



DR. SPANG

INGENIEURGESELLSCHAFT FÜR BAUWESEN, GEOLOGIE UND UMWELTECHNIK MBH

Emschergenossenschaft  
GB Planung und Bau  
Gebiet Emscher Hauptlauf  
Frau Ebru Weißler  
Kronprinzenstr. 24  
45128 Essen

Projekt-Nr.	Datei	Diktat	Büro	Datum
40.6699	P6699b200512_REV01.docx	CSp/Den	Witten	12.05.2020

**Projekt-Nr: 1.805**

**Rheindeich Beeckerwerth**

**Rheindeich-km 0,0 bis km 0,6 und km 3,6 bis km 4,2**

**- Erdstatische Nachweise für die wasser- und luftseitigen  
Böschungen des Rheindeiches -**

Bestell-Nr. 0010-4500389871-65287

Auftrag vom 20.05.2019

**Gesellschaft:** HRB 8527 Amtsgericht Bochum, USt-IdNr. DE126873490, <https://www.dr-spang.de>  
58453 Witten, Rosi-Wolfstein-Straße 6, Tel. (0 23 02) 9 14 02 - 0, Fax 9 14 02 - 20, [zentrale@dr-spang.de](mailto:zentrale@dr-spang.de)

**Geschäftsführer:** Dipl.-Ing. Christian Spang, Dipl.-Wirtsch.-Ing. Christoph Spang

**Niederlassungen:** 73734 Esslingen/Neckar, Weilstr. 29, Tel. (0711) 351 30 49-0, Fax 351 30 49-19, [esslingen@dr-spang.de](mailto:esslingen@dr-spang.de)  
60528 Frankfurt/Main, Rennbahnstraße 72 – 74, Tel. (069) 678 65 08-0, Fax 678 65 08-20, [frankfurt@dr-spang.de](mailto:frankfurt@dr-spang.de)  
09599 Freiberg/Sachsen, Halsbrücker Str. 34, Tel. (03731) 798 789-0, Fax 798 789-20, [freiberg@dr-spang.de](mailto:freiberg@dr-spang.de)  
21079 Hamburg, Harburger Schloßstraße 30, Tel. (040) 524 73 35-0, Fax 524 73 35-20, [hamburg@dr-spang.de](mailto:hamburg@dr-spang.de)  
06618 Naumburg, Wilhelm-Franke-Straße 11, Tel. (03445) 762-25, Fax 762-20, [naumburg@dr-spang.de](mailto:naumburg@dr-spang.de)  
90491 Nürnberg, Erlenstegenstr. 72, Tel. (0911) 964 56 65-0, Fax 964 56 65-5, [nuernberg@dr-spang.de](mailto:nuernberg@dr-spang.de)  
14480 Potsdam, Großbeerenstraße 231, Haus III, Tel. (0331) 231 843-0, Fax 231 843-20, [berlin@dr-spang.de](mailto:berlin@dr-spang.de)

**Banken:** Deutsche Bank AG, Witten, IBAN: DE42 4307 0024 0813 9511 00, BIC: DEUTDE33HAN30  
Sparkasse Witten, IBAN: DE59 4525 0035 0000 0049 11, BIC: WELADED1WWTN



---

<b>INHALT</b>	<b>SEITE</b>
<b>1. ALLGEMEINES</b>	<b>4</b>
1.1 Projekt	4
1.2 Unterlagen	4
1.3 Programmbeschreibungen	6
<b>2. BAUTECHNISCHE RANDBEDINGUNGEN</b>	<b>6</b>
2.1 Bauwerksbeschreibung und -daten	6
2.2 Baugrund	7
<b>3. GEOTECHNISCHE UND GEOHYDRAULISCHE NACHWEISE</b>	<b>10</b>
3.1 Allgemeines	10
3.1.1 Berechnungsquerschnitte	12
3.1.2 Einwirkungen	12
3.2 Hydraulische Nachweise	14
3.2.1 Freibordberechnung	14
3.2.2 Nachweis der hydraulischen Filterwirksamkeit	15
3.2.3 Dimensionierung des Dräns	18
3.2.4 Überprüfung der Oberflächenerosion	19
3.2.5 Sicherheit gegen Kolmation	20
3.3 Berechnung der Tragfähigkeit	20
3.3.1 Böschungsbruch- und Böschungsgrundbruchnachweise	20
3.3.2 Nachweise des Abschiebens des Deichs	24
3.3.3 Lokale Standsicherheit der Böschungen	28
3.3.4 Spreizsicherheit am Böschungsfuß	28
3.3.5 Berechnung der Auftriebssicherheit der landseitigen Deckschicht	30
3.3.6 Nachweise gegen hydraulischen Grundbruch	34
3.4 Berechnung der Sicherheit gegen Materialtransport	34
3.4.1 Kontakterosion	35
3.4.2 Suffosion	36
3.4.3 Erosionsgrundbruch	37
3.5 Berechnung der Gebrauchstauglichkeit	40
3.5.1 Setzungen / Verformungen / Rissbildung	40
<b>4. ABSCHLIESSENDE HINWEISE</b>	<b>40</b>



## 5. ANLAGEN

- Anlage 1: Ermittlung der Sickerlinien (20)
- Anlage 1.1: Querprofil 2 km 0+060 (6)
- Anlage 1.2: Querprofil 3 km 0+170 (5)
- Anlage 1.3: Querprofil 5 km 0+280 (5)
- Anlage 1.4: Querprofil 3 km 4+000 (2)
- Anlage 1.5: Querprofil 4 km 4+150 (2)
- Anlage 2: Böschungsbruchberechnungen (39)
- Anlage 2.1: Querprofil 2 km 0+060 (11)
- Anlage 2.2: Querprofil 3 km 0+170 (10)
- Anlage 2.3: Querprofil 5 km 0+280 (6)
- Anlage 2.4: Querprofil 3 km 4+000 (6)
- Anlage 2.5: Querprofil 4 km 4+150 (6)
- Anlage 3.1: Ermittlung der erforderlichen Höhe der Auflastberme (1)
- Anlage 4: Nachweis der Sicherheit gegen Suffosion (6)
- Anlage 4.1: Verfahren nach Kenney und Lau (3)
- Anlage 4.2: Verfahren nach Burenkova (3)



## **1. ALLGEMEINES**

### **1.1 Projekt**

Die Emschergenossenschaft ist für den Rheindeich Beeckerwerth, Abschnitt Rheindeich km 0+00 bis km 4+35 (rechtes Ufer) hochwasserschutzpflichtig. Dieser Deichabschnitt liegt rechtsrheinisch zwischen Rhein-km 783,5 und 787,9 in den Duisburger Stadtteilen Beeckerwerth und Marxloh. Auf den Übersichtslageplänen der Anlagen 1.1 und 1.2 zum Erläuterungsbericht der Vorplanung [U 1] sind die beiden hier gegenständlichen Abschnitte dargestellt.

Aus älteren Untersuchungen geht hervor, dass es im Projektgebiet von Rheindeich km 0+00 bis km 0+60 im Deichhinterland bei Hochwasser zum Austritt von Qualmwasser kommt. Im Bereich der Kläranlage Duisburg Alte Emscher (Rheindeich km 3+60 bis km 4+20) wurde festgestellt, dass der Aufbau des Deiches nicht der DIN 19712:2013-01 Hochwasserschutzanlagen an Fließgewässern entspricht. Die beiden Deichabschnitte sind gem. der DIN 19712:2013-01 in die Deichklasse I (hohes Schadenspotential) zuzuordnen.

Die Emschergenossenschaft plant daher im Rahmen des Hochwasserschutzes für die beiden Deichabschnitte zwei Maßnahmen:

- Schaffung eines Auflastfilters und eines landseitigen Deichverteidigungsweges (DWW) am Rheindeich in Duisburg Beeckerwerth,
- Schaffung eines landseitigen Deichverteidigungsweges am Rheindeich im Bereich der Kläranlage Duisburg Alte Emscher.

Die Dr. Spang GmbH wurde von der Emschergenossenschaft beauftragt, die erforderlichen geotechnischen und hydraulischen Standsicherheitsuntersuchungen der beiden Deichabschnitte entsprechend den Vorgaben der DIN 19 712 und des DWA-Merkblattes M 507 durchzuführen. Mit dem vorliegenden Bericht werden die Berechnungsergebnisse vorgelegt. Die Baugrunduntersuchungen vom Büro ICG Leonhard-Veith GmbH & Co. KG aus Düsseldorf [U 2] und [U 3] dienen dabei als Grundlage für diese Berechnungen.

### **1.2 Unterlagen**

Es wurden die nachfolgend aufgeführten Unterlagen verwendet:



- [U 1] Erläuterungsbericht - Vorplanung - Rheindeich Beeckerwerth, Auflastfilter und Deichverteidigungswege, Rheindeich km 0,0 - 0,6 und km 3,6 - 4,2; Dr. Spang GmbH, Witten, 01.12.2019.**
- [U 2] Baugrunderkundung / Hydraulische und erdstatische Untersuchungen; Duisburg Beeck, Rheindeich Beeckerwerth, Untersuchung des bestehenden Deichs von Rheindeich-km 0,0 bis km 0,6 (rechts); ICG Leonhardt-Veith GmbH & Co. KG, Düsseldorf, 05.05.2010.**
- [U 3] Baugrunderkundung / Hydraulische und erdstatische Untersuchungen; Duisburg Beeck, Rheindeich Beeckerwerth, Untersuchung des bestehenden Deichs von Rheindeich-km 3,5 bis km 4,2 (rechts); ICG Leonhardt-Veith GmbH & Co. KG, Düsseldorf, 12.12.2008.**
- [U 4] Merkblatt DWA-M 507-1 "Deiche an Fließgewässern, Teil 1: Planung, Bau und Betrieb"; Ausgabe 2011, DTK/DGGT/DWA, Hennef.**
- [U 5] Merkblatt „Standsicherheit von Dämmen an Bundeswasserstraßen“ (MSD); Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe, Juni 2011.**
- [U 6] Merkblatt „Anwendung von Kornfiltern an Bundeswasserstraßen“ (MAK); Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe, Oktober 2013.**
- [U 7] Merkblatt „Materialtransport im Boden“ (MMB); Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe, Oktober 2013.**
- [U 8] Merkblatt „Freibordbemessungen an Stauanlagen“ (DVWK-M 246/1997); DVWK, Bonn, 1997**
- [U 9] Statik im Erdbau; 2. überarbeitete Auflage, Henner Türke, Ernst & Sohn, 1990**
- [U 10] Bodenmechanik; Gerd Gudehus, Ferdinand Enke Verlag, 1981**
- [U 11] TAE-Seminar „Geotechnische Aspekte des technischen Hochwasserschutzes“, Vortrag Dr.-Ing. Markus Herten zum Thema „Geotechnische Nachweise“; Technische Akademie Esslingen, Dr.-Ing. Bernhard Odenwald, März 2018**



**[U 12] Lehrbuch der Hydrogeologie, Band 3: Geohydraulik, Busch, Luckner, Tiemer; Prof. Dr. Georg Matthess, Gebrüder Bornträger, Berlin / Stuttgart, 1993**

### 1.3 Programmbeschreibungen

Im Rahmen der Standsicherheitsberechnungen werden folgende Computerprogramme verwendet:

Programmname	Leistungsbezeichnung	Programmautor	Programm-Version, Erstellungsdatum
GGU-2D-SSFLOW	Berechnung von zweidimensionalen Grundwasserströmungen mit der Finiten-Elemente-Methode	GGU Software, Braunschweig	V 11.11 18.10.2019
GGU-STABILITY	Böschungsbruch nach DIN 4084	GGU Software, Braunschweig	V 13.05 21.11.2019

**Tabelle 1.3-1:** Verwendete Software

## 2. BAUTECHNISCHE RANDBEDINGUNGEN

### 2.1 Bauwerksbeschreibung und -daten

Nach derzeitigem Stand der Planung soll durch die Schaffung bzw. Erneuerung eines Auflastfilters und eines landseitigen Deichverteidigungsweges am Rheindeich der Hochwasserschutz für das Projektgebiet in Duisburg Beeckerwerth verbessert werden. Der Deich bleibt in seiner eigentlichen Form erhalten. Am landseitigen Böschungsfuß wird in den beiden Abschnitten (Rheindeich km 0+00 bis km 0+60 und km 3+50 bis km 4+20) ein DVW am landseitigen Deichfuß erstellt sowie im Abschnitt Rheindeich km 0+00 bis km 0+60 zusätzlich ein Auflastfilter hergestellt. Außer dem lokal auf der Luftseite erforderlichen Abheben des Mutterbodens sind keine Eingriffe in den vorhandenen Deich vorgesehen.

