



GRUNDBAULABOR BREMEN  
INGENIEURGESELLSCHAFT  
FÜR GEOTECHNIK MBH  
KLEINER ORT 2  
28357 BREMEN  
TELEFON (0421) 20770-0  
TELEFAX (0421) 27 42 55  
GLB@GRUNDBAULABOR.DE

Objekt-Nr.: 17 11964  
Datum: 29.06.2018  
Zeichen: SB/Re  
Datei: O:\17\11964\GTB1.2.docx

Anlage zum  
wasserbehördlichen Verfahren  
Bremen, 05. Feb. 2021

**Stadtstrecke; Standsicherheitsnachweis des Deiches an der Piepe,  
28197 Bremen**

**Geotechnischer Bericht Nr. 1**

**Beurteilung der Standsicherheit**

---

Auftraggeber: Bremischer Deichverband am linken Weserufer  
Warturmer Heerstr. 125  
28197 Bremen



## INHALTSVERZEICHNIS

<b>1</b>	<b>Anlass der geotechnischen Untersuchungen</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Baumaßnahme (Anlage 1)</b>	<b>4</b>
2.1	Planunterlagen	4
2.2	Untersuchungsfläche (Anlage 1)	5
2.3	Deichquerschnitt an der Piepe	6
2.4	Geotechnische Kategorien	7
<b>3</b>	<b>Baugrund [U9] und [U10]</b>	<b>8</b>
<b>4</b>	<b>Deichstandsicherheit</b>	<b>8</b>
4.1	Aufgabenstellung und Berechnungsquerschnitt	8
4.2	Nachweisführung nach DIN 19712:2013-01	9
4.2.1	Allgemeines Nachweiskonzept	9
4.2.2	Spezielles Nachweiskonzept	11
4.3	Baugrund (Anlage 4.2)	12
4.4	Bemessungswasserstände (Anlage 4.1)	12
4.5	Rechnerische Bodenkennwerte, Systemparameter und Verkehrslasten	13
4.6	Teilsicherheitsbeiwerte	14
4.7	Hydrogeologische Situation	14
4.7.1	Software	14
4.7.2	Kalibrierungsrandbedingungen	16
4.7.3	Simulationsablauf	17
4.7.4	Systemparameter und Randbedingungen (Anlage 4.2)	18
4.7.5	Vergleich der Messdaten und der Berechnung (Anlage 4.3)	19
4.7.6	Simulationsergebnisse der Bemessungsturmflut (Anlage 4.4)	21
4.8	Böschungsbruchuntersuchungen	22
4.8.1	Software	22
4.8.2	Piepe-Wasserstand + 0,70 m NHN (Anlage 5.1.1 bis 5.7.3)	22
4.8.3	Piepe-Wasserstand + 1,20 m NHN (Anlage 6.1.1 bis 6.7.3)	24
4.8.4	Piepe-Wasserstand + 2,20 m NHN (Anlage 7.1.1 bis 7.7.3)	25
4.8.5	Betrachtung eines außergewöhnlichen Lastfalles (Anlagen 8.1.1 bis 8.7.3)	26
4.9	vorzeitig bauliche Ertüchtigungsmaßnahmen	28
4.9.1	Variante 1: Deichfußsicherung	28
4.9.2	Variante 2: Abflachen der Böschung piepeseitig (Neigung 1 : 2,6)	29
4.9.3	Variante 3: Abflachen der Böschung piepeseitig (Neigung 1 : 3,1)	31
<b>5</b>	<b>GTB 2 von 2012 (11 10089) – GTB 1 von 2018 (17 11964)</b>	<b>32</b>
<b>6</b>	<b>Stand der Technik – Bestandssituation</b>	<b>33</b>
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>35</b>
<b>8</b>	<b>Anlagenverzeichnis</b>	<b>36</b>

## **1 Anlass der geotechnischen Untersuchungen**

Der Bremische Deichverband am linken Weserufer plant im Rahmen des Generalplans Küstenschutz die Ertüchtigung der Stadtstrecke Kleine Weser. Aufgrund der Planungszeiten soll überprüft werden, ob zur Sicherstellung der Standsicherheit des Deiches an der Piepe vorzeitig bauliche Maßnahmen umgesetzt werden müssen.

Das Grundbaulabor Bremen wurde vom Bauherrn beauftragt, eine Beurteilung der geotechnischen Standsicherheit des Deiches an der Piepe anhand einer instationären Berechnung in einem charakteristischen Querschnitt (Querprofil 2 [U7]) abzugeben.

Die Ergebnisse der Baugrunderkundungen sowie vorhergehende Berechnungen zur Standsicherheit des Deichabschnittes sind folgenden Geotechnischen Berichten zu entnehmen:

- Deichstandsicherheit, Stadtstrecke Kleine Weser, 28197 Bremen, Beurteilung der Standsicherheit, Geotechnischer Bericht 1, vom 20.02.2011 (11 10089) [U9]
- Deichstandsicherheit, Stadtstrecke Kleine Weser, 28197 Bremen, Beurteilung der Standsicherheit, Geotechnischer Bericht 2, vom 15.08.2012 (11 10089) [U10]

Dieser Geotechnische Bericht 1 enthält die Ergebnisse der instationären Berechnungen, der geotechnischen Standsicherheitsberechnungen sowie eine Beurteilung der Handlungsnotwendigkeit und Empfehlungen zu notwendigen baulichen Maßnahmen zur Sicherstellung der Standsicherheit.

## 2 **Baumaßnahme (Anlage 1)**

### 2.1 **Planunterlagen**

#### Erhalten vom Bremischen Deichverband am linken Weserufer

- [ 1 ] HWS Stadtstrecke, Querprofil 1 + 727 175, Dipl.-Ing. Dieter Borstel und Dipl.-Ing. Herbert Horst – Öffentlich bestellte Vermessungsingenieure, erhalten per Mail am 26.10.2017
- [ 2 ] HWS Stadtstrecke, Übersichtsplan, Dipl.-Ing. Dieter Borstel und Dipl.-Ing. Herbert Horst – Öffentlich bestellte Vermessungsingenieure, erhalten per Mail am 26.10.2017
- [ 3 ] Umsetzung Generalplan Küstenschutz Machbarkeitsstudie Stadtstrecke – Grundwasserstandsmessungen, Untersuchungsbericht, Institut für Geotechnik – Hochschule Bremen, erhalten per Mail am 26.10.2017
- [ 4 ] Umsetzung Generalplan Küstenschutz Machbarkeitsstudie Stadtstrecke – Generelle Beurteilung der Tragfähigkeit des Baugrundes und der Gründungsmöglichkeiten für die bauliche Maßnahmen, Geotechnischer Bericht, Institut für Geotechnik – Hochschule Bremen, erhalten per Mail am 26.10.2017
- [ 5 ] Sonderdruck aus „Die Küste“, Die Sturmflut vom 16./17. Februar 1962 im Lande Bremen, SUBV, erhalten per Mail am 16.11.2017
- [ 6 ] Werdersee und Weserdeich, Lageplan, Öffentl. best. Verm. Ing. Wolfgang Schaefer, vom 22.02.2018, erhalten per Mail am 28.02.2018
- [ 7 ] Weserdeich (links) zw. Stephani-Brücke und Dammacker, Querprofil 2, Öffentl. best. Verm. Ing. Wolfgang Schaefer, vom 28.02.2018, erhalten per Mail am 28.02.2018
- [ 8 ] Vermessungspläne von 1983, Querschnitte der Kleinen Weser im Bereich der Piepe, übermittelt vom SUBV, erhalten per Mail am 25.04.2018

### Grundbaulabor Bremen

- [ 9 ] Deichstandsicherheit, Stadtstrecke Kleine Weser, 28197 Bremen, Beurteilung der Standsicherheit, Geotechnischer Bericht 1, vom 20.02.2011 (11 10089)
- [ 10 ] Deichstandsicherheit, Stadtstrecke Kleine Weser, 28197 Bremen, Beurteilung der Standsicherheit, Geotechnischer Bericht 2, vom 15.08.2012 (11 10089)

### Deich/Damm

- [ 11 ] Empfehlungen des Arbeitskreises Numerik in der Geotechnik – EANG, 2014
- [ 12 ] Karl Josef Witt, Grundbau-Taschenbuch Teil 2: Geotechnische Verfahren, 2009
- [ 13 ] DIN 4084 „Baugrund- Geländebruchberechnungen“, Januar 2009
- [ 14 ] Merkblatt DWA-M 507-1, Deiche an Fließgewässern, Teil 1: Planung, Bau und Betrieb
- [ 15 ] BAW-Merkblatt „Standsicherheit von Dämmen an Bundeswasserstraßen (MSD)“, Ausgabe 2011

## **2.2 Untersuchungsfläche (Anlage 1)**

Der Deichabschnitt an der Stadtstrecke liegt zwischen der Eisenbahnbrücke und der Straße „Am Dammacker“ am linken Weserufer sowie am linksseitigen Ufer der Kleinen Weser.

Die Deichstrecke liegt in den beiden Bremer Stadtteilen „Alte Neustadt“ und „Buntentor“.

Der in diesem Geotechnischen Bericht 1 charakteristische Berechnungsquerschnitt (Querprofil 2 [U7]) wird auf der einen Seite durch das Ufer der „Kleinen Weser“ und auf der anderen Seite durch das Ufer der „Piepe“ begrenzt.

Einen Lageplan im Maßstab 1 : 20.000 zeigt die Anlage 1.

### 2.3 Deichquerschnitt an der Piepe

Der bestehende Deichquerschnitt an der Piepe (Querprofil 2) wurde im Februar 2018 von dem Öffentlich bestellten Vermessungsingenieur Wolfgang Schaefer in seiner Lage und Höhe vermessen, siehe [U7]. Die Höhe der Deichkrone liegt bei + 8,86 m NN.

