

Hamburg · Berlin · Kiel
Ludwigshafen · Oldenburg

Heinrich-Hertz-Straße 116
22083 Hamburg
Tel.: (0 40) 22 70 00 - 0
Fax: (0 40) 22 70 00 - 28

www.igb-ingenieure.de

Hamburg, 15.04.2011
10-152 • ZI/Ca/Pet/WI

Untersuchung der Deichsicherheit für Kompensationsmaßnahmen an der Stör

- **Maßnahmengbiet Kellinghusen**

Ermittlung und Bewertung der Deichsicherheit

Auftraggeber:

Wasser- und Schifffahrtsamt Hamburg
Projektbüro Fahrrinnenanpassung
Moorweidenstraße 14
20148 Hamburg

INHALTSVERZEICHNIS

| | Seite |
|--|-----------|
| 1 EINLEITUNG | 3 |
| 2 AUFGABENSTELLUNG..... | 3 |
| 3 UNTERLAGEN | 4 |
| 4 BAUVORHABEN..... | 5 |
| 4.1 Bestand/Ist-Zustand..... | 5 |
| 4.2 Geplante Maßnahmen/Plan-Zustand | 6 |
| 5 BAUGRUNDVERHÄLTNISSE..... | 7 |
| 5.1 Aufschluss- und Laborprogramm | 7 |
| 5.2 Untergrundaufbau | 8 |
| 5.2.1 Deckschicht | 9 |
| 5.2.2 Aufgefüllter Sand (Deichkörper) | 9 |
| 5.2.3 Aufgefüllter Klei (Deichkörper) | 10 |
| 5.2.4 Mutterboden..... | 10 |
| 5.2.5 Gewachsener Sand | 10 |
| 5.2.6 Geschiebemergel..... | 11 |
| 5.3 Grundwasser | 12 |
| 6 BODENKENNWERTE | 12 |
| 7 STANDSICHERHEITSUNTERSUCHUNGEN, STRÖMUNGSBERECHNUNGEN | 13 |
| 7.1 Berechnungsverfahren..... | 15 |
| 7.2 Berechnungsmodelle | 16 |
| 7.3 Berechnungsablauf und Randbedingungen | 16 |
| 7.4 Berechnungsergebnisse | 18 |
| 7.5 Gegenüberstellung Ergebnisse Ist-Zustand/Plan-Zustand | 20 |
| 8 FOLGERUNGEN UND EMPFEHLUNGEN | 21 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 9 | SICHERUNGSMABNAHMEN AM MITTELDEICH | 22 |
| 10 | ZUSAMMENFASSUNG | 23 |
| | ANLAGENVERZEICHNIS..... | 25 |

1 EINLEITUNG

Im Rahmen der geplanten Fahrrinnenanpassung der Elbe an die Erfordernisse der Containerschiffahrt und den daraus resultierenden Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen sind an der Stör Veränderungen von einzelnen außendeichs der Mitteldeiche gelegenen Teilflächen vorgesehen.

Die Teilflächen liegen zwischen Störufer und Mitteldeich (Hauptdeichlinie der Stör), sie sind mit Sommerdeichen eingefasst. Geplant ist die punktuelle Öffnung der Sommerdeiche. Damit verbunden ist eine Vergrößerung des vorhandenen Tideeinflusses bis an den Mitteldeich.

Die vorgesehenen Ausgleichsmaßnahmen sind mit lokalen Veränderungen der hydrologischen Gegebenheiten verbunden. Im Rahmen einer Abflussberechnung wurden die Auswirkungen der geplanten Maßnahmen auf den Hochwasserabfluss der Stör durch das Büro Golder Associates untersucht.

2 AUFGABENSTELLUNG

Vom Wasser- und Schifffahrtsamt Hamburg (WSA Hamburg) wurden wir beauftragt, die Auswirkungen auf die Sicherheit der Hauptdeiche bzw. der Hauptdeichlinien in den Maßnahmengebieten Neuenkirchen, Bahrenfleth, Siethfeld und Kellinghusen zu untersuchen. Dieser vorliegende Berichtsteil befasst sich mit dem Gebiet Kellinghusen.

Im Rahmen der genannten Aufgabenstellung waren zunächst der Deichaufbau sowie die Untergrundverhältnisse im Bereich des Mitteldeiches und des Deichvorlandes durch Baugrundaufschlüsse zu erkunden sowie die geotechnischen Verhältnisse zu beurteilen.

Auf Grundlage dieser Untersuchungsergebnisse sind Berechnungsprofile und Berechnungskennwerte festzulegen, um anhand von Standsicherheitsuntersuchungen und Durchströmungsberechnungen die Deichsicherheit zu ermitteln und zu bewerten.

Diese Untersuchungen sollen für verschiedene Wasserstände durchgeführt werden und zwar für den Ist-Zustand, d. h. den derzeitigen Zustand mit vollständigem Sommerdeich

und für den Plan-Zustand, d. h. den künftigen Zustand nach punktueller Öffnung der Sommerdeiche.

Dabei sind in Abstimmung mit dem WSA Hamburg die Wasserstände

- mittleres Tidehochwasser
- Wasserstand in OK Sommerdeich
- Wasserstand bei HQ 100

näher zu betrachten.

Grundlagen für die Erfassung der aktuellen Deich- und Geländehöhen liefert das im Zuge der Erkundungsarbeiten vorgenommene Aufmaß von Querprofilen des Mitteldeiches.

Für die Erfassung der hydraulischen Randbedingungen (u. a. Wasserstände und Einstauzeiten) sind die Ergebnisse der Abflussberechnungen des Büros Golder zu berücksichtigen.

Die Untersuchungsergebnisse für den Ist-Zustand und den Plan-Zustand sollen gegenübergestellt werden, um Änderungen herauszuarbeiten, die sich durch Maßnahmenumsetzung ergeben können.

Bei eintretenden Defiziten sind erforderliche Maßnahmen zur Gewährleistung der Deichsicherheit zu empfehlen. Anhand einer Schätzung sollen für mögliche Ausführungsvarianten die zu erwartenden Kosten benannt werden.

