



**Bundesanstalt für Wasserbau**  
Kompetenz für die Wasserstraßen

**BAWMerkblatt**

## **Standicherheit von Dämmen an Bundeswasserstraßen (MSD)**

**Ausgabe 2011**



**Bundesanstalt für Wasserbau**  
Kompetenz für die Wasserstraßen

## BAW-Merkblätter und -Richtlinien Herausgeber

Bundesanstalt für Wasserbau (BAW)  
Kußmaulstraße 17  
76187 Karlsruhe

Postfach 21 02 53  
76152 Karlsruhe

Tel.: 0721 9726-0  
Fax: 0721 9726-4540

[info@baw.de](mailto:info@baw.de)  
[www.baw.de](http://www.baw.de)

Übersetzung, Nachdruck – auch auszugsweise – nur mit Genehmigung des Herausgebers: © BAW 2011

<b>Inhaltsverzeichnis</b>		<b>Seite</b>
1	Geltungsbereich und Zweck	1
2	Begriffe und Formelzeichen	1
2.1	Begriffe	1
2.2	Formelzeichen	4
2.3	Abkürzungen	4
3	Sicherheitskonzept, Bemessungssituationen und Sicherungselemente	5
3.1	Sicherheitskonzept	5
3.2	Bemessungssituationen	5
3.3	Berücksichtigung von Sicherungselementen	6
3.3.1	Dräns	6
3.3.2	Dichtungen	6
3.3.3	Mehrere Sicherungselemente	6
4	Berechnungsgrundlagen	7
4.1	Verkehrslasten	7
4.2	Wasserstände	7
4.2.1	Nicht hochwasserbelastete Dämme	7
4.2.2	Hochwasserbelastete Dämme	7
4.3	Kapillarkohäsion	8
4.4	Durchwurzelungskohäsion	8
4.5	Ermittlung der Dammdurchströmung	9
4.5.1	Dammdurchströmung in der BS-P	9
4.5.2	Dammdurchströmung in der BS-A	10
4.5.3	Berechnung der Dammdurchströmung	10
5	Nachweise und Sicherheiten bei Dämmen	12
5.1	Allgemeines	12
5.2	Standsicherheit der wasserseitigen Böschung	12
5.3	Standsicherheit der luftseitigen Böschung	13
5.3.1	Globale Standsicherheit	13
5.3.2	Lokale Standsicherheit	13
5.3.3	Mindestquerschnitt	14
5.3.4	Sonderregelung bei niedrigen Dämmen	15
5.4	Aufschwimmen einer Bodenschicht	16
5.5	Hydraulischer Grundbruch	16
5.6	Materialtransport	17
5.6.1	Geometrisches Kriterium für Suffosion und Kontakterosion	17
5.6.2	Hydraulisches Kriterium für Suffosion und Kontakterosion	18
5.6.3	Mengenmäßige Abschätzung des transportierten Bodenmaterials	18
5.6.4	Piping (Fugenerosion)	19

6	Dichtungen und Dräns	19
6.1	Dichtungen	19
6.2	Dräns	21
7	Bauwerke in Dämmen	23
7.1	Allgemeines	23
7.2	Nachweis gegen Fugenerosion	23
7.2.1	Vorgehensweise	23
7.2.2	Berechnung der Dammdurchströmung im Bauwerksbereich	25
8	Damminspektion	28
9	Bewuchs auf Dämmen	29
9.1	Grundsätze	29
9.2	Durchwurzelung von Oberflächendichtungen	30
9.3	Dämme ohne Mindestquerschnitt	31
9.4	Überbreite und überhohe Dämme	32
9.5	Sonderregelung bei niedrigen Dämmen	34
10	Literatur	35

## Tabellen

Tabelle 1:	Sicherheiten $\eta$ gegen Materialtransport	18
Tabelle 2:	Beurteilung von Dichtungen	21
Tabelle 3:	Beispiele zur Beurteilung der Gefahr einer Hohlraumbildung bei Bauwerken in Dämmen	25
Tabelle 4:	Zoneneinteilung und zulässiger Bewuchs auf überbreiten und überhohen Dämmen	33

## Bilder

Bild 1:	Typen des Materialtransportes im Boden nach Busch, Luckner und Thiemer [2]	3
Bild 2:	Mindestquerschnitt (schraffiert) bei Dämmen mit Oberflächendichtung der wasserseitigen Böschung (oben), mit Uferspundwand (unten) und mit Kernwand (Mitte)	14
Bild 3:	Vereinfachter Nachweis bei niedrigen Dämmen	16
Bild 4:	Typische Situation für die Möglichkeit des Aufschwimmens einer Bodenschicht	16
Bild 5:	Typische Situation für die Möglichkeit eines hydraulischen Grundbruchs im Bereich des Seitengrabens	16
Bild 6:	Bespiele für vollkommene (oben und Mitte) und unvollkommene Dichtungen (unten)	20
Bild 7:	Auswirkung von außenliegenden und innenliegenden Dränsystemen auf die Sickerlinie	22
Bild 8:	Wurzelbrut	31
Bild 9:	Zoneneinteilung für den zulässigen Bewuchs auf überbreiten und/oder überhohen Dämmen mit Mindestquerschnitt (schraffiert)	32

## Anhänge

Anhang 1:	Hinweise zur numerischen Modellierung der Dammdurchströmung	37
Anhang 2:	Berücksichtigung von offenen Fugen in der Strömungsberechnung	44
Anhang 3:	Ablauf des Nachweises für Dammbereiche mit Bauwerken	46
Anhang 4:	Beispiel zu Bauwerken in Dämmen	47
Anhang 5:	Gehölzliste	54



## 1 Geltungsbereich und Zweck

Dieses Merkblatt gilt für ständig wasserbelastete Dämme an Bundeswasserstraßen (Kanalseitendämme und Flusseiteindämme). Die Regelungen des Merkblattes können auch auf Deiche, die nur bei Hochwasser belastet werden, angewandt werden. Nachfolgend wird jedoch ausschließlich der Begriff Damm verwendet.

Das Merkblatt regelt das Vorgehen bei der Standsicherheitsbeurteilung von Dämmen insbesondere unter Berücksichtigung der Dammdurchströmung. Behandelt werden dabei auch der Einfluss von Bauwerken in Dämmen und der zulässige Bewuchs. Es ergänzt die einschlägigen DIN-Normen und sonstigen allgemeinen technischen Regelwerke.

## 2 Begriffe und Formelzeichen

### 2.1 Begriffe

#### **Damm**

Ein Damm ist ein Bauwerk zur Stützung eines Wasserstands und ggf. zusätzlich zum Schutz gegen Hochwasser. Im Vergleich dazu dient ein Deich dem Schutz des Hinterlandes gegen Hochwasser und wird nur bei Hochwasser belastet.

#### **Dammnachsorge**

Unter Dammnachsorge werden alle Maßnahmen an bestehenden Dämmen verstanden, mit denen die Standsicherheit für andere als ursprünglich vorgesehene Belastungen (insbesondere Ausfall von Sicherungselementen) gewährleistet oder an die weiterentwickelten anerkannten Regeln der Technik angepasst wird.

#### **Dichtung**

Eine Dichtung besteht aus einem natürlichen oder künstlichen Material mit einer geringen hydraulischen Durchlässigkeit und dient zur Verhinderung oder Minimierung von Wasserverlusten aus Wasserstraßen in Dammlage. Es wird unterschieden in Oberflächendichtungen und Innendichtungen.

Oberflächendichtungen sind an der Sohle und den wasserseitigen Böschungen der Dämme angeordnet. Detaillierte Hinweise zu den unterschiedlichen Dichtungssystemen und deren Eigenschaften und Anwendungsgrenzen werden in [17] gegeben

Innendichtungen befinden sich innerhalb des Dammkörpers und können als Kerndichtung oder Dichtwand (Schlitzwand, Mixed-in-Place-Wand, Spundwand etc.) ausgeführt werden.

#### **Drän**

Ein Drän dient zur Fassung und Ableitung von Grund- und Sickerwasser. Nach DIN 4095:1990 [9] ist Drän der Sammelbegriff für Dränleitung und Dränschicht. Bei Dämmen an Wasserstraßen ist eine Dränleitung nicht zwingend erforderlich.

### **Dränschicht**

Wasserdurchlässige Schicht, bestehend aus Sickerschicht und Filterschicht oder aus einer filterfesten Sickerschicht (Mischfilter) (DIN 4095:1990 [9])

### **Filterschicht (Filter)**

Teil der Dränschicht, der das Ausschlämmen von Bodenteilchen infolge fließenden Wassers verhindert (DIN 4095:1990 [9])

*Anmerkung: Filterschicht und Sickerschicht können aus Mineralkorn oder Geokunststoff bestehen.*

### **Flussseitendamm**

Erdbauwerk als seitliche Begrenzung eines staugeregelten Flusses und der Mündungstrecken von Nebenflüssen im Staubereich des Hauptflusses (VV-WSV 1102 – Objektkatalog (ObKat) [28], DIN 4048-1:2009 [6] und DIN 4054:1977 [7])

### **Instandsetzung**

Als Instandsetzung werden im Folgenden alle Maßnahmen verstanden, mit denen der ursprüngliche Sollzustand wiederhergestellt wird (z. B. Erneuerung einer Kanaldichtung).

