



Gesellschaft für Grundbau
und Umwelttechnik mbH

GGU mbH • In den Ungleichen 3 • 39171 Osterweddingen

Ingenieurgesellschaft
Prof. Dr.-Ing. E. Macke mbH
Herr Schlegel
Mariannenstraße 14
06844 Dessau-Roßlau

Magdeburg

Telefon +49 (0)39205/4538-0
Telefax +49 (0)39205/4538-11
www.ggu.de
post-md@ggu.de

Baugrund
Grundwasser
Umwelttechnik /Altlasten
Damm- und Deichbau
Straßen- und Erdbau
Spezialtiefbau
Deponiebau
Kunststofftechnik
Software-Entwicklung

Ringschlussdeich Gruna
Tragsicherheits- und Setzungsnachweise
- Ergebnisbericht -

11.07.2013 Baugrunderkundung
Feldmesstechnik
Prüflabore für Boden
Prüflabor für Kunststoff
Inspektionsstelle

Braunschweig
Magdeburg
Öhringen
Schwerin

Bericht: 3572.1 / 13

Verteiler: Ing.-ges. Prof. Dr.-Ing. E. Macke mbH, Dessau

3-fach

Inhalt: (siehe Verzeichnis nächste Seite)

Ausfertigung:

Beratende Ingenieure VBI,
BDB, DWA, DGGT, ITVA, BWK
Sachverständige für
Erd- und Grundbau
Vereidigte Sachverständige
Amtsgericht Braunschweig
HRB 9354
Geschäftsführer:
Dr.-Ing. Joachim Schmidt
Prof. Dr.-Ing. Johann Buß
Dr.-Ing., Dipl.-Wirtsch.-Ing.
Peter Grubert, M.Sc.



Inhalt:

1. Vorbemerkungen	3
2. Grundlagen	4
2.1 Nachweisführung	4
2.2 Querprofil	5
2.3 Lastfälle / Einwirkungskombinationen	6
2.4 Einwirkungen / Lasten	6
2.5 Bodenkennwerte	8
3. Untergrundhydraulische Berechnungen	9
3.1 Allgemeines	9
3.2 Systeme, Randbedingungen	10
3.3 Ergebnisse	12
4. Tragsicherheitsnachweise	13
4.1 Allgemeine (globale) Tragsicherheit	13
4.2 Lokale Tragsicherheit	15
4.3 Lokale Sicherheit am Dammfuß (Spreizsicherheit)	17
4.4 Tragsicherheit von Böschungsdichtungen	18
4.5 Auftriebssicherheit und hydraulischer Grundbruch	18
4.6 Sicherheit gegen Materialtransport	20
5. Setzungsnachweise	25
6. Anlagen	
Anlage 1	Tragsicherheitsnachweise Querprofil 21
Anlage 2	Tragsicherheitsnachweise Querprofil 115
Anlage 3	Setzungsnachweise Deich-km 0+300 bis 0+620
Anlage 4	Setzungsnachweise Deich-km 0+750 bis 1+000

1. Vorbemerkungen

Die Landestalsperrenverwaltung (LTV) plant bei Gruna die Errichtung eines Ringschlussdeiches eines gesteuerten Polders. Die erforderlichen Planungsleistungen werden durch die Ingenieurgesellschaft Prof. Dr.-Ing. E. Macke mbH, Dessau (nachfolgend Planer) erbracht. Im Zuge der Planungen waren Tragsicherheits- sowie Setzungsnachweise aufzustellen. Die GGU mbH wurde vom Planer mit den erforderlichen Leistungen beauftragt.

Im vorliegenden Bericht werden die Ergebnisse der Tragsicherheits- sowie Setzungsberechnungen für den Ringschlussdeich Gruna mitgeteilt und es wird zur Standsicherheit Stellung genommen. Folgende Unterlagen standen für die Bearbeitung zur Verfügung:

- [U1] Geotechnischer Bericht; Vereinigte Mulde, rechts, Neubau östlicher Ringschlussdeich Gruna, Deich-km 0+000 – 1+370; Bericht 12+058 der GGL – Geophysik und Geotechnik Leipzig GmbH, Leipzig; 20.09.2012
- [U2] Vereinigte Mulde, rechts, Neubau östlicher Ringschlussdeich Gruna; Auszüge aus der Planung; Ingenieurgesellschaft Prof. Dr.-Ing. E. Macke mbH, Dessau; Stand April 2012

2. Grundlagen

2.1 Nachweisführung

Im vorliegenden Fall ist die Tragsicherheit von Deichstrecken im Hochwasserfall zu untersuchen. Dazu erfolgen auf der Grundlage der DIN 19712:1997-11 Nachweise für:

- Allgemeine (globale) Standsicherheit der land- und wasserseitigen Böschungen gegen Böschungsbruch
- Lokale Standsicherheit im Bereich der land- und wasserseitigen Böschungen
- Lokale Standsicherheit am Böschungsfuß (Spreizsicherheit)
- Standsicherheit von Böschungsdichtungen bei Wasserdruck vom Deichkörper her
- Auftriebssicherheit bzw. Sicherheit gegen hydraulischen Grundbruch im Bereich des luftseitigen Deichfußes
- Nachweise zur inneren Erosionssicherheit (Materialtransportnachweise):
 - Suffosions- und Erosionsstabilität
 - Sicherheit gegen Kontakterosion (mechanische Filterwirksamkeit)
 - Sicherheit gegen Erosionsgrundbruch sowie
 - Sicherheit gegen Fugenerosion

Die Nachweise erfolgen durch erdstatische Berechnungen unter Berücksichtigung aller maßgebenden Einwirkungskombinationen und Widerstände für die entsprechenden Bemessungssituationen (früher: Lastfälle) an ausgewählten, repräsentativen Querprofilen. Einwirkungen aus Porenwasserdrücken sind bei Deichen von großer Bedeutung. Daher werden diese Einwirkungen über geeignete stationäre bzw. instationäre untergrundhydraulische Berechnungen gesondert ermittelt.