Gemäß den Angaben in [U 2] und [U 3] handelt es sich bei dem bestehenden Deich um einen Einzonendeich aus vorwiegend lehmigem Material. Im Zuge einer Deichsanierung zwischen km 0+48 und km 1+17 im Jahr 1999/2000 wurde zur Verbreiterung und Erhöhung des Deiches im Bereich der Deichkrone und wasserseitigen Deichböschung ebenfalls bindiges Material verwendet. Dies wird auch mit dem Ergebnis der Baugrunderkundung aus [U 2] bestätigt. Lediglich im Bereich



der landseitigen Böschung wurde sandiges Anschüttungsmaterial verwendet. Bei km 0+06 (Querprofil 2) und km 0+38 (Querprofil 5) des vorderen Deichabschnittes wurden im Deichkörper unterhalb der bindigen Auffüllmaterialien und oberhalb der Auelehme (bindige Deckschicht) sandige Auffüllungen angetroffen, die zur Landseite hin ausstreichen bzw. an die Geländeoberfläche treten. Der hintere Deichabschnitt wurde mit unterschiedlichen Material mehrfach erhöht und verbreitert. Wasserseitig ist dort in der Regel eine bindige Dichtungsschicht vorhanden, auf der Landseite wurde z.T. gröberes Material eingebaut. Der Deichkörper besteht vorwiegend aus Waschbergematerial und kann als homogener Deich mit einer Oberflächendichtung eingestuft werden.

Die Kronenhöhe liegt zwischen km 0+00 und 0+60 zwischen +31,77 m NN und +32,10 m NN und zwischen km 3+50 und 4+20 zwischen +32,32 m NN und +33,11 m NN in Kronenmitte. Aufgrund des Geländeverlaufs ergeben sich Deichhöhen von ca. 2,3 m bis ca. 7,6 m auf der Landseite und von ca. 6,9 m und 11,9 m auf der Wasserseite. Anhand der vorliegenden Querprofilen ergeben sich Böschungsneigungen auf der Wasserseite von 1 : 1,9 bis 1 : 3,9 sowie auf der Landseite von 1 : 2,2 bis 1 : 3,0.

Im Deichabschnitt ab km 0+48 wurde nach [U 2] bereits im Jahr 1999/2000 eine Sanierung des Deiches mit Anordnung des Deichverteidigungsweges am landseitigen Böschungsfuß vorgenommen, so dass auf die Untersuchung dieses Abschnittes verzichtet wird. **Die Untersuchungen werden somit nur für den Deichabschnitt von km 0+00 bis km 0+48 und km 3+50 bis km 4+20 durchgeführt.**

Die zu führenden **geotechnischen und hydraulischen Nachweise** für den Deich sind im DWA-Merkblatt 507-1 [U 4] und DIN 19712 aufgeführt und werden im Kapitel 3.1 erläutert.

## 2.2 Baugrund

Mit Bezug auf die Berichte vom Büro ICG [U 2] und [U 3] lassen sich die anstehenden Böden zu insgesamt **4 verschiedenen Bodenhauptgruppen** zusammenfassen. Diese werden in den vorgenannten Berichten ausführlich beschrieben. Nachfolgend folgt nur eine kurze Zusammenfassung.

**Schicht 1: Anschüttung.** Hierbei handelt es sich sowohl um bindige (lehmige) Auffüllungen, die sowohl im Deichkörper als auch im Bereich des Deichvor- und hinterlandes angetroffen wurden. Rollige bis gemischtkörnige (sandige) Auffüllungen wurden vorwiegend, jedoch nicht in allen Auf-



schließen, in der untersten Anschüttungszone des Deichkörpers bzw. im Deichhinterland erkundet. Die Mächtigkeiten der Anschüttungen variieren aufgrund der Deichgeometrie und Geländehöhen stark. Im Deichvor- und -hinterland beträgt die Mächtigkeit nur etwa 1 bis 2 m, im Deichkörper wurden Mächtigkeiten von 7 bis 9 m erkundet.

**Schicht 2: Auelehme und -sande (quartäre Ablagerung).** Hierbei handelt es sich um feinsandige, schwach tonige Schluffe in weicher bis steifer Konsistenz sowie um schluffige Feinsande. Die Auelehme und -sande bilden die oberste gewachsene Bodenschicht und stellt die Aufstandsfläche des Deiches dar. Im Mittel beträgt die Mächtigkeit 3 m. Die Unterkante der Schicht liegt bei etwa 20 bis 22 m NN im vorderen Deichabschnitt und bei ca. 14 bis 18 m NN im hinteren Deichabschnitt.

**Schicht 3: Terrassensande und -kiese (quartäre Ablagerung).** Unterhalb der Auelehme und -sande stehen die Niederterrassenablagerungen an. Es handelt sich um Kiese mit variierenden Sandanteilen, am Schichtbeginn ist eine kiesige und / oder schluffige Sandschicht ausgebildet. Die Sande und Kiese weisen eine Mächtigkeit von ca. 8 bis 20 m auf und reichen bis in eine Tiefe von etwa 0 bis 10 m NN.

**Schicht 4: Lintfort Schichten (tertiäre Sedimente).** Die Terrassensande und -kiese werden von tertiären Sedimenten unterlagert. Diese Sedimente setzen sich aus stark feinsandigen, teils tonigen Schluffen sowie lokal stark schluffigen Sanden zusammen. Das Tertiär wird nur bei der Ermittlung der Sickerlinie im Baugrundmodell berücksichtigt, bei dem Böschungsbruchnachweis ist diese Schicht aufgrund der Tiefenlage nicht von Relevanz.

Auf der Grundlage von [U 2] und [U 3] werden für die Standsicherheitsnachweise folgende bodenmechanische Kennwerte verwendet.

Schicht Nr.	Boden	Wichte $\gamma_k / \gamma_k'$ [kN/m <sup>3</sup> ]	Reibungswinkel $\phi_k'$ [°]	Kohäsion $c_k'$ [kN/m <sup>2</sup> ]
1.1	bindige Anschüttung	19 / 9	25	5
1.2	rollige Anschüttung	19 / 10	30	0 <sup>1)</sup>
2	Auelehme und -sande	19 / 9	25	5
3	Terrassensande und -kiese	20 / 11	35	0

1) Ansatz einer Kapillarkohäsion zur Vermeidung oberflächennaher Gleitkreise

**Tabelle 2.2-1:** Charakteristische bodenmechanische Kennwerte [U 2] und [U 3]





In der nachfolgenden Tabelle sind die bodenmechanischen Kennwerte für die Materialien zur Herstellung der Auflastberme und des Deichverteidigungsweges (DVW) angegeben, die auf Erfahrungswerten beruhen. Nach MSD-Merkblatt [U 5] darf bei einem dichten, lückenlosen Grasbewuchs der Einfluss der Durchwurzelung durch den Ansatz einer Durchwurzelungskohäsion in einer oberflächennahen, 0,20 m dicken Schicht berücksichtigt werden. Dies wurde für die vorhandene Vegetationsschicht im hinteren Deichabschnitt von km 3+50 bis 4+20 vorgenommen. Die dafür angesetzten Rechenkennwerte sind in der nachfolgenden Tabelle ebenfalls enthalten.

Bezeichnung	Wichte $\gamma / \gamma'$ [kN/m <sup>3</sup> ]	Reibungswinkel $\varphi'$ [°]	Kohäsion $c'$ [kN/m <sup>2</sup> ]
Wurzelschicht	19,0 / 9,0	25	7,0 <sup>1)</sup>
Auflastberme / DVW	20,0 / 11,0	32,5	-

1) Wurzelkohäsion entsprechend MSD-Merkblatt [U 5]

**Tabelle 2.2-2:** Charakteristische bodenmechanische Kennwerte für Wurzelschicht und Auflastberme

In [U 2] und [U 3] sind **Durchlässigkeitsbeiwerte**  $k_f$  der anzutreffenden Bodenschichten angegeben. Zusammenfassend sind die für die Bemessung verwendeten Durchlässigkeitsbeiwerte  $k_f$  in der folgenden Tabelle angegeben.

Schicht / Bauteil	Durchlässigkeitsbeiwerte $k_f$ [m/s]
bindige Anschüttung	$1 \times 10^{-6} / 1 \times 10^{-7}$
rollige Anschüttung	$1 \times 10^{-4} / 1 \times 10^{-5}$
Auelehme und -sande	$1 \times 10^{-7}$
Terrassensande und -kiese	$1 \times 10^{-3}$
Tertiär	$1 \times 10^{-6}$
Auflastberme / DVW	$1 \times 10^{-4}$

**Tabelle 2.2-3:** Durchlässigkeitsbeiwerte  $k_f$

Die grundsätzlichen Anforderungen an Deiche, an die geotechnischen Untersuchungen und die zu führenden Nachweise sowie die zu verwendenden Deichbaumaterialien sind im DWA-Merkblatt 507-1 [U 4] enthalten.



### 3. GEOTECHNISCHE UND GEOHYDRAULISCHE NACHWEISE

#### 3.1 Allgemeines

Im Zuge der nachfolgenden Untersuchungen werden geotechnische Nachweise auf Grundlage des DWA-Merkblatts 507-1 [U 4] geführt. Das Merkblatt bezieht sich hinsichtlich der zu führenden Nachweise auf die DIN 19712 und EC 7 / DIN 1054.

Die zu führenden Nachweise im Deichbau werden in zwei grundlegende Kategorien unterschieden: die **geotechnischen** und die **hydraulischen Nachweise**. Für die geotechnischen Nachweise wird zusätzlich zwischen den Grenzzuständen der Tragfähigkeit, der Gebrauchstauglichkeit und der Sicherheit gegen Materialtransport unterschieden. Die nachfolgende Tabelle stellt die formal nach [U 4] zu führenden **geotechnischen Nachweise** zusammenfassend dar.

Tragfähigkeit		Sicherheit gegen Materialtransport	Gebrauchstauglichkeit
Globale Sicherheit	Lokale Sicherheit		
Böschungsbruch	Bereich der land- und wasserseitigen Böschung	Kontakterosion	Setzungen
Böschunggrundbruch	Spreizsicherheit am Böschungsfuß	Suffosion Innere Erosion	Verformungen
Abschieben des Dammkörpers	Wasserseitige Dichtung bei Wasserdruck im Deichkörper	Erosionsgrundbruch	Rissbildung
	Auftrieb und hydraulischer Grundbruch	Fugenerosion	

**Tabelle 3.1-1:** Geotechnische Nachweise nach [U 4]

Die geforderten **hydraulischen Nachweise** umfassen weiterhin folgende Einzelnachweise:

- Festlegung der Freibordhöhe
- Hydraulische Filterwirksamkeit
- Dimensionierung von Dräns und Dränleitungen
- Erosionsstabilität der wasserseitigen Böschungen
- Sicherheit gegen Kolmation.



Weiterhin sind für die vorgenannten Nachweise unterschiedliche Bemessungssituationen zu berücksichtigen. Entsprechend dem Sicherheitskonzept des EC 7-1 wird hierbei zwischen der **ständigen Bemessungssituation (BS-P)**, der **vorübergehenden Bemessungssituation (BS-T)** und der **außergewöhnlichen Bemessungssituation (BS-A)** unterschieden. Im vorliegenden Bericht werden die Bemessungssituationen BS-P und BS-A betrachtet.

Die Tabelle 3.1-2 fasst die für den vorliegenden Fall anzusetzenden Einwirkungen für die relevanten Bemessungssituationen zusammen.

