

Inhaltsverzeichnis

1.	Unterlagen	2
2.	Berechnungsquerschnitte	3
3.	Berechnungsgrundlagen	3
3.1	Nachweiskonzept	3
3.2	Berechnungsprogramme	3
3.3	Berechnungsansätze	4
3.3.1	Spundwände	4
3.3.2	Deich und wasserseitige Böschungen	5
4.	Einwirkungen und Beanspruchungen	6
4.1	Ständige Einwirkungen	6
4.1.1	Eigengewicht	6
4.1.2	Erddruck	6
4.1.3	Gebäude-/Gründungslasten	6
4.1.4	Abrostung	7
4.2	Veränderliche Einwirkungen	7
4.2.1	Wasserstände	7
4.2.2	Verkehrslasten	7
4.2.3	Bauzeitliche Beanspruchungen	8
4.3	Außergewöhnliche Einwirkungen	8
4.3.1	Wasserstände	8
4.3.2	Versagen von Dichtungen	8
4.3.3	Versagen von Dräns	9
4.3.4	Windwurf	9
4.3.5	Eisdruck	9
5.	Bemessungssituationen	9
5.1	Deich und wasserseitige Böschungen	9
5.2	Spundwände	10
6.	Ergebnisse	12
6.1	Deiche	12
6.2	wasserseitige Böschungen	12
6.3	Spundwände	14

Tabellenverzeichnis

Tabelle 6-1	Ergebnisse wasserseitige Böschungen in der BS-P.2.....	13
Tabelle 6-2	Ergebnisse Spundwandberechnung	15

Anlagen

Anlage 1	Abschnitt 1, QS km 0-275
Anlage 2	Abschnitt 1, QS km 0-550
Anlage 3	Abschnitt 1, QS km 0-650
Anlage 4	Abschnitt 2, QS km 0+150
Anlage 5	Abschnitt 2, QS km 0+355
Anlage 6	Abschnitt 2, QS km 0+455
Anlage 7	Abschnitt 3, QS km 0+650
Anlage 8	Abschnitt 3, QS km 0+850

1. Unterlagen

- /1/ Planungsgemeinschaft Hochwasserschutz Herzberg:
Entwurfsplanung Teilobjekt 1; Hochwasserschutz Herzberg – Maßnahme SE 3p, Bearbeitungsstand 12/2016.
- /2/ Planungsgemeinschaft Hochwasserschutz Herzberg:
Geotechnischer Bericht Teilobjekt 1; Hochwasserschutz Herzberg – Maßnahme SE 3p, Bearbeitungsstand 12/2016.
- /3/ GGL Geophysik und Geotechnik Leipzig GmbH:
Baugrunduntersuchung Teilobjekt 1, Hochwasserschutz Herzberg – Maßnahme SE 3p, Bearbeitungsstand 10/2016.
- /4/ Landesamt für Umwelt (LfU) Brandenburg:
Charakteristische Abflussganglinien für die Pegel Herzberg und Bad Liebenwerder als Grundlage für die instationären Durchströmungsberechnungen, 11.01.2017.
- /5/ Landesamt für Umwelt (LfU) Brandenburg:
Stellungnahme zu den Lastannahmen und Berechnungsansätzen vom 05.12.2016 und 07.04.2017.
- /6/ Planungsgemeinschaft Hochwasserschutz Herzberg:
Zusammenstellung der Lastannahmen und Berechnungsansätze für das TO1- Abschnitte 1-4 vom 30.11.2016.
- /7/ DIN EN 1997-1: EC 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik – Teil 1: Allgemeine Regeln; Deutsche Fassung EN 1997-1:2004 + AC:2009.
- /8/ DIN EN 1997-1/NA: Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – EC 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik – Teil 1: Allgemeine Regeln
- /9/ DIN 1054: Baugrund – Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau – Ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-1, Dezember 2010.

- /10/ DIN EN 1993-5: EC 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten –Teil 5: Pfähle und Spundwände, Dezember 2010.
- /11/ DIN 4084: Baugrund – Geländebruchberechnungen, Januar 2009.
- /12/ DIN 4085: Baugrund – Berechnung des Erddrucks; Oktober 2007.
- /13/ DIN 19712: Hochwasserschutzanlagen an Fließgewässern, Januar 2013.
- /14/ DIN 19704-1: Stahlwasserbauten, Teil 1: Berechnungsgrundlagen, Mai 1998.
- /15/ DWA – Regelwerk, Merkblatt DWA-M 507-1: Deiche an Fließgewässern Teil1: Planung, Bau und Betrieb, Dezember 2011.
- /16/ EAU 2012: Empfehlungen des Arbeitsausschusses „Ufereinfassungen“ Häfen und Wasserstraßen, 11. Auflage 2012.
- /17/ Bundesanstalt für Wasserbau (BAW): Merkblatt – Materialtransport im Boden (MMB), Ausgabe 2013.

2. Berechnungsquerschnitte

Auf der Grundlage der vorliegenden Planungsquerschnitte /1/ und den Ergebnissen der Baugrunderkundung /3/ wurden in den einzelnen Abschnitten des Teilobjektes 1 die folgenden Berechnungsquerschnitte ausgewählt.

Abschnitt 1 – km 0+000 – 0-650:

- km 0-275
- km 0-550
- km 0-650

Abschnitt 2 – km 0+000 – 0+500:

- km 0+150
- km 0+355, Bereich Altlasten
- km 0+455

Abschnitt 3 – km 0+500 – 0+900:

- km 0+650
- km 0+850

3. Berechnungsgrundlagen

3.1 Nachweiskonzept

Die Nachweise erfolgen nach dem Konzept mit Teilsicherheitsbeiwerten entsprechend DIN EN 1997-1 /7/ in Verbindung mit DIN 1054 /9/. Es werden Ausnutzungsgrade μ berechnet.