### **Kanalseitendamm**

Erdbauwerk als seitliche Begrenzung eines Schifffahrtskanals oder Schleusenkanals (VV-WSV 1102 – Objektkatalog (ObKat) [28] und DIN 4054:1977 [7])

### **Kontrollelemente**

Als Kontrollelemente werden Einrichtungen bezeichnet, mit denen die Funktion der Dammkonstruktion und der Sicherungselemente kontrolliert werden kann.

### **Materialtransport im Boden**

**Erosion** ist die Umlagerung und der Transport aller Fraktionen eines Bodens durch die Strömung des Wassers. Je nachdem, wo die Erosion stattfindet, unterscheidet man zwischen der äußeren Erosion, der Kontakterosion, dem "Piping" oder der "rückschreitenden Erosion", bei der ein Transport von Boden längs vorhandener oder sich bildender Hohlräume stattfindet (*Bild 1*). Die Hohlräume bilden sich meist an Kontaktflächen zwischen erosionsfestem und erosionsgefährdetem Material (z. B. Gründungssohlen von Betonkörpern auf Sand oder bei Dämmen unter Schichtgrenzen von bindigem zu nichtbindigem Boden; *Bild 1*). Der Materialtransport beginnt luftseitig und setzt sich Richtung Wasserseite (rückschreitend) fort.

Suffosion ist die Umlagerung und der Transport der feinen Fraktionen eines ungleichförmigen nichtbindigen Bodens im Porenraum des Korngerüsts der groben Fraktionen durch die Strömung des Wassers. Das tragende Korngerüst wird nicht verändert, es erhöhen sich die Durchlässigkeit und die Porenzahl des Bodens, während die Dichte abnimmt. Je nachdem, wo die Suffosion stattfindet, unterscheidet man zwischen äußerer Suffosion, innerer Suffosion und Kontaktsuffosion (siehe *Bild 1*).



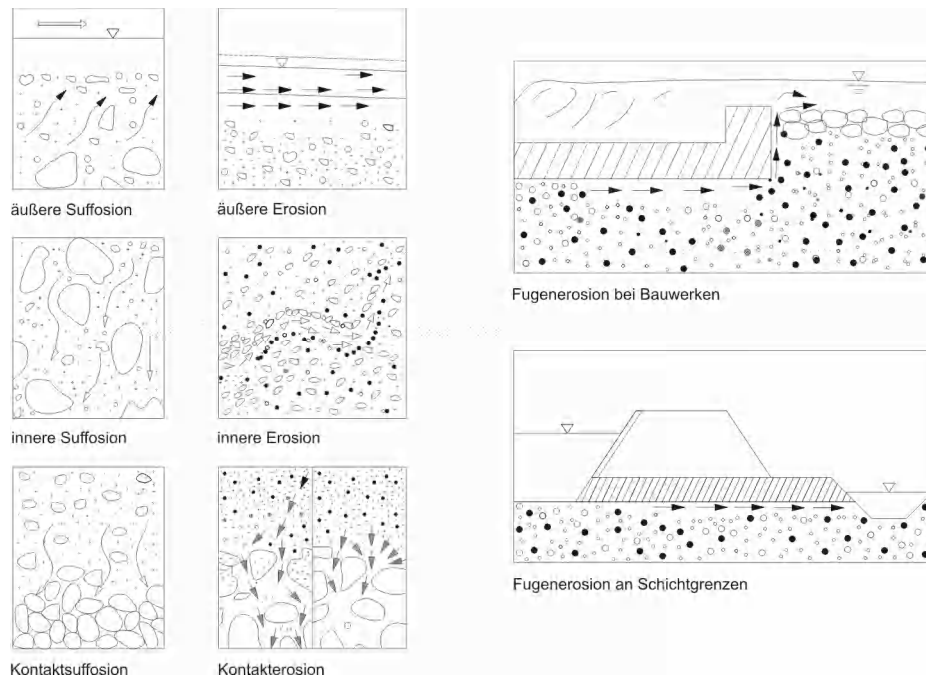


Bild 1: Typen des Materialtransportes im Boden nach Busch, Luckner und Thieme [2]

### Schiffahrtskanal

Wasserlauf mit überwiegend künstlich hergestelltem Gewässerbett für die Schifffahrt (VV-WSV 1102 – Objektkatalog (ObKat) [28] und DIN 4054:1977 [7])

### Schleusenkanal

Strecke eines staugeregelten Flusses als Durchstich, die als Zufahrt zur Schiffsschleusenanlage vom Fluss abzweigt (VV-WSV 1102 – Objektkatalog (ObKat) [28] und DIN 4054:1977 [7])

### Sicherungselement

Als Sicherungselement werden im Folgenden alle Konstruktionen bezeichnet, mit denen die Beeinträchtigung der Dammstandsicherheit infolge Durchströmung ganz vermieden oder vermindert wird.

*Anmerkung: Sicherungselemente sind z. B. Dichtungen, Sickerwegverlängerungen oder Dräns. Die Sicherungselemente werden für den jeweils betrachteten Fließweg in Fließrichtung des durchströmenden Wassers nummeriert.*

### Standsicherheit

Die globale Standsicherheit im Sinne des Merkblattes ist die Sicherheit gegen Bruchzustände im Boden, bei denen die Gleitfläche verhältnismäßig tief in den Boden einschneidet.

Die lokale Standsicherheit (auch: örtliche Standsicherheit) im Sinne des Merkblattes ist die Sicherheit gegen oberflächennahe Brüche im Boden.

## 2.2 Formelzeichen

Formelzeichen	Benennung	Einheit	Kapitel
$A_{50}$	Abstandsverhältnis der Korndurchmesser, $A_{50}=D_{50}/d_{50}$	-	5.6.1
$c_{c,k}$	charakteristischer Wert der Kapillarkohäsion	kN/m <sup>2</sup>	4.3
$c_{w,k}$	charakteristischer Wert der Wurzelkohäsion	kN/m <sup>2</sup>	4.4
$d_{10}$	Korndurchmesser bei 10% Siebdurchgang	mm	5.6
$d_{50}, D_{50}$	Korndurchmesser bei 50% Siebdurchgang	mm	4.3, 5.6.1
$d_{85}$	Korndurchmesser bei 85% Siebdurchgang	mm	4.3
$e_{\max/\min}$	Porenzahl für die lockerste/dichteste Lagerung	-	5.6.1
$e_n$	Porenzahl für die natürliche Lagerung	-	5.6.1
$i_{\text{krit}}$	kritischer hydraulischer Gradient	-	5.6.2
$i_{\text{vorh}}$	vorhandener hydraulischer Gradient	-	5.6.2
$l_D$	bezogene Lagerungsdichte	-	5.6.1
$k$	Durchlässigkeitsbeiwert	m/s	4.5.1
$n$	Jährlichkeit	a	4.2.2
$U$	Ungleichförmigkeitsgrad	-	5.6.1
$\beta$	Böschungswinkel	°	5.3.2
$\varphi'_d$	Bemessungswert des wirksamen Reibungswinkels des Bodens	°	5.3.2
$\varphi'_k$	charakteristischer Wert des wirksamen Reibungswinkels des Bodens	°	5.3.2

## 2.3 Abkürzungen

BS-P	Ständige ( <b>p</b> ersistent) Bemessungssituation
BS-T	Vorübergehende ( <b>t</b> ransient) Bemessungssituation
BS-A	Außergewöhnliche ( <b>a</b> ccidental) Bemessungssituation
BS-E	Bemessungssituation bei Erdbeben ( <b>e</b> arthquake)
GEO-3	Grenzzustand des Versagens oder sehr großer Verformungen des Baugrunds, bei dessen Nachweis die Scherparameter mit Teilsicherheitsbeiwerten belegt und mit den Bemessungswerten der Scherparameter die Einwirkungen und Widerstände des Baugrunds ermittelt werden.
UPL	Grenzzustand des Verlustes der Lagesicherheit des Bauwerks oder Baugrunds infolge Aufschwimmens (Auftrieb) oder anderer vertikaler Einwirkungen ( <b>u</b> plift)
HYD	Grenzzustand des Versagens verursacht durch Strömungsgradienten im Boden, z. B. hydraulischer Grundbruch, innere Erosion und Piping ( <b>h</b> ydraulic failure)

### 3 Sicherheitskonzept, Bemessungssituationen und Sicherungselemente

#### 3.1 Sicherheitskonzept

Das Merkblatt folgt dem Konzept der Teilsicherheitsbeiwerte nach DIN EN 1997-1:2009 (Eurocode 7) [13] und DIN 1054:2010 [5]. Es sind die in den Tabellen A 2.1 bis A 2.3 der DIN 1054:2010 [5] angegebenen Teilsicherheitsbeiwerte anzuwenden und es ist eine Einstufung der Dämme in geotechnische Kategorien nach DIN 1054:2010 [5] vorzunehmen.

