IGB INGENIEURGESELLSCHAFT MBH
Geotechnik · Wasserbau · Umwelttechnik · Beweissicherung · Arbeitsschutz

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, 14.04.2011
10-152 • Zl/Ca/Pet/Wl

Untersuchung der Deichsicherheit für Kompensationsmaßnahmen an der Stör

- **Maßnahmengebiet Neuenkirchen**

Ermittlung und Bewertung der Deichsicherheit

Auftraggeber:

Wasser- und Schifffahrtsamt Hamburg
Projektbüro Fahrrinnenanpassung
Moorweidenstraße 14
20148 Hamburg

H:\IGB-10\10-152 Standsicherheit Stördeiche\10 GeoBer\01 Text\10-152 BER Deichsicherheit Neuenkirchen03 Ca.doc

IGB

INHALTSVERZEICHNIS

Seite

1 EINLEITUNG 3

2 AUFGABENSTELLUNG 3

3 UNTERLAGEN 4

4 BAUVORHABEN 5

4.1 Bestand/Ist-Zustand 5
4.2 Geplante Maßnahme/Plan-Zustand 6

5 BAUGRUNDVERHÄLTNISSE 8

5.1 Aufschluss- und Laborprogramm 8
5.2 Untergrundaufbau 8
5.2.1 Deckschicht 9
5.2.2 Aufgefüllter Klei (Deichkörper) 9
5.2.3 Gewachsener Klei 10
5.2.4 Sand 11
5.3 Grundwasser 12

6 BODENKENNWERTE 12

7 STANDSICHERHEITSUNTERSUCHUNGEN, STRÖMUNGSBERECHNUNGEN 12

7.1 Berechnungsverfahren 14
7.2 Berechnungsmodell 15
7.3 Berechnungsablauf und Randbedingungen 16
7.4 Berechnungsergebnisse 18
7.5 Gegenüberstellung Ergebnisse Ist-Zustand/Plan-Zustand 19

8 FOLGERUNGEN 20

9 ZUSAMMENFASSUNG 20

ANLAGENVERZEICHNIS.....22

1 EINLEITUNG

Im Rahmen der geplanten Fahrrinnenanpassung der Elbe an die Erfordernisse der Containerschifffahrt 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 Neuenkirchen.

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 21, vom 25.08. und 26.08.2010

[3] Aufmaß Deichquerprofile vom 17.09.2010

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

4 BAUVORHABEN

4.1 Bestand/Ist-Zustand

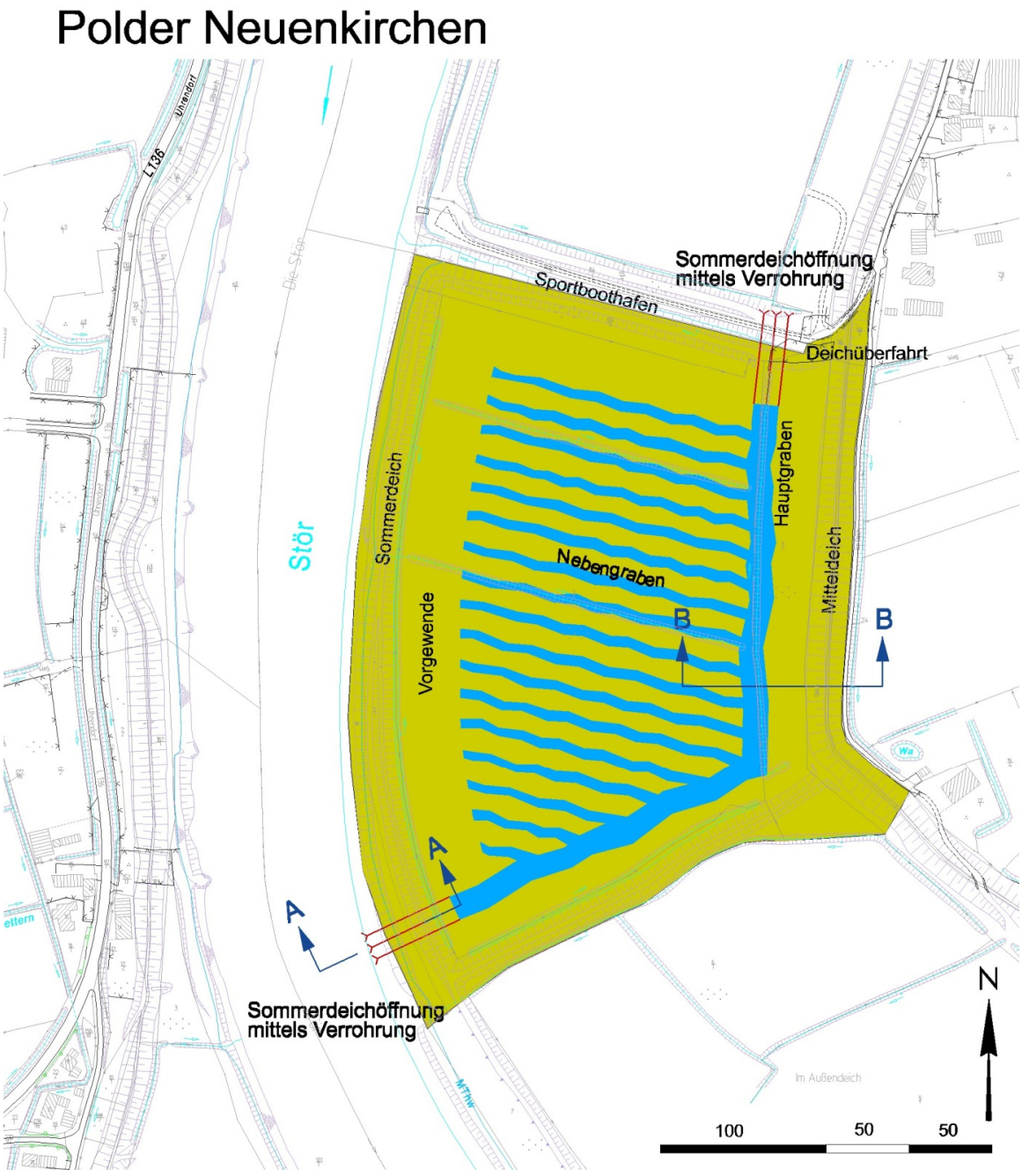
Das Maßnahmengebiet Neuenkirchen liegt am Unterlauf der Stör südwestlich der gleichnamigen Ortschaft. Es hat eine Fläche von etwa 10 ha. Der 350 m lange Mitteldeich bildet die rückwärtige Begrenzung des Maßnahmengebietes. Das Gebiet ist geprägt durch die Lage in der Elbmarsch.