3 UNTERLAGEN

Zur Ausarbeitung des vorliegenden Berichts standen uns die im Folgenden aufgeführten Unterlagen zur Verfügung:

Wasser- und Schifffahrtsamt Hamburg

- [1] Unterlagen zum Vertrag vom 28.07.2010
- [1a] Planänderungsunterlage III, Teil 12a (UVP-Screening)

Joern Thiel Baugrunduntersuchung

- [2] Schichtenverzeichnisse, BS 1 bis BS 14, vom 14. bis 16.09.2010
Ergebnisse der Rammsondierung, DPL 1 und DPL 2, vom 22.09.2010
- [3] Aufmaß Deichquerprofile vom 29.09.2010

Golder Associates

- [4] Wirkung von Ausgleichsmaßnahmen auf das Abflussverhalten der Stör
Bericht vom 04.10.2010

BWS GmbH

- [5] Ergänzung zum landschaftspflegerischen Begleitplan, Drittbetroffenheit
Bericht vom 24.06.2010
- [6] Neubau Störbrücke im Zuge der Umgehung Kellinghusen (B 206)
Schichtenverzeichnisse vom 17.07.1974

4 BAUVORHABEN

4.1 Bestand/Ist-Zustand

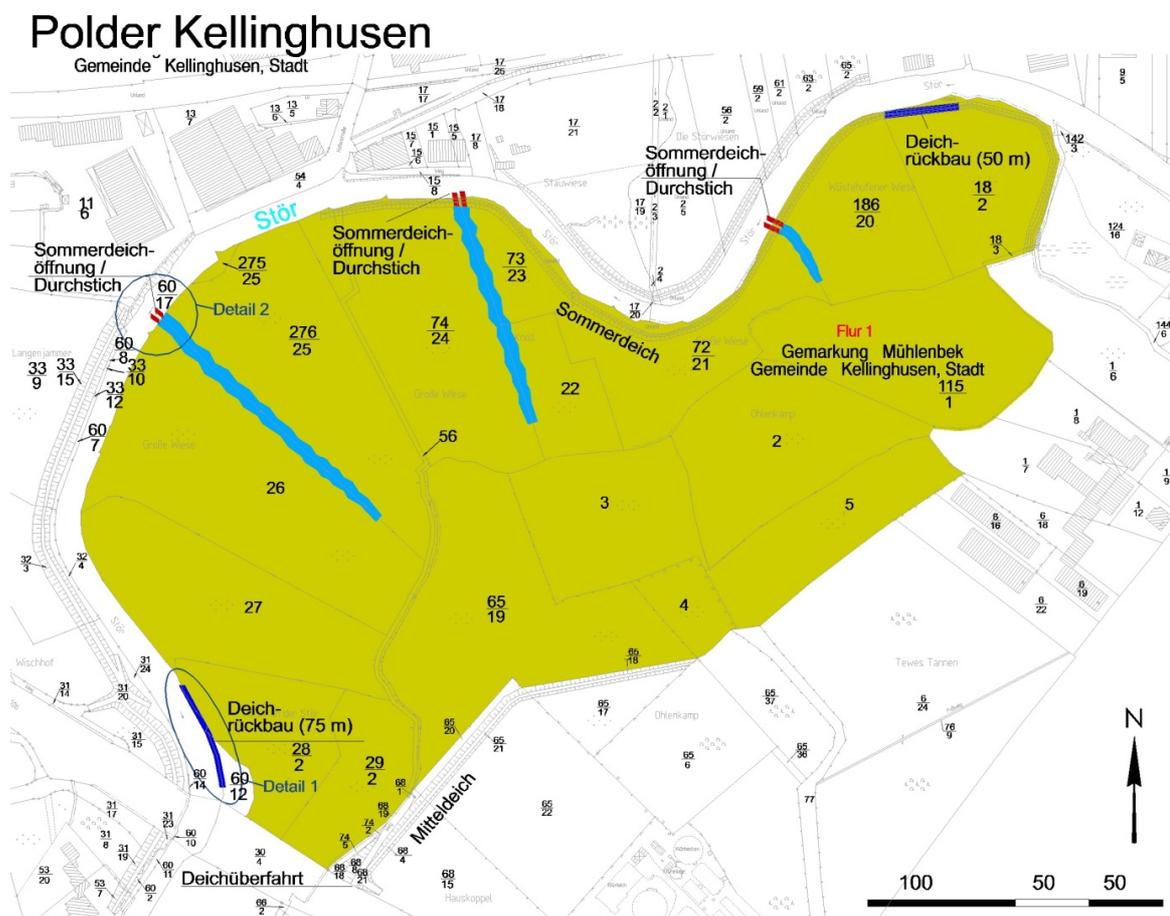
Das Maßnahmengebiet Kellinghusen liegt auf einer Fläche zwischen der Stör, dem Straßendamm der Bundesstraße B 206 und dem Mitteldeich in unmittelbarer Nähe der Ortschaft Kellinghusen. Es hat eine Fläche von etwa 19 ha. Der 300 m lange Mitteldeich bildet die rückwärtige Begrenzung des Maßnahmengebietes zwischen Straßendamm und dem nach Nordosten ansteigenden Gelände. Binnendeichs liegt die Kläranlage der Gemeinde Kellinghusen.

Das Gebiet ist auf dem Übersichtslageplan kenntlich gemacht, vgl. Anlage 1.1.2. Details sind diesem Lageplan sowie den Querprofilen für das Baugrundmodell zu entnehmen, vgl. Anlage 2.3.

Der Mitteldeich weist Kronenhöhen um + 4,0 mNN auf. Binnen liegt das Gelände auf Höhen um + 2,6 mNN bis + 2,9 mNN. Nach Nordosten steigt das Gelände binnen auf + 3,4 mNN an. Da das Gelände in Nord-Ost-Richtung ansteigt, verringert sich die Höhe des Deichkörpers von etwa 2,5 m im Westen (Station 0+250) auf etwa 0,5 m im Osten (Station 0+050).

Die vor dem Mitteldeich liegenden Wiesen werden durch Sommerdeiche (Kronenhöhe Minimum etwa + 2,3 mNN) geschützt. Die Wiesen liegen am Deichfuß auf Höhen um + 1,5 mNN in der Nähe des Straßendamms, nach Nordosten ansteigend auf etwa + 3,0 mNN. Durch die Sommerdeiche kommt es uns gemachten Angaben zu Folge im Ist-Zustand nicht zu tidebedingten Überflutungen. Gemäß [4] sind jedoch mehrmals im Jahr Überflutungen der Sommerdeiche infolge Hochwässer zu erwarten.

4.2 Geplante Maßnahmen/Plan-Zustand



Geplant ist die Öffnung des Sommerdeiches mittels Rückbau auf etwa 75 m Länge an der B 206 sowie etwa 50 m an der Mühlenbek bis auf die vorhandene Geländehöhe bei + 1,25 mNN. Darüber hinaus sind drei Durchstiche im Bereich vorhandener Gräben geplant. Einzelheiten zum geplanten Vorhaben sowie zu den Vorhabensbestandteilen sind der Planänderungsunterlage III, Teil 12a zu entnehmen [1a]. Über die geplanten Sommerdeichöffnungen soll Wasser in das Grabennetz einströmen (MThw auf + 1,72 mNN, MTnw + 1,61 mNN).

Neben dem täglichen Tideeinfluss erreichen oberwasserinduzierte Hochwässer, die bisher vom Sommerdeich zurückgehalten wurden, nun häufiger den Mitteldeich. Die Hochwässer können über mehrere Tage andauern.