#### 3.2 Bemessungssituationen

Folgende Bemessungssituationen nach DIN EN 1990:2010 (Eurocode) [12] und DIN 1054:2010 [5] sind zu berücksichtigen:

##### **Ständige Bemessungssituation (BS-P)**

In der ständigen Bemessungssituation (BS-P) sind als ständige Einwirkungen Eigenlasten, Erddruck und die aus einem ständigen Wasserstand resultierenden Druck- und Strömungskräfte anzusetzen. Als veränderliche Einwirkungen sind Nutz- und Verkehrslasten sowie Hochwasserstände, die während der zu erwartenden Nutzungsdauer des Dammes auftreten können, zu berücksichtigen.

Eine Notwendigkeit konstruktiver Maßnahmen zur Verhinderung des Sickerlinienaustrittes bei Dämmen, deren Standsicherheit für die ständigen Bemessungssituation (BS-P) nachgewiesen ist, ist im Einzelfall zu prüfen.

##### **Vorübergehende Bemessungssituation (BS-T)**

In der vorübergehenden Bemessungssituation (BS-T) sind die ständigen und veränderlichen Einwirkungen in Bauzuständen (z.B. Strömungskräfte, die beim Aufnehmen einer Dichtung während einer Baumaßnahme auftreten) und Revisionszuständen (z. B. Trockenlegung einer Kanalhaltung) zu berücksichtigen.

##### **Außergewöhnliche Bemessungssituation (BS-A)**

In der außergewöhnlichen Bemessungssituation (BS-A) ist zusätzlich zu den Einwirkungen der ständigen Bemessungssituation (BS-P) bzw. der vorübergehenden Bemessungssituation (BS-T) eine außergewöhnliche Einwirkung zu berücksichtigen. Außergewöhnliche Einwirkungen stellen z. B. das Versagen eines Sicherungselementes oder ein über das Bemessungshochwasser hinausgehendes Hochwasser dar.

*Anmerkung: Der Ansatz eines vollständigen Ausfalls eines Sicherungselementes entspricht einem Ereignis mit äußerst geringer Eintrittswahrscheinlichkeit im Sinne einer außergewöhnlichen Bemessungssituation nach DIN EN 1990: 2010 (Eurocode) [12] Durch die Nachweise in der außergewöhnlichen Bemessungssituation (BS-A) sollen jedoch keine Katastrophenfälle erfasst werden, bei denen der Damm überspült wird oder - wie etwa bei Bombenschäden - so große Wassermengen durch den Damm treten, dass zusätzlich eine Gefährdung durch Erosion auf der Böschung entsteht.*

## **Bemessungssituation bei Erdbeben (BS-E)**

In der Bemessungssituation für Erdbeben (BS-E) werden Beanspruchungen des Bauwerks durch Erdbeben (siehe DIN 4149:2005 [10]) berücksichtigt. Auf die ggf. erforderlichen Nachweise wird hier nicht eingegangen.

### **3.3 Berücksichtigung von Sicherungselementen**

#### **3.3.1 Dräns**

Die druckentlastende Wirkung von Dräns darf in der Durchströmungsberechnung und den darauf basierenden Standsicherheitsberechnungen nur angesetzt werden, wenn:

- die geometrische Filterstabilität des Dränmaterials gegenüber dem Baugrund nachgewiesen wird bzw. ist und
- bei Dräns, bei denen zur Ableitung des gefassten Wassers eine Dränleitung erforderlich ist (siehe Kap. 6.2), außerdem eine Überprüfung der Funktionstüchtigkeit der Dränagen möglich ist und regelmäßig durchgeführt wird.

Ist dies nicht der Fall, ist von einer fehlenden Funktionsfähigkeit des Dräns auszugehen und die druckentlastende Wirkung der Dräns darf nicht berücksichtigt werden.

#### **3.3.2 Dichtungen**

Ein hydraulischer Ausfall von Innendichtungen in Dämmen muss in der außergewöhnlichen Bemessungssituation (BS-A) nicht angesetzt werden, wenn deren Dichtwirkung durch eine Funktionsprüfung (z. B. Grundwasserstandsmessungen, Bodentemperaturmessungen) sichergestellt wird bzw. wurde. Ist eine Funktionsprüfung nicht durchführbar, kann auf den Ansatz eines hydraulischen Ausfalls einer Innendichtung nur dann verzichtet werden, wenn die Dichtung eine sehr hohe Systemsicherheit aufweist. Die Systemsicherheit ist gutachterlich zu bewerten.

Der hydraulische Ausfall massiver Uferwände ist in der außergewöhnlichen Bemessungssituation (BS-A) nicht anzusetzen, wenn nachgewiesen wird, dass eine Schiffsanfahrt nicht zu einer Undichtigkeit führt.

#### **3.3.3 Mehrere Sicherungselemente**

Bei mehreren, unabhängig voneinander wirksamen Sicherungselementen ist in der außergewöhnlichen Bemessungssituation (BS-A) nur der hydraulische Ausfall des ersten Sicherungselementes zu untersuchen. Dies setzt voraus, dass ein Beobachtungssystem existiert, mit dem das Versagen des ersten Sicherungselementes erkannt werden kann und somit eine außergewöhnliche Bemessungssituation (BS-A) nicht unerkannt zu einer ständigen Bemessungssituation (BS-P) wird.

Bei mehreren, zusammen wirksamen Sicherungselementen (z. B. unvollständige Dichtung, die nur eine Verlängerung des Sickerwegs bewirkt, und Drän) ist in der außergewöhnlichen Bemessungssituation (BS-A) der hydraulische Ausfall jedes Sicherungselements separat zu untersuchen. Kann das hydraulische Versagen des ersten Sicherungselementes nicht durch ein Beobachtungssystem (z. B.

Grundwassermeßstellen) erkannt werden, so ist der gemeinsame hydraulische Ausfall der beiden Sicherungselemente anzusetzen.

## 4 Berechnungsgrundlagen

### 4.1 Verkehrslasten

Die Größe der Verkehrslast auf Dammkronen und Bermen ist in Abhängigkeit der Bemessungssituation von den zuständigen Dienststellen festzulegen. Bei befahrbaren Dammkronen und Bermen ist eine Verkehrslast von mindestens 10 kN/m<sup>2</sup> anzusetzen.

### 4.2 Wasserstände

#### 4.2.1 Nicht hochwasserbelastete Dämme

Bei nicht hochwasserbelasteten Dämmen an Schifffahrtskanälen ist für die Ermittlung der Dammdurchströmung in allen Bemessungssituationen der obere Betriebswasserstand BWo (siehe Richtlinien für Regelquerschnitte von Schifffahrtskanälen des BMV [25]) als Bemessungswasserstand anzusetzen.

#### 4.2.2 Hochwasserbelastete Dämme

Sowohl für die Ermittlung der Dammdurchströmung als auch für den Ansatz der Wasserdruckbelastung sind die in den einzelnen Bemessungssituationen maßgebenden Hochwasserstände (bzw. die zu Grunde zu legenden jährlichen Hochwasserüberschreitungswahrscheinlichkeiten) in Abstimmung mit den für den Hochwasserschutz zuständigen Behörden festzulegen. Die nachstehend für die einzelnen Bemessungssituationen aufgeführten Jährlichkeiten  $n$  (= Reziprokwert der jährlichen Hochwasserüberschreitungswahrscheinlichkeiten) sind als Anhaltswerte zu verstehen und im Einzelfall festzulegen.

Dämme können unter bestimmten Randbedingungen auch auf der Luftseite eingestaut werden (z. B. Flusseitendämme im Bereich von Hochwasserrückhalteräumen). In diesem Fall sind die entsprechenden Wasserstände auf der Luftseite in den Berechnungen zu berücksichtigen.

