach EA-Pfähle /U 40/ darf die Mächtigkeit der tragfähigen Schichten unterhalb der Pfahlfußfläche ein Maß von 5 x Pfahldurchmesser (mind. jedoch 1,5 m) nicht unterschreiten. Des Weiteren gelten die Angaben für Einzelpfähle und unter Beachtung der ergänzenden Forderungen und Hinweise der EA-Pfähle.

Die Kennwerte der Mantelreibung und des Spitzendruckes der anstehenden Böden für die nicht bindigen und bindigen Böden sind in Tabelle 8 zusammengestellt.

Tabelle 8: Spitzendruck und Mantelreibung für Rammpfähle gemäß EA-Pfähle /U 40/

Schicht	Lagerungsdichte	Konsistenz	Bodengruppe (DIN 18 196)	Charakteristischer. Pfahlsitzendruck $q_{b,k}$ [kN/m <sup>2</sup> ] bei einer bezogenen Pfahlkopfsetzung $s/D_{eq}$ von		Charakteristische. Pfahlmantelreibung $q_{s1,k}$ [kN/m <sup>2</sup> ] bei einer Setzung von	
				0,035	0,1	$s_{sg}^*$	$s_{sg}=0,1 \cdot D_{eq}$
1.2.1	lo	-	[SW, SI, SE]	-	-	-	-
1.3.1	lo	-	[GW, GI, GE]	-	-	-	-
1.4.1	lo	-	[SU, ST]	-	-	-	-
1.4.2	md	-		2.200	4.200	30	40
1.5.1	lo	-	[GU, GT]	-	-	-	-
1.5.2	md	-		2.200	4.200	30	40
1.6.1	lo	-	[SU*, ST*]	-	-	-	-
1.6.2	md	-		2.200	4.200	30	40
1.7.1	-	w	[TL, TM, UL, UM]	-	-	-	-
1.7.2	-	st		350	600	20	20
1.8.2	-	st	[TA, UA]	350	600	20	20
1.8.3	-	hf		550	850	35	40
2.1.1	lo	-	SE	-	-	-	-
2.1.2	md	-		2.200	4.200	30	40
2.1.3	d	-		4.000	7.500	65	95
2.2.2	md	-	SW, SI	2.200	4.200	30	40
2.2.3	d	-		4.000	7.500	65	95
2.3.1	lo	-	SU, ST	-	-	-	-
2.3.2	md	-		2.200	4.200	30	40
2.3.3	d	-		4.000	7.500	65	95
2.4.1	lo	-	SU*, ST*	-	-	-	-
2.4.2	md	-		2.200	4.200	30	40
2.4.3	d	-		4.000	7.500	65	95
2.5.2	-	st	TL, TM, UL, UM	350	600	20	20
2.5.3	-	hf		550	850	35	40

Schicht	Lagerungsdichte	Konsistenz	Bodengruppe (DIN 18 196)	Charakteristischer. Pfahlspitzendruck $q_{b,k}$ [kN/m <sup>2</sup> ] bei einer bezogenen Pfahlkopfsetzung $s/D_{eq}$ von		Charakteristische. Pfahlmantelreibung $q_{s1,k}$ [kN/m <sup>2</sup> ] bei einer Setzung von	
				0,035	0,1	$s_{sg}^*$	$s_{sg}=0,1 \cdot D_{eq}$
2.6.2	md	-	-	2.200	4.200	30	40
2.6.3	d	-		4.000	7.500	65	95
3.1.2	md	-	GE, GW, SE, SW	2.200	4.200	30	40
3.1.3	d	-		4.000	7.500	65	95
3.2.2	md	-	SU, ST	2.200	4.200	30	40
3.2.3	d	-		4.000	7.500	65	95
3.3.2	md	-	SU*, ST*	2.200	4.200	30	40
3.3.3	d	-		4.000	7.500	65	95
3.4.2	-	st	TL, TM, UL, UM	350	600	20	20
3.4.3	-	hf		550	850	35	40
3.4.4	-	f		800	1.150	45	55
4.1.1	-	-	-	8.000		120	

Die vom Pfahltyp abhängigen Anpassungsfaktoren  $\eta_b$  und  $\eta_s$  für Spitzen- und Mantelwiderstand sind in Tabelle 9 angegeben. Die Werte für den Pfahlspitzendruck und die Mantelreibung der Rammpfähle sind entsprechend abzumindern.

Tabelle 9: Anpassungsfaktoren für Pfahlspitzendruck und Pfahlmantelreibung von Fertigrammpfählen nach Tab. 5.5 der EA Pfähle 2012 /U 40/

Pfahltyp		$\eta_b$	$\eta_s$
Stahlbeton und Spannbeton		1,00	1,00
Stahlträgerprofil ( $h \leq 0,50$ m und $h / b_F \leq 1,5$ )	$S = 0,035 \times D_{eq}$	$0,61 - 0,30 \times h / b_F$	0,60
	$S = 0,10 \times D_{eq}$	$0,78 - 0,30 \times h / b_F$	
doppeltes Stahlträgerprofil		0,25	0,60
offenes Stahlrohr und Hohlkasten ( $0,30$ m $\leq D_b \leq 1,60$ m)		$0,95 \times e^{-1,2 \times D_b}$	$1,1 \times e^{-0,63 \times D_b}$
geschlossenes Stahlrohr ( $D_b \leq 0,80$ m)		0,80	0,60
h= Höhe des Stahlträgerprofils, $b_F$ = Flanschbreite des Stahlträgerprofils			

Sofern zur Einbringung der Rammpfähle Rammhilfen zum Einsatz kommen, sind die in Tabelle 10 aufgeführten Abminderungsfaktoren zu berücksichtigen.

Tabelle 10: Abminderungsfaktoren bei Einsatz von Rammhilfen bei Rammpfählen (Erfahrungswerte)

	Vorbahren			Spülhilfe
Mantelreibung	0,5	bei $d - d_B$	$\leq 50 \text{ mm}$	0,9
	0,6	bei $d - d_B$	$> 50 \text{ mm}$	
	1,0	bei $d - d_B$	$> 150 \text{ mm}$	

$d$  Pfahl-  $\varnothing$  bzw. -breite,  $d_B$   $\varnothing$  Bohrung

Hinweise und Forderungen der DIN 1054:2021 /U 33/ sowie der DIN EN 12699:2015 sind zu beachten.