Die Vermessungen des Querprofils 2 geben keine Auskunft über die anzutreffenden Sohlthiefen der Kleinen Weser und der Piepe.

Die übermittelten Vermessungsunterlagen von 1983 [U8] vom SUBV zeigen Sohlthiefen der Kleinen Weser im Bereich von - 0,56 m NN bis + 0,04 m NN, siehe Abbildung 1.

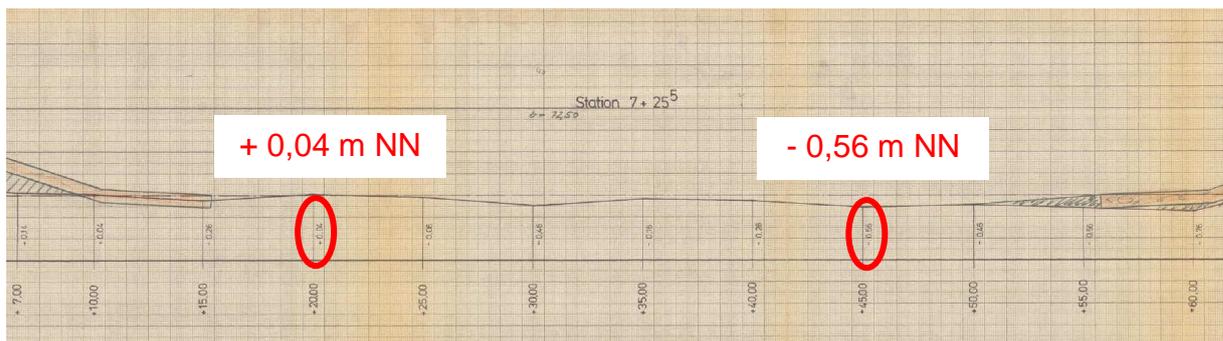


Abbildung 1: Sohlthiefen der Kleinen Weser (Ausschnitt aus [U8])

Die im Berechnungsquerschnitt durch die Bohrsondierung BS 14 ([U9] und [U10]) angenommene Sohlthiefe der Kleinen Weser liegt bei ca. - 1,5 m NN und die Sohlthiefe der Piepe bei der Sondierung BS 13 ([U9] und [U10]) bei ca. - 1,0 m NN.

Die im Berechnungsquerschnitt tiefer liegenden Sohlthiefen (im Vergleich zu den Vermessungsplänen von 1983 [U8]) wirken sich negativ auf die Berechnung der Standsicherheit des Querprofils 2 aus.

Nach telefonischer Absprache am 09.05.2018 mit Herrn Dierks, Bremischer Deichverband am linken Weserufer, wurden auf der sicheren Seite liegend die Böschungsneigungen im Uferbereich der Kleinen Weser und der Piepe auf die in den Bohrsondierungen BS 13 und BS 14 ([U9] und [U10]) angetroffenen Ufersohlen (festgestellten Schluffschichten) verlängert.

Gemäß [U3] liegt der Dauerwasserstand am „Wehr Kleine Weser“ bei rd. + 3,8 m NN. Bei Sturmfluten wird das Wehr unterwasserseitig überströmt und der Wasserstand der „Kleinen Weser“ entspricht während der Überflutungsphase ungefähr dem Tidewasserstand der Weser.

## **2.4 Geotechnische Kategorien**

Nach Eurocode 7 (DIN EN 1997-1 mit DIN 1054: 2010-12) werden bautechnische Maßnahmen in drei geotechnische Kategorien eingestuft. Die geotechnischen Kategorien sind Gruppen, in die bautechnische Maßnahmen nach dem geotechnischen Risiko, das sich nach dem Schwierigkeitsgrad der Konstruktion, der Baugrundverhältnisse und der Wechselbeziehung zur Umgebung richtet, folgendermaßen eingestuft werden:

Die geotechnische Kategorie 1 (GK 1) umfasst kleine einfache Bauobjekte bei einfachen und übersichtlichen Baugrundverhältnissen, so dass die Standsicherheit aufgrund gesicherter Erfahrung beurteilt werden kann.

Die geotechnische Kategorie 2 (GK 2) umfasst Bauobjekte und Baugrundverhältnisse mittleren Schwierigkeitsgrades, bei denen die Sicherheit zahlenmäßig nachgewiesen werden muss und die eine ingenieurmäßige Bearbeitung mit geotechnischen Kenntnissen und Erfahrungen verlangen.

Die geotechnische Kategorie 3 (GK 3) umfasst Bauobjekte mit schwieriger Konstruktion und/oder mit schwierigen Baugrundverhältnissen, die zur Bearbeitung vertiefte geotechnische Kenntnisse und Erfahrungen auf dem jeweiligen Spezialgebiet der Geotechnik verlangen.

Für wasserbelastete Dämme, Staudämme, Deiche, Absperrbauwerke von Sedimentationsbecken und Dämme von Hochwasserrückhaltebecken wurde das geometrische Kriterium der Stauhöhe auf  $\leq 2$  m (GK 1) und  $> 4$  m (GK 3) im EC 7-1 festgelegt. Für eine Einstufung in GK 3 gilt alternativ das Stauvolumen von  $> 100.000$  m<sup>3</sup> als Kriterium.

Die Baumaßnahme ist in die geotechnische Kategorie 3 einzustufen.

### **3 Baugrund [U9] und [U10]**

Die Angaben zu dem Baugrund im Bereich der Stadtstrecke und im Deichquerschnitt an der Piepe, wie z.B.:

- Baugrundaufschlüsse
- Baugrundverhältnisse
- Grundwasserverhältnisse
- Ergebnisse von Laborversuchen

sind den Unterlagen [U9] und [U10] zu entnehmen.

## **4 Deichstandsicherheit**

### **4.1 Aufgabenstellung und Berechnungsquerschnitt**

Nach Rücksprache mit dem Deichverband am linken Weserufer und nach Bestätigung einer Kettentide wurde vom Deichverband eine Simulation auf Basis einer instationären Finiten-Elemente-Methode im Deichquerschnitt (Querprofil 2) an der Piepe [U7] mit anschließender Beurteilung der Deichstandsicherheit beauftragt.

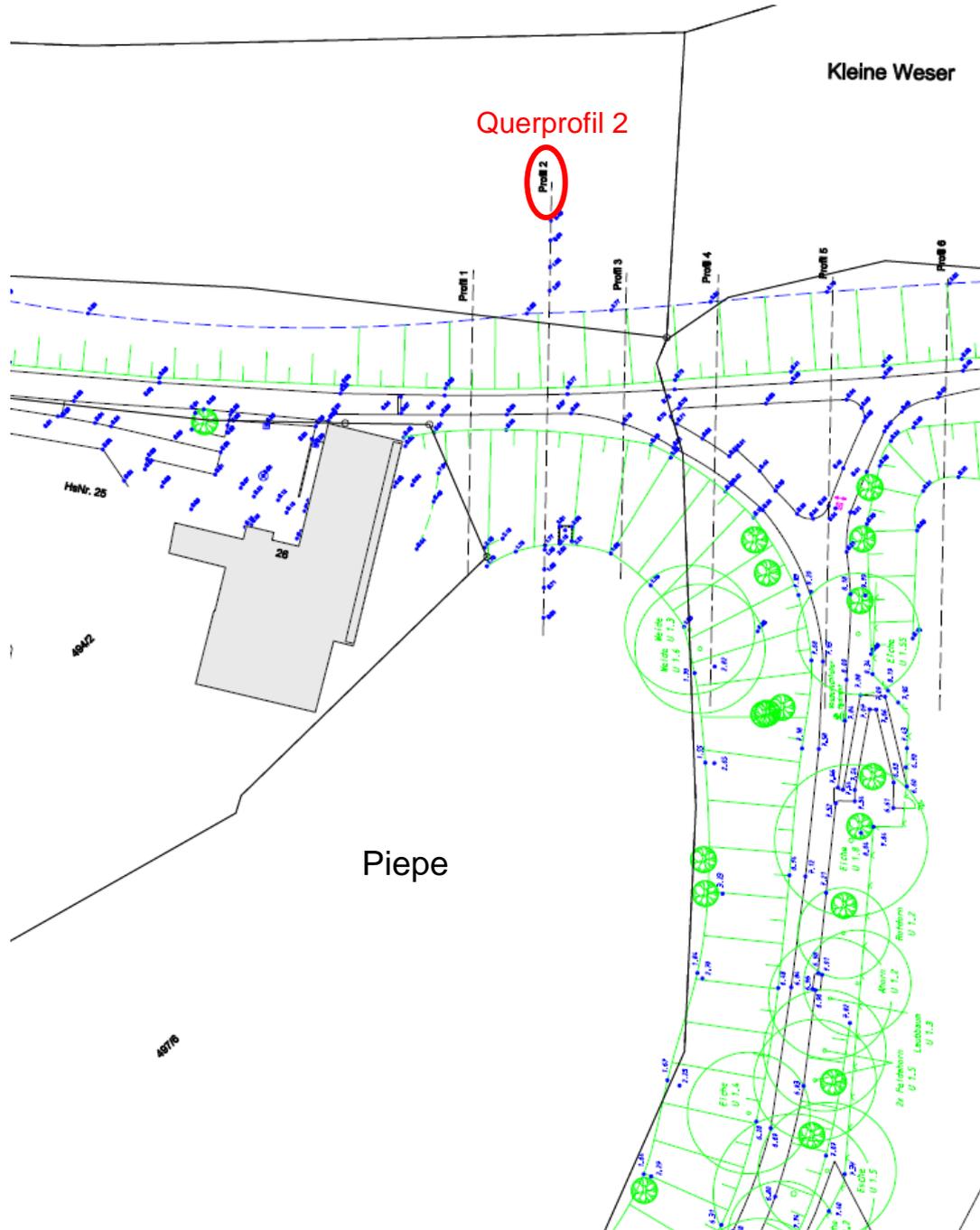


Abbildung 2: Berechnungsquerschnitt (Ausschnitt aus [U6])

## 4.2 Nachweisführung nach DIN 19712:2013-01

### 4.2.1 Allgemeines Nachweiskonzept

Das Nachweiskonzept orientiert sich an der DIN 19712:2013-01 Hochwasserschutzanlagen an Fließgewässern und an der DIN 1054 Baugrund – Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau – Ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-1.