Gemäß Abflussberechnung [4] sind folgende Wasserstände zu erwarten:

| | | |
|--------|------------|--------------|
| HQ 1 | + 3,07 mNN | (+ 3,07 mNN) |
| HQ 5 | + 3,23 mNN | (+ 3,24 mNN) |
| HQ 10 | + 3,28 mNN | (+ 3,29 mNN) |
| HQ 100 | + 3,39 mNN | (+ 3,40 mNN) |

Die in Klammern gesetzten Werte gelten für den Ist-Zustand, d. h. den jetzigen Zustand vor Öffnung der Sommerdeiche. Die zu erwartende Änderung der Wasserstände liegt in der Größenordnung eines Zentimeters.

Für die Tidewasserstände gelten folgende Werte:

- Ist-Zustand MThw auf + 1,76 mNN, MTnw + 1,56
- Plan Zustand MThw auf + 1,72 mNN, MTnw + 1,61

Der Tideeinfluss ist sehr gering. Die zu erwartenden Wasserstände sind nahezu unverändert.

Tief liegende Bereiche der Wiesen an der B 206 werden bei den geringen Änderungen der Tidewasserstände ständig benetzt. Höher auflaufende Tiden erreichen nach Maßnahmenumsetzung den Fuß des Mitteldeiches. Bereits bei einem jährlich auftretendem Hochwasser (HQ 1) wird der Fuß des Mitteldeiches dann etwa 1,0 m bis 1,5 m hoch eingestaut.

5 BAUGRUNDVERHÄLTNISSE

5.1 Aufschluss- und Laborprogramm

Zur Untersuchung der Baugrundverhältnisse und zur Erkundung des Deichaufbaus wurden im September 2010 Aufschlussarbeiten durchgeführt.

Der Mitteldeich wurde zwischen den Stationen 0+050 und 0+250 auf der Deichkrone sowie am Deichfuß binnen und außen, in der Böschung außen und zusätzlich im Deichvorland durch insgesamt 14 Bohrsondierungen bis in Tiefen von 8 m erkundet. Zusätzlich wurden zwei Schürfe angelegt. Zur Bestimmung der Lagerungsdichte wurden zwei leichte Rammsondierungen (DPL-5) durchgeführt. Die Ansatzpunkte der einzelnen Aufschlüsse sind auf Anlage 1.2 dargestellt.

Die bei den Aufschlussarbeiten entnommenen Bodenproben wurden von uns angesprochen. Ausgewählte Proben wurden im Labor hinsichtlich ihrer bodenmechanischen Eigenschaften untersucht.

Neben Kornverteilungskurven und Wassergehalten wurde zusätzlich an einer ungestörten Bodenprobe, die dem Schurf Sch 1 entnommen wurde, ein Durchlässigkeitsversuch durchgeführt.

5.2 Untergrunderbau

Die Ergebnisse der Untergrunderkundung sind in der Anlage 2.1 für den Längsschnitt (Deichkrone und Deichvorland) und in den Anlagen 2.2.1 bis 2.2.3 für die Querschnitte bei den Stationen 0+050, 0+150 und 0+250 höhengerecht als Bodenprofile dargestellt.

Den Bodenprofilen liegen die Schichtenverzeichnisse des Bohrunternehmers zugrunde, die von uns nach Ansprache der aus den in einzelnen Bodenschichten entnommenen Proben sowie anhand der Ergebnisse der durchgeführten Laborversuche überarbeitet und ergänzt wurden.

Danach kann der Untergrunderbau im Maßnahmenbereich Kellinghusen wie folgt beschrieben werden:

Sowohl auf dem Deichkörper sowie in den angrenzenden Flächen wurde in der Regel zunächst eine **Deckschicht** aus Mutterboden erkundet. Der Deichkörper wird fast vollständig aus **aufgefüllten Sanden** gebildet, deren Zusammensetzung uneinheitlich ist. Vereinzelt wurde im Deichkörper auch **aufgefüllter Klei** erbohrt. In der Deichaufstandsfläche stehen **gewachsene Sande** und vereinzelt der ursprüngliche **Mutterboden** an. Die Schichten werden flächendeckend von **Geschiebemergel** unterlagert.

Sande und unterlagernder Geschiebemergel wurden seinerzeit auch beim Bau der Störbrücke erkundet [6]. Bei den damaligen Aufschlussarbeiten wurden den uns vorliegenden Unterlagen zufolge am östlichen Brückenwiderlager zunächst Auffüllungen erbohrt, die von mehreren Meter mächtigen Muddeschichten unterlagert werden. Die gewachsenen Sande und der Geschiebemergel folgten darunter ab etwa 5,0 m Tiefe unter Gelände. Diese Schichten liegen im Bereich des Brückenlagers deutlich tiefer als am Mitteldeich.

5.2.1 Deckschicht

Zunächst steht flächendeckend eine Vegetationsschicht an, die im Bereich des Deichkörpers aufgefüllt wurde. Diese Schicht wird im Wesentlichen aus Mutterboden, vereinzelt aus aufgefüllten Sanden mit organischen Beimengungen und Pflanzenresten gebildet. Die erkundete Schichtdicke liegt zwischen 0,2 m und 0,7 m.

5.2.2 Aufgefüllter Sand (Deichkörper)

Der Deich wurde fast durchgehend aus Sand hergestellt. Wie auch dem Bild 1 zu entnehmen ist, wird der aufgefüllte Sand zum großen Teil aus Fein- und Mittelsand mit wechselnden Beimengungen an Grobsand und Schluff gebildet. Weiter wurden organische Bestandteile und Ziegelbruch angetroffen.

Nach den Ergebnissen der Leichten Rammsondierungen ist davon auszugehen, dass die aufgefüllten Sande überwiegend eine lediglich lockere Lagerung aufweisen.

Die Basis des aufgefüllten Sandes wurde im Westen auf Koten von etwa + 1,45 mNN erkundet, sie steigt in östliche Richtung auf Geländehöhe an.

