

GRUNDBAUINGENIEURE STEINFELD UND PARTNER

BERATENDE INGENIEURE mbB

Fernwärmesystemanbindung West (FWS-West)

Los 2: Elbedüker

mit dem Startschacht im Jachtweg

und dem Zielschacht im Hindenburgpark

1. Bericht (Revision 1)

Geotechnisches und hydrogeologisches Gutachten
sowie orientierende chemische Untersuchung
hinsichtlich Wiederverwertbarkeit und Entsorgung

Hamburg, den 30. November 2020 - Auftr.-Nr. 023581-2

REIMERSBRÜCKE 5, D-20457 HAMBURG · TELEFON (040) 38 91 39-0 · TELEFAX (040) 380 91 70



Inhaltsverzeichnis

	<u>Seite</u>
1. Veranlassung.....	1
2. Unterlagen.....	2
3. Geplantes Bauvorhaben	4
3.1 Generelle Angaben	4
3.2 Tunnelbauwerk.....	5
3.3 Startschacht	5
3.4 Zielschacht.....	6
4. Generelle geologische und hydrogeologische Angaben zur Trasse	7
4.1 Morphologische Verhältnisse.....	7
4.2 Hydrogeologische Verhältnisse.....	8
5. Baugrund- und Wasserverhältnisse	10
5.1 Baugrunderkundung	10
5.1.1 Baugrundaufschluss	10
5.1.2 Bohrhindernisse	11
5.1.3 Bohr- und Sondierprofile und geologischer Schnitt	12
5.2 Baugrundaufbau	15
5.2.1 Generelle Angaben.....	15
5.2.2 Auffüllungen	17
5.2.3 Holozäne Ablagerungen.....	18
5.2.4 Weichselzeitliche Ablagerungen	20
5.2.5 Saalezeitliche Ablagerungen.....	21
5.2.6 Elsterzeitliche Ablagerungen	23
5.3 Lagerungsdichte der Sande	29
6. Wasserverhältnisse.....	30
6.1 Wasserstände	30
6.2 Grundwasserzusammensetzung.....	31

Seite

7.	Bodenmechanische Laborversuche.....	32
7.1	Allgemeines.....	32
7.2	Organische Weichschichten	33
7.2.1	Wassergehalte	33
7.2.2	Wichte	34
7.3	Weichselzeitliche Sande und Kiese.....	34
7.3.1	Korngrößenverteilung	34
7.3.2	Wasserdurchlässigkeit.....	35
7.4	Elsterzeitlicher Lauenburger Ton	35
7.4.1	Wassergehalte	35
7.4.2	Korngrößenverteilung	36
7.4.3	Wichte	36
7.4.4	Glühverlust.....	37
7.4.5	Kalkgehalt	37
7.4.6	Konsistenzgrenzen	38
7.4.7	Zusammendrückbarkeit.....	38
7.4.8	Undräßierte Scherfestigkeit	39
7.4.9	Effektive Scherparameter.....	39
7.4.10	Quellversuche	40
7.4.11	Tonmineralanalysen.....	40
7.5	Elsterzeitliche Sande	41
7.5.1	Korngrößenverteilung	41
7.5.2	Wasserdurchlässigkeit.....	42
7.6	Geschiebemergel	43
7.6.1	Wassergehalte	43
7.6.2	Korngrößenverteilung	43
7.6.3	Wichte	44
7.6.4	Glühverlust.....	44
7.6.5	Undräßierte Scherfestigkeit	45
7.6.6	Effektive Scherparameter.....	45



Seite

7.7	Saalezeitliche Sande	46
7.7.1	Korngrößenverteilung	46
7.7.2	Wasserdurchlässigkeit.....	46
7.8	Miozäner Glimmerton	47
7.8.1	Wassergehalte	47
7.8.2	Korngrößenverteilung	47
7.8.3	Wichte	48
7.8.4	Glühverlust.....	48
7.8.5	Kalkgehalt	48
7.8.6	Konsistenzgrenzen	49
7.8.7	Schrumpfgrenze	49
7.8.8	Zusammendrückbarkeit.....	50
7.8.9	Undrainede Scherfestigkeit	50
7.8.10	Effektive Scherparameter	50
7.8.11	Quellversuche	51
7.8.12	Tonmineralanalysen.....	52
7.9	Abrasivität der sandigen und gemischtkörnigen Böden.....	52
8.	Charakteristische Bodenkennwerte.....	54
9.	Orientierende chemische Untersuchung hinsichtlich Wiederverwertbarkeit und Entsorgung	58
9.1	Allgemeine Beurteilungsgrundlagen zur Prüfung von Verwertungs- bzw. Entsorgungsmöglichkeiten	58
9.2	Probenauswahl, Zusammenstellung von Mischproben, Untersuchungsumfang und Ergebnisse	60
9.3	Bewertung der orientierenden chemischen Untersuchungen	62
9.3.1	Startschacht	62
9.3.2	Zielschacht	64
9.3.3	Tunnel	65

Seite

10.	Geotechnische Empfehlungen und Bemessungsangaben zum Tunnelvortrieb und Tübbingausbau	67
10.1	Baugrund und Wasser im Trassenbereich, Bemessungswasserstände	67
10.2	Angaben zur Wahl der Tunnelbohrmaschine	70
10.3	Bemessung des Tunnelausbaues	75
10.4	Stützung der Ortsbrust, Ausblärsicherheit	78
10.5	Auswirkung des Vortriebs auf die Umgebung	79
10.6	Angaben zum Bodentransport und zur Bodenconditionierung	79
10.7	Baubegleitende Messungen	79
10.8	Zustandsfeststellung	80
11.	Geotechnische Empfehlungen und Bemessungsangaben für die Schachtbaugruben und Schachtbauwerke	80
11.1	Baugrund und Wasser, Bemessungsprofil und Bemessungswasserstände	80
11.1.1	Startschacht (Dükeroberhaupt)	80
11.1.2	Zielschacht (Dükerunterhaupt)	81
11.2	Bemessung der Schachtwände und Schachsohlen (Endzustand)	83
11.3	Bauzeitliche Bemessung der Schachtbaugruben	83
11.4	Herstellung der Schlitzwände	86
11.5	Rückverankerung der Baugrubenwände	86
11.6	Rückverankerung der Unterwasserbetonsohlen	88
11.6.1	Bemessung der verpressten Mikropfähle	88
11.6.2	Herstellung der verpressten Mikropfähle	89
11.6.3	Hebungen	91
11.7	Baugrubenaushub, bauzeitliche Trockenhaltung und Auftriebssicherung	91
11.8	Trockenhaltung und Auftriebssicherheit der Schachtbauwerke im Endzustand	92
11.9	Bauwerkssetzungen	93
12.	Zusammenfassung	94



Anlagenverzeichnis

023581-2/1	Lage- und Übersichtsplan, M 1 : 20.000/2000
023581-2/2	Geologischer Längsschnitt, M 1 : 2.000/200
023581-2/3.1 – 3.4	Bohrprofile und Sondierdiagramme
023581-2/4.1.1 – 4.4.2	Grundwasserganglinien
023581-2/5.1 – 5.5	Grundwasseranalysen
023581-2/6.1 – 6.5	Grundwasseranalysen – Auswertung Einleitparameter
023581-2/7.1.1 – 7.7.3	Kornverteilungskurven
023581-2/8.1.1 – 8.2.3	Konsistenzgrenzen
023581-2/9.1.1 – 9.2.1	Kompressionsversuche
023581-2/10.1.1 – 10.3.6	Einaxiale Druckversuche
023581-2/11.1.1 – 11.3.3	Scherversuche
023581-2/12.1.1 – 12.2.2	Quellversuche
023581-2/13	Kornformuntersuchungen und Tonmineralanalysen
023581-2/14.1 und 14.2	Bemessungsprofile
023581-2/15.1 – 15.14	Homogenbereiche H 1 bis H 14
023581-2/16.1 – 16.3	Analysenergebnisse der chemischen Bodenuntersuchung
023581-2/17.1 – 17.3	Übersicht Zuordnungswerte und Deponieklassen



Wärme Hamburg GmbH
Herrn Lassen-Petersen
Andreas-Meyer-Straße 8
22113 Hamburg

Reimersbrücke 5
20457 Hamburg
Telefon: 040 389139-0
Telefax: 040 3809170
www.steinfeld-und-partner.de
Steuer-Nr.: 48/661/00263
USt-IdNr.: DE 117943142
DNV GL Zertifiziertes Management-
System mit dem Standard SCC*: 2011

Auftragsnummer

023581-2

30. November 2020
- Pr/An/Na -

BV Fernwärmesystemanbindung West (FWS-West)
Los 2: Elbedüker mit dem Startschacht im Jachtweg
hier: Geotechnisches und hydrogeologisches Gutachten
sowie orientierende chemische Untersuchung hinsichtlich
Wiederverwertbarkeit und Entsorgung

Anlagen: s. Anlagenverzeichnis

1. Bericht (Revision 1)

1. Veranlassung

Für die Anbindung der geplanten KWK-Anlage am Standort Dradenau an das bestehende Fernwärmesystem ist der Neubau einer Fernwärmesystemanbindung (FWS) West mit einem Startpunkt südlich der Elbe und südwestlich des Klärwerks Dradenau in Hamburg-Waltershof sowie mit einem Endpunkt nördlich der Elbe in der Notkestraße in Hamburg-Bahrenfeld geplant.

Das Los 2 umfasst den Trassenabschnitt der Unterquerung der Elbe zwischen dem geplanten Startschacht im Jachtweg in Waltershof und dem Zielschacht im Hindenburgpark. Der vorliegende Bericht enthält die Baugrundbeurteilung und die geotechnischen Empfehlungen sowie



die orientierende chemische Untersuchung hinsichtlich der Wiederverwertbarkeit und Entsorgung der Aushubböden für den im Los 2 geplanten Abschnitt der FWS West.

2. Unterlagen

Für die Bearbeitung stehen uns die nachfolgend genannten Unterlagen zur Verfügung:

Von der WTM Engineers GmbH, Hamburg:

- U 2.1 FWS-West Entwurfsplanung, Startschacht Elbquerung (Dükeroberhaupt), Baugrube (Schlitzwände), Vertikalschnitt A-A und Horizontalschnitt B-B, M 1:100, Vorabzug Stand 27.11.2020, ohne weitere Planangaben
- U 2.2 FWS-West Entwurfsplanung, Startschacht Elbquerung (Dükeroberhaupt), Endzustand Schachtbauwerk Los T, Schnitte A-A bis F-F, M 1:100, Vorabzug Stand 27.11.2020, ohne weitere Planangaben
- U 2.3 FWS-West Entwurfsplanung, Zielschacht Elbquerung (Dükerunterhaupt), Bauzustand (Schlitzwände), Horizontalschnitt A-A und Vertikalschnitt B-B, M 1:100, Vorabzug Stand 27.11.2020, ohne weitere Planangaben
- U 2.4 FWS-West Entwurfsplanung, Zielschacht Elbquerung (Dükerunterhaupt), Endzustand Schachtbauwerk Los T, Schnitte A-A bis F-F, M 1:100, Vorabzug Stand 27.11.2020, ohne weitere Planangaben

Eingang am 27.10.2020

Von der BabEng GmbH, Lübeck:

- U 2.5 Lage- und Bohrplan - Tunnel Elbquerung, Variantenuntersuchung - Tunneltrasse Tübbingvortrieb, M 1:2000, Zeichnungsnummer: LA - TU - 001e, mit Datum vom 09.04.2020
- U 2.6 Lageplan - Tunnel Elbquerung, Baustelleneinrichtungsfläche - Tunneltrasse Tübbingvortrieb (EPB), M 1:250, Zeichnungsnummer: : LA - TU - 002f, mit Datum vom 09.04.2020
- U 2.7 Längsschnitt-Gradienten – Tunnel Elbquerung, Variantenuntersuchung - Tunneltrasse Tübbingvortrieb, M 1:1000, Zeichnungsnummer: : LS - TU – 001h, mit Datum vom 07.10.2020 (Vorabzug)

Eingang am 03.11.2020

- U 2.8 Vorabangaben zur Tunnelgeometrie, E-Mail vom 19.05.2020



Von der Wilhelm Soltau Brunnenbau GmbH, Seevetal:

- U 2.9 Schichtenverzeichnisse mit Höhenaufmaß der Bohransatzpunkte und 327 gestört entnommene Bodenproben sowie 49 ungestört entnommenen Sonderproben aus 12 konventionellen Maschinenbohrungen (B 1 bis B 6, WB 1 bis WB 6) nach DIN EN ISO 22475-1 bis in eine Tiefe von rd. max. 70,0 m unter Bohransatzpunkt; Maschinenbohrungen ausgeführt im Zeitraum vom 04.11.2019 bis 29.01.2020
- U 2.10 Schichtenverzeichnisse mit Höhenaufmaß der Bohransatzpunkte und 28 gestört entnommene Bodenproben sowie 16 Glasproben aus 3 Kleinbohrungen (BS 116 bis BS 118) nach DIN EN ISO 22475-1 bis in eine Tiefe von rd. max. 15,0 m unter Bohransatzpunkt; Maschinenbohrungen ausgeführt am 09.12.2019
- U 2.11 Ergebnisse von 14 Drucksondierungen (DS 1 bis DS 6 und WDS 1 bis WDS 8) nach DIN EN ISO 22476-2 bis in Tiefen von max. rd. 31,8 m unter Ansatzpunkt mit Darstellung des Spitzenwiderstandes, der Mantelreibung und des Reibungsverhältnisses; Drucksondierungen ausgeführt im Zeitraum vom 07.10.2019 bis 18.02.2020, ausgeführt von der Fugro Germany Land GmbH, Lilienthal
- U 2.12 Ergebnisse der chemischen Analysen auf Betonaggressivität nach DIN 4030, Stahlaggressivität nach DIN 50929, Einleitparameter sowie Zusatzparameter für den Schildvortrieb von je einer Wasserprobe aus der GWM B 2, Prüfbericht 2019P531976/1 vom 13.12.2019; der GWM B 3, Prüfbericht 2019P532747/1 vom 18.12.2019; der GWM B 5, Prüfbericht 2019P500996/1 vom 14.01.2020; der GWM B 6, Prüfbericht 2020P503020/1 vom 04.02.2020 und der GWM B 6.1, Prüfbericht 2020P503021/1 vom 04.03.2020; ausgeführt von der GBA Gesellschaft für Bioanalytik mbH, Pinneberg

Von der GBA Gesellschaft für Bioanalytik mbH, Pinneberg:

- U 2.13 Ergebnisse der chemischen Analysen von 26 Bodenmischproben auf den Parameterumfang gemäß der LAGA-TR Boden und gemäß Deponieverordnung sowie von 9 Bodenmischproben auf den AT4- und den Brennwert: Prüfbericht 2020P505121/3 vom 06.03.2020, Prüfbericht 2020P505732/1 vom 03.03.2020 und Prüfbericht 2020P506962/1 vom 13.03.2020

Von dem Institut Dr. Baermann & Partner Mikroanalytik, Hamburg:

- U 2.14 BV: Fernwärmesystemanbindung (FWS West) – Los 2, Bestimmung von Kornform und Rundungsgrad an Sanden und Geschiebemergeln sowie Mineral- und Tonmineralanalysen, Bericht G 661-1-20 vom 16.05.2020

Eingang am 20.05.2020

Von der Hamburg Port Authority AöR, Hamburg:

- U 2.15 Peilplan Köhlfleet mit Einfahrt, Kontrollpeilung zur Verkehrssicherung inkl. Nachpeilung „Akke“, M 1 : 1000, Stand 12.04.2019
- U 2.16 Peilplan Unterelbe Blatt 9, M 1 : 2500, Stand 08.11.2018

Eingang am 08.05.2019



Eigene Unterlagen:

- U 2.17 Aufzeichnungen der Grundwasserganglinien in den Messstellen GWM B 2, GWM B 3, GWM B 5, GWM B 6 und GWM B 6.1 im Zeitraum vom 29.01. bis zum 05.11.2020
- U 2.18 Fernwärmesystemanbindung West, (FWS West), Leitungsvarianten Parkstraße – Notkestraße, Halbmondsweg – Ebertallee und Dradenaustraße, 1. Bericht vom 31.07.2019, unsere Auftr.-Nr.: 022474
- U 2.19 Fernwärmesystemanbindung West, Variante „Parkstraße“, Abschnitt 10 Gleisquerung S-Bahn, Rohrvortrieb, 2. Bericht vom 07.08.2019, unsere Auftr.-Nr.: 022474
- U 2.20 Fernwärmesystemanbindung West (FWS West), Tunnel Jachtweg bis Hindenburg Park, 1. Bericht vom 15.08.2019, unsere Auftr.-Nr.: 022510
- U 2.21 Geologische Übersichtskarte Raum Hamburg, M : 50.000, Quartärbasis
 - a) Blatt 1 Morphologie
 - b) Blatt 2 Geologie
- U 2.22 Primär- und Sekundärspannungszustände in überkonsolidiertem Ton am Beispiel eines im Hamburger Glimmerton aufgefahrenen Tiefdükers, Dissertation von M. Kahl, 177 S., TU Braunschweig, 1991

3. Geplantes Bauvorhaben

3.1 Generelle Angaben

Für die geplante Fernwärmesystemanbindung von Hamburg-Waltershof nach Hamburg-Bahrenfeld ist die Unterquerung des Köhlfleethafens und der Elbe erforderlich. Die Trasse wurde in 3 Lose aufgeteilt. Das „Landlos“ 1 südlich der Elbe, das Los 2 Tunnel Elbquerung und das „Landlos“ 3 nördlich der Elbe. Die Trasse der Fernwärmesystemanbindung (FWS) West für das Los 2 beginnt am geplanten Startschacht im Bereich des Jachtweges in Hamburg-Waltershof südlich der Elbe. Der geplante Tunnel unterquert in der Elbmarsch in nordnordwestlicher Richtung zunächst den Köhlfleethafen mit einem Schiffsanleger, das Seemannshöft und unterfährt dann die Elbe bis zu einem im Hindenburgpark am Elbhänge gelegenen Zielschacht in Hamburg-Othmarschen.

Die genaue Lage und der Verlauf der Trasse ist dem Lage- und Übersichtsplan in der Anlage 023581-2/1 zu entnehmen. Südöstlich des Startschachtes im Anschlusslos 1 und nördlich des Startschachtes im Anschlusslos 3 verläuft die FWS West oberflächennah unter GOK verlegt.



3.2 Tunnelbauwerk

Der rd. 1,16 km lange Fernwärmetunnel soll im Schildvortriebsverfahren aufgefahen und mit Stahlbetontübbingen ausgebaut werden. Der Tunneldurchmesser ist nach U 2.7 mit $\varnothing_{\text{innen}} = 3,70 \text{ m}$ und $\varnothing_{\text{außen}} = 4,30 \text{ m}$ vorgesehen. Der Ausbruchdurchmesser der Tunnelbohrmaschine (TBM) beträgt etwa $D = 4,55 \text{ m}$.

Der Tunnelvortrieb beginnt am Startschacht im Jachtweg mit einer Firsthöhe bei rd. NHN -14,93 m bei Stat km 0+000 und taucht nach Nordnordwesten zunächst mit einer Neigung von ca. 6 % ab. Er unterfährt von ca. Stat km 0+140 bis ca. Stat km 0+440 den Köhlfleethafen, dessen Solltiefe der Hafensohle nach U 2.7 bei ca. NHN -14,1 m liegt, mit einer Mindestüberdeckung von rd. 13,0 m (Firsthöhe Tunnel hier zwischen rd. NHN -27,0 m und NHN -29,5 m).

Von etwa Stat km 0+230 m bis ca. Stat. km +0+295 m unterfährt der Tunnel den tief gegründeten Tankanleger im Köhlfleethafen. In der U 2.7 werden die Unterkanten der Pfähle zwischen rd. NHN -24 m und rd. NHN -27 m angegeben.

Die Elbe, deren geplante Baggertiefe (Sohltiefe) nach U 2.7 im Trassenbereich in der Fahrrinne bei ca. NHN -17,3 m liegt, wird auf einer Länge von rd. $L = 400 \text{ m}$ nahezu horizontal (Steigung $< 0,6 \%$) unterquert. Ab Stat km 0+881,766 steigt die Gradienten mit rd. 5,5 % auf einer Länge von rd. $L = 280 \text{ m}$ bis zum Zielschacht an. Die minimale Überdeckung des Tunnels zur Gewässersohle wird in U 2.7 zu rd. 10,2 m angegeben.

Der Zielschacht im Hindenburgpark im Bereich des Elbhangs wird bei Stat km 1+160 mit einer OK Gelände bei rd. NHN + 12,5 m erreicht und mit einer Firsthöhe des Tunnels bei rd. NHN -11,95 m aufgefahen.

3.3 Startschacht

Der Startschacht wird von GOK bis in die Lauenburger Schichten mit annähernd kreisförmig angeordneten Schlitzwandlamellen mit einer Dicke der Stahlbetonschlitzwand von $d = 1,5 \text{ m}$ erstellt. Die maßgebenden Daten sind in U 2.1 bzw. U 2.2 wie folgt angegeben:



Außendurchmesser Startschacht	rd. 25,4 m
Geländeoberkante	ca. NHN +5,5 m
OK Unterwasserbeton-/Baugrubensohle	rd. NHN -21,2 m
UK Unterwasserbetonsohle d = 2,3 m	rd. NHN -23,5 m
Außendurchmesser Schacht Dükeroberhaupt	rd. 13,2 m
UK Schachtsohle Dükeroberhaupt d = 1,2 m	rd. NHN -20,9 m
UK Tunnel	rd. NHN -19,2 m
UK Schlitzwand	rd. NHN -33 m
UK Auftriebspfähle	rd. NHN -60,6 m

Die rd. 2,3 m dicke Unterwasserbetonsohle soll über Verpresspfähle kleinen Durchmessers gegen Auftrieb gesichert werden. Die UK der Verpresskörper der Verpresspfähle reicht bis rd. NHN -60,6 m. Die Pfähle sollen von einer auftriebssicheren Arbeitsebene innerhalb der Schlitzwandbaugrube vom Niveau bei rd. NHN -12,0 m hergestellt werden.

Die Schachtsohle weist gegenüber den Schachtwänden einen seitlichen Überstand von rd. a = 4,6 m auf. Der Zwischenraum zwischen den Baugrubenwänden und den Schachtwänden wird mit Füllsanden verfüllt. Diese Sandauflast dient als „Zusatzgewicht“ zur Sicherstellung der Auftriebssicherheit des Dükeroberhauptes im Endzustand.

3.4 Zielschacht

Der Zielschacht wird mit annähernd kreisförmig angeordneten Schlitzwandlamellen mit einer Dicke der Stahlbetonschlitzwand von d=1,5 m erstellt. Die maßgebenden Daten sind in U 2.3 bzw. U 2.4 wie folgt angegeben:

Außendurchmesser Zielschacht	rd. 16,7 m
Geländeoberkante	ca. NHN +14,2 m
OK Unterwasserbeton-/Baugrubensohle	rd. NHN -20,0 m
UK Unterwasserbetonsohle d = 2,5 m	rd. NHN -22,5 m
Außendurchmesser Schacht Dükerunterhaupt	rd. 13 m
UK Schachtsohle Dükerunterhaupt d = 1,2 m	rd. NHN -18,8 m
UK Tunnel	rd. NHN -16,3 m



UK Schlitzwand	rd. NHN -30,5 m
UK Auftriebspfähle	rd. NHN -58,0 m

Die rd. 2,5 m dicke Unterwasserbetonsohle soll über Verpresspfähle kleinen Durchmessers gegen Auftrieb gesichert werden. Die UK der Verpresskörper der Verpresspfähle reicht bis rd. NHN -58 m. Die Pfähle sollen von einer auftriebssicheren Arbeitsebene innerhalb der Schlitzwandbaugrube vom Niveau bei rd. NHN -6,0 m hergestellt werden.

Die rd. 1,2 m dicke Schachtsohle soll mit Schubknaggen konstruktiv an die Schlitzwand angeschlossen werden, um das Eigengewicht der Schlitzwand für den Abtrag der Auftriebskräfte mit heranzuziehen.

4. Generelle geologische und hydrogeologische Angaben zur Trasse

4.1 Morphologische Verhältnisse

Die Trasse der Fernwärmesystemanbindung (FWS) West verläuft im Los 2 vom geplanten Startschacht im Bereich des Jachtweges in Hamburg-Waltershof bis zum nördlichen Elbufer durch die nacheiszeitlich entstandene Elbmarsch und von dort bis zum Zielschacht im Hindenburgpark durch die eiszeitlich geprägte, höher liegende und flach wellige Hamburger Geest.

Die Geländeoberkante (GOK) lag in den Marschbereichen ursprünglich weitgehend nur bis einige Dezimeter oberhalb des mittleren Tidewasserstandes der Elbe.

Durch die hafenbaulichen Tätigkeiten wurde die Geländeoberkante des Marschbereiches intensiv umgestaltet und dabei sowohl durch den Bau von Hafenbecken (Köhlfleethafen), Dockanlagen etc. bereichsweise abgegraben als auch durch Bodenauffüllungen bis auf unterschiedliche Geländehöhen aufgehöhht. Die GOK im Trassenabschnitt der Elbmarsch liegt nach U 2.7 in Übereinstimmung mit der höhenmäßigen Einmessung der Bohransatzpunkte durch das Bohrunternehmen landseitig derzeit überwiegend im Höhenbereich zwischen ca. NHN +5 m und ca. NHN +6 m.



Die Flusssohle der zu unterquerenden Elbe liegt nach U 2.7 im Trassenbereich im Mittel in einem Tiefniveau um ca. NHN -18 m.

Die Solltiefe der Hafensohle des Köhlfleethafens liegt bei rd. NHN -14,1 m.

Im Geestbereich steigt die GOK beginnend am Elbhang am Hans-Leip-Ufer bis auf Höhen zwischen ca. NHN +12 m und ca. NHN +15 m auf Höhe des geplanten Zielschachtes an. Weiter nördlich steigt der Elbhang bis auf Höhe der Elbchaussee auf rd. NHN +27 m an.

4.2 Hydrogeologische Verhältnisse

Die im Bereich der Trasse anstehenden Böden lassen sich aufgrund ihrer unterschiedlichen Wasserdurchlässigkeit (k-Wert) bzw. Wasserleitfähigkeit generell in Grundwasserleiter ($k \geq 10^{-6}$ m/s) und Grundwasserhemmer/Grundwassergeringleiter ($k < 10^{-6}$ m/s) unterscheiden.

Zu den Grundwasserleitern gehören die sandigen Auffüllungen, die holozänen, weichselzeitlichen und elsterzeitlichen Sande mit Kieseinlagerungen (die den Hauptgrundwasserleiter der Elbmarsch bilden) sowie die saalezeitlichen und elsterzeitlichen Sande und Kiese, die unterschiedliche Grundwasserleiter in der Geest bilden.

Zu den Grundwassergeringleitern (Grundwasserstauer) gehören die bindigen Auffüllungen und die holozänen organischen Weichschichten (Klei und Torf), der elsterzeitliche Lauenburger Ton, die bindigen Geschiebeböden (Geschiebelehm, Geschiebemergel) und der miozäne Glimmertone.

In der Elbmarsch werden die Grundwasserstände durch die Wasserstände der Elbe bestimmt. In der Geest steigen die Grundwasserstände entsprechend der Geländemorphologie an.

Der **Wasserstand in der Elbe** ist tideabhängig. Gemäß den gewässerkundlichen Angaben für den Pegel St. Pauli für den Messzeitraum der Jahre 2014 bis 2018 ist von folgenden Wasserständen auszugehen:



Höchstes Tidehochwasser (HThw):	NHN +6,08 m
Mittleres Tidehochwasser (MThw):	NHN +2,16 m
Mittleres Tideniedrigwasser (MTnw):	NHN -1,67 m
Niedrigstes Tideniedrigwasser (NTnw):	NHN -3,64 m
mittlerer Tidenhub:	3,83 m

Der höchste Tidewasserstand HHThw am Pegel St. Pauli wurde 1976 mit NHN +6,45 m gemessen. Der maximale Bemessungswasserstand für Bauwerke im Bereich der Elbe sowie des Köhlfleets mit einer Lebensdauer von bis zu 50 Jahren beträgt NHN +7,2 m und NHN +8,0 m für Bauwerke mit einer Lebensdauer von mehr als 50 Jahren gemäß der Anlage 1 „Bemessungswasserstände für Anlagen im zentralen Hafengebiet, Stand 2013, der HPA.

In den Sanden der Elbmarsch steht das **Grundwasser** wegen der Überdeckung mit gering wasserleitfähigen Böden überwiegend gespannt an. Es steht in hydraulischer Verbindung mit der Elbe. Die tidebedingten Wasserstandsschwankungen der Elbe wirken sich hier in Abhängigkeit von der Entfernung zur Elbe phasenverschoben und mit gedämpften Amplituden auf die Grundwasserstände bzw. das Grundwasserdruckniveau in der Elbmarsch aus.

In den sandig ausgebildeten Auffüllungen ist dort, wo diese oberflächennah von wasserstauenden Bodenschichten unterlagert werden, mit dem Vorkommen von oberflächennahem **Stauwasser** zu rechnen.

Die Höhenlage des Stauwassers ist u.a. von der Höhenlage und Ausdehnung der wasserstauenden Schicht, der Mächtigkeit des Stauwasserleiters, den Vorflutverhältnissen und vor allem der Dauer und Intensität der Niederschläge anhängig.