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 von etwa + 6,2 mNN auf. Binnen liegt das Gelände auf Höhen um + 0,7 mNN bis + 1,1 mNN. Unmittelbar am binnenseitigen Deichfuß verläuft ein befestigter Weg.

Die vor dem Mitteldeich liegenden Wiesen werden durch Sommerdeiche (Kronenhöhe etwa + 2,75 mNN) geschützt. Die Wiesen liegen am Deichfuß auf Höhen um + 1,5 mNN bis + 1,8 mNN. Durch die Sommerdeiche kommt es uns gemachten Angaben zufolge im Ist-Zustand nicht zu tidebedingten Überflutungen.

4.2 Geplante Maßnahmen/Plan-Zustand



Geplant ist die Öffnung der Sommerdeiche an zwei Stellen durch Einbau von jeweils drei großen Rohren sowie die Anlage eines Hauptgrabens und diverser Nebengräben. Der Hauptgraben (Ausbautiefe etwa – 1,0 mNN) soll in einem Abstand von etwa 25,0 m vor dem Deichfuß parallel zum Mitteldeich verlaufen. Einzelheiten zum geplanten Vorhaben

sowie zu den Vorhabensbestandteilen sind der Planänderungsunterlage III Teil 12a zu entnehmen [1a].

Über die geplante Verrohrung soll bei jeder Tide Wasser in das Grabennetz einströmen (MThw auf + 1,46 mNN, geplante Rohr-/Grabensohle auf MTnw entsprechend - 1,03 mNN).

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

Gemäß Abflussberechnung [4] sind folgende Wasserstände zu erwarten:

HQ 1	+ 2,80 mNN	(+ 2,81 mNN)
HQ 5	+ 2,96 mNN	(+ 2,97 mNN)
HQ 10	+ 2,96 mNN	(+ 2,97 mNN)
HQ 100	+ 2,97 mNN	(+ 2,98 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.

Der Fuß des Mitteldeiches wird bereits bei einem jährlich auftretenden Hochwasser (HQ 1) etwa 1,0 m hoch eingestaut.

Für die Tidewasserstände gelten folgende Werte:

- Ist-Zustand MThw auf + 1,46 mNN, MTnw – 1,03 mNN
- Plan-Zustand MThw auf + 1,46 mNN, MTnw – 1,03 mNN

Der Tidenhub beträgt etwa 2,5 m. Die zu erwartenden Wasserstände sind praktisch unverändert.

5 BAUGRUNDVERHÄLTNISSE

5.1 Aufschluss- und Laborprogramm

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

Der Mitteldeich ist dabei zwischen den Stationen 4+700 und 5+000 auf der Deichkrone sowie am Deichfuß binnen und außen, in der Böschung binnen und außen und zusätzlich im Deichvorland durch insgesamt 21 Bohrsondierungen bis in Tiefen von 10 m erkundet worden. Zusätzlich wurden zwei Schürfe angelegt. Die Ansatzpunkte der einzelnen Aufschlüsse sind auf Anlage 1.2 dargestellt.

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

Neben Kornverteilungskurven, Wassergehalten und Glühverlusten wurden Fließ- und Ausrollgrenzen ermittelt. Zusätzlich wurden zur besseren Abschätzung der Standsicherheit des Deiches an ungestörten Bodenproben, die in Schürfen gewonnen wurden, ein direkter Scherversuch und Durchlässigkeitsversuche durchgeführt.