Nach DIN 19712:2013-01 sind folgende Nachweise zu erbringen:

1. Nachweis ausreichender globaler und lokaler Standsicherheit (GEO-2 bzw. GEO-3):
  - Böschungsbruch (global),
  - Böschungsgrundbruch (global),
  - Abschieben/Gleiten des Deichkörpers (global)
  - lokale Standsicherheit der wasser- und landseitigen Böschungen,
  - lokale Standsicherheit am Böschungsfuß (Spreizsicherheit),
  - Standsicherheit bei Belastungen infolge des Versagens der Dichtung,
  - Standsicherheit bei Belastungen infolge des Versagens bei Dränung,
  - Standsicherheit infolge des Versagens von sicherheitsrelevanten Bauteilen bzw. Bauwerken (z.B. von statisch wirksamen Innendichtungen).
  
2. Nachweis gegen das Versagen durch hydraulischen Grundbruch (HYD) und Aufschwimmen (UPL):
  - Auftriebssicherheit bzw. hydraulischer Grundbruch,
  - Standsicherheit der Böschungsdichtungen bei Wasserdruck vom Deichkörper her.
  
3. Nachweis der Gebrauchstauglichkeit (SLS):
  - Nachweis Verträglichkeit von Setzungen und Verformungen,
  - Nachweis der Sicherheit gegen Rissbildungen.
  
4. Nachweis der Sicherheit gegen Materialtransport (HYD):
  - Nachweis zur Sicherheit gegen Kontakterosion (mechanische Filterwirksamkeit),
  - Nachweis zur Suffusionsstabilität,
  - Nachweis zum Erosionsgrundbruch im Deichkörper bzw. im Untergrund,
  - Nachweis zur Fugenerosion.

Nach [U14] Tabelle 4 sind folgende Bemessungssituationen und Einwirkungen an einem Deich der Klasse I (GK 3) zu berücksichtigen:

Einwirkungen		Bemessungssituation					
		BS-P ständig		BS-T vorübergehend	BS-A außergewöhnlich		
		Hochwasser- zustand		Bauzustand	besondere Belastungen		
		P.1	P.2	T.1	A.1	A.2	A.3
Ständige	Eigenlasten und Auflasten	X	X	X	X	X	X
Veränderliche	Verkehrslasten	X	X	X	X	X	X
	Beanspruchung durch BHW	X				X	
	Beanspruchung durch aus BHW fallender Wasserspiegel		X				
	Beanspruchung durch BauHW			X			X
Außergewöhnliche	Beanspruchung durch Wasserstand „bordvoll“				X		
	Beanspruchung infolge Versagens von Dichtungen bzw. Dräns und Sonstiges					X	X

#### 4.2.2 Spezielles Nachweiskonzept

Aus Sicht des Grundbaulabor Bremens sind folgende Nachweise für den IST-Zustand des Deiches im Bereich der Piepe zu führen:

- BS-P.1: GEO-3, globaler Böschungsbruch mit einer Verkehrslast von 34 kN/m<sup>2</sup>
- BS-P.2: GEO-3, globaler Böschungsbruch mit einer Verkehrslast von 34 kN/m<sup>2</sup>
- BS-A.2: GEO-3, globaler Böschungsbruch mit einer Verkehrslast von 34 kN/m<sup>2</sup>

Auf weitere Standsicherheitsnachweise kann verzichtet werden (siehe hierzu auch [U10], Abschnitt 5.4).

### 4.3 **Baugrund (Anlage 4.2)**

Der Baugrund wurde gemäß der vorhergehenden Standsicherheitsberechnungen für den Querschnitt an der Piepe aus den Geotechnischen Berichten 1 vom 20.02.2011 und 2 vom 15.08.2012 ([U9] und [U10]) übernommen.

Das in Ansatz gebrachte Bodenprofil ist auf der Anlage 4.2 zur Kalibrierung des FE-Modells angegeben. Die rechnerischen Bodenkennwerte und Systemparameter sind in Abschnitt 4.4 enthalten.

### 4.4 **Bemessungswasserstände (Anlage 4.1)**

#### Kleine Weser:

Für die instationäre Berechnung wurde von uns eine Bemessungsganglinie auf der Grundlage des Weserhochwassers von 1962 (siehe [U5]) vom Deichverband am linken Weserufer sowie vom Senator für Umwelt, Bau und Verkehr (SUBV) bestätigt.

Die Kettentide des Bemessungshochwassers ist der Anlage 4.1 zu entnehmen. Das Bemessungshochwasser der Weser liegt für den Deichabschnitt bei + 7,40 m NHN.

Der Wasserstand in der Kleinen Weser erreicht aufgrund des Wehreinbaus einen minimalen Wert von + 3,80 m NHN.

#### Piepe:

Für den Wasserstand in der Piepe liegen keine Grundwasserstandsmessungen vor. Es wurde für die Piepe ein Schwankungsbereich der Tiefst- und Höchstwasserstände gemäß dem Geologischen Dienst für Bremen (GDfB) von + 0,70 m NN bis + 2,20 m NN angesetzt.

Der Wasserstand in der Piepe wird somit für die Berechnung der Standsicherheit folgendermaßen angesetzt:

1. + 0,70 m NHN
2. + 1,20 m NHN
3. + 2,20 m NHN

#### 4.5 Rechnerische Bodenkennwerte, Systemparameter und Verkehrslasten

Die rechnerischen Bodenkennwerte werden auf Basis von Erfahrungswerten als charakteristische Bodenkennwerte entsprechend dem Sicherheitskonzept mit Partial-sicherheiten entsprechend DIN 1054: 2010-12 festgelegt.

Systemparameter der hydrogeologischen Simulation:

Schicht	Durchlässigkeit [m/s]		n <sub>eff</sub> [-]
	k <sub>x</sub>	k <sub>y</sub>	
Deichabdeckung	1 · 10 <sup>-8</sup>	1 · 10 <sup>-8</sup>	0,05
Sandauffüllung	1 · 10 <sup>-4</sup>	1 · 10 <sup>-4</sup>	0,15
Schluff	1 · 10 <sup>-8</sup>	1 · 10 <sup>-8</sup>	0,05
Wesersande	1 · 10 <sup>-4</sup>	1 · 10 <sup>-4</sup>	0,10
Dummy A Schluff	1,1 · 10 <sup>-9</sup>	1 · 10 <sup>-8</sup>	0,05
Dummy A Wesersande	1,1 · 10 <sup>-5</sup>	1 · 10 <sup>-4</sup>	0,10
Dummy E Schluff	1 · 10 <sup>-8</sup>	1 · 10 <sup>-8</sup>	0,05
Dummy E Wesersande	1 · 10 <sup>-4</sup>	1 · 10 <sup>-4</sup>	0,10

Rechnerische Bodenkennwerte der Standsicherheitsberechnung:

Boden	Reibungswinkel	Kohäsion	Wichte
	φ' <sub>k</sub> [°]	c' <sub>k</sub> [kN/m <sup>2</sup> ]	γ <sub>k</sub> [kN/m <sup>3</sup> ]
Deichabdeckung	17,5°	5	17
Sandauffüllung	30°	0	18
Schluff	20°	5	17
Wesersande	35°	0	19

Ansatz der Verkehrslast:

Im Bereich der Deichkrone wurde auf einer Breite von 3 m eine Verkehrslast von 34 kN/m<sup>2</sup> (SLW 60) in Ansatz gebracht.

#### 4.6 Teilsicherheitsbeiwerte

Die Teilsicherheitsbeiwerte für die Einwirkungen und Widerstände für den Endzustand (BS-P) wurden aus der EC 7 übernommen und sind nachfolgend aufgeführt:

	<b>Formel- zeichen</b>	<b>BS-P</b>
Ständige Einwirkungen	$\gamma_G$	1,00
ungünstige veränderliche Einwirkungen	$\gamma_Q$	1,30
Reibungsbeiwert $\tan \varphi'$ des dränierten Bodens	$\gamma_\varphi$	1,25
Kohäsion $c'$ des dränierten Bodens	$\gamma_c$	
Scherfestigkeit $c_u$ des undränierten Bodens	$\gamma_{cu}$	

#### 4.7 Hydrogeologische Situation

##### 4.7.1 Software

Die Simulation der hydrogeologischen Situation wurde mit dem Programm GGU - Flow 2D durchgeführt.

Das Programm löst im Fall vertikal ebener Systeme die Differentialgleichung:

$$k_r \cdot k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_r \cdot k_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + Q = 0$$

$k_x, k_y$  = Durchlässigkeiten in z.B. [m/s] für x- und y- Richtung

$h$  = Standrohrspiegelhöhen in [m]

$k_r$  = Beiwert zur Bestimmung der Durchlässigkeiten im ungesättigten Bereich [-]

$Q$  = Wassermenge in z.B. [m<sup>3</sup>/s]

$x, y$  = Koordinaten z.B. in [m]

Der Wert  $k_r$  erfasst die Veränderung der Durchlässigkeit in der ungesättigten Zone  $r$  oberhalb des Grundwasserspiegels und kann zwischen 0,0 und 1,0 liegen. In gesättigten Systembereichen ist  $k_r$  gleich 1,0. Der Wert  $k_r$  ist eine Funktion des Porenwasserdrucks  $u$ . Der Porenwasserdruck  $u$  berechnet sich aus der Standrohrspiegelhöhe  $h$ , der Ortshöhe  $y$  und der Wichte des Wassers  $\gamma_w$ .

$$u = (h - y) * \gamma_w$$

Die Bewegung des Grundwassers lässt sich im Allgemeinen durch zwei Kurvenscharen erfassen. Dies sind die Stromlinien (Bahnen der Wasserteilchen) und die Äquipotentiallinien (Linien gleicher Standrohrspiegelhöhen, Niveaulinien). Im Computer wird das Modell des Querschnitts durch eine endliche Anzahl von Elementen abgebildet.