### 3.3.4 Bettungsverlauf der Pfahlgründung

Querwiderstände dürfen nur für Pfähle mit einem Pfahlschaftdurchmesser  $D \geq 0,30 \text{ m}$  bzw. einer Kantenlänge  $a \geq 0,30 \text{ m}$  angesetzt werden. Der charakteristische Querwiderstand darf dabei durch charakteristische Werte des horizontalen Bettungsmoduls beschrieben werden. Der horizontale Bettungsmodul  $k_{s,k}$  lässt sich grob abschätzen nach der Gleichung:

$$k_{s,k} = E_{s,k} / D_s$$

$E_{s,k}$  - charakteristischer Wert des Steifemoduls

$D_s$  - Pfahldurchmesser (bei  $D_s \geq 1,0$  ist  $D_s = 1,0$  nach DIN 1054 anzusetzen)

Die Anwendung dieser Formel gilt für Pfahldurchmesser  $D_s \leq 1,0 \text{ m}$  und einem Höchstwert der Horizontalverschiebung von  $y = 2 \text{ cm}$  bzw.  $y = 0,03 \cdot D_s$ , wobei der kleinere Wert maßgebend ist. Bei einem Pfahldurchmesser von  $0,5 \text{ m}$  ergibt sich somit eine maximale Horizontalverschiebung von  $0,03 \cdot 0,5 \text{ m} = 1,5 \text{ cm}$ . Bei größeren Verformungen sind die Bettungsmoduln abzumindern. Bei der Ermittlung des horizontalen Bettungsmoduls ist ebenfalls eine Gruppenwirkung der Pfähle zu berücksichtigen.

## 3.4 Baugrubensicherung

### 3.4.1 Baugruben

#### EÜ Entengraben

Im Bereich des Durchlasses für den Entengraben ergibt sich nach /U 11/ für den Rückbau des Bestandes eine Baugrubensohle bei rd. 305,8 m NHN, d. h. eine Baugrubentiefe von etwa 4,0 m ab derzeitiger Geländeoberkante (ca. 309,8 m NHN). Die Baugrubensohle liegt

2,7 m unter dem bauzeitlichen Bemessungswasserstand (308,5 mNHN, siehe Kapitel 2.5.7). Der Entengraben wird während der Bauausführung verrohrt und um die Baugrube herumgeführt.

### EÜ Überwerfungsbauwerk

Die Sohle der Baugrube für das Überwerfungsbauwerk ist nach /U 11/ im Rückbaubereich des Bestands auf rd. 307,5 m NHN, außerhalb dieses Bereichs (inkl. Bodenaustausch für Nachverdichtung Gründungssohle, siehe Kapitel 3.1.1) auf rd. 308,1 m NHN geplant. Die Sohle liegt damit rd. 2,3 m bzw. rd. 1,7 m unter derzeitiger Geländeoberkante des umliegenden Geländes bzw. rd. 1,0 m bzw. 0,4 m unter dem bauzeitlichen Bemessungswasserstand (308,5 mNHN, siehe Kapitel 2.5.7). Die Anschlussdämme werden im Baugrubenbereich im erforderlichen Umfang rückgebaut.

### Stützwände

Bei den Stützwänden ergeben sich nach /U 12/ die Aushubsohlen etwa analog wie beim Überwerfungsbauwerk.

### OLA-Masten und Schallschutzwände

Bei Ausführung der empfohlenen Rammrohrgründung, siehe Kapitel 3.3, ergeben sich nur geringfügige Baugrubentiefen.

## **3.4.2 Wahl der Baugrubensicherung**

Baugruben bis 1,25 m Tiefe können nach DIN 4124 senkrecht ausgehoben werden. Tiefere Baugruben müssen geböscht oder verbaut werden. Unbelastete Böschungen über dem Grundwasser bis 5,00 m Böschungshöhe können nach DIN 4124 in nichtbindigen Böden (Kiese/Sande) und bindigen Böden von weicher Konsistenz unter Einhaltung eines Böschungswinkels  $\leq 45^\circ$  ohne gesonderten Nachweis hergestellt werden. In bindigen Böden mit mindestens steifer Konsistenz ist eine Erhöhung des Böschungswinkels bis  $60^\circ$  zulässig. Bei belasteten oder höheren Böschungen bzw. aufgeweichten Bodenschichten sowie Böschungen unter Grundwasser ist die Standsicherheit nachzuweisen bzw. ein Baugrubenverbau vorzusehen.

Bei den vorliegenden Untergrund-, Grundwasser- und Platzverhältnissen sowie den in Kapitel 3.1.1 beschriebenen Aushubtiefen bei Ausführung einer Flachgründung wird für das Überwerfungsbauwerk, die Stützwände und den Durchlass Entengraben entweder ein wasserdichter Baugrubenverbau erforderlich, z. B. in Form eines Spundwandverbaus, oder es

werden frei geböschte Baugruben in Verbindung mit einer Absenkung des Grundwasserspiegels unter die Baugrubensohlen mittels einer geschlossenen Wasserhaltung ausgeführt.

Aktuell werden vom AG aus Gründen des Lärm- und Erschütterungsschutzes frei geböschte Baugruben in Verbindung mit einer geschlossenen Wasserhaltung favorisiert.

In den vorhandenen Dammschüttungen und in den quartären Sanden beträgt der zulässige Böschungswinkel bei Böschungshöhen bis 5,0 m unter Voraussetzung einer zuverlässigen Absenkung des Grundwasserspiegels bis mindestens 0,5 m unter die Baugrubensohlen (siehe Kapitel 3.5) 45°. Bei Böschungshöhen > 5,0 m (z. B. im Bereich der Anschlussdämme) ist auf halber Höhe der Böschung eine Berme mit einer Mindestbreite von 2,0 m anzuordnen. Der Entengraben ist bauzeitlich im Baugrubenbereich zu verrohren und um die Baugrube herumzuführen.

Für die Ausbildung der Baugruben sind die Hinweise der DIN 4124 sowie des Arbeitskreises „Baugruben“ (EAB) der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau /U 39/ zu beachten. Darüber hinaus sind in gleisnahen Bereichen die Vorgaben der Ril 836.4305 /U 34/ zu beachten

Generell ist die Art und Dimensionierung des Verbaus in Abhängigkeit der auftretenden Lasten vom Statiker festzulegen und rechnerisch nachzuweisen.

### **3.5 Wasserhaltung**

Die Wasserhaltung ist für den bauzeitlichen Bemessungswasserstand bei 308,5 m NHN zu dimensionieren.

Die Baugrubengeometrien für die EÜ Entengraben, für das Überwerfungsbauwerk und die Stützwände sind in Kapitel 3.4.1 beschrieben.

Der Grundwasserspiegel ist bauzeitlich bis mindestens 0,5 m unter geplante Aushubsohle abzusenken. D. h. es ergeben sich etwa folgende Absenkziele bzw. erforderlichen Absenkungen:

- Baugrube EÜ Entengraben:  $305,8 \text{ m NHN} - 0,5 \text{ m} = 305,3 \text{ m NHN}$  (Absenkung: rd. 3,2 m)
- Baugrube EÜ Überwerfungsbauwerk:  $307,5 \text{ m NHN} - 0,5 \text{ m} = 307,0 \text{ m NHN}$  (Absenkung: 1,5 m) bzw.  $308,1 \text{ m NHN} - 0,5 \text{ m} = 307,6 \text{ m NHN}$  (Absenkung: rd. 0,9 m)
- Baugruben Stützwände: voraussichtlich  $308,1 \text{ m NHN} - 0,5 \text{ m} = 307,6 \text{ m NHN}$  (Absenkung: rd. 0,9 m)



Für die Absenkung des Grundwasserspiegels wird eine geschlossene Wasserhaltung erforderlich. Angesichts der notwendigen Absenktiefen und der relativ hohen Durchlässigkeit der anstehenden nicht und schwach bindigen quartären Sanden (SE, SW, SU, Schichten 2.1.2, 2.1.3, 2.2.2, 2.2.3, 2.3.2, 2.3.4) bietet sich hierfür eine geschlossene Wasserhaltung mittels Schwerkraftbrunnen (Tiefbrunnen) an.