5. Baugrund- und Wasserverhältnisse

5.1 Baugrunderkundung

5.1.1 Baugrundaufschluss

Die W. Soltau Brunnenbau GmbH, Seevetal führte gemäß dem von uns aufgestellten Bohrplan im Zeitraum vom 04.11.2019 bis 29.01.2020 insgesamt 6 landseitige und 6 wasserseitige Maschinenbohrungen nach DIN EN ISO 22475-1 (B 1 bis B 6 und WB 1 bis WB 6) bis in eine Tiefe von rd. max. 70,0 m unter Bohransatzpunkt aus.

Die Bohrungen im Bereich des Start- und des Zielschachtes erfolgten mit Entnahme von gestörten Bodenproben, alle anderen landseitigen Bohrungen mit Gewinnung von Bohrkernen ab ca. 10 m oberhalb der Tunneloberkante. Die wasserseitigen Bohrungen erfolgten mit durchgehender Gewinnung von Bohrkernen.

Zur Erkundung der Grundwasserverhältnisse wurden vor allem in den Bereichen der geplanten Baugruben für den Startschacht und den Zielschacht insgesamt fünf Bohrungen zu Grundwassermessstellen (GWM) ausgebaut (GWM B 2, GWM B 3, GWM B 5, GWM B 6 und GWM B 6.1). Die GWM B 6.1 wurde mit einem separaten Bohrloch neben der tieferen Messstelle (GWM B 6) als zweite GWM im oberen Grundwasserleiter ausgebaut.

Auf der Süd-Seite der Elbe filtert die Grundwassermessstelle GWM B 2 den unteren Grundwasserleiter innerhalb der Lauenburger Schichten (qe) und die GWM B 3 den oberen Grundwasserleiter - die weichselzeitlichen Sande und Kiese - aus.

Auf der Nord-Seite der Elbe filtern die Grundwassermessstellen GWM B 6 und GWM B 6.1 unterschiedliche Stockwerke der saalezeitlichen Sande (qs) des oberen Grundwasserleiters und die GWM B 5 die elsterzeitlichen Sande des unteren Grundwasserleiters aus. Die Köpfe der Grundwassermessstellen GWM B 6 und GWM B 6.1 mussten aufgrund des artesischen Wasserdruckes wasserdruckhaltend ausgebildet werden.



Die Lage aller Messstellen geht aus dem Lageplan der Anlagen 023581-2/1 und 2 hervor. Die Ausbaudaten der Grundwassermessstellen mit Kennzeichnung der ausgefilterten Tiefen sind in den Anlagen 023581-2/3.1 bis 3.4 jeweils rechts neben den zugehörigen Bohrprofilen dargestellt.

Von der Fugro Consult GmbH, Lilienthal wurden zur Erkundung der Lagerungsdichte der Sande im Zeitraum vom 07.10.2019 bis 18.02.2020 insgesamt 6 landseitige und 8 wasserseitige Drucksondierungen nach DIN EN ISO 22476-1 (DS 1 bis DS 6 und WDS 1 bis WDS 8) bis in Tiefen von max. rd. 31,8 m unter Sondieransatzpunkt ausgeführt.

Aufgrund des Schiffsverkehrs durften innerhalb der Fahrrinne der Elbe keine Bohrungen ausgeführt werden. Im Bereich des Fahrwassers wurden stattdessen für einen indirekten Aufschluss 2 Drucksondierungen (WDS 7 und WDS 8) ausgeführt.

Die Baugrundaufschlussarbeiten wurden stichprobenartig durch uns überwacht. Die Lage und die Ansatzhöhen der land- und wasserseitigen Baugrundaufschlüsse sowie der Grundwassermessstellen wurden vom Bohrunternehmer nach den vorgegebenen Gauß-Krüger-Koordinaten eingemessen und sind im Lageplan der Anlagen 023581-2/1 und 2 angegeben.

Wir haben an allen Bohrkernen der wasser- und landseitig ausgeführten Kernbohrungen die Bodenansprache sowie die Schichtabgrenzungen vorgenommen und die Bohrkern e fotografiert. Die Fotodokumentation geht dem Auftraggeber gesondert zu.

Die bearbeiteten und wieder verschlossenen Bohrkern e werden in einem Kernlager der Wärme Hamburg GmbH, Hamburg aufbewahrt.

5.1.2 Bohrhindernisse

Die wasserseitige Bohrung WB 1/F wurde aufgrund eines Hindernisses (Stein-/Geröllhorizont) in rd. 11,8 m Tiefe unter Ansatzpunkt abgebrochen und als Bohrung WB 1 bis zur geplanten Tiefe von 35 m unter Hafensohle abgeteuft.



Die wasserseitige Bohrung WB 2/F wurde aufgrund eines Hindernisses (Stein-/Geröllhorizont) in rd. 11,1 m Tiefe unter Ansatzpunkt abgebrochen und versetzt. Die jeweils versetzten Bohrungen WB 2/F1 und WB 2/F2 konnten ebenfalls aufgrund von Steinhindernissen in 15,5 m bzw. in 14,6 m Tiefe unter Gewässersohle nicht tiefer geführt werden.

Die wasserseitige Bohrung WB 6 wurde 5 m vor Erreichen der vorgegebenen Bohrtiefe von 35 m abgebrochen, da die Bohrstelle auf Anordnung der Nautischen Zentrale wegen eines vorbeifahrenden Schiffes frühzeitig geräumt werden musste.

Die landseitige Drucksondierung DS 4 sowie die versetzte Drucksondierung DS 4A mussten aufgrund eines Hindernisses in einer Tiefe von ca. 5 m unter GOK abgebrochen werden.

Die wasserseitige Drucksondierung WDS 2 musste aufgrund eines Hindernisses in einer Tiefe von 10,2 m unter Gewässersohle abgebrochen werden. Anschließend konnte nach Versetzen die Drucksondierung WDS 2A bis zum Erreichen der Endlast abgeteuft werden.

Die wasserseitige Drucksondierung WDS 3 musste aufgrund eines Hindernisses in einer Tiefe von 0,2 m unter Gewässersohle abgebrochen werden. Anschließend konnte nach Versetzen die Drucksondierung WDS 3A bis zum Erreichen der Endlast abgeteuft werden.

Die wasserseitige Drucksondierung WDS 7 sowie die versetzte Drucksondierung WDS 7A mussten aufgrund eines Hindernisses in einer Tiefe von ca. 7 m unter Gewässersohle abgebrochen werden.

Die wasserseitige Drucksondierung WDS 8 musste aufgrund eines Hindernisses in einer Tiefe von 1,7 m unter Gewässersohle abgebrochen werden. Anschließend konnte nach Versetzen die Drucksondierung WDS 8A bis zum Erreichen der Endlast abgeteuft werden.

5.1.3 Bohr- und Sondierprofile und geologischer Schnitt

Die Ergebnisse der ausgeführten Kernbohrungen sowie der vom Bohrunternehmer gestört entnommenen Bodenproben sind nach unserer visuellen und manuellen Beurteilung sowie nach den Angaben in den Schichtenverzeichnissen in Form von höhengerechten Bohr-



profilen gemäß unseren Schichtabgrenzungen bei der Kernansprache in den Anlagen 023581-2/3.1 bis 3.4 dargestellt.

Die Ergebnisse der Drucksondierungen sind ebenfalls in den Anlagen 023581-2/3.1 bis 3.4 als höhengerecht aufgetragene Sondierdiagramme dargestellt. Aufgetragen sind dabei über die Sondiertiefe der Spitzenwiderstand q_c [MN/m²] und die Mantelreibung τ_m [MN/m²] sowie das daraus abgeleitete Reibungsverhältnis $R_f = 100 \cdot \tau_m / q_c$.

Weiterhin wurden die Ergebnisse von einem Baugrundaufschluss aus dem Archiv des Geologischen Landesamtes Hamburg hinsichtlich seiner Ortslage, der Höhenlage des Bohr-ansatzpunktes sowie der Angaben zum Schichtenaufbau und zur stratigrafischen (alters-mäßigen) Einstufung auf Plausibilität geprüft und für die Baugrundbeurteilung und die Erstellung des geologischen Längsschnittes herangezogen (s. Anlagen 023581-2/1 und 023581-2/2).

Die Ergebnisse der hinzugezogenen Altbohrung C 8 sind ebenfalls als höhengerecht aufgetragenes Bohrprofil in der Anlage 023581-2/3.1 aufgetragen.

Die Lage aller verwendeten Aufschlussansatzpunkte kann dem Lageplan in der Anlage 023581-2/1 entnommen werden.

Die Ergebnisse der Baugrundaufschlüsse wurden jeweils lotrecht auf die Schnittebene projiziert und daraus ein geologischer Längsschnitt entworfen, der in der Anlage 023581-2/2 dargestellt ist. Hierbei wurden die aus den Bohr- und Drucksondierungsergebnissen ermittelten Schichtgrenzen der geologischen Einheiten zwischen den Aufschlussansatzpunkten miteinander verbunden. Die Schichtgrenzen zwischen den Aufschlüssen wurden interpoliert. Zwischen den Aufschlüssen ist mit Abweichungen vom dargestellten Schichtenverlauf zu rechnen. Im Bereich der Elbfahrrinne konnte der Baugrund zwischen der Bohrung WB 3 und der Sondierung WDS 8A mit der Sondierung WDS 7A lediglich oberhalb des Tunnels bis rd. 7 m unter Gewässersohle aufgeschlossen werden. Zwischen Tunnelmeter ca. Stat km 0+580 und Stat km 0+770 beträgt der Aufschlussabstand zwischen der WB 3 und der WDS 8A rd. 190 m.



Da mit der WB 3 und anschließend nach Süden hin die elsterzeitliche Rinnenstruktur erbohrt wurde und mit der Sondierung WDS 8A sowie der nördlich gelegenen Bohrung WB 4 keine elsterzeitlichen Ablagerungen erbohrt wurden, ist eine zutreffende Interpretation des Schichtenverlaufs zwischen den Aufschlüssen WB 3 und WDS 8A nicht möglich. In diesem Bereich muss daher mit der Durchfahrung der Bodenschichten gemäß dem Profil WB 3 als auch dem Profil WDS 8A gerechnet werden. Im geologischen Längsschnitt haben wir daher verzichtet, hier einen möglichen Schichtenverlauf anzugeben.

Der geologische Längsschnitt hat wie der Lageplan den Längenmaßstab 1:2.000. Für die Höhe wurde der Maßstab 1:200 gewählt. Der geologische Längsschnitt ist damit 5-fach überhöht.

Die Ergebnisse der einzelnen für den geologischen Längsschnitt verwendeten Bohrungen wurden soweit erforderlich generalisiert (vereinfacht bzw. zusammengefasst). Einzelne nur wenige Dezimeter dicke Streifen (aus beispielsweise Sand oder Schluff) wurden nicht dargestellt.

Oberboden (Mutterboden) und Böden mit eingelagerten Fremdstoffen wurden zum Schichtkomplex der Auffüllungen bzw. durch die geringe Mächtigkeit im Bereich des Elbhangs zum Schichtkomplex des Geschiebemergels zusammengefasst.

Der geologische Längsschnitt vermittelt einen generellen Überblick über die im Vortriebsbereich und im Bereich der Schächte zu erwartenden geologischen Einheiten. Aufgrund der über die gesamte Streckenlänge festgestellten kleinräumig stark wechselhaften Schichtenfolge ist mit Abweichungen des Schichtenaufbaus und des Schichtenverlaufes zwischen den Bohrprofilen sowohl in Längsrichtung als auch quer zur Trassenachse gegenüber den tatsächlichen Verhältnissen zu rechnen. Auch wegen der Projektion der örtlich bis zu ca. 20 m entfernt liegenden Bohrungen auf den Trassenverlauf sind der Schichtenaufbau und die Schichtgrenzen der in den geologischen Schnitten dargestellten Bohrprofile mit Unsicherheiten behaftet. Mit zusätzlichen Unsicherheiten behaftete unbekannte und nur vermutete Schichtenverläufe und Schichtenaufbauten wurden im geologischen Längsschnitt mit Fragezeichen gekennzeichnet.



Beim Abteufen der Aufschlussbohrungen angetroffene Steine sind in den geologischen Schnitten jeweils neben den Strichprofilen der Bohrungen als rote Kreuze gekennzeichnet. Da das Antreffen von Steinen durch die Bohrungen aufgrund des begrenzten Verrohrungsdurchmessers und der Bohrabstände stark vom Zufall abhängt, kann aus der Lage und Häufigkeit der dargestellten Steine nicht auf Anzahl und Häufigkeit der tatsächlich zu erwartenden Steine geschlossen werden. Angaben zur Abschätzung der Anzahl und Größe der beim Schildvortrieb zu erwartenden Steine werden in Abschnitt 10.1 gemacht.

Einzelheiten zum Schichtenaufbau und zu den Lagerungsdichten der Sande sind den Bohrprofilen bzw. den Drucksondierdiagrammen in den Anlagen 0223581-2/3.1 bis 3.4 zu entnehmen.

5.2 Baugrundaufbau

5.2.1 Generelle Angaben

Das Untersuchungsgebiet liegt zum Großteil in der Elbmarsch (im Süden im Bereich des Startschachtes bis hin zum nördlichen Elbufer), die oberflächennah vor allem durch die jungpleistozänen Schmelzwasserablagerungen der jüngsten Eiszeit (Weichselvereisung), die Ablagerungen der Nacheiszeit (Holozän) und den Einfluss des Menschen (u. a. Aufspülungen, Deichbau, Elbfahrwasservertiefung) geprägt wurde. Der Baugrund unterhalb der holozänen und weichselzeitlichen Sedimente wird durch unterschiedliche altpleistozäne (elsterzeitliche) Ablagerungen aufgebaut. Die mittelpleistozänen (saalezeitlichen) Ablagerungen, die in den Geestflächen randlich des Elbtals anstehen, sind im Bereich des Elbtals erosionsbedingt nicht mehr vorhanden.

Am nördlichen Elbufer schließt die Geest mit dem steil abfallenden Elbhang bestehend aus mittelpleistozänen (saalezeitlichen) und altpleistozänen (elsterzeitlichen) Moränen, die von neogenen (miozänen) Ablagerungen unterlagert werden.

Aus den Ergebnissen der ausgeführten Baugrundaufschlüsse ergibt sich folgender genereller Baugrundaufbau im Bereich der Elbquerung:



- Auffüllungen unterschiedlicher Zusammensetzung (Sande, z.T. mit Bauschutteinlagerungen, Klei, Torf und Sande mit Klei-Einlagerungen), landseitig im Bereich südlich der Elbe
- holozäne Ablagerungen der Elbmarsch:
 - landseitig im Bereich der südlichen Elbe: Klei und örtlich Torf, Wattsande mit Kleieinlagerungen
 - wasserseitig im Bereich des Köhlfleethafens: Schlick
 - südlich des Elbhangs flächendeckend: Flusssande, wasserseitig nur noch in geringen Mächtigkeiten vorhanden
 - weichselzeitliche Ablagerungen des Elbe-Urstromtales bestehend aus Fluss- und Schmelzwassersanden mit Kieseinlagerungen sowie basaler Kies und kiesiger Sand mit Steineinlagerungen und Steinsohle, südlich des Elbhangs flächendeckend vorkommend
- saalezeitliche Ablagerungen der vorletzten Eiszeit, nur im Bereich des Elbhangs, bestehend aus:
 - Schmelzwasserablagerungen
 - der Grundmoräne aus Geschiebemergel
 - Kies- und Stein-Horizonte, örtlich
- elsterzeitliche Ablagerungen der vorvorletzten Eiszeit, im Bereich des Elbhangs sowie im Bereich zwischen Startschacht im Jachtweg und südlichem Bereich der Elbe angetroffen, bestehend aus:
 - Lauenburger Schichten: elsterzeitlicher Ton und Schluff, bereichsweise sandig, mit Sandstreifen und -Lagen sowie Beckensande (schwach schluffige bis schluffige Fein- bis Mittelsande mit Ton- und Schluffstreifen; im Bereich des Elbhangs sowie südlich des Seemannshöfts angetroffen)
 - elsterzeitlichen Beckenablagerungen aus schwach schluffigem bis schluffigem Fein- bis Mittelsand, mit Schluff-Streifen, nur örtlich unterhalb der geplanten Tunnelgradienten angetroffen
 - elsterzeitlichen Schmelzwasserablagerungen, bereichsweise angetroffen.
 - einer elsterzeitlichen Grundmoräne aus Geschiebemergel, örtlich angetroffen



Nachfolgend werden die einzelnen unterschiedlichen Bodenarten und geologischen Einheiten zusammenfassend beschrieben. Nähere Einzelheiten zur Zusammensetzung, Mächtigkeit, Konsistenz und Lagerungsdichte der Böden sind den Angaben der Anlagen 023581-2/3.1 bis 3.4 zu entnehmen.

5.2.2 Auffüllungen

Zu den Auffüllungen gehören die oberen durch anthropogene Tätigkeiten umgelagerten oder hinzugefügten Bodenschichten, wie z. B. Geländeaufhöhungen, Sandaufspülungen oder Verfüllungen von Hafenbecken im Bereich des Seemannshöfts, des Anlegers im Köhlfleethafen und im Bereich Waltershof, das Baumaterial für die in der Fernwärmetrasse vorhandenen Polder-Deckwerke, Verkehrsflächen und Leitungstrassen sowie für die dort vorhandenen Gebäude, und sonstigen Bauwerke. Der Oberboden wurde den Auffüllungen zugeordnet.

In dem geologischen Längsschnitt sind die Auffüllungen gemäß den Schichtabgrenzungen in den Bohrprofilen stark vereinfacht wiedergegeben.

Die Schichtmächtigkeiten der örtlich stark wechselhaften Auffüllungen wurden nach den Ergebnissen der Baugrundaufschlüsse landseitig im Bereich zwischen dem Startschacht im Jachtweg und dem Seemannshöft überwiegend in einer Größenordnung zwischen rd. 6,1 m (B 3) und rd. 10,5 m (B 4) und mit einer Unterkante zwischen rd. NHN -0,7 m (B 3) und rd. NHN -4,7 m (B 4) angetroffen. Sie bestehen überwiegend aus Sanden mit Kleieinlagerungen sowie einer Wechsellagerung von Sanden und Klei-Lagen, im Bereich südlich des Köhlfleethafens (B 3) wurden auch kompakte Auffüllungen aus Klei und Torf mit einer Mächtigkeit von rd. 3 m angetroffen. Zum Teil enthalten die Auffüllungen Fremdstoffe wie z.B. Keramik-, Ziegel-, Asphalt-, Betonbruch oder Glas. Örtlich (B 1) wurde Geruch von Mineralölkohlenwasserstoffen festgestellt.

In den Auffüllungen und in den gewachsenen Böden darunter können tiefreichende Bauteile vorhanden sein, die ggf. Hindernisse für die vorgesehene Vortriebstrasse darstellen können. Hierzu gehören beispielsweise ehemalige Baugrubenverbauwände oder Tiefgründungen (wie z.B. im Bereich des Anlegers im Köhlfleethafen).



Im Bereich des Zielschachtes im Hindenburgpark wurden unterhalb der Geländeoberkante aufgefüllte sandige, humose Schluffe mit vereinzelt Beimengungen von Ziegelbruch bzw. Ziegelresten in Mächtigkeiten von rd. 0,5 m (BS 116, BS 117) und rd. 1,0 m (BS 118) erbohrt. Bei der B 6 wurde ab Deckschicht ein 40 cm mächtiger aufgefüllter Geschiebemergel angetroffen. Bei der B 5 wurde Mutterboden in einer Mächtigkeit von 40 cm erbohrt.

5.2.3 Holozäne Ablagerungen

Schlick

Im Bereich des Köhlfleethafens wurde ab der Gewässersohle sehr schwach feinsandiger bis feinsandiger **Schlick**, z.T. mit Schill und Torf-Einlagerungen und überwiegend Geruch von Mineralölkohlenwasserstoffen, in Mächtigkeiten zwischen rd. 2,8 m (WB 2/F) und rd. 5,2 m (WB 2/F2) mit einer Unterkante zwischen rd. NHN -14,8 m (WB 2/F) und rd. NHN -16,6 m (WB 1) erbohrt.

Die uns angelieferten, gestört entnommenen Bodenproben des Schlicks wiesen überwiegend eine breiige Konsistenz auf. Unmittelbar an der Gewässersohle ist auch mit einer flüssigen Konsistenz zu rechnen und mit zunehmender Tiefe kann der Schlick auch in weicher Konsistenz auftreten.

Die organischen Weichschichten aus Klei, Torf und Schlick werden vom Schildvortrieb am Startschacht beginnend über eine Streckenlänge von ca. 500 m bis zum Seemannshöft unterfahren.

Organische Weichschichten aus Torf und Klei

Landseitig im Bereich zwischen dem Seemannshöft und dem Startschacht im Jachtweg wurden kompakte organische Weichschichten aus Torf und Klei mit Gesamtschichtdicken von rd. 2,2 m (B 4) bis rd. 5,0 m (B 3) angetroffen.

Die Basis der organischen Weichschichten wurde in Tiefen von rd. NHN -6,9 m (B 4) bis rd. NHN -9,1 m (B 1) erbohrt.



- Torf

Landseitig im Bereich des Startschachtes im Jachtweg wurde **Torf** in Mächtigkeiten zwischen rd. 1,9 m (B 1) und 2,9 m (B 2) mit einer Unterkante zwischen rd. NHN -6,5 m (B 2) und NHN -6,9 m (B 1) aufgeschlossen.

Der Torf ist schwach zersetzt bis zersetzt, und z.T. gepresst mit Holzeinlagerungen.

- Klei

In den landseitigen Bereichen zwischen dem Startschacht im Jachtweg und dem Seemannshöft wurde **Klei** in Mächtigkeiten zwischen rd. 1,4 m (B 2) und 5,0 m (B 3) mit einer Unterkante zwischen rd. NHN -8,3 m (B 2) und NHN -9,1 m (B 1) erbohrt.

Der Klei besteht überwiegend aus tonigem bis stark tonigem, sehr schwach bis schwach feinsandigem Schluff und organischer Substanz. Bereichsweise enthält er Pflanzen-, Torf- und Holzeinlagerungen, Schill sowie Feinsand- und Torf-Streifen. Er hat überwiegend eine weich bis steife Konsistenz.

Holozäne Sande

Landseitig und unter der Elbsohle sowie unterhalb der Hafensohle des Köhlfleethafens wurden holozäne Sande der Elbmarsch sowie holozäne Flusssande aufgeschlossen. Hierbei handelt es sich überwiegend um **fein- und mittelkörnige Fluss- bzw. Wattsande**, z. T. sehr schwach schluffig bis schluffig, mit Kleistreifen oder Klei-Einlagerungen, örtlich mit Holz-, Grobsand- und Kies-Einlagerungen. Im Bereich des Köhlfleethafens tritt überwiegend Geruch von Mineralölkohlenwasserstoffen auf. Im Bereich des Elbe-Fahrwassers sind sie auch schwach grobsandig bis grobsandig und schwach kiesig bis kiesig ausgeprägt, örtlich enthalten sie Muschel- und Schneckenschalen.

Die holozänen Sande stehen landseitig in Mächtigkeiten zwischen rd. 2,6 m (B 2) und rd. 9,5 m (B 4) an. In den Bereichen der Elbsohle und der Hafensohle des Köhlfleethafens weisen die holozänen Sande nur noch geringe Mächtigkeiten von rd. 0,6 m (WB 3) bis rd. 2,6 m (WB 5) auf.



Im Bereich südlich des Köhlfleethafens wurde eine Schicht holozäner Sande oberhalb der organischen Weichschichten in einer Mächtigkeit zwischen rd. 0,4 m (B 1) und rd. 2,9 m (B 3) erkundet. Innerhalb der oberen holozänen Sande wurde überwiegend Geruch von Mineralölkohlenwasserstoffen (B 1, B 3) festgestellt.

Die holozänen Sande weisen nach den Drucksondiererergebnissen eine überwiegend lockere ($2,5 \text{ MN/m}^2 \leq q_c \leq 7,5 \text{ MN/m}^2$) bis mitteldichte Lagerung ($7,5 \text{ MN/m}^2 \leq q_c \leq 15 \text{ MN/m}^2$) auf, die zur Tiefe örtlich (DS 3) in eine dichte Lagerung ($15 \text{ MN/m}^2 \leq q_c \leq 25 \text{ MN/m}^2$) übergeht.

Die Unterkante der holozänen Ablagerungen wurde in Tiefenlagen zwischen rd. NHN -10,9 m (B 2) und rd. NHN -17,4 m (WB 1) im Bereich zwischen Startschacht im Jachtweg und Seemannshöft und zwischen rd. NHN -5,7 m (WB 6) und rd. NHN -19,4 m (WB 3) im Bereich des Elbe-Fahrwassers angetroffen.

5.2.4 Weichselzeitliche Ablagerungen

Südlich des Elbhangs wurden unterhalb der holozänen Ablagerungen flächendeckend weichselzeitliche glaziofluviale Ablagerungen des Elbeurstromtales (**Fluss- und Schmelzwassersande mit Kieseinlagerungen** sowie **basaler Kies und kiesiger Sand mit Steineinlagerungen und Steinsohle**) mit Gesamtmächtigkeiten zwischen rd. 5,0 m (WB 6) und rd. 20,4 m (B 2) angetroffen. Die weichselzeitlichen Ablagerungen bestehen überwiegend aus sehr schwach bis schwach kiesigen Mittelsanden mit unterschiedlichen Anteilen an Fein- und Grobsand sowie örtlich Steinen, Schluff-Linsen und Holzkohlegrus. Im Bereich des Köhlfleethafens war an den Bodenproben in den oberen Metern Geruch von Mineralölkohlenwasserstoffen festzustellen. An ihrer Basis wurde eine ca. 1 m (B 1, B 2, WB 1, WB 2/F1, WB 4) bis ca. 4 m (B 4) mächtige Lage aus sandigem Kies und Steinen sowie kiesigem und steinigem Sand mit eingelagerten Steinen angetroffen. An der Basis der weichselzeitlichen Ablagerungen ist überwiegend mit einer Steinsohle zu rechnen, in der Steine und (Groß-) Blöcke unterschiedlicher Größe bis zur Findlingsgröße vorkommen können.



Bohrdurchmesserbedingt konnten in den Bohrkernen keine Steine von mehr als 10 cm Durchmesser und beim Säubern der Verrohrung durch Aufbohren keine Blöcke von mehr als rd. 20 cm Durchmesser gefördert werden. Die größten geförderten und z. T. beim Bohren zertrümmerten Steine/Blöcke hatten demnach Durchmesser von rd. 13 cm bis 20 cm. (z. B. B 2, B 3, B 6).

Beim Abteufen der Drucksondierungen und Bohrungen wurden im Bereich der weichselzeitlichen Ablagerungen zahlreiche Steine und Blöcke unbekannter Größe angetroffen, die z. T. als Bohr- oder Sondierhindernis auftraten und zum Abbruch von Baugrundaufschlüssen führten (z.B. WB 1/F, WB 2/F bis WB 2/F2, WDS 7). In den Bohrkernen eingeklemmte Steine führten außerdem gelegentlich zu Kernverlusten und zu ungenauen Schichtabgrenzungen.

Nach den Ergebnissen der Drucksondierungen weisen die weichselzeitlichen Sande überwiegend eine mindestens mitteldichte ($7,5 \text{ MN/m}^2 \leq q_c \leq 15 \text{ MN/m}^2$) Lagerung und zum Teil eine dichte Lagerung ($15 \text{ MN/m}^2 \leq q_c \leq 25 \text{ MN/m}^2$) bis sehr dichte Lagerung ($q_c > 25 \text{ MN/m}^2$) auf. Im Bereich des Elbefahrwassers tritt örtlich (WDS 3A) auch eine lockere ($2,5 \text{ MN/m}^2 \leq q_c \leq 7,5 \text{ MN/m}^2$) bis mitteldichte Lagerung ($7,5 \text{ MN/m}^2 \leq q_c \leq 15 \text{ MN/m}^2$) auf.

Die Basis der weichselzeitlichen Ablagerungen wurde in unterschiedlichen Tiefen zwischen rd. NHN -23,7 m (WB 4) und ca. NHN -29,2 (B 1, B 4) aufgeschlossen. In den Fehlbohrungen WB 1/F, WB 2/F, WB 2/F1, WB 2/F2 wurde die Basis der weichselzeitlichen Ablagerungen nicht durchteuft.

Die Weichselzeitlichen Sande und Kiese werden auf einer Strecke von ca. 160 m (zwischen Tunnelmeter Stat 0+000 km und Stat 0+160 km) durchfahren.

5.2.5 Saalezeitliche Ablagerungen

Die Ablagerungen der vorletzten Eiszeit (Saale-Kaltzeit) sind durch Erosion während der jüngsten Eiszeit (Weichsel-Kaltzeit) nur noch im Bereich des Elbhangs vorhanden. Dort stehen sie oberflächennah unterhalb einer ca. 0,4 m mächtigen Oberbodenschicht an.



Diese bestehen aus drei verschiedenen, teilweise verzahnten Grundmoränen aus **Geschiebemergel** mit zwischengelagerten Schmelzwassersanden. Der Geschiebemergel weist eine steife bis halbfeste und eine feste Konsistenz auf. Die Schmelzwassersande bestehen aus z. T. **kiesigen Sanden mit örtlichen Kies- und Steinlagen**. Sie enthalten bereichsweise Geschiebemergelstreifen und -lagen. Das Vorkommen von örtlichen **Steinsohlen** ist nicht auszuschließen.