5.2 Untergrundaufbau

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 4+750, 4+850 und 4+950 höhengerecht als Schichtenprofile dargestellt.

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

Danach stellt sich der Untergrundaufbau im Maßnahmenbereich Neuenkirchen relativ einheitlich dar und kann wie folgt beschrieben werden:

Sowohl auf dem Deichkörper sowie in den angrenzenden Flächen wurde zunächst eine **Deckschicht** aus durchwurzeltem Klei bzw. aus Mutterboden erkundet. Der Deichkörper wird vollständig aus **aufgefülltem Klei** gebildet und steht auf **gewachsenem Klei** der von **Sanden** unterlagert wird.

5.2.1 Deckschicht

Zunächst steht flächendeckend eine Vegetationsschicht an, die im Bereich des Deichkörpers den Auffüllungen zuzuordnen ist. Diese Schicht wird im Wesentlichen aus organischem Schluff mit tonigen und teilweise feinsandigen Beimengungen gebildet und ist zumeist durchwurzelt. Die erkundete Schichtdicke liegt zwischen 0,1 m und 1,1 m.

5.2.2 Aufgefüllter Klei (Deichkörper)

Der Deich wurde durchgehend aus Klei hergestellt. Die Basis des aufgefüllten Kleis wurde auf einer Kote zwischen – 0,7 mNN und + 1,25 mNN erkundet.

Wie dem Bild 1 zu entnehmen ist besteht der untersuchte aufgefüllte Klei kornanalytisch zu über 50 % aus Schlämmkorn, er enthält zumeist unter 15 %, bzw. in einem Fall knapp 48 % Feinsand. Der Feinstkornanteil schwankt zwischen 20 % und 40 %. Der aufgefüllte Klei ist als toniger, bzw. stark toniger Schluff mit organischen, teilweise auch stark feinsandigen Beimengungen anzusprechen. Vereinzelt wurden im aufgefüllten Klei auch Sand-Streifen oder Pflanzenreste erkundet.

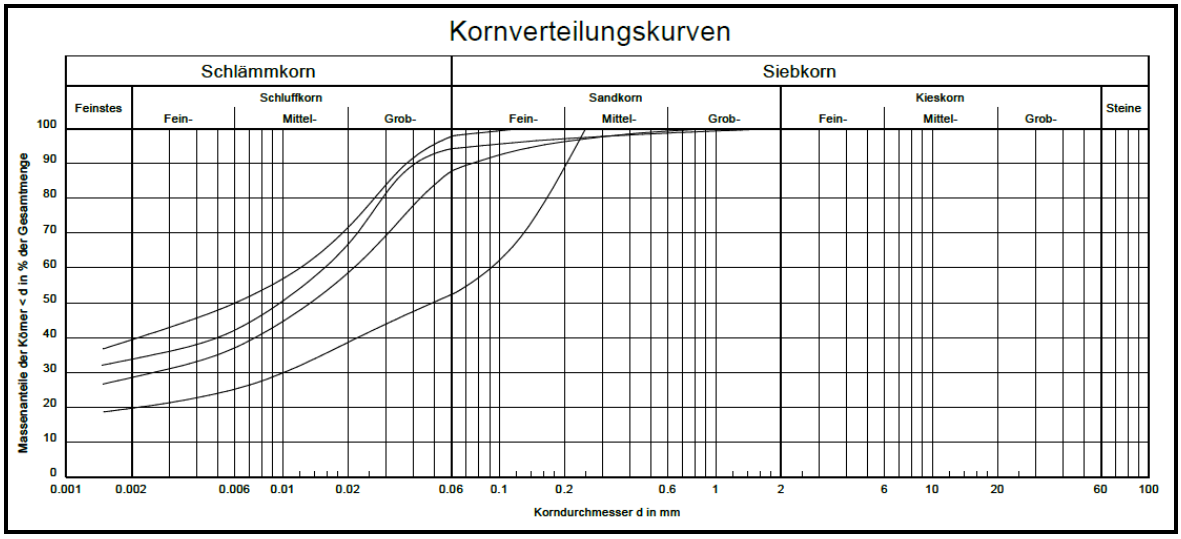


Bild 1 Körnungsband Klei, aufgefüllt

Die ermittelten Wassergehalte wie auch die Glühverluste weisen eine geringe Spannweite auf, vgl. Tabelle 1. Bei der Bodenansprache konnte festgestellt werden, dass in weiten Bereichen der in der Region für den Deichbau typische Klei verwendet wurde.

Nach den ermittelten Konsistenzzahlen ist die Konsistenz der untersuchten Proben als breiig bzw. weich einzustufen. Das entspricht auch der Bodenansprache, wonach die Konsistenz als weich, weich/steif oder auch steif eingestuft wurde. Seine Plastizität ist als mittel bis leicht plastisch, örtlich auch als plastisch und ausgeprägt plastisch, zu beurteilen.