Basierend auf den vorliegenden Untersuchungsergebnissen kann für eine Vordimensionierung der geschlossenen Wasserhaltung von folgenden Durchlässigkeitsbeiwerten ausgegangen werden:

- Ermittlung der erforderlichen Brunnenanzahl  $1 \times 10^{-4}$  m/s
- Ermittlung der zu pumpenden Wassermenge  $8 \times 10^{-4}$  m/s

Die Durchlässigkeitsbeiwerte sind vor Beginn der Baumaßnahme durch Pumpversuche in vorab hergestellten Wasserhaltungsbrunnen zu verifizieren.

Eine überschlägige Vordimensionierung mit dem Programm GGU Drawdown /U 44/ ergibt eine Anlage mit 4 Brunnen mit einem Brunnenaussendurchmesser von 900 mm und einer Tiefe inkl. Pumpensumpf von ca. 11 bis 12 m ab derzeitiger Geländeoberkante am Dammfuß, siehe Anlage 9. Die Brunnen werden bis Oberkante Sandsteinersatz (ca. 299,5 m NHN) verfiltert (Filterrohrdurchmesser 300 mm), der Pumpensumpf liegt im Sandsteinersatz.

Im Beharrungszustand ergibt sich überschlägig eine zu pumpende Wassermenge in der Größenordnung von rd. 150 – 170 m<sup>3</sup>/h (rd. 42 - 47 l/s), siehe Anlage 9.

Bei hohen Grundwasserständen kann in den Randbereichen, z. B. im Bereich der Baugruben für die Stützwände eine Ergänzung durch eine offene Wasserhaltung mittel Pumpensümpfen und Drainagegräben erforderlich werden. Alternativ ist auch die Anordnung von ergänzenden Brunnen in den Randbereichen möglich (ergänzende Brunnen im Bereich der nördlichen und südlichen Stützwand).

Die Wasserhaltungsanlage ist nach Abschluss der Planungen (bzw. durch die ausführende Firma) im Detail zu dimensionieren.

Für die Ableitung der anfallenden Wassermengen ist eine ausreichend bemessene Vorflut erforderlich. Denkbar wäre es z. B. das Wasser bachabwärts in den Entengraben einzuleiten. Hierzu ist hydraulische Berechnung durchzuführen.

Die Wasserhaltung und die Einleitung in den Entengraben bedürfen einer wasserrechtlichen Erlaubnis.

Die Wasserhaltung im Bereich der Baugruben für die OLA-Masten bzw. die Lärmschutzwände kann voraussichtlich mittels einer offenen Wasserhaltung erfolgen. Dies ist nach Vorlage von Planunterlagen nochmals zu prüfen.

### 3.6 Widerlagerhinterfüllungen

Bauwerkshinterfüllungen sind gemäß Ril 836 /U 34/ so auszubilden, dass Setzungen am Übergang zwischen Kunstbauwerk und Erdbauwerk infolge von:

- Konsolidierung des Untergrundes,
- Eigenverformung der Hinterfüllung und
- Verkehrsbelastung

minimiert werden.

Die Hinterfüllmaterialien sollen gemäß Ril 836, Modul 836.4106, Bild 2 /U 34/ aus wasserdurchlässigen, grobkörnigen, weit- oder intermittierend gestuften Kies-Sanden (GW, GI, SW, SI nach DIN 18196) mit einem Verdichtungsgrad  $D_{pr} \geq 1,0$  bestehen. Um dies zu erreichen, ist das Material im erdfeuchten Zustand in Lagen von  $d \leq 0,30$  m einzubauen und zu verdichten (Abbildung 15). Die Verdichtung ist im Zuge der Bauausführung kontinuierlich nachzuweisen. Das für den Einbau vorgesehene Material ist im Vorfeld der Baumaßnahme auf seine Eignung hin zu prüfen. Zur Qualitätssicherung im Hinterfüllbereich ist der Prüfumfang gemäß Ril 836.4106, Absatz 9 einzuhalten.

Die Breite des Hinterfüllbereichs muss auf der OK der Hinterfüllung mindestens 5,0 m bzw.  $2 \times H$  (Auffüllhöhe) betragen. Der größere Wert ist maßgebend.

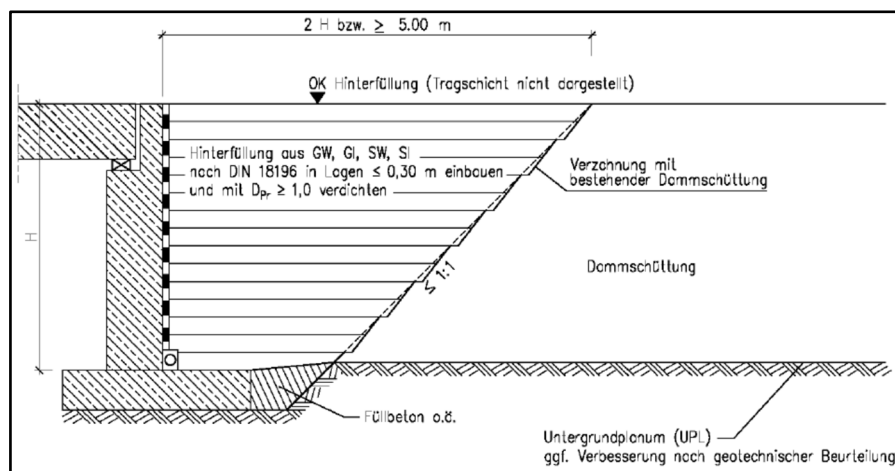


Abbildung 15 – Hinterfüllung bei Strecken mit  $v < 160$  km/h /U 34/

Gemäß Ril 836.4106, Absatz 6 ist zwischen unterschiedlichen bzw. nicht gleichzeitig eingebrachten Schüttstoffen eine Verzahnung entsprechend Modul 836.4103 / ZTVE-StB 09, Absatz 4.3.1.2 herzustellen.

### 3.7 Anschlussdämme

#### 3.7.1 Allgemeines

Für den Neubau des Überwerfungsbauwerks inklusive der im Norden und Süden anschließenden Stützwänden werden die Bestandsdämme bauzeitlich (teilweise) abgetragen und anschließend neu errichtet. Ausgehend von den im Kapitel 3.4.2 für Baugrubenböschungen angegebenen zulässigen Böschungsneigungen, bei Böschungshöhen > 5 m erforderlichen Bermen sowie nach /U 13/ erforderlichen Baustraßen erstreckt sich der Neubaubereich etwa von km 54,310 im Süden bis zum Bauwerk und vom Bauwerk nach Norden bis etwa km 54,495.

