



Kempfert Geotechnik GmbH

Hasenhöhe 128
22587 Hamburg

Fon 040 6960445-0
Fax 040 6960445-29
Mail hh@kup-geotechnik.de

Geschäftsführer

Dipl.-Ing. Heiko Vierck

Prokurist

Dr.-Ing. Patrick Becker

Registergericht

Amtsgericht Hamburg
HRB 109428

Ust.-Identnummer

DE264813170

Projekt-Ansprechpartner

Heiko Vierck
040 6960445-10
h.vierck@kup-geotechnik.de

Arbeitsschwerpunkte

Erkunden
Beraten
Planen
Überwachen
Prüfen
Messen

Kempfert + Partner Gruppe

Hamburg
Würzburg
Konstanz

Anerkannte Sachverständige

Dr.-Ing. U. Berner¹⁾
Prof. Dr.-Ing. H.-G. Kempfert¹⁾
Dr.-Ing. M. Raithe^{1) 2) 3)}

Öffentlich bestellt und vereidigt¹⁾

Prüfsachverständiger²⁾
Eisenbahn-Bundesamt³⁾

Information

www.kup-geotechnik.de

Zertifiziert nach ISO 9001:2015

Geotechnischer Bericht

Band 1

Ergebnisse der geotechnischen Untersuchungen und
Festlegung der charakteristischen Werte

BAB A7 – Ersatzneubau Rader Hochbrücke,
Brückenbauwerk BW 603

bearbeitet im Auftrag der

DEGES

Deutsche Einheit Fernstraßenplanungs- und -bau GmbH
Zimmerstraße 54
10117 Berlin

Hamburg, den 21.12.2017

Az.: HH 229.0/16

Berichtsstatus

Rev.	Datum	aufgestellt	geprüft	Änderungen
00	21.12.2017	gez. hv/at	gez. pb	-

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1 Veranlassung	6
2 Unterlagen, Normen und Regelwerke	7
3 Bauvorhaben	9
3.1 Allgemeines	9
3.2 Bestandsbauwerk	9
3.3 Brückenneubau.....	10
3.4 Geplante Anleger an den Ufern der Borgstedter Enge	11
4 Geotechnischer Untersuchungsbericht	11
4.1 Untersuchungsgebiet	11
4.1.1 Topographie, Morphologie, Bewuchs	11
4.1.2 Geologische Situation	12
4.1.3 Hydrogeologische Situation	13
4.1.4 Altlasten und Altlastenverdachtsflächen.....	14
4.1.5 Schutzgebiete.....	14
4.2 Baugrundaufschlüsse	14
4.3 Baugrundbeschreibung	15
4.3.1 Nördliches Widerlager (Achse 10).....	15
4.3.2 Nördliches Vorland (Achse 20).....	16
4.3.3 Nördliches Vorland (Achse 30).....	17
4.3.4 Bauzeitlicher Anleger am Nordufer der Borgstedter Enge.....	17
4.3.5 Borgstedter Enge (Achse 40).....	18
4.3.6 Borgstedter Enge (Achse 50).....	18
4.3.7 Borgstedter Enge (Achse 60).....	19
4.3.8 Bauzeitlicher Anleger am Südufer der Borgstedter Enge	20
4.3.9 Rader Insel (Achsen 70 bis 120)	21
4.3.10 Rader Insel (Böschungskrone Einschnitt)	21
4.3.11 Kanalpfeiler, Erkundung der Senkkästen (Achsen 130 und 140).....	21

4.3.12	Kanalpfeiler (Achse 130)	22
4.3.13	Kanalpfeiler (Achse 140)	23
4.3.14	Südliches Vorland (Achsen 150 und 160).....	23
4.3.15	Südliches Widerlager (Achse 170).....	24
4.4	Grund- und Schichtwasser	24
4.5	Bodenmechanische Laborversuche und weitere Versuche	25
4.5.1	Wassergehalte und Glühverluste.....	25
4.5.2	Kornverteilungen	26
4.5.3	Konsistenzgrenzen.....	28
4.5.4	Einaxiale Druckversuche.....	28
4.5.5	Direkte Scherversuche	31
4.5.6	Kompressionsversuche.....	33
4.5.7	Flügelscherversuche.....	35
4.5.8	Betondruckfestigkeit an Betonkernen der Senkkästen	36
4.5.9	Dissipationstests	36
4.6	Chemische Analysen des Bodens.....	38
4.6.1	Allgemeines.....	38
4.6.2	Untersuchungsergebnisse	38
4.7	Wasseranalytik.....	41
4.8	Asphalt, PAK-Analytik	42
5	Auswertung und Bewertung der geotechnischen Untersuchungsergebnisse.....	43
5.1	Charakteristische Bodenkenngrößen für geotechnische Berechnungen.....	43
5.2	Charakteristische Grund- und Schichtwasserstände	44
5.3	Bodenklassifizierung und Homogenbereiche	45

Anlagenverzeichnis

- Anlage 1 Übersichtslageplan

- Anlage 2 Lageplan der Untergrundaufschlüsse
- Anlage 2.1 Lageplan der Untergrundaufschlüsse, km 0+890 bis km 1+820
- Anlage 2.2 Lageplan der Untergrundaufschlüsse, km 1+840 bis km 2+450
- Anlage 2.3 Koordinatentabelle der Untergrundaufschlüsse

- Anlage 3 Ergebnisse der Untergrundaufschlüsse
- Anlage 3.1 Ergebnisse der Untergrundaufschlüsse, Widerlager-Nord und Achse 10
- Anlage 3.2 Ergebnisse der Untergrundaufschlüsse, Achse 20
- Anlage 3.3 Ergebnisse der Untergrundaufschlüsse, Achse 30
- Anlage 3.4 Ergebnisse der Untergrundaufschlüsse, bauzeitlicher Anleger Nord
- Anlage 3.5 Ergebnisse der Untergrundaufschlüsse, Achse 40
- Anlage 3.6 Ergebnisse der Untergrundaufschlüsse, Achse 50
- Anlage 3.7 Ergebnisse der Untergrundaufschlüsse, Achse 60
- Anlage 3.8 Ergebnisse der Untergrundaufschlüsse, bauzeitlicher Anleger Süd
- Anlage 3.9 Ergebnisse der Untergrundaufschlüsse, Achse 70
- Anlage 3.10 Ergebnisse der Untergrundaufschlüsse, Achse 80
- Anlage 3.11 Ergebnisse der Untergrundaufschlüsse, Achse 90
- Anlage 3.12 Ergebnisse der Untergrundaufschlüsse, Achse 100
- Anlage 3.13 Ergebnisse der Untergrundaufschlüsse, Achse 110
- Anlage 3.14 Ergebnisse der Untergrundaufschlüsse, Achse 120
- Anlage 3.15 Ergebnisse der Untergrundaufschlüsse, Rader Insel, Böschungskrone Einschnitt
- Anlage 3.16 Ergebnisse der Untergrundaufschlüsse, Achse 130 West
- Anlage 3.17 Ergebnisse der Untergrundaufschlüsse, Achse 130 Ost
- Anlage 3.18 Ergebnisse der Untergrundaufschlüsse, Achse 140 West
- Anlage 3.19 Ergebnisse der Untergrundaufschlüsse, Achse 140 Ost
- Anlage 3.20 Ergebnisse der Untergrundaufschlüsse, Achse 150
- Anlage 3.21 Ergebnisse der Untergrundaufschlüsse, Achse 160
- Anlage 3.22 Ergebnisse der Untergrundaufschlüsse, Widerlager-Süd, West, Achse 170
- Anlage 3.23 Ergebnisse der Untergrundaufschlüsse, Widerlager-Süd, Ost, Achse 170

- Anlage 4 Ergebnisse der bodenmechanischen Versuche
- Anlage 4.1 Kornverteilungen
- Anlage 4.2 Konsistenzgrenzenermittlungen

- Anlage 4.3 Kompressionsversuche
- Anlage 4.4 Direkte Scherversuche
- Anlage 4.5 Einaxiale Druckversuche
- Anlage 4.6 Flügelscherversuche Laborflügelsonde
- Anlage 4.7 Dissipationstests

- Anlage 5 Ergebnisse der chemischen Analytik
 - Anlage 5.1 LAGA Analytik, Boden
 - Anlage 5.2 Chemische-Analytik Mudde (Sulfat, Sulfid, PH-Wert)
 - Anlage 5.3 PAK-Analytik, Asphalt
 - Anlage 5.4 Wasseranalytik, Beton- u. Stahlangriff sowie Einleitparameter

- Anlage 6 Betondruckfestigkeit an Betonkernen der Senkkästen

- Anlage 7 Ganglinien der Grundwasserpegel

- Anlage 8 Kennzeichnende Bodeneigenschaften der Schichten

1 Veranlassung

Die Rader Hochbrücke überführt seit 1972 die vierstreifige Bundesautobahn A7 ca. 5 km östlich der Kreisstadt Rendsburg auf einer Länge von knapp 1.500 m über die Bundeswasserstraße Nord-Ostsee-Kanal (NOK) sowie die Borgstedter Enge. Bei Überprüfungen im Jahr 2013 wurden durch den Landesbetrieb Straßenbau und Verkehr Schleswig-Holstein gravierende Mängel an den Pfeilerköpfen festgestellt und die erforderlichen Instandsetzungsarbeiten eingeleitet.

Das Ministerium für Wirtschaft, Arbeit, Verkehr und Technologie (MWAVT) Schleswig-Holstein hat die DEGES Deutsche Einheit Fernstraßenplanungs- und -bau GmbH mit der Planung und Baudurchführung für den Ersatzneubau der Rader Hochbrücke beauftragt.

Die Baumaßnahme erstreckt sich von Norden nach Süden zwischen der Anschlussstelle AS Rendsburg/Büdelndorf und dem Autobahnkreuz AK Rendsburg. Für den zunächst vorgesehenen vierstreifigen Ersatzneubau waren der Bauanfang im Norden bei ca. km 58,6 unmittelbar südöstlich der bestehenden Straßenunterführung des Wirtschaftsweges (BW 606) und das Bauende kurz hinter der Straßenunterführung des Rader Wegs bei ca. km 61,9 vorgesehen. Die Baumaßnahme umfasst dabei:

- den Streckenbau für das Dammbauwerk Nord (Teilabschnittslänge ca. 900 m),
- den Streckenbau für das Dammbauwerk Süd (Teilabschnittslänge ca. 840 m),
- das Ingenieurbauwerk Rader Hochbrücke (BW 603) mit einer lichten Weite von ca. 1.500 m,
- das Ingenieurbauwerk Straßenunterführung der L 42 (BW 604) mit einer lichten Weite von ca. 20 m,
- Lärm- und Windschutzwände auf der Rader Hochbrücke sowie auf den Dammbauwerken.

Südlich des NOK, unmittelbar westlich der A7 zwischen Rader Weg und dem Weg „Trajektfähre“ befindet sich ein im Zuge der Verbreiterung des NOK entstandenes Spülfeld. Es ist vorgesehen, die Böden aus dem Spülfeld „Trajektfähre“ bei entsprechender bau- und umwelttechnischer Eignung für die geplanten Erdbaumaßnahmen zu verwenden.

Kempfert + Partner Geotechnik wurde von der DEGES, Deutsche Einheit Fernstraßenplanungs- und -bau GmbH, beauftragt, den Aufbau, die Beschaffenheit und die Eigenschaften des Baugrunds sowie die Grundwasserverhältnisse in den Planungsbereichen sowie im Bereich des Spülfeldes „Trajektfähre“ zu erkunden und zu untersuchen, den Baugrund vergleichend zu bewerten und Empfehlungen für die Gründung der geplanten baulichen Anlagen auszuarbeiten.

Zwischenzeitlich wurde der sechstreifige Ausbau für den Ersatzneubau der Rader Hochbrücke beschlossen und der Planungsbereich bis zur Anschlussstelle AS Rendsburg/Büdelndorf im Norden und bis zum Autobahnkreuz AK Rendsburg im Süden erweitert. Die Erweiterung des Planungsbereiches wird mit einer zusätzlichen Geotechnischen Untersuchung bewertet und ist nicht Gegenstand des vorliegenden Geotechnischen Berichts.

Der vorliegende Geotechnische Bericht (Band 1) beinhaltet die Ergebnisse der geotechnischen Untersuchungen und die Festlegung der charakteristischen Werte für das Brückenbauwerk BW 603. Die Empfehlungen für die Gründung des Brückenbauwerks sind in dem Geotechnischen Bericht (Band 2) zusammengestellt.

Zu den Dammbauwerken Nord und Süd, dem Bauwerk BW 604 (Straßenunterführung L42) sowie den auf den Dämmen zu gründenden Lärm- und Windschutzwänden liegen separate Geotechnische Berichte vor.

2 Unterlagen, Normen und Regelwerke

Für den Geotechnischen Bericht wurden folgende Unterlagen verwendet:

- U1 Schüßler-Plan Ingenieurgesellschaft mbH, Berlin, A7 Ersatzneubau Rader Hochbrücke, Bestandsbauwerk Übersicht (Längsschnitt und Querschnitt mit Gründungstiefen und Hilfsstützen), Februar 2017
- U2 Dr.-Ing. PAPROTH & Co. KG., Winsen a. d. Luhe, Schalpläne Senkkasten Kanalpfeiler 3, Juli 1969
- U3 Philipp Holzmann AG, Frankfurt am Main, Schalpläne Senkkasten Kanalpfeiler 4, Mai 1969
- U4 Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Kiel-Holtenau, Kiel, Sicherung gegen Schiffsstoß, Gesamtansicht und Längsschnitte der Pfeilerachsen P3 und P4 mit Senkkästen, Juni 1989
- U5 Plan ohne Angabe eines Verfassers: A7 Ersatzneubau Rader Hochbrücke, Längssystem, Variante: Kanalfeld mit 224 m Stützweite, Vorzugsvariante II, Längsschnitt und Draufsicht, Maßstab 1:2.000, 15.07.2016
- U6 Schüßler-Plan Ingenieurgesellschaft mbH, Berlin, A7 Ersatzneubau Rader Hochbrücke, Höhenplan Gradienten Achse 102, Vorentwurf, November 2017
- U7 Grassl Beratende Ingenieure im Bauwesen, Hamburg, BAB A7 Ersatzneubau Rader Hochbrücke, Machbarkeitsstudie zur Variantenfindung, Ansichten: Bestand sowie Variante 1 bis 3, Stand 06.08.2015
- U8 Plan ohne Angabe eines Verfassers: Darstellung des Regelquerschnitts und des Voutenquerschnitts der geplanten Rader Hochbrücke „Querschnitt mit Kastenaufweitung nach unten“, Variante 2.1, Maßstab 1:100, ohne Datum
- U9 DEGES GmbH, Berlin, Bauwerksbuch des Teilbauwerks Nr. 1624504 0, Straße A7, IBwNr. 1624604, A 7 / NOK (Hochbrücke "Rader Insel", BW 603), 26.02.2015
- U10 Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein (LKN.SH), Kiel, Anlage 021158/11, Grundwasserpegelraten aus dem Umfeld der Rader Hochbrücke (Borgstedt, Grellkamp Nord, Schacht-Audorf), Messzeitraum ca. 2002 bis 2015, ohne Datum
- U11 DEGES GmbH, Berlin, Email vom 19.06.2017, Betreff: A7, Ersatzbauwerk Rader Hochbrücke, Anforderungen an den Geotechnischen Bericht und Angaben zum geplanten Bauwerk (Abmessungen)

- U12 Grundbauingenieure Steinfeld und Partner GbR, Hamburg, BAB A7 Ersatzneubau Rader Hochbrücke, 1. Bericht, Grundlagenermittlung, Stellungnahmen und Unterlagen, 02.10.2015
- U13 Grundbauingenieure Steinfeld und Partner GbR, Hamburg, BAB A7 Ersatzneubau Rader Hochbrücke, 2. Bericht, Bestandsanalyse Baugrund und Ergebnisse der Drucksondierungen im Bereich der Widerlager, 22.01.2016
- U14 Grundbauingenieure Steinfeld und Partner GbR, Hamburg, BAB A7 Ersatzneubau Rader Hochbrücke, 3. Bericht / Revision 1, Bauteilbezogenes geotechnisches Erkundungskonzept, 13.05.2016
- U15 Grundbauingenieure Steinfeld und Partner GbR, Hamburg, BAB A7 Ersatzneubau Rader Hochbrücke, 4. Bericht, Ergebnisse der Drucksondierungen im Bereich der geplanten Pfeilerpositionen (Variante I, Stützenstellung 224), 16.06.2016
- U16 Grundbauingenieure Steinfeld und Partner GbR, Hamburg, BAB A7 Rader Hochbrücke, Geotechnische Stellungnahme, Setzungsprognose für die nächsten 30 Jahre, 06.03.1995
- U17 Erdbaulaboratorium Dr.-Ing. Karl Steinfeld, Hamburg, Bundesautobahn Hamburg-Flensburg, Hochbrücke Rader Insel über den NO-Kanal, Baugrundgutachten, 05.09.1966
- U18 Erdbaulaboratorium Dr.-Ing. Karl Steinfeld, Hamburg, Bauvorhaben Hochbrücke Rensburg-Rade, Steckenabschnitt 6 – Kanalüberquerung, Ergänzung zur Gründungsbeurteilung vom 05.09.1966, Ergänzungsbericht, 14.11.1966
- U19 Geologisches Landesamt Schleswig-Holstein, Kiel, Schichtenverzeichnisse und Profile vom 1. Ausbau des Nord-Ostsee-Kanals, 1889 bis 1975
- U20 Geologisches Landesamt Schleswig-Holstein, Kiel, Geologische Karte von Schleswig Holstein, Blatt 1624 Rendsburg, Maßstab 1:25.000, aus dem Jahr 1984
- U21 Geologisches Landesamt Schleswig-Holstein, Kiel, Hydrogeologische Übersichtskarte von Schleswig Holstein, Maßstab 1:200.000, aus dem Jahr 1986
- U22 Schreiben vom Kreis Rendsburg-Eckernförde, Fachdienst Umwelt, Untere Bodenschutzbehörde mit Angaben zum Auftreten von Altlasten im Planungsgebiet der Rader Hochbrücke, 09.09.2015
- U23 Email vom Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein, Abteilung Geologie und Boden an Grundbauingenieure Steinfeld und Partner GbR, Hamburg, Betreff: Rohstoffsicherungsflächen sowie weitere Schutzgebiete im Planungsgebiet der Rader Hochbrücke, 29.07.2015

Im vorliegenden Bericht wird auf fachtechnische Normen und Regelwerke verwiesen. Bei allen nachfolgenden undatierten Verweisen auf Normen und Regelwerke gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen). Bei allen nachfolgenden datierten Verweisen auf Normen und Regelwerke gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe.