Die obere Moräne ist überwiegend sandig ausgeprägt und wurde nur landseitig im Bereich des Hindenburgparks angetroffen. Sie steht ab GOK bis in einem Niveau zwischen rd. NHN +0,6 m (BS 116) und rd. NHN -0,4 m (B 6) an und wird von Schmelzwasserablagerungen unterlagert. Diese treten ebenfalls in der Bohrung WB 6 bis zu einem Niveau von rd. NHN -10,7 m auf. In den Kleinbohrungen BS 117 und BS 118 wurde die obere Moräne bis zur Bohrendtiefe in einem Niveau zwischen rd. NHN +2,7 m (BS 117) und rd. NHN -3,5 m (BS 118) nicht erbohrt.

Die Unterkante der mittleren Moräne wurde im Bereich des Elbhangs in einem Niveau zwischen rd. NHN -11,8 m (B 6) und rd. NHN -14,7 m (WB 6) erbohrt. Die mittlere Moräne wird ebenfalls von Schmelzwasserablagerungen unterlagert. In der etwa 25 m nördlich der B 6 abgeteufte Bohrung B 5 wurde im v. g. Tiefenbereich der mittleren Moräne kein Geschiebemergel angetroffen.

Die untere Moräne wurde in einer Mächtigkeit von rd. 0,8 m (B 5) bis rd. 3,0 m (B 6) mit einer Oberkante zwischen rd. NHN -15,8 m (B 6) und rd. NHN -20,7 m (B 5) und einer Unterkante zwischen rd. NHN -18,7 m (WB 6) und rd. NHN -21,5 m (B 5) angetroffen.

In den Geschiebemergel der Moräne können entstehungsbedingt **Ton-, Schluff-, Sand- und Kiesschollen** sowie **Steine und (Groß-) Blöcke** (Findlinge) in unterschiedlicher Größe und Verteilung eingelagert sein. Insbesondere auf der Oberkante der Geschiebeböden ist bedingt durch die erodierende Wirkung des Schmelzwassers beim Abtauen der Gletscher mit einer örtlich konzentrierten Ansammlung von Steinen unterschiedlicher Größe zu rechnen.



Nach den Ergebnissen der Drucksondierungen weisen die saalezeitlichen Sande eine dichte ($15 \text{ MN/m}^2 \leq q_c \leq 25 \text{ MN/m}^2$) bis sehr dichte Lagerung ($q_c > 25 \text{ MN/m}^2$) auf.

Die Gesamtmächtigkeit der saalezeitlichen Ablagerungen (Abfolge von Geschiebemergel und Schmelzwassersanden) beträgt im Bereich des Zielschachtes ca. 30 m.

Die Schichtbasis wird vom unterlagernden Lauenburger Ton gebildet.

Die saalezeitlichen Ablagerungen werden auf einer Strecke von ca. 120 m (zwischen Tunnelmeter Stat 1+040 km und Stat 1+160 km) durchfahren.

5.2.6 Elsterzeitliche Ablagerungen

Unterhalb der weichselzeitlichen Ablagerungen wurden, mit Ausnahme eines ca. 350 m breiten Bereichs unterhalb der Elbe, flächendeckend Ablagerungen der vorvorletzten Eiszeit (Elster-Kaltzeit) unterschiedlicher Zusammensetzung angetroffen, die durch die Saalevereisung eiszeitlich vorbelastet wurden.

Während der Elster-Kaltzeit wurde Geschiebemergel auf dem miozänen Untergrund aus Glimmerton abgelagert, an dessen Basis sich eine Steinsohle befindet. Während des Abschmelzens der Gletscher, wurde der Untergrund erodiert und so Rinnen in den Geschiebemergel und den Glimmerton geschnitten sowie Becken geformt. Die Rinnen und Becken wurden mit Schmelzwassersanden, Beckensanden und dem Lauenburger Ton gefüllt.

Beim Abteufen der Drucksondierungen und Bohrungen wurden im Bereich der elsterzeitlichen Ablagerungen zahlreiche Steine und Blöcke unbekannter Größe angetroffen, die z. T. als Bohrhindernis auftraten (z.B. WB 3, B 6). In den Bohrkernen eingeklemmte Steine führten außerdem gelegentlich zu Kernverlusten und zu ungenauen Schichtabgrenzungen.

Nachfolgend werden die einzelnen unterschiedlichen elsterzeitlichen Bodenarten beschrieben.



Lauenburger Schichten

Die jüngsten aufgeschlossenen elsterzeitlichen Ablagerungen bestehen aus elsterzeitlichem Schluff und Ton, bereichsweise feinsandig und/oder mit Feinsandstreifen oder -lagen (im Folgenden generalisiert als **Lauenburger Ton** bezeichnet) sowie schwach schluffigen bis stark schluffigen Feinsanden, bereichsweise mit Ton- und Schluffstreifen oder -lagen (im Folgenden als **Beckensande** bezeichnet). Diese wurden im Bereich des Elbhangs sowie südlich des Seemannshöfts angetroffen. Er stammt aus der Endphase der ältesten Vereisung im norddeutschen Raum (Elster-Kaltzeit). Die feinkörnigen Sedimente wurden in zeitweise abflusslosen Rinnen und Senken vor der abschmelzenden Eisfront abgelagert.

Die Abfolge von schluffigen Sanden und sandigen Schluffen und Tonen ist wechselhaft und unregelmäßig und es bestehen horizontale und laterale Übergänge und Verzahnungen.

Insbesondere in den Randbereichen des Beckens (WB 1) treten Sand- und vereinzelt auch Kieslagen auf.

Die Lauenburger Schichten wurden südlich des Seemannshöfts in einer Mächtigkeit der Schichtenfolge von rd. 15,2 m (WB 1) bis rd. 34,7 m (B 2) angetroffen. Die Schichtbasis der Lauenburger Schichten wurde im Bereich unterhalb des Köhlfleethafens in einer Tiefe von rd. 26,2 m (WB 1) unter Gewässersohle und in Richtung Startschacht in zunehmender Tiefe bis ca. 69 m (B 2) unter GOK erbohrt.

Im Bereich des Elbhangs wurde ein geringmächtiger Horizont des Lauenburger Tons in einer Mächtigkeit zwischen rd. 1,1 m (B 6) und rd. 3,1 m (WB 6) mit einer Schichtunterkante in einem Niveau zwischen rd. NHN -19,9 m (B 6) und rd. NHN -23,5 m (B 5) angetroffen. In diesem Bereich wurde der Lauenburger Ton überwiegend als Schluff und Ton angetroffen.

Die Ablagerungen des Lauenburger Tons bestehen überwiegend aus Ton und Schluff mit unterschiedlichen Feinsand-Anteilen sowie schluffigen bis stark schluffigen Feinsanden in lateral und horizontal stark wechselnden Anteilen. Der Lauenburger Ton wurde z. T. kompakt mit Tonanteilen zwischen 32 und 48 Gewichtsprozent und Feinsandanteilen zwischen 10 und 20 Gewichtsprozent (z.B. in den Bohrungen B 3, WB 1, WB 6) und



bereichsweise als eher magerer Lauenburger Ton aus tonigem Schluff mit einem Tonanteil von unter 26 Gewichtsprozent und Feinsandanteilen zwischen 10 und 35 Gewichtsprozent (z.B. in den Bohrungen B 2, WB 1, B 3) angetroffen. Überwiegend enthält er Feinsand-Adern und -Streifen, z.T. in Wechsellagerung mit Tonen und Schluffen und enthält Sandlagen (schwach schluffige Fein- bis Mittelsande oder schluffige bis stark schluffige Feinsande) von mehreren Dezimetern Mächtigkeit (z.B. B 1, B 2).

Der Lauenburger Ton enthält nach den Ergebnissen der durchgeführten bodenmechanischen Laboruntersuchungen in wechselnden Anteilen organische Substanzen (vermutlich Braunkohlezerreißel) und ist daher als schwach organischer bis organischer Boden einzustufen. Der Lauenburger Ton hat eine steife bis halbfeste und feste Konsistenz. Örtlich wurden gepresste Holzlagen angetroffen.

Nach den Ergebnissen der Drucksondierungen weisen die elsterzeitlichen Sande innerhalb der Lauenburger Schichten eine dichte ($15 \text{ MN/m}^2 \leq q_c \leq 25 \text{ MN/m}^2$) bis sehr dichte Lagerung ($q_c > 25 \text{ MN/m}^2$) auf.

Nähere Einzelheiten zu den Ergebnissen der Baugrundaufschlüsse sind den einzelnen Bohrprofilsäulen und Drucksondierdiagrammen in den Anlagen 023581-2/3.1 bis 3.4 zu entnehmen.

Die Lauenburger Schichten werden auf einer Strecke von ca. 200 m (zwischen Tunnelmeter Stat 0+100 km und Stat 0+300 km) sowie auf einer Strecke von ca. 120 m (zwischen Tunnelmeter 1+000 m und 1+120 m) durchfahren.

Beckensande

Im Bereich der Rinne unterhalb des Seemannshöfts und im Becken zwischen Startschacht und Seemannshöft wurden elsterzeitliche Beckensande (schwach schluffige bis schluffige Fein- bis Mittelsande, mit Schluff-Streifen,) in Schichtdicken bis zu max. rd. 17,8 m (B 4) mit einer Schichtunterkante in einem Niveau zwischen rd. NHN -47,0 m (B 4) und rd. NHN -60,7 m (B 2) erkundet.



Drucksondiererergebnisse aus dieser tiefen Abfolge liegen nicht vor. Nach den Angaben in den Schichtenverzeichnissen zur Beschaffenheit des Bodens und gemäß den Angaben zu den erforderlichen Schlagzahlen beim Einschlagen des Kernentnahmegerätes ist von einer mitteldichten bis dichten Lagerung der Beckensande auszugehen.

Die Beckensande wurden nur örtlich unterhalb der geplanten Tunneltrasse bzw. im Bereich des Startschachtes angetroffen

Schmelzwasserablagerungen

Innerhalb der Rinnen und Becken sowie im Bereich des Elbhanges unterhalb des Lauenburger Tons und des Geschiebemergels wurden elsterzeitliche Schmelzwassersande angetroffen.

Unterhalb der elsterzeitlichen Beckensande und des Lauenburger Tons sowie als Rinnenfüllung unterhalb der weichselzeitlichen Ablagerungen unterhalb des Seemannshöfts wurden **elsterzeitliche Schmelzwasserablagerungen** unterschiedlicher Zusammensetzung angetroffen. Diese Abfolge besteht aus überwiegend Mittelsanden mit unterschiedlichen Feinsand-, Grobsand-, Schluff- und Kies-Anteilen. Sie enthalten bereichsweise Geschiebemergelstreifen und -lagen, Kies-Lagen und vereinzelt bzw. örtlich Steine sowie Holzkohlestreifen oder -lagen. Mit dem Vorkommen eingelagerter Steine und ggf. einzelner Blöcke ist zu rechnen.

Nach den Ergebnissen der Drucksondierung WDS 6, die nur im Bereich des Elbhanges in der Drucksondierung WDS 6 aufgeschlossen wurden, weisen die elsterzeitlichen Schmelzwassersande eine dichte ($15 \text{ MN/m}^2 \leq q_c \leq 25 \text{ MN/m}^2$) bis sehr dichte Lagerung ($q_c > 25 \text{ MN/m}^2$) auf.

Im Bereich des Startschachtes sowie unterhalb des Köhlfleethafens wurden die elsterzeitlichen Schmelzwassersande bis zu den Endteufen der Baugrundaufschlüsse bis in eine maximale Tiefe von rd. NHN -64,7 m (B 1) nicht durchteuft.



Die elsterzeitlichen Schmelzwasserablagerungen werden zwischen Tunnelmeter ca. Stat 0+420 km und ca. Stat 0+520 km sowie ca. Stat 1+000 km und ca. Stat 1+080 km durchfahren.

Geschiebemergel

Der elsterzeitliche Geschiebemergel ist aufgrund der Erosion während des Abschmelzens der Gletscher bereits in der Elster-Zeit erodiert worden und nur noch in Restmächtigkeiten in Form von Rücken-Strukturen im Untergrund vorhanden. Der Geschiebemergel ist überwiegend sandig bis stark sandig ausgeprägt und weist eine steife bis halbfeste Konsistenz und auch eine feste Konsistenz auf.

Der elsterzeitliche Geschiebemergel wurde im Bereich unterhalb des Seemannshöfts in einer Mächtigkeit zwischen rd. 5,4 m (WB 3) und ca. 10 m (WDS 2A) mit einer Schichtunterkante in einem Niveau zwischen rd. NHN -31,5 m (WB 3) und rd. NHN -34,3 m (WDS 2A) angetroffen.

Im Bereich des Elbhangs wurde er nur örtlich (WB 6, B 5) in geringen Mächtigkeiten von max. ca. 1 m angetroffen.

In den Geschiebemergel können entstehungsbedingt **Ton-, Schluff-, Sand- und Kies-schollen** (z.B. WB 3) sowie **Steine und (Groß-) Blöcke** (Findlinge) in unterschiedlicher Größe und Verteilung eingelagert sein. Insbesondere auf der Oberkante der Geschiebeböden ist bedingt durch die erodierende Wirkung des Schmelzwassers beim Abtauen der Gletscher mit einer örtlich konzentrierten Ansammlung von Steinen unterschiedlicher Größe zu rechnen.

Innerhalb des Geschiebemergels wurde in der Bohrung WB 3 eine Beckenton-Scholle angetroffen.

An der Basis des Geschiebemergels wurde im Bereich der Bohrung WB 3 eine ca. 2 m mächtige Lage aus sandigem Kies mit Steinen angetroffen. In der WDS 2A wird aufgrund des hohen Spitzenwiderstandes ebenfalls eine Kies- bzw. Stein-Lage angenommen. An der



Basis der elsterzeitlichen Ablagerungen ist überwiegend mit einer Steinsohle zu rechnen, in der Steine und (Groß-) Blöcke unterschiedlicher Größe bis zur Findlingsgröße vorkommen können.

In der Bohrung B 3 wurde der elsterzeitliche Geschiebemergel bis zur Endteufe der Bohrung bis in eine maximale Tiefe von rd. NHN -49,6 m nicht durchteuft.

Der elsterzeitliche Geschiebemergel wird an verschiedenen Stationen (zwischen Tunnelmeter Stat 0+300 km bis Stat 0+420 km, Stat 0+520 km bis Stat 0+620 km (?, Grenze unscharf) und Stat 1+000 km bis Stat 1+080 km) auf einer Gesamtstrecke von ca. 380 m durchfahren.

5.2.7 Glimmerton

Unterhalb der elsterzeitlichen Ablagerungen wurden bindige Ablagerungen des Neogens angetroffen, die dem oberen Miozän zugeordnet werden und nachfolgend anhand ihrer lithologischen Ausbildung als **Glimmerton** bezeichnet werden.

Die Basis des Glimmertons wurde im Bereich der Trasse bis zur maximalen Bohrtiefe von rd. 70,0 m unter GOK (rd. NHN -59,3 m bei B 6) nicht durchteuft. Die Glimmertonablagerungen erreichen nach U 2.21 im Hamburger Raum eine Gesamtmächtigkeit von ca. 100 m bis 300 m. Im Untersuchungsgebiet wurde eine Glimmertonmächtigkeit bis rd. 27 m (WB 5) aufgeschlossen. Die Aufschlüsse im Bereich des Hindenburgparks liegen nach U 2.21 am Rande der Salzstock-Umgrenzung des Othmarschen-Langenfelde-Diapirs, sodass wir hier tendenziell die geringeren Mächtigkeiten der Glimmertonablagerungen erwarten.

Der Glimmerton ist eine Meeresablagerung und setzt sich aus wechselnden Anteilen der Hauptkomponenten Schluff und Ton sowie untergeordnet Feinsand zusammen. Er ist weitgehend homogen ausgebildet. Im oberen Bereich ist er durch die Gletscheraktivität in der Elster-Kaltzeit überprägt und enthält Sand und Kies. An seiner Oberfläche wurde z. T. eine Kies- und Steinsohle angetroffen.



Der Glimmerton ist unregelmäßig kalkhaltig bis kalkfrei ausgebildet. Gemäß den Untersuchungsergebnissen der U 2.14 enthält er quellfähige Tonmineralien (Smectite) und entwickelt bei Wasserzutritt und behinderter Dehnung Quelldrücke.

Der Glimmerton hat eine feste und untergeordnet halbfeste Konsistenz. Nach U 2.22 wurden im Glimmerton im Bereich des nahegelegenen Tiefdükers Dradenau unterschiedliche Trennflächensysteme (Schichtung, unterschiedliche Klüfte) angetroffen. Im Rahmen unserer Bodenansprache konnten markante offene Trennflächen nicht festgestellt werden. Es ist jedoch davon auszugehen, dass das v. g. Trennflächensystem zumindest örtlich auch im Bereich der Trasse ausgebildet sein kann.

Im Bereich zwischen dem Elbhang und des Elbefahrwassers (WB 5) ist im Untergrund eine Rückenstruktur des Glimmertons ausgebildet, die im oberen Bereich stark sandig ausgeprägt ist.

Nähere Einzelheiten zu den Ergebnissen der Baugrundaufschlüsse sind den einzelnen Bohrprofilsäulen und Drucksondierdiagrammen in den Anlagen 023581-2/3.1 bis 3.4 zu entnehmen.

Der Glimmerton wird auf einer Strecke von ca. 300 m (zwischen Tunnelmeter Stat 0+720 m (?), Grenze unscharf) und Stat 1+020 m) durchfahren.

5.3 Lagerungsdichte der Sande

Die Lagerungsdichten der verschiedenen sandigen Schichtkomplexe wurden durch die Drucksondierungen DS 1 bis DS 6 und WDS 1 bis WDS 6 erfasst.

Danach stehen die gewachsenen Sande der verschiedenen stratigrafischen Einheiten überwiegend in mindestens mitteldichter Lagerung (Spitzendruck der Sonde $q_c \geq 7,5 \text{ MN/m}^2$) und zur Tiefe hin häufig in dichter ($q_c = 15\text{-}25 \text{ MN/m}^2$) bzw. sehr dichter ($q_c \geq 25 \text{ MN/m}^2$) Lagerung an. Untergeordnet (v.a. im Bereich der Auffüllungen und der holozänen Sande in der Fahrrinne) wurden auch Bereiche mit nur locker bis mitteldichter Lagerungsform ($q_c = 5\text{-}7,5 \text{ MN/m}^2$) angetroffen.



Die Ergebnisse der Drucksondierungen sind in den Anlagen 023581-2/3.1 bis 3.4 als höhengerecht aufgetragene Diagramme dargestellt.

6. Wasserverhältnisse

6.1 Wasserstände

Beim Abteufen der Aufschlussbohrungen wurden in den holozänen Sanden im Bereich des Startschachtes nicht ausgespiegelte Wasserstände mit Höhen zwischen rd. NHN -1,1 m (B 1) und rd. NHN -0,1 m (B 2) eingemessen. Im Bereich des Seemannsthöfts (B 4) wurde innerhalb der aufgefüllten Sande ein nicht ausgespiegelter Wasserstand mit einer Höhe von rd. NHN +2,6 m eingemessen. Im Bereich der Geest wurden nicht ausgespiegelte Wasserstände mit Höhen zwischen rd. NHN +5,1 m (B 5) und rd. NHN +8,6 m (B 6) innerhalb der saalezeitlichen Sande eingemessen.

Zur Ermittlung der tideabhängigen Grundwasserstandsschwankungen wurden in die Grundwassermessstellen elektronische Datenlogger eingebaut, mit denen die Grundwasserdruckhöhen im Zeitraum vom 21.01. bis 05.11.2020 aufgezeichnet wurden.

Im Nahbereich des Startschachtes in der Elbmarsch wurden im v. g. Zeitraum in den Grundwassermessstellen GWM B 2 (elsterzeitliche Sande/unterer Grundwasserleiter) und GWM B 3 (weichselzeitliche Sande/oberer Grundwasserleiter) tidebeeinflusste Grundwasserstände im Niveau zwischen rd. NHN +2,9 m und rd. NHN -1,6 m (GWM B 3) bzw. zwischen rd. NHN +2,6 m und rd. NHN -1,4 m (GWM B 2) (Anlage 023581-2/4.1) und in der Grundwassermessstelle GWM B 5 (elsterzeitliche Sande/unterer Grundwasserleiter) im Nahbereich des Zielschachtes in der Geest Grundwasserstände im Niveau zwischen rd. NHN +3,7 m und rd. NHN -0,4 m (Anlage 023581-2/4.2) bei einem Wasserstandsniveau der Elbe zwischen rd. NHN +4,2 m und rd. NHN -2,6 m gemessen. Im Messzeitraum wurden tidebedingte Schwankungen des Grundwasserspiegels in der Größenordnung um rd. 1,5 m bis 2,0 m bei Elbtidenschwankungen um rd. 4 m bis 5 m festgestellt. Damit liegt der Dämpfungsgrad gegenüber den Tidebewegungen der Elbwasserstände im Bereich des geplanten Startschachtes bei einem Faktor von ca. 50 – 60 % und im unteren Grundwasserleiter im Bereich des Zielschachtes bei einem Faktor von ca. 80 – 90 %.



Im Nahbereich des Zielschachtes in der Geest wurden im v. g. Zeitraum in den Grundwassermessstellen GWM B 6 (saalezeitliche Sande/mittlerer artesischer Grundwasserleiter) und GWM B 6.1 (saalezeitliche Sande/oberer artesischer Grundwasserleiter) relativ konstante Grundwasserstände im Niveau zwischen rd. NHN +12,2 m und rd. NHN +10,6 m (GWM B 6) bzw. zwischen rd. NHN +12,2 m und rd. NHN +10,9 m (GWM B 6.1) (Anlage 023581-2/4.4). Im Messzeitraum wurden sehr geringe Schwankungen des Grundwasserspiegels in der Größenordnung um rd. 0,4 m bis 0,8 m festgestellt.

Alle Ganglinien sind in den Anlagen 023581-2/4.1.1 bis 4.4.2 dargestellt.

Angaben zu den Bemessungswasserständen für die Bauzeit bzw. den Endzustand sind getrennt für die einzelnen Schachtbauwerke und den Tunnel in den Abschnitten 10.1 und 11.1 angegeben.

6.2 Grundwasserzusammensetzung

Aus den ausgebauten Grundwassermessstellen GWM B 2, GWM B 3, GWM B 5, GWM B 6 und GWM B 6.1 wurden im Zeitraum vom 04.12.2019 bis 28.01.2020 je eine Grundwasserprobe entnommen und die Betonaggressivität nach DIN EN 206 bzw. DIN 4030, die Stahlaggressivität nach DIN 50929, die Parameter für die Einleitung in die Vorflut sowie verschiedene für den Schildvortrieb ausgewählte Zusatzparameter analysiert.

Die Untersuchungsergebnisse sind gemäß den Prüfberichten des Labors in den Anlagen 023581-2/6.1 bis 6.5 wiedergegeben und nachfolgend tabellarisch zusammengestellt.

Tabelle 1 Ergebnisse der Grundwasseruntersuchungen auf Beton- und Stahlaggressivität

GWM	Wasserprobe		Betonaggressivität Expositionsklasse	Stahlaggressivität		
	Entnahme-Datum	Entnahme-Tiefe [mNHN]		Mulden- / Lochkorrosion	Flächenkorrosion	Güte
B 2	05.12.2019	-49,6	XA 2	sehr gering	sehr gering	sehr gut
B 3	10.12.2019	-24,8	nicht Beton angreifend	sehr gering	sehr gering	sehr gut
B 5	20.12.2019	-30,5	nicht Beton angreifend	sehr gering	sehr gering	sehr gut
B 6	28.01.2020	-15,5	XA 1	sehr gering	sehr gering	sehr gut
B 6.1	28.01.2020	-4,6	nicht Beton angreifend	sehr gering	sehr gering	sehr gut



Die Wasserproben wurden aus unterschiedlichen Grundwasserstockwerken entnommen.

Die Grundwasserproben in den Messstellen B 3, B 5 und B 6.1 weisen keine Betonaggressivität auf. In der Messstelle GWM B 6 ist das Grundwasser in die Expositionsklasse XA 1 (geringe Betonaggressivität) und in der Messstelle GWM B 2 in die Expositionsklasse XA 2 (mäßige Betonaggressivität) einzustufen.

Bezüglich der Stahlaggressivität wurde bei allen Proben eine sehr geringe Flächenkorrosion ermittelt. Die Mulden- und Lochkorrosion wird ebenfalls als sehr gering eingestuft.

Die hydrochemischen Untersuchungen zur Einleitbarkeit von gefördertem Grundwasser ergaben bei einigen der untersuchten Wasserproben Überschreitungen von Grenzwerten für die Einleitung in Gewässer II. Ordnung, so dass das beim Lenzen der Baugruben des Start- und Zielschachtes anfallende Grundwasser vor Einleitung in die Vorflut in der Regel gereinigt werden muss. Die grenzwertüberschreitenden Parameter aus den Analysen der Baugrunderkundung (Anlagen 023581-2/5.1 bis 5.5) sind in der nachfolgenden Tabelle 2 im Einzelnen aufgeführt.

Tabelle 2 Ergebnisse der Grundwasseruntersuchungen auf Einleitparameter

Wasserprobe		Überschreitungen Einleitparameter RW-Siel/Vorfluter	Überschreitungen Einleitparameter MW- / Schmutzwassersiel
GWM	Entnahme-Datum		
B 2	05.12.2019	Ammonium, Sulfat, Kupfer, Zink	Sulfat
B 3	10.12.2019	Ammonium	keine
B 5	20.12.2019	keine	keine
B 6	28.01.2020	Eisen gesamt, Sulfat	keine
B 6.1	28.01.2020	keine	keine

7. Bodenmechanische Laborversuche

7.1 Allgemeines

Zur Abschätzung der in erdstatischen Berechnungen für die anstehenden Bodenschichten anzusetzenden Bodenkennwerte wurden neben der manuellen und visuellen Bewertung der Bodenproben an ausgewählten ungestört und gestört entnommenen Bodenproben folgende bodenmechanische Laborversuche durchgeführt:



- Ermittlung des Wassergehaltes (w) nach DIN EN ISO 17892-1
- Ermittlung der Korngrößenverteilung nach DIN EN ISO 17892-4
- Ermittlung der Wichte (γ) bzw. Dichte (ρ) nach DIN EN ISO 17892-2
- Ermittlung der Zustandsgrenzen nach DIN 18122-1
- Ermittlung der Schrumpfgrenze nach DIN 18122-2
- Ermittlung des Glühverlustes (V_{gl}) nach DIN 18128
- Ermittlung des Kalkgehaltes (V_{ca}) nach DIN 18129
- Ermittlung der Wasserdurchlässigkeit k_f nach DIN EN ISO 17892-11
- Ermittlung der Zusammendrückbarkeit (E_s) im Kompressionsversuch nach DIN EN ISO 17892-5
- Ermittlung der undrained Scherfestigkeit (c_u) im Zylinderdruckversuch nach DIN EN ISO 17892-7
- Ermittlung der effektiven Scherparameter (φ' , c') im direkten Rahmenscherversuch (CD-Versuch) nach DIN EN ISO 17892-10
- Ermittlung des Quellpotentials und des Quelldrucks nach KAISER/HENKE

Weiterhin wurden zur Ermittlung des Kornrundungsgrades und des Abrasionsvermögens repräsentative Proben der weichselzeitlichen und elsterzeitlichen Sande sowie des saalezeitlichen und elsterzeitlichen Geschiebemergels mikroskopisch untersucht.

Zur Beurteilung des Verklebungspotentials für die Werkzeuge der Schildvortriebsmaschine und des Quellvermögens wurde die Tonmineralzusammensetzung der bindigen Böden durch Tonmineralanalysen mit dem Röntgendiffraktometer untersucht.

Die Ergebnisse der ausgeführten bodenmechanischen Laborversuche können im Einzelnen den Anlagen 023581-2/7 bis 12 entnommen werden.

7.2 Organische Weichschichten

7.2.1 Wassergehalte

Zur Abschätzung der in erdstatischen Berechnungen anzusetzenden Bodenkennwerte wurde in unserem Labor an ausgewählten Bodenproben der organischen Weichschichten (Klei und Torf) der Wassergehalt (w) nach DIN EN ISO 17892-1 ermittelt. Die Ergebnisse sind in den Anlagen 023581-2/3.1 bis 3.4 in einer Spalte neben den Bohrprofilen, den



Probeentnahmetiefen zugeordnet, eingetragen. Es ergeben sich die in Tabelle 3 zusammengestellten Grenz- und Mittelwerte:

Tabelle 3 Wassergehalte der organischen Weichschichten

Bodenart	Versuchsanzahl	Wassergehalt w (%)		
		min.	mittel	max.
Klei	8	42,3	85,2	120
Torf	4	184	202	238

7.2.2 Wichte

Zur Bestimmung der Feuchtwichte wurde die Dichte (ρ in $\text{g/cm}^3 = \text{t/m}^3$) nach DIN EN ISO 17892-2 an insgesamt drei ungestört entnommenen Proben der organischen Weichschichten bestimmt.

Nach statistischer Auswertung ergeben sich die in Tabelle 4 angegebenen Grenz- und Mittelwerte.