#### 3.7.2 Neubau Dämme

In den Bereichen, die im Anschluss an das Bauwerk neu errichtet werden, sind die Dämme entsprechend den Vorgaben der Ril 836.4102A01 /U 34/ mit Regelneigungen gemäß Bild 1 Ril 836.4102A01 (siehe Abbildung 17) neu aufzubauen.

<b>Bild 1 Regelneigungen in Lockergesteinsböschungen an Eisenbahnstrecken (Dämme, Einschnitte)</b>				
Bodenart		Gruppen- symbol nach DIN 18196	Böschungs- höhe	Regel- neigung
grobkörnige Bodenarten	weit gestufte und intermittierend gestufte Kiese	GW, GI	0 m - 12 m	1:1,5
	eng gestufte Kiese, intermittierend gestufte und weit gestufte Sande	GE, SW, SI	0 m - 12 m	1:1,7
	Eng gestufte Sande	SE	0 m - 12 m	1:2,0
gemischt- körnige und feinkörnige Bodenarten	Schluffige/tonige und stark schluffige/tonige Kiese	GU, GU*, GT, GT*	0 m - 6 m 6 m - 9 m 9 m - 12 m	1:1,6
	Schluffige/tonige und stark schluffige/tonige Sande	SU, SU*, ST, ST*		1:1,8
				1:2,0
	leicht, plastische Schluffe oder Tone (nur Einschnitt)	UL, TL,		

Abbildung 16 – Regelneigungen gemäß Bild 1 Ril 836.4102A01 /U 34/

In Höhe Dammaufstandsfläche ist nach Ril 836 /U 34/ bzw. ZTV E-StB 17 /U 35/ ein Verformungsmodul  $E_{v2} \geq 45$  MPa nachzuweisen. Dieser Wert kann bei anstehenden nicht oder

schwach bindigen Sanden durch Nachverdichten erreicht werden. Um eine erfolgreiche Nachverdichtung der anstehenden nicht bindigen Sande zu gewährleisten ist zuoberst eine 0,3 m dicke Schicht aus kornabgestuftem Schotter (GW, GI, z. B. Körnung 0/32 oder 0/56) einzubauen. Bindige Böden oder bindige bis stark bindige Sande sind auszuheben und durch das Dammbaumaterial zu ersetzen.

Für die Schüttung der neuen Anschlussdämme mit einer angenommenen Böschungsneigung von 1 : 1,5 gemäß Regelneigung nach /U 34/, empfehlen wir Böden der Bodengruppe GW, SW, SI, GU und GT zu verwenden. Vom Einsatz von Böden der Bodengruppen UM, UA, TM, TA die zur Herstellung von Böschungen von 1 : 1,5 geeignet sind, raten wir aufgrund von Schwierigkeiten in Bezug auf den Nachweis der Tragfähigkeit und in Bezug auf die Bauausführung ab. Bei der Verwendung von bindigen Böden ist deren Witterungsempfindlichkeit besonders zu beachten. Sie müssen vor ungünstigen Witterungseinflüssen geschützt werden (ausreichendes Quergefälle, unmittelbare Verdichtung, Schüttfläche glatt walzen, usw.). Je nach Verdichtungsgüte sind Eigensetzungen des Dammes möglich.

Die anzuschüttenden weit- oder intermittierend gestuften Kiessande sollten im erdfeuchten Zustand in Lagen von  $d \leq 0,30$  m eingebaut und verdichtet werden. Die Verdichtung ist im Zuge der Bauausführung kontinuierlich nachzuweisen. Das einzubauende Material ist auf seine Eignung hin im Vorfeld der Baumaßnahme zu prüfen. Es ist bei der Dammanschüttung ein Verdichtungsgrad  $D_{Pr} = 0,98 - 1,00$  ( $E_{V2} = 100 - 120$  MPa) nachzuweisen.

Die Dammschüttungen sind nach Möglichkeit schichtweise und nicht abschnittsweise herzustellen, um zeitliche Sprünge in der ansonsten gleichmäßigen und stetigen Setzungsmulde zu vermeiden. Der lagenweise Einbau ist hinsichtlich der Einbaudichte zu kontrollieren.

Im Übergangsbereich zwischen Dammneubau und bestehendem Damm ist in Anlehnung an 836.4102A01 /U 34/ eine Verzahnung herzustellen. D. h. im Bestandsdamm sind Stufen mit Stufenhöhen von ca. 0,6 m und Stufenbreiten von ca. 3 m herzustellen. Der Bestandsdamm ist im Verzahnungsbereich auf den Stufen nachzuverdichten. Zur Ableitung von eventuellen Wasseraustritten aus dem Bestandsdamm sind die Stufen mit einem Gefälle von ca. 5% herzustellen. Das Wasser ist zu fassen und aus dem Erdbauwerk zu leiten.

### 3.8 Bestandsdämme mit Gradientenanhebung

#### 3.8.1 Allgemeines

Im Zuge der Maßnahme wird nach dem vorliegenden Trassierungsentwurf /U 14/ die Gradiente der auf dem Damm der Hochlage (Richtungsgleis Nürnberg) zwischen km 54,070 und km 54,540 um bis zu 41 cm (am Kreuzungsbauwerk) angehoben, siehe nachfolgenden Auszug aus /U 14/.

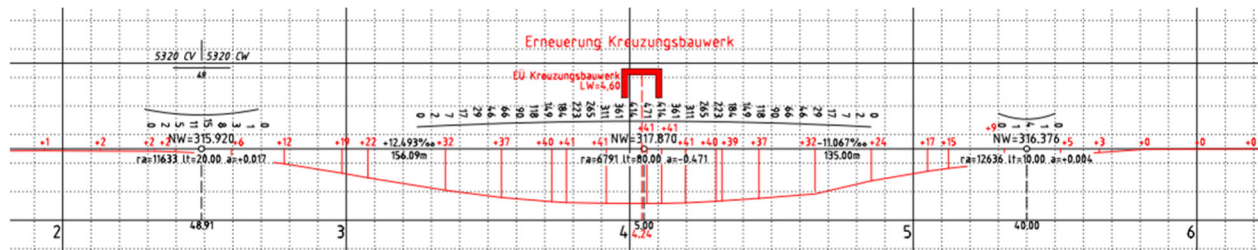


Abbildung 17 – Höhenplan, Auszug aus Trassierungsentwurf /U 14/

Im Anschluss an die Bauwerke werden die Dämme neu gebaut, siehe Kapitel 3.7.