3 Bauvorhaben

3.1 Allgemeines

Die Rader Hochbrücke wurde im Zuge des Baus der Bundesautobahn A7 in den Jahren 1969 bis 1972 errichtet und überführt mit vier Fahrstreifen und zwei Standstreifen die Bundesautobahn A7 ca. 5 km östlich der Kreisstadt Rendsburg über die Bundeswasserstraße Nord-Ostsee-Kanal (NOK) sowie die Borgstedter Enge.

In einem Abstand von ca. 2,5 km nördlich der Kanalmitte befindet sich die Anschlussstelle (AS) Rendsburg/Büdelndorf, und in einem Abstand von ca. 3,3 km südlich der Kanalmitte liegt das Autobahnkreuz (AK) Rendsburg.

Nördlich und südlich der Brücke schließen sich die Anrampungen „Dammbauwerk Nord“ und „Dammbauwerk Süd“ an. Am Anschluss an die Brücke betragen die Höhen der Dammbauwerke ca. 19 m (Dammbauwerk Nord) bzw. ca. 30 m (Dammbauwerk Süd) über dem Gelände.

Aufgrund von Schäden an den Pfeilerköpfen und der Konstruktion des Brückenbauwerks, die seit dem Jahr 2013 festgestellt wurden, bestehen derzeit Nutzungseinschränkungen hinsichtlich der Belastung der Brücke und der Fahrgeschwindigkeit von Fahrzeugen auf der Brücke. Es ist daher ein Ersatzneubau des Brückenbauwerks mit einem Fertigstellungstermin im Jahr 2026 geplant.

Nachdem für den Ersatzneubau zunächst ein vierstreifiger Ausbau vorgesehen war, wurde im September 2017 unter Berücksichtigung aktueller Prognosen zukünftiger Straßenverkehrsbelastungen entschieden, den Ersatzneubau sechsstreifig auszuführen. Der sechsstreifige Ausbau soll in Richtung Norden bis zur AS Rendsburg/Büdelndorf und in Richtung Süden bis zum AK Rendsburg erfolgen.

Das gesamte Bauvorhaben umfasst damit neben dem Ersatzneubau des Brückenbauwerks auch die mit der geänderten Trassierung verbundenen Dammverbreiterungen der beiden Anrampungen in Richtung Osten, den sechsstreifigen Ausbau bis an die vorgenannten Anschlusspunkte sowie die Anpassung bzw. den Neubau mehrere Ingenieurbauwerke zur Unterführung und Überführung von Straßen im überplanten Trassenabschnitt der Bundesautobahn A7. Die Ergebnisse der Baugrunduntersuchung und die darauf aufbauenden Empfehlungen zur Gründung der genannten weiteren Teilbaumaßnahmen werden in separaten Geotechnischen Berichten zusammengestellt.

3.2 Bestandsbauwerk

Beim Bestandsbauwerk handelt es sich um eine 15-feldrige Plattenbalkenbrücke mit unterschiedlichen Stützweiten zwischen den Pfeilern. Die Brücke ist insgesamt 1.498 m lang und erreicht eine Höhe von bis zu 49 m über dem Gelände. Die lichte Durchfahrtshöhe für Schiffe beträgt 42 m. Die Längsneigung auf der Brücke beträgt zu beiden Seiten 2,67 %.

Die Stützweite zwischen den Kanalpfeilern beträgt 221,54 m gem. Unterlage U1 und in den beidseits angrenzenden Feldern jeweils 111,73 m. Im südlichen und nördlichen Vorland sowie auf der Rader Insel betragen die Stützweiten zwischen 75,5 m und 84,0 m. Die Borgstedter Enge wird durch drei Felder mit jeweils 104,0 m Stützweite überspannt.

Der Überbau ist als Durchlaufträger mit einer Konstruktionshöhe von 5,0 m ausgebildet. An den Pfeilern des Kanalfeldes ist der Durchlaufträger voutenartig mit einer maximalen Konstruktionshöhe

von 9,5 m ausgebildet. Die Fahrbahnplatte ist als Stahlplatte mit aussteifenden Stahlträgern in längs- und Querrichtung (sog. ortotrophe Fahrbahnplatte) ausgebildet und weist eine Breite von 29,5 m auf.

Die Lasten der Brücke werden über insgesamt 14 Pfeilerpaare abgetragen. Die Pfeiler sind als Stahlbetonhohlkästen ausgebildet und weisen Wandstärken von ca. 40 cm (Normalpfeiler) bzw. ca. 60 cm (Kanalpfeiler) auf. Informationen zu den genauen Abmessungen der Pfeiler sowie der Pfeilerfundamente liegen uns nicht vor.

Nach den vorliegenden Informationen (Unterlagen U1 und U8) erfolgte die Gründung der auf dem südlichen und nördlichen Vorland sowie auf der Rader Insel positionierten Pfeilerpaare als Flachgründung.

Die drei in der Borgstedter Enge angeordneten Pfeilerpaare wurden nach den vorliegenden Informationen auf Stahlrohrrammpfählen mit 91 cm Durchmesser und im Fußbereich angeschweißten Stahlflügeln gegründet.

Die Gründung der Kanalpfeiler erfolgte auf einem gemeinsamen Caisson (Senkkasten) je Pfeilerpaar. Die Caissons weisen Abmessungen im Grundriss von 24,3 m x 19,3 m und eine Bauhöhe von 18,5 m auf. Die Caissons sind unterteilt in 12 Kammern mit 70 cm dicken Kammerwänden; die Außenwände sind 1,0 m dick. Die Gründungsebene der Caissons liegt planmäßig auf einem Niveau von -21,0 mNN. Die Bodenüberdeckung oberhalb der Caissons beträgt rd. 4,0 m.

Für die Montage des Brückenüberbaus im Freivorbau-Verfahren wurden nach den vorliegenden Informationen Hilfsstützen verwendet, die in der Borgstedter Enge auf Stahlflügelpfählen tief gegründet wurden. Nach Unterlage U1 wurden die Hilfsstützen in der Borgstedter Enge in den Feldern mittig, d.h. mit einem Achsabstand zu den Pfeilerpaaren von 52 m, angeordnet. Es wird davon ausgegangen, dass diese Pfähle nach Beendigung der Baumaßnahme im Untergrund verblieben sind.

3.3 Brückenneubau

Für den Ersatzneubau ist die Errichtung einer gegenüber der Bestandsbrücke geringfügig nach Osten verschobenen sechsstreifigen Zwillingenbrücke mit einem dreistreifigen Überbau je Richtungsfahrbahn vorgesehen. Als Regelquerschnitt ist ein „RQ 36B“ geplant, der gem. Unterlage U7 eine Gesamtbreite der Fahrbahn von 37,1 m vorsieht.

Geplant ist, zunächst die östliche Brückenhälfte herzustellen. Nach Fertigstellung der östlichen Brückenhälfte soll der Verkehr hierauf umgeleitet werden und anschließend die Bestandsbrücke rückgebaut werden. Anschließend soll in der Lage der abgebrochenen Bestandsbrücke die westliche Brückenhälfte errichtet werden.

Die beiden Brückenhälften sollen unabhängig voneinander auf Einzelpfeilern gegründet werden. Hierbei wird unter der Voraussetzung einer mittigen Anordnung der Pfeiler unter den Brückenhälften zunächst (Planunterlagen liegen noch nicht vor) von einem Achsabstand der Pfeilerpaare von etwa 18 m bis 20 m ausgegangen (bei der zuvor geplanten 4-streifigen Variante war zunächst ein Achsabstand der Pfeilerpaare von etwa 16 m bis 17 m vorgesehen).

Die neue Brücke ist als 16-feldriges Bauwerk mit einer Länge von 1.500 m geplant.

Der Abstand der Achsen bzw. die Stützweite der Kanalpfeiler ist gem. Unterlage U4 mit 224 m geplant („Stützenstellung 224“). In den beiden nördlich und südlich angrenzenden Feldern ist eine Stützweite von 124 m vorgesehen. Auf der Rader Insel, dem südlichen und nördlichen Vorland sowie in der Borgstedter Enge sind Stützweiten zwischen 80 m und 88 m geplant. In den beiden Randfeldern an den Widerlagern ist eine Stützweite von jeweils 64 m vorgesehen.

Aufgrund der vorgesehenen Pfeilerstandorte ergibt sich eine gegenüber den Pfeilerstandorten der Bestandsbrücke versetzte Anordnung, siehe auch Anlage 2.1 und Anlage 2.2.

Es wird auf Grundlage der Angaben in Unterlage U10 von Fundamentabmessungen für die flach zu gründenden Pfeiler wie auch für die Pfahlkopfplatten tief zu gründender Pfeiler von etwa $a \times b = 14 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ bis $a \times b = 14 \text{ m} \times 12 \text{ m}$ ausgegangen. Für die Widerlager werden in Unterlage U10 Abmessungen von $a \times b = 30 \text{ m} \times 8 \text{ m}$ genannt.

Planunterlagen mit genauerer Darstellung von Bauteilabmessungen für den Brückenneubau liegen derzeit noch nicht vor.

3.4 Geplante Anleger an den Ufern der Borgstedter Enge

Für die bauzeitliche Logistik in Verbindung mit der Herstellung des neuen Brückenbauwerks in der Borgstedter Enge sowie auf der Rader Insel ist vorgesehen, am nördlichen Ufer der Borgstedter Enge einen Anleger herzustellen bzw. auf der Rader Insel den dort bereits vorhandenen Anleger in Spundwandbauweise zu erweitern und ggf. zu ertüchtigen.

Die vorgesehene Lage kann dem Lageplan der Anlage 2.1 entnommen werden. Weitere Planungsunterlagen liegen uns derzeit nicht vor. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass eine Ufersicherung in Spundwandbauweise vorgesehen ist, die in Abhängigkeit des zu sichernden Geländesprungs sowie der geotechnischen Randbedingungen voraussichtlich eine horizontale Stützung durch eine Rückverankerung benötigen wird.

4 Geotechnischer Untersuchungsbericht

4.1 Untersuchungsgebiet

4.1.1 Topographie, Morphologie, Bewuchs

Das Untersuchungsgebiet liegt in Schleswig-Holstein im Landkreis Rendsburg-Eckernförde, ca. 5 km nordöstlich von Rendsburg an der Bundeswasserstraße Nord-Ostsee-Kanal, siehe Anlage 1.

Die Morphologie des Untersuchungsgebietes ist maßgeblich geprägt durch die Weichsel-Kaltzeit, siehe auch Abschnitt 4.1.2. Die Topographie des Geländes sowie weitere Details entlang des geplanten Brückenbauwerks stellen sich von Norden nach Süden betrachtet wie folgt dar.

Ab Bauwerksbeginn, im Bereich des nördlichen Widerlagers der Brücke, fällt das beidseits des Böschungskegels des Dammbauwerks vorhandene Gelände des nördlichen Vorlands, welches ein Niveau von etwa +10 mNN aufweist, zum Ufer der Borgstedter Enge hin ab. Die Böschungsneigung

des Böschungskegels in der Brückenachse beträgt ca. 1:2. Im Bereich des sich an den Böschungskegel anschließenden nördlichen Vorlands beträgt das Geländeniveau in der Brückenachse etwa +3 mNN bis +5 mNN.

Die Wassertiefe in der Borgstedter Enge beträgt maximal etwa 3 m bis 4 m (Sohnniveau ca. -3 mNN bis -4 mNN, z. T. auch flacher). Der Wasserstand in der Borgstedter Enge ist gekoppelt an den Wasserstand im NOK und beträgt relativ konstant etwa 10 cm bis 20 cm unter Normal-Null (NN).

Am südlichen Ufer der Borgstedter Enge auf der Rader Insel befindet sich ein Anleger in Spundwandbauweise, dessen landseitige Rangierfläche mit Asphalt befestigt ist, siehe auch Abschnitt 3.4.

Auf der Rader Insel wurde im Zuge des Baus der Rader Hochbrücke Anfang der 1970er Jahre ein Einschnitt in das ursprünglich hügelige Gelände vorgenommen, um die Herstellung der Pfeiler und deren Gründung zu vereinfachen bzw. diese von einem einheitlichen Niveau aus ausführen zu können. Das Sohlniveau des Einschnitts beträgt überwiegend etwa +2,5 mNN. Das umliegende natürliche Gelände weist Geländehöhen von bis zu ca. +16 mNN auf. Zur Neigung der beidseitigen Einschnittsböschungen liegen uns keine Unterlagen vor; es dürfte sich jedoch augenscheinlich um eine Böschungsneigung von etwa 1:2 handeln.

Die Breite des NOK im Bereich der Brücke beträgt von Ufer zu Ufer ca. 190 m. Die Kanalböschungen sind planmäßig mit 1:3 geneigt und mit Deckwerksteinen gesichert. Das Sohlniveau liegt gemäß Unterlage U6 bei -11,2 mNN, woraus sich unter Berücksichtigung des o. g. Wasserstandes eine Wassertiefe von 11 m ergibt. Das Geländeniveau an den Kanalpfeilern beträgt etwa +1,6 mNN

Vom südlichen Kanalpfeiler aus in Richtung Süden schließt sich eine Böschung bis auf ein Geländeniveau von etwa +13 mNN an. Das südliche Vorland weist ein Geländeniveau von etwa +13 mNN bis +17 mNN auf.

Die Böschungsneigung des Böschungskegels des südlichen Widerlagers in der Brückenachse beträgt ca. 1:2. Das Geländeniveau an den Böschungsfüßen des Rampendamms am südlichen Widerlager beträgt etwa +14,5 mNN bis +16 mNN.

Die umliegenden Flächen des Untersuchungsgebietes sind größtenteils von Landwirtschaft und den Spülflächen am NOK geprägt. In dieser Kulturlandschaft sind in der für Schleswig Holstein typischen Weise die Acker- und Grünflächen durch sogenannte „Knicks“ (Wallhecken) begrenzt. Die Knicks bieten Rückzugsflächen für die einheimische Fauna. Natürlicherweise herrschen in der Jungmoränenlandschaft Buchenwälder bzw. auf trockenen Standorten Eichen-Buchenwälder vor sowie an feuchten Standorten Eschen- und Erlenwälder. Diese sind im Untersuchungsbereich nur vereinzelt anzutreffen. Auf vielen Brach- / Ruderalflächen haben sich kleine Pionierwälder und Trockenrasen entwickelt.

4.1.2 Geologische Situation

Die Morphologie des Untersuchungsgebietes ist geprägt durch die Weichsel-Kaltzeit. Die Rader Hochbrücke befindet sich hierbei im Bereich der ehemaligen Gletscherrandlage, d.h. der Endmoräne aus dem Brandenburg-Stadium (ca. 22.000 bis 24.000 Jahre AD), welches in der Weichsel-Kaltzeit den weitesten Vorstoß der Endmoräne nach Süden darstellt. Die Endmoräne stellt gleichzeitig den Übergang des östlichen Hügellands (Jungmoränenlandschaft) zur Vorgeest (Altmoränenlandschaft)

dar. Die Borgstedter Enge resultiert aus dem ursprünglichen Verlauf der Obereider und stellt jetzt einen Seitenarm des NOK dar.

Der quartäre Untergrund im Bereich der Rader Hochbrücke stellt sich als heterogener Schichtkomplex dar, der sich aus Schmelzwassersanden, Sanden und Kiesen der Moräne, Geschiebeböden, Beckenablagerungen, Mudden sowie Torf zusammensetzt.

Die quartären Schichten werden gem. Unterlage U21 (hydrogeologische Übersichtskarte) in größeren Tiefen, die mit den im Rahmen des vorliegenden Berichts durchgeführten Untersuchungen nicht aufgeschlossen wurden, unterlagert durch miozäne Braunkohlensande des Jungtertiärs.