3.2 Berechnungsprogramme

Spundwand

GGU-RETAIN (Version 9.05)

Deich

GGU-SS-FLOW2D (Version 10.10) – stationäre Durchströmungsberechnung

GGU-TRANSIENT (Version 6.02) – instationäre Durchströmungsberechnung

GGU-STABILITY (Version 12.00) – Böschungsbruch, Gleitsicherheit, Spreizsicherheit

GGU-UPLIFT (Version 6.04) – Auftriebssicherheit, hydraulischer Grundbruch

GGU-Filter-Stability (Version 3.02) – Suffosion und Fugenerosion

3.3 Berechnungsansätze

3.3.1 Spundwände

Die Bemessung der Spundwand erfolgt gemäß EAU nach dem Verfahren von BLUM. Die Wände sind unverankert und werden als fest eingespannt angenommen.

Bemessung Wandquerschnitt

Die Bemessung des Spundwandquerschnittes erfolgt nach DIN EN 1993-5 /10/. Es werden elastische statische Berechnungen durchgeführt. Für die Spundwand wird vorzugsweise die Stahlgüte S240GP berücksichtigt.

Bei den Berechnungen werden die Querschnittswerte der Spundwand je lfd./m-Wand bezogen auf eine Doppelbohle zugrunde gelegt.

In den Berechnungsquerschnitten wird die Spundwand bis zur geplanten Deichoberkante berücksichtigt. Die teilweise geplante Oberbodenüberdeckung von 20 cm wird dabei vernachlässigt. Der Ansatz der um ca. 20 cm höheren Spundwand liegt auf der sicheren Seite.

Einbindetiefe

Bei voller oder teilweiser Einspannung ist ein Längenzuschlag zur theoretisch ermittelten Einbindetiefe erforderlich. Die Ermittlung des erforderlichen Längenzuschlages erfolgt nach EAU 2012, Pkt. 8.2.9 /16/.

Kopfauslenkung

Gemäß Abstimmung /5/ ist eine maximal zulässige Kopfauslenkung von $w < 5,0$ cm für die Spundwand im Deich zu berücksichtigen.

Im Bereich von Gebäuden / Bauwerken wird eine maximale Kopfauslenkung von $w < 2,0$ cm zugelassen.

Geometrie und Baugrund

Die Baugrundsichtung und die Zuordnung der Bodenkennwerte wird entsprechend den Angaben aus den Baugrundunterlagen /2/ und /3/ berücksichtigt.

Es wird ein horizontaler Schichtverlauf angesetzt, da das verwendete Berechnungsprogramm keine geneigten Schichtverläufe abbildet. Es wird der jeweils ungünstigste Schichtverlauf berücksichtigt.

Die geometrischen Verhältnisse werden aus den vorliegenden Querschnitten der Planung /1/ übernommen.

3.3.2 Deich und wasserseitige Böschungen

Die Nachweise zur Tragfähigkeit erfolgen auf der Grundlage des DWA-M 507-1 /15/, der DIN 19712 und des MMB 2013 /17/.

geohydraulische Randbedingungen

Bei den stationären Durchströmungsberechnungen werden folgende Randbedingungen angesetzt:

wasserseitiger Modellrand (vertikal und horizontal):

- offener Modellrand von der Modellunterkante bis zur Höhe des Wasserstandes in der jeweiligen Bemessungssituation und Ansatz eines Festpotentials entsprechend dem jeweiligen Wasserstand
- Für die instationären Durchströmungsberechnungen wurde ein zeitlicher Ansatz berücksichtigt, der dem Verlauf der schnellen Wasserspiegelabsenkung der Ganglinie des HW2010 am Pegel Herzberg entspricht. Gemäß Abstimmung mit dem LfU wurde folgende lineare Absenkung der ablaufenden HW-Ganglinie berücksichtigt:
 - 0 – 6 Tage nach Scheitel: 11,5 cm / Tag
 - 7 – 13 Tage nach Scheitel: 10,0 cm / Tag
 - 13 – 34 Tage nach Scheitel: 4,3 cm / Tag

landseitiger Modellrand:

- vertikaler Modellrand: geschlossener Modellrand (ungünstigster Fall)
- horizontaler Modellrand: Ansatz eines Festpotentials auf Geländeneiveau. Iteration der Festpotentiale im Böschungsbereich bis keine Wassereintritte mehr auftreten.

Geometrie und Baugrund

Die Baugrundsichtung und die Zuordnung der Bodenkennwerte wird entsprechend den Angaben aus den Baugrundunterlagen /2/ und /3/ berücksichtigt.

Die geometrischen Verhältnisse werden aus dem vorliegenden Querschnitt der Planung /1/ übernommen.

4. Einwirkungen und Beanspruchungen

4.1 Ständige Einwirkungen

4.1.1 Eigengewicht

Das Eigengewicht der Spundwände wird im Programm automatisch berücksichtigt.

4.1.2 Erddruck

Erddruck – Beanspruchungsseite:

- aktiver Erddruck nach DIN 4085
- Wandreibungswinkel δ_a
 $\delta_a = 1/3 \varphi$ (weniger rau, lockere Lagerung, weiche – steife Konsistenzen)
 $\delta_a = 2/3 \varphi$ (rau, mitteldichte – dichte Lagerung, halbfeste – feste Konsistenzen)
- Ersatzerddruck: Ersatzreibungswinkel: $\varphi_{\text{Ersatz, k}} = 40^\circ$

Erddruck – Widerstandsseite:

- passiver Erddruck nach DIN 4085
- Wandreibungswinkel
 $\delta_p = 1/3 \varphi$ (weniger rau, lockere Lagerung, weiche – steife Konsistenzen)
 $\delta_p = 2/3 \varphi$ (rau, mitteldichte – dichte Lagerung, halbfeste – feste Konsistenzen)

Die Werte δ_p werden ggf. abgemindert, um die Bedingung $\Sigma V \geq 0$ (keine Zugkräfte) zu erfüllen.