*Anmerkung: Die Festlegung der maßgebenden Hochwasserstände für bestimmte Jährlichkeiten erfordert i. A. eine Niederschlag-Abflussmodellierung für das Einzugsgebiet auf Grundlage extremwertstatistischer Verfahren sowie eine hydrodynamische Abflussmodellierung zur Bestimmung der Abfluss-Wasserstands-Beziehung.*

Folgende Wasserstände sind in den Bemessungssituationen anzusetzen:

#### **Ständige Bemessungssituation (BS-P):**

In der ständigen Bemessungssituation (BS-P) ist der für den Damm maßgebende Bemessungshochwasserstand BHW anzusetzen. Dieser entspricht i. d. R. einem Hochwasserstand für ein statistisch einmalig oder selten während der zu erwartenden Nutzungsdauer des Dammes auftretendes Hochwasser ( $n \approx 50 - 100$  a). Mindestens ist der höchste Schifffahrtswasserstand HSW anzusetzen.

### **Vorübergehende Bemessungssituation (BS-T):**

In der vorübergehenden Bemessungssituation (BS-T) ist der maßgebende Bemessungshochwasserstand für Bau- oder Revisionszustände  $BHW_{\text{Bau}}$  im Einzelfall festzulegen. Wird dieser auf eine jährliche Hochwasserüberschreitungswahrscheinlichkeit bezogen, so ist dabei die Bauzeit zu berücksichtigen.

### **Außergewöhnliche Bemessungssituation (BS-A):**

Bei Hochwasser als außergewöhnliche Einwirkung ist in der außergewöhnlichen Bemessungssituation (BS-A) ein Wasserstand bis OK Dammkrone bzw. der maximal mögliche Wasserstand anzusetzen. Alternativ kann auch ein Hochwasserstand mit einer deutlich geringeren Hochwasserüberschreitungswahrscheinlichkeit ( $n \approx 200 - 1000 \text{ a}$ ) als in der ständigen Bemessungssituation (BS-P) angesetzt werden.

Bei einer anderen außergewöhnlichen Einwirkung nach Kapitel 3 ist in der außergewöhnlichen Bemessungssituation (BS-A) der Bemessungshochwasserstand BHW entsprechend BS-P anzusetzen.

Bei Hochwasser als außergewöhnliche Einwirkung während eines Bau- oder Revisionszustandes ist in der außergewöhnlichen Bemessungssituation (BS-A) ein über den für den Bauzustand festgelegten Bemessungshochwasserstand  $BHW_{\text{Bau}}$  hinausgehender Wasserstand anzusetzen. Der maßgebende Wasserstand sowie die ggf. erforderlichen Maßnahmen bei Überschreitung des bauzeitlichen Bemessungswasserstandes  $BHW_{\text{Bau}}$  sind im Einzelfall festzulegen.

Bei einer anderen außergewöhnlichen Einwirkung nach Kapitel 3 während eines Bau- oder Revisionszustandes ist in der außergewöhnlichen Bemessungssituation (BS-A) der bauzeitliche Bemessungshochwasserstand  $BHW_{\text{Bau}}$  entsprechend BS-T anzusetzen.

## **4.3 Kapillarkohäsion**

Bei bestehenden Dämmen darf eine Kapillarkohäsion (scheinbare Kohäsion) auf Grund von Oberflächenspannungen des Porenwinkelwassers oberhalb der höchstmöglichen Sickerlinie mit einem charakteristischen Wert von  $c_{c,k} = 5 \text{ kN/m}^2$  unter folgenden Bedingungen berücksichtigt werden (Bilz und Vieweg [1]):

- es muss ein Verdunstungsschutz für den Boden, z. B. eine geschlossene Grasnarbe, vorhanden sein und
- das Dammmaterial muss eine Körnungslinie haben, bei der  $d_{50} < 0,6 \text{ mm}$  und  $d_{85} < 2 \text{ mm}$  ist.

Die Kapillarkohäsion darf bei der Ermittlung der Standsicherheit von Böschungen neuer Dämme und Einschnitte auf Grund des fehlenden Verdunstungsschutzes nicht berücksichtigt werden.

## **4.4 Durchwurzelungskohäsion**

Bei der Überprüfung der Standsicherheit von bestehenden Dämmen mit dichtem, lückenlosem Grasbewuchs kann für den Nachweis der Standsicherheit der Einfluss der Durchwurzelung durch den

Ansatz einer Durchwurzelungskohäsion mit einem charakteristischen Wert von maximal  $c_{w,k} = 7 \text{ kN/m}^2$  in einer oberflächennahen, 0,2 m dicken Schicht berücksichtigt werden (Hähne [18]). Die Durchwurzelungskohäsion darf nicht zusätzlich zur Kapillarkohäsion angesetzt werden. Der Einfluss aus Wurzeln anderer Pflanzen wird nicht berücksichtigt.

Der Einfluss einer Vegetationsschicht (z. B. Mutterbodenschicht) auf die Durchlässigkeit ist grundsätzlich zu prüfen (vgl. Kapitel 5.3.2).

## 4.5 Ermittlung der Dammdurchströmung

### 4.5.1 Dammdurchströmung in der BS-P

Die Standsicherheit eines Dammes wird bei Durchströmung maßgeblich durch die daraus resultierenden Strömungskräfte beeinflusst. In diesem Fall sind als Grundlage für die Standsicherheitsberechnung die Grundwasserpotenzialverteilung mit der freien Grundwasseroberfläche im Dammkörper (Sickerlinie) und ggf. sich ergebende Wasseraustritte an der Dammböschung (Sickerstrecke) zu ermitteln.

Bei Kanälen mit einer intakten, vollständigen Dichtung des Kanalbettes kann die Strömungsberechnung in der ständigen Bemessungssituation (BS-P) entfallen. Wenn auf Grund des Zustands der Dichtung oder auf Grund der im Dammbereich gemessenen Grundwasserstände von einer erhöhten Zusickerung aus dem Kanal und damit von einer verminderten Wirksamkeit der Dichtung auszugehen ist, ist jedoch auch in der ständigen Bemessungssituation (BS-P) eine Strömungsberechnung durchzuführen. Dabei ist die verminderte Wirksamkeit der Kanaldichtung durch eine auf der sicheren Seite abgeschätzte Erhöhung der Durchlässigkeit der Dichtung zu berücksichtigen. Dazu sollte möglichst eine Kalibrierung des Berechnungsmodells auf Grundlage der gemessenen Grundwasserstände erfolgen. Die Erhöhung der Durchlässigkeit kann auf Teilbereiche der Dichtung beschränkt werden (z. B. durchwurzelte Bereiche in der Wasserwechselzone).

*Anmerkung: Für eine intakte, qualifizierte Tondichtung entsprechend Regelbauweise kann die Durchlässigkeit mit  $k = 10^{-8} \text{ m/s}$  angesetzt werden.*

Eine Berechnung der Dammdurchströmung in der ständigen Bemessungssituation (BS-P) ist auch erforderlich bei:

- Dichtungen, die nur eine Verlängerung des Sickerwegs bewirken,
- hohen, nicht durch Zusickerung aus dem Gewässer verursachten Grundwasserständen, die eine Durchströmung des Dammes bewirken können (z.B. bei einseitigen Dammsituationen),
- Dämmen, die nur bei Hochwasser (BHW) durchströmt sind und
- nicht planmäßig, sondern nur durch natürliche Kolmations- oder Sedimentationsschichten gedichteten Damnstrecken von Kanälen und Flüssen.

Die gegenüber dem Dammmaterial verminderte Durchlässigkeit einer Kolmationsschicht kann in der Strömungsberechnung berücksichtigt werden, wenn diese durch langfristige Grundwasserstandsmessungen belegt ist. Dabei ist die Durchlässigkeit der Kolmationsschicht auf der sicheren Seite liegend

abzuschätzen, um eine reduzierte Wirksamkeit dieser Schicht auf Grund möglicher Maßnahmen (z. B. Sohlbaggerungen) oder Einwirkungen (z. B. Hochwasser) zu berücksichtigen.

#### 4.5.2 Dammdurchströmung in der BS-A

In einer außergewöhnlichen Bemessungssituation (BS-A), bei der der Ausfall einer Dichtung angenommen wird, ist diese, auf der sicheren Seite liegend, i. A. als hydraulisch vollständig unwirksam anzusetzen. In der Berechnung ist dabei die Durchlässigkeit der Dichtung der des Dammkörpers bzw. des Untergrunds gleichzusetzen. Dies gilt auch für natürliche Kolmations- und Sedimentationsschichten, die eine Abdichtung des Fluss- oder Kanalbetts bewirken.

Ergibt sich unter Berücksichtigung eines vollständigen Ausfalles der Dichtung rechnerisch keine ausreichende Böschungsstandsicherheit, kann der in der Strömungsberechnung anzusetzende Dichtungsausfall auf Teilbereiche der Dichtung begrenzt werden. Die Größe dieser Teilbereiche ist auf der sicheren Seite liegend festzulegen. Dies setzt jedoch voraus, dass durch eine Überwachung der Grundwasserverhältnisse der Teilausfall der Dichtung erkannt werden kann. Soll eine mögliche Fuge zwischen Dichtung und Bauwerk abgebildet werden, so ist die Durchlässigkeit des Fugenbereiches entsprechend Anhang 2 zu wählen.