Für die Nachweise der landseitigen Böschungen wird ungünstig und damit auf der sicheren Seite liegend von einer stationären Durchströmung mit vollständiger Ausbildung der Sickerlinie ausgegangen. Für die Nachweise der wasserseitigen Böschungen im Lastfall schnell fallender Wasserspiegel können durch instationäre Berechnungen zur Bestimmung der Porenwasserdruckverteilungen erfolgen. Alternativ kann eine böschungsnahe Porenwasserdrucklinie konstruiert werden. Die erhaltenen Porenwasserdruckverteilungen bilden sodann die Grundlage für die nachfolgenden erdstatischen Berechnungen.

2.2 Querprofil

Für die Berechnungen wurde mit [U2] ein Regelprofil übergeben, welches wie folgt beschrieben werden kann:

- grobkörniger Stützkörper mit wasserseitiger Dichtung und Deckschicht zum Schutz der Dichtung
- landseitige Berme mit Dränprisma zur Fassung von Dränwasser
- Breite der Deichkrone $b = 3,00 \text{ m}$
- Breite der Berme $b = 4,00 \text{ m}$
- wasserseitige Böschungsneigung $= 1:3$
- landseitige Böschungsneigung $= 1:3$

Dieses Regelprofil wurde mit den entsprechend [U1] anstehenden Baugrundverhältnissen wie folgt verknüpft:

Querprofil 21 bei Deich-km 0+170

Im Querprofil 21 wird der geplante Deichkörper auf einer durchgehenden Deckschicht aus Auelehm aufgebaut. Im Liegenden stehen Muldeschotter an. Fehlstellen in der Deckschicht sind nicht nachgewiesen. Einer Einströmung in den Untergrund erfolgt somit nur im Bett der Mulde.

Das Querprofil 21 ist somit repräsentativ für Bereiche mit durchgehender Auelehmdeckschicht.

Querprofil 115 bei Deich-km 0+910

Im Querprofil 115 wird der geplante Deichkörper auf einer deutlich ausgedünnten Deckschicht aus Auelehm aufgebaut. Im Liegenden stehen Muldeschotter an. Fehlstellen in der Deckschicht wurden im Hinterland nachgewiesen. Im Vorland sind Fehlstellen nicht auszuschließen. Einer Einströmung in den Untergrund erfolgt somit im Bett der Mulde und auch über Fehlstellen im Vorland.

Das Querprofil 115 ist somit repräsentativ für Bereiche mit gestörter Auelehmdeckschicht.

2.3 Lastfälle / Einwirkungskombinationen

Für die Berechnungen werden nach [U3] folgende Lastfälle betrachtet:

Lastfall	Bemessungssituation	Wasserstand Wasserseite	Wasserstand Landseite
Lastfall LF 2.1	BS-T	BHQ = HQ100 Mulde	Höhe landseitiger Deichfuß
Lastfall LF 2.2	BS-T	ausgehend vom BHQ schnell fallender Wasser- spiegel bis Deichfuß	Höhe landseitiger Deich- fuß
Lastfall LF 3.1	BS-A	bordvoller Einstau	Höhe landseitiger Deich- fuß
Lastfall LF 3.2	BS-A	ausgehend von Bordvoll schnell fallender Wasser- spiegel bis Deichfuß	Höhe landseitiger Deich- fuß

Tabelle 1: Lastfälle nach [U3]

2.4 Einwirkungen / Lasten

Wasserstände

Bei den Berechnungen wurden die Bemessungswasserstände wie folgt angesetzt:

Querprofil	Bemessungswasserstände [mNHN]	
	Lastfall LF 2.1	Lastfall LF 3.1
QP 21 bei Deich-km 0+177	94,88	95,38
QP 115 bei Deich-km 0+910	95,07	95,57

Tabelle 2: Wasserstände

Verkehrslasten

Verkehrslasten werden wie folgt angesetzt:

- | | |
|--------------------------|--|
| Lastfall LF 2.1 und 2.2: | Verkehrslast $p_v = 10,0 \text{ kN/m}^2$ auf der Deichkrone |
| | Verkehrslast $p_v = 33,3 \text{ kN/m}^2$ auf dem Deichverteidigungsweg |
| Lastfall LF 3.1 und 3.2: | Verkehrslast $p_v = 33,3 \text{ kN/m}^2$ auf dem Deichverteidigungsweg |

Verkehrslasten werden gemäß der Definition im Regelwerk nur in Ansatz gebracht, wenn diese antreibend, also ungünstig, wirken. Die für die Tragsicherheitsnachweise verwendete Software GGU-STABILITY berücksichtigt dieses programmintern.

Porenwasserdrücke

Für die Berechnungen der Lastfälle LF 2.1 und LF 3.1 ist die Böschung Landseite maßgebend. Hierfür wurden in Anlehnung an die DIN 19712 auf diese Böschung gerichtete stationäre Sickerströmungen mit einem Porenwasserdrucknetz unterstellt. Die dabei resultierenden Porenwasserdrücke werden als Einwirkungen in den erdstatischen Berechnungen verwendet.

Für die Berechnungen der Lastfälle LF 2.2 und LF 3.2 ist die Böschung Wasserseite maßgebend. Für diese Berechnungen werden infolge Wasserspiegelabsenkung auf diese Böschung gerichtete instationäre Sickerströmungen unterstellt. Die dabei resultierenden Porenwasserdrücke werden als Einwirkungen (für den maßgebenden Zeitpunkt) in den erdstatischen Berechnungen verwendet.