4.1.3 Hydrogeologische Situation

Im Bereich der Rader Hochbrücke stehen im oberflächennahen Untergrund überwiegend Sande und pleistozäne Geschiebeböden an. Bereichsweise werden die pleistozänen Sande von pleistozänen Beckenschluffen und Beckentonen unterlagert.

Die pleistozänen Sande bilden generell einen ausgedehnten zusammenhängenden Porengrundwasserleiter, der jedoch örtlich auch durch die vergleichsweise gering durchlässigen Geschiebeböden und Beckenablagerungen eine zergliederte Ausprägung aufweist.

Die Grundwasseroberfläche kann sich in Bereichen, in denen die sandigen Böden ab der Geländeoberfläche anstehen, frei ausbilden, während in Bereichen mit gering durchlässigen Beckenschluffen, Beckentonen und Geschiebeböden (Grundwassergeringleiter) das Grundwasser an der Unterkante dieser Schichten i. d. Regel gespannt ansteht.

Auf den z. T. oberflächennah anstehenden bindigen Böden kann sich witterungs- und niederschlagsbedingt Stau- bzw. Schichtwasser ausbilden, welches je nach den lokalen hydrogeologischen Gegebenheiten vertikal in die grundwasserleitenden Sande versickert oder auch entsprechend dem Gefälle der Schichtoberfläche lateral abfließt.

Für das Stauwasser, Schichtwasser und Grundwasser aus dem Bereich der Widerlager und der Vorländer sowie der Rader Insel bilden die beiden offenen Gewässer Borgstedter Enge und NOK die natürliche Vorflut. In diesem Zusammenhang ist es plausibel, dass - aufgrund großräumig gegenüber dem Wasserstand im NOK deutlich erhöhten Grundwasserständen - in dem das Planungsgebiet unterlagernden Porengrundwasserleiter artesisch gespannte Verhältnissen gemessen wurden, s. Abschnitt 4.5.9.

Gemäß der hydrogeologischen Übersichtskarte (Unterlage U21) werden die im Rahmen der durchgeführten Baugrundaufschlüsse aufgeschlossenen Bodenschichten in größeren Tiefen unterlagert durch grundwasserführende miozäne Braunkohlensande des Jungtertiär.

Die Trasse befindet sich gem. Unterlage U12 außerhalb von Grundwasserschutz- und Trinkwassergewinnungsgebieten.

4.1.4 Altlasten und Altlastenverdachtsflächen

Im Untersuchungsbereich sind gem. Unterlage U22 keine Altlasten und Altlastenverdachtsflächen bekannt.

4.1.5 Schutzgebiete

Nach der Karte der Schutzgebiete des Bundesamtes für Naturschutz (Unterlage U23) grenzt das Dammbauwerk Nord unmittelbar an den Naturpark Hüttener Berge.

4.2 Baugrundaufschlüsse

Der Baugrundaufbau wurde im Bereich des Brückenbauwerks BW 603 zwischen Februar und Juli 2017 mit 40 Bohrungen und 42 Spitzendrucksondierungen sowie 4 schweren Rammsondierungen erkundet.

Die Aufschlüsse wurden von der Firma Keller Grundbau GmbH, Hannover, mit Unterstützung durch die Firmen Knut Rösch Baugrunduntersuchungen GmbH, Norderstedt, sowie der Ivers Brunnenbau GmbH, Osterrönfeld, ausgeführt und zusätzlich durch unser Büro begleitet und überwacht.

Die Bohrungen wurden bis in eine Tiefe zwischen 16 m u. GOK und 45 m u. GOK bzw. Gewässer-sole, entsprechend maximal –50,0 mNN (B58) ausgeführt. Die Drucksondierungen wurden generell bis zur Auslastung des Geräts ausgeführt, wobei Tiefen von max. –51,0 mNN (DS43) erreicht wurden.

Zur Entnahme von Wasserproben aus dem Grundwasserhorizont und zur langfristigen Aufzeichnung der Wasserstände mithilfe von Datenloggern wurden vier Bohrungen (GWM01 bis GWM04) zu Grundwassermessstellen ausgebaut.

Weiterhin liegen Altaufschlüsse aus den Jahren 1967, 2015 und 2016 vor. Dabei handelt es sich um Altbohrungen aus den 60er Jahren des vergangenen Jahrhunderts sowie um Drucksondierungen aus den Jahren 2015 und 2016, siehe auch Unterlagen U13, U15 und U17.

Im Rahmen der Aufschlussarbeiten wurden auch die Senkkästen der Bestandspfeiler Achse P3 (geplante Achse 140, südlich des NOK) und P4 (geplante Achse 130, nördlich des NOK) durch Baugrundbohrungen, Kernbohrungen, schwere Rammsondierungen und Drucksondierungen erkundet. Hierzu wurden zunächst ab der Geländeoberkante bis zur Oberkante der Senkkastendecke Bohrungen abgeteuft und nachlaufend mit Kernbohrungen die Senkkastendecken durchörtert. Im Anschluss wurden innerhalb der Senkkästen mit schweren Rammsondierungen die Lagerungsdichte der Senkkastenfüllungen (Sande und Kiese) erkundet und hinterher Bohrungen zur Probengewinnung der Senkkastenfüllungen abgeteuft. Anschließend wurden die Sohlen der Senkkästen mit jeweils einer zweiten Kernbohrung durchörtert und im letzten Schritt mit Drucksondierungen der gewachsene Boden unterhalb der Senkkästen bis zu einer maximalen Tiefe von ca. –33,2 mNN erkundet.

Zur Erkundung des Baugrunds der geplanten Pfeilerstandorte in der Borgstedter Enge (Achse 40 bis Achse 60) sowie des geplanten bauzeitlichen Anlegers Nord und des bauzeitlichen Anlegers Süd

(Kaianlage Fa. Schreiber) wurden Drucksondierungen und nachlaufend Wasserbohrungen in der Borgstedter Enge abgeteuft. Die Drucksonde sowie das Bohrgerät der Keller Grundbau GmbH wurden hierzu auf das Spezialschiff „Süderau“ der Fa. Schwalbe Baugesellschaft mbH & Co. KG, Preetz, geladen und fest montiert. Die „Süderau“ wurde beim Erreichen der Ziel- bzw. Sondierkoordinaten durch zwei Ankerpfähle am Bug und Heck des Schiffes fixiert und diente während der Drucksondierung als Gegengewicht. Die „Süderau“ besitzt eine mittige Rohrdurchführung (DN 500) durch welche das Sondier- / Bohrgestänge sowie die Schutzverrohrung geführt wurden.

Zur Messung der Grundwasserdruckhöhen im Grundwasserleiter in größeren Tiefen wurden an einigen in der Borgstedter Enge ausgeführten Drucksondierungen mehrere Dissipationstests nach DIN EN ISO 22476-1¹ ausgeführt, siehe auch Abschnitt 4.5.9.

Aufgrund der erreichten Endauslastung des Sondiergerätes bzw. der maximalen Auslenkung des Gestänges konnten die Drucksondierungen DS46, DS45a und DS42 nicht bis zur geplanten Endteufe von 40 m bzw. 45 m abgeteuft werden. Zur Erkundung der Lagerungsdichte des tieferen Untergrunds wurden in je einer Bohrung pro Pfeilerachse SPT-Tests (Standard Penetration Test) gemäß DIN EN ISO 22476-3² durchgeführt. Dabei wurde auf den letzten 15 Bohrmeter alle 3 m ein Test durchgeführt. Mithilfe der sich in der Höhe z. T. „überschneidenden“ Ergebnisse der Drucksondierungen und ausgeführten SPT können die Ergebnisse kalibriert und vergleichend bewertet werden.

Die Lage der Baugrundaufschlüsse kann den Anlagen 2.1 und 2.2 entnommen werden. Die Koordinaten der Bohransatzpunkte sind in der Anlage 2.3 zusammengestellt.

Die Ergebnisse der Aufschlüsse sind im Maßstab 1:100 höhengerecht in den Anlagen 3.1 bis 3.23 gemäß DIN 4023³ aufgetragen. Hierbei sind auch ausgewählte Altaufschlüsse mit dargestellt.

4.3 Baugrundbeschreibung

4.3.1 Nördliches Widerlager (Achse 10)

Die Ergebnisse der im Bereich des nördlichen Widerlagers ausgeführten Baugrundaufschlüsse sind in der Anlage 3.1 dargestellt.

Unterhalb der Oberflächenbefestigung der Autobahn oder der im Böschungsbereich vorhandenen Unterhaltungswege bzw. unterhalb des Mutterbodens im Bereich der Böschungen stehen die aufgefüllten Sande und schluffigen Sande des Dammbauwerkes an. Die Mächtigkeit dieser Auffüllungen entspricht etwa der Dammhöhe am jeweiligen Aufschlusspunkt. Kornanalytisch handelt es sich hauptsächlich um Fein- und Mittelsande, welche meist schwach schluffig und teilweise schwach grobsandig und schwach kiesig ausgeprägt sind. Vereinzelt wurden Horizonte mit erhöhten Schluffanteilen erkundet. Die Lagerungsdichte kann anhand der Ergebnisse der Drucksondierungen als überwiegend mitteldicht und dicht bezeichnet werden. Zum Teil wurden mit den Drucksondierungen auch lockere Lagerungsdichten der aufgefüllten Sande ($q_c \leq 7,5 \text{ MN/m}^2$) nachgewiesen. Weiterhin weisen die Rückgänge des Spitzenwiderstandes bei gleichzeitig ansteigendem Reibungsverhältnis R_f auf die vorbeschriebenen in die Auffüllung eingelagerten schluffigen Bänderungen hin.

¹ DIN EN ISO 22476-1: Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Felduntersuchungen – Teil 1: Drucksondierungen mit elektrischen Messwertaufnehmern und Messeinrichtungen für den Porenwasserdruck

² DIN EN ISO 22476-3: Geotechn. Erkundung und Unters. – Felduntersuchungen – Teil 3: Standard Penetration Test

³ DIN 4023: Baugrund- und Wasserbohrungen, zeichnerische Darstellung der Ergebnisse

Die Schichtgrenze zum gewachsenen Untergrund weist im Bereich des nördlichen Widerlagers große Höhenunterschiede auf, da die GOK bzw. die vor der Dammschüttung ehemals vorhandene GOK hier ein starkes Relief aufweist. Die Ergebnisse der direkten und indirekten Aufschlüsse weisen auf ein Niveau der Schichtgrenze zwischen etwa +5 mNN und +12 mNN hin.

Der gewachsene Untergrund besteht bis in größere Tiefen zunächst fast ausschließlich aus gewachsenen Sanden und Kiesen unterschiedlicher Körnung mit z. T. schluffigen Anteilen. Eine Ausnahme bildet ein mit einigen Aufschlüssen dicht unter der GOK bzw. im Bereich des Dammes unter der ehemaligen GOK nachgewiesener etwa 1 m bis 2 m mächtiger bindiger Horizont aus Geschiebelehm bzw. schluffigem Sand. Zudem wurden vereinzelt auch geringmächtige Schluffbänder innerhalb der Sande ($d < 0,3$ m) angetroffen. Die Lagerungsdichte der Sande wurde mit den Drucksondierungen als überwiegend mitteldicht bis dicht nachgewiesen. Dicht unterhalb der GOK bzw. ehemaligen GOK wurden auch lockere Lagerungsdichten nachgewiesen.

In größerer Tiefe wurden mit der Drucksondierung DS 49 ab einer Tiefe von etwa -15 mNN bis zur Endteufe bei etwa -23 mNN ein bindiger Horizont anhand der hier verzeichneten Rückgänge des Spitzendrucks bei gleichzeitig ansteigendem Reibungsverhältnis indirekt nachgewiesen. Innerhalb des bindigen Horizonts lassen sich wiederum mehrere sandige Bänderungen (hoher Spitzenwiderstand, niedriges Reibungsverhältnis) indirekt nachweisen. Auf Grundlage der Baugrundsituation im Umfeld wird davon ausgegangen, dass es sich bei dem bindigen Boden um Geschiebemergel mit sandigen Einschlüssen handelt.

4.3.2 Nördliches Vorland (Achse 20)

Die Ergebnisse der im Bereich des nördlichen Vorlandes (Achse 20) ausgeführten Baugrundaufschlüsse sind im Detail in der Anlage 3.2 dargestellt.

Demnach steht unterhalb des Mutterbodens zunächst bis in eine Tiefe von etwa 3 m bis 4 m unter GOK ein Horizont aus überwiegend locker gelagerten Fein-, Mittel- und Grobsanden sowie Schluffen und Geschiebelehm an. Die bindigen Böden weisen breiige, weiche und weich bis steife Konsistenzen auf.

Unterlagernd folgen bis zu einer Tiefe von etwa -15,0 mNN Fein-, Mittel- und Grobsande mit zum Teil schwach schluffigen und schwach kiesigen Anteilen. Die Sande weisen auf Grundlage der Ergebnisse der Drucksondierungen mitteldichte bis dichte Lagerungsdichten auf.

Im Hangenden wurde ein heterogener Horizont mit einer Wechsellagerung aus Geschiebemergel, Sanden und Kiesen bis zur Endteufe bei ca. -38 mNN erbohrt. Beim Geschiebemergel handelt es sich überwiegend um schwach tonige bis tonige, schluffige bis stark schluffige Sande mit schwachen Kiesanteilen. Vereinzelt dominiert gewichtsmäßig auch das Feinkorn, so dass es sich dann überwiegend um sandige und tonige Schluffe handelt. Der Geschiebemergel wurde mit überwiegend steifer und halbfester Konsistenz angesprochen. Für die Sande und Kiese, die zum Teil Steine enthalten und auch schluffige Anteile aufweisen, wurden dichte und sehr dichte Lagerungsdichten nachgewiesen. In den Sanden und Kiesen sowie auch im Geschiebemergel ist unter Berücksichtigung der geologischen Entstehung zudem das Vorkommen von Blöcken und Findlingen wahrscheinlich, auch wenn diese aufschlussbedingt nicht nachgewiesen wurden.

4.3.3 Nördliches Vorland (Achse 30)

Die Ergebnisse der im Bereich des nördlichen Vorlandes (Achse 20) ausgeführten Baugrundaufschlüsse sind im Detail in der Anlage 3.3 dargestellt.

Demnach stehen unterhalb des Mutterbodens zunächst locker gelagerte Sande (B41) und Kiese (B42) an. Die mit der Bohrung B42 bis zu einem Niveau von 3,0 m unter GOK erbohrten sandigen und z. T auch steinigen Kiese enthalten hohe Anteile an Schalen von Muscheln und Schnecken. In die mit der Bohrung 41 erbohrten Sande ist ab einem Niveau von 1,3 m unter GOK ein 0,3 m mächtiges Torfband eingelagert. Die lockere Lagerungsdichte der Sande und Kiese wurde mit den Drucksondierungen bis zu einem Niveau von ca. -7,0 mNN (DS47) bzw. ca. -3,5 mNN (DS11-2016) nachgewiesen.

Unterlagernd folgen bis zu einer Tiefe von mind. etwa -21,0 mNN Fein-, Mittel- und Grobsande mit zum Teil schwach schluffigen und schwach kiesigen Anteilen. Mit der Bohrung B42 wurde ab einer Tiefe von -13,63 mNN eine rd. 4 m mächtige Kieseinlagerung erbohrt. Die Lagerungsdichte des nichtbindigen Horizonts ist auf Grundlage der Ergebnisse der Drucksondierungen als überwiegend mitteldicht, z. T auch als dicht gelagert zu bezeichnen.

Im Hangenden wurde ein heterogener Horizont mit einer Wechsellagerung aus Geschiebemergel, Sanden und Kiesen bis zur Endteufe bei max. ca. -39 mNN erbohrt. Beim Geschiebemergel handelt es sich überwiegend um schwach tonige bis tonige, schluffige bis stark schluffige Sande mit schwachen Kiesanteilen sowie auch Steinen. Vereinzelt dominiert gewichtsmäßig auch das Feinkorn, so dass es sich dann überwiegend um sandige und tonige Schluffe handelt. Der Geschiebemergel wurde mit überwiegend steifer und halbfester Konsistenz angesprochen. Für die Sande und Kiese, die zum Teil Steine enthalten und auch schluffige Anteile aufweisen, wurden mitteldichte und dichte Lagerungsdichten nachgewiesen. In den Sanden und Kiesen sowie auch im Geschiebemergel ist unter Berücksichtigung der geologischen Entstehung zudem das Vorkommen von Blöcken und Findlingen wahrscheinlich, auch wenn diese aufschlussbedingt nicht nachgewiesen wurden.

4.3.4 Bauzeitlicher Anleger am Nordufer der Borgstedter Enge

Die Ergebnisse der im Bereich des geplanten Anlegers am Nordufer der Borgstedter Enge ausgeführten Baugrundaufschlüsse sind im Detail in der Anlage 3.4 dargestellt.

Bei einer Wassertiefe von etwa 1,5 m bis 2,5 m wurde ab der Gewässersohle, welche hier ein Niveau von etwa -1,5 mNN bis -2,5 mNN aufweist, mit der Bohrung B57 zunächst eine etwa 0,7 m mächtige Muddeschicht mit breiiger Konsistenz erbohrt.