Bodenart	Anzahl der Versuche	Ergebnisse		
		min	max.	Mittelwert
Wassergehalt w [%]	7	30,2	34,5	32,8
Glühverlust V_{gl} [%]	2	3,3	6,3	4,8
Konsistenzzahl I_c [-]	2	0,32	0,65	0,49

Tabelle 1 Ergebnisse bodenmechanische Laborversuche, aufgefüllter Klei

5.2.3 Gewachsener Klei

Dem Bild 2 ist zu entnehmen, dass der untersuchte gewachsene Klei kornanalytisch zu über 60 % aus Schlämmkorn besteht, dabei enthält er zwischen 14 % und 47 % Feinstkornanteil. Der gewachsene Klei ist als toniger, bzw. stark toniger Schluff mit organischen teilweise auch stark feinsandigen Beimengungen anzusprechen. Vereinzelt wurden im gewachsenen Klei auch Sand-Streifen oder Pflanzenreste erkundet.

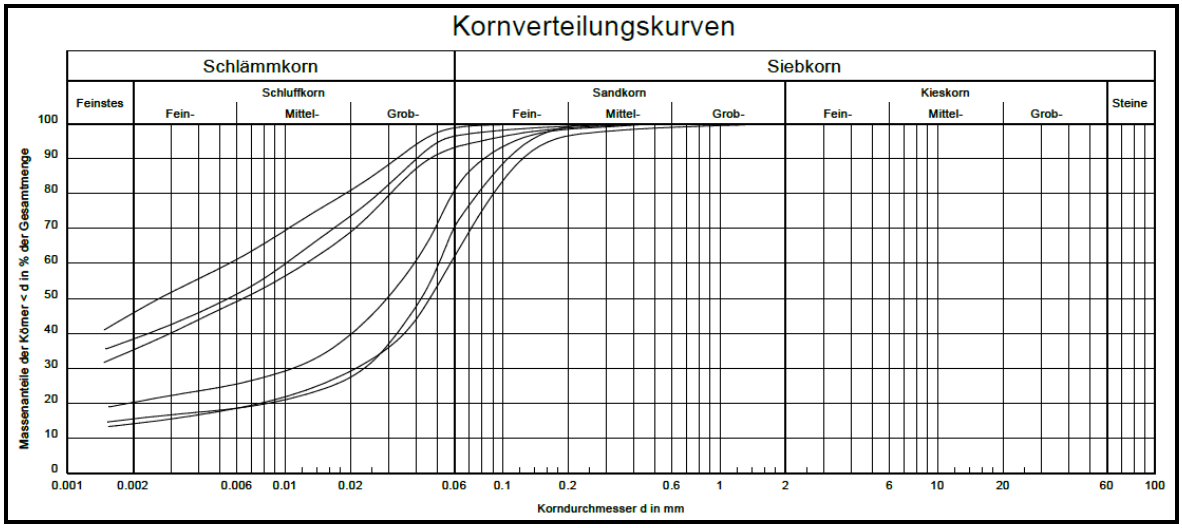


Bild 2 Körnungsband gewachsener Klei

Gegenüber dem aufgefüllten Klei weist der untersuchte gewachsene Klei bei den Wassergehalten eine größere Bandbreite auf, vgl. Tabelle 2. Höhere Wassergehalte lassen auf einen höheren organischen bzw. pflanzlichen Anteil schließen. Insgesamt spiegeln die Ergebnisse die natürlichen inhomogen Verhältnisse des gewachsenen Kleis wieder.

An der untersuchten Kleiprobe wurde eine Konsistenzzahl von 0,59 ermittelt, vgl. Tabelle 2. Danach ist die Konsistenz der Probe als weich einzustufen. Das entspricht der Bodenansprache, wonach die Konsistenz als weich, weich/steif oder auch steif eingestuft wurde. Der Klei ist als mittel bis ausgeprägt plastisch zu beurteilen.

Bodenart	Anzahl der Versuche	Ergebnisse		
		min	max.	Mittelwert
Wassergehalt w [%]	7	31,6	86,0	47,2
Glühverlust V_{gl} [%]	1	-	-	6,9
Konsistenzzahl I_c [-]	1	-	-	0,59

Tabelle 2 Ergebnisse bodenmechanische Laborversuche, gewachsener Klei

Nach den durchgeführten Versuchen liegt die Durchlässigkeit für den gewachsenen Klei bei 4,7 x 10^{-10} m/s und 2,0 x 10^{-10} m/s. Die Kohäsion wurde zu 12,3 kN/m² bei einem Reibungswinkel von 30,4° ermittelt.

5.2.4 Sand

Mit einem Großteil der abgeteuften Aufschlüsse wurden unterhalb des gewachsenen Kleis Sande erbohrt. Im Bereich des Querprofils 4+750 wurde mit keinem der abgeteuften Aufschlüsse Sand erbohrt. Insgesamt ist festzustellen, dass der Verlauf des Sandhorizonts in Längsrichtung relativ stark um mehrere Meter, d. h. zwischen – 1,08 mNN und – 3,49 mNN schwankt. In den einzelnen Querprofilen liegt der Höhenunterschied des Sandhorizontes bei wenigen Dezimetern.