Begrenzungslinien des vom Wasser durchströmten Bereichs sind Stromlinien. Geländelinien, die unter Wasser liegen und in denen Grundwasser ein- bzw. austritt, sind Äquipotentiallinien (Randäquipotentiallinien). Sie entsprechen den Randbedingungen.

Folgende weitere allgemeine Anmerkungen zum Programm GGU-SS FLOW2D sind wichtig:

- Es werden Dreieckselemente benutzt.
- Es gilt das Darcy'sche Gesetz.
- Die Standrohrspiegelhöhen werden elementweise linear berechnet.
- Aus der linearen Annäherung der Standrohrspiegelhöhen ergibt sich eine elementweise konstante Annäherung der Geschwindigkeiten. Um die Güte der Geschwindigkeitsannäherung zu verbessern, werden die Geschwindigkeiten für die Berechnung von Stromlinien in einer Nachlaufrechnung auf Knotenwerte gemittelt.
- Das Programm unterscheidet nicht zwischen Bewässerungs- und Entwässerungspfad (Hysterese).

#### 4.7.2 Kalibrierungsrandbedingungen

Für die Kalibrierung können nur Messergebnisse der Grundwassermessstellen herangezogen werden, die im Bereich des Deiches an der Piepe in den unteren Sanden gemessen worden sind und eventuell gemessene Wasserstände der Kleinen Weser, siehe Abbildung 3.

Im Bereich des Deiches an der Piepe liegen Messergebnisse der Hochschule Bremen für die Grundwassermessstelle GWM-3T vom 07.10.2015 bis zum 20.04.2017 in einem Messintervall von 15 Minuten in den unteren Sanden vor, die für die Kalibrierung des Modelles herangezogen werden.

Im Bereich der Kleinen Weser liegen keine Wasserstandsmessungen vor und es muss für die Kalibrierung von einem konstanten Einstauwasserstand von + 3,80 m NN ausgegangen werden. Die für die Weser gemessenen Wasserstände im Bereich der Großen Weserbrücke liegen vor dem Wehr und können nicht für die Kalibrierung hinter dem Weserwehr herangezogen werden.

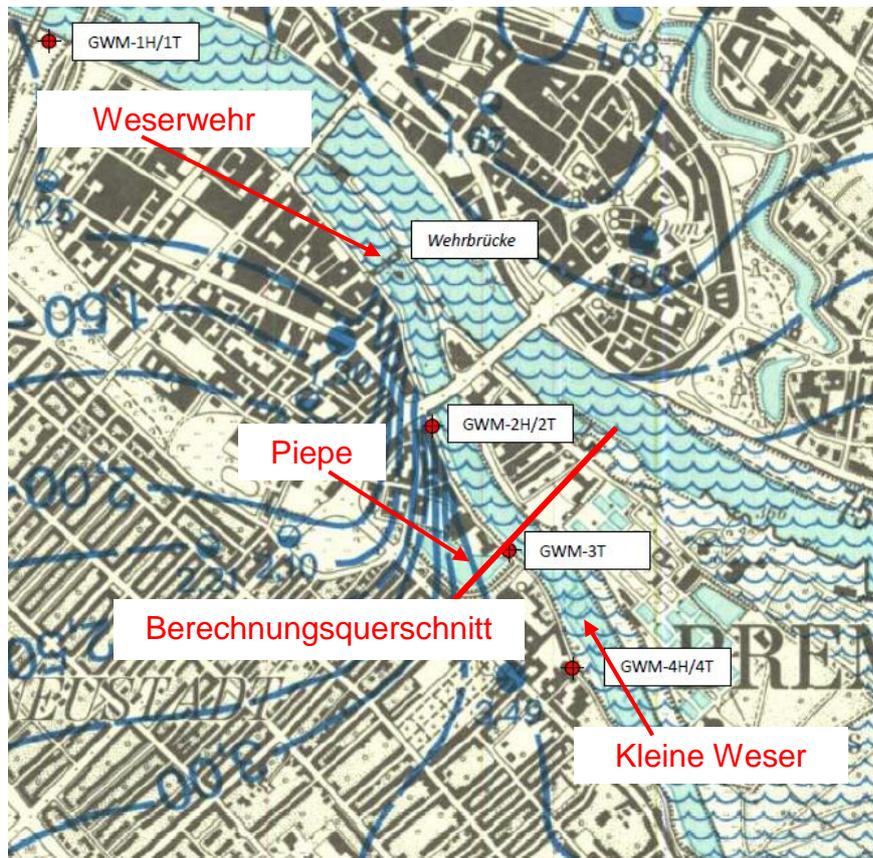


Abbildung 3: Ausschnitt aus [U3] – Grundwasserstandsmessungen

### 4.7.3 Simulationsablauf

In einem ersten Schritt wurden die Messergebnisse der Grundwasserstandsmessungen vom 07.10.2015 bis zum 20.04.2017 der Hochschule Bremen – Institut für Geotechnik [U3] im Bereich der Piepe (GWM-3T) im Zeitraum vom 13.01.2017 bis zum 15.01.2017 (Sturmflutereignis, siehe Abbildung 4) mit einem Stauwasserstand der Kleinen Weser von + 3,80 m NN und einem mittleren Piepe-Wasserstand von + 1,20 m NN (siehe Abschnitt 4.4) modelliert. Die Systemparameter wurden in den in der Natur vorkommenden Schwankungsbereichen so variiert, dass eine möglichst gute Übereinstimmung der Berechnungsergebnisse mit den Messergebnissen eintritt.

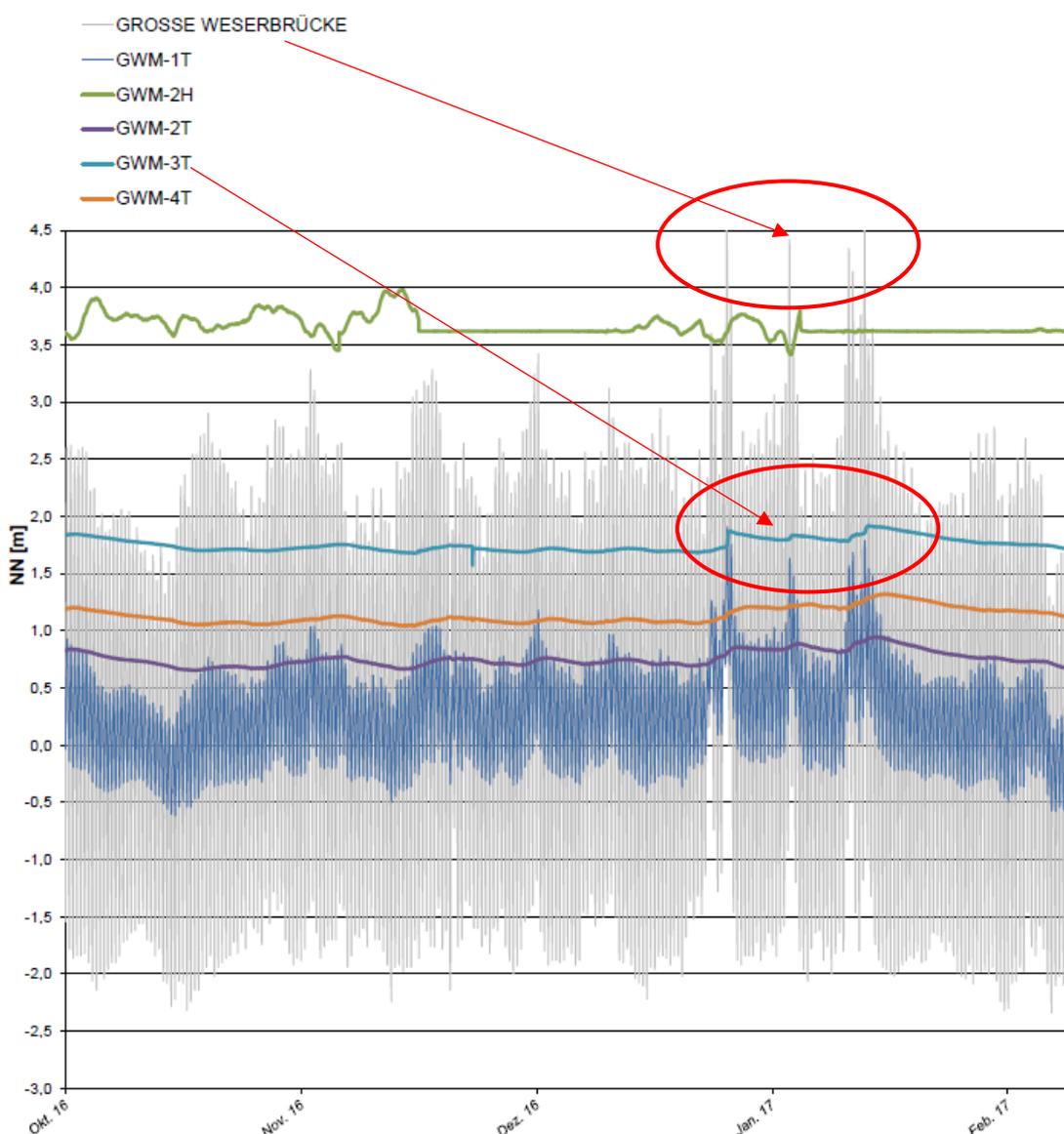


Abbildung 4: Ausschnitt aus [U3] – Messergebnisse Sturmflutereignis

In einem zweiten Schritt wurde mit dem kalibrierten Modell die vorgegebene Kettentide mit einem Bemessungshochwasser von + 7,40 m NHN (Anlage 4.1) als Randbedingung am Weserufer simuliert. Weiterhin wurde der Wasserstand in der Piepe mit + 0,70 m NHN, + 1,20 m NHN und + 2,20 m NHN als Modellrandbedingung variiert. Die übrigen Systemparameter wurden aus dem ersten Schritt übernommen.