2.5 Bodenkennwerte

Die Bodenkennwerte wurden für den vorhandenen Deichkörper und den gewachsenen Untergrund aus [U1] entnommen. Die Bodenkennwerte für die neu zu erstellen Bauteile des geplanten Hochwasserschutzdeiches wurden durch die GGU auf der Grundlage von Erfahrungswerten festgelegt. Diese sind sodann bei weiteren Planungen als Mindestwerte zugrunde zu legen. Folgende charakteristische Kennwerte sind in die Berechnungen eingegangen:

Schicht	Wichte		Scherfestigkeit		Durchlässigkeit
	γ_k [kN/m ³]	γ'_k [kN/m ³]	ϕ'_k [°]	c'_k [kN/m ²]	k_f [m/s]
geplanter Deichkörper					
Mutterboden	17,5	7,5	25,0	2,0	$1 \cdot 10^{-5}$
Deckschicht	21,0	11,0	28,0	2,0	$5 \cdot 10^{-6}$
Dichtungsschicht	21,0	11,1	25,0	5,0	$1 \cdot 10^{-8}$
Stützkörper	19,0	11,0	32,5	0,0	$1 \cdot 10^{-5}$
Deichverteidigungsweg	21,0	13,0	37,5	0,0	$1 \cdot 10^{-4}$
Dränprisma	18,0	10,0	40,0	0,0	$1 \cdot 10^{-3}$
Untergrund nach [U2]					
Schicht S3 – Auelehm	19,0	9,0	25,0	2,0	$5 \cdot 10^{-7}$
Schicht S3a – Auelehm, stark bindig	18,5	8,5	22,5	2,0	$6 \cdot 10^{-9}$
Schicht S4 – Muldeschotter (Sand)	19,0	11,0	32,5	0,0	$7 \cdot 10^{-4}$
Schicht S5 – Muldeschotter (Kies)	19,0	11,0	32,5	0,0	$4 \cdot 10^{-3}$

Tabelle 3: Charakteristische Bodenkennwerte Baugrund und Deich

Die Kohäsion bindiger Böden wurde entsprechend der durch das Baugrundgutachten dokumentierten Werte angesetzt. Eine Abminderung der Kohäsion aufgrund von Durchsickerung und damit verbundenem Konsistenzwechsel erfolgte nicht, da diese sehr ungünstige Einschätzung durch vorliegende Erfahrungen nicht bestätigt werden kann.

Die Konsistenz feinkörniger und gemischtkörniger Böden kann bei einer Durchsickerung schon aufgrund der Auflast durch Eigengewicht nicht verändert werden. Demzufolge kann es in diesen Böden auch keine Abnahme der Kohäsion geben. Es könnte höchstens ein Konsistenzwechsel (Aufweichung) in oberflächennahen Bereichen im Bereich des Sickerwasseraustritts (hier fehlt die Auflast durch Eigengewicht) stattfinden. Hier allerdings würde sodann Wurzelkohäsion (nach MSD kann hier bis zu 7 kN/m^2 angesetzt werden) wirken. Der gewählte Ansatz der Kohäsion gemäß [U1] mit $c = 5 \text{ kN/m}^2$ liegt somit auf der sicheren Seite.

3. Untergrundhydraulische Berechnungen

3.1 Allgemeines

Die DIN 19700, Stauanlagen, fordert den Nachweis der statischen, der hydraulischen und der Rissicherheit. Für Deiche sind die statische und die hydraulische Sicherheit maßgebend.

Die DIN 19712 fordert den Nachweis der allgemeinen Standsicherheit der Böschungen, der örtlichen Sicherheit, z. B. bei Sickerwasseraustritten an der Böschung, der Auftriebssicherheit, der hydraulischen Grundbruchsicherheit und der Suffosionssicherheit.

Für alle diese Nachweise ist die Kenntnis der Durchströmung des Deichkörpers und der Unterströmung im Deichuntergrund wesentlich. Aus den Kenntnissen der aus Durch- und Unterströmung hervorgerufenen Einwirkungen können direkt die hydraulische Sicherheit (sämtliche Arten von Erdstoffverformungen) und indirekt die Ansätze (Porenwasserdruck) für die statische Sicherheit (allgemeine und örtliche Sicherheit) abgeleitet werden.

Die Grundwasserströmungen im Damm und im Deichuntergrund gehorchen der LAPLACE'SCHEN Differentialgleichung und sind somit potentialtheoretisch zu behandeln. Eine geschlossene analytische Lösung der Differentialgleichung existiert nur für wenige Sonderfälle. Praktische Anwendungen erfordern daher eine numerische Lösung des untergrundhydraulischen Problems.

Als flexibles numerisches Lösungsverfahren hat sich die Finite-Elemente-Methode (FEM) durchgesetzt. Dabei wird das System in viele kleine (finite) Dreieckselemente unterteilt, für die ein einfacher linearer Lösungsansatz gewählt wird. Die tatsächliche Lösung wird dann durch mosaikartiges Zusammensetzen der Teillösungen erhalten. Die Berechnungen mit der FEM erfolgten mit dem in der GGU entwickelten Programmsystem GGU-Ss-FLOW2D, Version 10.00 (Stand 16.10.2011) an vertikal-ebenen Schnitten für den stationären Zustand.

3.2 Systeme, Randbedingungen

Die zu betrachtenden Systeme wurden aus den vorliegenden Planunterlagen sowie den Ergebnissen der Untersuchungen modelliert. Sie sind in den beiliegenden Berechnungsgrafiken dargestellt. Zusammenfassend können die Systeme und die allgemeinen Randbedingungen wie folgt beschrieben werden:

- Geometrie gemäß Planung aus [U2]
- Wasserseitiger Systemrand, Geländeoberkante und Deichböschung Wasserseite im Einstaufall:
Potential und entsprechender Wasserstand oberhalb Gelände entspricht Bemessungswasserstand BHW oder bordvollem Wasserstand (stationär)
- Wasserseitiger Systemrand, Geländeoberkante und Deichböschung Wasserseite bei schnellem Absink:
Ansatz einer Porenwasserdrucklinie in Höhe der Oberkante der wasserseitigen Böschung
- Landseitiger Systemrand Geländeoberkante:
Der landseitige Systemrand Geländeoberkante erhält in der Regel eine Potentialrandbedingung auf GOK. Damit wird das Potentialfeld hier auf diese Höhe begrenzt, was im Hinblick auf die Standsicherheit einen auf der sicheren Seite liegenden An-

satz bedeutet. Das impliziert, dass dieser Systemrand offen ist, was potentialtheoretisch korrekt ist.