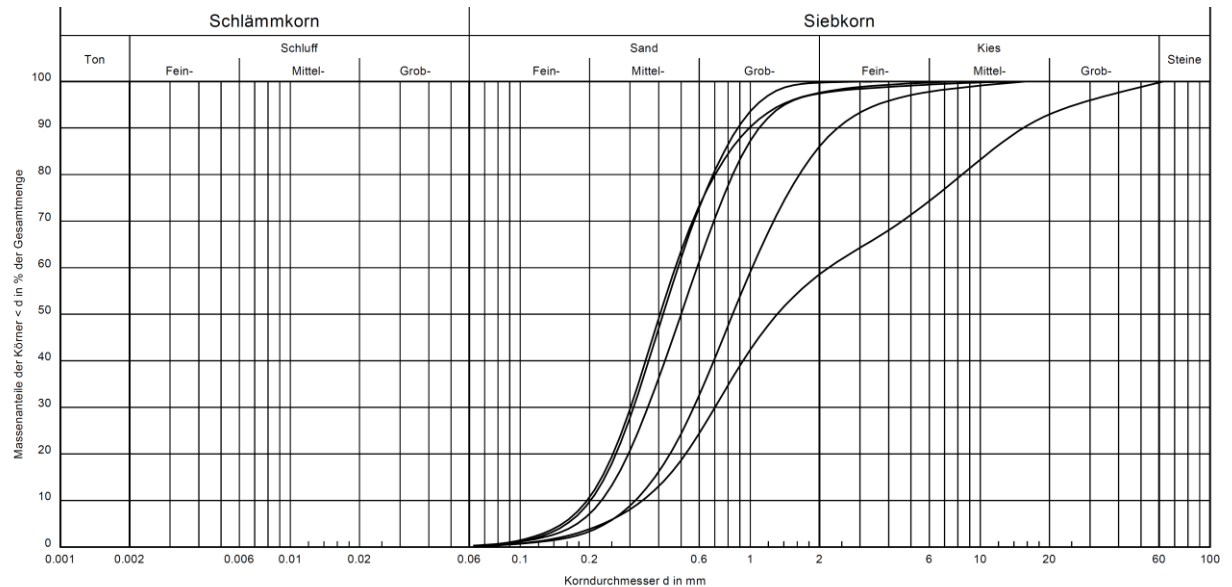
Tabelle 4 Feuchtwichte der organischen Weichschichten

Bodenart	Anzahl der Versuche	Feuchtwichte γ [kN/m^3]		
		min.	mittel	max.
Klei	1	-	14,2	-
Torf	2	11,3	-	11,9

7.3 Weichselzeitliche Sande und Kiese

7.3.1 Korngrößenverteilung

An insgesamt vier Bodenproben der weichselzeitlichen Sande und einer Bodenprobe der weichselzeitlichen Kiese wurde die Korngrößenverteilung nach DIN EN ISO 17892-4 ermittelt. Die Ergebnisse sind in der Anlage 023581-2/7.1.1 als Kornverteilungskurven dargestellt.

**Abbildung 1** Korngrößenverteilungsband der weichselzeitlichen Sande und Kiese

7.3.2 Wasserdurchlässigkeit

Von den anstehenden weichselzeitlichen Sanden wurde an einer Probe der Wasserdurchlässigkeitsbeiwert im Laborversuch nach DIN EN ISO 17892-11 bestimmt. Das Ergebnis des Laborversuchs ist in Tabelle 5 aufgeführt.

Tabelle 5 Wasserdurchlässigkeit der weichselzeitlichen Sande

Bohrung	Entnahmetiefe unter Ansatzpunkt [m]	Bodenart	Wasserdurchlässigkeitsbeiwert k
			[m/s]
B 3	28,3 – 28,5	mS, gs, fs'	$3,9 \cdot 10^{-4}$

7.4 Elsterzeitlicher Lauenburger Ton

7.4.1 Wassergehalte

Zur Abschätzung der in erdstatischen Berechnungen anzusetzenden Bodenkennwerte wurde in unserem Labor an ausgewählten Bodenproben des Lauenburger Tons der Wassergehalt (w) nach DIN EN ISO 17892-1 ermittelt. Die Ergebnisse sind in den Anlagen 023581-2/3.1 bis 3.4 in einer Spalte neben den Bohrprofilen, den Probeentnahmetiefen zugeordnet, eingetragen. Es ergeben sich die in Tabelle 6 zusammengestellten Grenz- und Mittelwerte:

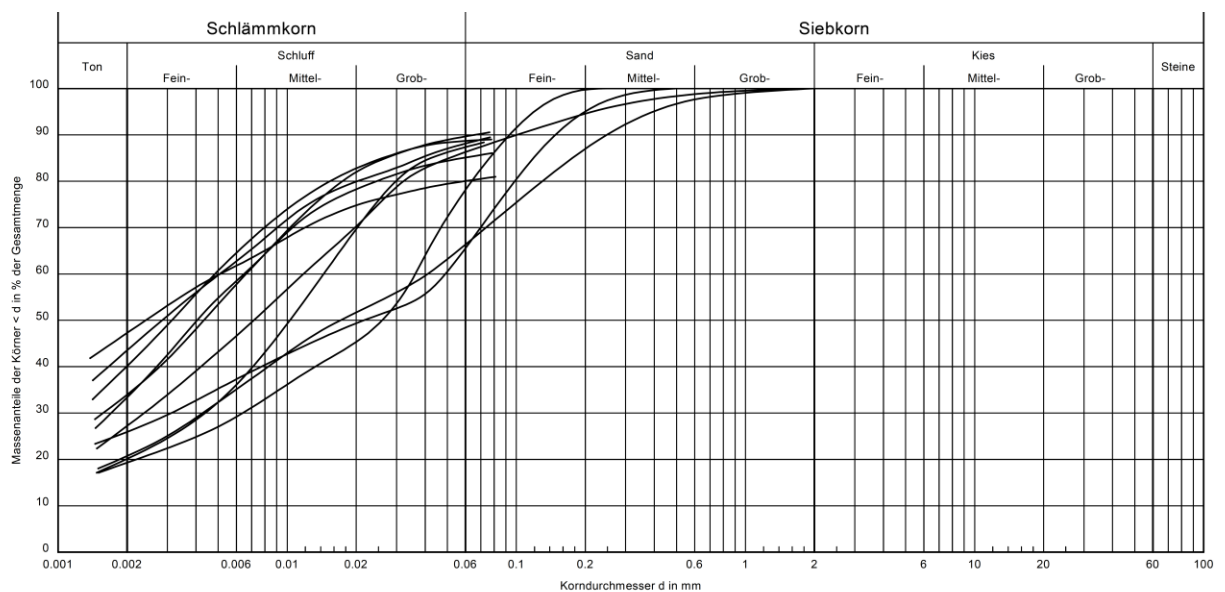
Tabelle 6 Wassergehalte des Lauenburger Tons

Bodenart	Versuchszahl	Wassergehalt w (%)		
		min.	mittel	max.
Lauenburger Ton & Beckenton	30	15,7	27,9	36,5

7.4.2 Korngrößenverteilung

An insgesamt neun Bodenproben des Lauenburger Tons sowie einer Probe eines elsterzeitlichen Beckentons wurde die Korngrößenverteilung nach DIN EN ISO 17892-4 ermittelt. Die Ergebnisse sind in den Anlagen 023581-2/7.3.1 bis 7.3.3 als Kornverteilungskurven dargestellt.

Abbildung 2 Korngrößenverteilungsband des elsterzeitlichen Lauenburger Tons und Beckentons



7.4.3 Wichte

Zur Bestimmung der Feuchtwichte wurde im Rahmen der Kompressions-, Scher- und Quellversuche die Dichte nach DIN EN ISO 17892-2 an insgesamt 12 ungestört entnommenen Proben des Lauenburger Tons bzw. des Beckentones bestimmt.



Die Einzelwerte der ermittelten Feuchtwichte sind in den Anlagen 023581-2/9.1.1 bis 9.1.3, 10.1.1 bis 10.1.5, 11.1.1 und 12.1.1 bis 12.1.3 angegeben. Nach statistischer Auswertung ergeben sich die in Tabelle 7 angegebenen Grenz- und Mittelwerte.

Tabelle 7 Feuchtwichte Lauenburger Ton

Bodenart	Anzahl der Versuche	Feuchtwichte γ [kN/m ³]		
		min.	mittel	max.
Lauenburger Ton	9	17,8	19,4	20,8
Beckenton	3	19,5	19,8	20,3

7.4.4 Glühverlust

An vier Bodenproben des Lauenburger Tons wurde der Glühverlust (V_{gl}) nach DIN 18128 zur Ermittlung des Anteils an organischer Substanz bestimmt. Die Werte sind in den Anlagen 023581-2/3.1 bis 3.4 links neben den Bohrprofilen, der Probenentnahmetiefe zugeordnet, angegeben.

Tabelle 8 Glühverlust des Lauenburger Tons

Bodenart	Anzahl der Versuche	Klassifizierung	Glühverlust V_{gl} [%]		
		DIN EN ISO 14688-2	min.	mittel	max.
Lauenburger Ton und Beckenton	2	schwach organisch	3,54	-	3,81
Lauenburger Ton	3	mittel organisch	7,16	10,95	15,14

7.4.5 Kalkgehalt

Der Kalkgehalt wurde nach DIN 18129 an vier Proben des Lauenburger Tons wie folgt bestimmt:

Tabelle 9 Kalkgehalt des Lauenburger Tons

Bodenart	Anzahl der Versuche	Kalkgehalt V_{Ca} [%]		
		min.	mittel	max.
Lauenburger Ton	4	7,4	9,5	11,1



Die Werte sind in den Anlagen 023581-2/3.1 bis 3.4 links neben den Bohrprofilen, der Probenentnahmetiefe zugeordnet, angegeben.

7.4.6 Konsistenzgrenzen

An vier Proben des Lauenburger Tons und an einer Probe des elsterzeitlichen Beckentons wurden die Wassergehalte an der Fließ- und Ausrollgrenze (w_L und w_P) nach DIN 18122 bestimmt. Die Ergebnisse sind zusammen mit dem für diese Probe bestimmten natürlichen Wassergehalt (w) auf den Anlagen 023581-2/8.1.1 bis 8.1.5 angegeben. Die v. g. Werte sind einschließlich der sich aus den Versuchswerten ergebenden Plastizitätszahl

$I_P = w_L - w_P$ und der Konsistenzzahl $I_C = (w_L - w) / (w_L - w_P)$ in der Tabelle 10 aufgeführt.

Tabelle 10 Konsistenzgrenzen des Lauenburger Tons und des Beckentons

Bohrung	Stratigrafische Einordnung	Entnahmetiefe unter Elbsohle [m]	Natürlicher Wassergehalt w [%]	Konsistenzgrenzen				Bodengruppe nach DIN 18196
				w_L [%]	w_P [%]	I_P [%]	I_C [-]	
B 2	Lauenburger Ton	37,25	19,9	43,7	24,4	19,3	1,23	TM
B 3		35,30	33,0	73,4	40,3	33,1	1,22	OT
B 5		35,25	26,7	80,3	38,3	42,0	1,28	OT
WB 1		20,40	15,7	43,9	21,4	22,5	1,25	TM
WB 3	Beckenton	11,60	22,3	37,5	20,2	17,3	0,88	TM

7.4.7 Zusammendrückbarkeit

Zur Bestimmung der Steifemoduli (E_s) des Lauenburger Tons wurden an insgesamt zwei ungestört entnommenen Bodenproben des Lauenburger Tons und einer ungestört entnommenen Bodenprobe des elsterzeitlichen Beckentons Kompressionsversuche mit verhinderter Seitendehnung nach DIN EN ISO 17892-5 durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Form der gemessenen Lastsetzungskurven in den Anlagen 023581-2/9.1.1 bis 9.1.3 dargestellt. Die aus den Lastsetzungskurven für verschiedene Spannungsbereiche ermittelten Steifemoduli der Zweitbelastung E_{s2} , sowie der Einbauwassergehalt und die Wichte sind ebenfalls den o. g. Anlagen zu entnehmen.



Zusammengefasst ergeben sich folgende Grenz- und Mittelwerte:

Tabelle 11 Steifemoduli Lauenburger Ton und Beckenton

Bodenart	Bohrung	Tiefe [m]	Steifemoduli [MN/m ²] Zweitbelastung			
			0,06-0,12 MN/m ²	0,12-0,25 MN/m ²	0,25-0,51 MN/m ²	0,51-1,03 MN/m ²
Lauenburger Ton	B 2	37,50	29	67,4	67,4	78,3
	B 3	32,50	14	33,1	42,3	46,1
Beckenton	WB 3	11,80	76,4	65	28,9	42,3

7.4.8 UndrÄnierte Scherfestigkeit

Die undrÄnierte Scherfestigkeit c_u wurde an vier ungestört entnommenen Proben des Lauenburger Tons und einer ungestört entnommenen Probe des elsterzeitlichen Beckentons durch einaxiale Druckversuche nach DIN EN ISO 17892-7 ermittelt. Die Scherkurven sind in den Anlagen 023581-2/10.1.1 bis 10.1.5 dargestellt. Zusammengefasst ergeben sich folgende undrÄnierte Scherfestigkeiten c_u :

Tabelle 12 UndrÄnierte Scherfestigkeit Lauenburger Ton und Beckenton

Bodenart	Anzahl der Versuche	c_u [kN/m ²]		
		min.	mittel	max.
Lauenburger Ton	4	23	58	95
Beckenton	1	-	63	-

7.4.9 Effektive Scherparameter

Zur Bestimmung der effektiven Scherparameter ϕ' und c' wurde an insgesamt einer ungestört entnommenen Probe des Lauenburger Tons ein direkter Scherversuch (CD-Versuch) nach DIN 18137-3 durchgeföhrt. Die Versuchsergebnisse mit den Scherparametern ϕ' und c' gehen aus der Anlage 023581-2/11.1.1 hervor.

Tabelle 13 Effektive Scherparameter Lauenburger Ton

Bodenart	Anzahl der Versuche	Reibungswinkel ϕ' (°)			Kohäsion c' [kN/m ²]		
		min.	mittel	max.	min.	mittel	max.
Lauenburger Ton	1	-	5,4	-	-	223,2	-



7.4.10 Quellversuche

Für die Beurteilung des Quellverhaltens des Lauenburger Tons und des Beckentons wurden an drei ausgewählten Proben Quellversuche nach KAISER/HENKE durchgeführt. Die Versuchsergebnisse sind in der Tabelle 14 zusammengefasst.

Tabelle 14 Ergebnisse der Quellversuche nach KAISER/HENKE

Bodenart	Bohrung Nr.	Tiefe unter GOK [m]	Korngrößen- verteilung			Wasser- gehalt w [%]	Quell- zeit [t]	Quell- potential ε [%]	Quell- druck $\sigma_{q\check{\lambda}}$ [kN/m ²]
			T [%]	U [%]	S [%]				
Lauenburger Ton	B 3	35,5	40	48	12	31,5	4	2,40	420
	WB 1	20,4	28	68	14	21,6	3	2,40	390
Beckenton	WB 3	11,9	19	61	20	30,7	3	2,50	410

Die Spannungs-Dehnungsdiagramme sind in den Anlagen 023581-2/12.1.1 bis 12.1.3 aufgetragen.

Insgesamt zeigt der Lauenburger Ton in Abhängigkeit von der Größe des Gehaltes an Tonmineralen und hier insbesondere des Smectitgehaltes ein relativ geringes Quellpotential zwischen 2,4 % und 2,5 %. Der bei den Versuchen ermittelte Quelldruck von bis zu rd. $\sigma_{q\check{\lambda}} = 420 \text{ kN/m}^2$ ist bei der Bemessung der Tunnelröhre zu berücksichtigen (s. Abschn. 10.3).

7.4.11 Tonmineralanalysen

Zur Ermittlung des Gehaltes an quellfähigen Mineralien haben wir zwei ausgewählte Bodenproben des Lauenburger Tons zur Tonmineralanalyse an das Institut Dr. Baermann & Partner, Hamburg, weitergeleitet. Dort wurde das Probenmaterial fraktioniert (Sand- und Schlufffraktion entfernt) und an der Korngrößenfraktion $\leq 2 \mu\text{m}$ (Tonfraktion) mittels Röntgenbeugung die Anteile an Tonmineralien und an anderen Mineralien bestimmt. Die Untersuchungsergebnisse sind in der nachfolgenden Tabelle 15 zusammengestellt. Die Einzelergebnisse sind gemäß der U 2.14 in der Anlage 023581-2/13 wiedergegeben.



Die in den untersuchten Proben nachgewiesenen Tonmineralien der Smectitgruppe sind stark quellfähig, wenn sie mit Wasser in Kontakt kommen.

Nach den v. g. Untersuchungsergebnissen liegt der Anteil der quellfähigen Mineralien innerhalb der untersuchten Tonfraktion größtenteils zwischen rd. 31 % und rd. 47 %.

Bezogen auf die Gesamtbodenproben (einschließlich der Schluff- und Feinsandfraktion) ist der prozentuale Anteil geringer.

Tabelle 15 Mineralgehalte der Tonfraktion in einer Bodenprobe des Lauenburger Tons

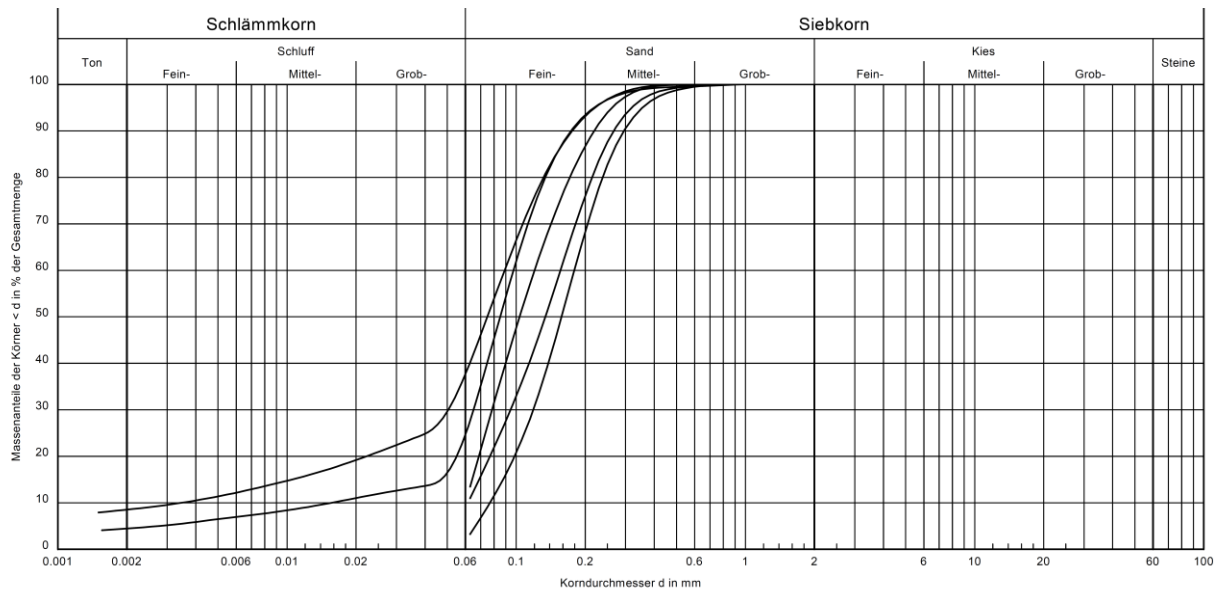
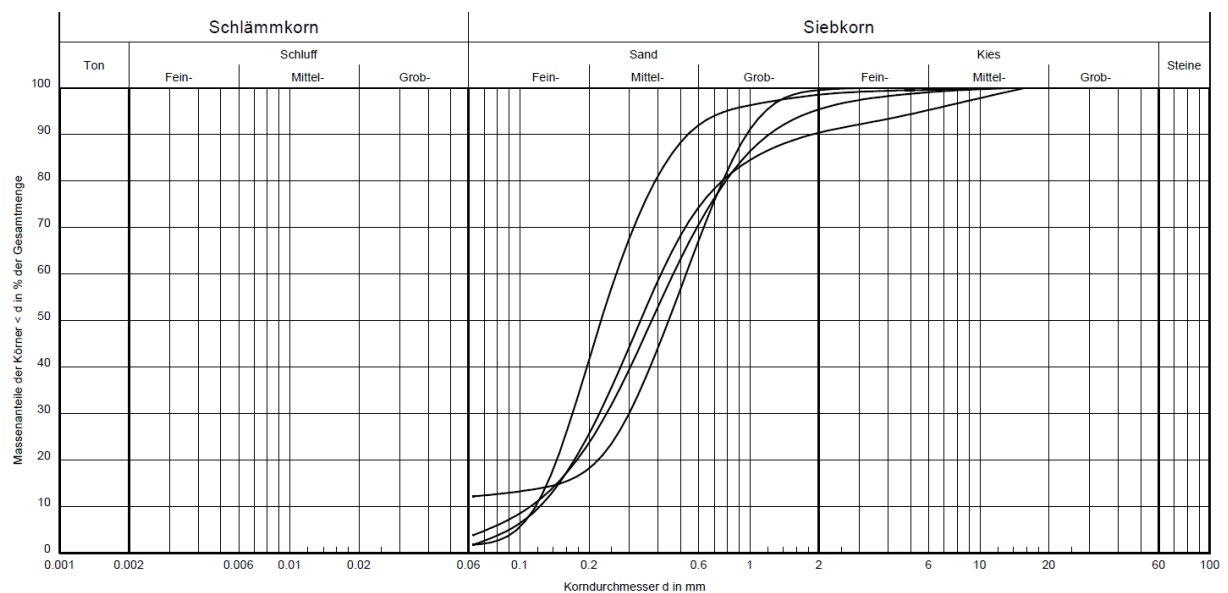
Bohrung	Probenentnahmetiefe unter GOK [m]	Mineralgehalt [% der Tonfraktion $\leq 2 \mu\text{m}$]					
		Tonmineralien					Calcit
		Smectit*	Illit	Kaolinit	Vermiculit/ mixed layer- Minerale	Chlorit	
B 3	35,5	45 - 47	23 - 25	16 - 18	< 2	2 - 4	8 - 10
WB 1	17,4	31 - 33	24 - 26	21 - 23	< 2	2 - 4	16 - 18

* quellfähige Mineralien

7.5 Elsterzeitliche Sande

7.5.1 Korngrößenverteilung

An insgesamt fünf Bodenproben der elsterzeitlichen Beckensande und vier Bodenproben der elsterzeitlichen Schmelzwassersande wurde die Korngrößenverteilung nach DIN EN ISO 17892-4 ermittelt. Die Ergebnisse sind in den Anlagen 023581-2/7.4.1 und 7.4.2 (Beckensande) und in der Anlage 023581-2/7.5.1 (Schmelzwassersande) als Kornverteilungskurven dargestellt.

**Abbildung 3** Korngrößenverteilungsband der elsterzeitlichen Beckensande**Abbildung 4** Korngrößenverteilungsband der elsterzeitlichen Schmelzwassersande

7.5.2 Wasserdurchlässigkeit

Von den anstehenden elsterzeitlichen Sanden wurde an drei Proben der Wasserdurchlässigkeitsbeiwert im Laborversuch nach DIN EN ISO 17892-11 bestimmt. Die Ergebnisse der Laborversuche sind in Tabelle 16 aufgeführt.

Tabelle 16 Wasserdurchlässigkeit der elsterzeitlichen Sande

Bohrung	Entnahmetiefe unter Ansatzpunkt [m]	Stratigrafische Einordnung	Bodenart	Wasserdurchlässigkeitsbeiwert k [m/s]
B 1	59,0	Beckensande	fS, ms', u'	$3,8 \cdot 10^{-6}$
B 4	38,6 - 38,9	Schmelzwasser-sande	mS, fs, gs, g', u''	$9,2 \cdot 10^{-5}$
WB 6	22,4 – 22,7	Schmelzwasser-sande	mS, $\bar{f}s$, gs'', g''	$1,3 \cdot 10^{-4}$

7.6 Geschiebemergel

7.6.1 Wassergehalte

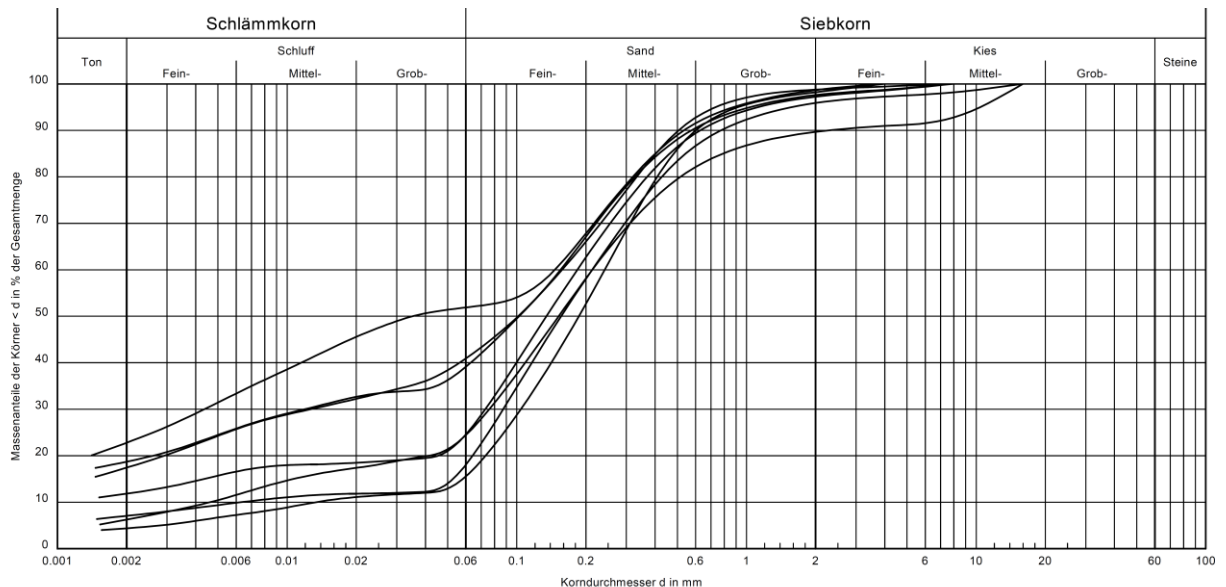
Zur Abschätzung der in erdstatischen Berechnungen anzusetzenden Bodenkennwerte wurde in unserem Labor an ausgewählten Bodenproben des bindigen Geschiebemergels der Wassergehalt (w) nach DIN EN ISO 17892-1 ermittelt. Die Ergebnisse sind in den Anlagen 023581-2/3.1 bis 3.4 in einer Spalte neben den Bohrprofilen, den Probeentnahmetiefen zugeordnet, eingetragen. Es ergeben sich die in Tabelle 17 zusammengestellten Grenz- und Mittelwerte:

Tabelle 17 Wassergehalte des bindigen Geschiebebodens

Bodenart	Versuchszahl	Wassergehalt w (%)		
		min.	mittel	max.
Geschiebemergel	16	10,4	14,3	23,7

7.6.2 Korngrößenverteilung

An insgesamt sieben Bodenproben des Geschiebemergels wurde die Korngrößenverteilung nach DIN EN ISO 17892-4 ermittelt. Die Ergebnisse sind in den Anlagen 023581-2/7.6.1 und 7.6.2 als Kornverteilungskurven dargestellt.

**Abbildung 5** Korngrößenverteilungsband des Geschiebemergels

7.6.3 Wichte

Zur Bestimmung der Feuchtwichte wurde im Rahmen der Kompressions-, Scher- und Quellversuche die Dichte nach DIN EN ISO 17892-2 an insgesamt fünf ungestört entnommenen Proben des Geschiebemergels bestimmt.

Die Einzelwerte der ermittelten Feuchtwichten sind den Anlagen 023581-2/10.2.1 bis 10.2.3, 11.2.1 und 11.2.2 entnehmen. Nach statistischer Auswertung ergeben sich die in Tabelle 18 angegebenen Grenz- und Mittelwerte.

Tabelle 18 Feuchtwichte Geschiebemergel

Bodenart	Anzahl der Versuche	Feuchtwichte γ [kN/m ³]		
		min.	mittel	max.
Geschiebemergel	5	21,5	21,9	22,6

7.6.4 Glühverlust

Zur Ermittlung des organischen Anteils wurde an einer Bodenprobe aus dem Geschiebemergel der Glühverlust nach DIN 18128 bestimmt.



Der ermittelte Einzelwert ist auf der Anlage 023581-2/3.4 links neben dem Bohrprofil, der entsprechenden Probenentnahmetiefe zugeordnet, angegeben.