Der in der Strömungsberechnung anzusetzende Dichtungsausfall kann dabei sowohl auf einen Teilabschnitt mit theoretisch unendlicher Länge (zweidimensionales Modell) als auch auf eine lokale Teilfläche der Dichtung (dreidimensionales Modell) begrenzt werden. Die Größe und die Anordnung der anzusetzenden Fehlstelle in der Dichtung sind in Abhängigkeit von den örtlichen Randbedingungen festzulegen.

#### 4.5.3 Berechnung der Dammdurchströmung

Die Berechnung der Dammdurchströmung sollte in der Regel mittels numerischer Verfahren (z.B. Methode der finiten Elemente) anhand eines für einen Dammschnitt repräsentativen Querschnittes senkrecht zur Kanalachse für alle zu untersuchenden Bemessungssituationen durchgeführt werden. Die berechneten Grundwasserpotenzialverteilungen sind möglichst direkt in die Berechnung zur Ermittlung der Böschungsstandsicherheit zu übertragen.

Das zur numerischen Berechnung der Dammdurchströmung verwendete (i. A. vertikal-ebene) Grundwassermodell muss:

- die Dammgeometrie inkl. der hydraulisch wirksamen Einbauten,
- die Durchlässigkeit der maßgebenden Bodenschichtung des Dammes und des Baugrunds sowie
- die hydraulischen Randbedingungen

hinreichend genau abbilden.

Die Bodenschichtung und die Durchlässigkeiten im Modell sind auf Grundlage einer ausreichenden Erkundung des Dammmaterials und des Untergrunds festzulegen. Dabei ist insbesondere darauf zu achten, dass ggf. vorhandene, wasserstauende Schichten im Modell ausreichend berücksichtigt



werden. Ist auf Grund des Dammmaterials und des Einbauverfahrens oder auf Grund der Bodenerkundung mit einer deutlichen Anisotropie (Richtungsabhängigkeit) der Durchlässigkeit zu rechnen (i. A. höhere horizontale als vertikale Durchlässigkeit z. B. bei lagenweise verdichtetem Waschbergematerial), so ist diese Anisotropie im Modell zu berücksichtigen. Die Modellabmessungen sind so zu wählen, dass die Grundwasserverhältnisse im Untergrund, die einen Einfluss auf die Dammdurchströmung haben, ausreichend berücksichtigt werden. Dabei sind insbesondere für die hydraulischen Randbedingungen an den Modellrändern (z. B. geschlossene Modellberandung ohne Abstrom, vorgegebene Grundwasserpotenziale für Grundwasserabstrom) auf der sicheren Seite liegende Annahmen hinsichtlich der Dammdurchströmung für alle Bemessungssituationen zu treffen.

In einfachen Fällen (z. B. Damm aus homogenem Material auf undurchlässiger Aufstandsfläche ohne Einbauten, Dichtungen und Dräns) oder zur qualitativen Überprüfung numerischer Strömungsberechnungen können die Sickerlinie und die Sickerstrecke mittels analytischer Verfahren ermittelt werden (Davidenkoff [4]). Bei analytischer Berechnung der Sickerlinie sind die Grundwasserpotenziale für die Ermittlung der Böschungsstandsicherheit über die Vertikale jeweils als konstant anzusetzen (Annahme hydrostatischer Druckverhältnisse). Im Allgemeinen ist die analytische Ermittlung der Potenzialverteilung für Standsicherheitsberechnungen z. B. nicht möglich bei

- Dämmen aus unterschiedlichem Material,
- Einbauten, die eine vertikale Umlenkung der Strömung bewirken,
- inhomogenen Untergrundverhältnissen, die einen wesentlichen Einfluss auf die Dammdurchströmung haben,
- komplexen hydraulischen Randbedingungen sowie
- dem Ansatz begrenzter Fehlstellen in der Kanaldichtung.

Die numerische Strömungsberechnung ist i. A. für einen stationären (zeitunabhängigen) Zustand durchzuführen. Dies gilt auch für hochwasserbelastete Dämme, bei denen die Berechnung der Dammdurchströmung auf Grundlage der in den einzelnen Bemessungssituationen maßgebenden hydraulischen Randbedingungen (Hochwasserstände im Gewässer) durchzuführen ist.

*Anmerkung: Bei Hochwasser wird sich ein stationärer Zustand für die Dammdurchströmung auf Grund der zeitlich verzögerten Aufsättigung des Dammes i. A. nur bei lang anhaltend konstanten Hochwasserständen einstellen. Die stationären Berechnungen liegen dadurch hinsichtlich der hydraulischen Belastung der luftseitigen Dammböschung aus der Dammdurchströmung auf der sicheren Seite.*

Im Sonderfall des luftseitigen Einstaus von Dämmen (z.B. bei luftseitig angeordneten Retentionsräumen) ist zu prüfen, ob insbesondere beim Abstau (schnelle Entleerung des Retentionsraums) erhöhte hydraulische Belastungen des Dammkörpers auftreten können. In diesem Fall sollte die maximale hydraulische Belastung des Dammes durch eine instationäre Berechnung der Dammdurchströmung ermittelt werden. Eine instationäre Berechnung kann z. B. auch erforderlich sein, um die Durchströmung eines Dammes bei kurzzeitiger Aufnahme der Kanaldichtung im Rahmen von Baumaßnahmen

(BS-T) zu ermitteln, da der Ansatz eines stationären Zustandes für die Dammdurchströmung hier eine unrealistisch hohe Belastung darstellen kann.

Weitere Hinweise zur numerischen Berechnung der Dammdurchströmung werden in Anhang 1 und z. B. auch in [24] gegeben.

## 5 Nachweise und Sicherheiten bei Dämmen

### 5.1 Allgemeines

Zur Gewährleistung der Standsicherheit sind für die Luftseite der Dämme für alle Bemessungssituationen die notwendigen Nachweise zu führen. Dazu gehören die Nachweise

- ausreichender globaler und lokaler Standsicherheit (GEO-3),
- ausreichender Sicherheit gegen hydraulischen Grundbruch (HYD),
- ausreichender Sicherheit gegen Aufschwimmen (UPL),
- ausreichender Sicherheit gegen Materialtransport (HYD) sowie
- ausreichender Dimensionierung der dränenden Bauteile.

Ein wesentlicher Aspekt bei der Beurteilung der Standsicherheit von Dämmen ist die verbleibende Sicherheit beim Ausfall von Sicherungselementen. Der Ausfall von Sicherungselementen muss erkannt werden (VV-WSV 2301 [29]). Dies ist nicht erforderlich, wenn die Standsicherheit unter Berücksichtigung des Ausfalles des Sicherungselementes mit den Teilsicherheitsbeiwerten der ständigen Bemessungssituation (BS-P) nachgewiesen werden kann und die erhöhten Wasserverluste tolerierbar sind. Örtliche Rutschungen an der luftseitigen Böschung können in dieser Bemessungssituation in Kauf genommen werden, wenn sie keine nennenswerte Beeinträchtigung der Umgebung darstellen. Sicherungsmaßnahmen sind sofort nach Erkennen einzuleiten.

Ein Befall der Dämme durch Wühltiere stellt eine so große Gefahr für die Dammstandsicherheit dar, dass Wühltiere unbedingt vertrieben und die festgestellten Wühltierschäden umgehend beseitigt werden müssen (Einzelheiten siehe DIN 19712:1997 [11]).

Für die Nachweise, die nicht in einschlägigen Normen oder Empfehlungen geregelt sind, werden, aufbauend auf den bisherigen Erfahrungen, in den Kapiteln 5.3 bis 5.6 die anzuwendenden Verfahren angegeben.

### 5.2 Standsicherheit der wasserseitigen Böschung

Für die Wasserseite eines Dammes ist die globale Standsicherheit der Böschung nach DIN 4084:2009 [8] nachzuweisen. Dies gilt insbesondere für den Fall ablaufendes Hochwasser. Zur Ermittlung der Porenwasserdruckverteilung können numerische instationäre Grundwasserströmungsmodelle eingesetzt werden.

Die lokale Standsicherheit der wasserseitigen Böschung ist im Regelfall durch eine ausreichend dimensionierte Böschungs- und Sohlsicherung gewährleistet. Der Erhalt der Böschungs- und Sohlsicherung und damit der lokalen Standsicherheit ist durch Unterhaltung sicherzustellen.

### 5.3 Standsicherheit der luftseitigen Böschung

#### 5.3.1 Globale Standsicherheit

Für die maßgebenden Bemessungssituationen ist der Nachweis der globalen Standsicherheit nach DIN 4084:2009 [8] zu führen.