Unterlagernd folgen bis zur Endteufe der Bohrung bei ca. -32 mNN überwiegend Fein- und Mittelsande mit zum Teil schluffigen, grobsandigen sowie kiesigen Anteilen. In größerer Tiefe wurden in die Sande eingeschaltete Schluffbänderungen bzw. geringmächtige Geschiebemergellagen angetroffen. Ab einer Tiefe von ca. -29 mNN wurden sandige und z. T. steinige Kiese erbohrt. Die Lagerungsdichte des nichtbindigen Horizonts ist auf Grundlage der Ergebnisse der Drucksondierungen überwiegend als locker und mitteldicht in größeren Tiefen auch als dicht zu bezeichnen. Hierbei wurden mit der westlich ausgeführten Drucksondierung DS69 bis zu einer Tiefe von ca. -12 mNN zunächst lockere Lagerungsdichten, bis zu einer Tiefe von ca. -17 mNN locker bis mitteldichte Lagerungsdichten, bis zu einem Niveau von ca. -35 mNN mitteldichte Lagerungsdichten und ab diesem

Niveau dichte Lagerungsdichten indirekt festgestellt. Die mit der Drucksondierung DS70 gemessenen Spitzendrücke sind demgegenüber etwas geringer, so dass noch bis in eine Tiefe von ca. -23 mNN immer wieder Rückgänge des Spitzendrucks entsprechend einer lockeren Lagerungsdichte ($q_c < 7,5 \text{ MN/m}^2$) verzeichnet wurden. Bindige Einlagerungen in die Sande wurden auch mit den Drucksondierungen anhand deutlicher Rückgänge des Spitzendrucks bei gleichzeitig ansteigendem Reibungsverhältnis indirekt nachgewiesen; hierbei ist insbesondere der mit der Drucksondierung DS70 in einer Tiefe von etwa -25 mNN bis -30 mNN nachgewiesene Horizont hervorzuheben, bei dem anhand der Drucksondiererergebnisse eine Wechsellagerung bindiger und nichtbindiger Böden abgeleitet werden kann.

4.3.5 Borgstedter Enge (Achse 40)

Die Ergebnisse der im Bereich der Borgstedter Enge (Achse 40) ausgeführten Baugrundaufschlüsse sind im Detail in der Anlage 3.5 dargestellt.

Bei einer Wassertiefe von knapp 4 m wurde ab der Gewässersohle, welche hier ein Niveau von etwa -3,5 mNN bis -4,0 mNN aufweist, zunächst eine etwa 15 m (B58) bzw. 20 m (B40) mächtige holozäne Seeablagerung (Mudde) erbohrt. Bei der Mudde handelt es sich um schwach tonige bis tonige und schwach feinsandige, organische bis stark organische Schluffe. Teilweise handelt es sich auch um schluffige sowie tonige, organische Sande. Mit den Glühverlustbestimmungen wurden Werte von im Mittel $v_{gl} = 23,1 \%$ festgestellt. Die Wassergehalte wurden im Mittel mit 178 % gemessen. Die Konsistenz der Mudde wurde überwiegend mit breiig angesprochen. Die an der Mudde zur Bestimmung der undränierten Scherfestigkeit durchgeführten Sonderversuche (einaxiale Druckversuche, Laborflügelsondierungen) erbrachten Werte von $c_u = 5,2 \text{ kN/m}^2$ bis $c_u = 9,5 \text{ kN/m}^2$. An der Basis der Mudde wurde mit der Bohrung B40 eine etwa 1 m mächtige Torfschicht erbohrt.

Direkt die Mudde bzw. den Torf unterlagernd wurde mit beiden Bohrungen ein 1,0 m (B58) bzw. 1,85 m (B40) mächtiger sandiger und steiniger Kieshorizont erbohrt. Es folgen bis zur Endteufe bei ca. -49 mNN Fein-, Mittel- und Grobsande mit zum Teil schwach schluffigen und schwach kiesigen Anteilen. Zum Teil weisen die Sande auch schluffige Anteile und Schluffbänderungen auf. Die Lagerungsdichte des nichtbindigen Horizonts unterhalb der Mudde ist auf Grundlage der Ergebnisse der Drucksondierungen zunächst als locker bis mitteldicht zu bezeichnen. Ab etwa -24 mNN bis etwa -30 mNN wurden überwiegend mitteldichte Lagerungen ($7,5 \text{ MN/m}^2 < q_c < 15 \text{ MN/m}^2$) nachgewiesen. Unterhalb eines Niveaus von -30 mNN sind die Lagerungsdichten auf Grundlage der Ergebnisse der Drucksondierungen sowie der in größeren Tiefen ausgeführten Standard Penetration Tests als überwiegend dicht und sehr dicht gelagert zu bezeichnen.

4.3.6 Borgstedter Enge (Achse 50)

Die Ergebnisse der im Bereich der Borgstedter Enge (Achse 50) ausgeführten Baugrundaufschlüsse sind im Detail in der Anlage 3.6 dargestellt.

Bei einer Wassertiefe von etwa 3,0 m bis 3,5 m wurde ab der Gewässersohle, die hier auf einem Niveau von -3,27 mNN (B38) bzw. -3,42 mNN (B39) eingemessen wurde, bis zu einer Tiefe von etwa -10,0 mNN zunächst eine Wechsellagerung aus schluffigen Sanden, Schluffen und Mudde angetroffen. Die bindigen Schichten weisen hierbei überwiegend eine breiige Konsistenz auf. Die Sande sind

auf Grundlage der Ergebnisse der Drucksondierungen als überwiegend locker und zum Teil auch mitteldicht gelagert einzustufen. In den Böden wurden vielfach Muschelreste angetroffen.

Unterlagernd folgt bis zu einer Tiefe von etwa -20 mNN ein Horizont aus überwiegend Mittel- und Grobsanden sowie zum Teil auch Kiesen. Die Lagerungsdichte dieses Horizontes ist unter Berücksichtigung der mit den Drucksondierungen gemessenen Spitzendrücke von überwiegend etwa $q_c = 3 \text{ MN/m}^2$ bis $q_c = 8 \text{ MN/m}^2$ als überwiegend locker gelagert zu bezeichnen.

Es folgt bis zu einer Tiefe von etwa -26 mNN ein Horizont mit einer Wechsellagerung aus überwiegend schluffigen Feinsanden und feinsandigen, zum Teil auch tonigen Schluffen. Die Lagerungsdichte der Sande ist auf Grundlage der Ergebnisse der Drucksondierungen als locker, z. T. auch als mitteldicht gelagert einzustufen.

Bis zur Endteufe bei -51 mNN folgen schwach schluffige bis schluffige, mittelsandige Feinsande sowie Mittelsande mit unterschiedlichen grobsandigen und feinsandigen Anteilen. Die Lagerungsdichte des nichtbindigen Horizonts ist auf Grundlage der Ergebnisse der Drucksondierungen bei gemessenen Spitzendrücken von überwiegend $q_c = 10 \text{ MN/m}^2$ bis $q_c = 20 \text{ MN/m}^2$ als mitteldicht bis dicht gelagert einzustufen.

4.3.7 Borgstedter Enge (Achse 60)

Die Ergebnisse der im Bereich der Borgstedter Enge (Achse 60) ausgeführten Baugrundaufschlüsse sind im Detail in der Anlage 3.7 dargestellt.

Bei einer Wassertiefe von etwa 3,5 m bis 4,0 m wurde ab der Gewässersohle, die hier auf einem Niveau von -3,66 mNN (DS42) bzw. -4,18 mNN (B36) eingemessen wurde, zunächst eine mehrere Meter mächtige holozäne Seeablagerung (Mudde) erbohrt. Die Schichtgrenze zum unterlagernden Sandhorizont fällt hierbei in östlicher Richtung ab. Die mit den Bohrungen direkt bzw. den Drucksondierungen indirekt nachgewiesene Basis der Mudde weist von West nach Ost betrachtet ein Niveau von etwa -8,7 mNN (DS42), -9,8 mNN (B36), -11,6 mNN (B37) und -13,8 mNN (DS41) auf. Bei der Mudde handelt es sich um schwach tonige bis tonige und schwach feinsandige, organische bis stark organische Schluffe. Teilweise handelt es sich auch um schluffige sowie tonige, organische Sande. Mit den Glühverlustbestimmungen wurden Werte von im Mittel $v_{GI} = 23,1 \%$ festgestellt. Die Wassergehalte wurden im Mittel mit 178 % gemessen. Die Konsistenz der Mudde wurde überwiegend mit breiig angesprochen. Die an der Mudde zur Bestimmung der undrännierten Scherfestigkeit durchgeführten Sonderversuche (einaxiale Druckversuche, Laborflügelsondierungen) erbrachten Werte von $c_u = 5,2 \text{ kN/m}^2$ bis $c_u = 9,5 \text{ kN/m}^2$. An der Basis der Mudde wurde mit der Bohrung B37 eine etwa 0,6 m mächtige Kiesschicht erbohrt.

Unterlagernd folgt ein mindestens 15 m mächtiger Horizont aus Sanden unterschiedlicher Körnung sowie zum Teil auch Kiesen. Die Basis dieses Horizonts fällt in östlicher Richtung ab. Die mit den Bohrungen direkt bzw. den Drucksondierungen indirekt nachgewiesene Basis des nichtbindigen Horizonts weist von West nach Ost betrachtet ein Niveau von etwa -24,5 mNN (DS42), -26,0 mNN (B36), -29,7 mNN (B37) und -34,0 mNN (DS41) auf. Die Lagerungsdichte ist unter Berücksichtigung der mit der Drucksondierung DS42 gemessenen Spitzendrücke von überwiegend etwa $q_c = 5 \text{ MN/m}^2$ bis $q_c = 10 \text{ MN/m}^2$ als locker bis mitteldicht zu bezeichnen. Mit der am östlichen Pfeilerstandort ausgeführten Drucksondierung DS41 wurden hingegen höhere Spitzendrücke von überwiegend etwa $q_c = 10 \text{ MN/m}^2$ bis $q_c = 20 \text{ MN/m}^2$ gemessen, so dass hier von einer überwiegend mitteldichten bis dichten Lagerung der Sande und Kiese auszugehen ist.

Unterlagernd folgt ein zunächst überwiegend bindiger Horizont aus Beckenschluffen, bei dem mit zunehmender Tiefe der Feinsandanteil zunimmt. Im oberen Bereich dieses Horizonts handelt es sich entsprechend überwiegend um tonige und feinsandige Schluffe, während in größerer Tiefe überwiegend schluffige bis stark schluffige Feinsande erbohrt wurden. Die Konsistenzen der Schluffe wurden überwiegend mit steif angesprochen. Unter Berücksichtigung der in der Tiefe großen Überlagerungsspannung, der Ergebnisse der in der Bohrung B37 ausgeführten Bohrlochrammsondierungen (SPT) sowie der mit den Drucksondierungen gemessenen Spitzendrücke von $q_c \geq 3 \text{ MN/m}^2$ wird jedoch davon ausgegangen, dass in situ tendenziell steife bis halbfeste und halbfeste Konsistenzen überwiegen. Die Lagerungsdichte der schluffigen bis stark schluffigen Feinsande ist auf Grundlage der Ergebnisse der Drucksondierungen sowie der Bohrlochrammsondierungen als überwiegend dicht, zum Teil auch mitteldicht zu bezeichnen.

4.3.8 Bauzeitlicher Anleger am Südufer der Borgstedter Enge

Die Ergebnisse der im Bereich des geplanten Anlegers am Südufer der Borgstedter Enge ausgeführten Baugrundaufschlüsse sind im Detail in der Anlage 3.8 dargestellt.

Wasserseits der vorhandenen Kaianlage der Fa. Schreiber wurden eine Bohrung (B56) sowie vier Drucksondierungen ausgeführt. Zur Beurteilung der landseits der Kaianlage vorhandenen Baugrundverhältnisse sind die in dichtem Abstand ausgeführten Baugrundaufschlüsse der Achse 70 (s. nachfolgenden Abschnitt) zu berücksichtigen.

Die Wassertiefe an den Bohransatzpunkten beträgt zwischen $-2,78 \text{ mNN}$ (B56) und $-3,45 \text{ mNN}$ (DS63). Mit der Bohrung B56 wurde ab der Gewässersohle zunächst bis in eine Tiefe von etwa 3 m, d. h. bis etwa $-5,8 \text{ mNN}$ unter Gewässersohle eine Wechsellagerung aus Schluffen bzw. Mudde und Sanden erbohrt. Mit den Drucksondierungen wurden bindige Böden geringer Festigkeit, bei denen es sich wahrscheinlich um Mudde handelt, noch bis in eine Tiefe von ca. -11 mNN (Westseite, DS 62 und DS62a) bzw. bis in eine Tiefe von ca. $-10,5 \text{ mNN}$ (Ostseite, DS68) indirekt nachgewiesen.

Unterlagernd steht ein nichtbindiger Horizont aus Sanden und Kiesen unterschiedlicher Körnung an, dessen Schichtgrenze zum unterhalb anstehenden bindigen Horizont starke Höhenunterschiede aufweist. Mit der Bohrung B56 wurde die Basis auf einem Niveau von etwa $-24,5 \text{ mNN}$ erbohrt. Mit der westlich der Bohrung ausgeführten Drucksondierung 62a wurde die Basis einige Meter tiefer auf einem Niveau von etwa -27 mNN und mit der östlich der Bohrung ausgeführten Drucksondierung DS63 noch deutlich tiefer auf einem Niveau von etwa $-37,5 \text{ mNN}$ indirekt nachgewiesen. Die Lagerungsdichten der nichtbindigen Böden sind auf Grundlage der Ergebnisse der Drucksondierungen in der vollen Bandbreite von locker bis hin zu sehr dicht zu bezeichnen, wobei die mit den einzelnen Drucksondierungen nachgewiesenen Verhältnisse diesbezüglich sehr unterschiedlich sind. Lockere Lagerungsdichten wurden bis zu einem Niveau von etwa -15 mNN indirekt nachgewiesen.

Bei dem mit der Bohrung B56 erbohrten unterlagernd anstehenden bindigen Horizont handelt es sich zunächst um Beckenschluff und darunter um Geschiebemergel in überwiegend mind. steifer Konsistenz. Bis zur Endteufe wurde unterhalb des bindigen Horizonts noch ein nichtbindiger Horizont angebohrt. Für die mit den Drucksondierungen indirekt nachgewiesenen bindigen Horizonte ist auf Grundlage der für bindige Böden vergleichsweise hohen gemessenen Spitzendrücke von etwa $q_c = 3 \text{ MN/m}^2$ bis $q_c = 10 \text{ MN/m}^2$ von relativ hohen Festigkeiten entsprechend überwiegend steifer und halbfester Konsistenzen auszugehen.

4.3.9 Rader Insel (Achsen 70 bis 120)

Die Ergebnisse der im Bereich der Rader Insel (Achsen 70 bis 120) ausgeführten Baugrundaufschlüsse sind im Detail in den Anlagen 3.9 bis 3.14 dargestellt.

Die Baugrundverhältnisse auf der Rader Insel sind an den erkundeten Pfeilerstandorten vergleichsweise ähnlich, so dass diese für die Achsen 70 bis 120 zusammenfassend beschrieben werden können.

Demnach steht unterhalb einer geringmächtigen Mutterbodenschicht zunächst ein Horizont aus überwiegend locker und mitteldicht gelagerten Sanden an, dessen Schichtgrenze zum unterlagernden bindigen Horizont etwa in Tiefen von -3 mNN bis -10 mNN festgestellt wurde. In die Sande sind z. T. geringmächtige Geschiebemergel- bzw. Schluffbänderungen eingebettet. Mit einigen Aufschlüssen wurden zudem oberflächennah bindige Schichten mit Mächtigkeit von maximal etwa 1 m bis 2 m erbohrt (siehe z. B. Anlage 3.13).

Unterlagernd folgt bis zur Endteufe von maximal ca. -50 mNN ein inhomogener Horizont mit Wechsellagerungen aus Geschiebemergel, Beckenschluffen, Sanden und Kiesen. Die Schichtmächtigkeiten und auch die Anteile der einzelnen Schichten an der gesamten mit den Aufschlüssen bis zur jeweiligen Endteufe erbohrten Mächtigkeit des Horizonts sind hierbei sehr uneinheitlich. So wurden z. B. in der Achse 70 überwiegend Sande erbohrt, während in den Achsen 90 und 100 der Geschiebemergel dominiert. Die Lagerungsdichten der Sande können auf Grundlage der Ergebnisse der Drucksondierungen als überwiegend dicht und sehr dicht sowie z. T. auch mitteldicht eingestuft werden. Die bindigen Böden weisen mit überwiegend steifen und halbfesten Konsistenzen generell hohe Festigkeiten bzw. geringe Zusammendrückbarkeiten auf.

4.3.10 Rader Insel (Böschungskrone Einschnitt)

Die Ergebnisse der im Bereich der Rader Insel auf der Böschungskrone des Einschnitts ausgeführten Baugrundaufschlüsse sind im Detail in der Anlage 3.15 dargestellt.

Demnach steht unterhalb des Mutterbodens zunächst ein etwa 5 m bis 6 m mächtiger Horizont aus aufgefüllten Sanden in lockerer Lagerungsdichte an.