Tabelle 19 Glühverlust des Geschiebemergels

Bodenart	Anzahl der Versuche	Klassifizierung	Glühverlust V_{gl} [%]		
		DIN EN ISO 14688-2	min.	mittel	max.
Geschiebemergel	1	schwach organisch	-	2,4	-

7.6.5 UndrÄnierte Scherfestigkeit

Die undrÄnierte Scherfestigkeit c_u wurde an drei ungestört entnommenen Proben des Geschiebemergels durch einaxiale Druckversuche nach DIN EN ISO 17892-7 ermittelt. Die Scherkurven sind in den Anlagen 023581-2/10.2.1 bis 10.2.3 dargestellt. Zusammengefasst ergeben sich folgende undrÄnierte Scherfestigkeiten c_u :

Tabelle 20 UndrÄnierte Scherfestigkeit Geschiebemergel

Bodenart	Anzahl der Versuche	c_u [kN/m ²]		
		min.	mittel	max.
Geschiebemergel	3	25	59	90

7.6.6 Effektive Scherparameter

Zur Bestimmung der effektiven Scherparameter ϕ' und c' wurden an insgesamt 2 ungestört entnommenen Proben des Geschiebemergels direkte Scherversuche (CD-Versuche) nach DIN 18137-3 durchgeföhrt. Die Versuchsergebnisse mit den Scherparametern ϕ' und c' gehen aus den Anlagen 023581-2/11.2.1 und 11.2.2 hervor. Zusammengefasst ergeben sich folgende Grenz- und Mittelwerte:

Tabelle 21 Effektive Scherparameter Geschiebemergel

Bodenart	Anzahl der Versuche	Reibungswinkel ϕ' (°)			Kohäsion c' [kN/m ²]		
		min.	mittel	max.	min.	mittel	max.
Geschiebemergel	2	17,7	-	29,0	202,8	-	358,1

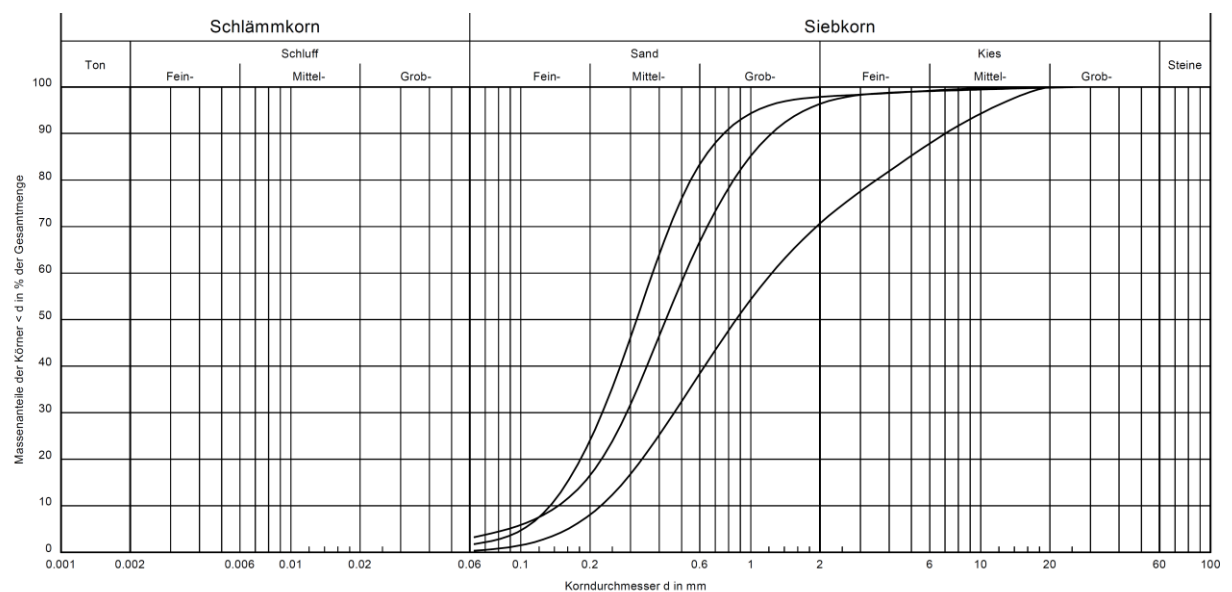


7.7 Saalezeitliche Sande

7.7.1 Korngrößenverteilung

An insgesamt drei Bodenproben der saalezeitlichen Sande wurde die Korngrößenverteilung nach DIN EN ISO 17892-4 ermittelt. Die Ergebnisse sind in der Anlage 023581-2/7.2.1 als Kornverteilungskurven dargestellt.

Abbildung 6 Korngrößenverteilungsband der saalezeitlichen Sande



7.7.2 Wasserdurchlässigkeit

Von den anstehenden saalezeitlichen Sanden wurde an einer Probe der Wasserdurchlässigkeitsbeiwert im Laborversuch nach DIN EN ISO 17892-11 bestimmt. Das Ergebnis des Laborversuchs ist in Tabelle 22 aufgeführt.

Tabelle 22 Wasserdurchlässigkeit der saalezeitlichen Sande

Bohrung	Entnahmetiefe unter Ansatzpunkt [m]	Bodenart	Wasserdurchlässigkeitsbeiwert k [m/s]
B 6	11,1 - 14,2	mS, gs, fs', u''	$4,0 \cdot 10^{-5}$



7.8 Miozäner Glimmerton

7.8.1 Wassergehalte

Zur Abschätzung der in erdstatischen Berechnungen anzusetzenden Bodenkennwerte wurde in unserem Labor an ausgewählten Bodenproben des Glimmertons der Wassergehalt (w) nach DIN EN ISO 17892-1 ermittelt. Die Ergebnisse sind in den Anlagen 023581-2/3.1 bis 3.4 in einer Spalte neben den Bohrprofilen, den Probeentnahmetiefen zugeordnet, eingetragen. Es ergeben sich die in Tabelle 23 zusammengestellten Grenz- und Mittelwerte:

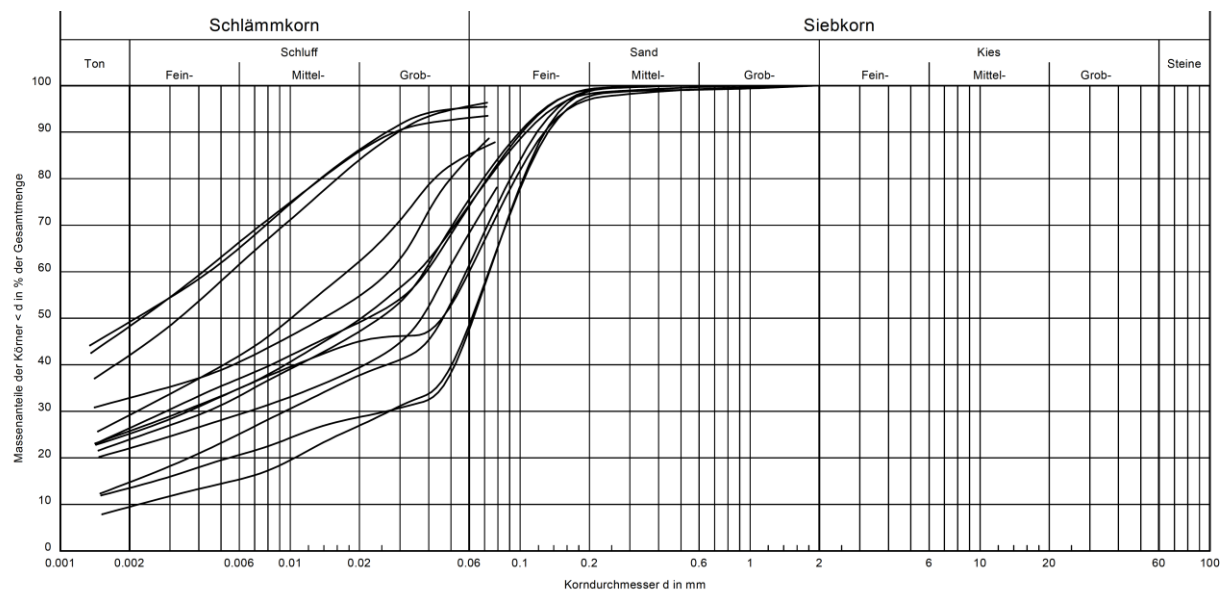
Tabelle 23 Wassergehalte des Lauenburger Tons

Bodenart	Versuchszahl	Wassergehalt w (%)		
		min.	mittel	max.
Glimmerton	51	15,5	20,2	33,2

7.8.2 Korngrößenverteilung

An insgesamt 13 Bodenproben des Glimmertons wurde die Korngrößenverteilung nach DIN EN ISO 17892-4 ermittelt. Die Ergebnisse sind in den Anlagen 023581-2/7.7.1 bis 7.7.3 als Kornverteilungskurven dargestellt.

Abbildung 7 Korngrößenverteilungsband des Glimmertons





7.8.3 Wichte

Zur Bestimmung der Feuchtwichte wurde im Rahmen der Kompressions-, Scher- und Quellversuche die Dichte nach DIN EN ISO 17892-2 an insgesamt 12 ungestört entnommenen Proben des Glimmertons bestimmt.

Die Einzelwerte der ermittelten Feuchtwichte sind in den Anlagen 023581-2/9.2.1, 10.3.1 bis 10.3.6, 11.3.1 bis 11.3.3 und 12.2.1 bis 12.2.2 angegeben. Nach statistischer Auswertung ergeben sich die in Tabelle 24 angegebenen Grenz- und Mittelwerte.

Tabelle 24 Feuchtwichte Glimmertons

Bodenart	Anzahl der Versuche	Feuchtwichte γ [kN/m ³]		
		min.	mittel	max.
Glimmertons	12	19,3	20,7	22,1

7.8.4 Glühverlust

An einer Bodenprobe des Glimmertons wurde der Glühverlust (V_{gl}) nach DIN 18128 zur Ermittlung des Anteils an organischer Substanz bestimmt. Der Wert ist in der Anlage 023581-2/3.4 links neben dem Bohrprofil, der Probenentnahmetiefe zugeordnet, angegeben.

Tabelle 25 Glühverlust des Glimmertons

Bodenart	Anzahl der Versuche	Klassifizierung	Glühverlust V_{gl} [%]		
		DIN EN ISO 14688-2	min.	mittel	max.
Glimmertons	1	schwach organisch	-	3,9	-

7.8.5 Kalkgehalt

Der Kalkgehalt wurde nach DIN 18129 an einer Probe des Glimmertons wie folgt bestimmt:

$$V_{ca} = 6,7 \text{ Gew.}\%$$



Der Wert ist in der Anlage 023581-2/3.4 links neben dem Bohrprofil, der Probenentnahmetiefe zugeordnet, angegeben.

7.8.6 Konsistenzgrenzen

An drei Proben des Glimmertons wurden die Wassergehalte an der Fließ- und Ausrollgrenze (w_L und w_P) nach DIN 18122 bestimmt. Die Ergebnisse sind zusammen mit dem für diese Probe bestimmten natürlichen Wassergehalt (w) auf den Anlagen 023581-2/8.2.1 bis 8.2.3 angegeben. Die v. g. Werte sind einschließlich der sich aus den Versuchswerten ergebenden Plastizitätszahl $I_P = w_L - w_P$ und der Konsistenzzahl $I_C = (w_L - w) / (w_L - w_P)$ in der Tabelle 26 aufgeführt.

Tabelle 26 Konsistenzgrenzen des Glimmertons

Bohrung	Entnahmetiefe unter Elbsohle [m]	Natürlicher Wassergehalt w [%]	Konsistenzgrenzen				Bodengruppe nach DIN 18196
			w_L [%]	w_P [%]	I_P [%]	I_C [-]	
WB 4	15,25	18,3	40,0	22,0	18,0	1,21	TM
WB 5	20,25	18,0	49,8	24,9	24,9	1,28	TM
WB 6	25,30	20,5	42,0	21,5	20,5	1,05	TM

7.8.7 Schrumpfgrenze

Zur weiteren bodenmechanischen Bewertung der natürlichen Wassergehalte des Glimmertons wurde an repräsentativen Proben die Schrumpfgrenze w_s nach DIN 18122, Teil 2, bestimmt. Die Einzelwerte sind links neben den Bohrprofilen in den Anlagen 023581-2/3.1 bis 3.4, den Probeentnahmetiefen zugeordnet, eingetragen. Es ergeben sich die in Tabelle 27 zusammengestellten Grenz- und Mittelwerte:

Tabelle 27 Schrumpfgrenzen des Glimmertons

Bodenart	Anzahl der Versuche	Schrumpfgrenze w_s (%)		
		min.	mittel	max.
Glimmerton	4	16,4	18,5	19,9



7.8.8 Zusammendrückbarkeit

Zur Bestimmung der Steifemoduli (E_s) des Glimmertons wurde an insgesamt einer ungestört entnommenen Bodenprobe des Glimmertons ein Kompressionsversuch mit verhin-
derter Seitendehnung nach DIN EN ISO 17892-5 durchgeführt. Das Ergebnis ist in Form
der gemessenen Lastsetzungskurve in der Anlage 023581-2/9.2.1 dargestellt. Der aus der
Lastsetzungskurve für verschiedene Spannungsbereiche ermittelte Steifemodul der Zweit-
belastung E_{s2} , sowie der Einbauwassergehalt und die Wichte sind ebenfalls den o. g.
Anlagen zu entnehmen.

Tabelle 28 Steifemoduli Glimmerton

Bodenart	Bohrung	Tiefe [m]	Steifemoduli [MN/m^2] Zweitbelastung		
			0,12-0,25 MN/m^2	0,25-0,51 MN/m^2	0,51-1,03 MN/m^2
Glimmer- ton	WB 6	25,20	86,7	98,4	99,7

7.8.9 Undränierete Scherfestigkeit

Die undränierete Scherfestigkeit c_u wurde an 6 ungestört entnommenen Proben des Glimmer-
tons durch einaxiale Druckversuche nach DIN EN ISO 17892-7 ermittelt. Die Scherkurven
sind in den Anlagen 023581-2/10.3.1 bis 10.3.6 dargestellt. Zusammengefasst ergeben sich
folgende undränierete Scherfestigkeiten c_u :

Tabelle 29 Undränierete Scherfestigkeit Glimmerton

Bodenart	Anzahl der Versuche	c_u [kN/m^2]		
		min.	mittel	max.
Glimmerton	6	126	234	318

7.8.10 Effektive Scherparameter

Zur Bestimmung der effektiven Scherparameter φ' und c' wurden an insgesamt drei unge-
stört entnommenen Proben des Glimmertons direkte Scherversuche (CD-Versuche) nach
DIN 18137-3 durchgeführt. Die Versuchsergebnisse mit den Scherparametern φ' und c'



gehen aus den Anlagen 023581-2/11.3.1 bis 11.3.3 hervor. Zusammengefasst ergeben sich folgende Grenz- und Mittelwerte:

Tabelle 30 Effektive Scherparameter Glimmerton

Bodenart	Anzahl der Versuche	Reibungswinkel ϕ' (°)			Kohäsion c' [kN/m ²]		
		min.	mittel	max.	min.	mittel	max.
Glimmerton	3	24,3	28,4	34,9	137,4	241,0	357,6

7.8.11 Quellversuche

Für die Beurteilung des Quellverhaltens des Glimmertons wurden an zwei ausgewählten Proben Quellversuche nach KAISER/HENKE durchgeführt. Die Versuchsergebnisse sind in der Tabelle 31 zusammengefasst.

Tabelle 31 Ergebnisse der Quellversuche nach KAISER/HENKE

Bohrung Nr.	Tiefe unter GOK [m]	Korngrößen- verteilung			Wasser- gehalt w [%]	Quell- zeit [t]	Quell- potential ε [%]	Quell- druck $\sigma_{q\ddot{A}}$ [kN/m ²]
		T [%]	U [%]	S [%]				
WB 4	15,25	17	46	37	17,3	4	3,6	480
WB 6	24,40	25	35	40	17,8	3	2,4	380

Die Spannungs-Dehnungsdiagramme sind in den Anlagen 023581-2/12.2.1 und 12.2.2 aufgetragen.

Insgesamt zeigt der Glimmerton in Abhängigkeit von der Größe des Gehaltes an Tonmineralen und hier insbesondere des Smectitgehaltes ein relativ geringes Quellpotential zwischen 2,4 % und 3,6 %. Der bei den Versuchen ermittelte Quelldruck von bis zu rd. $\sigma_{q\ddot{A}} = 480 \text{ kN/m}^2$ ist bei der Bemessung der Tunnelröhre zu berücksichtigen (s. Abschn. 10.3).



7.8.12 Tonmineralanalysen

Zur Ermittlung des Gehaltes an quellfähigen Mineralien haben wir zwei ausgewählte Bodenproben des Glimmertons zur Tonmineralanalyse an das Institut Dr. Baermann & Partner, Hamburg, weitergeleitet. Dort wurde das Probenmaterial fraktioniert (Sand- und Schlufffraktion entfernt) und an der Korngrößenfraktion $\leq 2 \mu\text{m}$ (Tonfraktion) mittels Röntgenbeugung die Anteile an Tonmineralien und an anderen Mineralien bestimmt. Die Untersuchungsergebnisse sind in der nachfolgenden Tabelle 32 zusammengestellt. Die Einzelergebnisse sind gemäß der U 2.14 in der Anlage 023581-2/13 wiedergegeben.

Die in den untersuchten Proben nachgewiesenen Tonmineralien der Smectitgruppe sind stark quellfähig, wenn sie mit Wasser in Kontakt kommen.

Nach den v. g. Untersuchungsergebnissen liegt der Anteil der quellfähigen Mineralien innerhalb der untersuchten Tonfraktion größtenteils zwischen rd. 20 % und rd. 27 %. Bezogen auf die Gesamtbodenproben (einschließlich der Schluff- und Feinsandfraktion) ist der prozentuale Anteil geringer.

Tabelle 32 Mineralgehalte der Tonfraktion in 2 Bodenproben des Glimmertons

Bohrung	Probenentnahmetiefe unter GOK [m]	Mineralgehalt [% der Tonfraktion $\leq 2 \mu\text{m}$]					
		Tonmineralien					Calcit
		Smectit*	Illit	Kaolinit	Vermiculit /mixed layer-Mineralien	Chlorit	
WB 4	15,25	20 - 22	43 - 45	32 - 34	< 2	< 2	< 1
WB 6	24,4	25 - 27	35 - 37	30 - 32	< 2	2 - 4	3 - 5

* quellfähige Mineralien

7.9 Abrasivität der sandigen und gemischtkörnigen Böden

Aus den Tiefenbereichen der vom Schildvortrieb zu durchfahrenden Böden wurden über die Länge der Vortriebsstrecke verteilt 4 charakteristische Proben von Sanden unterschiedlicher Korngrößenverteilung sowie 2 Geschiebemergelproben ausgewählt und an das Institut Dr. Baermann & Partner, Hamburg, zur Untersuchung der Zusammensetzung und



zur Bestimmung des Rundungsgrades der Sandfraktion als Grundlage für die Beurteilung der Abrasivität weitergeleitet. Die Untersuchungsergebnisse gemäß der U 2.14 sind diesem Bericht als Anlage 023581-2/13 beigelegt.

Danach sind die untersuchten Fein- bis Mittelsande und der Geschiebemergel nach der Klassifizierung von Pettijohn et al. und Nichols überwiegend als „eckig“ bis „gerundet“ bei einer Schwankungsbreite zwischen überwiegend „sehr eckig“ und „gut gerundet“ einzuordnen. Der elsterzeitliche Sand (B 4) weist eine Schwankungsbreite zwischen „eckig“ und „gut gerundet“ auf.

Die Sande bestehen gemäß U 2.14 überwiegend aus Quarz und Quarziten.

Die sandigen Auffüllungen, die holozänen, Weichsel- und elsterzeitlichen Sande sind überwiegend als abrasiv bis stark abrasiv, z.T. auch als extrem abrasiv (H5 und H 8) einzuordnen.

Die aufgefüllten und gewachsenen organischen Weichschichten (Klei und Torf) sind als nicht bis schwach abrasiv einzuordnen.

Der Geschiebemergel ist überwiegend als abrasiv bis stark abrasiv und örtlich abhängig vom Kiesanteil auch als extrem abrasiv einzuordnen.

Die Kies- und Steinlagen sind als stark bis extrem abrasiv einzuordnen.

Der Lauenburger Ton, der Beckenton sowie der Glimmertone sind abhängig vom Sandanteil überwiegend als schwach abrasiv bis abrasiv einzuordnen.



Tabelle 33 Untersuchte Bodenproben

Bohrung	Probenentnahmetiefe unter GOK [m]	Stratigrafische Einordnung	Bodenart
B 2	19,0	weichselzeitliche Sande	Mittelsand, fs, gs'', g''
B 3	28,3 – 28,5	weichselzeitliche Sande	Mittelsand, fs', gs'
B 4	38,6 – 38,9	elsterzeitliche Sande	Mittelsand, fs, gs', u'', g'
WB 3	12,7 – 12,8	elsterzeitlicher Geschiebemergel	Geschiebemergel, sandig
WB 6	22,4 – 22,7	elsterzeitliche Sande	Fein- bis Mittelsand, u'', gs'', g''
B 6	27,0 - 27,25	saalezeitlicher Geschiebemergel	Geschiebemergel, sandig

8. Charakteristische Bodenkennwerte

Nach den Ergebnissen der Laborversuche an den ungestört entnommenen Sonderproben und den gestört entnommenen Proben sind unter Berücksichtigung unserer Erfahrungen mit vergleichbaren Bodenarten für erdstatische Berechnungen die in der Tabelle 34 aufgeführten Bodenkennwerte als charakteristische Werte anzusetzen. In der Tabelle 34 sind ferner zu den einzelnen Bodenarten die zugehörigen Bodengruppen nach DIN 18196 sowie die Homogenbereiche angegeben.

Tabelle 34 Bodenkennwerte (charakteristische Werte), Bodengruppen und Homogenbereiche

Schicht-Nr.	Bodenart	Homogen-Bereich	Boden-gruppe nach DIN 18196	Wichte		Scherparameter			Steife-modul	Bettungs-modul
				min. γ/γ'	max. γ/γ'	φ'_k	c'_k	$c_{u,k}$	$E_{s,k}$	$k_{sh,k}^{**}$
[-]	[-]	[-]	[-]	[kN/m ³]		[°]	[kN/m ²]	[kN/m ²]	[MN/m ²]	[MN/m ³]
1a	Auffüllung, sandig, mit Klei-Einlagerungen, z.T. mit Bauschutt, locker gelagert	H 1	[SE, SW, SU, SU*, ST]	17/10	18/10	27,5	0	-	5 - 15	5
1b	Auffüllungen aus Torf	H 2	[HN, HZ]	11/1	12/2	15	5	15	0,3 – 1	0,1
1c	Auffüllungen aus Klei		[OU, OT]	14/4	16/6	17,5	7,5	17,5	1,0 – 2,0	0,5
3b	Schlick	-	OU, OT	11/1	13/3	10	5	5 - 15	0,1 – 1,5	-
2	Torf	H 3	HN, HZ	11/1	12/2	15	5	15	0,3 – 1	0,1
3a	Klei		OU, OT	14/4	16/6	17,5	7,5	17,5	1,0 - 2,0	1



Schicht-Nr.	Bodenart	Homo-gen-Bereich	Boden-gruppe nach DIN 18196	Wichte		Scherparameter			Steife-modul	Bettungs-modul
				min. γ/γ'	max. γ/γ'	φ'_k	c'_k	$c_{u,k}$	$E_{s,k}$	$k_{sh,k}^{**}$
[-]	[-]	[-]	[-]	[kN/m ³]		[°]	[kN/m ²]	[kN/m ²]	[MN/m ²]	[MN/m ³]
4a	Holozäne Watt-sande , bereichs-weise mit Klei-streifen sowie Flusssande, locker bis mitteldicht	H 4	SE, SW, SI, SU, SU*	17/10	19/11	32,5	0	0	≥ 40	7,5
4b	Holozäne Watt-sande , bereichs-weise mit Klei-streifen sowie Flusssande, mitteldicht bis dicht		SE, SW, SI, SU, SU*	18/10	19/11	35	0	0	≥ 60	10
5a	Weichselz. Fluss- und Schmelz-wassersande , z.T. kiesig, vz. Steine, mind. mitteldicht	H 5	SE, SW, SI	18/10	19/11	35	0	0	≥ 60	20
5b	Weichselz. Fluss- und Schmelz-wassersande , z.T. kiesig, vz. Steine, dicht bis sehr dicht		SE, SW, SI	19/11	21/12	37,5	0	0	≥ 60	30
6	Weichsel-, Saale- und Elsterzeitl. Sand, kiesig/Kies, sandig , mit Stein-Einlage-rungen, dicht bis sehr dicht	H 6	SE, SW, SI, GE, GW, GI	19/11	21/12	37,5	0	0	≥ 60	30
7	Saalezeitl. und Elsterzeitl. Geschiebemergel , steif bis halbfest	H 7	SU, SU*, ST, ST*, UL, UM, TL, TM	20/10	22/12	30	10	50 - 180	≥ 60	20
8	Saalezeitl. Schmelz-wassersande mit Kies-Einlagerungen, vz. Geschiebe-mergel-Streifen, örtlich Steine, dicht bis sehr dicht	H 8	SE, SW, SI, SU	19/11	21/12	37,5	0	0	≥ 60	30
Elsterzeitl. Lauenburger Schichten: Beckenschluff und -ton , bereichsweise sandig mit Sandstreifen und -Lagen sowie Beckensande (schluffige Feinsande, bereichsweise mit Schluff- und Tonstreifen und -Lagen)										
9a	überwiegend bindig	H 9	TL, TM, TA, OU, OT, UL, UM, UA	18/8	21/11	20	20	30 - 100	30 - 60	10



Schicht-Nr.	Bodenart	Homo- gen- Bereich	Boden- gruppe nach DIN 18196	Wichte		Scherparameter			Steife- modul	Bettungs- modul
				min. γ/γ'	max. γ/γ'	φ'_k	c'_k	$c_{u,k}$	$E_{s,k}$	$k_{sh,k}^{**}$
[-]	[-]	[-]	[-]	[kN/m ³]		[°]	[kN/m ²]	[kN/m ²]	[MN/m ²]	[MN/m ³]
9b	überwiegend nichtbindig	H 10	SU, SU*, ST, ST*	18/10	19/11	30	5	0	≥ 50	15
10	Elsterzeitl. Becken- sande : schwach schluffige bis schluffige Fein- bis Mittelsande mit Schluff-Streifen, mind. mitteldicht	H 11	SE, SU, SU*	19/11	20/10	35	0	0	≥ 60	15
11	Elsterzeitl. Schmelz- wassersande mit Kies- und Schluff- Einlagerungen, vz. Geschiebemergel- Streifen/-Lagen, örtlich Steine/Holz- kohlestreifen, dicht bis sehr dicht	H 12	SE, SW, SI, SU, SU*	19/11	21/12	37,5	0	0	≥ 60	30
12	Beckenton (Lage innerhalb des Geschiebemergels)	H 13	TL, TM, TA, OU	19/9	20/10	20	20	30 - 100	20 - 40	10
13	Glimmertön , oberflächlich aufgearbeitet, halbfest bis fest	H 14	TM, TA, OU, OT, UM, UA, SU*, ST*	19/9	22/12	25	60	≥ 200	50 – 100	15

** Bettungsmodul für Ortbetonwände und Anwendung des Bettungsmodulverfahrens nach EB 102, EAB

Für die Planung des Schildvortriebes können folgende Bandbreiten der Wasserdurchlässigkeitsbeiwerte angesetzt werden:

- | | |
|--|--|
| - Klei und Torf | $1 \times 10^{-10} \text{ m/s} \leq k \leq 1 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ |
| - holozäne Sande | $1 \times 10^{-5} \text{ m/s} \leq k \leq 5 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ |
| - weichsel- und elsterzeitliche Schmelzwassersande | $1 \times 10^{-4} \text{ m/s} \leq k \leq 5 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ |
| - saalezeitliche Schmelzwassersande | $1 \times 10^{-5} \text{ m/s} \leq k \leq 5 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ |
| - kiesige Sande & sandige Kiese | $1 \times 10^{-5} \text{ m/s} \leq k \leq 5 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ |
| - elsterzeitliche schluffige Feinsande (Beckensande) | $1 \times 10^{-7} \text{ m/s} \leq k \leq 2 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ |



- | | |
|---|--|
| - Lauenburger Ton (ohne Feinsandbänder) | $1 \times 10^{-12} \text{ m/s} \leq k \leq 1 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ |
| - Geschiebemergel | $1 \times 10^{-12} \text{ m/s} \leq k \leq 1 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ |
| - Glimmertone | $1 \times 10^{-12} \text{ m/s} \leq k \leq 5 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ |

Im Bereich von Kies- oder Steinlagen mit geringem Sandanteil sind lokal höhere horizontale Wasserdurchlässigkeitsbeiwerte bis ca. max. $k_f \approx 2 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$ nicht auszuschließen

Die Luftdurchlässigkeit des Baugrundes k_L wird von verschiedenen Faktoren bestimmt (z. B. Lagerungsdichte und Porenraum der Sande, Sättigungsgrad der Poren, Luftüberdruck etc.) und ist über die Zeit nicht konstant. Sie wird für den Vortriebsbereich grob mit $k_L \approx 70 - 100 \cdot k_w$ (Wasserdurchlässigkeit) abgeschätzt.

Unter Berücksichtigung des geplanten Schildvortriebes und der erforderlichen Tiefbauarbeiten für die Errichtung und Sicherung der verschiedenen Baugruben und Bauwerke werden die Homogenbereiche H 1 bis H 14 (siehe Tabelle 34) unter Beachtung der DIN 18300 (Erdarbeiten), DIN 18301 (Bohrarbeiten), DIN 18304 (Ramm-, Rüttel- und Pressarbeiten), DIN 18311 (Nassbaggerarbeiten), DIN 18312 (Untertagebauarbeiten), DIN 18313 (Schlitzwandarbeiten mit stützenden Flüssigkeiten) und DIN 18321 (Düsenstrahlarbeiten) festgelegt.

Die für die Homogenbereiche H 1 bis H 14 geltenden bodenmechanischen Eigenschaften sind in den Anlagen 023581-2/15.1 bis 15.14 zusammengestellt.

Bei der Abschätzung der Bandbreite der bodenmechanischen Eigenschaften der einzelnen Homogenbereiche wurden die bodenmechanischen Labor-/ Feldversuchsergebnisse gemäß Abschn. 7.1 bis 7.9 sowie uns vorliegende Erfahrungswerte vergleichbarer Böden herangezogen. Aufgrund natürlicher geogen bedingter Unregelmäßigkeiten sind jedoch Abweichungen davon möglich.