#### 5.3.2 Lokale Standsicherheit

Die lokale Standsicherheit ist mit böschungparallelen Gleitflächen für nichtbindiges Dammmaterial bzw. flach einschneidenden Gleitkreisen für bindiges Dammmaterial nachzuweisen.

Bei Dämmen aus nichtbindigem Dammmaterial wird eine ausreichende Sicherheit eingehalten, wenn gilt:

$$\tan \beta \leq \tan \varphi'_d \quad \text{oberhalb der Sickerlinie}$$

$$\tan \beta \leq \frac{1}{2} \cdot \tan \varphi'_d \quad \text{unterhalb der Sickerlinie}$$

Hierbei ist  $\varphi'_d$  der Bemessungswert des Reibungswinkels  $\tan \varphi'_d = \tan \varphi'_k / \gamma_\phi$  und  $\beta$  der Böschungswinkel des Dammes.

Alternativ und bei bindigem Dammmaterial können flach einschneidende oberflächennahe Gleitfugen gemäß DIN 4084:2009-01 [8] untersucht werden.

Bei einer lückenlos mit Gras bewachsenen Böschung reicht unterhalb der potenziellen Sickerlinienaustrittsstelle für den Nachweis der lokalen Standsicherheit in der *außergewöhnlichen Bemessungssituation (BS-A)* eine Böschungsneigung von  $\beta \leq \varphi'_k/2$  aus, da die Durchwurzelungskohäsion den erforderlichen Sicherheitsabstand zum Grenzgleichgewicht gewährleistet. Dies gilt auch für neue, erstmalig eingestaute Dämme, bei denen sich während der ersten Vegetationsperiode erst noch eine geschlossene Grasnarbe bilden muss, wenn in dieser Zeit eine erhöhte Dammbewachung durchgeführt wird.

In der *außergewöhnlichen Bemessungssituation (BS-A)* muss im Falle eines Sickerwasseraustrittes an der Luftseite sichergestellt sein, dass keine Erosion der Oberfläche auftritt. Dies kann durch einen lückenlosen Grasbewuchs erreicht werden.

Eine Mutterbodenanddeckung der Dammböschung sollte vermieden werden, da eine gegenüber dem Dammmaterial dichtere Substratschicht zu einem Aufstau des Sickerwassers führen kann. Bei unmittelbarer Begrünung des anstehenden Materials kann davon ausgegangen werden, dass infolge der Durchwurzelung eine Auflockerung und damit eine Durchlässigkeitserhöhung erfolgt. Daher ist eine Einsaat unmittelbar in das Dammschüttmaterial einer Mutterbodenanddeckung vorzuziehen. Besteht das Dammmaterial aus für den Bewuchs ungeeignetem Material, so ist der Mutterboden nicht als Schicht anzudecken, sondern in den Boden einzuarbeiten. Eine Magerraseneinsaat kann dabei

durchgeführt werden, wenn sichergestellt ist, dass die Durchwurzelung so dicht wird, dass keine Oberflächenerosion auftreten kann und die oben beschriebenen Kriterien der Durchlässigkeit erfüllt sind.

### 5.3.3 Mindestquerschnitt

Der Mindestquerschnitt im Sinne dieses Merkblattes wird wie folgt definiert (Bild 2):

- Breite des Mindestquerschnitts  $b = 5 \text{ m}$  in 1 m Höhe über dem maßgebenden Wasserstand in der ständigen Bemessungssituation (BS-P) (BWo bei Kanalseitendämmen bzw. Bemessungswasserstand bei Stauhaltungsdämmen).

Wenn die Differenz zwischen Dammkrone und maßgebendem Wasserstand geringer als 1 m ist, sind die äußeren Begrenzungslinien des Mindestquerschnittes bis 1 m über den maßgebenden Wasserstand zu extrapolieren (siehe Detail Bild 2 oben).

- Neigung der luftseitigen Böschung:  $\beta = \varphi'_{k/2}$ ,

Als überbreite und/oder überhohe Dämme werden Dämme bezeichnet, deren Querschnitt den oben definierten Mindestquerschnitt enthält.

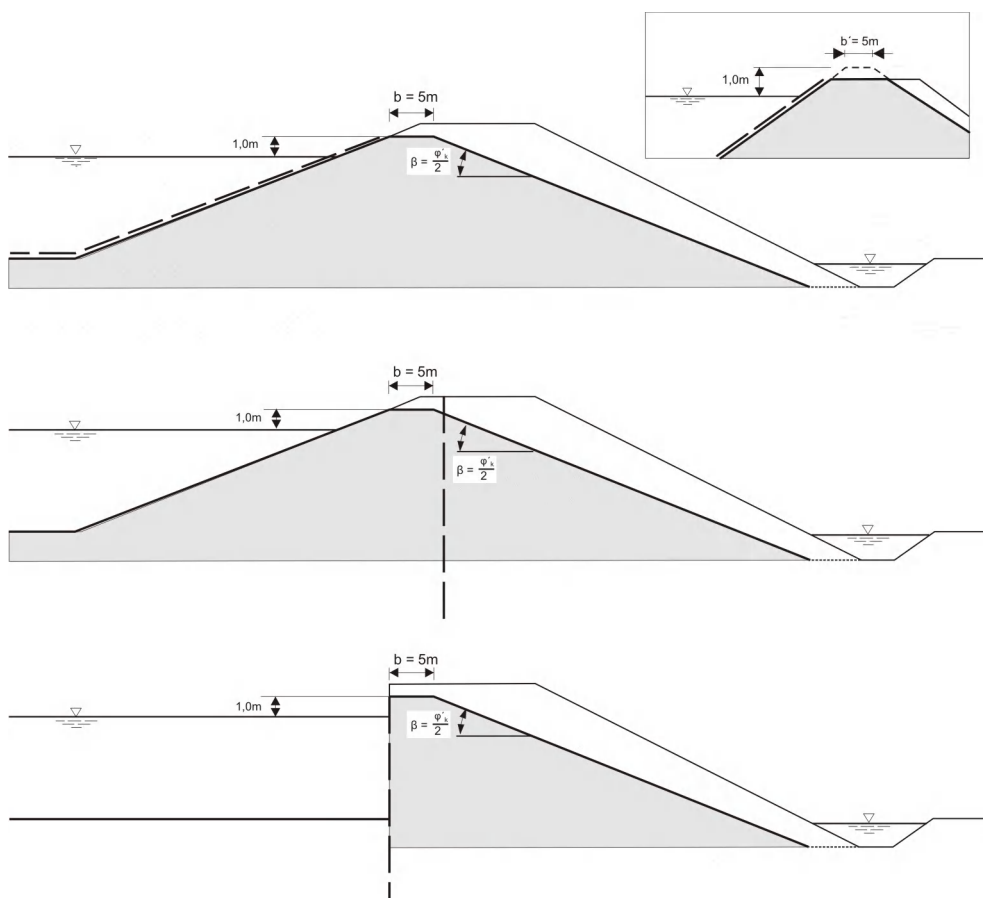


Bild 2: Mindestquerschnitt (schraffiert) bei Dämmen mit Oberflächendichtung der wasserseitigen Böschung (oben), mit Uferspundwand (unten) und mit Kernwand (Mitte)

Bei überbreiten und/oder überhohen Dämmen mit Dichtungen als erstes Sicherungselement (siehe Bild 2) gilt die Standsicherheit der luftseitigen Böschung in der außergewöhnlichen Bemessungssituation (Ausfall erstes Sicherungselement) als nachgewiesen.

Bei verankerten Uferspundwänden darf der Nachweis über den Mindestquerschnitt nur angewandt werden, wenn der Abstand zwischen dem Ende der Krafteinleitungsstrecke des Ankers und der äußeren Begrenzung des Mindestquerschnitts mindestens 3 m beträgt.

Der Nachweis mit dem Mindestquerschnitt setzt voraus, dass man örtliche Rutschungen an der luftseitigen Böschung ohne wesentliche Beeinträchtigung der Umgebung zulassen kann.

*Anmerkung: Diese Regelung berücksichtigt, dass sich bei einer Rutschung infolge Durchströmens die Oberfläche mit einer Neigung von ca.  $\beta = \varphi_k / 2$  einstellt. Die stützende Wirkung des abgerutschten Materials und eine mögliche zusätzliche (ungünstige) Oberflächenerosion werden nicht berücksichtigt.*

Die Standsicherheitsnachweise über den Mindestquerschnitt setzen einen homogenen Damm voraus. Sie dürfen nicht angewandt werden z. B. bei:

- geschichteten Dämmen, bei denen bei Durchströmung Stauhohizonte auftreten können,
- Dämmen mit Bodenmaterial in der Aufstandsfläche, das eine wesentlich geringere Scherfestigkeit aufweist als das Dammmaterial,
- möglichen gespannten Grundwasserverhältnissen unterhalb der Aufstandsfläche des Dammes.