#### 4.7.4 Systemparameter und Randbedingungen (Anlage 4.2)

Die Systemparameter im ersten Simulationsschritt wurden an die Messwerte angepasst. Zur Abbildung des Bemessungshochwassers und zur horizontalen Verlängerung des linken Modellrandes wird ein zusätzlicher Dummy (Dummy A) am linken Systemrand, entsprechend Gl. 1.4 und Bild 1.14 der Empfehlungen des Arbeitskreises Numerik in der Geotechnik – EANG, eingeführt.

$$k_{ersatz} = k \frac{r_2}{r_3}$$

bspw.  $k = 1 \times 10^{-8} \text{ m/s}$   
 $r_2 = 10 \text{ m}$   
 $r_3 = 90 \text{ m}$

$$k_{ersatz} = 1 \cdot 10^{-8} \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \frac{10\text{m}}{90\text{m}} = 1,11 \cdot 10^{-9} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Die dargestellten 10 m entsprechen somit einer Verlängerung des Systemrandes um 90 m.

Am rechten Modellrand wurde der Dummy (Dummy E) dargestellt, aber nicht in Ansatz gebracht. Der Wasserstand der Piepe wurde für die Kalibrierung am rechten Systemrand mit einem mittleren Wasserstand von + 1,20 m NN aufgebracht. Der untere Systemrand ist geschlossen.

Die Systemparameter der hydrogeologischen Situation sind dem Abschnitt 4.4 zu entnehmen.

Die Baugrundsichtung, die Randbedingungen und der FE-Knoten für die Grundwassermessstelle GWM-3T (Potentialknoten 537) sind auf der Anlage 4.2 dargestellt.

#### 4.7.5 Vergleich der Messdaten und der Berechnung (Anlage 4.3)

Die Anlage 4.3 zeigt, dass mit den angegebenen Parametern die Kalibrierung eine ausreichende quantitative und qualitative Übereinstimmung (Abweichung vom gemessenen zum berechneten Wert entspricht 3 cm) der Berechnungsergebnisse mit den Messergebnissen erreicht wurde:

- GWM-3T max. gemessen: + 1,91 m NN
- Potentialknoten 537 max. berechnet: + 1,94 m NN

Die dargestellte errechnete Ganglinie (Wasserstände) des Potentialknotens 537 entspricht der Grundwassermessstelle GWM-3T in einer Tiefe von – 2,25 m NN.

Für die weiteren Berechnungen der Standsicherheit der Uferböschung wurde das Potentialnetz an allen Scheitelpunkten des Bemessungshochwassers (Anlage 4.1) sowie für drei unterschiedliche Piepe-Wasserstände (+ 0,70 m NHN, + 1,20 m NHN und + 2,20 m NHN) erzeugt und in die Böschungsbruchberechnung eingearbeitet:

<b>Zeit</b>  <b>[s]</b>	<b>Datum und Uhrzeit</b> <b>beispielhaft</b> <b>[tt.mm.jjjj] [hh:mm]</b>	<b>Wasserstand</b> <b>Kleine Weser</b>
0	31.12.2019 20:00	+ 3,80 m NHN
45000	01.01.2020 08:30	+ 6,05 m NHN
66600	01.01.2020 14:30	+ 4,15 m NHN
88560	01.01.2020 20:36	+ 7,40 m NHN
115200	02.01.2020 04:00	+ 4,75 m NHN
130320	02.01.2020 08:12	+ 6,45 m NHN
259200	03.01.2020 20:00	+ 3,80 m NHN

Die Potentialfelder zu den unterschiedlichen Zeitpunkten sind auf folgenden Anlagen dargestellt:

<b>Piepe-Wasserstand</b> <b>[m NHN]</b>	<b>Zeitpunkt</b> <b>[s]</b>	<b>Wasserstand</b> <b>Kleine Weser</b> <b>[m NHN]</b>	<b>Anlagen-</b> <b>Nr.</b>
+ 0,70 (Anlage 5)	0	+ 3,80	5.1.1
	45000	+ 6,05	5.2.1
	66600	+ 4,15	5.3.1
	88560	+ 7,40	5.4.1
	115200	+ 4,75	5.5.1
	130320	+ 6,45	5.6.1
	259200	+ 3,80	5.7.1
+ 1,20 (Anlage 6)	0	+ 3,80	6.1.1
	45000	+ 6,05	6.2.1
	66600	+ 4,15	6.3.1
	88560	+ 7,40	6.4.1
	115200	+ 4,75	6.5.1
	130320	+ 6,45	6.6.1
	259200	+ 3,80	6.7.1
+ 2,20 (Anlage 7)	0	+ 3,80	7.1.1
	45000	+ 6,05	7.2.1
	66600	+ 4,15	7.3.1
	88560	+ 7,40	7.4.1
	115200	+ 4,75	7.5.1
	130320	+ 6,45	7.6.1
	259200	+ 3,80	7.7.1

#### 4.7.6 Simulationsergebnisse der Bemessungsturmflut (Anlage 4.4)

Die Ganglinienverläufe des Potentialknotens 537 (entspricht der Grundwassermessstelle GWM-3T) bei Aufbringung der Kettentide mit einem Bemessungshochwasser von + 7,40 m NHN am Modellrand und bei den Wasserständen der Piepe von + 0,70 m NHN, + 1,20 m NHN und + 2,20 m NHN sind auf der Anlage 4.4 dargestellt. Die minimalen und maximalen Wasserstände der Ganglinien des Potentialknotens 537 mit den unterschiedlichen Piepe-Wasserständen sind der nachfolgenden Tabelle zu entnehmen:

<b>Piepe-Wasserstand [m NHN]</b>	<b>Wasserstand min. 537 [m NHN]</b>	<b>Wasserstand max. 537 [m NHN]</b>
+ 0,70	+ 1,59	+ 2,56
+ 1,20	+ 1,94	+ 2,91
+ 2,20	+ 2,66	+ 3,63

Aus den Ganglinien ergeben sich folgende Differenzen der Höchstwasserstände (Bemessungshochwasser von + 7,40 m NHN zu den maximalen Wasserständen der Ganglinien des Potentialknotens 537):

<b>BHW [m NHN]</b>	<b>Piepe-Wasserstand [m NHN]</b>	<b>Wasserstand max. 537 [m NHN]</b>	<b>Differenz [m]</b>
+ 7,40	+ 0,70	+ 2,56	4,84
	+ 1,20	+ 2,91	4,49
	+ 2,20	+ 3,63	3,77

## **4.8 Böschungsbruchuntersuchungen**

Die Ergebnisse der einzelnen Böschungsbruchberechnungen sowie die zugehörigen Potentialfelder zum jeweiligen Zeitpunkt sind auf den Anlagen 5.1.1 bis 5.7.3 für einen Piepe-Wasserstand von + 0,70 m NHN, 6.1.1 bis 6.7.3 für einen Piepe-Wasserstand von + 1,20 m NHN und 7.1.1 bis 7.7.3 für einen Piepe-Wasserstand von + 2,20 m NHN dargestellt und in den Abschnitten 4.7.2 bis 4.7.4 zusammengefasst.

### **4.8.1 Software**

Die Berechnung der Böschungsbruchsicherheit wurde mit dem Programm GGU-STABILITY – Böschungsbruchberechnungen und Berechnungen von Bodenvernagelungen und Bewehrte-Erde-Wände nach DIN 4084 und EC 7 – Version 12.00, durchgeführt.

Die Standsicherheit der weserseitigen und piepeseitigen Böschungen wurde mit dem Verfahren nach Bishop (kreisförmiger Bruchkörper mit dem Mohr-Coulomb Bruchkriterium) ermittelt. Aus der Globalsicherheit  $\eta_d$  ergibt sich der Ausnutzungsgrad  $\mu$  nach dem Teilsicherheitskonzept:

$$\mu = 1/\eta_d \leq 1,0.$$

### **4.8.2 Piepe-Wasserstand + 0,70 m NHN (Anlage 5.1.1 bis 5.7.3)**

Die Ergebnisse der Standsicherheitsuntersuchungen der Uferböschungen weserseitig und piepeseitig sowie die jeweiligen Potentialfelder bei einem Wasserstand in der Piepe von + 0,70 m NHN sind auf den Anlagen 5.1.1 bis 5.7.3 dargestellt und nachfolgend zusammengefasst:

<b>Zeitpunkt [s]</b>	<b>Wasserstand Kleine Weser [m NHN]</b>	<b>Uferseite</b>	<b>Ausnutzungs- grad</b>	<b>Nachweis erfüllt</b>	<b>Anlagen- Nr.</b>
0	+ 3,80	Weser	0,70	JA	5.1.2
		Piepe	0,95	JA	5.1.3
45000	+ 6,05	Weser	0,48	JA	5.2.2
		Piepe	1,01	NEIN	5.2.3
66600	+ 4,15	Weser	0,66	JA	5.3.2
		Piepe	0,96	JA	5.3.3
88560	+ 7,40	Weser	0,38	JA	5.4.2
		Piepe	1,04	NEIN	5.4.3
115200	+ 4,75	Weser	0,60	JA	5.5.2
		Piepe	0,97	JA	5.5.3
130320	+ 6,45	Weser	0,45	JA	5.6.2
		Piepe	1,02	NEIN	5.6.3
259200	+ 3,80	Weser	0,70	JA	5.7.2
		Piepe	0,95	JA	5.7.3

Die Standsicherheitsberechnungen ergeben keine ausreichende Standsicherheit piepeseitig ab einem Wasserstand der Kleinen Weser von + 6,05 m NHN. Es müssen bei einem Piepe-Wasserstand von + 0,70 m NHN vorzeitig bauliche Maßnahmen erfolgen, die die Standsicherheit des Deichquerschnittes im Bereich der Piepe gewährleisten.