Zwischen dem Beginn der Gradientenanhebung und den Neubaubereichen verbleiben Abschnittslängen von etwa 240 m im Süden und etwa 45 m im Norden, in denen die Gradientenanhebung auf Bestandsdämmen geplant ist. Die Anhebung beträgt nach /U 14/ in diesen Bereichen sowohl im Süden als auch im Norden bis etwa 22 cm. Zudem werden in diesem Abschnitt Randwege neu hergestellt sowie Schallschutzwände und OLA-Masten neu angeordnet.

Aus einer Bestandsvermessung vom Mai 2024 /U 8/ liegen in diesen Abschnitten 4 Querprofile vor. Die vorhandene Dammgeometrie im Bereich der Querprofile ist in Tabelle 11 zusammengestellt. Es zeigt sich, dass die Böschungsneigungen im Bestand nahezu durchgehend steiler sind, als es die Regelneigung nach Ril 836.4102A01 (siehe auch Kapitel 3.7.2, Abbildung 16) in Bezug auf die anstehenden Sande vorsieht.

Tabelle 11: Vorhandene Dammgeometrie

Querprofil	Dammhöhe [m]		Böschungsneigung [-]		Anhebung Gleisachse nach /U 9/ [cm]
	bahnlinks	bahnrechts	bahnlinks	bahnrechts	
km 54,2 + 42.59	2,18	3,85	1 : 2,57	1 : 1,36	3,1
km 54,2 + 87.67	2,97	4,94	1 : 1,72	1 : 1,55	15,4
km 54,4 + 64.57	6,32	6,69	1 : 1,37	1 : 1,42	31,8
km 54,5 + 21.22	7,02	5,20	1 : 1,32	1 : 1,50	10,9

### **3.8.2 Standsicherheit Ist-Zustand und für geplante Maßnahmen nach Stellungnahme EBA-Gutachter /U 16/**

Die Standsicherheit der Bestandsdämme im Ist-Zustand wurde in einer Gutachterlichen Stellungnahme des EBA-Gutachters Dr.-Ing. Lutz Vogt vom 02.09.2016 /U 16/ beurteilt:

*„Die Böschungen vor und hinter dem ÜW Entengraben sind bis zu 7 m hoch und gemäß U 4 (Anmerkung: damalige Unterlagen zum Bauvorhaben) bis 38° steil.*

*Am 25.08.2016 fand eine Begehung der Böschungen durch den EBA-Gutachter im Bereich des ÜW Entengraben statt. Die teilweise sehr steilen Böschungen sind mit Bäumen bewachsen, weisen jedoch keine Anzeichen von Instabilität auf. Es gibt auch keine Anzeichen auf Entwässerungsprobleme.*

*Durch die zuständigen Stellen der DB Netz AG wurde gemäß U 4 (Anmerkung: damalige Unterlagen zum Bauvorhaben) angegeben, dass kein erhöhter Instandhaltungsaufwand angefallen ist. Auch die übergebenen Gleismessschriebe zeigen keine Besonderheiten, die auf Probleme mit der Gleislage hinweisen. Allerdings weisen die teilweise sehr großen Schotterdicken gemäß U 2 (Anmerkung: bezieht sich auf /U 15/) darauf hin, dass es im Laufe der langen Betriebsbelastung Verformungen im Bereich des Planums und Verdichtungen des Dammmaterials im Einflussbereich der Verkehrslasten gegeben hat. Da derzeit keine Gleislageprobleme bekannt sind, darf davon ausgegangen werden, dass die Strecke für die gegenwärtige Gleisbelastung und Streckengeschwindigkeit gebrauchstauglich ist.*

*Die Böschungsoberfläche ist durch dichten Bewuchs mit teils mächtigen Bäumen und von der Böschungsschulter herabgerutschten Schotter gekennzeichnet. Es ist davon auszugehen, dass die Standsicherheit der Böschungsoberfläche maßgeblich durch den Bewuchs und die Schotterauflage gesichert wird.*

*Zusammenfassend wird durch den EBA-Gutachter festgestellt, dass eine ausreichende Standsicherheit der Dammböschung im Ist-Zustand gegeben ist.“*

Zur Standsicherheit der Böschungen für die geplanten Baumaßnahmen ist in der Geotechnischen Stellungnahme des EBA-Gutachters Dr.-Ing. Lutz Vogt vom 02.09.2016 /U 16/ angegeben:

*„Die geplante Gradientenerhöhung um 5 bis 35 cm ist für die bis 7 m hohen Anschlussdämme des ÜW Entengraben als unwesentliche Änderung gemäß Ril 836.7001, 4 (3) einzustufen.“*



Die damals geplante Gradientenerhöhung entspricht im Wesentlichen der aktuell geplanten Anhebung. Es wird also davon ausgegangen, dass die Standsicherheit der Bestandsböschungen grundsätzlich auch für die aktuell geplanten Maßnahmen gegeben ist.

Nachfolgend wird jedoch die Dammstandsicherheit in den Bereichen mit Gradientenanhebungen anhand der aktuell vorliegenden Vermessung rechnerisch beurteilt.

### 3.8.3 Standsicherheit Bestandsdämme mit geplanter Gradientenanhebung

Für die vorliegenden Querprofile /U 9/ wurden Standsicherheitsberechnung mit GGU Stability /U 41/ nach dem Verfahren von Bishop für die Bemessungssituation BS-P nach DIN 1054 /U 33/ und DIN 4084 /U 36/ durchgeführt mit:

- Schichtaufbau gemäß in der Nähe gelegenen Aufschlüssen aus /U 15/ und /U 20/
- charakteristischen Bodenkennwerten gemäß Kapitel 2.6.2
- charakteristischer Verkehrslast von 52 kN/m<sup>2</sup> mit einer Breite von 3 m in einer Belastungsebene, die 0,70 m unter SO liegt (Ersatzstreifenlast nach Ril 836.2001 3.1 (3)) und charakteristische Verkehrslast von 2,5 kN/m<sup>2</sup> zur Berücksichtigung von Verkehrslasten auf Randwegen (nach Ril 836.2001 4 (1))
- Grundwasserstand in Höhe des Bemessungswasserstands bei 409,0 mNHN gemäß Kapitel 2.5.7

Die Ergebnisse sind in Tabelle 12 zusammengefasst.