Der Sand ist als Feinsand mit schluffigen bzw. stark schluffigen Beimengungen und vereinzelt mit Kleieinlagerungen anzusprechen.

Nach der Kornverteilungskurve des untersuchten Sandes ist dieser kornanalytisch als schluffiger Sand zu bezeichnen.

5.3 Grundwasser

Die im Zuge der Aufschlussarbeiten angetroffenen Wasserstände sind höhengerecht neben den Bodenprofilen auf den Anlagen 2.1 und 2.2.1 bis 2.2.3 aufgetragen. Danach wurde das Grundwasser teilweise in den im Klei eingelagerten Sandstreifen teilweise in den unterlagernden Sanden, etwa in Höhen zwischen + 3,71 mNN und – 3,49 mNN eingemessen. Die gemessenen Wasserstände sind mit dem bei dem Aufschlussverfahren (Bohrsondierungen) üblichen Unsicherheiten behaftet. Die Messwerte sind nicht vergleichbar mit Messungen im ausgebauten Bohrloch oder in einem Grundwasserpegel.

6 BODENKENNWERTE

Auf der Grundlage der Ergebnisse der Untergrundaufschlüsse und der 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.

Bodenart	Wichte		Scherfestigkeit		Durchlässigkeit	Steifemodul	Bodengruppe
	γ_k kN/m³	γ'_k kN/m³	φ'_k °	c'_k kN/m²	k m/s	$E_{s,k}$ MN/m²	DIN 18196[2]
Deckschicht	16	6	20	7,5	$5*10^{-9}$	-	OH, OT, OU
aufgefüllter Klei	17	7	20	10	$1*10^{-10}$	5	OU/OT
gewachsener Klei	16	6	22,5	10	$5*10^{-10}$	4	OU/OT
Sand	19	11	30	0	$5*10^{-5}$	40	SE

Tabelle 3 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.

---

1 DIN 1054: Baugrund – Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau (01/2005)
2 DIN 18196: Erd- und Grundbau; Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke

Wie der Beschreibung der Örtlichkeit im Abschnitt 4 zu entnehmen ist, liegt die Kronenhöhe des etwa 350 m langen Mitteldeichs bei etwa + 6,2 mNN. Durch die geplante Öffnung des Sommerdeiches, dessen Kronenhöhe gemäß [4] bei Minimum + 2,88 mNN liegt, ist davon auszugehen, dass der Mitteldeich öfter als bisher eingestaut wird. Zur Veranschaulichung der Situation ist in Bild 3 der Geländeverlauf in Neuenkirchen skizziert. Die zugehörigen Höhen und Abstände zur Stör können der Tabelle 4 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

Dabei ist festzustellen, dass nicht nur das HQ 100 sondern auch Hochwasser in Höhe des Sommerdeichs oberhalb des binnenseitigen Deichfußes anstehen. Beim Querschnitt Station 4+750 steht auch das MThw oberhalb des Hinterlandes. Eine genaue Darstellung der Deichkubatur mit Baugrundmodell kann für die jeweiligen Deichquerschnitte den Anlagen 2.3.1 bis 2.3.3 entnommen werden.