#### 4.8.3 Piepe-Wasserstand + 1,20 m NHN (Anlage 6.1.1 bis 6.7.3)

Die Ergebnisse der Standsicherheitsuntersuchungen der Uferböschungen weserseitig und piepeseitig sowie die jeweiligen Potentialfelder bei einem Wasserstand in der Piepe von + 1,20 m NHN sind auf den Anlagen 6.1.1 bis 6.7.3 dargestellt und nachfolgend zusammengefasst:

Zeitpunkt [s]	Wasserstand Kleine Weser [m NHN]	Uferseite	Ausnutzungsgrad	Nachweis erfüllt	Anlagen-Nr.
0	+ 3,80	Weser	0,73	JA	6.1.2
		Piepe	0,94	JA	6.1.3
45000	+ 6,05	Weser	0,49	JA	6.2.2
		Piepe	1,00	JA	6.2.3
66600	+ 4,15	Weser	0,69	JA	6.3.2
		Piepe	0,95	JA	6.3.3
88560	+ 7,40	Weser	0,39	JA	6.4.2
		Piepe	1,04	NEIN	6.4.3
115200	+ 4,75	Weser	0,62	JA	6.5.2
		Piepe	0,97	JA	6.5.3
130320	+ 6,45	Weser	0,46	JA	6.6.2
		Piepe	1,01	NEIN	6.6.3
259200	+ 3,80	Weser	0,73	JA	6.7.2
		Piepe	0,95	JA	6.7.3

Die Standsicherheitsberechnungen ergeben keine ausreichende Standsicherheit piepeseitig ab einem Wasserstand der Kleinen Weser von + 6,45 m NHN. Es müssen bei einem Piepe-Wasserstand von + 1,20 m NHN vorzeitig bauliche Maßnahmen erfolgen, die die Standsicherheit des Deichquerschnittes im Bereich der Piepe gewährleisten.

#### 4.8.4 Piepe-Wasserstand + 2,20 m NHN (Anlage 7.1.1 bis 7.7.3)

Die Ergebnisse der Standsicherheitsuntersuchungen der Uferböschungen weserseitig und piepeseitig sowie die jeweiligen Potentialfelder bei einem Wasserstand in der Piepe von + 2,20 m NHN sind auf den Anlagen 7.1.1 bis 7.7.3 dargestellt und nachfolgend zusammengefasst:

Zeitpunkt [s]	Wasserstand Kleine Weser [m NHN]	Uferseite	Ausnutzungsgrad	Nachweis erfüllt	Anlagen-Nr.
0	+ 3,80	Weser	0,79	JA	7.1.2
		Piepe	0,92	JA	7.1.3
45000	+ 6,05	Weser	0,53	JA	7.2.2
		Piepe	0,96	JA	7.2.3
66600	+ 4,15	Weser	0,75	JA	7.3.2
		Piepe	0,92	JA	7.3.3
88560	+ 7,40	Weser	0,41	JA	7.4.2
		Piepe	0,99	JA	7.4.3
115200	+ 4,75	Weser	0,67	JA	7.5.2
		Piepe	0,94	JA	7.5.3
130320	+ 6,45	Weser	0,49	JA	7.6.2
		Piepe	0,97	JA	7.6.3
259200	+ 3,80	Weser	0,80	JA	7.7.2
		Piepe	0,92	JA	7.7.3

Die Standsicherheitsberechnungen ergeben eine ausreichende Standsicherheit piepeseitig. Es müssen bei einem Piepe-Wasserstand von + 2,20 m NHN keine vorzeitigen baulichen Maßnahmen erfolgen.

#### 4.8.5 Betrachtung eines außergewöhnlichen Lastfalles (Anlagen 8.1.1 bis 8.7.3)

Für die Betrachtung eines außergewöhnlichen Lastfalles mit der Bemessungssituation BS-A, wurde eine defekte Deichabdeckung (Lücke in der Deichabdeckung) im Bereich von + 4,00 m NHN bis + 5,00 m NHN wesenstendig simuliert. Der Piepe-Wasserstand wurde dabei mit + 1,20 m NHN angesetzt.

Die Teilsicherheitsbeiwerte für den außergewöhnlichen Lastfall (BS-A) werden nachfolgend aufgeführt:

	<b>Formelzeichen</b>	<b>BS-A</b>
Ständige Einwirkungen	$\gamma_G$	1,00
ungünstige veränderliche Einwirkungen	$\gamma_Q$	1,00
Reibungsbeiwert $\tan \varphi'$ des dränierten Bodens	$\gamma_\varphi$	1,10
Kohäsion $c'$ des dränierten Bodens	$\gamma_c$	
Scherfestigkeit $c_u$ des undränierten Bodens	$\gamma_{cu}$	

Im Bereich der defekten Deichabdeckung werden folgende Systemparameter und Bodenkennwerte in Ansatz gebracht:

#### Systemparameter der hydrogeologischen Simulation:

<b>Schicht</b>	<b>Durchlässigkeit [m/s]</b>		<b><math>n_{eff}</math> [-]</b>
	$k_x$	$k_y$	
Deichabdeckung defekt	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	0,10

#### Rechnerische Bodenkennwerte der Standsicherheitsberechnung:

<b>Boden</b>	<b>Reibungswinkel</b> $\varphi'_k$ [°]	<b>Kohäsion</b> $c'_k$ [kN/m <sup>2</sup> ]	<b>Wichte</b> $\gamma_k$ [kN/m <sup>3</sup> ]
Abdeckung defekt	30°	0	18

Die Ergebnisse der Standsicherheitsuntersuchungen der Uferböschungen weserseitig und piepeseitig sowie die jeweiligen Potentialfelder bei einem Wasserstand in der Piepe von + 1,20 m NHN sind auf den Anlagen 8.1.1 bis 8.7.3 dargestellt und nachfolgend zusammengefasst:

<b>Zeitpunkt [s]</b>	<b>Wasserstand Kleine Weser [m NHN]</b>	<b>Uferseite</b>	<b>Ausnutzungsgrad</b>	<b>Nachweis erfüllt</b>	<b>Anlagen-Nr.</b>
0	+ 3,80	Weser	0,62	JA	8.1.2
		Piepe	0,82	JA	8.1.3
45000	+ 6,05	Weser	0,53	JA	8.2.2
		Piepe	0,89	JA	8.2.3
66600	+ 4,15	Weser	0,76	JA	8.3.2
		Piepe	1,07	NEIN	8.3.3
88560	+ 7,40	Weser	0,46	JA	8.4.2
		Piepe	1,17	NEIN	8.4.3
115200	+ 4,75	Weser	0,82	JA	8.5.2
		Piepe	2,01	NEIN	8.5.3
130320	+ 6,45	Weser	0,60	JA	8.6.2
		Piepe	2,40	NEIN	8.6.3
259200	+ 3,80	Weser	0,87	JA	8.7.2
		Piepe	1,63	NEIN	8.7.3

#### 4.9 vorzeitig bauliche Ertüchtigungsmaßnahmen

Gegen die globalen Standsicherheitsprobleme piepeseitig empfehlen wir folgende mögliche Varianten der Ertüchtigungsmaßnahmen. Die Berechnungen der Standsicherheit der möglichen piepeseitigen Ertüchtigungsmaßnahmen werden im ungünstigen Fall bei einem Piepe-Wasserstand von + 0,70 m NHN und einem Wasserstand der Kleinen Weser von + 7,40 m NHN ( $t = 88560$  s bei der Potentialfeldberechnung) für die Bemessungssituation BS-P durchgeführt und nachgewiesen.

##### 4.9.1 Variante 1: Deichfußsicherung

Für eine ausreichende Standsicherheit der Böschung piepeseitig wird eine Deichfußsicherung z.B. durch eine Spundwand mit einer Länge von 5,0 m = - 3,2 m NHN Tiefe vorgeschlagen, siehe Abbildung 5.

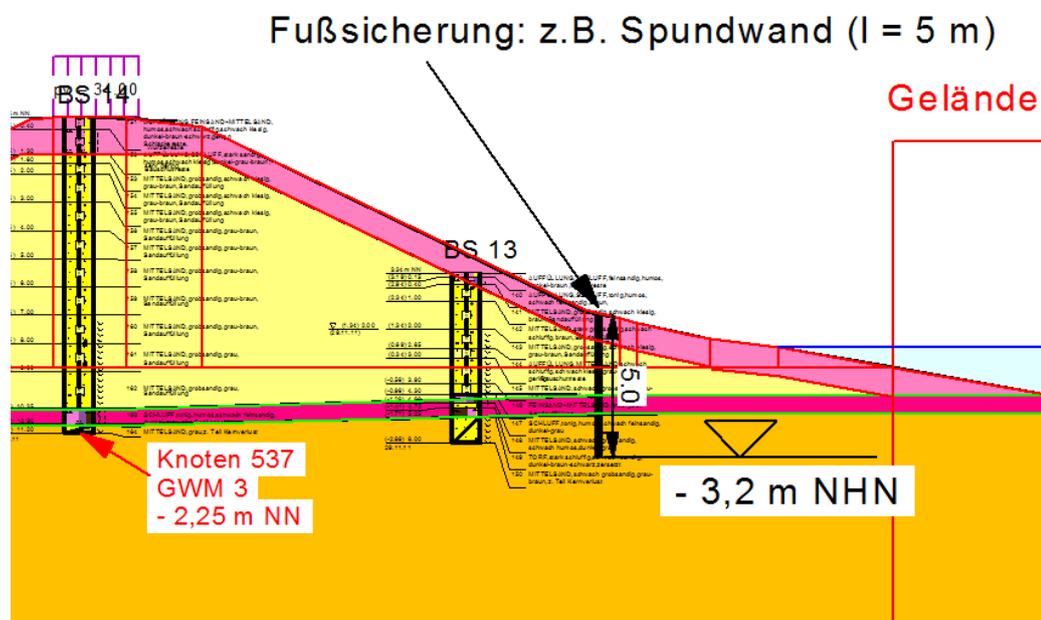


Abbildung 5: Ausschnitt aus Anlage 9.2

Die Bodenkennwerte und die Systemparameter sind dem Abschnitt 4.4 zu entnehmen. Für die Spundwand wurde für die Potentialfeldberechnung eine Durchlässigkeit in horizontaler und vertikaler Richtung von  $k_x = k_y = 1 \cdot 10^{-10}$  m/s und eine effektive Porosität von  $n_{\text{eff}} = 0,01$  in Ansatz gebracht.