Es folgt ein etwa 15 m mächtiger Horizont aus überwiegend Fein- und Mittelsanden mit unterschiedlichen Beimengungen an Schluff, Grobsand und Kies in mitteldichter, dichter und zum Teil auch sehr dichter Lagerung. Der Sandhorizont ist mehrfach schluffgebändert.

Unterlagernd steht Geschiebemergel in weich-steifer Konsistenz, gefolgt von Kiesen und kiesigen Sanden in dichter und sehr dichter Lagerung und einem bis zur Endteufe bei ca. -22,0 mNN reichenden bindigen Horizont aus Beckenton und Geschiebemergel in steifer bis halbfester Konsistenz.

4.3.11 Kanalpfeiler, Erkundung der Senkkästen (Achsen 130 und 140)

Mit den in den Anlagen 3.16 und 3.18 dargestellten Erkundungen wurden u.a. die Senkkästen der beiden bestehenden Kanalpfeiler durch zwei Aufschlusspunkte je Kanalpfeiler erkundet.

Mit den zunächst ab der Geländeoberkante bis zur Oberkante der Senkkastendecke abgeteuften Bohrungen wurde die Senkkastendecke etwa 4,0 m bis 4,5 m unter GOK erkundet. Das Niveau der Senkkastendecke wurde auf einem Niveau von -2,35 mNN bzw. -2,53 mNN (nördlicher Kanalpfeiler) sowie -2,22 mNN bzw. -2,44 mNN (südlicher Kanalpfeiler) eingemessen. Bei den oberhalb der Senkkastendecken aufgefüllten Böden handelt es sich überwiegend um sandiges und kiesiges Material mit eingelagerten Deckwerksteinen, Holzresten, Gummiresten etc. sowie organischen Bestandteilen. Zum Teil wurde auch aufgefüllter Geschiebelehm angetroffen.

Nachlaufend wurden an jedem der vier Aufschlusspunkte Kernbohrungen durch die Senkkastendecken durchgeführt. Die erkundeten Betonmächtigkeiten betragen von 1,02 m bis 1,53 m. Zur Güte und Druckfestigkeit des Betons wird auf die Ausführungen in Abschnitt 4.5.8 verwiesen.

Im Anschluss wurden innerhalb der Senkkästen mit schweren Rammsondierungen die Lagerungsdichten der Senkkastenfüllungen erkundet und hinterher Bohrungen zur Probengewinnung der Senkkastenfüllungen abgeteuft. Demnach handelt es sich bei dem Bodenmaterial in den Senkkästen um Sande unterschiedlicher Körnung mit schluffigen und kiesigen Anteilen und Steinen sowie z. T. auch um Kiese. Mehrfach wurden in den Böden Holzreste erkundet. Die Lagerungsdichte der Böden innerhalb der Senkkästen ist auf Grundlage der Ergebnisse der schweren Rammsondierungen als überwiegend sehr locker zu bezeichnen. Die Abbrüche zweier schwerer Rammsondierungen können im Zusammenhang mit den erbohrten Steinen erklärt werden. Am Aufschlusspunkt „Senkkasten 03“ wurde im unteren Teil der Auffüllungen ein massives Betonhindernis mit 1,5 m Mächtigkeit durchörtert. Es ist daher wahrscheinlich, dass in den Senkkastenfüllungen weitere massive Hindernisse größer als Steingröße vorhanden sind. Bezüglich der Schadstoffbelastung der Senkkastenfüllungen wird auf die in Abschnitt 4.6 dokumentierten chemischen Analysen verwiesen.

Anschließend wurden die Sohlen des Senkkästen mit jeweils einer zweiten Kernbohrung durchörtert und im letzten Schritt mit Drucksondierungen der gewachsene Boden unterhalb der Senkkästen bis zu einer maximalen Tiefe von ca. -33,2 mNN erkundet. Die erkundeten Betonmächtigkeiten der Senkkastensohlen betragen von 2,5 m bis 3,45 m. Zur Güte und Druckfestigkeit des Betons wird auf die Ausführungen in Abschnitt 4.5.8 verwiesen. Auf Grundlage der Ergebnisse der unterhalb der Senkkästen ausgeführten Drucksondierungen sowie der vorliegenden Altaufschlüsse handelt es sich bei dem unterhalb der Senkkastensohlen ab etwa -20 mNN anstehenden Böden überwiegend um Geschiebemergel mit hoher Festigkeit.

4.3.12 Kanalpfeiler (Achse 130)

Die Ergebnisse der im Bereich der vorhandenen und auch geplanten Standorte der Kanalpfeiler (Achse 130) ausgeführten Baugrundaufschlüsse sind im Detail in den Anlagen 3.16 (geplanter westlicher Pfeiler) und 3.17 (geplanter östlicher Pfeiler) dargestellt. Die Detailerkundungen der Senkkästen werden im Abschnitt 4.3.11 beschrieben.

Unter Berücksichtigung der vorgesehenen Positionierung des westlichen Pfeilers innerhalb der Grundrissfläche im nordöstlichen Bereich des Senkkastens ist für die Gründung der Baugrund unterhalb des Senkkastens von Bedeutung. Auf Grundlage der Altaufschlüsse sowie der Ergebnisse der Drucksondierungen steht ab UK Senkkasten (ca. -20 mNN bis -21 mNN) bis zur maximalen Teufe der Altbohrung B-103-A-1966 von rd. -44 mNN Geschiebemergel an. Dieser weist unter Berücksichtigung der mit der Drucksondierung DS65 erreichten Tiefe von maximal etwa -33 mNN sowie auch

der qualitativen Angaben aus Unterlage U17 sehr hohe Festigkeiten auf. Die mit der Drucksondierung gemessenen Spitzenwiderstände betragen überwiegend $q_c \geq 5 \text{ MN/m}^2$ bzw. zum Teil auch $q_c \geq 10 \text{ MN/m}^2$.

In der Grundfläche des östlichen Pfeilers wurden zunächst bis zu einer Tiefe von etwa -17 mNN Sande, Kiese sowie auch bindige Böden in Form von Beckenschluff und Geschiebemergel erkundet. Die nichtbindigen Böden sind hierbei im oberflächennahen Bereich vielfach locker gelagert. In größeren Tiefen weisen die Ergebnisse der Drucksondierungen auf mitteldichte bis hin zu sehr dichten Lagerungen hin.

Unterlagernd folgt bis zu Endteufe von ca. -33 mNN ein durchgängig bindiger Horizont aus zunächst Beckenschluff und Beckenton über Geschiebemergel. Die Konsistenzen wurden mit steif, halbfest und fest angesprochen.

4.3.13 Kanalpfeiler (Achse 140)

Die Ergebnisse der im Bereich der vorhandenen und auch geplanten Standorte der Kanalpfeiler (Achse 140) ausgeführten Baugrundaufschlüsse sind im Detail in den Anlagen 3.18 (geplanter westlicher Pfeiler) und 3.19 (geplanter östlicher Pfeiler) dargestellt. Die Detailerkundungen der Senkkästen werden im Abschnitt 4.3.11 beschrieben.

Unter Berücksichtigung der vorgesehenen Positionierung des westlichen Pfeilers am Rand der Grundrissfläche im südöstlichen Bereich des Senkkastens ist für die Gründung der Baugrund unterhalb des Senkkastens von Bedeutung. Auf Grundlage der Altaufschlüsse sowie der Ergebnisse der Drucksondierungen steht ab UK Senkkasten (ca. -20,5 mNN bis -21,0 mNN) bis zur maximalen Teufe der Altbohrung B-101-1966 von rd. -45 mNN Geschiebemergel an. Dieser weist unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Drucksondierungen, der Angaben aus Unterlage U17 sowie auch der Ergebnisse der in geringem Abstand für den östlichen Pfeiler ausgeführten Bohrung B25 sehr hohe Festigkeiten auf. Die Konsistenzen werden als überwiegend steif-halbfest und halbfest eingestuft.

In der Grundfläche des östlichen Pfeilers wurden zunächst bis zu einer Tiefe von etwa -17 mNN Fein- und Mittelsande in überwiegend mitteldichter und dichter Lagerung erkundet.

Unterlagernd folgt bis zu Endteufe von ca. -38 mNN durchgängig ein Horizont aus Geschiebemergel in überwiegend steif-halbfester und halbfester Konsistenz.

4.3.14 Südliches Vorland (Achsen 150 und 160)

Die Ergebnisse der im Bereich des südlichen Vorlands (Achse 150 und Achse 160) ausgeführten Baugrundaufschlüsse sind im Detail in der Anlage 3.20 und Anlage 3.21 dargestellt.

Ab der Geländeoberkante wurde locker gelagerter Mutterboden mit einer Mächtigkeit von rd. 0,5 m angetroffen. Kornanalytisch handelt es sich um humose Fein- und Mittelsande mit z. T. schluffigen, grobsandigen und kiesigen Bestandteilen. Unterhalb des Mutterbodens stehen locker bis mitteldicht gelagerte aufgefüllte Sande bis zu einer maximalen Tiefe von + 12,1 mNN (Achse 150) bzw. + 15,9 mNN (Achse 160) an. Die Mächtigkeit beträgt ca. 0,9 m. Zumeist handelt es sich um grobsandige und schwach kiesige Mittelsande und teilweise um schluffige Feinsande (B22, Achse 160).

Unterhalb eines geringmächtigen Horizonts gewachsener Sande steht in der Achse 150 ab +12,3 mNN weicher und weich bis steifer Geschiebelehm / Geschiebemergel an, während in der Achse 160 ab +15,6 mNN Beckenschluffe mit einer weichen und weich bis steifen Konsistenz angetroffen wurden. Die Mächtigkeit der bindigen Schichten in beiden Achsen beträgt i.M. 1,6 m. Kornanalytisch ist der Geschiebelehm / -mergel als schluffiger bis stark schluffiger, schwach toniger und schwach kiesiger Sand anzusprechen, während es sich bei dem Beckenschluff um einen feinsandigen, schwach tonigen Schluff handelt.

Im Liegenden dieser Horizonte ab ca. +13,5 mNN (Achse 160) bzw. ca. +9,0 mNN (Achse 150) stehen in Wechsellagerung mit weiteren Beckenschluffhorizonten (mit mind. weicher bis steifer Konsistenz) gewachsene Sande an. Die gewachsenen Sande wurden bis zur Endteufe nicht durchörtert. Kornanalytisch handelt es sich bei den gewachsenen Sanden hauptsächlich um schwach schluffige bis schluffige, z.T. auch schwach mittelsandige Feinsande und nur vereinzelt um Grobsande und Mittelsande. Vereinzelt wurden in den schluffigen Feinsanden Mergelsteine und Holzkohlereste erkundet. Die gewachsenen Sande sind auf Grundlage der Ergebnisse der Drucksondierungen als mitteldicht, z.T. auch als locker und dicht gelagert einzustufen. Eingeschaltet in die gewachsenen Sande wurde mit der Bohrung B23 (-16,9 mNN) ein etwa 1,0 m mächtiger Kieshorizont erkundet. Kornanalytisch handelt es sich hierbei um ein Sand-Kies-Gemisch.

4.3.15 Südliches Widerlager (Achse 170)

Die Ergebnisse der im Bereich des südlichen Widerlagers (Achse 170) ausgeführten Baugrundaufschlüsse sind im Detail in der Anlage 3.22 und der Anlage 3.23 dargestellt.

Unterhalb der Oberflächenbefestigung bzw. unterhalb des Mutterbodens stehen die aufgefüllten Sande und schluffigen Sande des Dammbauwerkes an. Die Mächtigkeit dieser Auffüllungen entspricht etwa der Dammhöhe am jeweiligen Aufschlusspunkt. Kornanalytisch handelt es sich hauptsächlich um Fein- und Mittelsande, welche meist schwach schluffig und teilweise schluffig bis stark schluffig, schwach grobsandig und schwach kiesig ausgeprägt sind. Vereinzelt wurden Schluffbänder erkundet. Die Lagerungsdichte kann anhand der Drucksondierungen i.d.R. als mitteldicht, dicht und teilweise sehr dicht angegeben werden. Ausnahmen mit einer bereichsweise nur lockeren Lagerungsdichte wurden mit der Drucksondierung DS17 nachgewiesen.

Ab ca. +15,0 mNN wurden unterhalb des Dammbauwerkes gewachsene Sande in Wechsellagerung mit Beckenablagerungen (stark schluffige Feinsande, sowie feinsandige, tonige Schluffe und schluffige Tone) erkundet, welche bis zur Endteufe nicht durchörtert wurden. Kornanalytisch handelt es sich bei den gewachsenen Sanden um schwach schluffige bis schluffige, z.T. auch schwach mittelsandige Feinsande und nur vereinzelt um Mittelsande. Teilweise wurden in den schluffigen Feinsanden Mergelsteine erkundet. Die gewachsenen Sande sind auf Grundlage der Ergebnisse der Drucksondierungen als mitteldicht, z.T. auch als locker und dicht gelagert einzustufen. Die Beckenablagerungen besitzen i.d.R. eine weich-steife und steife Konsistenz.

4.4 Grund- und Schichtwasser

Grund- und Schichtwasserstände wurden im Zuge der Bohrarbeiten aufgenommen sowie mit insgesamt drei Pegeln im Bereich des Brückenbauwerkes eingemessen. Bei den im Zuge der Bohrarbeiten eingemessenen Wasserständen ist zu berücksichtigen, dass diese nur ungefähre Wasserstände

darstellen, da im Zuge des Bohrvorgangs i. d. R. nicht genügend Zeit für ein Auspegeln im Bohrrohr vorhanden ist. Die gemessenen Wasserstände sind an den Bohrprofilen der Anlage 3 angetragen.

Am Widerlager Nord wurden innerhalb des Dammes und auch am Dammfuß Wasserstände von etwa +3,5 mNN bis +4,7 mNN eingemessen. Am Widerlager Süd wurden unter Berücksichtigung der Altaufschlüsse Wasserstände in einer Bandbreite von etwa +2,1 mNN bis +7,1 mNN gemessen. Bei den Wasserständen an den Widerlagern handelt es sich im Zusammenhang mit den hier vorhandenen schluffigen Böden z. T. um Schichtwasserstände mit starker Veränderlichkeit in Abhängigkeit der Niederschlagsneigung.

Von den Widerlagern ausgehend gleichen sich die Wasserstände in Richtung der Ufer der Borgstedter Enge bzw. des NOK den Wasserständen in den Gewässern an, welche relativ konstant etwa 10 cm bis 20 cm unter Normal-Null (NN) gehalten werden.

Die Grundwasserstände auf der Rader Insel werden ebenfalls maßgeblich beeinflusst durch die nahe gelegenen Ufer der Gewässer. Die mit den Bohrungen und der auf der Rader Insel angeordneten Grundwassermessstelle GWM03 gemessenen Wasserstände liegen überwiegend auf einem Niveau von etwa +0,5 mNN bis +2,0 mNN.

Die Grundwasserdruckhöhen in größeren Tiefen wurden mit Hilfe der in Abschnitt 4.5.9 näher erläuterten Dissipationstests gemessen. Hierbei hat sich gezeigt, dass gegenüber den Wasserständen in den Gewässern eine um mehrere Meter höhere Grundwasserdruckhöhe vorhanden ist, d. h. das Grundwasser im Porengrundwasserleiter steht an der Unterseite der bindigen Schichten entsprechend der lokalen hydrogeologischen Verhältnissen mehr oder weniger gespannt an. In dem die holozänen Weichschichten (Mudde) unterlagernden Grundwasserleiter im Bereich der Borgstedter Enge wurden artesische Überdrücke von im Mittel etwa 30 kN/m² gemessen.

4.5 Bodenmechanische Laborversuche und weitere Versuche

4.5.1 Wassergehalte und Glühverluste

Zur vergleichenden Bewertung und zur Bestimmung der Bodenkennwerte wurden Wassergehalte gemäß DIN 18121-1⁴ und Glühverluste gemäß DIN 18128⁵ an ausgewählten bindigen Proben bestimmt. Zusätzlich sind hier die Wassergehalte aus den Untersuchungen zur Bestimmung der Konsistenzgrenzen sowie der Sonderversuche berücksichtigt worden. Eine Übersicht über die Ergebnisse ist in Tabelle 1 dargestellt.

⁴ DIN 18121-1: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Wassergehalt - Teil 1: Bestimmung durch Ofentrocknung

⁵ DIN 18128: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung des Glühverlustes

Tabelle 1: Übersicht über die Wassergehalte und Glühverluste ausgewählter Proben

Bodenart	Wassergehalte w [%]			Glühverluste v _{gl} [%]		
	Min.	Mittelw.	Max.	Min.	Mittelw.	Max.
SB2 Sand, locker w: 0 Versuche v _{gl} : 1 Versuch	-	-	-	-	1,8	-
SB8 Sand, schluffig w: 3 Versuche v _{gl} : 0 Versuche	7,4	8,4	9,2	-	-	-
SB10 Geschiebelehm w: 3 Versuche v _{gl} : 0 Versuche	15,0	15,7	16,6	-	-	-
SB11/12 Geschiebemergel w: 56 Versuche v _{gl} : 0 Versuche	7,5	13,5	27,4	-	-	-
SB13 Beckenschluff, -ton w: 42 Versuche v _{gl} : 4 Versuche	15,2	23,4	53,8	1,5	3,3	5,1
SB14 Torf w: 1 Versuch v _{gl} : 1 Versuch	-	386,7	-	-	79,7	-
SB15 Mudde w: 30 Versuche v _{gl} : 27 Versuche	49,4	178,1	303,7	5,0	23,1	38,8

Die Einzelergebnisse der Wassergehalts- und Glühverlustbestimmungen können den Bohrprofilen der Anlagen 3.1 bis 3.23 entnommen werden.