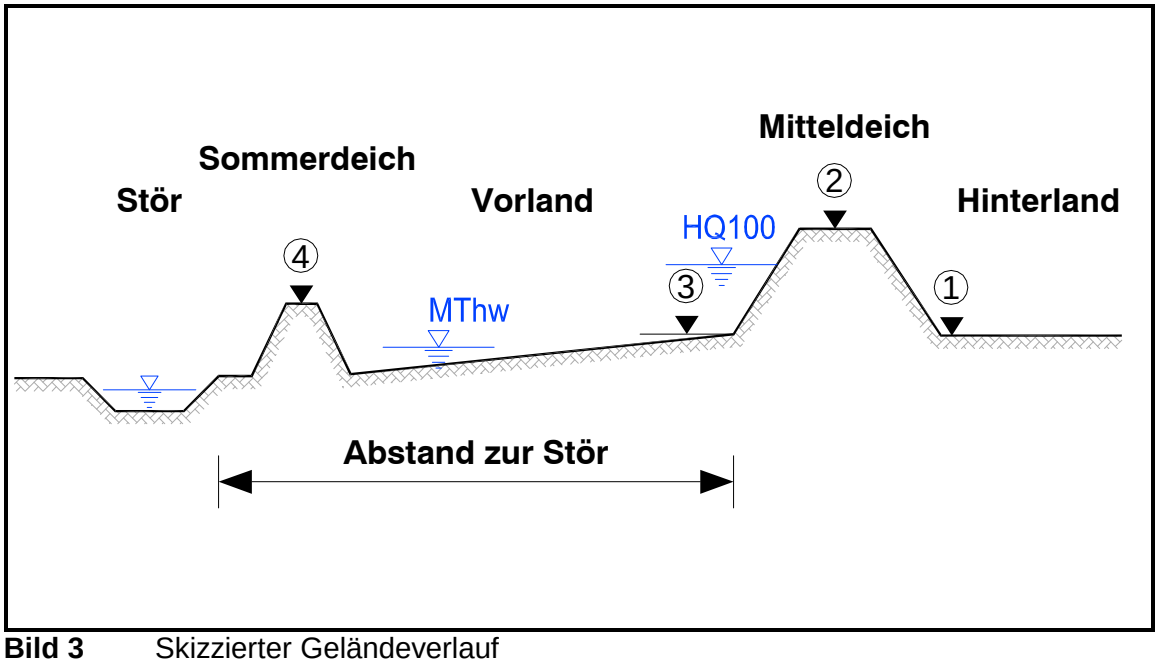


Bild 3 Skizzierter Geländeverlauf

Station	Deich-fuß binnen (1) [mNN]	Deich-krone Mittel-deich (2) [mNN]	Deich-fuß außen (3) [mNN]	Som-mer-deich (4) [mNN]	Ab-stand zur Stör [m]	Mw [mNN]	MThw [mNN]	HQ 100 [mNN]
4+750	+ 0,76	+ 6,26	+ 2,55	+ 2,88	~300	+ 0,22	+ 1,46	+ 2,97
4+850	+ 1,07	+ 6,22	+ 1,75	+ 2,88	~300	+0,22	+ 1,46	+ 2,97
4+950	+ 1,10	+ 6,23	+ 2,0	+ 2,88	~300	+0,22	+ 1,46	+ 2,97

Tabelle 4 Höhenangaben – Gelände und Wasserstände

Wie dem Abschnitt 4 entnommen werden kann, wird der Deichkörper im Wesentlichen aus aufgefülltem Klei gebildet. In der Deichaufstandsfläche steht gewachsener Klei an. Unterlagernd folgt Sand. Der gewachsene wie auch der aufgefüllte Klei weisen im Gegensatz zu den Sanden eine vergleichsweise geringe Wasserdurchlässigkeit auf.

Im Ist-Zustand wird das Störwasser bis zur Höhe des Sommerdeiches (+ 2,88 mNN) gekehrt. Für den Fall der Öffnung des Sommerdeiches (Plan-Zustand) ist dieses nicht mehr der Fall.

Um mögliche Auswirkungen der nach Öffnung der Sommerdeiche neu zu erwartenden Wasserstände auf den Mitteldeich abschätzen zu können, werden im Folgenden Berechnungen durchgeführt, mit denen die verschiedenen Wasserstände simuliert und so z. B. Einflüsse auf die Standsicherheit abgeleitet werden können.

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.

Stoffgesetze und geotechnische Parameter

Sämtlichen Böden wurde ein linear elastisches - ideal plastisches Materialgesetz mit einer Bruchbedingung nach Mohr-Coulomb zugewiesen. Die den Bodenarten zugeordneten geotechnischen Parameter entsprechen den in Abschnitt 6 angegebenen Kennwer-

ten. Wie in Abschnitt 5 erwähnt, kann der gewachsene Klei z. T. Sand-Streifen aufweisen. Deshalb wird auf der sicheren Seite liegend eine horizontal größere Durchlässigkeit angesetzt. Es gehen für den gewachsenen Klei folgende Wasserdurchlässigkeiten in die Berechnung ein:

Durchlässigkeit, vertikal	$k_v = 5*10^{-10}$ m/s	gemäß Tabelle 3
Durchlässigkeit, horizontal	$k_h = 1*10^{-9}$ m/s	

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 Scherparamter 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} = vorh. φ' / erf. φ' = vorh. c' / erf. c'

Hierbei handelt es sich um eine globale Sicherheit im Sinne der DIN 4084(1981)[3]. Es sind gemäß DIN 4084 folgende Sicherheiten für lamellenfreie Verfahren (hier FEM) nachzuweisen:

$\eta = M_{sf} \geq 1{,}3$ (LF 1)
$\eta = M_{sf} \geq 1{,}2$ (LF 2)

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 Berechnungsmodell

Untersucht wird ein für die betrachtete Deichstrecke repräsentativer Querschnitt durch den Mitteldeich, der aufgrund seiner Beschaffenheit bzw. der Querschnittsgeometrie als ungünstig anzusehen ist (worst-case-Betrachtung). Die Ergebnisse der Berechnungen liegen bei dieser Betrachtung auf der sicheren Seite.

[3] DIN 4084(1981) Baugrund – Gelände- und Böschungsbruchberechnungen
[4] DIN 1054 (1976) Baugrund – Zulässige Belastung des Baugrundes

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, vgl. [1]. Das Vorland wird entsprechend dem Aufmaß der Deichquerschnitte aus [3] mit einer Geländeoberkante bei rd. + 1,4 mNN modelliert.