Das Potentialfeld zum Zeitpunkt  $t = 88560$  s bei einem Bemessungswasserstand von + 7,40 m NHN zeigt die Anlage 9.1. Für dieses Potentialfeld ergibt sich ein Ausnutzungsgrad der Böschungsbruchberechnung der piepeseitigen Böschung von

$$\mu = 0,88.$$

Der Nachweis der Deichstandsicherheit ist unter den gegebenen Randbedingungen erfüllt und auf der Anlage 9.2 dargestellt.

#### **4.9.2 Variante 2: Abflachen der Böschung piepeseitig (Neigung 1 : 2,6)**

Alternativ kann zur Erreichung einer ausreichenden Standsicherheit der Böschung piepeseitig ein Abflachen der Böschung auf ein Neigungsverhältnis von ca. 1 : 2,6 durch das Aufbringen einer zusätzlichen Deichabdeckungsschicht vorgenommen werden. Der Verlauf der neuen Böschungslinie ist der Abbildung 6 zu entnehmen. Die Böschungslinie wurde anhand von zwei Festpunkten der bisherigen Böschungslinie abgeflacht.

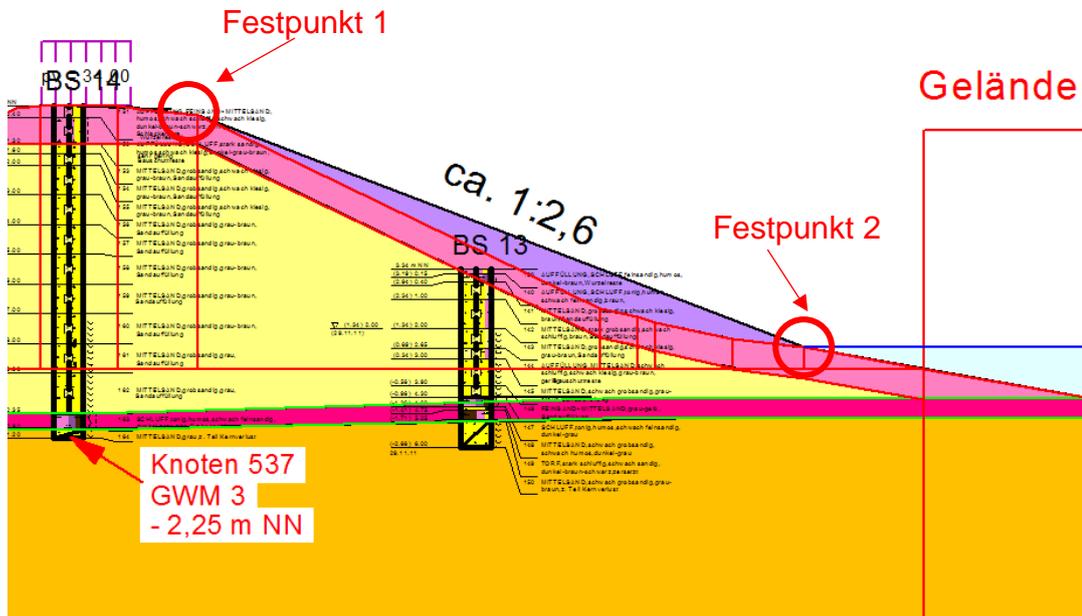


Abbildung 6: Ausschnitt aus Anlage 10.2

Für die neue Deichabdeckung wurden die Bodenkennwerte und Systemparameter der ursprünglichen Deichabdeckung übernommen und sind dem Abschnitt 4.4 zu entnehmen.

Das Potentialfeld zum Zeitpunkt  $t = 88560$  s bei einem Bemessungswasserstand von  $+7,40$  m NHN zeigt die Anlage 10.1. Für dieses Potentialfeld ergibt sich ein Ausnutzungsgrad der Böschungsbruchberechnung der piepeseitigen Böschung von

$$\mu = 0,98.$$

Der Nachweis der Deichstandsicherheit ist unter den gegebenen Randbedingungen erfüllt und auf der Anlage 10.2 dargestellt.

#### 4.9.3 Variante 3: Abflachen der Böschung piepeseitig (Neigung 1 : 3,1)

Zur weiteren Stabilisierung der Böschung piepeseitig wird ein Abflachen der Böschung auf ein Neigungsverhältnis von ca. 1 : 3,1 durch das Aufbringen einer zusätzlichen Deichabdeckungsschicht vorgenommen. Der Verlauf der neuen Böschungslinie ist der Abbildung 7 zu entnehmen. Die Böschungslinie wurde anhand eines Festpunktes der Deichkrone der bisherigen Böschung und des Festpunktes der Sohle der Piepe abgeflacht.

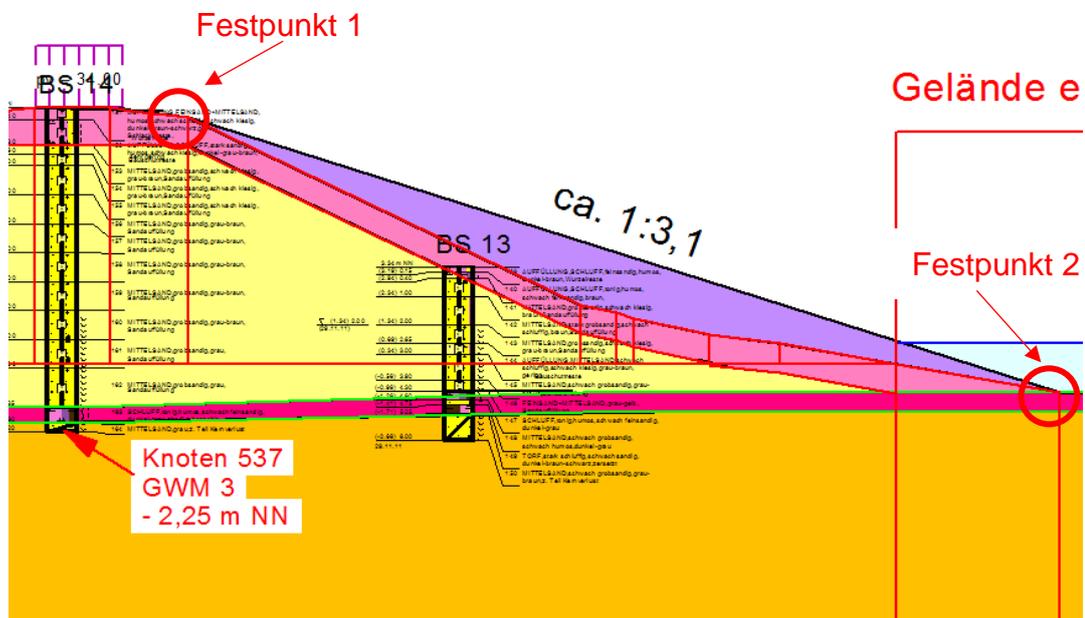


Abbildung 7: Ausschnitt aus Anlage 11.2

Für die neue Deichabdeckung wurden die Bodenkennwerte und Systemparameter der ursprünglichen Deichabdeckung übernommen und sind dem Abschnitt 4.4 zu entnehmen.

Das Potentialfeld zum Zeitpunkt  $t = 88560$  s bei einem Bemessungswasserstand von + 7,40 m NHN zeigt die Anlage 11.1. Für dieses Potentialfeld ergibt sich ein Ausnutzungsgrad der Böschungsbruchberechnung der piepeseitigen Böschung von

$$\mu = 0,88.$$

Der Nachweis der Deichstandsicherheit ist unter den gegebenen Randbedingungen erfüllt und auf der Anlage 11.2 dargestellt.

## 5 GTB 2 von 2012 (11 10089) – GTB 1 von 2018 (17 11964)

In der nachfolgenden Tabelle werden die Berechnungsansätze der Standsicherheitsnachweise von 2012 und 2018 gegenübergestellt:

	<b>GTB 2012 (11 10089)</b>		<b>GTB 2018 (17 11964)</b>
Querprofil	2011		2018
Bodenprofile	BS 16, BS 14, BS 13		
Bodenkennwerte	$\varphi'_k$ [°]	$c_k$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\gamma_k$ [kN/m <sup>3</sup> ]
Deichabdeckung	17,5	5	17
Sandauffüllung	30	0	18
Schluff	20	5	17
untere Sande	35	0	19
Verkehrslast	34 kN/m <sup>2</sup> auf 3 m Breite		
Piepe-Wasserstand	+ 1,10 m NN		+ 0,70 m NHN, + 1,20 m NHN, + 2,20 m NHN
Ansatz Porenwasserdruck	stationäre Sickerlinie		instationäres Potentialfeld
BHW	+ 7,40 m NN		+ 7,40 m NHN

Die Berechnungen von 2012 wurden anhand eines Vermessungsprofils von 2011 durchgeführt, das in seiner Geometrie von der Geometrie des in 2018 vermessenen Querprofils abweicht, vgl. [U10]: Deichstandsicherheit, Stadtstrecke Kleine Weser, 28197 Bremen, Beurteilung der Standsicherheit, Geotechnischer Bericht 2, vom 15.08.2012 (11 10089). Das Böschungsverhältnis zur Kleinen Weser ist deutlich steiler als bei der Vermessung von 2018.