Tabelle 12: Ergebnisse Standsicherheitsberechnung

Querprofil	Dammseite	Dammhöhe [m]	Böschung- neigung [-]	Anhebung Gleisachse nach /U 9/ [cm]	Auf- schlüsse	Böschungsbruch- berechnung nach DIN 4084 für BS-P Ausnutzungsgrad $\mu$ [-]
km 54,2 + 42.59	bahnlinks	2,18	1 : 2,57	3,1	(BS 31/16, DPL 31/16)	0,86
	bahnrechts	3,85	1 : 1,36			1,09
km 54,2 + 87.67	bahnlinks	2,97	1 : 1,72	15,4	(BS 31/16, DPL 31/16)	1,14
	bahnrechts	4,94	1 : 1,55			1,18
km 54,4 + 64.57	bahnlinks	6,32	1 : 1,37	31,8	BS11, DPH11, BS9, DPH9	1,17
	bahnrechts	6,69	1 : 1,42			1,18
km 54,5 + 21.22	bahnlinks	7,02	1 : 1,32	10,9	BS32/16, DPL32/16 , BS46/16, DPH46/16	1,32
	bahnrechts	5,20	1 : 1,50			1,20

D. h. die bestehenden Dammböschungen weisen überwiegend keine ausreichenden Standsicherheiten auf. Es ist darauf hinzuweisen, dass für die Standsicherheitsberechnungen meist keine Aufschlüsse unmittelbar im Bereich des Querprofils vorlagen, sondern die Untergrundverhältnisse von Aufschlüssen in der näheren Umgebung extrapoliert wurden. Tatsächlich können also im Bereich der Querprofile günstigere Untergrundverhältnisse vorliegen oder die Standsicherheit wird in situ durch vorhandene Einbauten (z. B. Rammpfähle für Schallschutzwand, Signale o. ä.) bzw. durch die Wurzeln des Baumbestandes (siehe auch /U 16/) erhöht.

Für die Ausführung der Gradientenanhebung wird eine Sanierung der Bestandsdämme empfohlen. Angaben zu möglichen Sanierungsmaßnahmen werden in Kapitel 3.8.4 gemacht.

### **3.8.4 Sanierung Bestandsdämme**

Die durchgeführten Standsicherheitsuntersuchungen zeigen, dass die rechnerische Standsicherheit großteils nicht gegeben ist. Im Vorfeld der geplanten Gradientenanhebungen werden somit Ertüchtigungen der Dammbauwerke erforderlich.

Bei der Wahl der Sanierungsmaßnahmen sind u. a. folgende Vorgaben zu berücksichtigen:

- Auf den Dämmen werden OLA-Masten und Lärmschutzwände gegründet.
- Es sind Verbreiterungen am Dammkopf für die Anordnung von ausreichend dimensionierten Randwegen geplant.
- Teilweise ist im Bereich der Dammfüße kein oder nur begrenzt Platz vorhanden (Baumbestand, Lärmschutzwände, Nachbargleise usw.).
- Die Maßnahmen müssen in einer Sperrpause von ca. 6 Monaten Dauer durchgeführt werden.

Für die Sanierung der Bestandsdämme sind daher bei den vorliegenden Platz-, Untergrund- und Grundwasserverhältnissen sowie beim vorhandenen Dammaufbau die nachfolgenden Maßnahmen denkbar:

- Variante 1 Böschungsvernagelungen
- Variante 2 Erdbetonstützscheiben
- Variante 3 Neubau von Stützwänden (z. B. Winkelstützwänden) im Bereich der Dammfüße und Anpassung der Dammneigungen oberhalb der Stützwände
- Variante 4 Anschüttungen, Dammverbreiterungen (lokal)

Gemäß Ril 836.4102A01 Abschnitt 3 /U 34/ sollen Standsicherheitserhöhungen von bestehenden Böschungen mit Vernagelungen oder Erdbetonstützscheiben ausgeführt werden, d. h. mit den genannten Varianten 1 oder 2.

Im Sinne der Ril 836.4102A01 Abschnitt 3 /U 34/ dienen Böschungsvernagelungen (Variante 1) der Erhöhung der Sicherheit gegen Bruch auf inneren Gleitlinien der Böschung. Im Unterschied dazu werden Bodenvernagelungen nach zugelassenen Verfahren des DIBt als Stützkörper an Geländesprüngen zur Aufnahme von Erddrücken ausgebildet (siehe hierzu Modul 836.4302). Da die Abschnittslänge für eine Vernagelung mehr als 100 m beträgt und die Dammhöhe teilweise mehr als 6 m ist bei Anwendung des Verfahrens nach Ril 836.4102A01 eine UiG/ZiE einzuholen

Als Alternative zur Vernagelung verbessern Erdbetonstützkörper (Variante 2) die Bodeneigenschaften an den Böschungsflanken und sorgen für eine Stabilisierung an den Dammflanken. Stützscheiben sind nach Ril 836.4102A01 Abschnitt 3 /U 34/ scheibenartige Tragelemente in Böschungen, die mit Lieferbeton oder durch Durchmischen des anstehenden Bodens mit Bindemitteln ("Erdbeton") hergestellt werden und die durch Aufnahme von Schubkräften aus den Böden zwischen den Scheiben die Gesamtstandsicherheit der Böschung erhöhen. Die Erdbetonstützscheiben können bei den hier vorhandenen Böschungshöhen von < 10 m entsprechend den Bedingungen der bauaufsichtlichen Zulassungen des EBA nach dem sogenannten HZ-Verfahren (Herstellen von Erdbeton in situ) hergestellt werden. Die Maßnahme kann bei den beschränkten Platzverhältnissen z. B. mittels Schreitbaggern ausgeführt werden.

Weiterhin denkbar wäre die Herstellung von Stützwänden (z. B. Winkelstützwänden) im Bereich der Dammfüße (Variante 3). Hierzu werden Maßnahmen zur Baugrubensicherung im Bereich der Dammfüße (frei geböschte Baugruben, Baugrubenverbau z. B. mittels Spundwandverbau, Trägerbohlwandverbau oder Spritzbetonsicherung (mit Vernagelung)) in Verbindung mit Wasserhaltungsmaßnahmen erforderlich. Die Variante ist demnach mit einem relativ hohen technischen und zeitlichen Aufwand bei der Bauausführung verbunden. Es entsteht aber ein sicheres und wartungsarmes Bauwerk.

Im nördlichen Bereich der Maßnahme würde nach Rodung des Baumbestands ausreichend Platz für eine erdbauliche Verbreiterung des Bestandsdamms (Variante 4) zur Verfügung stehen. Bei der Dammverbreiterung wird Liefermaterial bspw. der Bodengruppen GW/GI verzahnt an den Bestand angebaut, lagenweise verdichtet und die Böschungsneigung somit abgeflacht. Denkbar wäre es auch, den Neubaubereich entsprechend nach Norden zu erweitern und die Dammabschnitte komplett neu aufzubauen.

Alle 4 Varianten sind grundsätzlich (Variante 4 nur lokal) machbar. Nach jetzigem Stand bieten sich in erster Linie die Varianten 1 mit einer Bodenvernagelung sowie vor allem die Variante 2 mit Erdbetonstützkörpern aufgrund der flexiblen Ausführbarkeit bei den vorliegenden Platzverhältnissen an.

Für eine endgültige Variantenentscheidung und für eine zutreffende Dimensionierung der Sanierungsmaßnahmen werden ergänzende Baugrund- und Laboruntersuchungen nach den Vorgaben der DIN EN 1997-2 (EC7) /U 32/ in Verbindung mit DIN 1054 /U 33/ erforderlich. Die vorliegenden Aufschlüsse reichen hierfür nicht aus.