Einwirkungen		Bemessungssituation				
		BS-P ständig		BS-A außergewöhnlich		
		P.1	P.2	A.1	A.2	A.3
<b>Ständige</b>	Eigenlasten und Auflasten	X	X	X	X	X
<b>Veränderliche</b>	Verkehrslasten	X	X	X	X	X
	Beanspruchung durch BHQ	X			X	X
	Beanspruchungen durch aus BHQ fallenden Wasserspiegel		X			
<b>Außer- gewöhnliche</b>	Beanspruchung durch Wasserstand „bordvoll“			X		
	Beanspruchungen infolge Versagens des Dräns auf der Landseite				X	
	Beanspruchungen infolge Versagens der Dichtung auf der Wasserseite					X

**Tabelle 3.1-2:** Anzusetzende Einwirkungen in Abhängigkeit der Bemessungssituation nach [U 4]

Die Bemessungssituation BS-A.3 entfällt, da keine Dichtungen vorhanden sind. Infolge der tlw. erforderlichen Anordnung einer Auflastberme auf der Landseite zur Druckentlastung ist die Bemessungssituation BS-A.2 zumindest stellenweise zu untersuchen.

Für die in Tabelle 3.1-2 aufgeführten Nachweise werden unterschiedliche Grenzzustände zu Grunde gelegt. Die Festlegung des Grenzzustands regelt das Nachweisverfahren und den Ansatz der zugehörigen Teilsicherheitsbeiwerte gemäß EC 7 / DIN 1054 auf Einwirkungs- und Widerstandsseite. Folgende Grenzzustände werden hierzu unterschieden:



- Nachweise einer ausreichenden globalen und lokalen Standsicherheit:  
**Grenzzustände GEO-3 und GEO-2**
- Nachweise gegen das Versagen durch hydraulischen Grundbruch und Aufschwimmen:  
**Grenzzustände HYD und UPL**
- Nachweise der Sicherheit gegen Materialtransport:  
**Grenzzustand HYD.**

Das zugrunde gelegte Sicherheitskonzept entspricht den Vorgaben in EC 7 / DIN 1054. Demzufolge ist nachzuweisen, dass unter Berücksichtigung der Teilsicherheitsbeiwerte für den Grenzzustand GEO-3, GEO-2 sowie HYD/UPL der Bemessungswert der Einwirkungen kleiner bzw. gleich dem Bemessungswert der Widerstände ist bzw. der Bemessungswert der destabilisierenden Einwirkungen kleiner bzw. gleich dem Bemessungswert der stabilisierenden Einwirkungen ist.

### 3.1.1 Berechnungsquerschnitte

Unter Berücksichtigung der Deichgeometrie werden für den Deichabschnitt von km 0+00 bis 0+60 die Querprofile 2, 3 und 5 untersucht. Am Querprofil 4 km 0+28 ist der Winkel der landseitigen Böschung zwar steiler, die Böschungshöhe jedoch deutlich flacher und ist daher nicht maßgebend. Bei km 0+52 ist das Gelände landseitig bereits mit einer Auflastberme erhöht worden, so dass an dieser Stelle ebenfalls keine Untersuchung mehr erforderlich ist.

Für den Deichabschnitt von km 3+50 bis 4+20 werden unter Berücksichtigung der Deichgeometrie die Berechnungen am Querprofil 3 und 4, entsprechend km 4+00 und 4+15, geführt.

### 3.1.2 Einwirkungen

In Abstimmung mit der Emschergenossenschaft ist sowohl für den Deichverteidigungsweg als auch auf der Deichkrone eine **Verkehrslast** von **33,3 kN/m<sup>2</sup>** (SLW 60) anzusetzen. Die Lasten werden auf einer Breite von 3 m je Fahrstreifen aufgebracht. Die Fahrbahnbreite des Deichverteidigungsweges ist nach [U 1] mit 5 m festgelegt (3 m Fahrstreifen, 2 x 1 m Bankett). Zur Überprüfung des Einflusses der Verkehrslast auf dem Deichverteidigungsweges auf die Böschungsstandsicherheit sollten die Berechnung einmal mit und einmal ohne Ansatz der Verkehrslast ausgeführt werden. Vergleichsberechnungen haben ergeben, dass dies keinen nennenswerten Einfluss auf



das Ergebnis der Böschungsstandsicherheit, so dass in den hier vorliegenden Berechnungsergebnissen die Verkehrslast immer enthalten ist.

Als **veränderliche Einwirkungen** für die maßgebenden geotechnischen und hydraulischen Nachweise gemäß [U 4] werden **Strömungskräfte** aus einer numerischen Strömungsberechnung für folgende Beanspruchungen ermittelt:

- Bemessungshochwasser BHQ;
- schnell fallender Wasserspiegel, ausgehend vom BHQ;

Der Wasserstand für das **Bemessungshochwasser** ist gemäß [U 2] und [U 3] vom Staatlichen Umweltamt Krefeld für den Regierungsbezirk Düsseldorf als BHQ<sub>2004</sub> festgelegt und liegt am Rhein-km 783,5 in Höhe von 28,54 m NN und bei Rhein-km 788,5 in Höhe von 27,49 m NN Für die Bemessung des Deichs bei schnell fallendem Wasserspiegel wird der freie Wasserspiegel nach [U 4] vereinfacht mit 1/3 des Bemessungswasserstandes angegeben. Die anzusetzenden Wasserstände sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst.

Deichabschnitt	Wasserstand BHQ <sub>2004</sub> [+m NN]	Mittelwasserstand AMW <sub>1990</sub> [+m NN]	Wasserstand bei schnell fallendem Wasserspiegel [+m NN]
km 0+00 bis 0+60	28,54	19,63	22,60
km 3+60 bis 4+20	27,49	18,77	21,68

**Tabelle 3.1.2-1:** anzusetzende Wasserstände

Zur Berücksichtigung der **außergewöhnlichen Einwirkungen** gemäß [U 4] werden Strömungskräfte aus einer Strömungsberechnung für folgende Beanspruchungen ermittelt:

- Bemessungshochwasser + 1,5 m,
- Beanspruchung infolge Versagens des Dränkörpers (Auflastberme) auf der Landseite.

Da die Deichkrone höher als erforderlich hergestellt ist (siehe auch Kapitel 3.2.1), wird eine Untersuchung auf „bordvoll“ (Einstau bis Deichkrone) nicht erforderlich. Unter Berücksichtigung der nach DWA-M 507 erforderlichen Mindestfreibordhöhe und einem Sicherheitszuschlag von 0,5 m für Wellenschlag, etc. ist in Abstimmung mit der Emschergenossenschaft sind die Nachweise für außergewöhnliche Einwirkungen mit einem Wasserstand von BHW + 1,5 m zu erbringen.



Für die Standsicherheitsnachweise des Deichkörpers liegt die Ermittlung des stationären Sickerlinienverlaufs als ungünstige Strömungssituation gemäß [U 4] auf der sicheren Seite. Der Sickerlinienverlauf wird dabei mit dem Programm GGU-2D-SSFLOW für den entsprechenden Wasserstand ermittelt und als Porenwasserdruck-Netz in das Programm GGU-STABILITY übernommen. Für die Bemessung des Deichs bei schnell fallendem Wasserspiegel wird die Sickerlinie ausgehend von der rechnerisch ermittelten stationären Durchströmung infolge BHQ böschungsparell manuell in GGU-STABILITY übertragen. Zur Berücksichtigung des ausgefallenen Dränkörpers (Auflastberme) werden die Bodenkennwerte im Bereich des Dräns durch die des Deichkörpers ersetzt.

Für den landseitigen Bereich wird der höchste Grundwasserstand gemäß den Angaben in [U 2] und [U 3] festgelegt und als landseitiges Randpotential für die Berechnungsmodelle angesetzt. Im Deichhinterland wird das Randpotential auf Geländehöhe festgelegt.

## **3.2 Hydraulische Nachweise**

### **3.2.1 Freibordberechnung**

Die Freibordhöhe gibt gemäß dem Merkblatt DWA-M 507 [U 4] den vertikalen Abstand zwischen dem Bemessungshochwasserstand (BHW) und der Deichkrone auf der Wasserseite an. Eine ausreichende Freibordhöhe soll ein Überströmen der Deichkrone auch unter Winddruck und Wellengang verhindern. Der Freibord setzt sich aus Windstau, Wellenauflauf und zusätzlichen Kronenerhöhungen zusammen.

Die erforderliche Freibordhöhe ist gemäß dem Merkblatt DWA-M 507 [U 4] bzw. dem Merkblatt DVWK-M 246/1997 [U 8] zu ermitteln. Nach DWA-M 507 ist für die vorhandenen Deichhöhen und der Einstufung der Deiche in Klasse I eine Mindestfreibordhöhe von 1,0 m erforderlich.

Gemäß den Angaben in [U 2] und [U 3] orientierte sich die Deichhöhe im Untersuchungsgebiet in der Vergangenheit nicht nur an den Hochwasserständen des Rheins, sondern auch an aufgetretenen und noch zu erwartenden Bergsenkungen. Aus diesem Grund liegt die Deichkrone im Untersuchungsgebiet deutlich oberhalb des Bemessungshochwasser von BHW = 28,54 m NN für km 0+00 bis 0+60 bzw. 27,49 m NN für km 3+50 bis 4+20. Die Einzelwerte sind in der nachfolgenden Tabelle enthalten. Das Mindestfreibord nach DWA-M 507 ist somit eingehalten.



QP	Deich-km	BHW [m NN]	wasserseitige Deichkrone [m NN]	Differenz [m]
2	0+060	28,54	31,74	3,20
3	0+170	28,54	31,72	3,18
5	0+380	28,54	32,05	3,51
3	4+000	27,49	32,31	4,82
4	4+150	27,49	32,25	4,76

**Tabelle 3.2.1-1:** vorhandenes Freibord

Das vorhandene Freibord ist somit für beide Deichabschnitte deutlich größer als das erforderliche Mindestfreibord nach DWA-M 507 und somit gewährleistet.

### 3.2.2 Nachweis der hydraulischen Filterwirksamkeit

Sofern mehrere Deichzonen (Dichtungsschicht – Stützkörper – Dränkörper) vorliegen, ist der Nachweis der hydraulischen Filterwirksamkeit zu führen.

Diese Forderung kann bei Bestandsdeichen zwar grundsätzlich überprüft werden, im Falle von heterogen zusammengesetzten Deichen ist jedoch davon auszugehen, dass eine ausreichend hydraulische Filterwirksamkeit der einzelnen Materialien untereinander nicht sichergestellt ist.

Die hydraulische Filterwirksamkeit ist daher i.d.R. nur bei neu zu errichtenden, gegliederten Drei-Zonen-Deichen nachzuweisen. Die Bewertung der inneren hydraulischen Sicherheit der hier zu begutachtenden Altdeiche erfolgt als Nachweis gegen Materialtransport.

Im vorliegenden Fall wird je untersuchtem Querprofil eine stationäre Sickerlinienberechnung unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Baugrunderkundung durchgeführt. Aus der Strömungsberechnung werden dann die maßgeblichen hydraulischen Gradienten ermittelt, mit denen die Nachweise gegen Materialtransport (hier: Piping und Suffosion, s. Kap. 3.4.3 und 3.4.2) geführt werden.

Da die Suffosionsicherheit der gemischtkörnigen / rolligen Anschüttungen nicht eindeutig nachgewiesen werden kann (siehe Kap. 3.4.2) ist für diese Böden der hydraulische Nachweis erforderlich. Nach Kap. 3.4.2 ist der Nachweis für den hinteren Deichabschnitt von km 3+50 bis km 4+20 zu führen.



Der Nachweis erfolgt durch den Vergleich des vorhandenen hydraulischen Gefälles mit dem kritischen Gefälle nach [U 4]:

$$i_{\text{vorh}} * \gamma_{\text{H,vorh}} \leq i_{\text{krit}} / \gamma_{\text{H,krit}}$$

Die Teilsicherheitsbeiwerte für die Nachweise einer ausreichenden Sicherheit gegenüber Suffosion nach [U 4] sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst.

Teilsicherheitsbeiwerte	BS-P	BS-A
$\gamma_{\text{H,vorh}}$	1,35	1,10
$\gamma_{\text{H,krit}}$	1,50	1,50

**Tabelle 3.2.2-1:** Teilsicherheitsbeiwerte für den Suffosionsnachweis

Für den vorhandenen Gradienten wird gemäß [U 4] der mittlere Gradient eingesetzt

$$i_{\text{vorh}} = \Delta h / \Delta l$$

mit  $\Delta h$  = Druckhöhendifferenz (Wasserstand - GOK landseitiger Deichfußpunkt)

$\Delta l$  = Länge des Sickerweges

Im hinteren Deichabschnitt liegt der landseitige Böschungsfuß über dem Bemessungshochwasserstand von BHW = 27,49 m NN. Es wird daher die Bestimmung des mittleren hydraulischen Gradienten für die Bemessungssituation BS-A erforderlich.