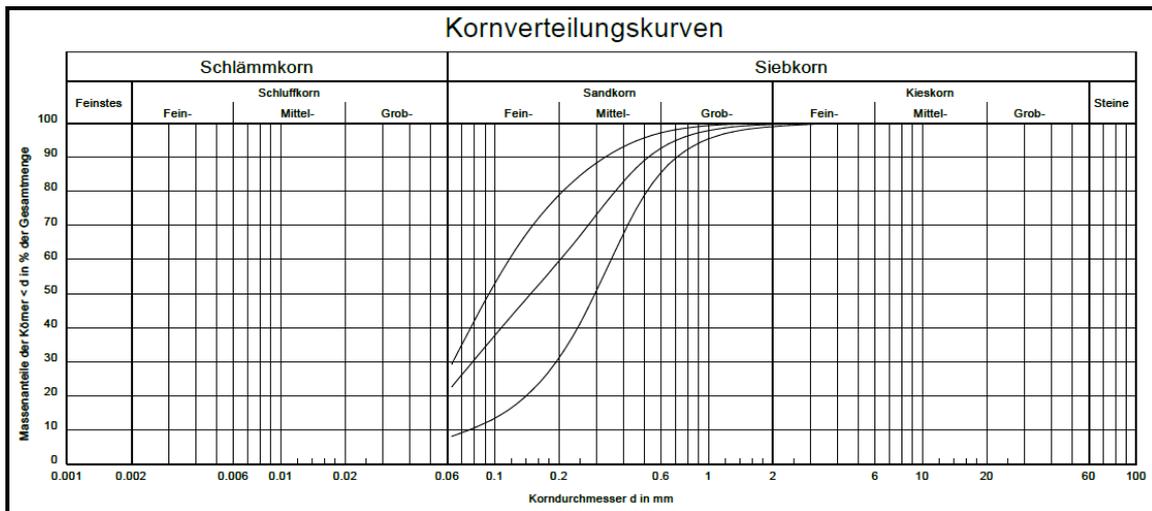


Bild 1 aufgefüllter Sand – Körnungsband

5.2.3 Aufgefüllter Klei (Deichkörper)

Bei Station 0+250 wurde mit den Aufschlüssen BS 12 (Deichkrone) und BS 13 (Böschung außen) aufgefüllter Klei von steifer Konsistenz bis in 1,7 m Tiefe bzw. 1,4 m Tiefe unter Ansatzpunkt erkundet.

Der aufgefüllte Klei ist als toniger Schluff bzw. schluffiger Ton mit organischen, teilweise auch feinsandigen Beimengungen anzusprechen. Der ermittelte Wassergehalt liegt bei 22,9 %.

5.2.4 Mutterboden

Mit einzelnen Aufschlüssen wurde unterhalb des Deichkörpers eine bis zu 1,25 m mächtige Mutterbodenschicht erbohrt. Der Mutterboden ist als schluffiger Sand mit organischen Beimengungen anzusprechen.

5.2.5 Gewachsener Sand

Der gewachsene Sand wurde etwa ab Tiefen zwischen + 1,45 mNN im Westen und + 3,7 mNN im Osten mit Schichtdicken zwischen etwa 2 m und 7 m erkundet. Wie dem Bild 2 zu entnehmen ist, besteht der untersuchte gewachsene Sand überwiegend aus Fein- und Mittelsand mit wechselnden Anteilen an Grobsand und Feinkorn.

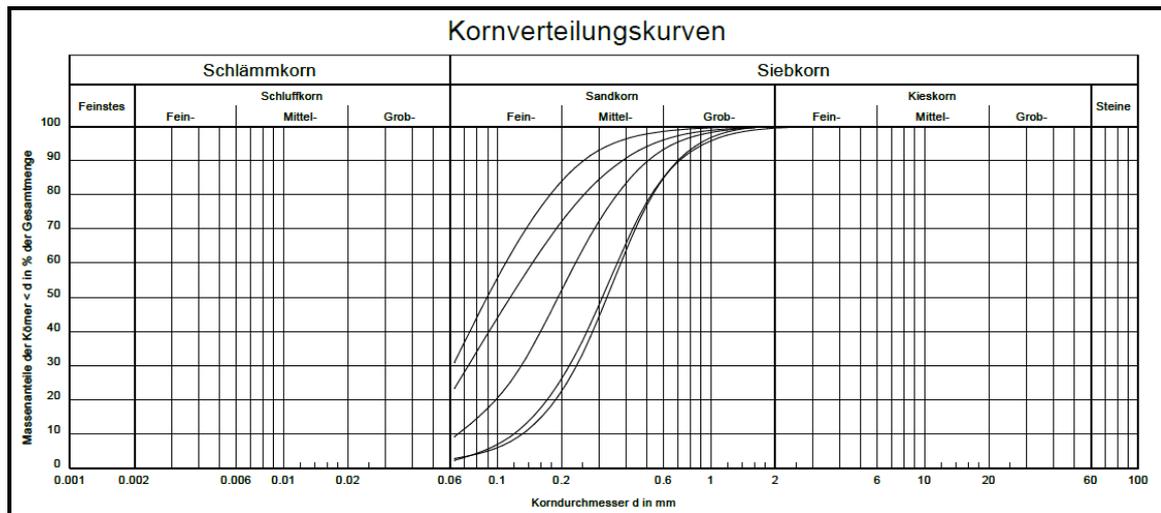


Bild 2 gewachsener Sand – Körnungsband

Die aus dem Körnungsband gemäß Häzen ermittelte Durchlässigkeit für Sande mit einem Feinkornanteil von unter 10 % liegt zwischen $5,5 \times 10^{-5}$ m/s und $2,3 \times 10^{-4}$ m/s. Die Durchlässigkeit für den gewachsenen schluffigen Sand liegt bei $2,7 \times 10^{-8}$ m/s, vgl. Versuchsergebnis an der dem Schurf 1 entnommenen ungestörten Bodenprobe. Die hier gegenüber dem o. g. Sand geringere Durchlässigkeit ist auf den höheren Feinkornanteil zurückzuführen.

Nach den Ergebnissen der Leichten Rammsondierungen weist der gewachsene Sand gegenüber dem aufgefüllten Sand eine deutlich höhere Lagerungsdichte auf. Mit Schlagzahlen von $N_{10} \geq 7$ ist die Lagerungsdichte als mindestens mitteldicht, mit Schlagzahlen von $N_{10} \geq 20$ als mindestens dicht zu bezeichnen.

5.2.6 Geschiebemergel

Der Geschiebemergelhorizont wurde auf Koten zwischen etwa – 0,3 mNN und - 1,9 mNN erbohrt und bis zu den jeweiligen Endteufen nicht durchörtert.

Der Geschiebemergel ist im Wesentlichen als sandiger, teilweise stark sandiger Schluff mit schwach tonigen und schwach kiesigen Beimengungen anzusprechen.

Die ermittelten Wassergehalte liegen für den Geschiebemergel im Mittel bei 14,0 %, vgl. Tabelle 1. Der Mergel wurde als steif und halbfest angesprochen.

| | Anzahl der Versuche | Ergebnisse | | |
|--------------------|---------------------|------------|------|------------|
| | | min | max. | Mittelwert |
| Wassergehalt w [%] | 3 | 11,8 | 17,1 | 14,0 |

Tabelle 1 Geschiebemergel – Ergebnisse bodenmechanische Laborversuche

5.3 Grundwasser

Die im Zuge der Aufschlussarbeiten angetroffenen Wasserstände sind höhengerecht neben den Bodenprofilen auf den Anlagen 2.1 bis 2.2.3 aufgetragen. Danach wurde das Grundwasser etwa in Höhen zwischen + 1,2 mNN und + 1,9 mNN eingemessen.

Die gemessenen Wasserstände sind mit den beim Aufschlussverfahren (Bohrsondierungen) üblichen Unsicherheiten behaftet. Die Messwerte sind daher nicht uneingeschränkt mit Messungen in einem ausgebauten Bohrloch oder Grundwasserpegel vergleichbar.