4.5.2 Kornverteilungen

Zur Ergänzung der im Probenlager (Rendsburg) durchgeführten Bodenprobenansprache (Februar bis Juli 2017) wurden an kennzeichnenden Bodenproben Kornverteilungsanalysen nach DIN 18123⁶ durchgeführt.

Die Ergebnisse der durchgeführten Kornverteilungsanalysen sind in Form von Kornverteilungskurven in der Anlage 4.1 dokumentiert und können wie folgt beschrieben werden. Die nachfolgende Benennung der Schichten „SBX“ entspricht hierbei der Schichteneinteilung gem. Abschnitt 5.1.

Auffüllung: Sand (Schichten SB2 und SB3)

Die Ergebnisse der Nasssiebungen zeigen, dass es sich bei dem aufgefüllten Sand sowohl um enggestufte, z.T. schwach schluffige Fein- und Mittelsande handelt, als auch um intermittierend gestufte, z.T. schwach kiesige bis kiesige Sande, welche gemäß DIN 18196⁷ den Bodengruppen SE, SI,

⁶ DIN 18123: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung der Korngrößenverteilung

⁷ DIN 18196: Erd- und Grundbau, Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke

SU und GU zuzuordnen sind. In der Anlage 4.1, Blatt 1 bis Blatt 3 sind die Einzelergebnisse der Nasssiebungen dargestellt.

Sand (Schicht SB5, SB6, SB7)

Bei den gewachsenen Sanden handelt es sich hauptsächlich um enggestufte Fein- und Mittelsande mit vielfach schwach schluffigen Anteilen und z.T. grobsandigen und schwach kiesigen Anteilen. Teilweise handelt es sich um mittelsandige und kiesige Grobsande. Die gewachsenen Sande sind gemäß DIN 18196⁸ den Bodengruppen SE / SU zuzuordnen. In der Anlage 4.1, Blatt 4 bis Blatt 7 sind die Einzelergebnisse der Nasssiebungen dargestellt.

Sand, schluffig (Schicht SB8)

Bei den schluffigen Sanden handelt es sich hauptsächlich um schluffige bis stark schluffige und mittelsandige Feinsande und teilweise um stark schluffige Sande. Die schluffigen Sande sind gemäß DIN 18196⁹ den Bodengruppen SU* zuzuordnen. In der Anlage 4.1, Blatt 8 sind die Einzelergebnisse der Nasssiebungen und der kombinierten Analysen dargestellt.

Kiese (Schicht SB9)

Bei den Kiesen bzw. Kiessanden handelt es sich kornanalytisch hauptsächlich um Sand-Kiesgemische, welche z.T. schwach schluffig ausgeprägt sind, und teilweise um schwach sandige Kiese. Die Kiese bzw. Kiessande sind den Bodengruppen GI / GU / SI zuzuordnen. In der Anlage 4.1, Blatt 9 sind die Einzelergebnisse der Nasssiebungen und der kombinierten Analysen dargestellt.

Geschiebelehm (Schicht SB10) und Geschiebemergel (Schicht SB11 und SB12)

Der Geschiebelehm ist überwiegend sandig ausgeprägt und weist i.d.R. einen geringeren Schluff- und Tonanteil als der Geschiebemergel auf. Geschiebelehm und Geschiebemergel sind teilweise schwach kiesig bis kiesig ausgeprägt. Geschiebelehm und Geschiebemergel können hauptsächlich der Bodengruppe SU* und teilweise den Bodengruppen SU, ST, ST*, UL, UM, TL und TM zugeordnet werden. In der Anlage 4.1, Blatt 10 bis Blatt 13 sind die Einzelergebnisse der kombinierten Analysen dargestellt.

Beckenschluff, Beckenton (Schicht SB13)

Mit einem Tonanteil von 3 % bis 41 % und einem Sandanteil zwischen 3 % und 55 % sind die Beckentone und Beckenschluffe kornanalytisch sehr unterschiedlich ausgeprägt. Teilweise weisen die Schluffe schwach organische bis organische Bestandteile auf. Die Beckenschluffe mit einem Sandanteil von über 25 % sind in der Regel den Bodengruppen SU / SU* / ST und UL zuzuordnen. Demgegenüber sind die Beckenschluffe und Beckentone mit einem Tonanteil über 10 % und einem Sandanteil zwischen 3 % und 25 % den Bodengruppen UL, UM, TM und TL zuzuordnen, bzw. beim Vorhandensein von organischem Material der Bodengruppe OU. In der Anlage 4.1, Blatt 14 bis Blatt 16 sind die Einzelergebnisse der kombinierten Analysen dargestellt.

Mudde (Schicht SB15)

Bei der Mudde handelt es sich kornanalytisch hauptsächlich um einen schwach tonigen bis tonigen und schwach feinsandigen, organischen bis stark organischen Schluff. Teilweise handelt es sich um

⁸ DIN 18196: Erd- und Grundbau, Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke

⁹ DIN 18196: Erd- und Grundbau, Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke

einen schluffigen sowie tonigen, organischen Sand. Die Mudde ist gemäß der DIN 18196 der Bodengruppe F (OU / OT) zuzuordnen. In der Anlage 4.1, Blatt 17 sind die Einzelergebnisse der kombinierten Analysen dargestellt.

4.5.3 Konsistenzgrenzen

Die Ergebnisse der Konsistenzgrenzenermittlung gemäß DIN 18122-1¹⁰ können der Anlage 4.2 entnommen werden. Untersucht wurden sechs Proben des Geschiebemergels, neun Proben des Beckentons / Beckenschluffs und drei Proben der Mudde.

Geschiebemergel (Schicht SB11 und SB12)

Bei dem Geschiebemergel handelt es sich hinsichtlich der plastischen Eigenschaften nach dem Plastizitätsdiagramm von CASAGRANDE zumeist um Sand – Schluff – Gemische (SU*) und teilweise um leicht- bis mittelplastische Tone (TL / TM). Die Plastizitätszahl wurde mit i.M. 4,2 % (SU*) bzw. 18,9 % (TL / TM) bestimmt. Die Fließgrenze beträgt i. M. 17,8 % (SU*) bzw. 34,4 % (TL / TM). Die Konsistenzen wurden mit den gemessenen Wassergehalten von 10,4 % bis 17,6 % als breiig-weich, steif und halbfest bestimmt.

Beckenschluff, Beckenton (Schicht SB13)

Bei den neun Proben des Beckentones / Beckenschluffs handelt es sich hinsichtlich der plastischen Eigenschaften nach dem Plastizitätsdiagramm von CASAGRANDE um einen Boden im Nahbereich oberhalb und unterhalb der A-Linie, welcher einerseits leichtplastisch bis mittelplastisch ist (UL, TL, TM) und andererseits nur sehr gering plastisch (SU*) ist. Die Plastizitätszahl wurde in einer Bandbreite von überwiegend etwa 5 % bis 19 % bestimmt. Die Fließgrenze beträgt 16,3 % bis 45,3 %. Die Konsistenzen wurde mit den gemessenen Wassergehalten der Proben von 15,3 % bis 27,3 % als breiig, weich, weich-steif, steif, steif-halbfest und halbfest bestimmt.

Mudde (Schicht SB15)

Bei den drei Proben der Mudde handelt es sich hinsichtlich der plastischen Eigenschaften nach dem Plastizitätsdiagramm von CASAGRANDE um organische Tone (OT). Die Plastizitätszahl wurde mit 60,7 % bis 113,5 %, bzw. i. M. 81,0 % bestimmt. Die Fließgrenze beträgt 129,8 % bis 211,9 %, bzw. i. M. 167,8 %. Die Konsistenz wurde mit den gemessenen Wassergehalten der Proben von 120,0 % bis 191,4 % als breiig bestimmt.

4.5.4 Einaxiale Druckversuche

Zur Bestimmung der undrained Scherfestigkeit c_u der bindigen Schichten wurden einaxiale Druckversuche gemäß DIN 18136¹¹ an ausgewählten ungestörten Bodenproben durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Anlage 4.5 dargestellt und in folgender Tabelle zusammengefasst.

¹⁰ DIN 18122: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Zustandsgrenzen (Konsistenzgrenzen) - Teil 1: Bestimmung der Fließ- und Ausrollgrenze

¹¹ DIN 18136: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Einaxialer Druckversuch

Tabelle 2: Ergebnisse der einaxialen Druckversuche

Schicht: Bodenart	Bohrung Tiefe	Wasser- gehalt	Druck- festigkeit	Bruch- stauchung	undrÄnirte Scherfestig- keit ¹⁾
		w	q _u	ε	c _u
	[m u. GOK]	[%]	[kN/m ²]	[%]	[kN/m ²]
SB8: Sand, schluffig (S, u*)	B43 26,00 - 26,25	16,2	51	4,0	25,5
SB11: Geschiebemergel (U, fs, ms, t')	B56 28,00 - 29,00	16,7	142	6,1	71,0
SB12: Geschiebemergel (S, t, u)	GWM04 25,75 – 26,00	8,3	256,0	2,0	128,0
SB12: Geschiebemergel (S, t, u, g')	B41 39,00 - 39,25	14,0	111	10,6	55,5
SB12: Geschiebemergel (S, u, t, g')	B30 24,00 – 24,25	14,6	63	6,0	31,5
SB12: Geschiebemergel (S, t, u)	B25 21,0 – 22,0	14,9	374	13,8	187
SB12: Geschiebemergel (S, t*, u)	B25 35,0 – 35,25	14,7	454	13,9	227
SB13: Beckenschluff / Beckenton (U, t', fs')	B38 20,00 - 20,25	40,2	101	12,1	50,5
SB13: Beckenschluff / Beckenton (U, t, s')	B37 27,00 - 27,25	53,8	150	20,7	75,0
SB13: Beckenschluff / Beckenton (U, t', fs')	B37 33,00 - 33,25	22,6	165	10,2	82,5

Schicht: Bodenart	Bohrung Tiefe [m u. GOK]	Wasser- gehalt	Druck- festigkeit	Bruch- stauchung	undrÄnierte Scherfestig- keit ¹⁾
		w [%]	q _u [kN/m ²]	ε [%]	c _u [kN/m ²]
SB13: Beckenschluff / Beckenton (U, t', fs')	B36 22,00 - 23,00	24,5	185	10,2	92,5
SB13: Beckenschluff / Beckenton (U, t', fs', ms')	B56 25,00 - 26,00	21,2	69	7,1	34,5
SB13: Beckenschluff / Beckenton (T, u*, fs', ms')	B29 24,00 – 24,25	19,7	79	20,2	39,5
SB13: Beckenschluff / Beckenton (U, t*, fs')	B26 20,0 – 20,25	27,3	105	20,8	53,0
SB13: Beckenschluff / Beckenton (U, t')	B22 14,75 – 15,00	21,6	405,0	2,3	202,5
SB15: Mudde (U, t', fs, o)	B40 18,00 - 19,00	120,0	14	6,3	7,0
SB15: Mudde (U, t, fs', o*)	B58 10,00-10,25	138,6	19	6,8	9,5

¹⁾ c_u = q_u / 2

4.5.5 Direkte Scherversuche

Zur Bestimmung der Scherparameter Reibungswinkel φ' und Kohäsion c' der Böden wurden direkte Scherversuche an ungestörten Proben durchgeführt. Die Versuchsergebnisse sind Anlage 4.4 zu entnehmen.

Tabelle 3: Ergebnisse der direkten Scherversuche

Bohrung Bodenart (Schicht) Tiefe	Anfangs- wasser- gehalt	Normal- spannung	Scher- spannung	Reibungs- winkel	Kohäsion
[m u. GOK]	w	σ	τ	φ'	c'
	[%]	[kN/m ²]	[kN/m ²]	[°]	[kN/m ²]
B44 Sand, A (SB2/SB3) 13,0 – 14,0	7,4 7,5 7,3	100 200 300	77,0 159,0 219,8	35,6	8,7
B44 Sand, A (SB2/SB3) 8,00 – 9,00	8,0 7,9 7,9	100 200 300	65,8 132,3 187,3	31,3	6,7
B21 Sand, A (SB2/SB3) 20,00 – 21,00	9,0 8,4 8,6	200 350 500	128,0 190,3 304,5	30,5	1,9
B45 Sand (SB6) 11,00 – 11,25	10,0 8,4 9,3	100 300 500	102,8 282,5 476,0	43,1	6,2
B27 Mg (SB11) 7,20 – 7,45	11,5 12,0 11,8	100 200 300	122,8 200,3 266,3	36,1	50,0
B32 Mg (SB11) 11,00 – 11,25	10,6 13,3	100 200	180,5 111,5	34,9	40,4
B32 Mg (SB11) 13,0 – 14,0	18,9 14,6 15,3	100 200 300	90,5 183,8 229,8	34,7	27,4
B43 Mg (SB12) 18,0 – 18,25	10,1 11,2 12,7	100 200 300	88,5 169,0 216,3	32,6	29,6

Bohrung Bodenart (Schicht) Tiefe	Anfangs- wasser- gehalt w	Normal- spannung σ	Scher- spannung τ	Reibungs- winkel φ'	Kohäsion c'
[m u. GOK]	[%]	[kN/m ²]	[kN/m ²]	[°]	[kN/m ²]
GWM04	14,3	100	79,0		
Mg (SB12)	12,6	200	183,8	34,6	20,8
19,0 – 19,25	12,5	300	217,0		
B35	17,2	100	106,3		
Beckenschluff (SB13)	17,7	200	200,3	45,3	1,7
17,0 – 17,35	18,0	300	307,8		
B20	17,3	600	418,8		
Beckenschluff (SB13)	17,7	800	524,0	33,0	20,2
37,0 – 38,0	16,8	1.000	678,8		
B19	17,4	600	450,0		
Beckenschluff (SB13)	17,2	800	603,8	36,0	17,0
38,0 – 39,0	16,8	1.000	740,5		

4.5.6 Kompressionsversuche

Kompressionsversuche gemäß DIN 18135¹² wurden an acht ungestörten Proben durchgeführt. Die Ergebnisse sind der Anlage 4.3 zu entnehmen; eine Übersicht ist in der folgenden Tabelle dargestellt.

Tabelle 4: Ergebnisse der Kompressionsversuche

Bohrung Bodenart (Schicht) Tiefe	Wasser- gehalt w	Kompressi- onsbeiwert C _c	Konsolidati- onsbeiwert ¹⁾ c _v	Steifemodul ²⁾ E _s [MN/m ²]					
				Spannung [kN/m ²]					
[m u. GOK]	[%]	[-]	[m ² /s]	^{b)} 50	100	200	400	800	1600
				^{a)} 25	50	100	200	400	800
B46 Mg (SB11) 4,00 - 4,25	9,1	0,043	6,91E-07 4,17E-07	1. Belastung ^{a)}					
				5,15	6,77	10,0	16,5	29,5	55,4
B34 Mg (SB11) 18,0 - 18,25	10,7	0,059	2,17E-07 2,41E-07	1. Belastung ^{b)}					
				8,17	10,5	15,1	24,4	42,9	80,0
		0,007 ³⁾	6,82E-07	2. Belastung ^{b)}					
				24,9	32,0	46,2	74,5	-	-
B27 Mg (SB11) 10,0 - 10,25	13,2	0,071	3,27E-07 6,64E-07	1. Belastung ^{b)}					
				5,3	7,3	11,4	19,4	35,6	68,0
		0,007 ³⁾	9,77E-07	2. Belastung ^{b)}					
				29,3	40,5	62,9	108	-	-
B43 Mg (SB12) 35,0 - 35,25	12,3	0,102	3,49E-08 / 5,21E-08	1. Belastung ^{b)}					
				6,67	7,96	10,5	15,7	26,0	46,7
		0,023 ³⁾	3,49E-08	2. Belastung ^{b)}					
				12,1	15,0	20,7	32,2	-	-
B41 Mg (SB12) 34,0 - 34,25	12,0	0,085	7,13E-08 6,23E-08	1. Belastung ^{b)}					
				6,69	8,29	11,5	17,8	30,6	56,1
		0,017 ³⁾	8,29E-08	2. Belastung ^{b)}					
				15,6	19,3	26,7	41,6	-	-

¹² DIN 18135: Baugrund - Untersuchung von Bodenproben - Eindimensionaler Kompressionsversuch