Der kritische Gradient ermittelt sich nach Busch, Luckner und Tiemer [U 12] zu

$$i_{\text{krit}} = \varphi_0 \sqrt{\frac{n * g * d_s^2}{v * k}}$$

mit  $\varphi_0 = 0,6 * \left(\frac{\rho_d}{\rho_w} - 1\right) * a^* * \sin\left(30^\circ + \frac{\alpha}{8}\right)$

$a^* = 0,82 - 1,8 * n + 0,0062 * (U - 5)$

$d_s = 0,27 * \sqrt[6]{U} * \frac{n}{1-n} * d_{17}$

U = Ungleichförmigkeitszahl des Erdstoffs

n = Porosität ( $\approx 0,3$ )

$d_{17}$  = Korndurchmesser bei a = 17 Gew.-% in [m]





- $g$  = Erdbeschleunigung ( $\approx 9,81 \text{ m/s}^2$ )  
 $\nu$  = kinematische Zähigkeit ( $\approx 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ )  
 $\rho_d$  = Schüttdichte, trocken in  $[\text{kg}/\text{m}^3]$  ( $\approx 1,9 \text{ t}/\text{m}^3$ )  
 $\rho_w$  = Dichtes des Wassers in  $[\text{kg}/\text{m}^3]$  ( $\approx 1,0 \text{ t}/\text{m}^3$ )  
 $k$  = hydraulische Durchlässigkeit  
 $\alpha$  = Winkel zwischen Erdbeschleunigung und Strömungsrichtung (horizontal =  $90^\circ$ )

Die Ermittlung der Eingangsparameter  $U$  und  $d_{17}$  zur Bestimmung des kritischen Gradienten mit der vorstehenden Formel ist nicht an allen Kornverteilungskurven aufgrund fehlender Ergebnisse im Bereich des Schlämmkorns möglich. Es wurde daher repräsentativ der Nachweis an der Bodenprobe BK 4 ( $t = 5,1 - 10,5 \text{ m}$ ) Tiefe geführt. Die Eingangsparameter und der kritische Gradient ermittelt sich damit wie folgt:

$$\varphi_0 = 0,6 \cdot \left( \frac{1,9}{1,0} - 1 \right) \cdot 0,506 \cdot \sin\left(30^\circ + \frac{90}{8}\right) = 0,18$$

$$a^* = 0,82 - 1,8 \cdot 0,3 + 0,0062 \cdot (41,5 - 5) = 0,506$$

$$d_s = 0,27 \cdot \sqrt[6]{41,5} \cdot \frac{0,3}{1-0,3} \cdot 0,24/1000 = 5,17 \cdot 10^{-5}$$

$$i_{krit} = 0,18 \sqrt{\frac{0,3 \cdot 9,81 \cdot (5,17 \cdot 10^{-5})^2}{1,2 \cdot 10^{-6} \cdot 1,0 \cdot 10^{-4}}} = 0,46$$

In der nachfolgenden Tabelle sind die mittleren hydraulischen Gradienten

	Bemessungssituation	
	A.1	
	QP3	QP4
$i_{vorh}$	0,06	0,04
$i_{vorh} \cdot \gamma_{H,vorh}$	0,066	0,047
$i_{krit}$	0,46	0,46
$\frac{i_{krit}}{\gamma_{H,krit}}$	0,307	0,307
$i_{vorh} \leq i_{krit}$	ja	ja

**Tabelle 3.2.2-2:** Ausnutzungsgrade für den Suffosionsnachweis für den Deichabschnitt km 3+50 bis km 4+20



Der Tabelle 3.2.2-2 ist zu entnehmen, dass der **Suffosionsnachweis** für das rollige / gemischt-körnige Anschüttmaterial **im hinteren Deichabschnitt erbracht** ist.

Für den Dränkörper / Auflastberme (nicht kohäsiver Boden) ist gegenüber dem Deichkörper ein Kriterium von  $k_D > 25 k_{St}$  gemäß MAK [U 6] einzuhalten. Bei Ansatz einer mittleren Durchlässigkeit des Deichkörpers von  $k_{st} = 1,0 \times 10^{-6}$  m/s ergibt sich somit eine erforderliche Durchlässigkeit des Dränkörpermaterials von  $k_D > 2,5 \times 10^{-5}$  m/s.

### 3.2.3 Dimensionierung des Dräns

Landseitige Dränfilter und Dränleitungen sind bei den Altdeichen nicht vorhanden bzw. nicht bekannt. Für die Anordnung einer erforderlichen Auflastberme, um bspw. die Auftriebssicherheit oder die Böschungsstandsicherheit infolge Austritt der Sickerlinie auf der Landseite zu gewährleisten, erfolgt die Bemessung jener Bermen nachfolgend.

Das Querprofil 2 km 0+060 ist in der Bemessungssituation BS-A.1 auf der Landseite als nicht standsicher zu beurteilen (siehe Kap. 3.3.1). Zwischen den bindigen Anschüttungen und den Au-elehmen ist eine Schicht aus rolligen Auffüllungen vorhanden, die zu einem Auftriebs- und somit Standsicherheitsproblem der landseitigen Böschung führen. Dies gilt ebenso für das untersuchte Querprofil 5 bei km 0+380. Aus diesem Grund wird am Böschungsfuß eine Auflastberme angeordnet, auf der dann auch der Deichverteidigungsweg liegt.

Die Ermittlung der erforderlichen Bermenhöhe wird unter Einhaltung der Standsicherheitsbedingungen für die Auftriebssicherheit geführt. Gemäß DWA-M 507-1 ist dabei folgende Berechnung zu führen:

$$a_{erf} = \frac{\gamma_w}{\gamma_2} * \frac{\gamma_{G,dst}}{\gamma_{G,stb}} * (h_2 + s) - \frac{\gamma_1}{\gamma_2} * s$$

- mit  $a_{erf}$  = erforderliche Bermenhöhe  
 $h_2$  = hydraulische Druckhöhe im Bereich der landseitigen Berme  
 $s$  = Mächtigkeit der bindigen Deckschicht  
 $\gamma_w$  = Wichte des Wassers  
 $\gamma_1$  = Wichte der bindigen Deckschicht  
 $\gamma_2$  = Wichte des Dränkörpers



Die Abschätzung des hydraulischen Potentialabbaus bezogen auf die Sickerstrecke erfolgt gemäß DWA-Merkblatt 507-1, Kap. 8.4.5. Es wird bei den Berechnungen von einer geschlossenen Deckschicht im Bereich des Deichlagers und einem Potentialabbau von 0,3 m auf 100 m Sickerstrecke ausgegangen.

Die angesetzte Mächtigkeit der bindigen Anschüttungen / der Auelehme (Deckschicht) ist aus den an den landseitigen Böschungsfüßen des jeweiligen Querprofils vorliegenden Baugrundaufschlüssen entnommen. Hierbei wird, sofern mehrere Aufschlüsse im Bereich eines Querprofils vorhandene, die geringste Deckschichtmächtigkeit angesetzt.

In Anlage 3.1 ist die Ermittlung der Höhe der Auflastberme für die drei untersuchten Querprofile des vorderen Deichabschnittes enthalten. Bei Querprofil 3 km 0+170 wird demnach keine Auflastberme erforderlich, da dort die Mächtigkeit der bindigen Deckschicht deutlich größer ist (keine rolligen Anschüttungen vorhanden / erkundet). Um Geländeerhöhungen und -vertiefungen weitgehend zu vermeiden, wird bei Querprofil 3 jedoch auch eine Auflastberme angeordnet. Die Oberkante wird für die weiteren Berechnungen auf Höhe von 27,55 m NN wie bei Querprofil 2 festgelegt. Im Zuge der weiteren Planung ist die tatsächliche Höhenlage unter Berücksichtigung der Erhöhung zwischen ca. km 0+23 bis 0+30 (Pumpwerksgelände) zu ermitteln.

Die Breite der Berme kann für eine erste Abschätzung gemäß dem DWA Merkblatt mit der doppelten Deichhöhe angesetzt werden. In diesem Fall reduziert sich die Ausnutzung am Querprofil 2 in der Bemessungssituation auf  $\mu = 0,66$ , so dass die Breite noch optimiert werden kann. Die Mindestbreite ermittelt sich aus der Breite des Deichverteidigungsweges inkl. Bankett zu 5 m. Die Standsicherheit liegt für diesen Fall bei  $\mu = 0,76$  und ist somit eingehalten. Alle weiteren Ergebnisse sind in Kap. 3.3.1 enthalten.

### **3.2.4 Überprüfung der Oberflächenerosion**

Grundsätzlich ist die Beschaffenheit der Deich- bzw. Böschungsoberfläche in Hinsicht auf das Verhalten bei paralleler Strömung zum Deich zu beurteilen. Fehlstellen in der Vegetation, Einbauten, wie z.B. Pflöcke, Rohreinläufe o.ä. können zur Kolkbildung und somit zu Schäden und Standsicherheitsdefiziten führen. Gleiches gilt auch für unterirdische Bauten von Wühltieren, wie z.B. Kaninchen, Dachs, Fuchs und Bisamratten.



Gemäß DWA-Merkblatt 507-1 [U 4] kann bei einer geschlossenen Grasdecke von einer ausreichenden Erosionssicherheit der wasserseitigen Deichböschungen ausgegangen werden. Aus diesem Grund ist eine geschlossene Grasnarbe ohne störende Einbauten oder Gehölze herzustellen und zu unterhalten, um Verwirbelungen und Kolkbildung zu vermeiden. Büsche und Sträucher sowie große Bäume sind beidseitig von den Deichböschungen zu entfernen. Fehlstellen in der geschlossenen Oberfläche der Grasnarbe und im Deichquerschnitt infolge von Wühltieraktivitäten bzw. nach einem Hochwasserereignis sind zu beseitigen. Eine regelmäßige Kontrolle ist erforderlich.

### **3.2.5 Sicherheit gegen Kolmation**

Bei Kolmation finden Boden- bzw. Partikelumlagerungen infolge von Durchströmung innerhalb von ungleichförmigen Materialien statt. Durch Kolmation setzen sich transportierte Teilchen im vorhandenen Porenraum des Korngerüsts eines nicht kohäsiven Bodens bzw. an der Oberfläche der betreffenden Bodenschicht ab, was zur Verringerung der Durchlässigkeit und einem Ansteigen des Wasserdrucks führen kann.

Gemäß BAW-Merkblatt für den Materialtransport im Boden (MMB) [U 7] bedingt Kolmation einen vorausgehenden Materialtransport und daher einen suffosiven Boden. Die Suffosionssicherheit ist für die bindigen Böden grundsätzlich gegeben (siehe Kap. 3.4.2). Für die rolligen / gemischtkörnigen Anschüttungen konnte die Suffosionssicherheit nicht einheitlich nachgewiesen werden. Der Nachweis der hydraulischen Filterwirksamkeit ist jedoch erbracht (siehe Kap. 3.2.2).

Es kann daher davon ausgegangen werden, dass Kolmationsereignisse nicht großflächig vorkommen, so dass die hydraulischen Eigenschaften der Deiche nicht in einem relevanten Maß beeinflusst werden.

## **3.3 Berechnung der Tragfähigkeit**

### **3.3.1 Böschungsbruch- und Böschungsgrundbruchnachweise**

Für die Gewährleistung der globalen Tragfähigkeit des Deichkörpers ist ein Bruch eines Gleitkörpers auszuschließen. Dabei werden die ungünstigsten Gleitflächen durch den Deichkörper (Böschungsbruch) sowie durch den Deichkörper und das Deichlager (Böschungsgrundbruch) untersucht.



Die Überprüfung der globalen Böschungsbruchsicherheit erfolgt nach dem Lamellenverfahren von BISHOP. Mithilfe des Programmes STABILITY der GGU mbH wird nach DIN 4084:2009 innerhalb eines vorgegebenen Rasterfeldes die kreiszylindrische Gleitfläche mit dem höchsten Ausnutzungsgrad ermittelt, wobei die Gleitkreisradien und die Gleitkreismittelpunkte variiert werden. Die in GGU-2D-SSFLOW ermittelte Porenwasserdruckverteilung wird in der Böschungsbruchberechnung als Porenwasserdrucknetz berücksichtigt.