Da die Wasserstände in diesem Bereich in den Sanden angetroffen wurden, die als wasserdurchlässig einzustufen sind, spiegeln sie annähernd den Grundwasserstand wieder.

6 BODENKENNWERTE

Auf der Grundlage der Ergebnisse der Untergrundaufschlüsse und bodenmechanischen Laborversuche sowie unter Berücksichtigung unserer Erfahrungen mit vergleichbaren Böden können die nachfolgend aufgeführten charakteristischen Bodenkennwerte für erdstatische Berechnungen gemäß DIN 1054 (2005)¹ in Ansatz gebracht werden.

¹ DIN 1054: Baugrund – Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau (01/2005)

| Bodenart | Wichte | | Scherfestigkeit | | Durchlässigkeit k m/s | Steifemodul E _{sk} MN/m ² | Boden- gruppe DIN 18196 ² |
|-------------------|---------------------------------|----------------------------------|-----------------|-----------------------------|-----------------------------|---|---|
| | γ_k kN/m ³ | γ'_k kN/m ³ | ϕ'_k ° | c'_k kN/m ² | | | |
| Deckschicht | 18 | 8 | 27,5 | 1 | 1×10^{-5} | - | OH, SE |
| aufgefüllter Sand | 18 | 10 | 30 | 0 | 1×10^{-5} | 30 | SE, SU |
| aufgefüllter Klei | 17 | 7 | 20 | 10 | 1×10^{-10} | 5 | OT, OU |
| Mutterboden | 18 | 8 | 27,5 | 1 | 1×10^{-5} | 0,5 | OH |
| gewachsener Sand | 19 | 11 | 35 | 0 | 2×10^{-4} | 60 | SE, SU |
| Geschiebemergel | 21 | 11 | 30 | 15 | 1×10^{-7} | 20 | ST, SU |

Tabelle 2 Charakteristische Bodenkennwerte

7 STANDSICHERHEITSUNTERSUCHUNGEN, STRÖMUNGSBERECHNUNGEN

Nachfolgend werden sowohl für den Ist-Zustand als auch für den geplanten Zustand die Strömungen im Deich und im Untergrund untersucht sowie die Standsicherheit des Deichkörpers ermittelt.

Wie der Beschreibung der Örtlichkeit im Abschnitt 4 zu entnehmen ist, liegt die Kronenhöhe des etwa 300 m langen Mitteldeichs bei etwa + 4,0 mNN. Durch die geplante Öffnung des Sommerdeiches, dessen Kronenhöhe bei + 2,3 mNN liegt, ist davon auszugehen, dass der Mitteldeich öfter als bisher eingestaut wird. Zur Veranschaulichung der Situation ist in Bild 3 der Geländeverlauf in Kellinghusen skizziert. Die zugehörigen Höhen und Abstände zur Stör können der Tabelle 3 entnommen werden. Eine genaue Darstellung der Deichkubatur mit Baugrundmodell kann für die jeweiligen Deichquerschnitte den Anlagen 2.3.1 bis 2.3.3 entnommen werden. Hierbei sind:

| | | |
|----------------|---|---|
| MThw | = | Mittleres Tidehochwasser nach Plan, gem. [4] |
| MTnw | = | Mittleres Tideniedrigwasser nach Plan, gem. [4] |
| MW | = | $(MThw + MTnw) / 2$ |
| HQ100 | = | maximales Hochwasserereignis, gem. [4] |
| HW Sommerdeich | = | Hochwasser in Höhe Sommerdeich |

Gemäß den Ergebnissen der Baugrunderkundung wird der Deichkörper im Wesentlichen aus aufgefüllten Sanden und vereinzelt aus gering durchlässigen bindigen Böden gebildet. In der Deichaufstandsfläche stehen gewachsene Sande an. Die gewachsenen

² DIN 18196: Erd- und Grundbau; Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke

7.1 Berechnungsverfahren

Die Berechnungen werden numerisch nach der Finiten Elemente Methode (FEM) als gekoppelte geohydraulische und geomechanische Berechnungen durchgeführt. Zum Einsatz kommt das Programmsystem PLAXIS der Firma Plaxis bv, Delft, Niederlande. Es ermöglicht zweidimensionale Berechnungen, in denen geohydraulisch sowohl stationäre als auch instationäre Verhältnisse abgebildet werden können.

FEM-Stoffgesetze und geotechnische Parameter

Sämtlichen Böden wurde ein linear elastisches - ideal plastisches Materialgesetz mit einer Bruchbedingung nach Mohr-Coulomb zugewiesen. Die den Bodenarten zugeordneten Kennwerte entsprechen den Angaben in Abschnitt 6 dieses Gutachtens.

Die Ermittlung der Standsicherheiten erfolgt mittels der sogenannten phi-c-Reduktion. Dies ist eine Anwendung der Fellenius-Regel, in der die Scherparameter des Bodens ϕ' und c' schrittweise reduziert und die zugehörigen Spannungen und Verformungen berechnet werden. So werden die Scherparameter erf. ϕ' und erf. c' für den Zustand ermittelt, in dem ein Teil des Modells instabil wird und die Verformungen unendlich groß werden. Die Standsicherheit ermittelt sich durch das Verhältnis der Scherparameter

$$M_{sf} = \text{vorh. } \phi' / \text{erf. } \phi' = \text{vorh. } c' / \text{erf. } c'$$

Hierbei handelt es sich um eine globale Sicherheit im Sinne der DIN 4084(1981)³.

Vergleichsrechnung

Zur Verifizierung der FEM-Berechnungen werden zusätzlich die Standsicherheiten η mittels Gleitkreisen und Lamellen nach dem Verfahren von Bishop ermittelt. Hierbei handelt es sich ebenfalls um eine globale Sicherheit im Sinne der DIN 4084 (1981).

Nach DIN 4084 sind folgende Sicherheiten erforderlich:

$$M_{sf} \geq 1,3 \text{ (LF 1) bzw. } 1,2 \text{ (LF 2) für lamellenfreie Verfahren (hier FEM)}$$

$$\eta \geq 1,4 \text{ (LF 1) bzw. } 1,3 \text{ (LF 2) für Lamellenverfahren (hier Vergleichsrechnung)}$$

³ DIN 4084(1981) Baugrund – Gelände- und Böschungsbruchberechnungen

Der Lastfall 1 (LF 1) gilt für den Fall der täglichen Tide (ständige Situation), der Lastfall 2 (LF 2) für Hochwasserereignisse (vorübergehende Situation), Lastfalldefinition gemäß DIN 1054 (1976)⁴.

7.2 Berechnungsmodelle

Untersucht werden zwei maßgebende Querschnitte durch den Mitteldeich, die aufgrund ihrer Zusammensetzung bzw. der Bodenbeschaffenheit und der Querschnittsgeometrie als besonders ungünstig für die betrachtete Deichstrecke einzustufen sind. Die Ausdehnung des Hinterlands wurde für das Modell so gewählt, dass am Modellrand keine Auswirkungen auf den Grundwasserspiegel infolge kurzfristiger Wasserstandsänderungen vor dem Deich auftreten. Die Ausdehnung des Vorlands entspricht dem Abstand des Mitteldeichs bis zur Stör. Das Vorland fällt vom Mitteldeich Richtung Stör auf +1,25 mNN ab. Der Geschiebemergel hat im Bereich der Stör eine Oberkante bei rd. - 7,0 m NN. Als Materialparameter werden die Kennwerte aus Tabelle 2 angesetzt.