Von dieser Regel gibt es folgende Ausnahmen:

- a) Es existiert ein landseitiger Polder mit Wasserständen über GOK
- b) Es existieren landseitige Potentialentlastungen, mit denen Potentiale unter oder bei GOK sichergestellt sind

Beide Ausnahmen liegen nicht vor.

- Landseitiger Systemrand Untergrund:

Der landseitige Systemrand Untergrund sollte in der Regel bis zu einem hydrogeologischen Rand des untergrundhydraulischen Systems (Graben, Seeufer, Vorfluter, etc.) geführt werden. Dort könnte sodann eine Potentialrandbedingung angesetzt werden, welche die Höhe der dort gegebenen natürlichen Randbedingung (Wasserstand) repräsentiert. Das impliziert natürlich, dass dieser Systemrand offen ist, was potentialtheoretisch korrekt ist. Diese Fälle wurden berücksichtigt.

Wenn, wie im vorliegenden Fall aber derartige natürliche Ränder nicht in modelltechnisch sinnvoller Nähe liegen, genügt es, in ausreichender Entfernung vom Deich einen Systemrand mit einer Potentialrandbedingung anzusetzen. Das impliziert, dass dieser Systemrand offen ist, was potentialtheoretisch korrekt ist.

Von dieser Regel gibt es folgende Ausnahme:

Der landseitige Systemrand Untergrund wird durch einen hydrogeologisch hemmenden Rand (z.B. aufsteigender Grundwasserstauer, Rand des Urstromtals etc.) gebildet. Nur in diesem Fall wäre dieser Systemrand undurchlässig zu modellieren (keine Potentialrandbedingungen).

Dieser (Ausnahme-) Fall ist jedoch bei den hier betrachteten Berechnungssituationen nicht gegeben.

- Sonstige Ränder: undurchlässig
- Sickerwasseraustritt:

Wurde im Zuge der untergrundhydraulischen Berechnungen ein Austritt der Sickerlinie auf der landseitigen Böschung festgestellt, erfolgte eine iterative Anpassung der Potentialansätze im Bereich der landseitigen Böschung bis eine ausgeglichene Wassermengenbilanz (kein Eintritt von Wasser in das System im Bereich des Sickerwasseraustrittes) erhalten wurde.

Mit diesen Modellen wurden nachfolgend untergrundhydraulische Berechnungen ausgeführt.

3.3 Ergebnisse

Die Ergebnisse der untergrundhydraulischen Berechnungen sind für die Querprofile gemäß Planung in den Anlagen 1 bis 2 dargestellt. Folgende Ergebnisse lassen sich für den Lastfall LF 2.1 ableiten:

Querprofil	Bereich	Deckschicht		Lastfall LF 2.1		Anlage/ Blatt
		GOK [mNHN]	UK [mNHN]	Potential [mNHN]	Gradient i [--]	
Querprofil 21	Untergrund	93,41	91,68	93,95	0,013	1.1
Querprofil 115	Untergrund	92,47	88,69	93,45	0,027	2.1

Tabelle 4: Ergebnisse der Untergrundhydraulischen Berechnungen, Lastfall 2.1

Im Lastfall LF 3.1 wurden folgende Ergebnisse erhalten:

Querprofil	Bereich	Deckschicht		Lastfall LF 3.1		Anlage/ Blatt
		GOK [mNHN]	UK [mNHN]	Potential [mNHN]	Gradient i [--]	
Querprofil 21	Untergrund	93,41	91,68	93,95	0,013	1.2
Querprofil 115	Untergrund	92,47	88,69	93,68	0,032	2.2

Tabelle 5: Ergebnisse der Untergrundhydraulischen Berechnungen, Lastfall 3.1

Neben der Ermittlung der Porenwasserdruckverteilungen sowie der im Untergrund vorhandenen hydraulischen Gradienten erfolgte eine Ermittlung der am landseitigen Deichfuß anfallenden Sickerwassermengen wie folgt:

Querprofil	Sickerwassermenge Q [m³/d je lfd. m]	
	Lastfall LF 2.1	Lastfall LF 3.1
Querprofil 21	0,282	0,399
Querprofil 115	2,281	2,739

Tabelle 6: Sickerwassermengen am landseitigen Deichfuß

4. Tragsicherheitsnachweise

4.1 Allgemeine (globale) Tragsicherheit

Die globale Böschungsbruchsicherheit wurde nach DIN 1054:2005-01 mit dem Gleitkreisverfahren nach BISHOP/KREY durchgeführt. Dabei werden im Gegensatz zur lokalen Standsicherheit tiefer reichende, kreisförmige Bruchkörper mit Lamellen untersucht. Die Berechnungen wurden mit dem Programm GGU-STABILITY, Version 10.37 (Stand 06.09.2012) durchgeführt.

Bei den Berechnungen zum Nachweis der landseitigen Böschung wurden die sich aus den untergrundhydraulischen Berechnungen bei stationärer Durchströmung ergebenden Porenwasserdrücke in einem Ansatz als Porenwasserdrucknetz berücksichtigt. Im Zuge der Berechnungen wurden die Einwirkungen E mit den rückhaltenden Widerständen R verglichen und es wurden Ausnutzungsgrade ermittelt. Ausreichende Sicherheiten sind bei Ausnutzungsgraden von $\leq 1,0$ vorhanden.