In Einzelfällen kann es durch die Berücksichtigung des passiven Erdwiderstands zu vergleichsweise tiefgreifenden Gleitfugen mit Gleitkreismittelpunkten nahe oder gar unter der Dammoberfläche kommen, die zwar ein rechnerisch korrektes Resultat darstellen, aber bodenmechanisch unplausibel sind. Da dies nur bei flachen Böschungsneigungen und geringen Ausnutzungsgraden auftritt, wird in solchen Fällen auf den haltenden Ansatz des Erdwiderstands verzichtet.

Die Ergebnisse der Böschungsbruchberechnungen für die zuvor beschriebenen Fälle können in Form des jeweils maximalen Ausnutzungsgrads  $\mu$  den nachfolgenden Tabellen entnommen werden. Ferner sind in den zugehörigen Anlagen die jeweils ungünstigsten Gleitkreise im Querprofil dargestellt.

Bemessungssituation		Maßgebende Böschungsseite	Ausnutzungsgrad $\mu$	Anlagen-Nr.
BS-P	P.1	wasserseitig	0,65	2.1.1
		landseitig	0,89	2.1.2
BS-A	A.1	wasserseitig	0,57	2.1.3
		landseitig	<b>1,68</b>	2.1.4

**Tabelle 3.3.1-1:** Ausnutzungsgrade für die wasser- und landseitige Böschung je nach Bemessungssituation für das Profil km 0+060 ohne Auflastberme

Das Querprofil 2 km 0+060 ist in der Bemessungssituation BS-A.1 auf der Landseite als nicht standsicher zu beurteilen. Zwischen den bindigen Anschüttungen und den Auelehmen ist eine Schicht aus rolligen Auffüllungen vorhanden, die zu einem Auftriebs- und somit Standsicherheitsproblem der landseitigen Böschung führen. Dies gilt ebenso für das untersuchte Querprofil 5 bei km 0+380. Aus diesem Grund wird am Böschungsfuß eine Auflastberme angeordnet, auf der dann auch der Deichverteidigungsweg liegt. Die Bemessung ist in Kap. 3.2.3 enthalten. Im Anschluss wurden die Standsicherheitsberechnungen für das Querprofil 2 für alle Bemessungssituationen mit dieser Auflastberme neu durchgeführt. Die Ergebnisse sind in der nachfolgenden Tabelle dargestellt.



Bemessungssituation		Maßgebende Böschungsseite	Ausnutzungsgrad $\mu$	Anlagen-Nr.
BS-P	P.1	landseitig	0,74	2.1.6
	P.2	wasserseitig	0,96	2.1.7
		landseitig	0,69	2.1.8
BS-A	A.1	landseitig	0,76	2.1.5
	A.2	wasserseitig	0,57	2.1.9
		landseitig	0,66	2.1.10

**Tabelle 3.3.1-2:** Ausnutzungsgrade für die wasser- und landseitige Böschung je nach Bemessungssituation für das **Profil km 0+060 mit Auflastberme**

In den nachfolgenden Tabellen sind die Ergebnisse der Böschungsbruchberechnungen der weiteren Querprofile dargestellt.

Bemessungssituation		Maßgebende Böschungsseite	Ausnutzungsgrad $\mu$	Anlagen-Nr.
BS-P	P.1	wasserseitig	0,73	2.2.1
		landseitig	0,80	2.2.2
	P.2	wasserseitig	0,95	2.2.3
		landseitig	0,77	2.2.4
BS-A	A.1	wasserseitig	0,55	2.2.5
		landseitig	0,76	2.2.6

**Tabelle 3.3.1-3:** Ausnutzungsgrade für die wasser- und landseitige Böschung je nach Bemessungssituation für das **Profil km 0+170 ohne Auflastberme**

Infolge der Auflastberme ergeben sich Änderungen der Berechnungsergebnisse auf der Landseite, so dass in der nachfolgenden Tabelle nur die neuen Ergebnisse für die Landseite enthalten sind. Die Ergebnisse für die Wasserseite sind in der vorherigen Tabelle 3.3.1-3 enthalten.

Bemessungssituation		Maßgebende Böschungsseite	Ausnutzungsgrad $\mu$	Anlagen-Nr.
BS-P	P.1	landseitig	0,69	2.2.7
	P.2	landseitig	0,66	2.2.8
BS-A	A.1	landseitig	0,65	2.2.9
	A.2	landseitig	0,61	2.2.10

**Tabelle 3.3.1-4:** Ausnutzungsgrade für die wasser- und landseitige Böschung je nach Bemessungssituation für das **Profil km 0+170 mit Auflastberme**



Bei km 0+280 wird ebenfalls eine Auflastberme erforderlich, da die Auftriebssicherheit (siehe Kap. 3.3.5) ansonsten nicht nachgewiesen werden kann. Die Berme wird in diesem Bereich über die gesamte Breite der Senke hergestellt, wie auch bereits in der Vorplanung [U 1] enthalten. Die Ermittlung der erforderlichen Mindesthöhe ist in Anlage 3.1 enthalten und ergibt sich zu 1,55 m. Mit diesen Abmessungen wurden die Böschungsbruchberechnungen am QP 5 durchgeführt.

Bemessungssituation		Maßgebende Böschungsseite	Ausnutzungsgrad $\mu$	Anlagen-Nr.
BS-P	P.1	wasserseitig	0,67	2.3.1
		landseitig	0,68	2.3.2
	P.2	wasserseitig	0,72	2.3.3
BS-A	A.1	wasserseitig	0,51	2.3.4
		landseitig	0,62	2.3.5
	A.2	landseitig	0,60	2.3.6

**Tabelle 3.3.1-5:** Ausnutzungsgrade für die wasser- und landseitige Böschung je nach Bemessungssituation für das Profil km 0+380 mit Auflastberme

Bemessungssituation		Maßgebende Böschungsseite	Ausnutzungsgrad $\mu$	Anlagen-Nr.
BS-P	P.1	wasserseitig	0,80	2.4.1
		landseitig	0,85	2.4.2
	P.2	wasserseitig	0,65	2.4.3
		landseitig	0,85	2.4.4
BS-A	A.1	wasserseitig	0,68	2.4.5
		landseitig	0,71	2.4.6

**Tabelle 3.3.1-6:** Ausnutzungsgrade für die wasser- und landseitige Böschung je nach Bemessungssituation für das Profil km 4+000

Bemessungssituation		Maßgebende Böschungsseite	Ausnutzungsgrad $\mu$	Anlagen-Nr.
BS-P	P.1	wasserseitig	0,78	2.5.1
		landseitig	0,81	2.5.2
	P.2	wasserseitig	0,78	2.5.3
		landseitig	0,80	2.5.4
BS-A	A.1	wasserseitig	0,66	2.5.5
		landseitig	0,68	2.5.6

**Tabelle 3.3.1-7:** Ausnutzungsgrade für die wasser- und landseitige Böschung je nach Bemessungssituation für das Profil km 4+150



Den Tabellen ist zu entnehmen, dass die **Standicherheit der Böschungen** für alle Bemessungssituationen unter Ansatz der gewählten Bodenkennwerte, Geometrie und des Baugrundaufbaus sowie für den vorderen Deichabschnitt mit Anordnung einer Auflastberme **nachgewiesen werden kann**.

### 3.3.2 Nachweise des Abschiebens des Deichs

Bei dem Nachweis des Abschiebens des Deichs wird berücksichtigt, dass aufgrund der vollständigen Abdichtung der Deichböschungen mit einer Dichtschürze ein hydrostatischer Wasserdruck auf den Deichkörper wirkt und einen vollständigen Verlust der Lagesicherheit zu Folge haben kann. Die Gleitfuge wird auf Höhe des landseitigen Deichfußes durch den Deichkörper angenommen.

Dabei sind die Bemessungssituationen P.1 und A.1 für die Untersuchung relevant. Es wird nachgewiesen, dass der Bemessungswert des auf den Deich wirkenden horizontalen Wasserdrucks  $W_{H,d}$  geringer als der Bemessungswert des mobilisierten Scherwiderstands  $T_d$  in der Deichaufstandsebene ist:

$$\mu = \frac{W_{H,d}}{T_d} \leq 1$$

Der horizontale Anteil des Wasserdrucks ergibt sich bei einer Wasserspiegelhöhe von  $h$  über der Deichaufstandsebene zu:

$$W_{h,k} = 1/2 \cdot \gamma_w \cdot h^2; \quad W_{h,d} = W_{h,k} \cdot \gamma_G$$

Die haltende Kraft  $T_k$  in der Deichaufstandsfläche ergibt sich aus dem Reibungswinkel  $\varphi'$  des Untergrunds zu:

$$T_k = G \cdot \tan \varphi'; \quad T_d = T_k / \gamma_{R,h}$$

Zur Ermittlung des Deichgewichts  $G$  wird vereinfachend auf der sicheren Seite liegend für den gesamten Deichkörper die Wichte unter Auftrieb mit  $\gamma_k' = 10 \text{ kN/m}^3$  angesetzt. Weiterhin wird der Deichquerschnitt auf der sicheren Seite liegend geometrisch vereinfacht. Gemäß DIN 1054 sind zur Ermittlung des Ausnutzungsgrades beim Gleitnachweis Teilsicherheitsbeiwerte für den Grenzzustand GEO-2 anzuwenden:





Teilsicherheitsbeiwerte	BS-P	BS-A
$\gamma_{R,h}$	1,10	1,10
$\gamma_G$	1,35	1,10

**Tabelle 3.3.2-1:** Teilsicherheitsbeiwerte für den Gleitnachweis gemäß DIN 1054:2010

Die Nachweise erfolgen auf der sicheren Seite liegend ohne Berücksichtigung einer Kohäsion in der Deichaufstandsfläche sowie des vertikalen Anteils des Wasserdrucks. Gemäß [U 2] und [U 3] stehen in der Deichaufstandsebene bindige Anschüttungen bzw. Auelehm an. Der Reibungswinkel ist für beide Schichten gleich und wird entsprechend berücksichtigt.

Die Berechnungsparameter und die ermittelten Ausnutzungsgrade sind in den nachfolgenden Tabellen zusammengefasst.

Bemessungssituation			P.1		
			QP2	QP3	QP5
Sohlhöhe	[+m NN]		20,51	20,56	25,19
Stauhöhe	[+m NN]		28,54	28,54	28,54
Höhe der Krone	[+m NN]		31,74	31,72	32,05
Deichhöhe	$h_D$	[m]	11,23	11,16	6,86
Wasserspiegelhöhe	$h_W$	[m]	8,03	7,98	3,35
Breite A Wasserseite	[m]		39,82	32,73	21,38
Kronenbreite	[m]		6,42	8,73	5,51
Breite C Landseite	[m]		15,75	14,24	22,08
Sohlreibungswinkel	$\varphi'_k$	[°]	25	25	25
Deichgewicht	$G_k$	[kN/m]	3.841	3.595	1.869
Scherwiderstand	$T_d$	[kN/m]	1.628	1.524	792
Horizontaler Wasserdruck	$W_{H,k}$	[kN/m]	322	318	56
	$W_{H,d}$		435	430	76
<b>Ausnutzungsgrad</b>	<b><math>\mu</math></b>		<b>0,27</b>	<b>0,28</b>	<b>0,10</b>

**Tabelle 3.3.2-2:** Ausnutzungsgrade für vollständiges Abschieben des Deichs für die Bemessungssituation BS-P.1 für den Abschnitt km 0+00 bis 0+60



Bemessungssituation			A.1		
			QP2	QP3	QP5
Sohlhöhe	[+m NN]		20,51	20,56	25,19
Stauhöhe	[+m NN]		30,04	30,04	30,04
Höhe der Krone	[+m NN]		31,74	31,72	32,05
Deichhöhe	$h_D$	[m]	11,23	11,16	6,86
Wasserspiegelhöhe	$h_w$	[m]	9,53	9,48	4,85
Breite A Wasserseite	[m]		39,82	32,73	21,38
Kronenbreite	[m]		6,42	8,73	5,51
Breite C Landseite	[m]		15,75	14,24	22,08
Sohlreibungswinkel	$\varphi'_k$	[°]	25	25	25
Deichgewicht	$G_k$	[kN/m]	3.841	3.595	1.869
Scherwiderstand	$T_d$	[kN/m]	1.628	1.524	792
Horizontaler Wasserdruck	$W_{H,k}$	[kN/m]	454	449	118
	$W_{H,d}$		500	494	129
Ausnutzungsgrad	$\mu$		<b>0,31</b>	<b>0,32</b>	<b>0,16</b>