Querprofil Station 4+850

Der Untergrundaufbau wird wie in Anlage 2.3.2 abgebildet modelliert. Das Hinterland hat eine Länge von 120 m, das Deichvorland von 290 m. Der Deich besteht aus aufgefülltem Klei. Im Vor- und Hinterland stehen oberflächennah Schichten aus gewachsenem Klei an. Darunter folgt Sand. Die bindigen Deckschichten sind hier weniger mächtig, als in den restlichen Querprofilen. Etwa 25,0 m vor dem Deich liegt der geplante Hauptbewässerungsgraben. Dessen Sohle liegt bei rd.- 1,0 mNN so dass jede Tide in die Gräben ein- und ausschwingt.

7.3 Berechnungsablauf und Randbedingungen

In Abstimmung mit dem WSA Hamburg[5] werden auf Grundlage der Abflussberechnungen [4] drei Zustände untersucht, anhand derer die Auswirkungen der Maßnahme auf Binnenwasserstände und Standsicherheiten bewertet werden:

1. Untersuchung des täglichen Tideeinflusses mit einem maximalen Außenwasserstand auf Höhe des mittleren Tidehochwassers. Da der anstehende Klei nur gering wasserdurchlässig ist, wird sich in dieser Schicht binnenseitig der Mittelwasserstand einstellen. Dieser wird am binnenseitigen Modellrand angesetzt.

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 2 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 2 Tage angesetzt.

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

Die Berechnungen werden für den Plan-Zustand durchgeführt, mögliche Auswirkungen des HQ100 im Ist-Zustand werden aus diesen Ergebnissen abgeleitet.

Die Untersuchung der einzelnen Zustände mit unterschiedlichen hydraulischen Randbedingen erfolgt anhand einzelner Untersuchungsschritte (Phasen), die z. T. aufeinander aufbauen. Die einzelnen Berechnungsphasen sind in Tabelle 5 zusammengestellt.

Phase	Simulationsschritt	Erläuterung
0	Initialzustand	Primärspannungen und Porenwasserdruck bei Mw
1	MThw	Sickerlinie bei außen MThw und binnen Mw
2	HW Sommerdeich	Sickerlinie nach 2 Tagen, außen HWSommerdeich, binnen Mw
3	HQ100	Sickerlinie nach 2 Tagen, außen HQ100, binnen Mw
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 5 Berechnungsphasen

Die Ermittlung der Spannungen im Initialzustand erfolgt bei Mittelwasser. Anschließend wird der Wasserstand außen auf das mittlere Tidehochwasser erhöht, während binnen am Modellrand das Mittelwasser festgehalten wird. Hierfür werden die Sickerlinie durch den Deich und der zugehörige Spannungszustand berechnet. Dieser Zustand wird auf der sicheren Seite liegend stationär ermittelt und dient als Ausgangspunkt für die instationären (zeitabhängigen) Berechnungen mit Außenwasserständen auf Höhe OK Sommerdeich und auf Höhe HQ100.

In Tabelle 6 sind für den geplanten Zustand die als Rand- bzw. Anfangsbedingungen angesetzten Wasserstände zusammengestellt.

Fall		Wasserstände		Zeit
		außen [mNN]	binnen [mNN]	[d]
Mittelwasser	Mw	0,22	0,22	-
tägliche Tide	MThw	1,46	0,22	-
Sommerdeich	HW Sommerdeich	2,88	0,22	2
Hochwasser	HQ100	2,97	0,22	2

Tabelle 6 Hydrologische Rand- und Anfangsbedingungen, Plan-Zustand

7.4 Berechnungsergebnisse

Als wesentliche Ergebnisse der Berechnungen werden für den im Abschnitt 7.2 erläuterten maßgebenden Querschnitt die Sickerlinien im Deich sowie die Standsicherheiten ermittelt. In der Anlage 4 sind die Ergebnisse der Berechnungen für Querprofil Station 4+850 für die einzelnen Fälle dargestellt. Abgebildet sind die maßgebenden Gleitkörper der Standsicherheitsberechnungen sowie die Strömungsbilder der Berechnungsphasen mit Wasserspiegeldifferenzen.

In nachfolgender Tabelle 7 sind die Ergebnisse für die untersuchten Querprofile zusammengefasst. Die ermittelten globalen Standsicherheiten sind als M_{sf} angegeben.

Fall	**Wasserstand am Deichfuß**		**Lastfall**	**Sicherheit**
	außen [mNN]	**binnen [mNN]**	**DIN 1054**	**DIN 4084** M_{sf}
tägliche Tide	1,46	0,55	LF 1	1,83 > 1,3
Sommerdeich	2,88	0,55	LF 2	1,78 > 1,2
Hochwasser	2,97	0,55	LF 2	1,80 > 1,2

Tabelle 7 Querprofil Station 4+850 – Berechnungsergebnisse

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.