### **3.9 Versickerungsfähigkeit**

Gemäß Arbeitsblatt DWA-A 138 „Planung, Bau und Betrieb von Anlagen zur Versickerung von Niederschlagswasser“ /U 38/ sind Böden für Versickerungsanlagen geeignet, deren Wasserdurchlässigkeitsbeiwerte  $k_f$  im Bereich zwischen  $10^{-3}$  m/s und  $10^{-6}$  m/s liegen. Die Mächtigkeit des Sickerraums sollte bezogen auf den mittleren höchsten Grundwasserstand mindestens 1 m betragen, um eine ausreichende Sickerstrecke für eingeleitete Niederschlagsabflüsse zu gewährleisten.

Die oberflächennah anstehenden Baugrundsichten 2.1.1, 2.1.2, 2.1.3, 2.2.1, 2.2.2, 2.2.3, 2.3.1, 2.3.2 und 2.3.3 (quartäre Sande) weisen eine für die Herstellung von Versickerungsanlagen ausreichende Sickerfähigkeit auf. Tieferliegende Schichten liegen deutlich unter dem Grundwasserspiegel und sind für die Versickerung von Oberflächenwasser nicht relevant.

Zur Ermittlung des Bemessungs- $k_f$ -Wertes sind die Mittelwerte der in Tabelle 4 (Kapitel 2.6.1) angegebenen Werte nach /U 38/ mit dem Korrekturfaktor 0,2 (Sieblinienauswertung) zu multiplizieren.

Der mittlere höchste Grundwasserstand ist mit 308,5 m NHN anzunehmen.

### **3.10 Einfluss der Baumaßnahme auf angrenzende Bebauungen / Gleisanlagen**

Bei Rammarbeiten, z. B. Rammrohrgründungen, Spundwände o. ä., ist mit Lärmemissionen und Erschütterungen zu rechnen, die im Bereich der im Westen angrenzenden Bebauung wahrnehmbar sind. Die gesetzlich zulässigen Emissionsgrenzwerte sind einzuhalten. Ggf. sind Schwingungsmessungen an den umliegenden Gebäuden erforderlich. Ein entsprechender Fachmann sollte hierfür hinzugezogen werden.

Bei der angedachten Grundwasserabsenkung um bis zu 3,2 m (siehe Kapitel 3.5) ist in den anstehenden stark durchlässigen quartären Sanden mit einem relativ großen Absenktrichter zu rechnen. Absenkmaße von mehr als 0,5 m, d. h. Maße, die über der natürlichen Schwankung des Grundwasserspiegels liegen, sind überschlägig im Umkreis von etwa 200 m um die Baugrube zu erwarten. D. h. der Absenktrichter erstreckt sich auch auf die im Westen des Baufeldes vorhandenen bebauten Privatgrundstücke.

Die Grundwasserabsenkung erfolgt in mindestens mitteldicht gelagerten Sanden. Die Sande besitzen eine gute Tragfähigkeit und geringe Zusammendrückbarkeit. Setzungen infolge des Wegfalls des Auftriebs durch die Grundwasserabsenkung sind daher nur in einer Größenordnung von weniger als 1 cm in der unmittelbaren Umgebung zu erwarten. Im Bereich der weiter entfernt liegenden Bebauung, ist aufgrund der wesentlich geringeren Wasserabsenkung und einer sehr flachen Setzungsmulde von zu vernachlässigenden Setzungen bzw. bauwerksverträglichen Setzungsdifferenzen auszugehen.

Diese Angaben sind im Zuge eines Gutachtens im Wasserrechtlichen Verfahrens noch zu verifizieren.

Es wird eine Beweissicherung der umliegenden Gebäude vor Baubeginn empfohlen. Zudem empfiehlt sich zur Beweissicherung die Errichtung von Grundwassermessstellen im Bereich der Nachbargrundstücke.

### **3.11 Bautechnische Wiederverwendbarkeit von Aushubmassen**

Die im Zuge der geplanten Baumaßnahme auszuhebenden Böden sind nur bedingt oder nicht für eine bautechnische Verwertung vor Ort geeignet. Ohne zusätzliche Prüfung können diese Böden in Bereichen ohne besondere Anforderungen an Durchlässigkeit, Verdichtungsgrad, Frostempfindlichkeit usw. als Auffüllmaterial eingesetzt werden. Fremdbestandteile wie Wurzeln, Bauschutt, o.ä. sind vor einer Wiederverwendung der Böden auszusortieren. Ausgebaute Oberböden sind zur Rekultivierung zu verwenden. Des Weiteren sind die Angaben der DIN 18196 zur bautechnischen Wiederverwendbarkeit der Böden zu beachten.

Die im Zuge der geplanten Baumaßnahmen im Erdbau auszuhebenden Erdmassen stellen neben dem Gleisschotter, Packlagen und Oberböden die aufgefüllten grob- und gemischtkörnigen Sande und Kiese (Schichten 1.2.1, 1.3.1, 1.4.1, 1.4.2, 1.5.1, 1.5.2, 1.6.1, 1.6.2), die aufgefüllten Schluffe und Tone (Schichten 1.7.1, 1.7.2, 1.8.2, 1.8.3) sowie die anstehenden nicht bindigen, schwach bindigen und bindigen Sande (Schichten 2.1.1, 2.1.2, 2.1.3, 2.2.1, 2.2.2, 2.2.3, 2.3.1, 2.3.2, 2.3.3, 2.4.1, 2.4.2, 2.4.3) dar.

Die in vorliegenden Aufschlüssen erkundeten sandigen und kiesigen Auffüllungen (Schichten 1.2.1, 1.3.1, 1.4.1, 1.4.2, 1.5.1, 1.5.2) sind nicht als Tragschichtmaterial geeignet, können aber bei begrenztem Feinkornanteil von  $< 15 \%$  aus bodenmechanischer Sicht bei geeignetem Wassergehalt und lagenweiser, ausreichender Verdichtung zur Hinterfüllung von Arbeitsbereichen wieder eingebaut werden.

Ausgehobene Böden der anderen Schichten, also gemischtkörnige Böden mit Feinkornanteilen von  $> 15 \%$  (Bodengruppen GU\* / GT\* / SU\* / ST\*) und bindige Böden (U / T) sind je nach natürlichem Wassergehalt nur bedingt oder nicht für den Wiedereinbau geeignet. Zu feuchte gemischtkörnige Böden und bindige Böden von weicher bis steifer Konsistenz können nur nach bodenverbessernden Maßnahmen, wie z. B. dem Einfräsen von Kalk-Zement-Mischbindemittel vor dem Einbau / Verdichten, für eine setzungsarme Rückverfüllung herangezogen werden. Bindige Böden mit einer  $\leq$  sehr weichen, bzw. breiigen Konsistenz und vernässte Böden sind nicht für einen setzungsarmen Wiedereinbau geeignet und sollten abgefahren werden.