Bei der Vermessung von 2011 wurden ebenso wie bei der Vermessung von 2018 die Sohlen der Kleinen Weser und der Piepe nicht erreicht. Bei den Berechnungen in diesem Geotechnischen Bericht Nr. 1 von 2018 wurde das Gelände sowohl zur Seite der Kleinen Weser als auch zur Seite der Piepe so extrapoliert, dass die Sohliefen mit den Weichschichten der Baugrunderkundungen übereinstimmen. Die Extrapolation des Geländes wurde in 2012 nicht vorgenommen.

Der Porenwasserdruck wurde in [U10] von 2012 anhand einer stationären Sickerlinie in Ansatz gebracht und in 2018 durch eine instationäre Strömungsberechnung ersetzt.

## **6 Stand der Technik – Bestandssituation**

Allgemeingültige Regelprofile für Deiche können aufgrund der verschiedenen örtlichen Gegebenheiten nicht angegeben werden. Im Deichaufbau wird grundsätzlich zwischen einem homogenen und einem zonierten (gegliedertem) Deichquerschnitt unterschieden:

- Homogener Deich:  
Der Querschnitt des Deiches besteht aus einem Stützkörper, der die Dichtungsfunktion übernimmt und an den Untergrund angrenzt.
- 2-Zonen-Deich:  
Der Querschnitt des Deiches besteht aus dem dichtenden Stützkörper und dem landseitigen stark durchlässigen Dränkörper. Die beiden Zonen grenzen an den Untergrund.
- 3-Zonen-Deich:  
Der Querschnitt besteht aus dem dichtenden Stützkörper, dem landseitigen stark durchlässigen Dränkörper und einer Dichtung im Bereich der Wasserseite. Die drei Zonen grenzen direkt an den Untergrund.

#### Kronenbreite:

In [U14] werden im Allgemeinen Mindestkronenbreiten von 3 m und in [U13] von 5 m in 1 m Höhe über dem maßgebenden Wasserstand der ständigen Bemessungssituation (BS-P) angegeben.

#### Deichböschung:

Als geeignet erwiesen haben sich Deichböschungen von 1 : 3. Böschungen, die im Verhältnis von 1 : 3 oder flacher geneigt sind, bieten geringere Angriffsmöglichkeiten für aufschlagende, durch Strömung und Wind verursachte Wellen.

#### Oberflächendichtung aus natürlich bindigen Böden:

Bei natürlichen bindigen Böden als Oberflächendichtung muss die Dichtung vor mechanischen, chemischen und biologischen Einwirkungen und aufgrund ihrer Frostempfindlichkeit sowie vor Trocknungsrissen geschützt werden. Eine 1 m dicke mineralische Dichtung sollte mit einer Deckschicht von mindestens  $d > 0,80$  m inklusive einer Vegetationsschicht geschützt werden. Mit zunehmender Dicke der Dichtungsschicht kann die Dicke der Deckschicht verringert werden oder ganz wegfallen.

Im vorliegenden Deichquerschnitt an der Piepe liegen steilere Böschungsverhältnisse als 1 : 3 vor und die Oberflächendichtung wurde mit einer Dicke von 1 m angenommen, die z. T. in geringerer Dicke vorhanden sein kann.

## 7 Zusammenfassung

Für die Ertüchtigung der Stadtstrecke Kleine Weser soll überprüft werden, ob zur Sicherstellung der Standsicherheit des Deiches an der Piepe vorzeitig bauliche Maßnahmen umgesetzt werden müssen.

In dem Deichquerschnitt Querprofil 2 ist bei dem gegebenen Vermessungsprofil und der bestätigten Kettentide des Bemessungshochwassers die Standsicherheit der Uferböschungen mit einem Piepe-Wasserstand von + 0,70 m NHN bis + 2,20 m NHN weseiseitig aus geotechnischer Sicht gewährleistet. Es sind keine vorzeitigen baulichen Sicherungsmaßnahmen notwendig. Piepeseitig kommt es bei Wasserständen der Kleinen Weser von + 6,05 m NHN, + 7,40 m NHN und + 6,45 m NHN bei einem Piepe-Wasserstand von + 0,70 m NHN und bei den Wasserständen der Kleinen Weser von + 7,40 m NHN und + 6,45 m NHN bei einem Piepe-Wasserstand von + 1,20 m NHN zu Überschreitungen des Ausnutzungsgrades  $\mu > 1.0$ .

Anhand eines Piepe-Wasserstandes von + 0,70 m NHN wurden drei vorzeitig bauliche Sicherungsmaßnahmen vorgeschlagen, um den Deichquerschnitt an der Piepe als standsicher nachzuweisen.

Weitere Einzelheiten sowie die Ergebnisse der Böschungsbruchuntersuchungen und notwendigen Sicherungsmaßnahmen der Standsicherheit des Deichprofils 2 an der Piepe sind im Bericht gegeben.



Dr.-Ing. von Bloh  
Geschäftsführer



i. A.  
Bau-Ing. Stefanie Bösche M. Sc.



### Verteiler:

Bauherr: Bremischer Deichverband am linken Weserufer  
Warturmer Heerstr. 125  
28197 Bremen

4 x und digital

## 8 Anlagenverzeichnis

I N H A L T	Anlage Nr.	
	von	bis
1. Lageplan	1	
4. Kalibrierung		
4.1 Kettentide Bemessungshochwasser + 7,40 m NHN	4.1	
4.2 Baugrund und Randbedingungen der Kalibrierung	4.2	
4.3 Kalibrierungsergebnisse Piepe-Wasserstand + 1,20 m NHN	4.3	
4.4 Simulationsganglinien BHW + 7,40 m NHN	4.4	
5. Böschungsbruchuntersuchung Piepe-Wasserstand + 0,70 m NHN		
5.1 t = 0 s + 3,80 m NHN	5.1.1	5.1.3
5.2 t = 45000 s + 6,05 m NHN	5.2.1	5.2.3
5.3 t = 66600 s + 4,15 m NHN	5.3.1	5.3.3
5.4 t = 88560 s + 7,40 m NHN	5.4.1	5.4.3
5.5 t = 115200 s + 4,75 m NHN	5.5.1	5.5.3
5.6 t = 130320 s + 6,45 m NHN	5.6.1	5.6.3
5.7 t = 259200 s + 3,80 m NHN	5.7.1	5.7.3
6. Böschungsbruchuntersuchung Piepe-Wasserstand + 1,20 m NHN		
6.1 t = 0 s + 3,80 m NHN	6.1.1	6.1.3
6.2 t = 45000 s + 6,05 m NHN	6.2.1	6.2.3
6.3 t = 66600 s + 4,15 m NHN	6.3.1	6.3.3
6.4 t = 88560 s + 7,40 m NHN	6.4.1	6.4.3
6.5 t = 115200 s + 4,75 m NHN	6.5.1	6.5.3
6.6 t = 130320 s + 6,45 m NHN	6.6.1	6.6.3
6.7 t = 259200 s + 3,80 m NHN	6.7.1	6.7.3

weitere Anlagen ...

<b>INHALT</b>		Anlage Nr.	
		von	bis
<b>7. Böschungsbruchuntersuchung Piepe-Wasserstand + 2,20 m NHN</b>			
7.1	t = 0 s + 3,80 m NHN	7.1.1	7.1.3
7.2	t = 45000 s + 6,05 m NHN	7.2.1	7.2.3
7.3	t = 66600 s + 4,15 m NHN	7.3.1	7.3.3
7.4	t = 88560 s + 7,40 m NHN	7.4.1	7.4.3
7.5	t = 115200 s + 4,75 m NHN	7.5.1	7.5.3
7.6	t = 130320 s + 6,45 m NHN	7.6.1	7.6.3
7.7	t = 259200 s + 3,80 m NHN	7.7.1	7.7.3
<b>8. Böschungsbruchuntersuchung Deichabdeckung defekt Piepe-Wasserstand + 1,20 m NHN</b>			
8.1	t = 0 s + 3,80 m NHN	8.1.1	8.1.3
8.2	t = 45000 s + 6,05 m NHN	8.2.1	8.2.3
8.3	t = 66600 s + 4,15 m NHN	8.3.1	8.3.3
8.4	t = 88560 s + 7,40 m NHN	8.4.1	8.4.3
8.5	t = 115200 s + 4,75 m NHN	8.5.1	8.5.3
8.6	t = 130320 s + 6,45 m NHN	8.6.1	8.6.3
8.7	t = 259200 s + 3,80 m NHN	8.7.1	8.7.3
<b>9. vorzeitig bauliche Ertüchtigungsmaßnahme 1: Fußsicherung</b>			
9.1	Potentialfeld t = 88560 s + 7,40 m NHN	9.1	
9.2	Böschungsbruchberechnung t = 88560 s + 7,40 m NHN	9.2	
<b>10. vorzeitig bauliche Ertüchtigungsmaßnahme 2: Abflachung 1 : 2,6</b>			
10.1	Potentialfeld t = 88560 s + 7,40 m NHN	10.1	
10.2	Böschungsbruchberechnung t = 88560 s + 7,40 m NHN	10.2	
<b>11. vorzeitig bauliche Ertüchtigungsmaßnahme 3: Abflachung 1 : 3,1</b>			
11.1	Potentialfeld t = 88560 s + 7,40 m NHN	11.1	
11.2	Böschungsbruchberechnung t = 88560 s + 7,40 m NHN	11.2	