**Tabelle 3.3.2-3:** Ausnutzungsgrade für vollständiges Abschieben des Deichs für die Bemessungssituation BS-A.1 für den Abschnitt km 0+00 bis 0+60

Bemessungssituation			P.1	
			QP3	QP4
Sohlhöhe	[+m NN]		20,69	21,24
Stauhöhe	[+m NN]		27,49	27,49
Höhe der Krone	[+m NN]		32,31	32,25
Deichhöhe	$h_D$	[m]	11,62	11,01
Wasserspiegelhöhe	$h_w$	[m]	6,8	6,25
Breite A Wasserseite	[m]		43,1	61,54
Kronenbreite	[m]		3,62	4,75
Breite C Landseite	[m]		31,04	21,57
Sohlreibungswinkel	$\varphi'_k$	[°]	25	25
Deichgewicht	$G_k$	[kN/m]	4.728	5.098
Scherwiderstand	$T_d$	[kN/m]	2.004	2.161



Bemessungssituation			P.1	
	Horizontaler Wasserdruck	$W_{H,k}$	[kN/m]	231
$W_{H,d}$			312	264
<b>Ausnutzungsgrad</b>	$\mu$		<b>0,16</b>	<b>0,12</b>

**Tabelle 3.3.2-4:** Ausnutzungsgrade für vollständiges Abschieben des Deichs für die Bemessungssituation BS-P.1 für den Abschnitt km 3+50 bis 4+20

Bemessungssituation			A.1	
			QP3	QP4
Sohlhöhe	[+m NN]		20,69	21,24
Stauhöhe	[+m NN]		28,99	28,99
Höhe der Krone	[+m NN]		32,31	32,25
Deichhöhe	$h_D$	[m]	11,62	11,01
Wasserspiegelhöhe	$h_w$	[m]	8,3	7,75
Breite A Wasserseite	[m]		43,1	43,1
Kronenbreite	[m]		3,62	3,62
Breite C Landseite	[m]		31,04	31,04
Sohlrreibungswinkel	$\varphi'_k$	[°]	25	25
Deichgewicht	$G_k$	[kN/m]	4.728	5.098
Scherwiderstand	$T_d$	[kN/m]	2.004	2.161
Horizontaler Wasserdruck	$W_{H,k}$	[kN/m]	344	300
	$W_{H,d}$		379	330
<b>Ausnutzungsgrad</b>	$\mu$		<b>0,19</b>	<b>0,15</b>

**Tabelle 3.3.2-5:** Ausnutzungsgrade für vollständiges Abschieben des Deichs für die Bemessungssituation BS-A.1 für den Abschnitt km 3+50 bis 4+20

Den Tabellen ist zu entnehmen, dass die **Lagesicherheit der untersuchten Deichabschnitte** für die maßgebenden Bemessungssituationen unter Ansatz der gewählten Bodenkennwerte, Geometrien und des Baugrundaufbaus für alle Querprofile **nachgewiesen werden kann**.



### 3.3.3 Lokale Standsicherheit der Böschungen

Anhand der vorliegenden Querprofile [U 1] ist der Deichkörper entweder aus bindigen Anschüttungen aufgebaut bzw. wird eine 0,2 m mächtige Wurzelschicht vorausgesetzt. Somit kann gemäß DWA-Merkblatt 507-1 [U 4] von einer ausreichenden lokalen Standsicherheit (Oberflächenerosion) der Böschungen ausgegangen werden.

Weiterhin sind alle maßgebenden Gleitkreise auch oberflächennah bei den Böschungsbruchrechnungen mit GGU-STABILITY (s. Kapitel 3.3.1) überprüft worden. Der größte auftretende Ausnutzungsgrad ist den Anlagen gemäß den Tabellen 3.3.1-1 bis 3.3.1-3 zu entnehmen.

### 3.3.4 Spreizsicherheit am Böschungsfuß

In der Deichsohle auftretende Schubspannungen müssen von der Scherfestigkeit des Materials in der Sohlfuge aufgenommen werden, um ein Spreizen des Deiches zu verhindern. Strömungskräfte in Richtung der Böschung oder äußere Lasteinwirkungen können die Neigung zum Spreizen erhöhen.

Der Nachweis der Sicherheit gegen Deichspreizen für die Bemessungssituationen BS-P und BS-A ist erbracht, wenn bei der Gegenüberstellung der treibenden und haltenden Einwirkungen gilt:

$$\mu = \frac{E_d}{R_d} \leq 1$$

Gemäß [U 11] ist der Nachweis der Spreizsicherheit dem Grenzzustand GEO-3 nach EC-7 zuzuordnen. Folgende Teilsicherheitsbeiwerte sind für die Berechnungen anzuwenden:

Teilsicherheitsbeiwerte	BS-P	BS-A
$\gamma_G$	1,00	1,00
$\gamma_\varphi$	1,25	1,10

**Tabelle 3.3.4-1:** Teilsicherheitsbeiwerte für den Spreiznachweis gemäß DIN 1054:2010

Der Bemessungswert der Beanspruchung  $E_d$  setzt sich aus dem horizontalen aktiven Erddruck  $E_{ah,k}$  infolge der Beanspruchung aus dem Deicheigengewicht  $E_{agh,k}$  sowie dem horizontalen Was-



serdruck  $W_{h,k}$  unter der Berücksichtigung von Teilsicherheitsbeiwerten entsprechend der jeweiligen Bemessungssituation nach folgender Formel zusammen:

$$E_d = E_{agh,k} * \gamma_G + W_{h,k} * \gamma_G$$

Die Ermittlung des aktiven Erddrucks erfolgt in Abhängigkeit vom aktiven Erddruckbeiwert  $K_{agh}$ . Der Erddruckbeiwert wird unter Berücksichtigung der Annahme Wandreibungswinkel  $\delta_a = 0$  sowie Wandneigung  $\alpha = 0$  und dem Reibungswinkel des Deichkörpers  $\varphi$  [°] aus Kapitel 2.2 bzw. der Auflastberme bestimmt.

Der Bemessungswiderstand  $R_d$  ergibt sich aus der Reibungskraft  $T_k$  in der Deichaufstandsfläche unter der Berücksichtigung des Teilsicherheitsbeiwertes entsprechend der jeweiligen Bemessungssituation:

$$R_d = T_k / \gamma_\varphi$$

Der Nachweis wird lediglich für die landseitige Böschung maßgebend.

Für den Nachweis der Spreizsicherheit wird ein ebenes Berechnungsmodell angenommen. Hieraus und aus den v. g. Formeln ergibt sich, dass lediglich die Böschungsneigung sowie die Bodeneigenschaften des Deichkörpers sowie der Böden in der Gleitfuge maßgebend sind, siehe hierzu auch [U 11].

Die Bruchfuge wird in der Deichaufstandsfläche angenommen, so dass für die Berechnung des Gleitwiderstands der Reibungswinkel des Deichlagers anzusetzen ist. Hier wird der Winkel der Gesamtscherfestigkeit für einen tonigen Schluff mit  $\varphi_s = 30^\circ$  nach [U 10] angenommen. Die Einwirkung aus dem Erddruck ist mit den Bodenkennwerten des Stützkörpers zu ermitteln. Somit ergibt sich für den Nachweis mit Ansatz von Wasserdruck nach [U 11] folgende Formel:

$$\mu = \frac{\tan \beta * \left( k_{agh,Damm} + \frac{\gamma_W}{\gamma_{Damm}} \right) * \gamma_G}{\tan \varphi_{d,Untergrund} / \gamma_\varphi} \leq 1$$

Im vorderen Deichabschnitt sowie bei km 4+00 wird der Deichkörper nicht vollständig durchströmt, so dass für die Wichte der Mittelwert aus Feuchtwichte und Wichte unter Auftrieb angesetzt wird. Bei km 4,15 verläuft die Sickerlinie deutlich unterhalb des Geländes und der Deichkörper wird nicht durchströmt. In diesem Fall kann die Feuchtwichte des Deichkörpers angesetzt werden.



In der nachfolgenden Tabelle sind die ermittelten Ausnutzungsgrade  $\mu$  für die beiden Deichabschnitte von km 0+00 bis 0+60 und km 3+50 bis 4+20 dargestellt.

Deichabschnitt	Querprofil / km		Bemessungssituation BS-P.1	Bemessungssituation BS-A.1
1	2	0+060	0,79	0,69
	3	0+170	0,79	0,69
	5	0+380	0,75	0,66
2	3	4+000	0,88	0,77
	4	4+150	0,85	0,75

**Tabelle 3.3.4-2:** Ermittelte Ausnutzungsgrade der Spreizsicherheit

Die **Spreizsicherheit** ist in allen Bemessungssituation und **an allen Querprofilen nachgewiesen**.

### 3.3.5 Berechnung der Auftriebssicherheit der landseitigen Deckschicht

Infolge einer sich vollständig (stationär) ausbildenden Durchsickerung des Deichkörpers und des Deichlagers kann sich unterhalb der bindigen Deckschicht an der Landseite des Deichs eine Porenwasserdrucklinie ausbilden, die am Deichfuß bis über die Geländeoberfläche reicht. Diese Situation kann zu einem Aufschwimmen der Deckschicht am Deichfuß bzw. am Fuß der Auflastberme führen, wobei der vertikal nach oben wirkende Wasserdruck gegen die Gewichtskraft des anstehenden, gering durchlässigen Bodens der Deckschicht wirkt und gegebenenfalls zu einem Aufbrechen der Deckschicht (**Auftrieb**) führt.

Der Nachweis einer ausreichenden Sicherheit gegenüber Aufschwimmen wird gemäß EC 7 / DIN 1054 im Grenzzustand UPL geführt. Daraus ergeben sich Teilsicherheitsbeiwerte gemäß der Tabelle 3.3.5-1.

Teilsicherheitsbeiwerte	BS-P	BS-A
$\gamma_{G, stb}$	0,95	0,95
$\gamma_{G, dst}$	1,05	1,00

**Tabelle 3.3.5-1:** Teilsicherheitsbeiwerte für den Nachweis gegen Aufschwimmen gemäß DIN 1054:2010



Bei dem Nachweis werden die destabilisierenden vertikalen Einwirkungen (Wasserdruck) den ständigen stabilisierenden vertikalen Einwirkungen (Gewicht der Deckschicht) gegenübergestellt. Gemäß DWA-Merkblatt 507-1 [U 4] ist dabei nachzuweisen:

$$\mu = \frac{\gamma_w * h_2 * \gamma_{G,dst}}{(s * \gamma_1 + d * \gamma_2) * \gamma_{G,stab}} = \frac{A_k * \gamma_{G,dst}}{G_k * \gamma_{G,stab}} \leq 1$$

- mit:
- $h_2$  = Druckhöhe des Wassers unterhalb der luftseitigen Deckschicht [m]
  - $s$  = Schichtmächtigkeit der luftseitigen Deckschicht [m]
  - $\gamma_w$  = Wichte des Wassers [kN/m<sup>3</sup>]
  - $\gamma_1$  = Feuchtwichte der Deckschicht [kN/m<sup>3</sup>]
  - $d$  = Dicke der Anschüttung über der bindigen Deckschicht [m]
  - $\gamma_2$  = Feuchtwichte der Anschüttung [kN/m<sup>3</sup>]
  - $A_k$  = hydrostatische Auftriebskraft [kN/m]
  - $G_k$  = Gewichtskraft [kN/m]

Eine durchgängige oberflächennahe landseitige Deckschicht wurde nicht überall erkundet. Auf der Landseite stehen nach den Ergebnissen der Baugrunderkundung in vier der fünf Querprofilen bindige Anschüttungen mit z.T. unterlagernden und landseitig auslaufenden rolligen Auffüllungen oberhalb der Auelehme und -sande an. Am Querprofil 4 bei km 4,15 ist landseitig keine bindige Deckschicht vorhanden. Es wurden bis in eine Tiefe von etwa 8 m unter GOK die rolligen Anschüttungen erkundet, so dass an dieser Stelle der Nachweis nicht erforderlich ist. Der Nachweis der Auftriebssicherheit wird an den Querprofilen 2, 3 und 5 des vorderen Deichabschnittes und an Querprofil 3 des hinteren Deichabschnittes geführt. Es wird für den vorderen Deichabschnitt dabei sowohl der Nachweis ohne als auch mit Auflastberme dargestellt.