Sind bodenverbessernde Maßnahmen vorgesehen, empfehlen wir, mit ausreichendem zeitlichem Vorlauf eine Eignungsuntersuchung des für den Wiedereinbau vorgesehenen Aushubmaterials zu veranlassen. Ziel ist dabei die Festlegung der benötigten Einbauparameter (insbesondere des benötigten Bindemittelanteils und des optimalen Wassergehalts  $w_{opt}$ ), um die gewünschte Verdichtung von z. B.  $D_{Pr} \geq 100 \%$  und / oder Festigkeit zu erreichen.

Werden wasserempfindliche Böden (Feinkorngesamtgehalt  $> 5 \%$ ) für den Wiedereinbau zwischengelagert, so sind diese gegen Witterungseinflüsse zu schützen (z. B. Lagerung auf Mieten, Abdeckung mit Folien etc.).

Die zuvor gemachten Aussagen beziehen sich ausschließlich auf die bautechnische Wiederverwendbarkeit von Aushubböden. Vor einer Wiederverwendung sind die Ergebnisse der abfalltechnischen Untersuchungen unbedingt zu berücksichtigen.

#### **4 Abfalltechnische Untersuchungen**

Hinsichtlich abfalltechnischer Untersuchungen wird auf den Geo- und Umwelttechnischen Bericht des Büros gbm /U 18/ verwiesen.

#### **5 Homogenbereiche**

Die Einteilung der angetroffenen Böden in Homogenbereiche gemäß VOB – Teil C ist in Anlage 11 (Homogenbereiche) enthalten.



## 6 Schlussbemerkungen und Hinweise

Die DB InfraGO AG plant an der Strecke 5320 Nürnberg – Treuchtlingen die Erneuerung der Eisenbahnüberführungen Entengraben bei km 54,409 und Überwerfungsbauwerk bei km 54,410 im Süden von Nürnberg. Die Ersatzneubauten sollen an gleicher Stelle wie der Bestand errichtet werden. Die EÜ Entengraben wird in das Überwerfungsbauwerk integriert. Die im Norden und Süden anschließenden Stützwände sind als Winkelstützwände geplant. Im Zuge der Maßnahme wird die Gradienten der Anschlussdämme (Richtungsgleis Nürnberg, Hochlage) zwischen km 54,070 und km 54,540 um bis zu 41 cm (am Kreuzungsbauwerk) angehoben.

Zur Beurteilung der Baugrundverhältnisse im Bereich der EÜs stehen Aufschlüsse zur Verfügung, welche im Zuge der Erstellung der Berichte /U 15/ und /U 17/ sowie /U 21/ und /U 22/ ausgeführt wurden.

Nach den vorliegenden Untersuchungsergebnissen stehen in Höhe der Gründungsunterkanten mindestens mitteldicht gelagerte, teilweise schwach kiesige bis kiesige, teilweise schwach bindige, quartäre Sande (SE, SW, SU, ST) an. Vereinzelt sind dünne Schlufflagen (TL, TM) vorhanden, örtlich zuoberst auch schluffige Sande (SU\*). Die quartären Ablagerungen werden in größerer Tiefe von zu schwach bindigen und bindigen Sanden (SU, ST, SU\*, ST\*) verwittertem Sandstein unterlagert. Die Schichtgrenze befindet sich in den Bohrungen zwischen rd. 299,6 m NHN (BK3) und rd. 301,4 m NHN (BS1). Im Sandsteinersatz sind teilweise steife und halbfeste Schluff- bzw. Tonlagen (TL, TM) vorhanden. Die Sande sind mitteldicht und dicht gelagert. Teilweise sind Übergänge zu mürbem Sandstein vorhanden. Mit der Tiefe folgt Sandsteinfels.

Im Projektgebiet wurden im Zeitraum von Dezember 2014 bis Dezember 2023 im obersten Grundwasserstockwerk in den quartären Sanden Grundwasserstände zwischen etwa 307,6 und 308,3 m NHN gemessen, mit einem Mittelwert bei etwa 308,0 m NHN

Basierend auf den vorliegenden Grundwasserbeobachtungen ist daher, analog wie in /U 17/ empfohlen, der bauzeitliche Bemessungswasserstand, auf 308,5 m NHN anzunehmen (mittlerer Wasserstand + 0,5 m) und der Bemessungswasserstand auf 309,00 m NHN (mittlerer Wasserstand + 1,0 m).

Die anstehenden Böden besitzen eine ausreichende Tragfähigkeit für eine Flachgründung der Bauwerke. Für die Gründungsarbeiten, insbesondere beim Rückbau des Bestands und beim Bau der EÜ Entengraben werden Wasserhaltungsmaßnahmen erforderlich.

Bei den vorliegenden Untergrund-, Grundwasser- und Platzverhältnissen kann die vom AG aufgrund von geringeren Lärm- und Erschütterungsemissionen favorisierte Variante mit freigebochten Baugruben in Verbindung mit einer Absenkung des Grundwasserspiegels unter die Baugrubensohlen mittels einer geschlossenen Wasserhaltung ausgeführt werden. Bei einer geschlossenen Wasserhaltung erstreckt sich der Absenktichter auch auf die im Westen des Baufeldes vorhandenen bebauten Privatgrundstücke. Bei den anstehenden mindestens mitteldicht gelagerten Sanden, aufgrund der wesentlich geringeren Wasserabsenkung im Bereich der Nachbarbebauung und aufgrund einer sehr flachen Setzungsmulde ist im Bereich der Nachbargrundstücke von zu vernachlässigenden Setzungen bzw. bauwerksverträglichen Setzungsdifferenzen auszugehen.

Für die OLA-Masten und die Schallschutzwände ist eine Tiefgründung mittels Rammrohrgründung aus geotechnischer Sicht möglich.

Für den Neubau des Überwerfungsbauwerks inklusive der im Norden und Süden anschließenden Stützwänden werden die Bestandsdämme bauzeitlich (teilweise) abgetragen und anschließend neu errichtet. Hier sind die Dämme entsprechend den Vorgaben der Ril 836.4102A01 /U 34/ mit Regelneigungen gemäß Bild 1 Ril 836.4102A01 neu aufzubauen.

Standortsicherheitsuntersuchungen zeigen, dass für die Bestandsdämme außerhalb des Neubaubereichs, in denen Gradientenanhebungen geplant sind, die rechnerische Standsicherheit großteils nicht gegeben ist. Es werden somit Ertüchtigungen der Dammbauwerke erforderlich. Für eine Sanierung bieten sich nach jetzigem Stand in erster Linie eine Bodenvernagelung oder Erdbetonstützkörper (HZ-Verfahren) an.

Für eine endgültige Variantenentscheidung und für eine zutreffende Dimensionierung der Sanierungsmaßnahmen werden ergänzende Baugrund- und Laboruntersuchungen nach den Vorgaben der DIN EN 1997-2 (EC7) /U 32/ in Verbindung mit DIN 1054 /U 33/ erforderlich. Die vorliegenden Aufschlüsse reichen hierfür nicht aus.

Aufgestellt

**München, den 15.07.2024**

Dipl.-Ing. Gerald Bauer

DB Engineering & Consulting GmbH