Querprofil Station 0+150

Der Untergrundaufbau wird wie in Anlage 2.3.2 abgebildet modelliert. Das Hinterland hat eine Länge von 120 m, das des Deichvorlands 190 m, vgl. auch Tabelle 3. In diesem Querprofil besteht der Deich ausschließlich aus wasserdurchlässigem Sand.

Querprofil Station 0+250

Der Untergrundaufbau wird wie in Anlage 2.3.3 abgebildet modelliert. Das Hinterland und das Vorland haben jeweils eine Länge von 120 m. Dieses Querprofil liegt besonders nahe der Stör und weist ein niedriges Vorland auf, wodurch höhere Wasserstände schneller den Mitteldeich erreichen.

7.3 Berechnungsablauf und Randbedingungen

Auf Grundlage der Ergebnisse der Abflussberechnungen [4] werden in Abstimmung mit dem WSA Hamburg⁵ drei Zustände untersucht, anhand derer die Auswirkungen der Maßnahme auf Binnenwasserstände und Standsicherheiten bewertet werden:

⁴ DIN 1054 (1976) Baugrund – zulässige Belastung des Baugrundes

⁵ Abstimmung per eMail am 27.10. und 08.11.2010, Besprechung am 02.12.2010

1. Untersuchung des täglichen Tideeinflusses mit einem maximalen Wasserstand auf Höhe des mittleren Tidehochwassers. Die Tide schwingt künftig in die geplanten Gräben ein und aus.
2. Bisher kehren die an der Stör verlaufenden Sommerdeiche Hochwasser, die bis höchstens Oberkante Sommerdeich auflaufen. In Zukunft werden diese Wasserstände direkt am Mitteldeich auftreten. Als Einstaudauer werden 4 Tage angesetzt.
3. Infolge der Maßnahme ergeben sich neue Höhen für die Bemessungshochwasser, die am Mitteldeich anstehen können. Untersucht wird das HQ100, das auf der sicheren Seite liegend die Wasserstände der häufiger auftretenden Hochwasser beinhaltet. Als Einstaudauer werden 4 Tage angesetzt.

Die Berechnungen werden für den Plan-Zustand durchgeführt, mögliche Auswirkungen des HQ 100 im Ist-Zustand werden aus diesen Ergebnissen abgeleitet: Wie im Abschnitt 4 erläutert, sind gemäß [4] die für den Plan-Zustand anzusetzenden Hochwässer HQ1, HQ5, HQ10 und HQ100 praktisch identisch mit denen für den Ist-Zustand. Für den Ist-Zustand liegen uns jedoch keine Angaben vor, welche Auswirkungen die Sommerdeiche auf die Einstaudauer haben. Generell bewirken die Sommerdeiche, dass auflaufendes Hochwasser zunächst zurückgehalten wird, der Polder erst später geflutet wird und das Hochwasser bis an den Hauptdeich gelangen kann. Andererseits bewirkt der Sommerdeich einen verzögerten Abfluss des Wassers. In Abstimmung mit dem WSA Hamburg wird davon ausgegangen, dass sich zwischen dem Ist-Zustand und dem Plan-Zustand keine signifikanten Unterschiede der Einstaudauern ergeben. Die folgenden Berechnungen werden daher ausschließlich für den Plan-Zustand durchgeführt.

Die Untersuchung der einzelnen Zustände mit unterschiedlichen hydraulischen Randbedingungen erfolgt anhand einzelner Untersuchungsschritte (Phasen), die z. T. aufeinander aufbauen. Die einzelnen Berechnungsphasen sind in Tabelle 4 zusammengestellt.

| Phase | Simulationsschritt | Erläuterung |
|-------|--------------------|---|
| 0 | Initialzustand | Primärspannungen und Porenwasserdruck bei MW |
| 1 | MThw | Sickerlinie bei außen MThw und binnen MThw |
| 2 | HW Sommerdeich | Sickerlinie nach 4 Tagen, außen HW Sommerdeich, binnen MThw |
| 3 | HQ100 | Sickerlinie nach 4 Tagen, außen HQ100, binnen MThw |
| 4 | MThw | Berechnung der Standsicherheit mittels phi-c-Reduktion |
| 5 | HW Sommerdeich | Berechnung der Standsicherheit mittels phi-c-Reduktion |
| 6 | HQ100 | Berechnung der Standsicherheit mittels phi-c-Reduktion |

Tabelle 4 Berechnungsphasen

Die Ermittlung der Spannungen im Initialzustand erfolgt bei Mittelwasser. Anschließend wird der Wasserstand außen und innen auf das mittlere Tidehochwasser erhöht und der Spannungszustand berechnet. Da sowohl der Deich als auch der Untergrund relativ große Wasserdurchlässigkeiten aufweisen, wird davon ausgegangen, dass sich außen und innen nahezu zeitgleich die gleichen Wasserstände einstellen. Diese Annahme liegt auf der sicheren Seite und dient als Ausgangspunkt für die zeitabhängigen Berechnungen von Außenwasserständen auf Höhe OK Sommerdeich und auf Höhe HQ100.

In Tabelle 5 sind für den geplanten Zustand die als Rand- bzw. Anfangsbedingungen angesetzten Wasserstände zusammengestellt.

| Fall | | Wasserstände | | Zeit |
|---------------|----------------|--------------|--------------|------|
| | | außen [mNN] | binnen [mNN] | [d] |
| Mittelwasser | MW | 1,67 | 1,67 | - |
| tägliche Tide | MThw | 1,72 | 1,72 | - |
| Sommerdeich | HW Sommerdeich | 2,30 | 1,72 | 4 |
| Hochwasser | HQ100 | 3,39 | 1,72 | 4 |

Tabelle 5 Hydrologische Rand- bzw. Anfangsbedingungen, Plan-Zustand

7.4 Berechnungsergebnisse

Als wesentliche Ergebnisse der Berechnungen werden für die in Abschnitt 7.2 erläuterten, maßgebenden Querschnitte die Sickerlinien im Deich sowie die Standsicherheiten ermittelt. In den Anlagen 4.1ff und 4.2ff sind die Ergebnisse der FEM-Berechnungen und der Vergleichsberechnungen für die untersuchten Querschnitte in den Stationen 0+150 und 0+250 dargestellt. Abgebildet sind die maßgebenden Gleitkörper der Standsicher-

heitsberechnungen sowie die Strömungsbilder der Berechnungsphasen mit Wasserspiegeldifferenzen.