#### **5.3.4 Sonderregelung bei niedrigen Dämmen**

Dämme, bei denen die Differenz zwischen BWo bei nicht hochwasserbelasteten Dämmen bzw. dem höchstmöglichen Wasserstand bei hochwasserbelasteten Dämmen und dem Dammfuß kleiner als 2 m ist, werden als niedrige Dämme eingestuft. Bei diesen gilt die Standsicherheit empirisch in allen *Bemessungssituationen* als gewährleistet, wenn die Dammbreite 1 m über dem jeweiligen Wasserstand mindestens 10 m beträgt und die Verbindungsgerade zwischen dem maßgebenden Wasserstand am Damm und dem Dammfußpunkt flacher als 1 : 10 geneigt ist (Bild 3). Wenn die Differenz zwischen Dammkrone und maßgebendem Wasserstand geringer als 1 m ist, sind entsprechend der Vorgehensweise beim Mindestquerschnitt (siehe Detail Bild 2 oben) die äußeren Begrenzungslinien des Mindestquerschnittes bis zur Höhe einer fiktiven Dammkrone (Breite 10 m) 1 m über dem maßgebenden Wasserstand zu extrapolieren.

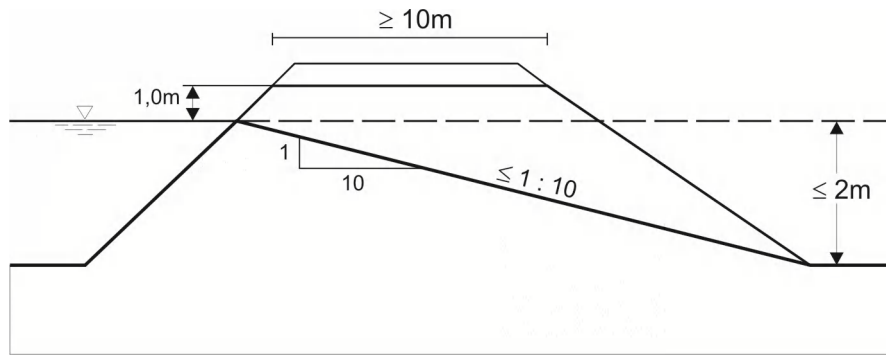


Bild 3: Vereinfachter Nachweis bei niedrigen Dämmen

Die in Kapitel 5.3.3 genannten Einschränkungen für die Standsicherheitsnachweise über den Mindestquerschnitt sind hier ebenfalls zu beachten.

#### 5.4 Aufschwimmen einer Bodenschicht

Der Nachweis gegen Aufschwimmen ist bei Dämmen z. B. bei Situationen zu führen, wie sie in Bild 4 dargestellt ist.

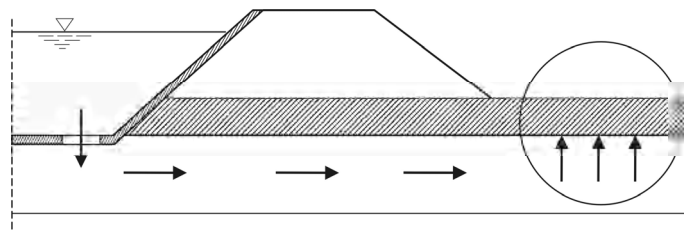


Bild 4: Typische Situation für die Möglichkeit des Aufschwimmens einer Bodenschicht

#### 5.5 Hydraulischer Grundbruch

Der hydraulische Grundbruch ist bei Dämmen z. B. bei Situationen nachzuweisen, wie sie in Bild 5 dargestellt ist.

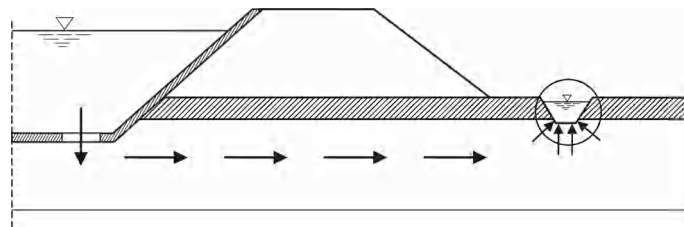


Bild 5: Typische Situation für die Möglichkeit eines hydraulischen Grundbruchs im Bereich des Seitengrabens

## 5.6 Materialtransport

Die Strömungskraft des Wassers im Boden kann Teile der Kornfraktionen von Bodenschichten oder den ganzen Boden in Bewegung setzen. Die Auswirkungen folgender drei Arten von Materialtransport sind zu untersuchen:

- Suffosion,
- Kontakterosion und
- Piping (Fugenerosion).

Die folgenden Hinweise zum Materialtransport auf Grund hydrodynamischer Belastung gelten nur für Erdstoffe mit  $d_{10} > 0,002$  mm. Bei Erdstoffen  $d_{10} \leq 0,002$  mm ist auf Grund der Haftfestigkeit der Bodenteilchen im Allgemeinen nicht mit Materialtransport zu rechnen (Ausnahme: dispersive Tone).

Beim Neubau wird grundsätzlich die Einhaltung der geometrischen Kriterien gefordert.

### 5.6.1 Geometrisches Kriterium für Suffosion und Kontakterosion

Beim Nachweis ausreichender Sicherheit gegen Materialtransport wird grundsätzlich zuerst untersucht, ob ein Transport von Feinbestandteilen des Bodens bei der vorhandenen Poren- und Korngeometrie überhaupt möglich ist (geometrisches Kriterium).

Böden mit unstetigen Körnungslinien (Ausfallkörnungen) sind hinsichtlich Suffosion besonders gefährdet. Böden, die eines der folgenden Kriterien erfüllen, gelten ohne besonderen Nachweis als suffosionssicher (Sicherheit von  $\eta = 1,5$ ):

- $U \approx 1$ ,
- $U < 10$  und eine Körnungslinie, die in halblogarithmischer Darstellung einer Geraden entspricht,
- $I_D > 0,6$  bei  $U > 10$  und eine Körnungslinie, die in halblogarithmischer Darstellung einer Geraden entspricht, mit  $I_D = (e_{\max} - e_n) / (e_{\max} - e_{\min})$ , oder
- $U < 8$  und stetige Körnungslinie.

Werden diese Kriterien nicht erfüllt, wird wegen der breiten Anwendungsgrenzen für den Nachweis ausreichender Sicherheit gegen Materialtransport das Verfahren nach Cistin und Ziems (in Cistin, [3]) empfohlen, das im Einzelnen und mit Beispielen im *Merkblatt für die Anwendung von Kornfiltern* (MAK) [22] erläutert wird.

Das Verfahren gilt sowohl für den Nachweis der Suffosion als auch für die Kontakterosion. Danach wird die Sicherheit durch die Einhaltung eines zulässigen Abstandsverhältnisses  $A_{50}$  gewährleistet, das als der Quotient aus den mittleren Korndurchmessern der Filterkörnung  $D_{50}$  und des zu filternden Bodens  $d_{50}$  definiert ist:  $A_{50} = D_{50} / d_{50}$

Das zulässige Abstandsverhältnis nach Cistin und Ziems enthält bereits eine Sicherheit von  $\eta = 1,5$ , die für alle Bemessungssituationen ausreichend ist.

### 5.6.2 Hydraulisches Kriterium für Suffosion und Kontakterosion

Kann das geometrische Kriterium für Suffosion bzw. Kontakterosion bei bestehenden Dämmen nicht mit den geforderten Sicherheiten erfüllt werden, so ist im nächsten Schritt zu prüfen, ob im vorliegenden Fall die Schleppkraft der Sickerströmung ausreicht, um einen Materialtransport von Feinbestandteilen im Boden hervorzurufen (hydraulisches Kriterium). Dazu muss zunächst das hydraulische Gefälle  $i_{\text{vorh}}$  im Boden ermittelt werden. Anschließend wird das vorhandene hydraulische Gefälle  $i_{\text{vorh}}$  in allen gefährdeten Bereichen mit dem kritischen Gefälle  $i_{\text{krit}}$  verglichen, bei dem Materialtransport auftreten kann. Als hydraulische Sicherheit  $\eta$  wird der Quotient

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

definiert. Die in allen Bemessungssituationen (BS-P, BS-T und BS-A) gleiche, geforderte hydraulische Sicherheit  $\eta$  ist in Tabelle 1 zu finden.