Erddruck – Ansatz der Deichböschungen:

Gemäß DIN 19712 darf die stützende Wirkung von Anböschungen/Anschüttungen nur dann bei den Nachweisen zur Tragfähigkeit berücksichtigt werden, wenn deren Bestand gesichert und nachgewiesen wird.

In den Abschnitten 1 und 2 wird davon ausgegangen, dass die Deichböschungen ausreichend standsicher sind. Es erfolgten exemplarisch Berechnungen mit teilweiser und vollständiger Erosion der wasserseitigen Böschungen.

Im Abschnitt 3 wird für den Nachweis der Tragfähigkeit davon ausgegangen, dass die wasserseitige Deichböschung bis in Höhe des wasserseitigen Deichfußes vollständig erodiert ist (teilweise Prallhanglage). Dies stellt für die Bemessung der Spundwand den ungünstigsten Fall dar. Zusätzlich erfolgt der erdstatische Nachweis der wasserseitigen Deichböschung bei fallendem Wasserspiegel.

4.1.3 Gebäude-/Gründungslasten

Liegen nicht vor.

4.1.4 Abrostung

Die Spundwände werden hauptsächlich vollständig in den Boden eingebracht. Die Abrostung der Spundwände wird beidseitig für eine unterstellte Nutzungsdauer von 100 Jahren nach DIN EN 1993-5, Tabelle 4-1 /10/, angenommen:

- ungestörte natürliche Böden (Kies, Sand, Schluff, Ton):
0,0120 mm/ Jahr \Rightarrow 1,20 mm in 100 Jahren,
- aggressive natürliche Böden (Sumpf, Torf):
0,0325 mm/ Jahr \Rightarrow 3,25 mm in 100 Jahren.

Der freistehende Teil der Spundwand wird mit einem Korrosionsschutz versehen.

4.2 Veränderliche Einwirkungen

4.2.1 Wasserstände

Für die Spundwandbemessung wird mit dem statischen Wasserdruck gerechnet. Es erfolgen keine Durchströmungsberechnungen. Die Durchlässigkeiten der Bodenschichten bleiben unberücksichtigt. Die Gradienten auf der Aktiv- und Passivseite ergeben sich aus der Annahme eines linearen Druckabbaus um die Spundwand.

Beanspruchungen durch Grund-/Oberflächenwasser

- Wasserseite und Landseite: beidseits mittlere und erhöhte Wasserstände

Beanspruchungen durch das Bemessungshochwasser (BHW)

- Wasserseite: BHW
- Landseite: Grundwasserstand im Hinterland = GOK (Deichfuß, bzw. Fuß Berme)

Beanspruchungen aus fallendem Wasserspiegel nach BHW

Dieser Ansatz berücksichtigt einen Wasserüberdruck in Richtung Wasserseite, da nach einem Hochwasser auf der Luftseite deutlich höhere GW-Stände herrschen und die Wasserstände im Gewässer bereits schneller abgesunken sind. Die luftseitigen Wasserstände werden maximal bis zur GOK am Deichfuß angenommen. Wasserseitig wird ein um 50 cm niedrigerer Wasserstand angesetzt. Dieser Ansatz orientiert sich an der EAU 2012, Pkt. 4.2, Bild E-19-1, Situation 2a /16/. Genauere Ansätze sind nur möglich, wenn Ergebnisse einer Grundwassermodellierung oder anderweitige Angaben vorliegen.

- Wasserseite: 0,5 m unterhalb des luftseitigen Wasserstandes
- Landseite: Grundwasserstand im Hinterland = GOK (Deichfuß, bzw. Fuß Berme)

Luftseitige Wasserstände über Gelände werden nicht berücksichtigt.

4.2.2 Verkehrslasten

Deichverteidigungsweg:

- $p_v = 33,0 \text{ kN/m}^2$ auf 3 m Breite gemäß DWA-M 507-1.

Deichkrone ohne Fahrweg:

- $p_v = 5 \text{ kN/m}^2$ auf 3 m Breite gemäß DIN 19712.

4.2.3 Bauzeitliche Beanspruchungen

Bauzeitliche Hochwasserstände (BauHW)

Eventuelle bauzeitliche, standsicherheitsrelevante Wasserstände sind noch nicht festgelegt. Die Baumaßnahme sollte möglichst außerhalb von Hochwasser gefährdeten Zeiten realisiert werden. Bauzeitliche Hochwasserstände wurden im Rahmen der vorliegenden Berechnungen nicht untersucht.

Bauzeitlich erhöhte Verkehrslasten

Eventuelle bauzeitliche, erhöhte Verkehrslasten sind noch nicht festgelegt. Bauzeitliche, erhöhte Verkehrslasten wurden im Rahmen der vorliegenden Berechnungen nicht untersucht.

4.3 Außergewöhnliche Einwirkungen

4.3.1 Wasserstände

Beanspruchungen durch Wasserdruck infolge bordvollen Einstaus

- Wasserseite: bordvoller Einstau bis OK Wand/Deich
- Landseite: Grundwasserstand im Hinterland = GOK (Deichfuß, bzw. Fuß Berme)

Beanspruchungen aus fallendem Wasserspiegel nach bordvollem Einstau

Formal ist dieser Ansatz nach DIN 197125 bzw. DWA-M 507-1 nicht vorgesehen. Er stellt jedoch für die Spundwandbemessung einen möglicherweise maßgebenden Belastungsfall dar, der nicht auszuschließen ist.