In den Tabellen 6 und 7 sind die Ergebnisse für die beiden untersuchten Querprofile zusammengefasst. Die globalen Standsicherheiten, die mit FEM-Berechnungen ermittelt wurden, sind als M_{sf} , die mit dem Lamellenverfahren ermittelten sind als η angegeben.

| Fall | Wasserstand am Deichfuß | | Lastfall DIN 1054 | Sicherheit DIN 4084 | |
|---------------|-------------------------|--------------|----------------------|------------------------|------------|
| | außen [mNN] | binnen [mNN] | | M_{sf} | η |
| tägliche Tide | 1,72 | 1,72 | LF 1 | 1,56 > 1,3 | 1,64 > 1,4 |
| Sommerdeich | 2,30 | 2,11 | LF 2 | 1,55 > 1,2 | 1,64 > 1,3 |
| Hochwasser | 3,39 | >2,59 | LF 2 | 1,38 > 1,2 | 1,33 > 1,3 |

Tabelle 6 Querprofil Station 0+150

- Lastfall, Berechnungsergebnisse, erforderliche Sicherheit

| Fall | Wasserstand am Deichfuß | | Lastfall DIN 1054 | Sicherheit DIN 4084 | |
|---------------|-------------------------|--------------|----------------------|------------------------|------------|
| | außen [mNN] | binnen [mNN] | | M_{sf} | η |
| tägliche Tide | 1,72 | 1,72 | LF 1 | 1,74 > 1,3 | 1,72 > 1,4 |
| Sommerdeich | 2,30 | 2,22 | LF 2 | 1,74 > 1,2 | 1,72 > 1,3 |
| Hochwasser | 3,39 | >2,68 | LF 2 | 1,47 > 1,2 | 1,41 > 1,3 |

Tabelle 7 Querprofil Station 0+250

- Lastfall, Berechnungsergebnisse, erforderliche Sicherheit

Den Berechnungsergebnissen zufolge ist die Standsicherheit der Deichböschung in den untersuchten Fällen ausreichend, die berechnete Sicherheit ist größer als die erforderliche Sicherheit, vgl. dazu Abschnitt 7.1.

Die Wasserstände der täglichen Tide (+ 1,72 mNN) liegen binnendeichs deutlich unter Geländeoberkante (Deichfuß binnen auf + 2,59 mNN bzw. + 2,68 mNN).

Bei Hochwässern auf Höhe des Sommerdeichs sind Anstiege des binnenseitigen Grundwasserstands um etwa 5 Dezimeter auf etwa + 2,1 mNN bzw. + 2,2 mNN zu erwarten, vgl. Tabellen 6 und 7. Diese Anstiege beschränken sich auf den unmittelbaren Bereich hinter dem Deich. Das Hinterland ist dort überwiegend höher als das Deichvor-

land, ein ausreichender Grundwasserflurstand ist gegeben. Es ist ausreichende Sicherheit gegen hydraulischen Grundbruch gemäß DIN 1054 vorhanden.

Während des HQ100 ergeben die Berechnungen für eine Einstaudauer von 4 Tagen einen Anstieg der binnenseitigen Wasserstände über die Geländeoberkante (Wasserstand über + 2,6 mNN bzw. + 2,7 mNN). Hier ist mit Austritt von Sickerwasser an der Binnendeichsböschung sowie von Qualmwasser am Deichfuß und somit einer Vernässung des Hinterlandes zu rechnen.

7.5 Gegenüberstellung Ergebnisse Ist-Zustand/Plan-Zustand

Die Untersuchungsergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

| Fall/Wasserstand | Ist-Zustand | Plan-Zustand |
|---|---|---|
| MThw Ist + 1,76 mNN Plan + 1,72 mNN | Für den Mitteldeich nicht relevant, da Wasserstand durch Sommerdeich gekehrt wird | - ausreichende Standsicherheit der Deichböschung - kein Qualmwasser |
| OK Sommerdeich Ist + 2,3 mNN Plan + 2,3 mNN | Für den Mitteldeich nicht relevant, da Wasserstand durch Sommerdeich gekehrt wird | - ausreichende Standsicherheit der Deichböschung - kein Qualmwasser, Wasserstandsanstieg binnen ~ 0,5 m (auf etwa + 2,1 mNN / + 2,2 mNN) - ausreichende Sicherheit gegen hydraulischen Grundbruch |
| HQ 100 Ist + 3,40 mNN Plan + 3,39 mNN | - ausreichende Standsicherheit der Deichböschung - Qualmwasser, Wasserstand binnen über Gelände, Wasserstand über + 2,6 mNN / + 2,7mNN - Erosionsgefahr | - ausreichende Standsicherheit der Deichböschung - Qualmwasser, Wasserstand binnen über Gelände, Wasserstand über + 2,6 mNN / + 2,7 mNN - Erosionsgefahr |

Tabelle 8 Gegenüberstellung der Ergebnisse

Da die Wasserstände im Fall HQ 100 im Ist-Zustand praktisch identisch sind mit denen des Plan-Zustandes gilt hinsichtlich der Folgerungen für den Ist-Zustand das Berechnungsergebnis des Plan-Zustandes, vgl. dazu Ausführungen in Abschnitt 7.3.

8 FOLGERUNGEN UND EMPFEHLUNGEN

Die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die globale Standsicherheit des Mitteldeichs ist sowohl im Ist-Zustand als auch nach Realisierung der geplanten Öffnung des Sommerdeichs gegeben.
- Bei natürlichem Tidegeschehen und bei Hochwasserereignissen bis zur Höhe des vorhandenen Sommerdeichs sind binnenseitig des Deichfußes geringe Anstiege des Grundwasserstandes zu erwarten.
- Bei Hochwasserereignissen entsprechend dem Abfluss des HQ100 ist im Ist-Zustand und im Plan-Zustand im Laufe der Einstaudauer mit austretendem Qualmwasser am binnenseitigen Deichfuß zu rechnen. Dieses kann zu rückschreitender Erosion und damit zunächst zur Schwächung, bei länger anhaltender Strömung zu Beeinträchtigungen der Standsicherheit des Deiches führen.

In diesem Zusammenhang wird darauf hingewiesen, dass das jährliche Hochwasser (HQ 1) nur etwa 30 cm tiefer liegt als das HQ 100. Den Berechnungen zum Abflussverhalten [4] zufolge kann eine ähnliche Beanspruchung der Deichbinnenböschung wie im Fall des HQ 100 folglich jedes Jahr auftreten.

Gemäß Gegenüberstellung in Tabelle 8 sind bereits heute im Falle des HQ 100 Defizite vorhanden.

Im Falle der geplanten Öffnung des Sommerdeichs treten gegenüber dem Ist-Zustand keine relevanten Änderungen hinsichtlich der Gebrauchstauglichkeit und der Standsicherheit des Mitteldeichs auf. Eine ungünstige Veränderung der Einstaudauer im Hochwasserfall wird nicht erwartet. Zwar wird nach Öffnung des Sommerdeichs das Hochwasser schneller an den Mitteldeich herankommen, es wird jedoch auch schneller wieder ablaufen können.