9. Orientierende chemische Untersuchung hinsichtlich Wiederverwertbarkeit und Entsorgung

9.1 Allgemeine Beurteilungsgrundlagen zur Prüfung von Verwertungs- bzw. Entsorgungsmöglichkeiten

Die Beurteilung der stofflichen Verwertung von bei Bauvorhaben anfallendem Bodenaushub erfolgt auf der Grundlage der Festlegungen der „Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Abfällen, Technische Regeln“ (TR) der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA), Teil I „Allgemeiner Teil“ (Stand 06.11.2003) sowie Teil II.1.2 „Bodenmaterial“ (TR-Boden, Stand 05.11.2004).

Zur Beurteilung der Wiederverwendbarkeit von Aushubböden sind dazu charakteristische Bodenmischproben entsprechend den Festlegungen der LAGA TR Boden chemisch zu untersuchen. In Abhängigkeit von den für die einzelnen Untersuchungsparameter im Feststoff bzw. Eluat ermittelten Gehalten (Konzentrationen) werden die untersuchten Böden einzelnen Einbauklassen bzw. bei Erfordernis einer Entsorgung den Deponieklassen nach DepV zugeordnet. Maßgebend für die Festlegung der Einbauklassen ist die Einhaltung der für die Untersuchungsparameter festgelegten Zuordnungswerte (Z0, Z1, Z1.1, Z1.2, Z2), die die Grenzwerte der jeweiligen Einbauklasse darstellen.

In der LAGA TR-Boden bzw. LAGA TR-Bauschutt sind die folgenden Einbauklassen/Zuordnungswerte definiert:

- **Einbauklasse 0 / Zuordnungswerte Z0/Z0*: Uneingeschränkter Einbau**

Bei Unterschreitung bzw. Einhaltung der Zuordnungswerte Z0 ist im Allgemeinen ein uneingeschränkter Einbau (Einbauklasse 0) von Boden bzw. Bauschutt in bodenähnlichen Anwendungen möglich.

Bei geringfügiger Überschreitung des Zuordnungswertes Z0 und bei Unterschreitung bzw. Einhaltung der Zuordnungswerte Z0* ist eine Verfüllung von Abgrabungen mit Bodenmaterial unterhalb einer durchwurzelbaren Bodenschicht von mind. 2 m Mächtigkeit generell unter Einhaltung weiterer Bedingungen möglich.



- **Einbauklasse 1 / Zuordnungswerte Z1 (Feststoff) sowie Z1.1 (Eluat) und Z1.2**

(Eluat): Eingeschränkter offener Einbau

Bei Unterschreitung bzw. Einhaltung der Zuordnungswerte Z1 für Feststoff und Z1.1 für Eluat ist ein offener Einbau von mineralischen Abfällen in technischen Bauwerken unter ungünstigen hydrogeologischen Standortbedingungen möglich.

Bei Unterschreitung bzw. Einhaltung der Zuordnungswerte Z1 für Feststoff und Z1.2 für Eluat ist ein offener Einbau von mineralischen Abfällen in technischen Bauwerken unter günstigen hydrogeologischen Standortbedingungen möglich.

- **Einbauklasse 2 / Zuordnungswerte Z2: Eingeschränkter Einbau**

Bei Unterschreitung bzw. Einhaltung der Zuordnungswerte Z2 im Feststoff und Eluat ist der Einbau von Bodenmaterial mit definierten technischen Sicherungsmaßnahmen (z. B. Tragschicht unter Asphalt) in technischen Bauwerken möglich.

- **Zuordnungswert >Z2**

Werden die Zuordnungswerte Z2 überschritten, ist der Einbau in eine zugelassene Deponie (Deponieverordnung – DepV vom 27.04.2009, BGBl. I S. 900) erforderlich.

Kann das Aushubmaterial aufgrund der Überschreitung der Zuordnungswerte Z 0 nicht einem Einbau zugeführt werden, so führt dies zu Mehrkosten bei der Entsorgung gegenüber einem nicht mit Schadstoffen belasteten Aushubmaterial.

Eine Verwertung oder Entsorgung von Aushubmaterial außerhalb der Baustelle kommt auch zum Tragen, wenn das Aushubmaterial aus bautechnischen oder wasserwirtschaftlichen Gründen nicht wieder eingebaut werden kann (z. B. geringe Verdichtbarkeit oder erhöhte Schadstoffkonzentrationen in Bezug auf den Grundwasserschutz) oder eine Verwertung vor Ort (z. B. Verfüllung von Arbeitsräumen) nicht möglich ist.

Um einen umfassenden Überblick über die Verbringungsmöglichkeiten zu erlangen, wurden alle Proben sowohl gemäß LAGA TR-Boden als auch gemäß Deponieverordnung



untersucht. Bei Böden mit erfahrungsgemäß erhöhten Anteilen organischen Kohlenstoffs wurden zusätzlich der AT4- und der Brennwert bestimmt.

9.2 Probenauswahl, Zusammenstellung von Mischproben, Untersuchungsumfang und Ergebnisse

Aus den uns vom Bohrunternehmer gelieferten Bodenproben wurden getrennt für die verschiedenen Bauabschnitte Mischproben zusammengestellt. Diese wurden aus Bodenproben jeweils gleicher oder ähnlicher Zusammensetzung und gleicher Genese (z. B. Auffüllungen aus Sand oder gewachsener Lauenburger Ton) ausgewählt.

Insgesamt wurden 26 Mischproben (MP 1 – MP 3, MP 4A, MP 4B, MP 5 – MP 25) zusammengestellt und von der GBA Gesellschaft für Bioanalytik mbH, Pinneberg gemäß der LAGA-TR Boden (Feststoff und Eluat) sowie der Deponieverordnung untersucht.

An insgesamt 9 Mischproben (MP 2, MP 4A, MP 5, MP 6, MP 15, MP 17, MP 21, MP 22 und MP 25) wurden zusätzlich der Brennwert und die Atmungsaktivität (AT4-Wert) bestimmt.

Die Angaben zur Bodenart der Mischproben, zur Herkunft der Einzelproben (Bohrung, Tiefenlage unter Geländeoberkante, Bodenart) sind Tabelle 35 zu entnehmen.

Die Zuordnungswerte und Einbauklassen gemäß der LAGA-TR Boden sowie alle oberhalb des Zuordnungswertes Z0 liegenden Parameter sind der Anlage 023581-2/17.2 zu entnehmen.

Die voraussichtliche Einstufung der Deponieklassen gemäß Deponieverordnung sowie alle oberhalb der Deponieklasse DK 0 liegenden Parameter sind der Anlage 023581-2/17.3 zu entnehmen.

Die Einzelergebnisse der orientierenden chemischen Untersuchungen sind gemäß den Prüfergebnissen der GBA Gesellschaft für Bioanalytik mbH, Pinneberg (U 2.13) in den Anlagen 023581-2/16.1 bis 16.3 zusammengestellt.



Sofern eine Verwertung nach der Einstufung LAGA-TR Boden unterhalb oder gleich des Zuordnungswertes nicht möglich ist, wird im Abschn. 9.3 die zugehörige Deponieklasse angegeben.

Tabelle 35 Mischprobenzusammenstellung

Bereich	Mischprobe	Bohrung/en	Tiefe	Bodenart
			[m]	
Startschacht	MP 1	B01	0,0 – 2,3	Auffüllung, Sand
		B02	0,0 – 2,6	
	MP 2	B01	2,3 – 3,2	Auffüllung, Klei
			3,9 – 4,6	
		B02	2,6 – 3,1	
			4,2 – 5,2	
	MP 3	B01	3,2 – 3,9	Auffüllung, Sand
			4,6 – 6,8	
		B02	3,1 – 4,2	
			5,2 – 5,5	
	MP 4A	B01	6,8 – 9,5	Auffüllung, obere Sande & Schlick - MKW-Geruch
	MP 4B	B02	5,5 – 9,6	Auffüllung, obere Sande & Schlick
	MP 5	B01	9,9 – 11,8	Torf
		B02	10,25 – 12,5	
	MP 6	B01	11,8 – 14,4	Klei
		B02	12,5 – 13,9	
	MP 7	B01	14,4 – 21,5	untere holozäne Sande
		B02	13,9 – 22,0	
	MP 8	B01	21,5 – 33,5	weichselzeitliche Sande
		B02	22,0 – 33,5	
	MP 9	B01	34,5 – 52,8	Lauenburger Ton
		B02	34,3 – 52,6	
Zielschacht	MP 10	B05	0,4 – 11,9	oberer saalezeitlicher Geschiebemergel
		B06	0,4 – 11,1	
	MP 11	B06	15,9 – 22,5	mittlerer saalezeitlicher Geschiebemergel
	MP 12	B05	11,9 – 32,7	saalezeitliche Sande
		B06	11,1 – 15,9; 22,5 – 26,5	
	MP 13	B05	32,7 – 38,2	unterer Geschiebemergel, Lauenburger Ton & schluffige Sande
		B06	26,5 – 44,0	



Tunnel	MP 14	B05	38,2 – 46,7	untere/elsterzeitliche Sande
	MP 15	B05	46,7 – 70,0	Glimmerton
		B06	44,5 – 70,0	
	MP 16	B 03	25,0 – 30,5	weichselzeitliche Sande
	MP 17	B 03	31,0 – 42,0	Lauenburger Ton
		WB 01	17,4 – 17,7	
	MP 18	B 04	36,0 – 41,0	elsterzeitliche Sande
	MP 19	WB 03	10,0 – 14,6	Geschiebemergel & Beckenton-Lage
	MP 20	WB 03	14,6 – 16,2	elsterzeitlicher Kies/Sand
	MP 21	WB 03	16,2 – 18,0	Glimmerton
	MP 22	WB 04	10,0 – 19,0	Glimmerton
		WB 05	12,0 – 22,0	
	MP 23	WB 06	17,6 – 19,6	Geschiebemergel & Lauenburger Ton
	MP 24	WB 06	19,6 – 23,6	elsterzeitliche Sande
	MP 25	WB 06	23,6 – 25,0	Glimmerton, aufgearbeitet

9.3 Bewertung der orientierenden chemischen Untersuchungen

9.3.1 Startschacht

Auffüllungen

Die durch die Mischprobe MP 1 repräsentierten **sandigen Auffüllungen** im Bereich des Startschachtes zeigen aufgrund erhöhter EOX- (extrahierbare organisch gebundene Halogene) und Blei-Werte eine **Überschreitung** des Zuordnungswertes **Z 2** der LAGA-TR Boden. Aufgrund des erhöhten Anteils lipophiler Stoffe sind die sandigen Auffüllungen der Deponieklasse **DK 1** zuzuordnen.

Die durch die Mischprobe MP 1 repräsentierten **Auffüllungen aus Klei** im Bereich des Startschachtes zeigen aufgrund des erhöhten Sulfat-Wertes eine **Überschreitung** des Zuordnungswertes **Z 2** der LAGA-TR Boden. Aufgrund des erhöhten TOC-Gehaltes sowie des Glühverlustes sind die sandigen Auffüllungen der Deponieklasse **DK 3** zuzuordnen.



Die durch die Mischprobe MP 3 repräsentierten **sandigen Auffüllungen** sowie die durch die Mischproben MP 4A und MP 4B repräsentierten **sandigen Auffüllungen mit Schlick-Streifen** im Bereich des Startschachtes sind aufgrund erhöhter Sulfat-Werte dem Zuordnungswert **Z 2** bzw. der **Einbauklasse 2** der LAGA-TR Boden zuzuordnen. Die Mischproben MP 1 und MP 4B zeigen **keine Überschreitungen** der Grenzwerte der Deponieklasse **DK 0**. Die Mischprobe MP 4A ist aufgrund des erhöhten Sulfat-Wertes der Deponieklasse **DK 1** zuzuordnen.

Die Atmungsaktivität (AT4-Wert) sowie der Brennwert der Mischproben MP 2 und MP 4A sind in der Anlage 023581-2/17.3 angegeben.

Organische Weichschichten

Der durch die Mischprobe MP 5 repräsentierte **Torf** im Bereich des Startschachtes zeigt aufgrund erhöhter Leitfähigkeits-, Sulfat-, Cadmium-, Nickel- und Zink-Werte sowie des TOC-Gehaltes eine **Überschreitung** (bzw. aufgrund des niedrigen pH-Wertes eine Unterschreitung) der Grenzwerte des Zuordnungswertes **Z 2** der LAGA-TR Boden. Der stark erhöhte TOC-Gehalt und der Glühverlust der Mischprobe MP 5 **überschreitet** (bzw. der niedrige pH-Wert unterschreitet) die Grenzwerte der Deponieklasse **DK 3**.

Der durch die Mischprobe MP 6 repräsentierter **Klei** im Bereich des Startschachtes zeigt aufgrund des niedrigen pH-Wertes eine **Unterschreitung** des Zuordnungswertes **Z 2** der LAGA-TR Boden. Der niedrige pH-Wert der Mischprobe MP 6 **unterschreitet** die Grenzwerte der Deponieklasse **DK 3**.

Die Atmungsaktivität (AT4-Wert) sowie der Brennwert der Mischproben MP 5 und MP 6 sind jeweils in der Anlage 023581-2/17.3 angegeben.

Untere holozäne Sande

Die durch die Mischprobe MP 7 repräsentierten **unteren holozänen Sande** im Bereich des Startschachtes zeigen aufgrund des niedrigen pH-Wertes eine **Unterschreitung** des Zuordnungswertes **Z 2** der LAGA-TR Boden. Der niedrige pH-Wert der Mischprobe MP 7 **unterschreitet** die Grenzwerte der Deponieklasse **DK 3**.



Wechselzeitliche Sande

Die durch die Mischprobe MP 8 repräsentierten **wechselzeitlichen Sande** im Bereich des Startschachtes sind aufgrund der erhöhten Leitfähigkeit dem Zuordnungswert **Z 1.2** bzw. der **Einbauklasse 1** der LAGA-TR Boden zuzuordnen. Die Mischprobe MP 8 zeigt **keine Überschreitungen** der Grenzwerte der Deponieklasse **DK 0**.

Lauenburger Ton

Der durch die Mischprobe MP 9 repräsentierte **Lauenburger Ton** im Bereich des Startschachtes ist aufgrund des erhöhten Sulfat-Wertes dem Zuordnungswert **Z 2** der **Einbauklasse 2** der LAGA-TR Boden zuzuordnen. Die Mischprobe MP 9 ist aufgrund des erhöhten TOC-Gehaltes und des Glühverlustes der Deponieklasse **DK 2** zuzuordnen.

9.3.2 Zielschacht

Geschiebemergel, überprägter Lauenburger Ton und Glimmerton sowie schluffige Sande

Der durch die Mischprobe MP 10 repräsentierte **obere saalezeitliche Geschiebemergel** und der durch die Mischprobe MP 11 repräsentierte **mittlere saalezeitliche Geschiebemergel** im Bereich des Zielschachtes sind aufgrund erhöhter Sulfat-Werte dem Zuordnungswert **Z 1.2** der **Einbauklasse 1** der LAGA-TR Boden zuzuordnen.

Die Mischprobe MP 13 repräsentiert die **elsterzeitlichen bindigen sowie schluffigen Böden** (den unteren Geschiebemergel, den überprägten Lauenburger Ton, die überprägte Glimmerton-Scholle (B 5) sowie die schluffigen Sande mit Schluff- und Geschiebemergel-Streifen (B 6)). Diese Böden sind aufgrund der erhöhten Sulfat-Werte dem Zuordnungswert **Z 2** bzw. der **Einbauklasse 2** der LAGA- TR Boden zuzuordnen.

Die Mischproben MP 10, MP 11 und MP 13 zeigen **keine Überschreitungen** der Grenzwerte der Deponieklasse **DK 0**.

Sande

Die durch die Mischprobe MP 12 repräsentierten **saalezeitlichen Sande** im Bereich des Zielschachtes sind dem Zuordnungswert **Z 0** bzw. der **Einbauklasse 0 (Uneingeschränkter Einbau)** der LAGA TR-Boden zuzuordnen und zeigen **keine Überschreitungen** der Grenzwerte der Deponieklasse **DK 0**.



Die durch die Mischprobe MP 14 repräsentierten **elsterzeitlichen Sande** im Bereich des Zielschachtes sind aufgrund des erhöhten Sulfat-Wertes dem Zuordnungswert **Z 1.2** bzw. der **Einbauklasse 1** der LAGA-TR Boden zuzuordnen und zeigen **keine Überschreitungen** der Grenzwerte der Deponieklasse **DK 0**.

Glimmerton

Der durch die Mischprobe MP 15 repräsentierte **Glimmerton** im Bereich des Zielschachtes ist aufgrund des erhöhten Sulfat-Wertes und des TOC-Gehaltes dem Zuordnungswert **Z 2** bzw. der **Einbauklasse 2** der LAGA-TR Boden zuzuordnen. Die Mischprobe MP 15 ist aufgrund des erhöhten TOC-Gehaltes und des Glühverlustes der Deponieklasse **DK 2** zuzuordnen

Die Atmungsaktivität (AT4-Wert) sowie der Brennwert der Mischprobe MP 15 ist in der Anlage 023581-2/17.3 angegeben.

9.3.3 Tunnel

Sande

Die durch die Mischprobe MP 16 repräsentierten **weichselzeitlichen Sande** im Vortriebsbereich sind dem Zuordnungswert **Z 0** bzw. der **Einbauklasse 0 (Uneingeschränkter Einbau)** der LAGA-TR Boden zuzuordnen und zeigen **keine Überschreitungen** der Grenzwerte der Deponieklasse **DK 0**.

Die durch die Mischproben MP 18, MP 20 und MP 24 repräsentierten **elsterzeitlichen Sande (und z.T. Kiese)** im Vortriebsbereich sind aufgrund der erhöhten Sulfat-Werte dem Zuordnungswert **Z 1.2** bzw. der **Einbauklasse 1** der LAGA-TR Boden zuzuordnen und zeigen **keine Überschreitungen** der Grenzwerte der Deponieklasse **DK 0**.

Elsterzeitlicher Lauenburger Ton, Geschiebemergel und Beckenton

Der durch die Mischprobe MP 17 repräsentierte elsterzeitlichen **Lauenburger Ton** im Vortriebsbereich im Süden der Trasse, ist aufgrund des erhöhten TOC-Gehaltes und des erhöhten Sulfat-Wertes dem Zuordnungswert **Z 2** bzw. der **Einbauklasse 2** der LAGA-TR Boden zuzuordnen.



Der durch die Mischprobe MP 19 repräsentierte **elsterzeitlichen Geschiebemergel mit Beckenton-Lage** (WB 3) im mittleren Vortriebsbereich und der durch die Mischprobe MP 23 repräsentierte **elsterzeitliche Lauenburger Ton mit Geschiebemergel-Lage** (WB 6) im Vortriebsbereich im Norden der Trasse sind aufgrund der erhöhten Sulfat-Werte dem Zuordnungswert **Z 2** bzw. der **Einbauklasse 2** der LAGA-TR Boden zuzuordnen.

Die Mischprobe **MP 17** ist aufgrund des erhöhten Glühverlustes der Deponieklasse **DK 3**, die Mischprobe **MP 19** aufgrund des erhöhten TOC-Gehaltes der Deponieklasse **DK 2** und die Mischprobe **MP 23** aufgrund des erhöhten Sulfat-Wertes der Deponieklasse **DK 1** zuzuordnen

Die Atmungsaktivität (AT4-Wert) sowie der Brennwert der Mischprobe MP 17 ist in der Anlage 023581-2/17.3 angegeben.

Glimmerton

Der durch die Mischproben MP 21 und MP 22 repräsentierte **Glimmerton** und der durch die Mischprobe MP 25 repräsentierte **aufgearbeitete Glimmerton** (WB 6) im Vortriebsbereich zeigt aufgrund erhöhter Sulfat-Werte eine **Überschreitung** der Grenzwerte des Zuordnungswertes **Z 2** der LAGA-TR Boden. Die Mischproben MP 21 und MP 25 sind aufgrund der erhöhten TOC-Gehalte und MP 21 aufgrund des Glühverlustes der Deponieklasse **DK 2** zuzuordnen. Die Mischprobe MP 22 ist aufgrund des erhöhten Glühverlustes der Deponieklasse **DK 3** zuzuordnen.

Die Atmungsaktivität (AT4-Wert) sowie der Brennwert der Mischproben MP 21, MP 22 und MP 25 sind jeweils in der Anlage 023581-2/17.3 angegeben.



10. Geotechnische Empfehlungen und Bemessungsangaben zum Tunnelvortrieb und Tübbingausbau

10.1 Baugrund und Wasser im Trassenbereich, Bemessungswasserstände

Die im Bereich des Tunnelvortriebs erbohrten Baugrundverhältnisse sind in Abschn. 5.2 generell beschrieben und in den Anlagen 023581-2/3.1 bis 3.4 in Form von Bohrprofilen und Sondierdiagrammen detailliert dargestellt.

Einen Überblick über die im Trassenbereich zu erwartenden Bodenarten gibt der geologische Längsschnitt in der Anlage 023581-2/2. Da die im Schnitt angegebenen Schichtgrenzen zwischen den Baugrundaufschlüssen interpoliert sind und die Bohrprofile auf die Trassenachse projiziert sind, ist grundsätzlich mit Abweichungen vom dargestellten Schichtenverlauf zu rechnen. Das gleiche gilt für den Schichtenverlauf quer zur Vortriebsachse sowie für die im Folgenden als grobe Richtwerte angegebenen Stationen der Tunnelsohle bzw. -firste bei Schichtwechseln.

Der Vortrieb durchfährt beginnend am Startschacht im Jachtweg zunächst überwiegend dicht, örtlich auch mitteldicht bzw. sehr dicht gelagerte weichselzeitliche Schmelzwasserablagerungen mit der ca. 1,5 m mächtigen Kies- und Steinsohle. Ab etwa Station 0+100 km taucht der Vortrieb in die unterlagernden elsterzeitlichen Lauenburger Schichten ein und unterfährt den Köhlfleethafen sowie die Pfahlgründung der Tankleitungsbrücke im Köhlfleethafen. Die Lauenburger Schichten stehen in unregelmäßiger Abfolge als Lauenburger Ton an, sodass die Vortriebstechnik auf jeden Fall auf die dann zu erwartenden hohen Verklebungen eingestellt werden muss. Etwa bei Station 0+310 km durchfährt der Vortrieb elsterzeitlichen Geschiebemergel. Der Geschiebemergel wurde in der Bohrung WB 2/F1 angebohrt sowie in der Drucksondierung WDS 2A angetroffen; die tatsächliche Längenausdehnung kann nur grob geschätzt werden. Ab etwa Station 0+410 km taucht der Vortrieb in elsterzeitliche Schmelzwassersande ein, wobei hierbei schleifend die Kies- und Steinsohle der weichselzeitlichen Schmelzwasserablagerungen angeschnitten werden. Die elsterzeitlichen Schmelzwassersande wurden in der Bohrung B 4 angetroffen; die tatsächliche Längenausdehnung kann nur grob geschätzt werden. Etwa bei Station 0+520 km durchfährt der Vortrieb den elsterzeitlichen Geschiebemergel mit einer rd. 1,6 m mächtigen Kies- und Steinsohle. Dabei schneidet der Vortrieb an der Tunnelfirste schleifend eine



Beckenton-Scholle und an der Tunnelsohle den Glimmerton an. Der v. g. Baugrundaufbau wurde in der Bohrung WB 3 angetroffen; die tatsächliche Längenausdehnung kann nur grob geschätzt werden. Zwischen der Bohrung WB 3 und der Drucksondierung WDS 8A ist in dem Tiefenbereich des Vortriebs die Interpretation eines Schichtenverlaufes zwischen den Stationen 0+620 km und 0+720 km nicht möglich. Es ist hier sowohl mit dem generellen Schichtenaufbau der WB 3 aus Geschiebemergel mit Kies- und Steinsohle und Becken-/ und Glimmerton-Anteilen sowie einem Schichtenaufbau der WDS 8A mit Glimmerton zu rechnen. Die Vortriebstechnik ist hier sowohl auf extreme Abrasion als auch auf hohe Verklebungen einzustellen. Ab etwa Station 0+720 km bis 1+000 km wird vollflächig über die gesamte Ortsbrust Glimmerton aufgefahren, sodass die Vortriebs-technik auf hohe Verklebungen eingestellt werden muss. Ab etwa Station 1+000 km werden Geschiebemergel, Lauenburger Schichten und Schmelzwassersande in unregelmäßiger Verteilung bis zum Zielschacht durchfahren.

Im Bereich des Elbhangs ist mit einer stark wechselhaften Schichtenabfolge zu rechnen.

Es wird an dieser Stelle nochmals darauf hingewiesen, dass sich die vorstehende Beschreibung der während des Vortriebs zu erwartenden Baugrundverhältnisse auf die Ergebnisse der ausgeführten Baugrundaufschlüsse und die Interpretation im geologischen Schnitt stützt und wegen der erforderlichen Interpolationen zwischen den Bohrpunkten beim Vortrieb teilweise mit deutlichen Abweichungen in allen Richtungen zu rechnen ist.

In der Ortsbrust steht in Teilstrecken nahezu durchgehend Glimmerton oder Sand an. Überwiegend wird jedoch über die Höhe der Ortsbrust von rd. 4,5 m eine wechselhafte Schichtenfolge aus Lauenburger Ton, Becken- und Schmelzwassersanden, Geschiebemergel mit Kies- und Steinsohlen sowie örtlich Glimmerton und Beckenton angeschnitten. Auf diese sog. Mixed-face-Bedingungen an der Ortsbrust – insbesondere unterschiedliche Festigkeiten und mechanische Eigenschaften – sind die Vortriebsmaschine (Art, Anzahl und Anordnung der Abbauwerkzeuge, Leistungskennwerte, Geometrie etc.) und das Vortriebskonzept (u. a. Einstellung des Stützdrucks, der Vortriebsgeschwindigkeit, der Drehzahl etc.) einzustellen. Hervorzuheben ist das Vorkommen von örtlichen, in den Geschiebemergel eingelagerten Sandlinsen, die bei einem möglichen Drucklufteinstieg in



die Arbeitskammer zur Kontrolle oder zum Wechsel des Werkzeugbesatzes bzw. zur Hindernisbeseitigung Schwierigkeiten bei der Ortsbruststützung bereiten können. Ebenso ist auch auf das teilweise hohe Verklebungspotential (s. Abschn. 10.2) der bindigen Böden und die überwiegend starke Abrasivität (s. Abschn. 7.9) hinzuweisen.

Im Geschiebemergel und insbesondere auf der Oberkante des Geschiebemergels und des Glimmertons sowie untergeordnet auch in den Schmelzwassersanden und Kiesen ist entstehungsbedingt mit Einlagerungen von Steinen und (Groß-) Blöcken aus harten Graniten und metamorphen nordischen Gesteinen bis zur Findlingsgröße zu rechnen. Die in den Bohrungen angetroffenen, im geologischen Längsschnitt jeweils neben den Bohrprofilen mit einem roten „X“ gekennzeichneten Steinhindernisse und die in den Bohrprofilen dokumentierten Steine stellen aufgrund des begrenzten Bohrdurchmessers und des geringen Anteils der erkundeten Fläche nur zufällige Funde dar und können naturgemäß keinen zuverlässigen Hinweis auf die örtliche Häufigkeit und Größe der Steineinlagerungen geben.

Der überwiegende Anteil der zu erwartenden Steine dürfte unterhalb eines Durchmessers von ca. 50 cm liegen und ist damit schneidradgängig und förderbar. Die während des Vortriebs in den Bereichen des Geschiebemergels, der Oberkante des Glimmertons sowie der Basis der Schmelzwassersande bzw. in Kieslagen zu erwartende Anzahl von Steinen bzw. Blöcken mit Durchmesser größer 50 cm ist nicht verlässlich abzuschätzen. Bei der weiteren Planung ist davon auszugehen, dass mit einer mittleren Anzahl von ca. 20 Steinen/ Blöcken Ø 50 - 100 cm und 5 Blöcken Ø > 100 cm je 100 m Vortrieb in den Teilstrecken mit Anschnitt bzw. Durchfahrung des Geschiebemergels, an der Oberkante des Glimmertons sowie an der Basis der Schmelzwassersande zu rechnen ist.

Die in der Trasse herrschenden Grundwasserverhältnisse sind in Abschn. 4.2 und 6 generell beschrieben. Für die Bemessung des Tunnelausbaues sind die in Tabelle 36 aufgeführten Bemessungswasserstände anzusetzen.



Tabelle 36 Bemessungswasserstände Tunnelbemessung

Streckenabschnitt Stat.km	Bemessungssituation	
	BS-P	BS-A
Startschacht bis Stat. Km 0+100	NHN + 6,0 m	NHN + 8,0 m
Stat. Km 0+100 bis Stat. Km 1+060	NHN +7,2 m	NHN +8,0 m
Stat. Km 1+060 bis Zielschacht	NHN +13,0 m	HNH +14,0 m

Die chemische Zusammensetzung des Grundwassers geht aus den Ergebnissen der durchgeführten Analysen hervor (s. Abschn. 6.2). Das Grundwasser weist nach den Ergebnissen der durchgeführten Analysen überwiegend keine Betonaggressivität nach DIN EN 206-1 auf. Die Analyse an der Wasserprobe aus der Messstelle GWM B 2 (Startschacht), ergab eine mäßige Betonaggressivität (Expositionsklasse XA 2) und die der Messstelle GWM B 6 eine geringe Betonaggressivität (Expositionsklasse XA 1) des Grundwassers zufolge erhöhter Sulfatgehalte.