Dieser Ansatz berücksichtigt einen Wasserüberdruck in Richtung Wasserseite, da nach einem Hochwasser auf der Luftseite deutlich höhere GW-Stände herrschen und die Wasserstände im Gewässer bereits schneller abgesunken sind. Die luftseitigen Wasserstände werden maximal bis zur GOK am Deichfuß angenommen. Wasserseitig wird ein um 1,0 m niedrigerer Wasserstand angesetzt. Dieser Ansatz orientiert sich an der EAU 2012, Pkt. 4.2, Bild E-19-1, Situation 2a /16/. Genauere Ansätze sind nur möglich, wenn Ergebnisse einer Grundwassermodellierung oder anderweitige Angaben vorliegen.

- Wasserseite: 1,0 m unterhalb des luftseitigen Wasserstandes
- Landseite: Grundwasserstand im Hinterland = GOK (Deichfuß, bzw. Fuß Berme)

Luftseitige Wasserstände über Gelände werden nicht berücksichtigt.

4.3.2 Versagen von Dichtungen

Die Spundwand übernimmt im vorliegenden Fall sowohl tragende als auch dichtende Funktion. Stahlspundwände zeichnen sich erfahrungsgemäß durch eine hohe Systemsicherheit hinsichtlich ihrer dichtenden Wirkung aus. Das hydraulische Versagen der Spundwand wird daher nicht betrachtet.

4.3.3 Versagen von Dräns

Aufgrund der vergleichsweise seltenen hydraulischen Beanspruchung und der flächigen Anordnung kann dieser Belastungsfall als sehr selten betrachtet bzw. ausgeschlossen werden. Daher wird ein hydraulisches Versagen nicht berücksichtigt.

4.3.4 Windwurf

Für den Wurzelkrater werden folgende Annahmen getroffen:

Wurzelkrater: Tiefe 1,5 m gemäß DWA-M 507-1,
Neigung des Kraters zur Spundwand: Reibungswinkel $\varphi_k/2$ des abgerutschten Deichmaterials bzw. der Bodenschicht im Untergrund.

Die Betrachtungen erfolgen im Abschnitt 2 an den Profilen km 0+150 und km 0+455 für die Baumstandorte auf der Wasserseite.

4.3.5 Eisdruck

In DIN 19712 und DWA-M 507-1 werden keine Angaben zu den Lastansätzen gemacht.

In Abstimmung mit dem LfU wurde folgender Lastansatz für den Eisdruck berücksichtigt:

- $p_E = 60 \text{ kN/m}$ als Linienlast in Höhe des BHW

Dies entspricht einer horizontalen Flächenlast von $p_E = 180 \text{ kN/m}^2$ bei einer Mindesteisdicke von 30 cm.

5. Bemessungssituationen

5.1 Deich und wasserseitige Böschungen

ständige Bemessungssituation (BS-P) – Hochwasserzustand

- BS-P.1 – BHW
 - Eigenlast,
 - Wasserstand im Vorland: BHW,
 - Wasserstand im Hinterland: GOK
 - Verkehrslast auf Deichkrone $p_V = 5 \text{ kN/m}^2$
 - Verkehrslast auf Deichverteidigungsweg $p_V = 33,0 \text{ kN/m}^2$
- BS-P.2 – fallender Wasserspiegel von BHW
 - Eigenlast,
 - fallender Wasserspiegel ausgehend vom BHW bis zum wasserseitigen Deichfuß,
 - Verkehrslast auf Deichkrone $p_V = 5 \text{ kN/m}^2$
 - Verkehrslast auf Deichverteidigungsweg $p_V = 33,0 \text{ kN/m}^2$

außergewöhnliche Bemessungssituation (BS-A) – besondere Belastungen/Situationen

- BS-A.1 – Bordvoll
 - Eigenlast,
 - Wasserstand im Vorland: bordvoller Einstau bis zu wasserseitigen Deichkrone,
 - Wasserstand im Hinterland: GOK
 - Verkehrslast auf Deichkrone $p_v = 5 \text{ kN/m}^2$
 - Verkehrslast auf Deichverteidigungsweg $p_v = 33,0 \text{ kN/m}^2$

Für die wasserseitigen Böschungen im Abschnitt 3 wird nur die BS-P.2 betrachtet.

5.2 Spundwände

Unter Berücksichtigung der genannten Einwirkungen werden gemäß DIN 19712 die folgenden Bemessungssituationen (BS) untersucht.

Ständige Bemessungssituation (BS-P)

- Bemessungssituation BS-P1.1
 - vollständiges Deichprofil
 - Wasserstand im Vorland: mittlerer Grundwasserstand
 - Wasserstand im Hinterland: mittlerer Grundwasserstand
 - Verkehrslast $p_v = 33,0 \text{ kN/m}^2$ (kein Ansatz wenn stützende Wirkung)
- Bemessungssituation BS-P1.2
 - vollständiges Deichprofil
 - Wasserstand im Vorland: BHW
 - Wasserstand im Hinterland: GOK
 - Verkehrslast $p_v = 33,0 \text{ kN/m}^2$ (kein Ansatz wenn stützende Wirkung)
- Bemessungssituation BS-P1.3
 - vollständiges Deichprofil
 - Wasserstand im Vorland = Wasserstand im Hinterland: GOK
 - Verkehrslast $p_v = 33,0 \text{ kN/m}^2$ (kein Ansatz wenn stützende Wirkung)
- Bemessungssituation BS-P.2:
 - vollständiges Deichprofil
 - Wasserstand im Vorland: 0,5 m unter luftseitigem Wasserstand
 - Wasserstand im Hinterland: GOK
 - Verkehrslast $p_v = 33,0 \text{ kN/m}^2$ (kein Ansatz wenn stützende Wirkung)

Außergewöhnliche Bemessungssituation (BS-A)

- Bemessungssituation BS-A1.1
 - vollständiges Deichprofil,
 - Wasserstand im Vorland: bordvoll, bis OK Wand/Deich
 - Wasserstand im Hinterland: GOK
 - Verkehrslast $p_v = 33,0 \text{ kN/m}^2$ (kein Ansatz wenn stützende Wirkung)
- Bemessungssituation BS-A1.2
 - vollständiges Deichprofil
 - Wasserstand im Vorland: 1,0 m unter luftseitigem Wasserstand
 - Wasserstand im Hinterland: GOK
 - Verkehrslast $p_v = 33,0 \text{ kN/m}^2$ (kein Ansatz wenn stützende Wirkung)
- Bemessungssituation BS-A1.3

Diese Bemessungssituation wurde im Abschnitt 1 und 3 berücksichtigt.