Mit Blick auf die mittel- bis langfristig ungünstigen Folgen des Qualmwasseraustritts wird empfohlen, an dem binnenseitigen Deichfuß eine Sicherungsmaßnahme auszuführen, durch die im Fall des Hochwassers HQ 100 der Austritt von Sickerwasser unterbunden wird. Hier kommen grundsätzlich folgende Varianten in Betracht:

1. Unterbindung des Sickerwasserzutritts durch Herstellung einer hydraulischen Sperre im Untergrund
2. Aufhöhung des Geländes am Deichbinnenfuß, so dass hier das Sickerwasser nicht mehr austritt
3. Herstellung einer Dränung am binnenseitigen Deichfuß, durch die im Fall HQ100 die Sickerlinie bis unter die bestehende Geländeoberkante abgesenkt wird

Die Herstellung einer hydraulischen Sperre im Untergrund kann nicht empfohlen werden, da auf diesem Wege auch der Abfluss von Grundwasser zur Stör während normaler Tidewasserstände unterbunden wird.

Eine Geländeaufhöhung hinter dem Mitteldeich ist mit einer entsprechenden Inanspruchnahme von Flächen hinter dem Deich verbunden. Eine funktionierende Dränung am binnenseitigen Deichfuß setzt eine niedrige Vorflut voraus, die durch Pumpbetrieb erreicht werden muss, sofern eine natürliche Vorflut nicht gegeben ist. Die aufgezeigten Maßnahmen sind teils mit Eingriffen in den Deichbestand verbunden.

Das Aufbringen von Dichtungsmaterial vor dem außenseitigen Deichfuß zur Verlängerung des Fließweges ist im vorliegenden Fall aufgrund der hydraulischen Gegebenheiten als Sicherungsmaßnahme nicht geeignet.

9 SICHERUNGSMABNAHMEN AM MITTELDEICH

Im Rahmen einer ersten Varianten- und Kostenbetrachtung wurden exemplarisch zwei mögliche Sicherungsvarianten betrachtet und grob die zu erwartenden Baukosten abgeschätzt.

- Aufhöhung des Geländes am Deichbinnenfuß
- Herstellung einer Dränage am binnenseitigen Deichfuß

Die Sicherungsvarianten sind im Einzelnen im Anhang 1 erläutert und anhand von Prinzipquerschnitten grob dargestellt.

Die reinen Baukosten belaufen sich auf eine Größenordnung von

netto € 30.000,00 bzw. € 45.000,00

Die Kosten sind anhand eines Kurz-LV's im Anhang zusammengestellt.

Die genannten Kosten geben eine Orientierung für die Investitionen bei den geplanten baulichen Anlagen. Nicht enthalten sind Grundstückskosten, Folgekosten usw.. Einzelheiten sind dem Anhang zu entnehmen.

Im Zuge weiterer Planungsabschnitte (Vorplanung, Entwurfsplanung ...) ist zu untersuchen, welche der Varianten die technisch und wirtschaftlich sinnvollste Lösung darstellt.

10 ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen der geplanten Fahrrinnenanpassung der Elbe ist an der Stör die Öffnung von Sommerdeichen vorgesehen. Damit verbunden ist eine Vergrößerung des vorhandenen Tideeinflusses bis an den Mitteldeich.

Aufbauend auf den Ergebnissen von Abflussberechnungen des Büros Golder wurden für das Maßnahmenggebiet Kellinghusen die Auswirkungen unterschiedlicher Szenarien auf die Standsicherheit der vorhandenen Deiche untersucht:

- Täglicher Tideeinfluss
- Oberwasserinduzierte Hochwässer

Bezüglich der oberwasserinduzierten Hochwässer wurde der Fall eines Hochwassers auf Höhe des derzeit noch vorhandenen Sommerdeiches sowie des HQ 100 näher betrachtet, vgl. Abschnitt 7.

Die Standsicherheit des Mitteldeiches ist in allen untersuchten Fällen zunächst gegeben. Für den Fall des HQ 100 sind für den Ist-Zustand und den Plan-Zustand Maßnahmen zur Sicherung des Mitteldeiches erforderlich, um eine Schwächung bzw. eine Beeinträchtigung z. B. durch rückschreitende Erosion bei anhaltender Durchströmung zu verhindern. Bereits heute sind Defizite vorhanden, vgl. Abschnitt 8.

Als Maßnahmen zur Sicherung sind eine Aufhöhung des Geländes hinter dem Deich oder eine Dränung des binnenseitigen Deichfußes geeignet. In einer Varianten- und Kostenbetrachtung wurden diese Sicherungsmaßnahmen für den Mitteldeich hinsichtlich der zu erwartenden Baukosten untersucht. Die Ergebnisse der Betrachtung sind dem Anhang zu entnehmen.

IGB Ingenieurgesellschaft mbH

i. V. 

Dipl.-Ing. Holger Carlsen

i. A. 

Dipl.-Ing. Gabriele Peters

ANLAGENVERZEICHNIS

| | |
|--------------|--|
| Anlage 1 | Lagepläne |
| Anlage 1.1.1 | Übersichtslageplan |
| Anlage 1.1.2 | Übersicht Maßnahmengbiet Kellinghusen |
| Anlage 1.2 | Lage der Untergrundaufschlüsse Kellinghusen |
| | |
| Anlage 2 | Ergebnisse der Untergrundaufschlüsse Kellinghusen |
| Anlage 2.1 | Längsschnitt Deichkrone |
| Anlage 2.2 | Querschnitte |
| Anlage 2.2.1 | Querschnitt Station 0+050 |
| Anlage 2.2.2 | Querschnitt Station 0+150 |
| Anlage 2.2.3 | Querschnitt Station 0+250 |
| Anlage 2.3 | Querprofile |
| Anlage 2.3.1 | Querprofil Station 0+050 |
| Anlage 2.3.2 | Querprofil Station 0+150 |
| Anlage 2.3.3 | Querprofil Station 0+250 |
| | |
| Anlage 3 | Ergebnisse der bodenmechanischen Laborversuche |
| Anlage 3.1 | Zusammenstellung |
| Anlage 3.2 | Kornverteilungskurven |
| Anlage 3.3 | Durchlässigkeitsversuch |
| | |
| Anlage 4 | Ergebnisse der Standsicherheitsuntersuchungen, Plan-Zustand |
| Anlage 4.1.1 | Querprofil Station 0+150 FEM-Berechnungen |
| Anlage 4.1.2 | Querprofil Station 0+150 Vergleichsrechnungen |
| Anlage 4.2.1 | Querprofil Station 0+250 FEM-Berechnungen |
| Anlage 4.2.2 | Querprofil Station 0+250 Vergleichsrechnungen |
| | |
| Anhang 1 | Sicherungsmaßnahmen am Mitteldeich, Varianten- und Kostenbetrachtung |