Aus den Strömungsberechnungen kann die maximale Druckhöhe des Sickerwassers unterhalb der Auelehmschicht bzw. den bindigen Auffüllungen am landseitigen Böschungsfuß für die jeweilige Bemessungssituation entnommen werden. Die relevanten Werte sind in der Tabelle 3.3.5-2 zusammengefasst. Aus der Tabelle wird ersichtlich, dass die maximale Druckhöhe für die Bemessungssituation A.1 die Werte aus den Bemessungssituationen für den Ausfall des Dränkörpers (A.2) übersteigt. Damit tritt eine größere Beanspruchung der Deckschicht bei der Berücksichtigung der Bemessungssituationen A.1 auf. Lediglich am Querprofil 5 ist die Druckhöhe in der Bemessungssituation BS-A.2 größer als in der Bemessungssituation BS-A.1.



Deichabschnitt	Querprofil / km	Druckhöhe	Bemessungssituation		
			P.1	A.1	A.2
1	QP 2 km 0+060	h <sub>2</sub> [m]	1,7	2,3	
	QP 3 km 0+170		5,7	7,1	6,4
	QP 5 km 0+380		1,2	1,5	1,7
2	QP 3 km 4+000		8,5	9,0	-

Tabelle 3.3.5-2: Maßgebende Druckhöhe des Sickerwassers

Bemessungssituation		P.1					
		QP2		QP3		QP5	
		ohne Auflast	mit Auflast	ohne Auflast	mit Auflast	ohne Auflast	mit Auflast
A <sub>k</sub>	[kN/m]	17	17	57	57	12	
A <sub>d</sub>		17,85	17,85	59,85	59,85	12,6	
s	[m]	0,6	0,6	5,6	5,6	0,4	
γ <sub>1</sub>	[kN/m <sup>2</sup> ]	19	19	19	19	19	
d	[°]	-	1,75	-	1,75	-	1,55
γ <sub>2</sub>	[kN/m]	-	20	-	20	-	20
G <sub>k</sub>	[kN/m]	11,4	46,4	106,4	141,4	7,6	38,6
G <sub>d</sub>		10,83	44,08	101,08	134,33	7,22	36,67
<b>Ausnutzungsgrad</b>	<b>μ</b>	<b>1,65</b>	<b>0,40</b>	<b>0,59</b>	<b>0,45</b>	<b>1,75</b>	<b>0,34</b>

Tabelle 3.3.5-3: Ausnutzungsgrade für die Auftriebssicherheit der landseitigen Deckschicht in der Bemessungssituation BS-P.1 für den Abschnitt km 0+00 bis km 0+60

Bemessungssituation		A.1				A.2	
		QP2		QP3		QP5	
		ohne Auflast	mit Auflast	ohne Auflast	mit Auflast	ohne Auflast	mit Auflast
A <sub>k</sub>	[kN/m]	23	23	71	71	17	17
A <sub>d</sub>		24,15	24,15	74,55	74,55	17,85	17,85
s	[m]	0,6	0,6	5,6	5,6	0,4	0,4
γ <sub>1</sub>	[kN/m <sup>2</sup> ]	19	19	19	19	19	19
d	[°]	-	1,75	-	1,75	-	1,55





Bemessungssituation		A.1				A.2	
$\gamma_2$	[kN/m]	-	20	-	20	-	20
$G_k$	[kN/m]	11,4	46,4	106,4	141,4	7,6	38,6
$G_d$		11,4	46,4	106,4	141,4	7,6	38,6
<b>Ausnutzungsgrad</b>	<b><math>\mu</math></b>	<b>2,12</b>	<b>0,52</b>	<b>0,70</b>	<b>0,53</b>	<b>2,35</b>	<b>0,46</b>

**Tabelle 3.3.5-4:** Ausnutzungsgrade für die Auftriebssicherheit der landseitigen Deckschicht in der Bemessungssituation BS-A.1 bzw. BS-A.2 für den Abschnitt km 0+00 bis km 0+60

Bemessungssituation		P.1	A.1
		<b>QP3</b>	
$A_k$	[kN/m]	85	90
$A_d$		89,25	94,5
s	[m]	11,5	11,5
$\gamma_1$	[kN/m <sup>2</sup> ]	19	19
d	[°]	-	-
$\gamma_2$	[kN/m]	-	-
$G_k$	[kN/m]	218,5	218,5
$G_d$		207,58	218,5
<b>Ausnutzungsgrad</b>	<b><math>\mu</math></b>	<b>0,43</b>	<b>0,41</b>

**Tabelle 3.3.5-5:** Ausnutzungsgrade für die Auftriebssicherheit der landseitigen Deckschicht in der Bemessungssituation BS.P.1 und BS-A.1 für den Abschnitt km 3+50 bis km 4+20 am Querprofil 3 km 4+000

Der Nachweis der Auftriebssicherheit am Böschungsfuß macht deutlich, dass bei **km 0,060 (QP 2) und km 0,380** ohne Anordnung der Auflastberme die **Deckschicht** im Falle eines Hochwassers rechnerisch **aufbrechen** wird. Mit der Auflastberme ist der Nachweis erbracht.

Der Nachweis der Auftriebssicherheit am Böschungsfuß im **Profil km 4,00** macht deutlich, dass ein **Aufbrechen** der Deckschicht in diesem Deichabschnitt unter den angenommenen Randbedingungen **ausgeschlossen** werden kann.



### 3.3.6 Nachweise gegen hydraulischen Grundbruch

Sofern die bindige, wasserstauende Deckschicht im Deichhinterland fehlt (z.B. im Bereich von Leitungsgräben, etc.), muss nachgewiesen werden, dass für den Bereich des Deichfußes die Sicherheit gegen hydraulischen Grundbruch eingehalten wird. Die Gefahr des Baugrundversagens infolge eines hydraulischen Grundbruchs besteht, wenn im Baugrund die aufwärts gerichtete Strömungskraft größer als das Bodeneigengewicht unter Auftrieb und ggf. weiterer Auflasten ist.

Bei km 0,17 und km 4,00 wurden am Deichfuß die bindige Anschüttung bzw. die Auelehme angetroffen und bei km 4,15 tritt die Sickerlinie nicht an der Geländeoberfläche aus. Am QP2 und QP5 des vorderen Deichabschnittes, entsprechend km 0,06 und km 0,380, ist zwischen der bindigen Anschüttung und den Auelehmen eine rollige Anschüttung vorhanden. Durch die Aufbringung einer Auflastberme wird die Auflast vergrößert und somit die Sicherheit gegen hydraulischen Grundbruch noch mehr erhöht.

Der **Nachweis gegen hydraulischen Grundbruch** ist unter Berücksichtigung der vorgenannten Angaben für die betrachteten Deichabschnitte **nicht zu führen**.

### 3.4 Berechnung der Sicherheit gegen Materialtransport

Infolge von strömendem Wasser kann es innerhalb des Deichkörpers und im Untergrund zu Materialumlagerungen kommen. Eine Kornbewegung findet statt, wenn sowohl die geometrischen als auch die hydraulischen Voraussetzungen erfüllt sind. Das geometrische Kriterium gibt Korndurchmesser bzw. Durchmesser der Porenräume vor, bei denen die Möglichkeit eines Partikeltransports durch die Poren gegeben ist. Dabei ist zu untersuchen, inwiefern eine Bewegung der feinen Bodenteilchen durch die Poren zwischen den groben Partikeln geometrisch möglich ist. Eine Kornbewegung findet jedoch erst statt, wenn gleichzeitig eine ausreichend große hydraulische Einwirkung aus der Wasserströmung auf die Bodenpartikel einwirkt (hydraulisches Kriterium). Die vorhandenen hydraulischen Gradienten ergeben sich aus der Potenzialverteilung und dürfen den abhängig von der Bodenart vorgegebenen kritischen Gradienten nicht überschreiten.

Gemäß Merkblatt DWA 507-1 [U 4] ist für die Überprüfung der **Sicherheit gegen Materialtransport** nach folgenden Erosionsformen zu unterscheiden:



- Kontakterosion
- Suffosion
- Erosionsgrundbruch

### 3.4.1 Kontakterosion

Unter Kontakterosion ist die Verlagerung von Bodenpartikeln an Schichtgrenzen infolge von Durchströmung zu verstehen. Bodenteilchen werden vom feineren Boden in die Poren eines größeren Bodens umgelagert. Dieses Verhalten tritt überwiegend dort auf, wo gleichkörnige feinkörnige Materialien mit geringer Kohäsion an grobpore ebenfalls gleichkörnige Materialien angrenzen. Die Deichkörperbasis unter den bindigen Anschüttungen ist unterschiedlich ausgebildet. Bereichsweise stehen unterhalb der Anschüttungen direkt die gewachsenen Auelehme und -sande an. Örtlich sind an der Basis jedoch auch gemischtkörnige Anschüttungen erkundet worden.

Der Nachweis wird für die ungünstigere Kombination geführt, dies bedeutet am vorderen Deichabschnitt an der Schichtgrenze bindige Anschüttung zu gemischtkörniger / rolliger Anschüttung und am hinteren Deichabschnitt an der Grenze Anschüttung zu Auelehmen und -sanden. Für den Nachweis werden die Kornverteilungskurven aus [U 2] und [U 3] verwendet. Die möglichen Nachweisverfahren bzw. Kriterien sind in den Merkblättern „Materialtransport im Boden“ (MMB) [U 7] und im DWA-Merkblatt 507-1 [U 4][U 6] enthalten:

- Kriterium von Terzaghi:  $d_{15F} / d_{85B} \leq 5$  und  $C_u < 2$
- Kriterium von Cistin / Ziems:  $A_{50\text{vorh.}} = d_{50F} / d_{50B} \leq A_{50\text{zul.}}$
- Kriterium von Witt:  $d_{5F} < \text{bzw. } \geq 0,5 \text{ mm}$  und  $U_F \leq 3$ ,  $3 < U_F \leq 6$  bzw.  $U_F > 6$

Für das Kriterium nach Terzaghi werden die Anwendungsgrenzen nicht eingehalten, da es sich nicht um enggestufte Sande handelt und die Ungleichförmigkeitszahl  $> 2$  bzw. nicht bestimmbar ist.

Das Kriterium von Cistin / Ziems kann nicht angewendet werden, da die Ungleichförmigkeitszahl der Anschüttung bzw. der Auelehme und -sande nicht bestimmt werden kann oder im Bereich  $> 18$  bzw. 20 und somit die Bestimmung von  $A_{50\text{zul.}}$  nicht möglich ist.



### Deichabschnitt km 0+00 bis 0+60:

Nach Witt ergibt sich folgendes Verhältnis:

→  $d_{5F} < 0,5 \text{ mm}$  und  $3 < U_F \leq 6$

max.  $d_{10F} = 0,1 \text{ mm}$ , min.  $d_{95B} = 0,12 \text{ mm}$  → max.  $d_{10F} / \text{min. } 95_B = 0,1 / 0,12 = 0,83 \leq 2,5$

→ **Kriterium erfüllt**

### Deichabschnitt km 3+60 bis 4+20:

Nach Witt ergibt sich folgendes Verhältnis:

→  $d_{5F} < 0,5 \text{ mm}$  und  $U_F > 6$

max.  $d_{5F} = 0,06 \text{ mm}$ , min.  $d_{95B} = 0,4 \text{ mm}$  → max.  $d_{5F} / \text{min. } 95_B = 0,06 / 0,4 = 0,15 \leq 2,5$

→ **Kriterium erfüllt**

Die **Sicherheit gegen Kontakterosion** ist damit für die ungünstigere Kombination **nachgewiesen**.

### 3.4.2 Suffosion

Die Suffosion bzw. innere Erosion beschreibt die Boden- bzw. Partikelumlagerung infolge von Durchströmung innerhalb von ungleichförmigen Materialien. Dabei werden die Feinanteile eines Bodens aufgrund der Sickerströmung innerhalb des Porenraums der Bodenschicht umgelagert. Das Volumen des Bodens bleibt zunächst unverändert, da sich die größeren Bestandteile anfänglich gegenseitig stützen (Grobkorngerüst). Die Folge dieser Materialumlagerungen kann eine zunehmende lokale Durchlässigkeit sein, die eine Veränderung der Sickerlinie und der hydraulischen Bedingungen bewirkt und letztlich die Standsicherheit gefährden kann.