Bei den Berechnungen für die landseitige Böschung liegen die ungünstigsten Gleitkreise in der Regel im Bereich der Berme. Dieses ist durch den geforderten Ansatz einer sehr hohen Verkehrslast (hier: SLW 60) bedingt. Gleitkreise im Bereich der landseitigen Deichböschung zeigen geringere Ausnutzungsgrade. Sie sind nicht gesondert dargestellt.

Die Nachweise der land- und der wasserseitigen Böschung sind nachfolgend zusammengestellt. Für den Lastfall LF 2.1 ergibt sich folgendes:

Querprofil / Deich-km	Landseite - LF 2.1		Wasserseite – LF 2.2	
	μ [-]	Anlage	μ [-]	Anlage
Querprofil 21	0,78	1.3	0,79	1.5
Querprofil 115	0,78	2.3	0,81	2.5

Tabelle 7: Globale Tragsicherheit, Lastfall LF 2.1

Für den Lastfall LF 3.1 ergibt sich folgendes:

Querprofil / Deich-km	Landseite - LF 3.1		Wasserseite – LF 3.2	
	μ [-]	Anlage	μ [-]	Anlage
Querprofil 21	0,55	1.4	0,82	1.6
Querprofil 115	0,57	2.4	0,83	2.6

Tabelle 8: Globale Tragsicherheit, Lastfall LF 3.1

Somit wurden für alle betrachteten Lastfälle durchgehend Ausnutzungsgrade von $\mu < 1$ nachgewiesen. Es liegt ausreichende globale Tragsicherheit der land- und der wasserseitigen Böschung vor.

4.2 Lokale Tragsicherheit

Die Untersuchung der lokalen Böschungsbruchsicherheit kann nach dem „Merkblatt Standsicherheit von Dämmen an Bundeswasserstraßen (MSD)“ grundsätzlich über Gleichgewichtsbedingungen an fiktiv unendlichen, böschungsp parallelen Gleitflächen über

$$\eta = \tan \varphi / \tan \beta$$

erfolgen. Nach dem Teilsicherheitskonzept ergibt sich:

$$E / R \leq 1$$

mit E = Einwirkungen (hier: Böschungswinkel $\tan \beta$)

R = Rückhaltende Kräfte (hier: $\tan \varphi / \gamma_\varphi$)

Für Bereiche unterhalb eines Sickerlinienaustritts mit böschungsp paralleler Durchströmung gilt sodann

R = Rückhaltende Kräfte (hier: $\tan (\varphi/2) / \gamma_\varphi$)

Das vereinfachte Berechnungsverfahren nach MSD gilt nur für nichtbindige Böden, da nur der Reibungswinkel berücksichtigt wird und die Kohäsion, die ggf. bei bindigen Böden wirkt, unberücksichtigt bleibt. Daher stellt die Anwendung des vereinfachten Berechnungsverfahrens für die lokale Tragsicherheit nach MSD für Bereiche mit bindigem Boden einen auf der ungünstigen und damit sicheren Seite liegenden Ansatz dar. Sofern ausreichende Sicherheiten ermittelt werden, sind weitere Berechnungen mit Berücksichtigung der Kohäsion also unnötig. Werden bei dem einfachen Nachweis nach MSD jedoch zu hohe Ausnutzungsgrade bestimmt, erfolgten zusätzlich Berechnungen mit oberflächennahen, flach einschneidenden Gleitkreisen nach DIN 4084.

Folgende Ergebnisse wurden für die Landseite ermittelt:

Querprofil / Deich-km	Böschungswinkel	Art des Deichkörpers	Reibungswinkel Deichkörper	Sickerwasser- austritt		Ausnutzungsgrad gemäß MSD	
				LF 2.1	LF 3.1	LF 2.1	LF 3.1
Querprofil 21	18,4	nb	32,5	nein	nein	0,60	0,57
Querprofil 115	18,4	nb	32,5	nein	nein	0,60	0,57

nb: nichtbindig

Tabelle 9: Lokale Tragsicherheit Landseite, Lastfälle LF 2.1 und LF 3.1

Folgende Ergebnisse wurden für die Wasserseite ermittelt:

Querprofil / Deich-km	Böschungswinkel	Art des Deichkörpers	Reibungswinkel Deichkörper	Sickerwasser- austritt		Ausnutzungsgrad gemäß MSD	
				LF 2.2	LF 3.2	LF 2.2	LF 3.2
Querprofil 21	18,4	gk	28,0	nein	nein	0,72	0,69
Querprofil 115	18,4	gk	28,0	nein	nein	0,72	0,69

gk: gemischtkörnig

Tabelle 10: Lokale Tragsicherheit Wasserseite, Lastfälle LF 2.2 und LF 3.2

Somit wurden mit dem einfachen Nachweis nach MSD für alle Lastfälle durchgehend Ausnutzungsgrade von $\mu < 1$ nachgewiesen. Es liegt ausreichende lokale Tragsicherheit vor. Ergänzende Berechnungen mit Gleitkörpern/-kreisen waren nicht erforderlich.

4.3 Lokale Sicherheit am Dammfuß (Spreizsicherheit)

Der Nachweis der Spreizsicherheit ist gemäß DIN 19712:1997-11 nur bei weichem bindigem Untergrund am Deichfuß zu führen. Im hier betrachteten Los VI liegen nach [U1] derartige Verhältnisse in der Regel nicht vor. Um dennoch Angaben zur vorhandenen Sicherheit gegen Spreizen zu erhalten, wurden entsprechende Berechnungen für den Lastfall LF 3.1 durchgeführt.

Die im Merkblatt DWA-M 507 (Entwurf Stand Februar 2007) u.a. aufgeführten Verfahren (z.B. BRAUNS 1980; KAST 1985) weisen Einschränkungen in der Anwendbarkeit (teilweise keine kohäsiven Böden, keine Strömungskräfte, keine Verkehrslasten etc.) auf. Sinnvoller sind im vorliegenden Fall erdstatische Betrachtungen an polygonalen Bruchkörpern nach der Methode der Starrkörperbruchmechanismen. Dabei erfolgt eine Variation der aktiven Gleitflächenwinkels am Gleitkeil, was dem aktiven Erddruckansatz gleichkommt. Die Betrachtungen erfolgten am erdstatischen System für den Lastfall LF 3.1, welches alle maßgebenden Einwirkungen berücksichtigen.