 - wasserseitige Deichböschung vollständig erodiert
 - Wasserstand im Vorland: 0,5 m unter luftseitigem Wasserstand
 - Wasserstand im Hinterland: GOK
 - Verkehrslast $p_v = 33,0 \text{ kN/m}^2$ (kein Ansatz wenn stützende Wirkung)
- Bemessungssituation BS-A1.4

Diese Bemessungssituation wurde im Abschnitt 2 berücksichtigt.

 - Windwurf wasserseitig in Verbindung mit Erosion
 - Wasserstand im Vorland: 0,5 m unter luftseitigem Wasserstand
 - Wasserstand im Hinterland: GOK
 - Verkehrslast $p_v = 33,0 \text{ kN/m}^2$ (kein Ansatz wenn stützende Wirkung)
- Bemessungssituation BS-A1.5
 - vollständiges Deichprofil,
 - Wasserstand im Vorland: BHW
 - Wasserstand im Hinterland: GOK
 - Verkehrslast $p_v = 33,0 \text{ kN/m}^2$ (kein Ansatz wenn stützende Wirkung)
 - Eisdruck $p_E = 60 \text{ kN/m}$ in Höhe BHW

6. Ergebnisse

6.1 Deiche

Es wurden keine Deichquerschnitte berechnet.

6.2 wasserseitige Böschungen

Für die im Abschnitt 3 neu zu errichtenden wasserseitigen Uferböschungen wurde die Tragsicherheit bei fallendem Wasserspiegel (BS-P.2) an den Querschnitten km 0+650 und km 0+850 nachgewiesen.

Instationäre Durchströmungsberechnung

Ausgangszustand der instationären Durchströmungsberechnungen für die Bemessungssituation BS-P.2 war der stationäre Endzustand bei BHW=HQ100.

Für die instationäre Berechnung der fallenden HW-Stände wurde entlang der wasserseitigen Böschungen im Bereich der Festpotentiale ein Polygonzug angesetzt, welcher den unter Pkt. 3.3.2 beschriebenen zeitlichen Verlauf der Absenkung widerspiegelt.

Für die Tragsicherheitsberechnungen wurden die Sickerlinienverläufe je Tag bis zum wasserseitigen Böschungsfuß berechnet.

Globale Tragsicherheit

Der Nachweis der Sicherheit gegen Böschungsbruch und Böschungsgrundbruch erfolgt für den Grenzzustand des Verlustes der Gesamtstandsicherheit (Grenzzustand GZ 1C). Die Forderung einer ausreichenden Sicherheit gegen Böschungsbruch und Böschungsgrundbruch ist erfüllt, wenn für die maßgebenden Bemessungssituationen die Grenzzustandsbedingung der DIN 4084 /11/ mit den Teilsicherheitsbeiwerten für den Grenzzustand GZ 1C nach DIN 1054 /9/ wie folgt eingehalten wird:

$$E \leq R \text{ bzw. } E/R \leq 1 \quad \text{mit:}$$

E ... Bemessungswert der resultierenden Beanspruchung,

R ... Bemessungswert des resultierenden Widerstandes.

Um unterschiedliche Bruchmechanismen vergleichen zu können, wurden im vorliegenden Fall Ausnutzungsgrade (μ) der Bemessungswiderstände ermittelt. Für Werte $\mu \leq 1$ ist eine ausreichende Sicherheit vorhanden.

Die Berechnungen erfolgten mit dem Programm GGU-STABILITY nach dem Lamellenverfahren von BISHOP mit kreisförmigen Bruchkörpern gemäß der DIN 4084 /11/.

Die bei den instationären Durchströmungsberechnungen ermittelten Potentiale wurden für ausgewählte Zeitschritte in das Modell der Böschungsbruchberechnung übertragen. Die Lage der Sickerlinien ist aus den Berechnungsausdrucken ersichtlich.

Der Böschungsgrundbruch wurde durch Gleitkreise untersucht, die auch Bereiche am Deichfuß unterhalb der Geländeoberfläche erfassen.

Lokale Tragsicherheit

Die Berechnung der lokalen Standsicherheit der Deichböschungen erfolgte mit dem Programm GGU-STABILITY nach dem Verfahren von JANBU mit flach einschneidenden, böschungsp parallelen, polygonalen Gleitflächen.

Lokale Tragsicherheit an den Böschungsfüßen (Spreizsicherheit)

Der Nachweis der Spreizsicherheit ist ein lokaler Spannungsnachweis. Es wird nachgewiesen, dass vorhandene Spreizspannungen mit ausreichender Sicherheit in der Deichaufstandsfläche aufgenommen werden.

Sind die vorhandenen Schubkräfte infolge des Erddruckes des Deichkörpermaterials sowie die wirkenden Strömungskräfte in Böschungsrichtung größer als die in der Deichaufstandsfläche aufnehmbaren Kräfte kommt es zu unzulässigen Spreizspannungen, die ein Ausweichen des Böschungsfußes verursachen.

Die Spreizsicherheit wurde im vorliegenden Fall durch Bruchkörper im Bereich der Böschungsfüße mit dem Programm GGU-STABILITY nach dem Verfahren von JANBU berechnet.