Die in der Deichaufstandsebene anstehenden bindigen Anschüttungen bzw. die Auelehme sind als kohäsive Böden gemäß MMB [U 7] als suffosionssicher zu bezeichnen. Bei den nichtbindigen Böden (rollige / gemischtkörnige Anschüttung, Terrassensande und -kiese) ist die Suffosionssicherheit zu überprüfen.

Zunächst wird für die Körnungslinien der Proben das vereinfachte Verfahren angewendet. Hierbei gelten Böden mit einer Ungleichförmigkeitszahl  $C_u < 8$  und mit einer stetigen Körnungslinie als suffosionssicher. Folgende Proben konnten über das vereinfachte Verfahren nachgewiesen werden.



Bohrung	Tiefe [m]	Schicht-Bezeichnung	Bodenart	Ungleichförmigkeitszahl $C_u$ [-]
BK 3	6,0 - 7,0	gemischtkörnige Anschüttung	mS, fs', gs', u', g'	4,9
BK 1	14,0 - 15,0	Terrassensand und -kies	G, s'	7,6

**Tabelle 3.4.2-1:** Nachweis der Suffosionssicherheit nach dem vereinfachten Verfahren

Die Bodenproben, welche nicht die Randbedingungen des vereinfachten Verfahrens erfüllen, werden gemäß MMB [U 7] mit den Kriterien nach Kenney & Lau oder Burenkova überprüft. Nicht alle Bodenproben konnten nach MMB überprüft werden, da teilweise die Anwendungsgrenzen für die einzelnen Verfahren nicht eingehalten sind. Die Ergebnisse der Bodenproben, die geprüft werden konnten, sind in der Anlage 4 beigelegt. Die untersuchten Proben der gemischtkörnigen / rolligen Anschüttungen sind z.T. nicht suffosionssicher einzustufen, dies gilt insbesondere für die Anschüttungen im hinteren Deichabschnitt von km 3+50 bis 4+20. Es ist daher für den hinteren Deichabschnitt der Nachweis der hydraulischen Filterwirksamkeit erforderlich (siehe Kap. 3.2.2).

Die Terrassensande und -kiese stehen erst unterhalb der Auelehme und -sande und demnach mit entsprechender Überdeckung an. Aufgrund der Tiefenlage ist in dieser Schicht nicht mit einer Umlagerung infolge Durchströmung auszugehen, so dass auf den Nachweis der Suffosionssicherheit für diese Böden verzichtet werden kann.

### 3.4.3 Erosionsgrundbruch

Erosionsgrundbruch bzw. rückschreitende Erosion (Piping) entsteht nach [U 4], wenn durch den Austritt von Sickerwasser an einer Erosionsstelle an der landseitigen Böschung oder dem Hinterland Bodenteilchen ausgetragen werden und sich hierdurch ein röhrenförmiger Erosionskanal in Richtung Wasserseite ausbildet. Voraussetzung hierfür ist nach MMB [U 7] der Abtransport der bewegten Bodenteilchen zu einer freien Oberfläche.

Sofern die Sickerlinie auf der Landseite unterhalb des Geländes liegt, ist der Nachweis nicht erforderlich. Bei Querprofil 5 km 0+380 ist dies infolge der Anordnung einer Auflastberme sowie am Querprofil 3 km 4+00 und Querprofil 4 km 4+15 auch ohne die Auflastberme der Fall. Der Nachweis gegen Erosionsgrundbruch ist somit nur am Querprofil 2 km 0+06 und Querprofil 3 km 0+17 zu führen.



Der Nachweis erfolgt mit dem Kriterium nach CHUGAEV [U 4], das auch für den Nachweis kritischer Gradienten in einem weitgehend homogenen Deichuntergrund angewendet werden kann. Hier-nach wird der kritische Gradient  $i_{krit}$  mit dem mittleren vorhandenen hydraulischen Gradienten  $i_{vorh}$  unterhalb des Deichkörpers verglichen.

Demnach ist die Sicherheit gegen Piping nachgewiesen, wenn gilt:

$$\mu = \frac{(i_{vorh} \cdot \gamma_{H,vorh})}{\left(\frac{i_{krit}}{\gamma_{H,krit}}\right)} \leq 1,0$$

Die Teilsicherheitsbeiwerte für die Nachweise einer ausreichenden Sicherheit gegenüber Erosionsgrundbruch nach [U 4] sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst.

Teilsicherheitsbeiwerte	BS-P	BS-A
$\gamma_{H,krit}$	1,10	1,10
$\gamma_{H,vorh}$	1,35	1,10

**Tabelle 3.4.3-1:** Teilsicherheitsbeiwerte für den Erosionsgrundbruchnachweis gemäß [U 4]

In [U 4] werden kritische Kontrollgradienten nach CHUGAEV in Abhängigkeit der Bodenart angegeben. Bei den in [U 2] und [U 3] beschriebenen Böden handelt es sich im Untergrund um feinsandige, schwach tonige Schluffe in weicher bis steifer Konsistenz sowie um schluffige Feinsande. Der geringste in [U 4] angegebene Wert gilt für Feinsand und liegt bei  $i_{krit} = 0,12$ . Da die Gefahr von Piping in erster Linie im feinsandigen Boden besteht, wird dieser Wert auf der sicheren Seite liegend für die Berechnung gewählt.

Für den vorhandenen Gradienten wird gemäß [U 4] der mittlere Gradient eingesetzt

$$i_{vorh} = \frac{\Delta h}{\Delta l}$$

Die Potentialdifferenz  $\Delta h$  wird dabei für jede Bemessungssituation ermittelt. Die Bemessungssituationen P.1 und P.2 stimmen aufgrund der gleichen Stauhöhe überein. Aus diesem Grund wird aufgrund der ungünstigeren Teilsicherheitsbeiwerte lediglich die Bemessungssituation P.1 neben der Bemessungssituation A.1 untersucht.



Die Ausnutzungsgrade  $\mu$  der Nachweise gegen Erosionsgrundbruch sind nach Bemessungssituation den Tabellen 3.4.3-2 bis 3.4.3-5 zu entnehmen.

	Bemessungssituation			
	P.1		A.1	
	QP2	QP3	QP2	QP3
$i_{vorh}$	0,08	0,09	0,16	0,15
$i_{vorh} \cdot \gamma_{H,vorh}$	0,102	0,116	0,174	0,166
$\frac{i_{krit}}{\gamma_{H,krit}}$	0,109	0,109	0,109	0,109
<b><math>\mu</math></b>	<b>0,93</b>	<b>1,06</b>	<b>1,60</b>	<b>1,52</b>

**Tabelle 3.4.3-2:** Ausnutzungsgrade der Erosionsgrundbruchnachweise für Deichabschnitt km 0+00 bis 0+60

Es zeigt sich, dass für  $i_{krit} = 0,12$  der Nachweis gegen Erosionsgrundbruch in drei von vier Nachweisen **nicht** gegeben ist. Im Bereich des landseitigen Böschungsfußes stehen bereichsweise zwischen den lehmigen Anschüttungen und den gewachsenen Auelehmen und -sandem gemischt-körnige bis rollige Anschüttungen an. Für die lehmigen bzw. rolligen Anschüttungen liegt  $i_{krit}$  nach [U 4] bei 0,20 - 0,26 bzw. 0,25 bis 0,33. Aufgrund dessen ist für den vorderen Deichabschnitt  $i_{krit}$  nicht mit dem ungünstigsten Wert von 0,12 anzusetzen, sondern es ist  $i_{krit} = 0,20$  zu verwenden. Bei diesem Ansatz ergeben sich die in der nachfolgenden Tabelle angegebenen Ausnutzungsgrade. **Der Nachweis gegen Erosionsgrundbruch ist für diesen Ansatz erfüllt.**

	Bemessungssituation			
	P.1		A.1	
	QP2	QP3	QP2	QP3
$i_{vorh}$	0,08	0,05	0,16	0,08
$i_{vorh} \cdot \gamma_{H,vorh}$	0,102	0,070	0,174	0,084
$\frac{i_{krit}}{\gamma_{H,krit}}$	0,182	0,182	0,182	0,182
<b><math>\mu</math></b>	<b>0,56</b>	<b>0,64</b>	<b>0,56</b>	<b>0,91</b>

**Tabelle 3.4.3-2:** Ausnutzungsgrade der Erosionsgrundbruchnachweise für Deichabschnitt km 0+00 bis 0+60



Den Tabellen 3.4.3-2 und 3.4.3-3 ist zu entnehmen, dass der **Nachweis gegen Erosionsgrundbruch mit  $i_{krit} = 0,20$  für alle Querprofile erbracht** werden kann.

### **3.5 Berechnung der Gebrauchstauglichkeit**

#### **3.5.1 Setzungen / Verformungen / Rissbildung**

Die Untersuchung der Gebrauchstauglichkeit umfasst i.d.R. die Abschätzung von auftretenden Setzungen, Verformungen und Rissbildung. Für Deichzustandsuntersuchungen sind diese Untersuchungen i.d.R. nicht maßgebend, da bei ausreichend langer Standzeit davon auszugehen ist, dass die Setzungen, Verformungen und Rissbildungen bereits abgeklungen sind. Darüber hinaus sind keine Veränderungen an den Deichen selbst vorgesehen. Es werden lediglich am landseitigen Deichfuß Arbeiten ausgeführt, um die Auflastbermen und den Deichverteidigungsweg herzustellen. Hieraus resultieren keine maßgeblichen zusätzlichen Belastungen, die zu Setzungen des Deichkörpers führen würden.

## **4. ABSCHLIESSENDE HINWEISE**

Die im vorliegenden Bericht durchgeführten geotechnischen und hydraulischen Nachweise können mit den getroffenen Annahmen für alle fünf betrachteten Querprofile erbracht werden. Bei drei der fünf Querprofile wird die Anordnung einer Auflastberme am landseitigen Böschungsfuß erforderlich. Weiterhin sind folgende Einschränkungen zu beachten:

- Die rolligen / gemischtkörnigen Auffüllungen sind ggf. suffosiv.
- Der Nachweis der hydraulischen Filterwirksamkeit ist dennoch gegeben.
- Der Erosionsgrundbruch ist für  $i_{krit} > 0,2$  erbracht.
- Das Material für die Auflastberme / den Deichverteidigungsweg ist unter Berücksichtigung des Nachweises der Sicherheit gegen Materialtransport zu wählen.

Während der Bauausführung sind die Erdarbeiten geotechnisch zu überwachen und Verdichtungskontrollen an der Auflastberme in Form einer Eigenüberwachung und durch Kontrollprüfungen vorzunehmen. In diesem Zusammenhang wird empfohlen, vorab einen Qualitätssicherungsplan (QS-Plan) mit der Festlegung der Einbau- und Überwachungskriterien zu erstellen.





Die durchgeführten Berechnungen beruhen auf der Grundlage von vorliegenden älteren Baugrunderkundungen. Eine Baugrunderkundung ist naturgemäß eine stichprobenartige Bestandsaufnahme, die zwischen den Aufschlüssen Ergebnisse interpoliert. Abweichungen in gewissem Umfang sind somit nicht gänzlich auszuschließen. Im Falle der angetroffenen von den Berechnungsannahmen abweichenden Bodenverhältnisse ist die Dr. Spang GmbH zu benachrichtigen und die Nachweisführung ggf. anzupassen.

Sollten geotechnische Fragen auftreten, die im vorliegenden Gutachten nicht bzw. nicht ausreichend behandelt wurden, oder sollten sich Abweichungen bzw. Abänderungen in den Planungen bzw. Annahmen ergeben, die diesem Gutachten zugrunde gelegt wurden, so ist die Dr. Spang GmbH vom Auftraggeber zu informieren und zu einer ergänzenden Stellungnahme aufzufordern.

Zur Beantwortung weiterer Fragen stehen wir Ihnen gerne jederzeit zur Verfügung.

Dipl.-Ing. Christian Spang  
(Geschäftsführer)

i.V.

M. Sc. Sabrina Denne  
(Teamleiterin)

- Verteiler:**
- Emschergenossenschaft, Frau Weßler, Essen, 2 x, davon 1 x vorab per Mail an <wessler.ebru@eglv.de>
  - Dr. Spang GmbH, Witten, 1 x