Die Angaben zum Grundwasserchemismus sind in den Anlagen 023581-2/5.1 bis 5.5 dargestellt und für die Materialien, die im Baugrundbereich eingebaut werden (Konditionierung, Zusatzstützung Bentonit, Ringspaltmörtel, etc.) zu berücksichtigen.

Weiterhin sind die Ergebnisse der durchgeführten Bodenanalysen zu beachten (s. Abschn. 9.3).

10.2 Angaben zur Wahl der Tunnelbohrmaschine

Der geplante Vortrieb verläuft in stark wechselhaften Baugrundverhältnissen mit grundwasserführenden Sanden und Kiesen, Wechselfolgen aus Lauenburger Ton und Beckensanden, Glimmerton, Geschiebemergel, Beckenton-Schollen sowie Steinen und Blöcken im Geschiebemergel bzw. konzentriert an der Basis der Schmelzwassersande sowie an der Oberkante des Glimmertons. Für den Vortrieb wird ein Schildvortrieb mit Vollschnittbau und Stützung der Ortsbrust (nach den Empfehlungen des DAUB e.V., Stand Mai 2020)



erforderlich. Ein Rohrvortrieb ist hier bei der erkundeten Baugrundsichtung nicht möglich.

Die DAUB-Empfehlung führt im Anhang 3 (Einsatzbereiche und Auswahlkriterien) in Abhängigkeit der Baugrundverhältnisse die Haupteinsatzbereiche, den erweiterten Einsatzbereich sowie den eingeschränkten Einsatzbereich der unterschiedlichen Tunnelbohrmaschinen auf.

Die Erdruckschildmaschine (EPB) hat ihre Haupteinsatzbereiche bei bindigen und gemischtkörnigen Böden. Das Slurryschild (SLS) hat dagegen die Haupteinsatzbereiche in gemischtkörnigen und rolligen Böden.

Nach den Bohrergebnissen und dem entwickelten geologischen Längsschnitt ist zu erwarten, dass etwa 74 % der aufzufahrenden Tunnelstrecke im Bereich der bindigen und gemischtkörnigen Böden und etwa 46 % im Bereich der rolligen und gemischtkörnigen Böden liegen werden. Bei den v. g. Prozentanteilen handelt es sich jeweils um eine Schnittmenge, so dass die Summe der hier aufgeführten Anteile nicht 100 % ergeben kann.

U.a. erachten wir entsprechend der prozentualen Verteilung der Haupteinsatzbereiche der Tunnelbohrmaschinentypen im vorliegenden Fall die Erdruckschildmaschine (EPB) als das am besten geeignete Verfahren. Wir empfehlen daher, bei der Ausschreibung den Einsatz eines EPB-Schildes vorzusehen.

Die Baugrundverhältnisse, die hohe Anforderungen an die Abbauwerkzeuge stellen (abrasive Sande, Kiese und Geschiebemergel, Einlagerungen von harten Granit- und Metamorphitblöcken, bereichsweise Glimmertone sowie Lauenburger Ton mit hohem Verklebungspotential), sind u. a. bei der Auswahl und Anordnung der Werkzeuge, bei der Gestaltung des Schneidrades und der Abbaukammer, der Anordnung und Dimensionierung der Konditionierungsdüsen, der Auswahl der Konditionierungsmittel etc. zu berücksichtigen.

Die ausführende Firma muss die vorgesehene Konditionierung des Bodens eigenverantwortlich festlegen und alle hierfür erforderlichen relevanten Parameter durch eigene Vor-



untersuchungen bzw. Analysen vor Baubeginn ermitteln. Die geplanten Additive sind umweltrechtlich und abfalltechnisch genehmigen zu lassen. Die Ortsbruststützung sowie der Materialfluss in der Abbaukammer und im Schneckenförderer sind sicherzustellen. Bei der Durchfahrung der gut wasserdurchlässigen Sande und kiesigen Sande sind geeignete Zusatzmaßnahmen, wie das Einbringen von Bentonit- oder Füllersuspension in die Abbaukammer und zusätzliche technische Ausstattung der TBM (z. B. Vorsehen eines Additional Face Systems) erforderlich. Die mineralogischen Wechselwirkungen zwischen dem Baugrund und Konditionierungsmitteln sind projektspezifisch zu analysieren.

Das Schneidradlayout und die Förderschnecke sind auf die zu erwartenden Steine auszuliegen. Die Öffnungsgrößen des Schneidrades sind durch fest verschweißte Begrenzer („Grizzly Bars“) zu begrenzen. Angaben zur geschätzten Häufigkeit von Stein- bzw. Blockeinlagerungen gehen aus Abschn. 10.1 hervor.

Zur Einschätzung der Werkzeugabnutzung ist davon auszugehen, dass die Sande und die im Geschiebemergel enthaltenen Sande einen überwiegend geringen Rundungsgrad aufweisen und damit überwiegend stark abrasiv sind. Zu berücksichtigen sind auch die abrasiven Eigenschaften der eingelagerten Kiese und Steine, die überwiegend aus sehr harten magmatischen Plutonitgesteinen wie Granit, Diorit sowie Metamorphiten wie Gneis o. ä. bestehen (siehe auch die Ergebnisse der Kornrundungsanalysen in der Anlage 023581-2/13) und stark bis extrem abrasiv eingestuft werden.

Verklebungen des Schneidrades und/oder des Abbauraumes oder anderer Bereiche beim Durchfahren bindiger Böden stellen keinen vergütungsfähigen Störfall dar, sondern sind bei der Planung des Vortriebs und der Vortriebsleistung (Konzipierung und Dimensionierung der Schildmaschine, der Förderschnecke, der Konditionierung etc., siehe auch Abschn. 10.6) zu berücksichtigen.

Zur Einschätzung der allgemeinen Verklebungspotentiale der einzelnen aufzufahrenden Bodenarten sind die Ergebnisse der im Labor ermittelten Zustandsgrenzen und Plastizitätszahlen in dem nachfolgenden Diagramm nach HOLLMANN & THEWES eingetragen.

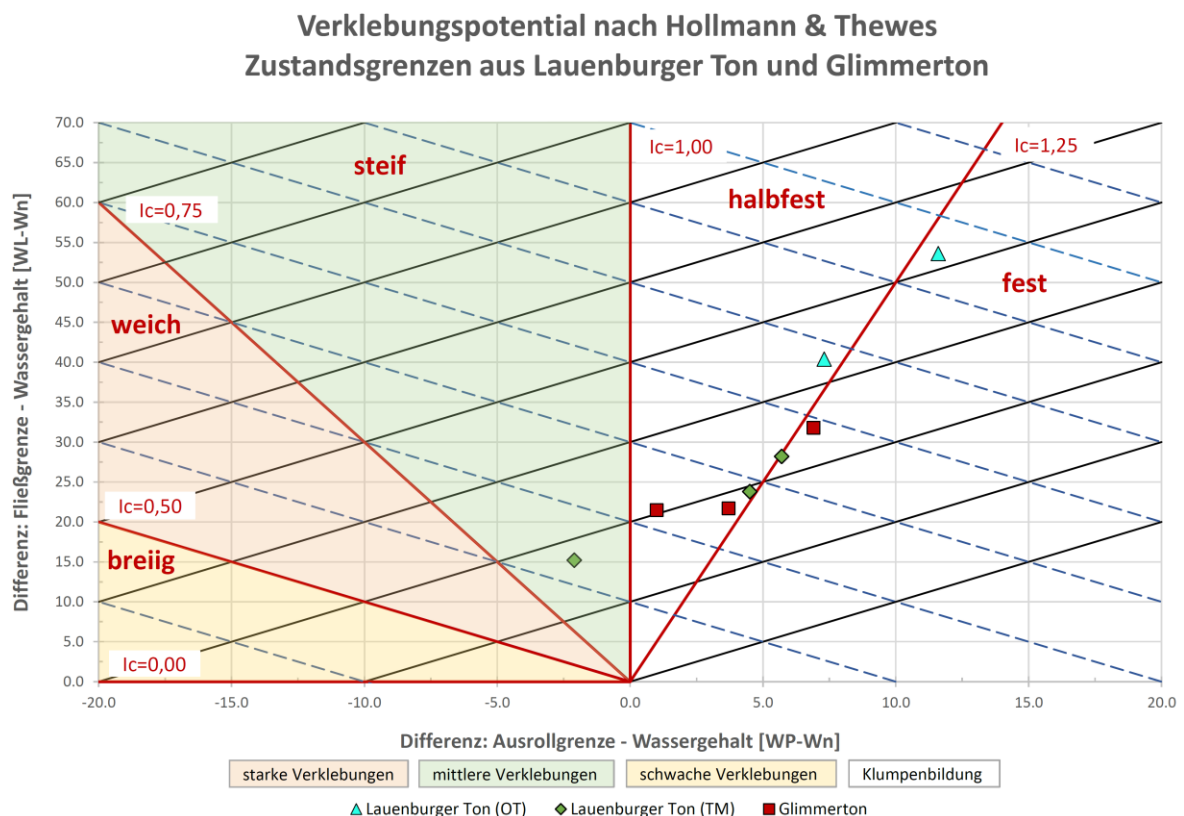


Abbildung 8 Verklebungspotential der untersuchten Proben mit Zustandsgrenzen (Lauenburger Ton und Glimmertone), Grenzen der Verklebungspotentiale nach HOLLMANN & THEWES

Bei den hier untersuchten bindigen Böden des Lauenburger Tones sowie des Glimmertones ist beim Abbau der Tonböden überwiegend mit Verklebungen zu rechnen. Eine Bodenprobe des Lauenburger Tones weist gemäß der Einstufung nach Abbildung 8 mittleres Verklebungspotential auf.

Zur Übersicht und zum Vergleich haben wir die Zustandsgrenzen und Plastizitätszahlen von repräsentativen Bodenproben auch in das nachfolgende Diagramm (Abbildung 9) für den flüssigkeitsgestützten Vortrieb (Slurry) nach THEWES eingetragen.

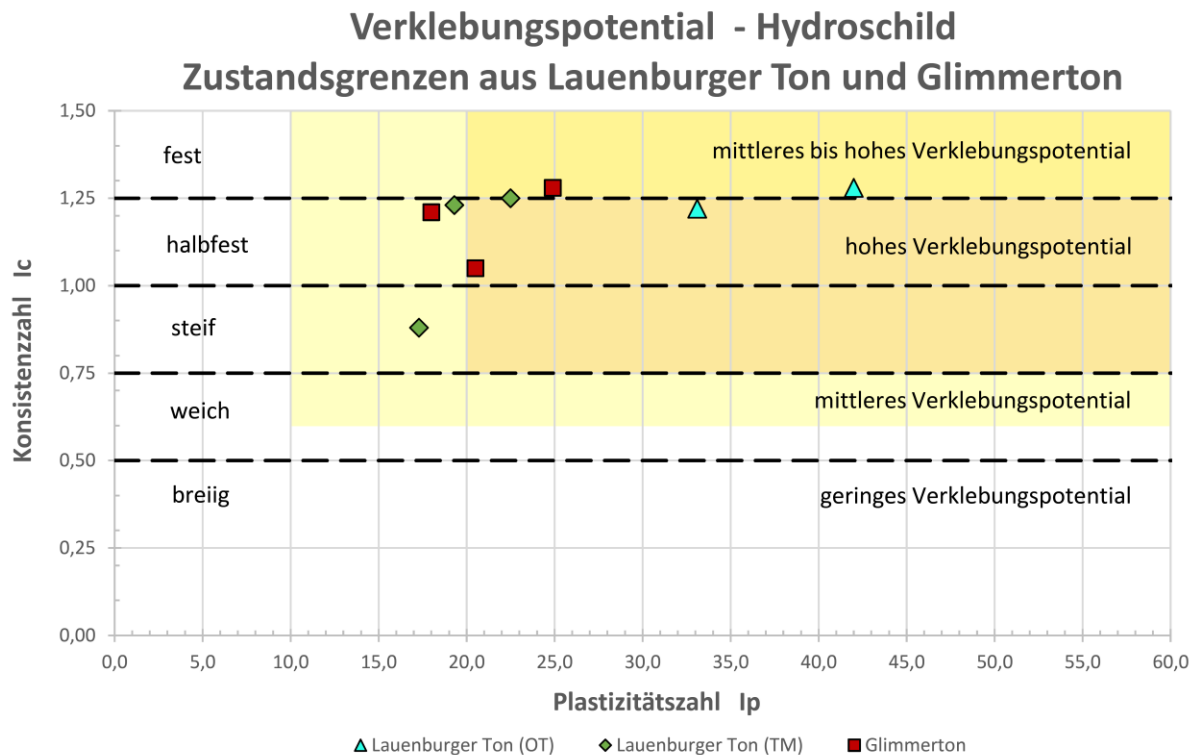


Abbildung 9 Verklebungspotential der untersuchten Proben mit Zustandsgrenzen (Lauenburger Ton und Glimmerton), Grenzen der Verklebungspotentiale nach THEWES

Danach sind sowohl der Lauenburger Ton als auch der Glimmerton nach der Einstufung von THEWES als Böden mit mittlerem bis hohem und hohem Verklebungspotential einzustufen.

Beim Geschiebemergel ist erfahrungsgemäß aufgrund des vergleichsweise geringeren Tonanteiles ein überwiegend mittleres bis geringes Verklebungspotential nach THEWES zu erwarten. Örtlich weist der Geschiebemergel auch höhere Tonanteile auf, dort ist auch ein höheres Verklebungspotential möglich.

Bei Stillständen im Rahmen von Reparaturen, Wartungsmaßnahmen, Umrüstungen oder Hindernisbeseitigungen sind geeignete Maßnahmen zur Sicherung der Ortsbrust zu ergreifen (Gefahr von Fließeinbrüchen bei den meist relativ gleichförmigen wassergesättigten Sanden insbesondere bei Sandeinlagerungen im Geschiebemergel u. a.).



10.3 Bemessung des Tunnelausbaues

Die Bemessung des Tunnelausbaues soll nach EC 7 erfolgen. Danach sind mit den in Abschn. 8 in der Tabelle 34 angegebenen Bodenkennwerten und den in Abschn. 6.1 beschriebenen Wasserständen unter Ansatz der geltenden Teilsicherheitsbeiwerte die Tragfähigkeit und die Gebrauchstauglichkeit nachzuweisen.

Die Tunnelbemessung ist nach den „Empfehlungen zur Berechnung von Tunneln im Lockergestein“ der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau e. V. vorzunehmen.

Bei einer Bemessung des Tunnels nach dem Bettungsmodulverfahren können die Erdruckbeiwerte für die verschiedenen durchfahrenen Bodenschichten mit Ausnahme des tertiären Glimmertones mit

$$K_0 = 1 - \sin \varphi'$$

angesetzt werden. Der Reibungswinkel φ' der verschiedenen Bodenarten ist der Tabelle 34 der Bodenkennwerte in Abschn. 8 zu entnehmen.

Für Berechnungen mit der Finite Elemente Methode kann die Querdehnungszahl ν aus der Beziehung

$$K_0 = \nu / 1 - \nu$$

ermittelt werden.

Abweichend von den zuvor aufgeführten Böden ist im tertiären Glimmertone aufgrund der geologisch bedingten Überkonsolidation dieses Bodens mit größeren Horizontalspannungen zu rechnen.

Die durch die ehemalige Eisauflast verursachte erhöhte Horizontalspannung ist durch die Tonmineralstruktur des Bodens teilweise konserviert und führte nach Abschmelzen des Eises und Wegfall der Eislast zu einem eingprägten Horizontalspannungsüberschuss. Nach einer Störung des Baugrundes, z.B. durch den Schildvortrieb, werden die erhöhten Horizontalspannungen teilweise vorübergehend abgebaut. Nach der Tunnelherstellung baut



sich der erhöhte Seitendruck mit der Zeit aber wieder auf. Nach unseren Erfahrungen u.a. bei der geotechnischen Begleitung des in vergleichbarer geologischer Position aufgeführten Tiefdükers Dradenau (U 2.22) kann der generell tiefenabhängige Seitendruckbeiwert für den Glimmerton unter Berücksichtigung der mit dem Vortrieb durchfahrenen Tiefen einheitlich angesetzt werden mit

$$K_0 = 1,7.$$

Für die Schnittkraftermittlung nach dem Bettungsmodulverfahren ist der radiale Bettungsmodul k_r nach der Formel $k_r = a \cdot E_s / r_a$ für $a = 1,0$ mit den in der Tabelle 34 angegebenen Steifemoduli zu ermitteln. Für die Tunnelstrecken im Glimmerschluff/-ton kann ein mittlerer Steifemodul von $E_{sr} = 60 \text{ MN/m}^2$ angesetzt werden. Eine tangentielle Bettung darf nicht berücksichtigt werden. Sofern es bei asymmetrischer Belastung der Tunnelauskleidung bei dem angewandten Berechnungsverfahren rechnerisch zu einer Verrollung der Röhre kommt, ist der Ansatz einer örtlichen Wandreibung zulässig. Hinsichtlich Lage und Größe ist die Wandreibung so anzusetzen, dass die für den Belastungsfall maßgebenden Schnittgrößen nicht reduziert werden.

Bei der Tunnelbemessung ist weiterhin die mögliche Quelldruckentwicklung des Becken-tones, des Lauenburger Tons und des tertiären Glimmertones zu beachten, die sich bei Wasserzutritt und behinderter Quelldehnung einstellen kann. Im bodenmechanischen Labor wurde der bei ausreichend langer Quellzeit von bis zu 4 Tagen und unbegrenzter zweiseitiger Wasserzufuhr maximal mögliche Quelldruck als Quelldruckäquivalenzpotential mit dem Quellversuch nach KAISER/HENKE in einer Größenordnung von $380 \text{ kN/m}^2 \leq \sigma_{q\ddot{A}} \leq 480 \text{ kN/m}^2$ ermittelt (s. Abschn. 7.4.10 und 7.8.11).

Da im Gegensatz zu den Laborbedingungen beim Einbau der Tübbinge und der anschließenden Schildschwanzverpressung sowohl die Quellzeit als auch die Menge des zur Verfügung stehenden Wassers im Kontaktbereich zwischen Ringspalt und Ton stark begrenzt sind und das Wasser weiterhin nicht allseitig, sondern nur von einer Seite aus auf den Ton einwirken kann, ist das Auftreten von Quelldrücken nach erfolgter Schildschwanzverpressung nur in einer wesentlich geringeren Größenordnung möglich. Dennoch müssen



sicherheitshalber durch eine sorgfältige kontinuierliche und hohlraumfreie, druck- und volumengesteuerte Ringspaltverpressung mögliche Quellerscheinungen der Tonböden soweit wie möglich reduziert werden.

Unter Berücksichtigung der vorliegenden Erfahrungen bei ähnlichen Tunnelbauvorhaben sowie nach den Überlegungen zum Ablauf der möglichen Quellvorgänge beim Schildvortrieb mit sorgfältiger volumen- und druckgesteuerter Ringspaltverpressung wird die Berücksichtigung eines Quelldruckes in der Tunnellage wie folgt vorgeschlagen.

Ein möglicher Quelldruck kann im normalen, mit einer Bentonitsuspension gestützten Vortrieb nur in dem sehr kurzen Zeitfenster vom Verpressen des Ringspalt bis zum Aushärten des Mörtels mit Aufnahme des restlichen ggf. noch vorhandenen freien Wassers bzw. bis zum Abschluss des Hydratationsvorgangs entstehen. Der beim Freilegen des Tones beginnende Quellvorgang kann bis zur Mörtelverpressung im Ringspalt ungehindert ablaufen. Die Größenordnung des hiernach möglichen Quelldruckes wird von uns auf höchstens ca. 30 % des in den Quellversuchen ermittelten maximalen Quelldruckes geschätzt und unter Berücksichtigung der Verteilung des Tonanteiles der untersuchten Proben für den Lauenburger Ton und den Beckenton mit $\sigma_q = 130 \text{ kN/m}^2$ angesetzt.

Die Größenordnung des möglichen Quelldruckes wird von uns für den Glimmerschluff/-ton zu $\sigma_q = 150 \text{ kN/m}^2$ angenommen.

Da der im Glimmerschluff/-ton eiszeitlich eingeprägte hohe Seitendruck (Seitendruckbeiwert $k_0 = 1,7$) beim Vortrieb durch die sich einstellende Entspannung zunächst etwa auf den Stützdruck abfällt, der nach der normalen geogenen Tiefenspannung (Seitendruckbeiwert $k_0 = 1$) festgelegt wird, überlagert sich der Quelldruck $\sigma_q = 150 \text{ kN/m}^2$ nach Auffahren des Tunnels lediglich mit dem Stützdruck. Die hiernach für diesen Zeitpunkt anzusetzende Gesamtspannung im Bereich der Ulmen ist geringer bzw. zumindest nicht höher als der für die Bemessung der Tübbinge langfristig zu berücksichtigende Seitendruck, der sich im Laufe mehrerer Jahre bzw. Jahrzehnte wiedereinstellt. Damit kann der Quelldruck bei der Bemessung der Tübbinge auf den Seitendruckbeiwert $k_0 = 1,7$ im Bereich des Glimmertones vernachlässigt werden.



Da die sich tatsächlich einstellende Größenordnung des Quelldruckes nicht bekannt ist, darf dieser nicht stützend angesetzt werden.

Die Sicherheit der Tunnelröhre gegen Auftrieb ist für die in Abschn. 10.1 beschriebenen höchsten Grundwasserstände im Endzustand nach EC 7 nachzuweisen, wobei Reibungskräfte am Tunnelmantel nicht angesetzt werden dürfen.

10.4 Stützung der Ortsbrust, Ausbläuersicherheit

In Anbetracht der Trassenlage und der damit verbundenen Forderung nach geringmöglichen Setzungen an der Geländeoberfläche infolge des Schildvortriebs kommt der sorgfältigen Ringspaltverpressung zwischen Baugrund und Tübbingausbau und der kontinuierlich ausreichenden Stützung der Ortsbrust und der Ausbruchlaibung während des gesamten Vortriebs eine besondere Bedeutung zu.

Die Standsicherheit der Ortsbrust ist von der ausführenden Firma durch Stützdruckberechnungen für die Erdbreistützung während der Schildfahrt in Abhängigkeit von den Bodenkennwerten des jeweiligen Baugrundaufbaues, vom Grundwasserstand und von der vorhandenen Bebauung nachzuweisen. Dabei sind neben der vollen Stützung auch Zustände mit halb und voll abgesenktem Stützmedium zu untersuchen. Die Stützdruckberechnungen sind außer für den Normalfall mit großer Überdeckung auch für die kritischen Bereiche bei der Unterquerung des Köhlfleethafens und der Norderelbe sowie für die artesischen Grundwasserverhältnisse im Bereich des Elbhangs durchzuführen. Bei den Stützdruckberechnungen sind realistische Ansätze für das Druckniveau des Erdbreis zu treffen sowie technisch und betrieblich nicht zu vermeidende Druckschwankungen z. B. beim Wiederaufstart der Vortriebsmaschine nach Stillständen zu berücksichtigen. Die Nachweise sind nach den Vorgaben der aktuellen ZTV-Ing zu führen.

Für detaillierte statische Nachweise sind die Bohrprofile und Sondierdiagramme in den Anlagen 023581-2/3.1 bis 3.4 maßgebend. Die Wichten sind gemäß den Angaben in Tabelle 34 in Abschnitt 8, zu wählen.



10.5 Auswirkung des Vortriebs auf die Umgebung

Mit den ortsbrustgestützten Vortriebsschilden der heutigen Generation lassen sich die vortriebsbedingten Geländesetzungen erfahrungsgemäß durch eine kontinuierlich ausreichende Ortsbruststützung und eine sorgfältige druck- und volumengesteuerte Ringspaltverpressung auf eine Größenordnung von i. d. R. ca. 1-2 cm begrenzen.

Grundsätzlich ist damit zu rechnen, dass sich die Setzungen zumindest in den Teilstrecken mit größerer Überdeckung zwischen den Schächten aufgrund der zunächst sich ausbildenden Gewölbewirkung nach Passieren des Vortriebs nicht unmittelbar in voller Größenordnung, sondern zeitlich verzögert einstellen.

Die Setzungen werden voraussichtlich spätestens ca. 6 Monate nach dem Auffahren der Tunnelröhre abgeklungen sein.

10.6 Angaben zum Bodentransport und zur Bodenconditionierung

Die Conditionierung und Aufbereitung des Abraumes sind so vorzusehen, dass der zu entsorgende Aushub in stichfester Form (weich bis steif) vorliegt, in dieser Form transportiert und auf der vorgesehenen Deponie eingelagert werden kann.

10.7 Baubegleitende Messungen

Zur Überprüfung des Verhaltens des anstehenden Baugrundes, der im Einflussbereich der Tunneltrasse liegenden Bauwerke und des Tunnelbauwerkes während des Tunnelvortriebs ist ein geotechnisches Messprogramm durchzuführen. Dabei sollte auch und insbesondere überprüft werden, inwieweit das prognostizierte mit dem tatsächlichen Verformungsverhalten von Baugrund und Bauwerken übereinstimmt (Systemverhalten, Interaktion Baugrund-TBM-Ausbau), so dass ggf. bei kritischen Beanspruchungszuständen und/oder beginnenden Versagensmechanismen rechtzeitig Gegenmaßnahmen zur Schadensvermeidung oder -begrenzung durchgeführt werden können.

In der Tunnelröhre sind in regelmäßigen Abständen von ca. 50-100 m Konvergenzmessungen zur Kontrolle der Ringverformungen durchzuführen. Die Häufigkeit der Messungen ist abhängig von der Größe und dem Verlauf der Verformungen zu wählen.



In noch festzulegenden Abständen sollen übertägige Messquerschnitte im Bereich zwischen Jachtweg und Uferlinie Köhlfleethafen, an der Brücke im Köhlfleethafen, am Bubendeyweg sowie am Hans-Leip-Ufer zur Erfassung der übertägigen Setzungsmulden angeordnet werden. In den Bereichen der Schildaus- und -einfahrten sind die Messabstände ggf. zu verringern.

Mit den Messungen sollte möglichst frühzeitig vor Baubeginn begonnen werden, um anhand der Messergebnisse die Auswirkungen der Tunnelherstellung von Vortriebsbeginn an kontinuierlich sicher beurteilen zu können. Das zeitliche Messraster ist dem Bauablauf und den Verformungen anzupassen. Das Messprogramm ist im Zuge der Ausführungsplanung entsprechend zu planen und mit den Fachgutachtern abzustimmen.

10.8 Zustandsfeststellung

Zur Dokumentation des vorhandenen baulichen Zustands und zur Abwehr von ggf. unberechtigten Schadenersatzansprüchen ist eine umfassende Zustandsfeststellung der im Einflussbereich der Tunnelbaumaßnahme liegenden Gebäude sowie des Tankanlegers im Köhlfleethafen oder sonstigen baulichen Anlagen, Sielen und Leitungen sowie Verkehrsflächen durchzuführen.

Als Maß für die Abgrenzung des Einflussbereiches bzw. der möglichen Setzungsmulde kann ausgehend von der Tunnelsohle quer zur Tunnelachse zu beiden Seiten ein Ausbreitwinkel von mind. ca. 55° zur Horizontalen angenommen werden.

11. Geotechnische Empfehlungen und Bemessungsangaben für die Schachtbaugruben und Schachtbauwerke

11.1 Baugrund und Wasser, Bemessungsprofil und Bemessungswasserstände

11.1.1 Startschacht (Dükeroberhaupt)

Die Baugrundverhältnisse im Bereich des Startschachtes wurden mit den Bohrungen B 1 und B 2 sowie den Drucksondierungen DS 1 und DS 2 erkundet. Die Bohr- und Sondierergebnisse sind in den Abschnitten 5.2 und 5.3 beschrieben.



Im Bereich des Startschachtes stehen unterhalb von aufgefüllten Böden organische Weichschichten aus Klei und Torf an, die nachfolgend von holozänen und weichselzeitlichen Sanden bzw. Sanden und Kiesen unterlagert werden. Die geplante Unterkante der Schachtsohle bei rd. NHN -22,7 m liegt innerhalb der weichselzeitlichen Sande. Unter den v. g. Sanden/Kiesen folgen ab ca. NHN -29 m die Lauenburger Schichten aus einer Wechselagerung von Tonen/Schluffen sowie schluffigen Feinsanden.

Für die Bemessung der Schachtwände sowie der Baugrubenwände ist das Bemessungsprofil in Anlage 023581/14.1 anzusetzen.

Der **Bemessungswasserstand im Endzustand** ist für das Schachtbauwerk mit NHN+8,0 m zu berücksichtigen.

Im Bauzustand können für die Bemessung der Baugrubenwände auf Basis der gemessenen Grundwasserstände in den Grundwassermessstellen GWM B 2 bzw. GWM B 3 und der hier festgestellten Dämpfung der Grundwasserstände zu den Elbwasserständen folgende Bemessungswasserstände in den Schmelzwassersanden (oberer GW-Leiter) bzw. in den elsterzeitlichen Sanden (unterer GW-Leiter) festgelegt werden:

Bauzustand:

Bemessungssituation BS-T: NHN +3,5 m

Bemessungssituation BS-A: NHN +6,0 m

11.1.2 Zielschacht (Dükerunterhaupt)

Die Baugrundverhältnisse im Bereich des Zielschachtes wurden mit den Bohrungen B 5 und B 6 sowie den Drucksondierungen DS 5 und DS 6 erkundet. Die Bohr- und Sondierergebnisse sind in Abschnitt 5.2 und 5.3 beschrieben.