Wie zuvor erläutert, erfolgte die Berechnung für die tägliche Tide stationär, woraus sich der binnenseitige Anstieg des Wasserstandes im Klei um etwa 0,3 m vom Mittelwasserstand ausgehend auf + 0,55 mNN ergibt. Der tatsächliche Rhythmus der Tide beschränkt sich auf Stunden, wodurch die Berechnung sehr auf der sicheren Seite liegt. Die sich in der Berechnung anschließenden höheren Außenwasserstände beim HW Sommerdeich bzw. HQ100, bewirken mit ihren Einstauzeiten von 2 Tagen keine weitere Erhöhung des binnenseitigen Wasserstandes. Somit zeigt sich, dass zeitlich begrenzte Änderungen des Außenwasserstandes nur geringen Einfluss auf die Wasserspiegellinie in den bindigen Schichten haben. Diese wird binnenseitig am Deichfuß nicht mehr als 0,3 m ansteigen (Anstieg auf etwa + 0,55 mNN). Es ist zu erwarten, dass sich weiter binnen langfristig der Mittelwasserstand im Klei einstellen wird.

Die Druckhöhe in den Klei unterlagernden Sanden steigt im Fall des HQ100 um etwa 0,9 m. Dies beschränkt sich auf den Bereich unmittelbar unterhalb und hinter dem Deich. Ein Anstieg der Wasserstände über die binnenseitige Geländeoberkante ist nicht zu erwarten.

Bei den berechneten Wasserständen und Wasserdruckverhältnissen ist eine ausreichende Sicherheit gegen Aufbruch der Kleischicht infolge Aufschwimmen gemäß DIN 1054 gegeben.

7.5 Gegenüberstellung Ergebnisse Ist-Zustand/Plan-Zustand

Die Untersuchungsergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

Fall/Wasserstand	Ist-Zustand	Plan-Zustand
MThw Ist + 1,46 mNN Plan + 1,46 mNN	Für den Mitteldeich nicht relevant, da Wasserstand durch Sommerdeich gekehrt wird	- ausreichende Standsicherheit der Deichböschung - kein Qualmwasser, Wasserstandsanstieg binnen < 0,3 m (auf etwa + 0,55 mNN) - ausreichende Sicherheit gegen Aufschwimmen
HW Sommerdeich Ist + 2,9 mNN Plan + 2,9 mNN	Für den Mitteldeich nicht relevant, da Wasserstand durch Sommerdeich gekehrt wird	
HQ 100 Ist + 2,98 mNN Plan + 2,97 mNN	- ausreichende Standsicherheit der Deichböschung - kein Qualmwasser, Wasserstandsanstieg binnen	- ausreichende Standsicherheit der Deichböschung - kein Qualmwasser, Wasserstandsanstieg binnen < 0,3 m (auf etwa + 0,55 mNN) - ausreichende Sicherheit gegen Aufschwimmen

Tabelle 8 Gegenüberstellung der Ergebnisse

Da die Wasserstände im Fall HQ100 im Ist-Zustand praktisch identisch sind mit denen im Plan-Zustand gilt hinsichtlich der Folgerungen für den Ist-Zustand das Berechnungsergebnis des Plan-Zustandes.

8 FOLGERUNGEN

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 HQ 100 sind an der maßgebenden Stelle des binnenseitigen Deichfußes nur geringen Anstiege des Grundwasserstandes zu erwarten.
- In den dem Klei unterlagerten Sanden wirkt erhöhter Druck auf die Basis der Kleischicht. Es ist ausreichende Sicherheit gegen Aufbruch der Kleischicht gegeben.

Im Falle der geplanten Öffnung des Sommerdeichs treten damit 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 den Mitteldeich schneller erreichen, es wird jedoch auch schneller wieder ablaufen können.

9 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 Maßnahmengebiet Neuenkirchen 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 gegeben. Binnendeichs steigt das Grundwasser den Berechnungsergebnissen zufolge um wenige Dezimeter an, vgl. Abschnitt 8.

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 Maßnahmengebiet Neuenkirchen
Anlage 1.2	Lage der Untergrundaufschlüsse Neuenkirchen
Anlage 2	Ergebnisse der Untergrundaufschlüsse Neuenkirchen
Anlage 2.1	Längsschnitt
Anlage 2.2	Querschnitte
Anlage 2.2.1	Querschnitt Station 4+750
Anlage 2.2.2	Querschnitt Station 4+850
Anlage 2.2.3	Querschnitt Station 4+950
Anlage 2.3	Querprofile
Anlage 2.3.1	Querprofile Station 4+750
Anlage 2.3.2	Querprofile Station 4+850
Anlage 2.3.3	Querprofile Station 4+950
Anlage 3	Ergebnisse der bodenmechanischen Laborversuche
Anlage 3.1	Zusammenstellung
Anlage 3.2	Kornverteilungskurven
Anlage 3.3	Zustandsgrenzen
Anlage 3.4	Scherversuch
Anlage 3.5	Durchlässigkeitsversuche
Anlage 4	Ergebnisse der Standsicherheitsuntersuchungen Station 4+850 Planzustand (Seiten 1 bis 6)