In der nachfolgenden Tabelle sind die die größten ermittelten Ausnutzungsgrade μ für ausgewählte Zeitschritte zusammengestellt. Die graphischen Darstellungen der Berechnungen sind in der Anlage 7 und 8 enthalten.

Tabelle 6-1 Ergebnisse wasserseitige Böschungen in der BS-P.2

Profil	Zeitschritt nach BHW [d]	Wasserstand [m NHN]	Globale Tragsicherheit	Lokale Tragsicherheit	Spreizen Deichfuß
0+650	7	80,64	0,82	0,79	0,61
	14	79,95	0,88	0,79	0,86
	20	79,74	0,86	0,77	0,77
	24	79,40	0,94	0,76	0,74
	26	79,32	0,91	--	--
0+850	7	80,60	0,79	--	--
	10	80,30	0,80	0,87	0,82
	14	79,90	0,82	0,85	0,83
	16	79,70	0,77	--	--
Sollwert			$\mu \leq 1$		

Für die wasserseitigen Böschungen wurden bei fallenden Hochwasserständen in der BS-P.2 bei allen betrachteten Zeitschritten Ausnutzungsgrade $\mu \leq 1$ und damit ausreichende Tragsicherheiten ermittelt.

Bei den Berechnungen wurde von einem sandigen Stützkörpermaterial mit folgenden Eigenschaften ausgegangen:

- Böschungsneigung 1:2,5
- 30 cm Oberboden
- mitteldichte Lagerung (Verdichtungsgrad $D_{Pr} \geq 97\%$)
- Durchlässigkeitsbeiwert $k_f \geq 1 \cdot 10^{-5}$ m/s
- charakteristischer Wert des Reibungswinkels $\varphi_k' \geq 32,5^\circ$
- charakteristischer Wert der Wichte $\gamma_k \geq 17,0$ kN/m³.

6.3 Spundwände

Die Ergebnisse der Berechnungen sind in den Anlagen 1 bis 8 dokumentiert.

Die rechnerisch ermittelten Spundwandlängen sind in der folgenden Tabelle für die einzelnen Bemessungssituationen zusammengestellt. Die für die jeweiligen Berechnungsquerschnitte maßgebenden Längen und Widerstandsmomente der Spundwände sind **fett** gekennzeichnet.

Bei den Berechnungen wurde die Stahlgüte S 240 GP nach DIN EN 1993-5 mit einer Mindeststreckgrenze von 24 kN/cm² zu Grunde gelegt.

Den Berechnungen liegen die Querschnittswerte je lfd./m-Wand bezogen auf eine Doppelbohle zugrunde.

Bei der Berechnung müssen Spundwandprofile gewählt werden, um die statisch erforderlichen Querschnitte ermitteln zu können. Die Auswahl der Spundwandprofile erfolgte im ersten Schritt im Hinblick auf eine optimale statische Auslastung. Im zweiten Schritt wurden für die maßgebenden Bemessungssituationen Profile im Hinblick auf günstige Rücken- und Stegdicken zur Berücksichtigung des Abrostungszuschlages gewählt.

Unter Berücksichtigung der erforderlichen Spundwandlängen kann von ausreichenden Geländebruchsicherheiten ausgegangen werden. Auf einen entsprechenden Nachweis wurde verzichtet.

An allen Querschnitten wurden ausreichende Sicherheiten gegen hydraulischen Grundbruch nachgewiesen.

Tabelle 6-2 Ergebnisse Spundwandberechnung

Bemessungssituation	Profil	Widerstandsmo- ment W_{el} [cm ³ /m]	erforderliche Länge [m]	Kopfauslen- kung [cm]		
Abschnitt 1, QS km 0-275						
BS P1.1	GU6N	625	2,52	<0,1		
BS-P1.2			4,70	0,3		
BS-P1.3			5,92	0,2		
BS-P.2	nicht maßgebend, (rechnerisch keine statisch sinnvolle Profillänge)					
BS-A1.1	GU6N	625	4,44	0,5		
BS-A1.2	nicht maßgebend, (rechnerisch keine statisch sinnvolle Profillänge)					
BS-A1.3	GU6N	625	5,35	0,7		
BS A1.5	GU8S	820	7,41	9,4		
	AZ14-700	1.405		5,4		
	AZ17-700	1.730		3,3		
Abschnitt 1, QS km 0-550						
BS-A1.3- vollst. Erosion	GU6N	625	5,13	0,9		
BS-A1.5			4,55	1,4		
Abschnitt 1, QS km 0-650						
BS-P1.1, P1.2, P1.3 BS-P.2 BS-A1.1, A1.2	nicht maßgebend, (rechnerisch keine statisch sinnvolle Profillänge)					
BS-A1.3- vollst. Erosion	GU6N	625	5,06	0,9		
	AZ12-770	1.245		0,4		
BS A1.5	GU6N	625	4,28	1,1		
	AZ12-770	1.245		0,5		
Abschnitt 2, QS km 0+150						
BS P1.1	GU6N	625	3,50	<0,1		
BS-P1.2			2,22	<0,1		
BS-P1.3			4,25	0,2		
BS-P.2			4,01	0,1		
BS-A1.1			2,95	0,1		
BS-A1.2			3,22	<0,1		
BS-A1.4-teilw. Erosion			4,66	0,3		
BS-A1.4-vollst. Erosion			GU6N	625	7,50	5,6
	GU8N	770	4,5			
BS A1.5	GU6N	625	5,48	3,8		
Abschnitt 2, QS km 0+355						
BS-P1.1	GU6N	625	4,26	0,2		
BS-P1.2			2,20	<0,1		
BS-P1.3			5,64	0,9		
BS-P.2			5,57	0,9		
BS-A1.1			4,18	0,2		
BS-A1.2			4,14	0,2		
BS-A1.4-teilw. Erosion			GU6N	625	7,46	3,9
BS A1.5			GU7S	740	7,06	8,0
	AZ12-700	1.205	4,8			