Folgende Ergebnisse wurden erzielt:

Querprofil / Deich-km	Landseite - LF 3.1	
	μ [-]	Anlage
Querprofil 21	0,26	ohne
Querprofil 115	0,30	ohne

Tabelle 11: Lokale Tragsicherheit am Böschungsfuß, Lastfall LF 3.1/3.2

Es ist somit ausreichende Sicherheit gegen Spreizen am Deichfuß vorhanden.

4.4 Tragsicherheit von Böschungsdichtungen

In beiden Querprofilen wird auf einem grobkörnigen Stützkörper eine wasserseitige Dichtung aufgebaut. Der grobkörnige Stützkörper wird über ein Dränprisma am landseitigen Deichfuß entwässert. Somit kann ausgeschlossen werden, dass sich hinter der Dichtung höhere Wasserstände als vor der Dichtung einstellen werden. Damit wirken auf die Dichtung auch keine Porenwasserdrücke. Der Nachweis der Tragsicherheit von Böschungsdichtungen kann somit entfallen.

4.5 Auftriebssicherheit und hydraulischer Grundbruch

Der Nachweis der Auftriebssicherheit ist bei Deichen zu führen, deren landseitiger Fuß auf einer bindigen (geringer durchlässigen) Deckschicht gegründet ist. Dies trifft für das betrachtete Querprofil 21 zu. Die Situation ist nachfolgend dargestellt:

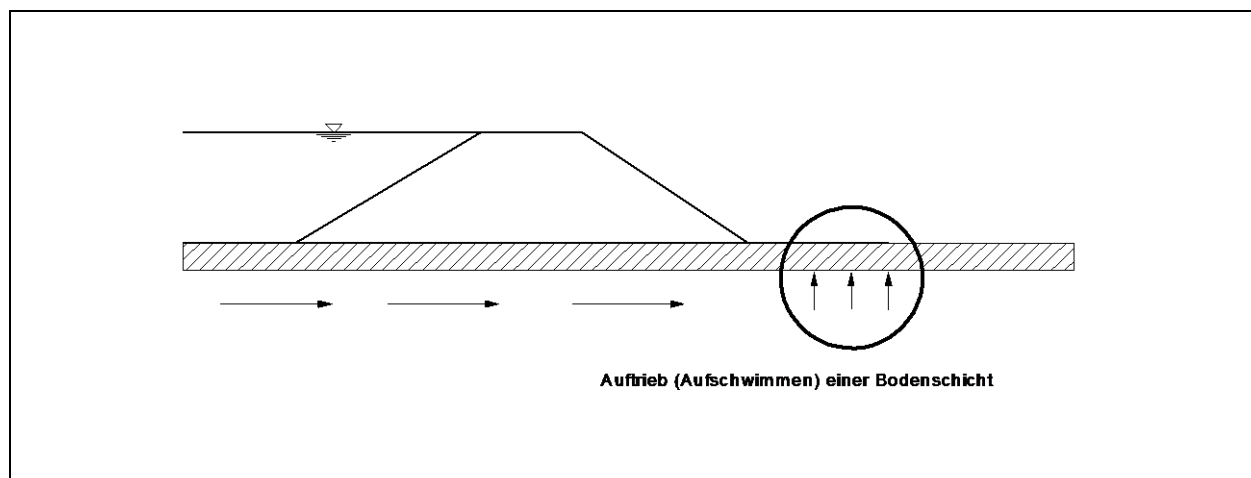


Abbildung 2: Nachweis gegen Auftrieb

Der Nachweis gegen hydraulischen Grundbruch ist dort zu führen, wo landseitig eine oberflächennahe Deckschicht aus bindigen Böden durch eine Fehlstelle unterbrochen ist und somit eine Grundwasserströmung stattfindet. Strömungskonzentrationen können hier zu einem Verlust der Lagesicherheit von Bodenkörpern führen. Dies trifft für das hier betrachtete Querprofil 115 zu. Die Situation ist nachfolgend dargestellt:

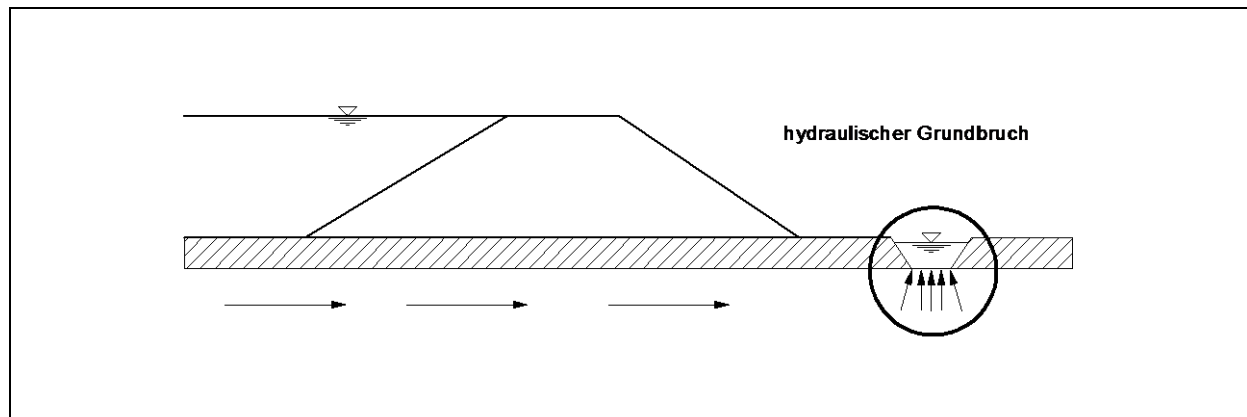


Abbildung 3: Nachweis gegen hydraulischen Grundbruch

Die Ergebnisse dieser beiden Nachweise sind in den Ergebnissen der untergrundhydraulischen Berechnungen enthalten, wobei programmtechnisch bedingt immer beide Nachweise dargestellt sind. Es ergeben sich folgende Ausnutzungsgrade gegen Auftrieb:

Querprofil / Deich-km	Lastfall LF 2.1		Lastfall LF 3.1	
	μ	Anlage	μ	Anlage
Querprofil 21	0,798	1.1	0,833	1.2
Querprofil 115	0,701	2.1	0,700	2.2

n.m.: Nicht maßgebend!