Bohrung Bodenart (Schicht) Tiefe	Wasser- gehalt w	Kompressi- onsbeiwert C _c	Konsolidati- onsbeiwert ¹⁾ c _v	Steifemodul ²⁾ E _s [MN/m ²]						
				Spannung [kN/m ²]						
[m u. GOK]	[%]	[-]	[m ² /s]	b) a)	50	100	200	400	800	1600
					25	50	100	200	400	800
					1. Belastung ^{b)}					
GWM03 Mg (SB12) 17,0 - 17,25	12,9	0,059	4,44E-07 8,18E-07	5,99	8,38	13,2	22,8	41,9	80,2	
					2. Belastung ^{b)}					
		0,006 ³⁾	1,26E-06	33,9	43,5	62,8	101	-	-	
					1. Belastung ^{b)}					
B31 Mg (SB12) 13,0 - 13,25	27,4	0,196	1,37E-07 1,80E-07	3,42	4,23	5,84	9,07	15,5	28,4	
					2. Belastung ^{b)}					
		0,029 ³⁾	3,92E-07	11,3	13,9	19,2	29,8	-	-	
					1. Belastung ^{b)}					
B20 Becken- schluff (SB13) 37,0 - 38,0	16,3	0,056	7,00E-07 3,57E-07	9,06	12,0	18,0	29,8	53,5	101	
					1. Belastung ^{b)}					
B19 Becken- schluff (SB13) 38,0 - 39,0	17,9	0,047	7,11E-07 6,30E-07	19,1	22,2	28,3	40,6	65,1	114	

¹⁾ Laststufen der Zeitsetzung [kN/m²]: 1. Belastung - 200 bis 400 / 400 bis 800; 2. Belastung 100 bis 200

²⁾ Ermittlung als Tangentenmodul

³⁾ hier für 2. Belastung: Schwellbeiwert C_s

^{a)} Laststufen 25 / 50 / 100 / 200 / 400 / 800

^{b)} Laststufen 50 / 100 / 200 / 400 / 800 / 1600

Zur Abschätzung der Sekundärsetzung kann als ein Kriterium die Beziehung

$$s_{\text{sek}} = c_B \cdot h_1 \cdot \log(t/t_1)$$

mit: c_B Kriechbeiwert nach BUISMANN

h₁ Schichtdicke bei Abschluss der Primärkonsolidation

t betrachteter Zeitpunkt der Sekundärsetzung

t_1 Zeitpunkt zum Abschluss der Primärkonsolidation

herangezogen werden. Aus den vorliegenden Versuchsergebnissen der Kompressionsversuche lassen sich daraus die in der folgenden Tabelle aufgeführten Kriechbeiwerte ableiten:

Tabelle 5: Kriechbeiwerte nach BUISMANN aus Kompressionsversuchen

Bodenart (Schicht)	Kriechbeiwert c_B [-]		
	Minimum	Mittelwert	Maximum
Geschiebemergel, breiig bis weich- steif (SB11) (6 Zeitsetzungen)	0,0011	0,0013	0,0016
Geschiebemergel, mind. steif (SB12) (8 Zeitsetzungen)	0,0007	0,0013	0,0019
Beckenschluff (SB13) (4 Zeitsetzungen)	0,0013	0,0016	0,0019

4.5.7 Flügelscherversuche

Zur Bestimmung der undränierten Scherfestigkeit der in der Borgstedter Enge ab der Gewässersohle anstehenden Mudde wurden Flügelsondierungen mit der Laborflügelsonde an ungestörten Proben durchgeführt. Die Versuchsergebnisse sind Anlage 4.6 zu entnehmen.

Der Korrekturfaktor zur Bestimmung des Scherwiderstands c_{fu} wird gemäß DIN 4094-4¹³ näherungsweise anhand der Plastizitätszahl I_P und der Fließgrenze w_L aus den Konsistenzgrenzenbestimmungen ermittelt:

Tabelle 6: Korrekturfaktor zur Bestimmung des Scherwiderstands c_{fu}

Bodenart	Plastizitätszahl I_P	Fließgrenze w_L	gewählter Korrekturfaktor μ
Mudde	ca. 80 %	ca. 170 %	0,6

Die aus den Flügelscherversuchen abgeleiteten und korrigierten Werte der Flügelscherfestigkeit c_{fu} sind in folgender Tabelle zusammengefasst:

¹³ DIN 4094-4: Baugrund – Felduntersuchungen - Teil 4: Flügelscherversuche

Tabelle 7: Ergebnisse der Flügelscherversuche

Bohrung Tiefe	Wassergehalt w	max. Scherwider- stand c_{fv}	Korrekturfaktor μ	korrigierter Scherwi- derstand c_{fu}
[m u. Sohle]	[%]	[kN/m ²]	[-]	[kN/m ²]
B40 8,00-8,25	208	8,6	0,6	5,2
4,00-4,25	242	9,2	0,6	5,5

4.5.8 Betondruckfestigkeit an Betonkernen der Senkkästen

Aus mehreren Bohrkernen des Betons der Senkkästen wurde die Betondruckfestigkeit ermittelt. Die Bohrkern mit den Bezeichnungen KB03, KB04, KB06a und KB07 wurden im Zuge des Durchbohrens der Senkkästen an folgende Punkten und Tiefen entnommen:

Probe Nr. KB03: Entnahme im Senkkasten nördl. Kanalufer, Bohrung „Senkkasten 02“ (s. Anlage 3.16), Entnahme aus Senkkastendecke

Probe Nr. KB04: Entnahme im Senkkasten nördl. Kanalufer, Bohrung „Senkkasten 02“ (s. Anlage 3.16), Entnahme aus Senkkastensohle

Probe Nr. KB06a: Entnahme im Senkkasten südl. Kanalufer, Bohrung „Senkkasten 03“ (s. Anlage 3.18), Entnahme aus Senkkastensohle

Probe Nr. KB07: Entnahme im Senkkasten südl. Kanalufer, Bohrung „Senkkasten 04“ (s. Anlage 3.18), Entnahme aus Senkkastendecke

Die Auswertung ist diesem Bericht als Anlage 6 beigelegt. Demnach wird mit gemessenen Betondruckfestigkeiten in einer Bandbreite von 39,3 N/mm² bis 67,2 N/mm² (Mittelwert 53 N/mm²) eine charakteristische Betondruckfestigkeit des Bauwerksbetons von $f_{ck,is} = 42$ N/mm² abgeleitet, was einer Festigkeitsklasse von C35/45 nach DIN 13791¹⁴ entspricht.

4.5.9 Dissipationstests

Mit den in der Borgstedter Enge ausgeführten Drucksondierungen wurden in unterschiedlichen Tiefen mehrere Dissipationstests gemäß DIN EN ISO 22476-1¹⁵ durchgeführt. Hiermit sollte im Porengrundwasserleiter unterhalb der gering durchlässigen Muddeschichten die Grundwasserdruckhöhe gemessen werden, um festzustellen, ob und in welchem Ausmaß in Relation zu den Wasserständen in der Borgstedter Enge artesisch gespannte Verhältnisse vorliegen.

¹⁴ DIN EN 13791: Bewertung der Druckfestigkeit von Beton in Bauwerken oder in Bauwerksteilen

¹⁵ DIN EN ISO 22476-1: Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Felduntersuchungen – Teil 1: Drucksondierungen mit elektrischen Messwertaufnehmern und Messeinrichtungen für den Porenwasserdruck

Die in der Anlage 4.7 dargestellten Ergebnisse der Dissipationstests wurden daher generell in den gut durchlässigen Böden unterhalb der holozänen Muddeschicht ausgeführt. Zum Teil wurden die Dissipationstests auch in der hydraulisch gering durchlässigen Mudde ausgeführt, wobei diese Versuche für die oben beschriebene Zielsetzung der Überprüfung artesisch gespannter Verhältnisse im Grundwasserleiter nicht herangezogen werden können.

Die nachfolgende Tabelle enthält eine Zusammenstellung und Auswertung der Ergebnisse der unterhalb der Muddeschicht im Grundwasserleiter durchgeführten Dissipationstests bezüglich des Vorliegens artesisch gespannter Verhältnisse.

Tabelle 8: Auswertung der Ergebnisse der Dissipationstests

Sondierung	Wasserstand NOK	Gewässersohle Ansatzhöhe DS Testtiefe	gemessener Porenwasserdruck ¹⁾	hydrostatischer Wasserdruck ²⁾	artesischer Druck im GW-Leiter
	[mNN]	[mNN]	[kN/m ²]	[kN/m ²]	[kN/m ²]
DS41	-0,13	-3,85 -7,85 -17,85	198	174	24
DS41	-0,13	-3,85 -7,85 -20,86	218	203	15
DS43	-0,12	-3,56 -6,04 -23,10	275	225	50
DS62A	-0,23	-3,00 -4,87 -14,87	184	144	40
DS70	-0,11	-1,51 -5,20 -13,20	150	128	22

¹⁾ zum Versuchsende

²⁾ aus Differenz zwischen Wasserspiegel NOK und Testtiefe

Aus den Ergebnissen lässt sich ableiten, dass im Grundwasserleiter unterhalb der Muddeschicht der Borgstedter Enge artesisch gespannte Verhältnisse vorliegen. Die mit den Dissipationstests gemessenen Porenwasserdrücke überschreiten hierbei die hydrostatisch zu erwartenden Porenwasserdrücke um 15 kN/m² bis 50 kN/m² bzw. im Mittel um ca. 30 kN/m². Zur hydrogeologischen Einordnung dieses Phänomens wird auf Abschnitt 4.1.3 verwiesen.

4.6 Chemische Analysen des Bodens

4.6.1 Allgemeines

Für das Untersuchungsgebiet liegen keine Hinweise aus dem Altlastenhinweiskataster vor, s. Abschnitt 4.1.4. Unabhängig hiervon wurde durch mehrere chemische Analysen an Bodenproben eine mögliche chemische Belastung überprüft.

Der im Zuge der Baumaßnahme auszuhebende Boden ist hinsichtlich seiner Weiterverwendung bzw. Verbringung und Entsorgung i. W. auf Grundlage der LAGA-Einstufung bzw. Zuordnung („Z-Werte“) zu beurteilen.

Die Z-Werte gemäß LAGA¹⁶ der Aushubböden führen zu folgenden Konsequenzen hinsichtlich des weitergehenden Einbaus dieser Böden:

Einbauklasse Z 0:	uneingeschränkter Einbau
Einbauklasse Z 1.1:	eingeschränkter offener Einbau
Einbauklasse Z 1.2:	eingeschränkter offener Einbau in hydrogeologisch günstigen Gebieten
Einbauklasse Z 2:	eingeschränkter Einbau mit definierten technischen Sicherungsmaßnahmen
Einbauklasse > Z 2:	Einbau in Deponien/Dekontamination des Bodens.

4.6.2 Untersuchungsergebnisse

Zur weiteren Untersuchung, ob mit erhöhten chemischen Belastungen des Bodenmaterials an den Pfeilerstandorten, des Füllmaterials aus den Senkkästen sowie den Auffüllungen im Bereich der auszubauenden Kaianlage am Südufer der Borgstedter Enge zu rechnen ist, wurden insgesamt 15 chemische Untersuchungen auf den Komplettumfang nach LAGA (Feststoff und Eluat) durchgeführt.

Für die Untersuchungen der Pfeilerstandorte wurden gleiche Bodenarten benachbarter Achsen zusammen beprobt und analysiert. Dabei wurden in Abstimmung mit dem AG neun Mischproben aus unterschiedlichen Tiefenbereichen untersucht. Die Beprobungspunkte wurden möglichst gleichmäßig auf die topographisch zu unterscheidenden Bereiche verteilt (landseitiger Bereich Nord, Borgstedter Enge, Rader Insel, landseitiger Bereich Süd). Die Untersuchungsergebnisse sind in Anlage 5.1 dargestellt und in der Tabelle 9 zusammengefasst.

Für die Untersuchungen des Materials oberhalb und innerhalb der Senkkästen wurden beide Senkkästen beprobt. Insgesamt wurden vier Mischproben untersucht. Die Untersuchungsergebnisse sind in Anlage 5.1 dargestellt und in der Tabelle 10 zusammengefasst.

¹⁶ Mitteilung der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA), Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen – Technische Regeln Boden – Stand: 31.08.2004

Für die Untersuchungen der aufgefüllten Böden und des oberflächennahen gewachsenen Bodens im Bereich der Kaianlage am Südufer der Borgstedter Enge wurden zwei Mischproben untersucht. Die Untersuchungsergebnisse sind in Anlage 5.1 dargestellt und in der Tabelle 11 zusammengefasst.

Tabelle 9: Übersicht über die Ergebnisse der LAGA-Analytik, Pfeilerstandorte Achsen 20 bis 160

Probenbezeichnung	Tiefe [m u. GOK]	Aufschluss / Achse	Bodenart	Zuordnung gem. LAGA	maßgebende Parameter
MP31	5,0 - 20,0	B41, B43 Achsen 20, 30	Sand, z.T. schwach kiesig, schluffig	Z1.2	Leitfähigkeit
MP32	30,0 - 35,0 / 2,0 - 3,0	B42, GWM04 Achsen 20, 30	Geschiebemergel / -lehm	Z0	-
MP14	0,0 - 7,0	B37, B38, B40 Achsen 40-60	Mudde / Schluff (organisch)	> Z2	TOC, Chlorid, Sulfat
MP15	16,0 - 26,0	B37, B38, B40 Achsen 40-60	Schluff	Z0	-
MP23	10,0 - 20,0	B36, B39, B58 Achsen 40-60	Sand	Z1.2	Chlorid
MP21	8,0 - 12,00	B28, B32, B34 Achsen 80, 100, 120	Geschiebemergel	Z1.2	Sulfat
MP22	1,0 - 3,10	GWM03, B27, B31 Achsen 90, 100, 120	Sand	Z0	-
MP29	3,0 - 16,0	B22, B24 Achsen 150, 160	Schluff, feinsandig, tonig, z.T. lehmig	Z0	-
MP30	8, 0 - 18,0	B23, B25, GWM01 Achse 140-160	Sand, z.T. schwach schluffig und kiesig	Z0	-

Bei der Probe des gewachsenen Sandes aus dem landseitigen Bereich nördlich der Borgstedter Enge wurde für den gewachsenen Sand eine erhöhte Leitfähigkeit, entsprechend einer Zuordnungsklasse von Z1.2, festgestellt.

Für die Mudde und die die unterlagernden Sande aus der Borgstedter Enge ergeben sich Zuordnungsklassen von > Z2 (Mudde) und Z1.2 (gewachsene Sande), wobei als maßgebende Parameter der Chlorid-Gehalt sowie bei der Mudde der TOC und der Sulfat-Gehalt hervorzuheben sind. Bei dem schluffigen Bodenmaterial unterhalb der gewachsenen Sande wurde keine Belastung festgestellt.

Des Weiteren ergibt sich für die Probe des oberen Geschiebemergelhorizonts von der Rader Insel eine Zuordnungs-kategorie von Z1.2 aufgrund des Parameters Sulfat.

Ergänzend zu den LAGA-Analysen wurde die Mudde (Aufschluss B40, Probe UP1) im Hinblick auf eine mögliche Metallsulfidbildung bei der Belüftung des Bodens auf die Parameter Schwefel gesamt, Sulfid, Sulfat, pH-Wert (vor und nach der Analyse) sowie auf den Glühverlust hin untersucht. Die Analyseergebnisse sind der Anlage 5.2 zu entnehmen. Die Untersuchung des Glühverlusts dient der Überprüfung der Repräsentativität der Muddeprobe B40, UP1. Mit einem Glühverlust von 29,0 % liegt das Ergebnis der Probe B40, UP1, in der Bandbreite der übrigen analysierten Proben, siehe auch Kapitel 4.5.1. Eine Veränderung des pH-Wertes vor und nach der Analytik infolge der Belüftung (Sauerstoffzufuhr) während der Versuchsdurchführung wurde mit den Analysen nicht festgestellt.

Tabelle 10: Übersicht über die Ergebnisse der LAGA-Analytik, Senkkästen bzw. Pfeilerstandorte, Achsen 130 und 140

Probenbezeichnung	Tiefe [m u. GOK]	Aufschluss / Achse	Bodenart	Zuordnung gem. LAGA	maßgebende Parameter
MP27	3,0 - 4,3	Senkkasten 01 Achse 130	Auffüllung, Kies-Sand- Schluff-Gemisch	Z0	-
MP28	10,0 - 13,0	Senkkasten 01 Achse 130	Auffüllung, Sand	Z1.2	Chlorid
MP33	3,0 - 5,0	Senkkasten 03 Achse 140	Auffüllung, Kies, sandig, schluffig, steinig	> Z2	Blei, Cadmium, Kupfer, Zink
MP34	15,0 - 20,0	Senkkasten 03 Achse 140	Auffüllung, Sand	> Z2	Chlorid

Bei dem nördlich des NOK vorhandenen Senkkasten weisen das Bodenmaterial oberhalb des Senkkastens sowie die Füllung des Senkkastens keine bzw. nur geringe Belastungen auf (Zuordnungs-kategorie Z1.2 / Chlorid).

Bei dem südlich des NOK vorhandenen Senkkasten wurden für das Bodenmaterial oberhalb des Senkkastens sowie für die Füllung des Senkkastens Zuordnungs-kategorien von > Z2 bestimmt. Die maßgebenden Parameter sind dabei Blei, Cadmium, Kupfer, Zink bzw. Chlorid. Für die Proben des Aufschlusses „Senkkasten 03“ (MP33 und MP34) liegt eine Erweiterungsanalytik gemäß DepV vor, welche für die analysierten Parameter die Einordnung in die Deponieklasse 1 (maßgebende Parameter Antimon (MP33) und Chlorid (MP34)) ergibt, s. Anlage 5.1.