Bemessungssituation	Profil	Widerstandsmoment W_{el} [cm ³ /m]	erforderliche Länge [m]	Kopfauslenkung [cm]
Abschnitt 2, QS km 0+455				
BS-P1.1	GU6N	625	3,54	<0,1
BS-P1.2			4,98	0,5
BS-P1.3			4,50	0,1
BS-P.2			4,06	<0,1
BS-A1.1			5,35	1,3
BS-A1.2			3,30	<0,1
BS-A1.4-teilw. Erosion			6,05	0,6
BS-A1.4-vollst. Erosion	GU6N	625	7,69	5,0
	AZ17-700	1.730		1,3
BS-A1.5	GU10N	990	7,57	8,8
	AZ12-770	1.245		6,4
	AZ17-700	1.730		3,8
Abschnitt 3, QS km 0+650				
BS-P1.1	GU6N	625	1,58	0
BS-P1.2			1,98	0
BS-P1.3			1,58	0
BS-P.2	nicht maßgebend, (rechnerisch keine statisch sinnvolle Profillänge)			
BS-A1.1	GU6N	625	2,27	0
BS-A1.2	nicht maßgebend, (rechnerisch keine statisch sinnvolle Profillänge)			
BS-A1.3- vollst. Erosion	GU6N	625	5,63	1,6
	AZ12-770	1.245		0,7
BS-A1.5	GU6N	625	4,86	2,1
	AZ12-770	1.245		1,0
Abschnitt 3, QS km 0+850				
BS-P1.1	keine Berechnung, da BS bereits am QS 0+650 nicht maßgebend war			
BS-P1.2	GU6N	625	2,09	0
BS P1.3	keine Berechnung, da BS bereits am QS 0+650 nicht maßgebend war			
BS P.2	keine Berechnung, da BS bereits am QS 0+650 nicht maßgebend war			
BS-A1.1	GU6N	625	2,50	0
BS-A1.2	keine Berechnung, da BS bereits am QS 0+650 nicht maßgebend war			
BS-A1.3- vollst. Erosion	GU6N	625	5,98	2,2
	AZ12-770	1.245		1,0
BS-A1.5	GU6N	625	5,63	4,4
	AZ12-770	1.245		1,8

Neben den rechnerisch erforderlichen Längen werden nachfolgend Lieferlängen empfohlen. Bei den empfohlenen Lieferlängen wurde eine paarweise Staffelung des Spundwandfußes von 1,0 m berücksichtigt (jede 2. Doppelbohle 1,0 m kürzer als erforderlich). Gemäß der EAU 2012, Pkt. 8.2.10.2 /16/, ist eine untere, paarweise Staffelung von 1,0 m ohne Nachweis möglich. Bei der Wahl der Lieferlängen wurde die Längentoleranz für warmgewalzte Spundbohlen berücksichtigt.

Es wird empfohlen, abschnittsweise gleiche Lieferlängen einzubauen. Die Wahl der nachfolgend genannten Abschnitte erfolgte unter Berücksichtigung der geometrischen Verhältnisse und der Baugrundsituation. Diese Einteilung sollte im Rahmen der weiteren Planungen im Hinblick auf technologische und andere Randbedingungen überprüft werden.

Es wird empfohlen warmgewalzte Spundwandprofile zu verwenden.

Bei der Festlegung der Spundwandprofile sind die folgenden Angaben zu beachten:

Abschnitt 1: km 0-650 – 0-450 und 0-250 – 0-00:

- Maßgebend: QS km 0-550 und km 0-650
- empfohlene Lieferlänge: **5,5 / 4,5 m**
- Stahlgüte: S240 GP
- statisch erforderliches, elastisches Widerstandsmoment W_{el} : **> 625 cm³/je m Wand**
- erf. Wanddicke: $t = 6,0$ mm zzgl. beidseits 1,2 mm **≥ 8,4 mm**
- erf. Wanddicke: $s = 6,0$ mm zzgl. beidseits 1,2 mm **≥ 8,4 mm**

Abschnitt 1: km 0-450 – 0-250:

- Maßgebend: QS km 0-275
- empfohlene Lieferlänge: **7,5 / 6,5 m**
- Stahlgüte: S240 GP
- statisch erforderliches, elastisches Widerstandsmoment W_{el} : **> 1.730 cm³/je m Wand**
- erf. Wanddicke: $t = 8,5$ mm zzgl. beidseits 1,2 mm **≥ 10,9 mm**
- erf. Wanddicke: $s = 8,5$ mm zzgl. beidseits 1,2 mm **≥ 10,9 mm**

Abschnitt 2: km 0+000 – 0+220:

- Maßgebend: QS km 0+150
- empfohlene Lieferlänge: **7,5 / 6,5 m**
- Stahlgüte: S240 GP
- statisch erforderliches, elastisches Widerstandsmoment W_{el} : **> 770 cm³/je m Wand**
- erf. Wanddicke: $t = 7,5$ mm zzgl. beidseits 1,2 mm **≥ 9,9 mm**
- erf. Wanddicke: $s = 7,1$ mm zzgl. beidseits 1,2 mm **≥ 9,5 mm**

Abschnitt 2: km 0+220 – 0+420:

- Maßgebend: QS km 0+355
- empfohlene Lieferlänge: **7,5 / 6,5 m**
- Stahlgüte: S240 GP
- statisch erforderliches, elastisches Widerstandsmoment W_{el} : **> 1.205 cm³/je m Wand**
- erf. Wanddicke: $t = 8,5$ mm zzgl. beidseits 1,2 mm **≥ 10,9 mm**
- erf. Wanddicke: $s = 8,5$ mm zzgl. beidseits 1,2 mm **≥ 10,9 mm**

Abschnitt 2: km 0+420 – 0+500:

- Maßgebend: QS km 0+455
- empfohlene Lieferlänge: **8,0 / 7,0 m**
- Stahlgüte: S240 GP
- statisch erforderliches, elastisches Widerstandsmoment W_{el} : **> 1.730 cm³/je m Wand**
- erf. Wanddicke: $t = 8,5 \text{ mm}$ zzgl. beidseits 1,2 mm **≥ 10,9 mm**
- erf. Wanddicke: $s = 8,5 \text{ mm}$ zzgl. beidseits 1,2 mm **≥ 10,9 mm**

Abschnitt 3: km 0+500 – 0+900:

- Maßgebend: QS km 0+850
- empfohlene Lieferlänge: **6,0 / 5,0 m**
- Stahlgüte: S240 GP
- statisch erforderliches, elastisches Widerstandsmoment W_{el} : **> 625 cm³/je m Wand**
- erf. Wanddicke: $t = 6,0 \text{ mm}$ zzgl. beidseits 1,2 mm **≥ 8,4 mm**
- erf. Wanddicke: $s = 6,0 \text{ mm}$ zzgl. beidseits 1,2 mm **≥ 8,4 mm**

Anlagen

Anlage 1 Abschnitt 1, QS km 0-275

- Anlage 1.1 BS P1.1 – beidseits mittlere GW-Stände
- Anlage 1.2 BS P1.2 – BHW
- Anlage 1.3 BS P1.3 – beidseits hohe GW-Stände
- Anlage 1.4 BS P.2 – fallender WSP nach BHW
- Anlage 1.5 BS A1.1 – Bordvoll
- Anlage 1.6 BS A1.2 – fallender WSP nach bordvollem Einstau
- Anlage 1.7 BS A1.3 – vollständige Erosion der wasserseitigen Böschung
- Anlage 1.8 BS A1.5 – BHW + Eisdruck

Anlage 2 Abschnitt 1, QS km 0-550

- Anlage 2.1 BS A1.3 – vollständige Erosion der wasserseitigen Böschung
- Anlage 2.2 BS A1.5 – BHW + Eisdruck

Anlage 3 Abschnitt 1, QS km 0-650

- Anlage 3.1 BS A1.3 – vollständige Erosion der wasserseitigen Böschung
- Anlage 3.2 BS A1.5 – BHW + Eisdruck

Anlage 4 Abschnitt 2, QS km 0+150

- Anlage 4.1 BS P1.1 – beidseits mittlere GW-Stände
- Anlage 4.2 BS P1.2 – BHW
- Anlage 4.3 BS P1.3 – beidseits hohe GW-Stände
- Anlage 4.4 BS P.2 – fallender WSP nach BHW
- Anlage 4.5 BS A1.1 – Bordvoll
- Anlage 4.6 BS A1.2 – fallender WSP nach bordvollem Einstau
- Anlage 4.7 BS A1.4 – Windwurf + teilweise Erosion der wasserseitigen Böschung
- Anlage 4.8 BS A1.4 – Windwurf + vollständige Erosion der wasserseitigen Böschung
- Anlage 4.9 BS A1.5 – BHW + Eisdruck

Anlage 5 Abschnitt 2, QS km 0+355

- Anlage 5.1 BS P1.1 – beidseits mittlere GW-Stände
- Anlage 5.2 BS P1.2 – BHW
- Anlage 5.3 BS P1.3 – beidseits hohe GW-Stände
- Anlage 5.4 BS P.2 – fallender WSP nach BHW
- Anlage 5.5 BS A1.1 – Bordvoll
- Anlage 5.6 BS A1.2 – fallender WSP nach bordvollem Einstau
- Anlage 5.7 BS A1.4 – Windwurf + teilweise Erosion der wasserseitigen Böschung
- Anlage 5.8 BS A1.5 – BHW + Eisdruck

Anlage 6 Abschnitt 2, QS km 0+455

- Anlage 6.1 BS P1.1 – beidseits mittlere GW-Stände
- Anlage 6.2 BS P1.2 – BHW
- Anlage 6.3 BS P1.3 – beidseits hohe GW-Stände
- Anlage 6.4 BS P.2 – fallender WSP nach BHW
- Anlage 6.5 BS A1.1 – Bordvoll
- Anlage 6.6 BS A1.2 – fallender WSP nach bordvollem Einstau
- Anlage 6.7 BS A1.4 – Windwurf + teilweise Erosion der wasserseitigen Böschung
- Anlage 6.8 BS A1.4 – Windwurf + vollständige Erosion der wasserseitigen Böschung
- Anlage 6.9 BS A1.5 – BHW + Eisdruck

Anlage 7 Abschnitt 3, QS km 0+650

- Anlage 7.1 BS P1.1 – beidseits mittlere GW-Stände
- Anlage 7.2 BS P1.2 – BHW
- Anlage 7.3 BS P1.3 – beidseits hohe GW-Stände
- Anlage 7.4 BS P.2 – fallender WSP nach BHW
- Anlage 7.5 BS A1.1 – Bordvoll
- Anlage 7.6 BS A1.2 – fallender WSP nach bordvollem Einstau
- Anlage 7.7 BS A1.3 – vollständige Erosion der wasserseitigen Böschung
- Anlage 7.8 BS A1.5 – BHW + Eisdruck
- Anlage 7.9 BS P.2 – fallender WSP nach BHW, Nachweis wasserseitige Böschung

Anlage 8 Abschnitt 3, QS km 0+850

- Anlage 8.1 BS P1.2 – BHW
- Anlage 8.2 BS A1.1 – Bordvoll
- Anlage 8.3 BS A1.3 – vollständige Erosion der wasserseitigen Böschung
- Anlage 8.4 BS A1.5 – BHW + Eisdruck
- Anlage 8.5 BS P.2 – fallender WSP nach BHW, Nachweis wasserseitige Böschung