Tabelle 12: Sicherheit gegen Auftrieb, Lastfälle LF 2.1 und LF 3.1

Es ergeben sich folgende Ausnutzungsgrade gegen hydraulischen Grundbruch:

Querprofil / Deich-km	Lastfall LF 2.1		Lastfall LF 3.1	
	μ	Anlage	μ	Anlage
Querprofil 21	0,697	1.1	0,795	1.2
Querprofil 115	0,443	2.1	0,462	2.2

n.m.: Nicht maßgebend!

Tabelle 13: Sicherheit hydraulischen Grundbruch, Lastfälle LF 2.1 und LF 3.1

Für beide betrachteten Querprofile sind somit in den Lastfällen LF 2.1 und 3.1 ausreichende Sicherheiten gegen hydraulischen Grundbruch und gegen Auftrieb vorhanden. Sickerschlitze werden nicht erforderlich.

4.6 Sicherheit gegen Materialtransport

Grundlagen

Der Nachweis der Sicherheit gegen Materialtransport umfasst folgende Einzelnachweise:

- Nachweis der Erosionssicherheit
- Nachweis der Suffosionssicherheit

Als Erosion wird die Umlagerung und der Transport aller Fraktionen eines Bodens infolge der Grundwasser- bzw. Sickerströmung bezeichnet. Suffosion hingegen ist die Umlagerung und der Transport der feinen Fraktionen eines ungleichförmigen nichtbindigen Bodens. Beide Arten des Materialtransports werden, je nachdem wo sie stattfinden, in die innere Erosion/Suffosion, in die äußere Erosion/Suffosion sowie in die Kontaktersion/-suffosion unterschieden. Weiterhin kann als Sonderfall eine Fugenerosion stattfinden.

Voraussetzung für alle Arten des Materialtransports ist ein erosions-/suffosionsempfindlicher Boden sowie eine entsprechend hohe hydraulische Belastung. Böden, die folgende Anforderungen erfüllen, gelten ohne besonderen Nachweis als suffosionssicher:

- bindige Böden mit einem Korndurchmesser $d_{10} < 0,002 \text{ mm}$
- sehr enggestufte nichtbindige Böden mit einem Ungleichförmigkeitsgrad von $U \approx 1$
- nichtbindige Böden mit $U < 10$ und einer Körnungslinie, die in halblogarithmischer Darstellung einer Gerade entspricht
- nichtbindige Böden mit einer Lagerungsdichte von $I_D > 0,6$ bei $U > 10$
- nichtbindige Böden mit $U < 8$ und einer stetigen Körnungslinie

Alle weiteren Böden gelten als suffosionsempfindlich.

Diese Bedingungen zeigen, dass für den Nachweis eine genaue Kenntnis der Materialparameter der einzelnen Bauteile/Schichten vorliegen muss. Im vorliegenden Fall liegen nur Angaben für die vorhandenen Hochwasserschutzdeiche sowie den Untergrund vor, sodass für den geplanten Deichkörper Materialkennwerte festzulegen sind.

Nachweis gegen Materialtransport im Untergrund

Der Nachweis gegen Materialtransport kann nach dem Merkblatt MSD durch Prüfung des hydraulischen Kriteriums für Suffosion und Kontakterosion erfolgen. Hierbei wird der vorhandene hydraulische Gradient i_{vorh} mit dem kritischen hydraulischen Gradienten i_{krit} verglichen. Die vorhandene Sicherheit ergibt sich zu

$$\eta = i_{\text{krit}} / i_{\text{vorh}}$$

Folgende Sicherheiten sind nach MSD nachzuweisen

- Sicherheit gegen Suffosion $\eta \geq 2,0$
- Sicherheit gegen Kontrakterosion $\eta \geq 1,5$

Der kritische hydraulische Gradient i_{krit} kann nach dem DWK-Merkblatt 210/1986 (Flussdeiche) ermittelt werden. Grundlage ist auch hier der Ungleichförmigkeitsgrad U der anstehenden Böden. Angaben hierzu liegen aus [U1] für die maßgebenden Schichten 4 und 5 (Muldeschotter, sandig und kiesig) wie folgt vor:

- Schicht 4, Muldeschotter (Sand), Bodengruppe SE: Ungleichförmigkeit $U \leq 6$
- Schicht 5, Muldeschotter (Kies), Bodengruppe GI: Ungleichförmigkeit $U > 20$

Nachfolgend erfolgt der Nachweis der Sicherheit gegen Suffosion und Kontaktersion mit dem größten Ungleichförmigkeitsgrad von $U > 20$ sowie den aus den untergrundhydraulischen Berechnungen für den Lastfall LF 2.1 bzw. LF 3.1 ermittelten höchsten hydraulischen Gradienten i_{vorh} . Es ergeben sich folgende Sicherheiten:

Querprofil	Bereich	hydraulischer Gradient i		Sicherheit [-]	Anlage/ Blatt
		i_{vorh} [-]	i_{krit} [-]		
Querprofil 21	Untergrund	0,017	0,30	17,6	1.2
Querprofil 115	Untergrund	0,032	0,30	9,4	2.2

Tabelle 14: Nachweis gegen Materialtransport im Untergrund

Es zeigt sich, dass das hydraulische Kriterium für Suffosion und Kontaktersion eingehalten wird und damit die Sicherheit gegen Suffosion, Kontaktersion und auch gegen Erosionsgrundbruch im Deichuntergrund durchgehend gegeben ist.