Im Bereich des Zielschachtes steht geländenah zunächst ein kompakter Geschiebemergelhorizont an, der nachfolgend von einer Wechsellagerung von Sanden, Kiesen und Geschiebemergel unterlagert wird. Darunter wurden in unterschiedlichen Tiefenlagen und unterschiedlichen Mächtigkeiten elsterzeitliche Ablagerungen aus Lauenburger Ton,



Geschiebemergel, aufgearbeiteten Glimmerton und Sanden sowie Kiesen erbohrt. Die geplante Unterkante der Schachtsohle liegt bei rd. NHN -19,7 m und damit am Standort der Bohrung B 5 innerhalb von Kiesen bzw. am Standort der B 6 am Übergang einer Lauenburger Ton-Lage zu Sanden mit Geschiebemergelstreifen. Der miozäne Glimmerton steht ab etwa NHN -34 m an.

Für die Bemessung der Schachtwände sowie der Baugrubenwände ist das Bemessungsprofil in Anlage 023581/14.2 anzusetzen.

Der **Bemessungswasserstand im Endzustand** ist für das Schachtbauwerk zufolge der artesischen Wasserdruckverhältnisse wie folgt zu berücksichtigen:

Endzustand:

Bemessungssituation BS-P: NHN +13,0 m

Bemessungssituation BS-A: NHN +14,0 m

Im Bauzustand müssen die Grundwasserstände des oberen Grundwasserleiters in den Schmelzwassersanden (Arteser) und die Grundwasserstände im unteren Grundwasserleiter in den elsterzeitlichen Sanden, der in hydraulischer Verbindung zu den Elbwasserständen steht, berücksichtigt werden. Folgende Bemessungswasserstände sind zu beachten:

Bauzustand:

oberer Grundwasserleiter (Schmelzwassersande qs):

Bemessungssituation BS-T: NHN +12,5 m

Bemessungssituation BS-A: NHN +13,5 m.

Unterer Grundwasserleiter (elsterzeitliche Sande qe):

Bemessungssituation BS-T: NHN +4,0 m

Bemessungssituation BS-A: NHN +6,5 m.



11.2 Bemessung der Schachtwände und Schachsohlen (Endzustand)

Zur Berücksichtigung der radialen Bettung der kreisförmigen Schachtbauwerke am Dükeroberhaupt und Dükerunterhaupt können die Empfehlungen und Ansätze der EAB unter EB 73, Abschnitte 8 und 9 zur Anwendung kommen. Für die Ermittlung der Bettung sind die in Tabelle 34, Abschnitt 8, angegebenen Steifemoduli (untere Werte) zu verwenden.

Für die Bemessung der Stahlbetonsohlplatten des Dükeroberhauptes und des Dükerunterhauptes nach dem Bettungsmodulverfahren erfolgte bereits ein iterativer Abstimmungsprozess zwischen dem Tragwerksplaner und uns.

Im Ergebnis konnten folgende Bettungsmoduli festgelegt werden:

Dükeroberhaupt (südlich der Elbe):

Mitte der Sohlplatte	$k_s = 20 \text{ MN/m}^3$
Unterhalb der Schachtwände	$k_s = 60 \text{ MN/m}^3$
Überstand der Sohlplatte	$k_s = 30 \text{ MN/m}^3$

Dükerunterhaupt (nördlich der Elbe):

Mitte der Sohlplatte	$k_s = 20 \text{ MN/m}^3$
Unterhalb der Schachtwände	$k_s = 60 \text{ MN/m}^3$

11.3 Bauzeitliche Bemessung der Schachtbaugruben

Es ist vorgesehen, die Schachtbaugruben im Unterwasseraushubverfahren auszuheben und eine Unterwasserbetonsohle herzustellen, die mit Schubknaggen an die geplanten Stahlbetonschlitzwände konstruktiv angebunden wird. Die Baugrubenwände/Schlitzwände sollen mit Verpressankern rückverankert werden.



Der Verbau für die geplanten Baugruben (Startschacht und Zielschacht) ist nach den Empfehlungen des Arbeitskreises Baugruben der DGGT (EAB) in der aktuell gültigen Fassung mit den Bemessungsprofilen in den Anlagen 023581/14.1 bzw. 14.2 zu bemessen.

Für eine Schlitzwand ist der Wandreibungswinkel mit $\delta_a = 1/2 \varphi'$ bzw. $\delta_p = -1/2 \varphi'$ anzunehmen. Sofern bei der Schlitzwandherstellung durch geeignete Maßnahmen die Ausbildung eines Filterkuchens vermieden werden kann oder eine stark unebene Wandoberfläche erreicht wird, darf nach EAB, EB 89, Abs. 3c, auch ein betragsmäßig höherer Erddruckneigungswinkel als $|\delta_p| = 1/2 \varphi'$ für nicht bindige Böden und Geschiebemergel angesetzt werden.

Für die Schlitzwand ist für den Nachweis der Standsicherheit des offenen Schlitzes die DIN 4126:2013-09 zu berücksichtigen.

Auf die Baugrubenwände ist der erhöhte aktive Erddruck $E^* = 0,5 E_a + 0,5 E_0$ mit $K_0 = 1 - \sin \varphi'_k$ anzusetzen. Beim Ansatz des Erdwiderstandes auf der passiven Seite der Baugrubenwände ist nach EAB, EB 22, zur Verringerung der Fußverschiebungen der Bemessungserdverstand mit dem Faktor $\eta_{Ep} \leq 0,8$ abzumindern.

Die horizontalen Wandverformungen sind insgesamt auf $\Delta h \leq 3$ cm bzw. im Kopfbereich auf $\Delta h \leq 2$ cm zu begrenzen. Wir empfehlen, die Verformungen der Verbauwände über regelmäßige Messungen mittels Inklinometermessungen überprüfen zu lassen.

Für die rechnerische Abschätzung der zu erwartenden Wandverformungen nach dem Bettungsmodulverfahren ist der erhöhte aktive Erddruck mit $E^* = 0,75 \cdot E_a + 0,25 \cdot E_0$ anzusetzen und die Scherparameter (φ'_k, c'_k) können auf der aktiven Seite zur näherungsweisen Erfassung der wahrscheinlichen Verformungen vereinfachend um 10 % angehoben werden.

Die Bemessung der Verbauwände soll nach dem Bettungsmodulverfahren durchgeführt werden. Bei der Anwendung des Bettungsmodulverfahrens sind auch die Vorgaben der EAB unter EB 102 zu beachten. Die horizontalen Bettungsmoduli $k_{sh,k}$ sind in der



Tabelle 34 bzw. in den Bemessungsprofilen in den Anlagen 023581-2/14.1 und 14.2 aufgeführt.

Die charakteristische Normalspannung $\sigma_{s,k}$ zwischen Verbauwand und Boden darf den für den ebenen Fall berechneten Wert von 80 % der charakteristischen Erdwiderstandsspannung $e_{ph,k}$ nicht überschreiten. Andernfalls sind die v. g. Werte für den Bettungsmodul entsprechend abzumindern bzw. deren Verteilung ist entsprechend zu modifizieren. Bei der Anwendung der Statikprogramme ist unbedingt darauf zu achten, dass die Überprüfung der Ausnutzung des Erdwiderstandes von 80 % $e_{ph,k}$ und damit die programminterne Anpassung der Bettungsmoduli auch im charakteristischen Zustand durchgeführt wird und nicht nur im Bemessungszustand (design).

Für den Nachweis der ausreichenden vertikalen Tragfähigkeit der Verbauwände (äußere Tragfähigkeit) sind die Angaben im Handbuch Eurocode 7, Band 1 (abgekürzt EC 7) zu berücksichtigen. Für die Ermittlung des charakteristischen axialen Widerstands der Verbauwand $R_{c,k}$ im Grenzzustand der Tragfähigkeit GEO-2 können die nachfolgend angegebenen charakteristische Spitzendrücke $q_{b,k}$ bezogen auf die Verbauwandfußfläche und charakteristische Mantelreibungen $q_{s,k}$ bezogen auf die umhüllende Verbauwandmantelfläche angesetzt werden.

Tabelle 37 Charakteristische Werte für die Bemessung der Baugrubenschlitzwände

Schicht	Charakteristischer Spitzendruck $q_{b,k}$ (kN/m ²)	Charakteristische Mantelreibung $q_{s,k}$ (kN/m ²)
Sandige Auffüllungen, locker gelagert	-	40
Sand, mitteldicht gelagert	2.500	80
Sand und Kies, dicht gelagert	4.000	100
Geschiebemergel, überwiegend steif bis halbfest	2.500	60
Beckenschluff, mind. steif	-	30
Lauenburger Ton, mind. steif	1.500	30
Glimmerschluff/-ton, halbfest, fest	2.000	70



Zur Kontrolle der bauzeitlichen horizontalen Schlitzwandverformungen sind Inklinometermessungen in verschiedenen Messquerschnitten vorzusehen.

11.4 Herstellung der Schlitzwände

Bei der Herstellung der Schlitzwände sind die Hinweise der DIN EN 1538, der DIN 4126 und der DIN 4127 zu beachten. Die teilweise dichte und sehr dichte Lagerung der Sande, die häufig große Festigkeit des Geschiebemergels sowie Hindernisse im Baugrund (z. B. Bauschutt, Fundamentreste, Steinlagen) sind dabei einzuplanen bzw. zu berücksichtigen. Die Schlitzwände sind daher mit geeigneten ausreichend leistungsfähigen Geräten herzustellen, die auch für die teilweise großen Aushubtiefen ausgelegt sind.

Der festgestellte Baugrundaufbau ist zum Nachweis für jede Schlitzlamelle zu dokumentieren. Sofern die Wände in den Grundwassernichtleiter (Lauenburger Ton oder Glimmerschluff/-ton) sicher einbinden sollen, ist im Hinblick auf die Bedeutung der ausreichenden Tiefeneinbindung die Herstellung des Verbaues durch den Baugrundsachverständigen überwachen zu lassen.

Die Verbauwände sind so herzustellen bzw. nachzudichten, dass für die Bauzeit eine Restwasserrate $q \approx 1 \text{ l/s} \cdot 1000 \text{ m}^2$ benetzter Umschließungsfläche (grundwasserführende Sande und Kiese) nicht überschritten wird. Dies gilt nicht für singuläre Fehlstellen. Die Nachdichtung der beim Aushub und beim Lenzen festgestellten Undichtigkeiten mit Wasserzutritt muss über die v. g. Forderung hinaus nach dem Stand der Technik ausgeführt werden.

11.5 Rückverankerung der Baugrubenwände

Für die bauzeitliche Rückverankerung der Schlitzwände können Verpressanker gemäß DIN EN 1537:2013-09 eingesetzt werden. Die Verpresskörper sind in den mind. mitteldicht gelagerten holozänen und weichselzeitlichen Sanden unterhalb der organischen Weichschichten bzw. in den mind. steifen Geschiebemergel bzw. den mind. mitteldicht gelagerten saalezeitlichen Sanden anzuordnen.

Für die statische Vorbemessung kann als charakteristische Mantelreibung über die Einbindelänge des Verpresskörpers in den holozänen Sanden ein Wert von $q_{s,k} = 180 \text{ kN/m}^2$,



in den weichselzeitlichen und saalezeitlichen Sanden Wert von $q_{s,k} = 200 \text{ kN/m}^2$ und für den mind. steifen Geschiebemergel ein Wert von $q_{s,k} = 160 \text{ kN/m}^2$ angesetzt werden.

Bei einem angenommenen Durchmesser des Verpresskörpers von max. rd. $d = 18 \text{ cm}$ (Bohrkronendurchmesser von rd. 16 cm zzgl. 2 cm) und einer Verpresskörperlänge von rd. $l_v = 10 \text{ m}$ ergibt sich damit für den Grenzzustand der Tragfähigkeit (GEO-2) bzw. für den Herauszieh Widerstand ein charakteristischer Wert von

$$R_{a,k} = \pi \cdot 0,18 \text{ m} \cdot 10 \text{ m} \cdot 200 \text{ kN/m}^2 = 1.130 \text{ kN/Anker im Sand}$$

bzw. von

$$R_{a,k} = 900 \text{ kN/Anker im Geschiebemergel.}$$

Die v. g. Erfahrungswerte gelten für Verpresskörperdurchmesser $D \leq 20 \text{ cm}$ und Verpresskörperlängen $l_v \leq 12 \text{ m}$.

Der Bemessungswert des Herauszieh Widerstandes ergibt sich daraus unter Berücksichtigung des Teilsicherheitsbeiwertes gemäß EC 7, Tabelle A 2.3, von $\gamma_a = 1,1$ für die hier maßgebende Bemessungssituation BS-T.

Die innere und äußere Tragfähigkeit der Rückverankerungen ist von der ausführenden Firma für das von ihr eingesetzte System gemäß DIN EN 1537:2013-09 und EC 7 nachzuweisen. Im Hinblick auf die Minimierung der horizontalen Baugrubenverformungen sind die Anker vorzuspannen und für den Nachweis der ausreichenden äußeren Tragfähigkeit sind Eignungs- und Abnahmeprüfungen vorzulegen und/oder durchzuführen.

Die Ankerherstellung sollte so ausgeschrieben werden, dass die Wahl des Ankersystems, des Herstellungsverfahrens sowie die Anzahl der erforderlichen Nachverpressungen im Verantwortungsbereich der ausführenden Firma liegt.

Die Verpressmörtelrezeptur ist auf den ermittelten Betonangriffsgrad des Grundwassers nach U 2.12, Abschn. 6.2, abzustimmen.



Wir empfehlen bei der Ausschreibung als Bohrverfahren den Einsatz des Überlagerungsbohrverfahrens mit Doppelkopftechnik als auch die Verwendung von Ankerzement (quellfähiger Zement) vorzugeben. Im Bereich des bindigen Geschiebemergels sind Nachverpressungen vorzusehen.

11.6 Rückverankerung der Unterwasserbetonsohlen

11.6.1 Bemessung der verpressten Mikropfähle

Zur Berechnung des charakteristischen axialen Pfahlwiderstandes $R_{c,k}$ bzw. des charakteristischen Pfahlwiderstandes $R_{t,k}$ für die auf Zug belasteten verpressten Mikropfähle kann für den mind. steifen Geschiebemergel der in der Tabelle 38 angegebene charakteristische Wert für die Mantelreibung $q_{s,k}$ angesetzt werden:

Tabelle 38 Charakteristischer Werte für Mantelreibung $q_{s,k}$
für den Lauenburger Ton (Schicht 9a)
im Bereich der Rückverankerung der Sohle am Startschacht

Pfahlsystem	Mantelreibung $q_{s,k}$ [kN/m ²]
Verpresste Mikropfähle (Zug/Druck)	120

Tabelle 39 Charakteristischer Werte für Mantelreibung $q_{s,k}$
für die Sande und kiesigen Sande (Schicht 6 und Schicht 11)
bzw. Glimmertone (Schicht 13)
im Bereich der Rückverankerung der Sohle am Zielschacht

Pfahlsystem	Mantelreibung SAND $q_{s,k}$ [kN/m ²]	Mantelreibung GLIMMERTON $q_{s,k}$ [kN/m ²]
Verpresste Mikropfähle (Zug/Druck)	240	200

Wir weisen darauf hin, dass die bei Mikropfählen zu erreichenden Werte für die Pfahlmantelreibung vorrangig abhängig sind von der Wahl des Herstellungsverfahrens und von der Ausführungsqualität. Bei den oben aufgeführten Mantelreibungswerten handelt es sich daher um Erfahrungswerte und nicht um Bodenkennwerte.



Die Achsabstände der verpressten Mikropfähle im Bereich der Krafteintragungslänge sollen mind. 0,8 m betragen. Ansonsten ist der charakteristische Wert für die Mantelreibung abzumindern. Die Achsabstände können auch über eine Neigung der Pfähle erreicht werden.

Der Bemessungswert für die Vorbemessung des Pfahlzugwiderstandes $R_{t,d}$ für die auf Zug belasteten verpressten Mikropfähle ergibt sich unter Berücksichtigung des Teilsicherheitsbeiwertes gemäß EC 7, Tabelle A 2.3, einheitlich zu $\gamma_{s,t} = 1,5$ für die maßgebende Bemessungssituation.

Die erforderlichen Pfahlabmessungen, insbesondere die Verpresskörperlängen der verpressten Mikropfähle, sind von der ausführenden Firma eigenverantwortlich festzulegen. Es sind Probelastungen im Baufeld durchzuführen, zu deren Planung, Durchführung und Auswertung die Angaben in der EA-Pfähle (2012) und in EC 7 zu berücksichtigen sind.

In der Regel erfolgen die Probelastungen an Bauwerkspfählen, so dass bei den zur Prüfung ausgewählten Pfählen oberhalb der Verpressstrecke ein PE-Glattrohr anzuordnen ist. Bei den nicht zur Prüfung vorgesehenen Pfählen ist dies nicht erforderlich. Die Anzahl der Probelastungen muss mindestens 3% der Gesamtanzahl betragen, wobei wir empfehlen, die Anzahl auf mindestens $n = 5$ festzulegen, um bei der Festlegung des Grenzwertes der Tragfähigkeit mit einem Streuungsfaktor von 1,0 rechnen zu können. Zusätzlich weisen wir hier darauf hin, dass bei der Bemessung aller Zugpfähle gemäß EC 7 der Modellfaktor $\eta_M = 1,25$ zu berücksichtigen ist.

11.6.2 Herstellung der verpressten Mikropfähle

Hinsichtlich Planung und Ausführung der verpressten Mikropfähle sind die DIN EN 14199:2015-07 und DIN SPEC 18539:2012-02 sowie die EA-Pfähle (2012) zu beachten.

Die Bohrungen für die Mikropfähle sind im Überlagerungsbohrverfahren auszuführen. Beim Überlagerungsbohrverfahren ist aufgrund der Bohrlochstützung durch die Außenverrohrung nur eine geringe Entspannung des Bodens um das Bohrloch herum möglich.



Wesentliches Merkmal des Überlagerungsbohrverfahrens ist die Doppelkopftechnik, die eine gegenläufige Drehbewegung von Außenverrohrung und Hohlbohrkrone sowie eine Veränderung des Voreilmaßes der Außenverrohrung während des Bohrvorganges erlaubt, wodurch erfahrungsgemäß das Lösen und Fördern des Bohrgutes bei einem weitgehend unbeeinflussten umgebenden Baugrund möglich ist.

Die erforderlichen Längen der Krafteinleitungslänge bzw. Verpresskörper sowie die Anzahl ggf. notwendig werdender Nachverpressungen der Verpresskörper der Mikropfähle sollten im Verantwortungsbereich der bauausführenden Firma liegen.

Wir empfehlen, den Bohrkronendurchmesser auf 178 mm zu begrenzen, so dass von einem Verpresskörperdurchmesser von etwa 200 mm ausgegangen werden kann.

Für die Verpressstrecken im Lauenburger Ton sind mindestens 3 Nachverpressleitungen einzuplanen. Grundsätzlich empfehlen wir, sog. Ankerzement (quellfähiger Zement) im Bereich der Verpressstrecken einzusetzen.

Für den Einbau der verpresster Mikropfähle hat die bauausführende Firma ggf. erforderliche Maßnahmen zur Schaffung einer ausreichend standsicheren Arbeitsebene für die von ihr eingesetzten Geräte eigenverantwortlich festzulegen und durchzuführen. Ferner hat sie zu gewährleisten, dass die erforderlichen Pfahlabssetztiefen im vorhandenen Baugrund mit dem zum Einsatz vorgesehenen Gerät erreicht werden. Für jeden Pfahl ist ein Herstellungsprotokoll aufzustellen.

Baugrundbedingt sind bei der Pfahlherstellung Erschwernisse durch mögliche Hindernisse (Holz, Steine bis Blöcke) zu erwarten. Die Wahl der Art der Beseitigung von möglichen Hindernissen sollte in der Verantwortung der bauausführenden Firma liegen.

Die Wahl der zum Einsatz kommenden Stoffe (z. B. Zementsuspension/Beton) ist auf die vorhandenen Baugrund- und Grundwasserverhältnisse abzustimmen. Die Ergebnisse der Grundwasseranalysen (s. Abschn. 6.2) sind entsprechend zu berücksichtigen.



11.6.3 Hebungen

Bei einer sach- und fachgerechten Ausführung der verpressten Mikropfähle sind zufolge der Zugbelastung erfahrungsgemäß Hebungen in einer Größenordnung von rd. $h \leq 10$ mm zu erwarten.

11.7 Baugrubenaushub, bauzeitliche Trockenhaltung und Auftriebssicherung

Bis zum Erreichen des Grundwasserspiegels bzw. bis zur aufbruchsicheren Aushubkote der Baugrubensohle im Bereich der artesischen Wasserdrücke beim Zielschacht können die Baugruben zunächst trocken ausgehoben werden. Anschließend sollen die Baugruben im Nassaushub ausgehoben werden. Hierbei ist sicherzustellen, dass das Baugrubenwasser kontinuierlich mindestens 1 m über den bauzeitlichen Bemessungswasserstand gehalten wird.

Es wird besonders darauf hingewiesen, dass aufgrund der Festigkeit des Geschiebemergels im Zielschacht und der ungünstigen Geometrie beim Unterwasseraushub geeignetes, ausreichend schweres Löse- und Hebegerät eingesetzt werden muss. Der Einsatz eines Baggers mit Seilgreifer reicht hier wahrscheinlich nicht aus. In den von den Geräten ggf. am Rand nicht erfassten Bereichen muss ggf. der Geschiebemergel von Tauchern händisch z. B. mittels Wasserkanonen gelöst werden.

Die Herstellung der Unterwasserbetonsohlen muss im Hinblick auf die Bedeutung für die bauzeitliche Standsicherheit durch Taucher begleitet und kontrolliert werden.

Vor dem Einbau des Unterwasserbetons ist eine Überprüfung der Aushubsohle erforderlich, bei der mit Taucherhilfe die ausreichende Entfernung des Schlammes zu kontrollieren ist, der sich u. a. aus der aushubbedingten Aufladung des Wassers mit Schwebstoffen sowie ggf. aus der Rücklaufsuspension bei der Herstellung der Rückverankerung in der fertiggestellten Baugrube bildet.



Während des Betoniervorgangs ist die sich vor der Betonierfront bildende Schlammwalze durch Taucher abzusaugen, um Schlammeneinschlüsse im Beton und damit mögliche Fehlstellen zu vermeiden. Auch in dieser Herstellungsphase muss auf die Einhaltung des Mindestwasserstandes in der Baugrube geachtet werden.

Nach Aushärtung der Unterwasserbetonsohle wird durch Absenken des Baugrubenwasserspiegels und Messung der ggf. zulaufenden Wassermenge die Dichtigkeit des Systems Schlitzwandverbau und Unterwasserbetonsohle geprüft. Undichte Bereiche müssen mit geeigneten Verfahren und Taucherhilfe festgestellt und nachgedichtet werden.

Nach Fertigstellung der Unterwasserbetonsohlen und Lenzen der Baugruben empfehlen wir, eine etwa 30 cm dicke Drän- und Ausgleichschicht aus Einkornbeton einzubauen, um hierüber die bauzeitliche Entwässerung (Dränleitungen und Pumpensümpfe) einzurichten.

Das Lenzwasser sowie das Tagwasser und der Restwasserzufluss durch die sog. technische wasserdichte Baugrubenumschließung ist vor der Einleitung in einen geeigneten Vorfluter zu reinigen.

Die Entnahme von Grundwasser und die Einleitung von Baugrubenwasser in die Vorflut bzw. die Siele sind genehmigungspflichtig.

11.8 Trockenhaltung und Auftriebssicherheit der Schachtbauwerke im Endzustand

Die druckwasserdicht herzustellenden Bauwerke sollen als „Weiße Wanne“ aus einem wasserundurchlässigen Beton mit entsprechender Rissbreitenbegrenzung hergestellt werden. Arbeits- und Bauwerksfugen sind entsprechend druckwasserdicht auszubilden. Bei der Ausbildung der Wände und der Sohle in WU-Beton ist zu beachten, dass vereinzelte Rissebildungen im Beton aus Schwinden und Kriechen nicht vollständig auszuschließen sind. Die im Rahmen der Gewährleistung der bauausführenden Firma durchzuführende Nachbehandlung des Betons in Bereichen mit örtlichen Durchfeuchtungen mittels Injektion ist jedoch Stand der Technik und führt danach zu einem dauerhaften und dichten Verschluss eventueller Rissebildungen.



Die dauerhafte Auftriebssicherheit (Sicherheit gegen Aufschwimmen UPL nach EC 7) des Bauwerks im Endzustand ist ausschließlich durch das Eigengewicht des Bauwerks zu gewährleisten und für den entsprechenden Bemessungswasserstand und unter Berücksichtigung der Oberkante verbleibender Schlitzwandverbauwände nachzuweisen. Innerhalb der Baugrube ist mit einem Aufstau von Stauwasser im Baugrubenseitenraum bis entsprechender OK Schlitzwandverbau zu rechnen.

11.9 Bauwerkssetzungen

Auf der Basis von Lastangaben des Tragwerkplaners und im Zuge der Abstimmung der Bettungsmodulansätze zur Bemessung der Sohlplatten wurden von uns Setzungsberechnungen durchgeführt. Die Berechnungsergebnisse lassen Setzungen der Schächte unmittelbar nach deren Bau in folgender Größenordnung erwarten:

Dükeroberhaupt (südlich der Elbe):

Nach Fertigstellung der Bauwerkssohle	$2 \text{ mm} \leq s \leq 4 \text{ mm}$
Nach Einbau der Schachtwände	$5 \text{ mm} \leq s \leq 7 \text{ mm}$
Nach Verfüllen des Seitenraumes	$5 \text{ mm} \leq s \leq 8 \text{ mm}$

Insgesamt sind Setzungen in einer Größenordnung von rd. $s = 1 \text{ cm}$ bis 2 cm zu erwarten.

Dükerunterhaupt (nördlich der Elbe):

Nach Fertigstellung der Bauwerkssohle	$2 \text{ mm} \leq s \leq 4 \text{ mm}$
Nach Einbau der Schachtwände	$5 \text{ mm} \leq s \leq 7 \text{ mm}$

Insgesamt sind Setzungen in einer Größenordnung von rd. $s = 0,5 \text{ cm}$ bis $1,0 \text{ cm}$ zu erwarten.

Nach Fertigstellung der Schächte wird sich über die Zeit innerhalb der Schachtbaugrube ein Wasserstand ungünstigstenfalls bis zur Oberkante der Schlitzwände einstellen und somit einen Auftrieb erzeugen. Zuzufolge der Auftriebskräfte erwarten wir langfristig Hebungen des Schachtes in einer Größenordnung von rd. $0,5 \text{ cm} \leq h \leq \text{rd. } 1,0 \text{ cm}$.



12. Zusammenfassung

Zur Beurteilung des Baugrundaufbaues im Bereich der Elbquerung der Fernwärmesystemanbindung (FWS) West zwischen dem Startschacht in Hamburg-Waltershof und dem Zielschacht im Hindenburgpark liegen die Ergebnisse von insgesamt 12 verrohrten Aufschlussbohrungen bis in Tiefen von max. 70,0 m unter GOK, 3 Kleinbohrungen bis max. 15 m unter GOK und 12 Drucksondierungen vor. Unterhalb der landseitig angetroffenen Auffüllungen, holozänen organischen Weichschichten und holozänen Sande sowie der bis zum Elbhang landseitig wie wasserseitig flächendeckend angetroffenen weichselzeitlichen Ablagerungen der jüngsten Eiszeit aus Schmelzwasserablagerungen ist der Baugrund sehr wechselhaft aufgebaut. Im Bereich des Elbhanges wurden unterschiedliche Geschiebemergel- und Schmelzwasserablagerungen, Lauenburger Ton sowie Glimmerton angetroffen.

Von Süden nach Norden verläuft der geplante Schildvortrieb durch weichselzeitliche Schmelzwasserablagerungen, elsterzeitliche Lauenburger Schichten aus Beckenton und -schluff sowie Beckensanden, Resten elsterzeitlichen Geschiebemergels mit Steinsohle, elsterzeitlichen Rinnenfüllungen aus Schmelzwassersanden sowie Glimmerton. Im Bereich des Elbhanges verläuft der Schildvortrieb in elsterzeitlichem Lauenburger Ton, elsterzeitlichem sowie saalezeitlichem Geschiebemergel sowie elsterzeitlichen und saalezeitlichen Schmelzwasserablagerungen.

Angaben zu den Wasserständen und zum Grundwasserchemismus gehen aus dem Abschn. 6 hervor.

Die Ergebnisse der ausgeführten bodenmechanischen Laboruntersuchungen sind im Abschn. 7 dokumentiert.

Die Ergebnisse der orientierenden chemischen Bodenuntersuchung nach LAGA TR-Boden bzw. Deponieverordnung gehen aus dem Abschn. 9 hervor.

Geotechnische Empfehlungen zum Tunnelvortrieb sind im Abschn. 10 enthalten.



Angaben zur Bemessung der Baugruben und der Bauwerke in offener Bauweise enthält
Abschn. 11.

Bearbeiterin:

Projektleiter:

Grundbauingenieure
Steinfeld und Partner
Beratende Ingenieure mbB

(Anders)

(Pormetter)

Verteiler:

Wärme Hamburg GmbH, Herr Lassen-Petersen
Wärme Hamburg GmbH, Frau Blume
WTM Engineers GmbH, Herr Lierse
BabEng GmbH, Frau Busch

2fach

per E-Mail:

dirk.lassen-petersen@waerme.hamburg
wiebke.blume@waerme.hamburg
s.lierse@wtm-hh.de
jb@babeng.com