Tabelle 11: Übersicht über die Ergebnisse der LAGA-Analytik, Kaianlage Fa. Schreiber / Pfeilerstandorte Achse 70

Probenbezeichnung	Tiefe [m u. GOK]	Aufschluss / Achse	Bodenart	Zuordnung gem. LAGA	maßgebende Parameter
MP25	0,20 - 3,30	B35 / Achse 70	Auffüllung Kaianlage, Sand	Z0	-
MP26	3,30 - 8,60	B35 / Achse 70	gewachsene Sande / Kiese	Z0	-

Bei dem Bodenmaterial der Proben MP25 und MP26 wurden Konzentrationen entsprechend einer Zuordnungs-kategorie Z0 festgestellt.

4.7 Wasseranalytik

Aus den Grundwassermessstellen GWM01, GWM03 und GWM04 wurden drei Wasserproben entnommen und durch das Labor GBA, Pinneberg, auf beton- und stahlangreifende Inhaltsstoffe gem. DIN 4030¹⁷ bzw. DIN 50929¹⁸ untersucht. Die detaillierten Ergebnisse der Analysen sind der Anlage 5.4 zu entnehmen und in der folgenden Tabelle zusammengefasst:

Tabelle 12: Übersicht über die Analysenergebnisse auf Beton- und Stahlaggressivität

Entnahmestelle	Betonaggressivität gem. DIN 4030	Stahlaggressivität gem. DIN 50929	
		Mulden- und Lochkorrosionswahrscheinlichkeit	Flächenkorrosionswahrscheinlichkeit
GWM01	nicht betonangreifend	sehr gering	sehr gering
GWM03	nicht betonangreifend	sehr gering	sehr gering
GWM04	nicht betonangreifend	sehr gering	sehr gering

Weiterhin wurde eine auf der Rader Insel aus der Grundwassermessstelle GWM03 entnommene Wasserprobe auf ausgewählte Parameter zur Beurteilung der Wasserqualität z. B. im Hinblick auf eine Einleitung von Baugrubenförderwasser ins offene Gewässer hin untersucht, s. Anlage 5.4. Das

¹⁷ DIN 4030-1: Beurteilung betonangreifender Wässer, Böden, und Gase – Teil 1: Grundlagen und Grenzwerte

¹⁸ DIN 50929-3: Korrosion der Metalle; Korrosionswahrscheinlichkeit metallischer Werkstoffe bei äußerer Korrosionsbelastung; Rohrleitungen und Bauteile in Böden und Wässern

Analysenergebnis zeigt, dass die überwiegende Anzahl der analysierten Metalle unterhalb der Nachweisgrenze liegen bzw. die Konzentrationen sehr gering sind. Auch die Eisenkonzentration ist mit 0,32 mg/l (Eisen, ges.) relativ niedrig.

Hinsichtlich einer Ableitung von Baugrubenwasser ist zu berücksichtigen, dass von der zuständigen Aufsichtsbehörde (Wasserbehörde Kreis Rendsburg-Eckernförde) in der Regel keine verbindlichen Grenzwerte für die Einleitung in Oberflächengewässer oder einen RW-Kanal festgelegt werden. Diese werden von Fall zu Fall, abhängig von den Einleitwerten, dem Ort der Einleitung und der Jahreszeit festgelegt.

Sofern eine Grundwasserabsenkung erforderlich wird, sind im Zuge der Erstellung der wasserrechtlichen Anträge die Einleitbedingungen mit der zuständigen Behörde rechtzeitig abzustimmen.

4.8 Asphalt, PAK-Analytik

An einer Asphaltprobe (B35, bauzeitlicher Anleger Süd) wurden zur Beurteilung der Pechhaltigkeit PAK-Bestimmungen (Polycyclische Aromatische Kohlenwasserstoffe) mit Untersuchungsumfang gem. EPA (amerikanische Bundesumweltbehörde USEPA) durchgeführt. Die mit diesem Umfang analysierten 16 Einzelverbindungen können erfahrungsgemäß in guter Näherung stellvertretend für die weitaus größere Anzahl vorkommender Einzelsubstanzen zur Beurteilung herangezogen werden.

Die Untersuchungsergebnisse sind in Anlage 5.3 dargestellt und in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst:

Tabelle 13: Übersicht über die Ergebnisse der PAK-Analytik

Probenbezeichnung	Aufschluss / Achse	PAK Gehalt [mg / kg]	Bezeichnung (RuVa-StBo 1-2005 ¹⁾)
AP1 / 35	B35 Achse 70	nicht nachweisbar	Ausbauasphalt

¹⁾ Richtlinie für die umweltverträgliche Verwertung von Ausbaustoffen mit teer- / pechtypischen Bestandteilen sowie für die Verwertung von Ausbauasphalt im Straßenbau, Ausgabe 2001, Fassung 2005

5 Auswertung und Bewertung der geotechnischen Untersuchungsergebnisse

5.1 Charakteristische Bodenkenngrößen für geotechnische Berechnungen

Auf Grundlage der Baugrunderkundung sowie unserer Erfahrungen mit vergleichbaren Böden werden die in der nachfolgenden Tabelle zusammengestellten charakteristischen Bodenkenngrößen angegeben.

Tabelle 14: Charakteristische Bodenkenngrößen

Bodenschicht	Wichte	Scherparameter ¹⁾	undrÄnirte KohÄsion	Steifemodul ²⁾
	γ_k / γ'_k	ϕ'_k / c'_k	$c_{u,k}$	$E_{s,k}$
	[kN/m ³]	[°] / [kN/m ²]	[kN/m ²]	[MN/m ²]
SB1: Mutterboden, org. Sand, schluffig, locker	16 / 8	22,5 / 2,5	k.A.	k.A.
SB2: Auffüllung: Sand, locker	17 / 9	32,5 / 0	-	≥ 5
SB3: Auffüllung: Sand, ≥ mitteldicht	19 / 11	35,0 / 0	-	40
SB4: Auffüllung: Schluff, sandig	19 / 9	25,0 / 5	-	≥ 3
SB5: Sand, locker	17 / 9	32,5 / 0	-	10-30
SB6: Sand, mitteldicht ³⁾	18 / 10	35,0 / 0	-	30-70
SB7: Sand, dicht bzw. sehr dicht ³⁾	19 / 11	37,5 / 0	-	≥ 70
SB8: Sand, schluffig ³⁾	19 / 11	32,5 / 0	-	≥ 30
SB9: Kiese, mind. mitteldicht ³⁾	19 / 11	37,5 / 0	-	≥ 50
SB10: Geschiebelehm ³⁾	20 / 10	27,5 / 10	≥ 40	≥ 15
SB11: Geschiebemergel, weich, weich-steif ³⁾	21 / 11	30,0 / 7,5	≥ 40	≥ 10
SB12: Geschiebemergel, mind. steif ³⁾	22 / 12	30,0 / 17,5	≥ 100	≥ 30
SB13: Beckenschluff, Beckenton ³⁾	20 / 10	27,5 / 20	≥ 100	≥ 20
SB14: Torf	11 / 1	17,5 / 5	≥ 7,5	0,4-1,0
SB15: Mudde, org. Schluff, breiig	13 / 3	20 / 2,5	≥ 5	0,5-1,5

¹⁾ Der Erddruckneigungswinkel ist im Torf und der Mudde zu $\delta_k = 0$ zu setzen. In den übrigen Böden kann ein Erddruckneigungswinkel von $\delta_k \leq 2/3 \phi'_k$ angesetzt werden.

²⁾ Bei Wiederbelastungsverhältnissen können beim Torf und bei der Mudde die 2-fachen Werte des Steifemoduls angesetzt werden. Bei den übrigen Böden können maximal die 3-fachen Werte angesetzt werden.

³⁾ In den pleistozänen Böden ist aufgrund der geologischen Entstehung mit Steinen und Blöcken bis zur Findlingsgröße zu rechnen, die ein Hindernis bei der Einbringung von Gründungselementen darstellen können und ggf. eine Hinderisbeseitigung erfordern.

5.2 Charakteristische Grund- und Schichtwasserstände

Auf Grundlage der gemessenen Wasserstände werden die folgenden für die Bemessung anzusetzenden höchsten und niedrigsten Grundwasserstände (Bemessungswasserstände) angegeben.

Aufgrund der engen Koppelung der Grundwasserstände mit den Wasserständen im NOK gelten die genannten Wasserstände unter der Voraussetzung, dass die Wasserstände im NOK auf dem derzeit bekannten Niveau beibehalten werden.

Tabelle 15: Charakteristische Grundwasserstände

Bereich	Höchster charakteristischer Grundwasserstand	Niedrigster charakteristischer Grundwasserstand
Achse 10 (WL Nord)	+5,5 mNN	+1,5 mNN
Achse 20 (nördliches Vorland)	+2,0 mNN	+0,5 mNN
Achse 30 (nördliches Vorland)	+1,0 mNN	-0,5 mNN
Achsen 40 bis 60	offenes Gewässer	
Achse 70 (Rader Insel)	+2,5 mNN ¹⁾	±0,0 mNN
Achse 80 (Rader Insel)	+2,5 mNN	±0,0 mNN
Achse 90 (Rader Insel)	+2,5 mNN	±0,0 mNN
Achse 100 (Rader Insel)	+2,5 mNN	±0,0 mNN
Achse 110 (Rader Insel)	+2,5 mNN	±0,0 mNN
Achse 120 (Rader Insel)	+2,5 mNN	±0,0 mNN
Achse 130 (nördlicher Kanalpfeiler)	+1,5 mNN	-0,5 mNN
Achse 140 (südlicher Kanalpfeiler)	+1,5 mNN	-0,5 mNN
Achse 150 (südliches Vorland)	+2,5 mNN	+0,5 mNN
Achse 160 (südliches Vorland)	+5,0 mNN	+1,0 mNN
Achse 170 (WL Süd)	+5,5 mNN	+1,0 mNN

¹⁾ Für die Bemessung des bauzeitlichen Anlegers am südlichen Ufer der Borgstedter Enge wird die Berücksichtigung eines höchsten charakteristischen Grundwasserstands von +3,0 mNN empfohlen.

Gegenüber den angegebenen Wasserständen höhere Wasserstände können lokal und temporär auf bindigen Schichten als Schicht- bzw. Stauwasser auftreten. Dies betrifft v. a. Die Widerlagerbereiche (Achsen 10 und 170) sowie das südliche Vorland (Achsen 150 und 160). Derartige gegenüber den Werten der Tabelle erhöhte Schichtwasserstände sind in Abhängigkeit der geotechnischen Aufgabenstellung bei Bedarf in Abstimmung mit unserem Büro im Einzelfall sinnvoll festzulegen.

In dem das Planungsgebiet unterlagernden Porengrundwasserleiter sind in größeren Tiefen artesisch gespannte Verhältnissen vorhanden (s. Abschnitt 4.5.9), die v.a. in Zusammenhang mit der Herstellung von Pfahlgründungen von Bedeutung sein können. Angaben diesbezüglich erfolgen in der Fortsetzung dieses Geotechnischen Berichts (Band 2).

5.3 Bodenklassifizierung und Homogenbereiche

Zur Beschreibung der leistungs- und verfahrenstechnischen Eigenschaften hinsichtlich der Bearbeitbarkeit des Baugrunds erfolgt in der Tabelle 16 eine Zuordnung der Schichten gem. Abschnitt 5.1 in Homogenbereiche mit für das jeweilige Bauverfahren vergleichbaren Eigenschaften. Die für die einzelnen Schichten kennzeichnenden Parameter können der Anlage 8 zu diesem Bericht entnommen werden.

Tabelle 16: Zuordnung der Schichten in Homogenbereiche mit Bezug auf die VOB, Teil C

Bodenschicht	I	II	III	IV	V
	DIN 18300 Erdarbeiten	DIN 18301 Bohrarbeiten	DIN 18304 Ramm-, Rüt- tel-, Pressar- beiten	DIN 18311 Nassbagger- arbeiten	DIN 18321 Düsenstrahlar- beiten
SB1: Mutterboden, org. Sand, schluffig, locker			III A		k. A. ¹⁾
SB2: Auffüllung: Sand, lo- cker				k. A. ¹⁾	V A
SB3: Auffüllung: Sand, ≥ mitteldicht		II A	III B		V B
SB4: Auffüllung: Schluff, sandig	I A		III C		V C
SB5: Sand, locker			III A	IV A	V A
SB6: Sand, mitteldicht					
SB7: Sand, dicht bzw. sehr dicht			III B		V B
SB8: Sand, schluffig		II B			
SB9: Kiese, mind. mittel- dicht	I B	II C	III D		V D
SB10: Geschiebelehm				k. A. ¹⁾	
SB11: Geschiebemergel, weich, weich-steif	I C	II D	III E		V E
SB12: Geschiebemergel, mind. steif					
SB13: Beckenschluff, Be- ckenton	I D	II E	III F		V F
SB14: Torf	I E				
SB15: Mudde, org. Schluff, breiig	I F	II F	III G	IV A	k. A. ¹⁾

¹⁾ k.A.: Bodenarten vom Bauverfahren nicht betroffen

Kempfert Geotechnik GmbH



Dipl.-Ing. H. Vierck

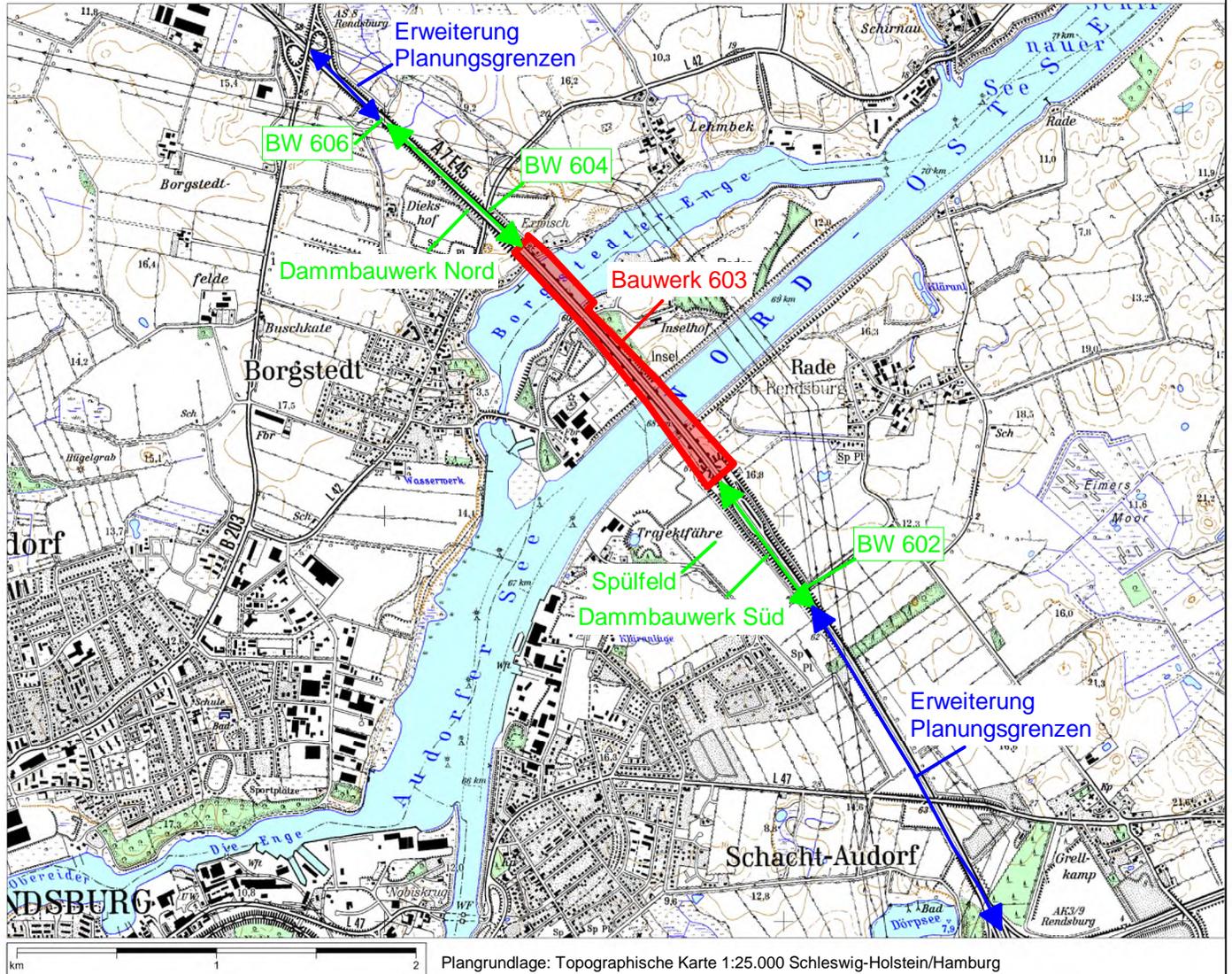
i. A.



Dipl.-Geol. A. Theodor

Anlage 1

Übersichtslageplan



Legende:

 Untersuchungsgebiet

BAB A7, Ersatzneubau Rader Hochbrücke, BW603
 Geotechnischer Bericht
 Übersichtslageplan

Anlage 2

Lageplan der Untergrundaufschlüsse