Der Nachweis gegen Fugenerosion (Piping) ist nur bei Deichen auf einer oberflächennahen bindigen Schicht notwendig, unter deren Schutz eine Fugenerosion entstehen kann und deren Lage einen Abtransport des erodierten Bodens (z.B. in einen Entwässerungsgraben) zulässt. Derartige Verhältnisse liegen lokal vor, da Fehlstellen in der Deckschicht vorhanden sind.

Der Nachweis kann gemäß DWA-M 507, Abs. 6.5.5 nach CHUGAEV geführt werden. Hierbei wird der mittlere Gradient der Strömung unterhalb des Staubauwerkes mit einem kritischen Kontrollgradienten i_{krit} verglichen. Nach [U2] stehen unterhalb der Deckschicht in der Regel Mittel- und Grobsande an, sodass nach CHUGAEV ein kritischer Kontrollgradienten von $i_{krit} =$

0,15 bis 0,20 angesetzt werden kann. Es ergeben sich folgende Sicherheiten:

Querprofil	Bereich	hydraulischer Gradient i		Sicherheit [-]	Anlage/ Blatt
		i_{vorh} [-]	i_{krit} [-]		
Querprofil 21	Untergrund	0,017	0,15	8,8	1.2
Querprofil 115	Untergrund	0,032	0,15	4,7	2.2

Tabelle 15: Nachweis gegen Fugenerosion (Piping)

Somit liegen ausreichende Sicherheiten gegen Fugenerosion vor.

Nachweis gegen Materialtransport im Deichkörper, Stützkörper

Gemäß [U2] wird ein grobkörniger Stützkörper errichtet. Detaillierte Angaben zur Materialqualität liegen derzeit nicht vor. Folgende Anforderungen werden empfohlen:

- Wasserdurchlässigkeit $k_f \geq 1 \cdot 10^{-5}$ m/s
- Ungleichförmigkeitsgrad $U < 8$ und stetige Körnungslinie

Damit ist das vorgesehene Deichbaumaterial suffosionssicher, sodass weitere Nachweise zum Deichbaumaterial für den Stützkörper entfallen können.

Nachweis gegen Materialtransport im Deichkörper, Dränprisma

Gemäß [U2] wird ein Dränprisma errichtet. Detaillierte Angaben zur Materialqualität liegen derzeit nicht vor. Folgende Anforderungen werden empfohlen:

- Bodengruppen GE, GW, GI nach DIN 18196
- Ungleichförmigkeit $U = 3$ bis 8
- Wasserdurchlässigkeit $k_f \geq 10^{-3}$ m/s

Das Material für das Dränprisma ist somit nach MSD als erosions-/suffosionssicher anzusehen, sodass weitere Nachweise für das Dränprisma entfallen.

Nachweis gegen Materialtransport im Deichkörper, Dichtungsschicht

Gemäß [U2] wird eine wasserseitige Dichtungsschicht errichtet. Detaillierte Angaben zur Materialqualität liegen derzeit nicht vor. Folgende Anforderungen werden empfohlen:

- Wasserdurchlässigkeit $k_f \leq 1 \cdot 10^{-8}$ m/s
- Korndurchmesser $d_{10} < 0,002$ mm

Damit ist das vorgesehene Deichbaumaterial suffosionssicher, sodass weitere Nachweise zum Deichbaumaterial für die Dichtungsschicht entfallen können. Zwischen Dichtungsschicht und Stützkörper wird bei Einhaltung dieser Anforderungen kein Trenn- und Filtervlies erforderlich.

Nachweis gegen Materialtransport im Deichkörper, Deckschicht

Gemäß [U2] wird die Dichtungsschicht durch eine Deckschicht geschützt. Detaillierte Angaben zur Materialqualität liegen derzeit nicht vor. Folgende Anforderungen werden empfohlen:

- Wasserdurchlässigkeit $k_f \leq 10^{-5}$ m/s
- Nachweis der Filterstabilität auf der Grundlage der Korngrößenverteilung und den hydraulischen Belastungen

Damit muss der Nachweis gegen Materialtransport in der Deckschicht auf der Grundlage des vorgesehenen Baustoffes erfolgen. Der Nachweis ist im Zuge der Eignungsuntersuchung zu erbringen.

5. Setzungsnachweise

Der Nachweis der Setzungen, die in Folge der Auflast aus dem geplanten Deichkörper zu erwarten sind, wurde an zwei Abschnitten der Neubaustrecke geführt. Die als maßgebend betrachteten Abschnitte sind dabei folgende:

- Deichkilometer 0+300 bis 0+620 aufgrund der Mächtigkeit der Schichten 2 und 3
- Deichkilometer 0+750 bis 1+000 aufgrund der örtlich erkundeten Schicht 3a

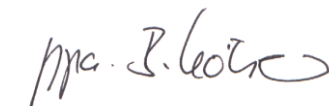
Die setzungsrelevanten Lasten wurden dabei entsprechend der übergebenen geplanten Deichgeometrien angesetzt.

Die Ergebnisse der Berechnungen finden sich in den Anlagen 3 (km 0+300 – 0+620) und 4 (km 0+750 – 1+000) und sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst:

Deichabschnitt	Station	Setzung [cm]	Anlage
0+300 bis 0+620	0+485	1,73	3
0+750 bis 1+000	0+870	2,48	4

Tabelle 16: Ergebnisse Setzungsberechnungen

Die ermittelten Setzungen sind in der weiteren Planung zu berücksichtigen.



(Dipl.-Ing. B. Kröber)