Tabelle 1: Sicherheiten  $\eta$  gegen Materialtransport

Transportart	Hydraulische Sicherheit $\eta$
	in allen Bemessungssituationen (BS-P, BS-T und BS-A)
Suffosion	2,0
Kontakterosion	1,5

Für die Kontakterosion ist die Größe des kritischen hydraulischen Gefälles  $i_{\text{krit}}$  von der Strömungsrichtung und dem Winkel zwischen Strömungsrichtung und Schichtung bzw. Schichtenfolge abhängig. Entspricht die Strömungsrichtung der Richtung der Schwerkraft, so lösen bereits sehr kleine hydraulische Gefälle eine hydrodynamische Bodenverlagerung aus, wenn diese geometrisch möglich ist. Umgekehrt, d. h. bei einer entgegen der Schwerkraft wirkenden Strömung, werden wesentlich größere Gefälle benötigt.

Auch beim hydraulischen Suffosionskriterium ist das kritische hydraulische Gefälle  $i_{\text{krit}}$  stark vom Winkel zwischen Strömungsrichtung und Richtung der Schwerkraft abhängig.

Die detaillierten hydraulischen Kriterien werden nachfolgend nicht wiedergegeben, sie sind in Busch, Luckner und Thieme [2] ausführlich beschrieben.

### 5.6.3 Mengenmäßige Abschätzung des transportierten Bodenmaterials

Kann bei bestehenden Dämmen weder das geometrische noch das hydraulische Kriterium erfüllt werden, so ist zu prüfen,

- wohin die Feinbestandteile transportiert werden können,



- welche Mengen bei anhaltender (BS-P) oder zeitlich begrenzter (BS-T und BS-A) Strömung transportiert werden können und
- welche Auswirkungen dies auf das Bauwerk haben kann.

Die mengenmäßige Abschätzung der Feinbestandteile kann nach Busch, Luckner und Thiemer [2] durchgeführt werden. Danach sind Materialumlagerungen in der Größenordnung von 3 % unbedenklich. Können Schäden nicht ausgeschlossen werden, die zu einer Beeinträchtigung der Funktionsfähigkeit oder der Dammstandsicherheit führen, so muss durch geeignete Maßnahmen ein Materialtransport verhindert werden.

#### **5.6.4 Piping (Fugenerosion)**

Der Nachweis gegen Piping ist bei Dämmen auf einer oberflächennahen bindigen Schicht, unter deren Schutz eine Fugenerosion entstehen kann und deren Lage einen Abtransport des erodierten Bodens (z. B. in den Seitengraben) zulässt, und bei Bauwerken in Dämmen notwendig.

Für den Nachweis gegen Fugenerosion unter einer bindigen Deckschicht wird das Verfahren von Sellmeijer (in TAW, Technical Report on Sand Boil [27]) empfohlen. Eine Übersicht über Nachweisverfahren gegen Fugenerosion gibt Sauke [26].

Bei Bauwerken in Dämmen ist unter der Annahme ungünstiger geohydraulischer Randbedingungen nachzuweisen, dass kein örtliches Versagen (Hydraulischer Grundbruch, Aufschwimmen oder Böschungsbruch) auftreten kann und dass der Boden erosions- und suffosionsstabil ist (siehe Kapitel 7).

## **6 Dichtungen und Dräns**

### **6.1 Dichtungen**

Bei der Dichtung eines Kanals ist zwischen vollkommenen und unvollkommenen Dichtungen zu unterscheiden (Bild 6). Bei einer vollkommenen Dichtung wird die Dammdurchströmung unterbunden, z. B. durch eine Oberflächendichtung, die das Bett der Wasserstraße vollständig auskleidet, oder durch eine Innendichtung, die in einen undurchlässigen Untergrund einbindet. Eine unvollkommene Dichtung verlängert lediglich den Sickerweg. Dadurch wird die Strömungsbelastung verringert.

Die verschiedenen Dichtungen werden nach folgenden Kriterien beurteilt:

- Beständigkeit gegenüber mechanischem Angriff (Schiffsstoß, Setzungsdifferenzen etc.),
- kontrollierbare Ausführung (Maßhaltigkeit, Rissefreiheit etc.),
- Erosionsbeständigkeit,
- Widerstand gegen Durchwurzelung.

Auf Grundlage dieser Kriterien ergibt sich für die üblichen Dichtungsmaterialien und Dichtungstypen die in Tabelle 2 dargestellte Beurteilungsmatrix.

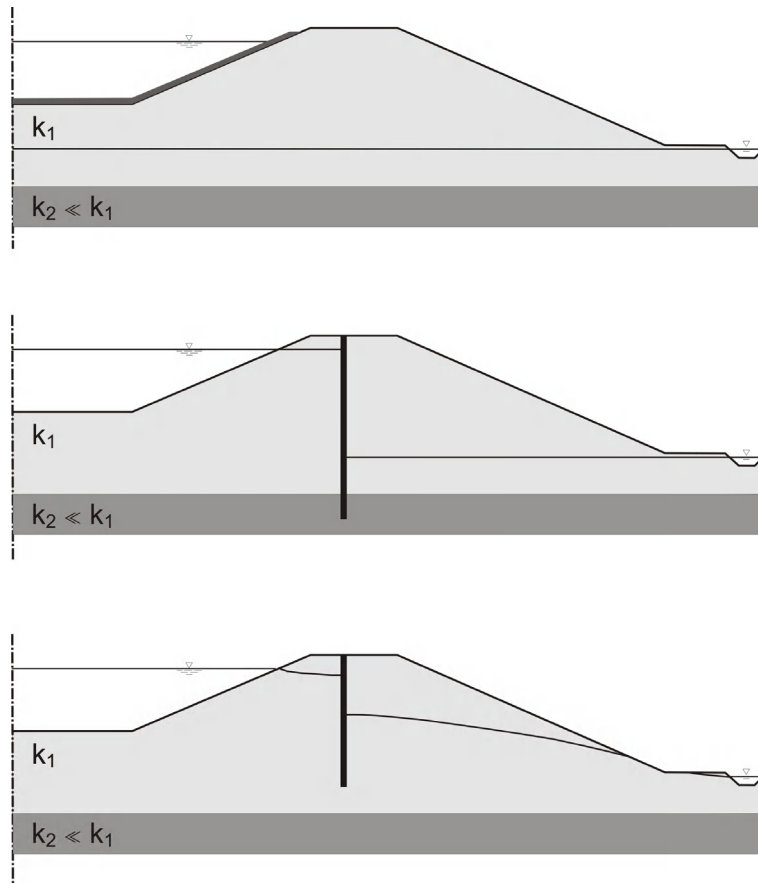


Bild 6: Beispiele für vollkommene (oben und Mitte) und unvollkommene Dichtungen (unten)

Weitere Einzelheiten zu Dichtungen sind in folgenden Regelwerken zu finden:

- Merkblatt Anwendung von Regelbauweisen für Böschungs- und Sohlensicherungen an Wasserstraßen (MAR) [23],
- Empfehlungen zur Anwendung von Oberflächendichtungen an Sohle und Böschung von Bundeswasserstrassen [17],
- Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen - Wasserbau (ZTV-W), Leistungsbereich 210 (LB 210) [30],
- Empfehlungen des Arbeitsausschusses „Ausführung von Asphaltarbeiten im Wasserbau“ (EAAW) [15],
- Empfehlungen für die Anwendung von Geosynthetischen Tondichtungsbahnen (EAG-GTD) [16].

Bei Bergsenkungen sind die erhöhten mechanischen Beanspruchungen bei der Auswahl des Dichtungstyps zu berücksichtigen.

Bei der Herstellung von Dichtungen ist auf Rissefreiheit zu achten, da Risse bevorzugt durchwurzelt werden.

Beim Einbringen einer Dichtung in einen bestehenden Grund- oder Sickerwasserstrom darf die Strömungskraft keinen Materialtransport des noch nicht abgebundenen Dichtungsstoffes (z.B. Suspension) bewirken.

Tabelle 2: Beurteilung von Dichtungen

Typ der Dichtung		Kriterien						
		kontrollierbare Ausführung	Beständigkeit gegenüber mechanischem Angriff	Widerstand gegen Durchwurzelung	Erosionsbeständigkeit	Instandsetzung	Korrosion Frost	
Oberflächen-dichtung	Spundwand <sup>)</sup>	0	0	+	+	+	-	
	Hartdichtung (Beton u. ä.)	Einbau im Nassen	0	-	0	+	0	0
		Einbau im Trockenen	+					
	Asphalt (Einbau im Trockenen)		+	-	-	+	-	0
	Naturton (nach ZTV-W, LB 210 [17])	Einbau im Nassen	0	0	-	0	0	0
		Einbau im Trockenen	+					
	GTD	Einbau im Nassen	0	0	-	0	0	0
		Einbau im Trockenen	+					
Innen-dichtung	Schmalwand	-	-	0	0	-	+	
	Spundwand	-	+	+	+	-	+	
	Schlitzwand/Bohrpfahlwand	+	+	+	+	-	+	
	Mixed-In-Place-Wand	0	0	0	0	-	+	
	Düsenstrahlwand	-	0	0	0	-	+	
	geschüttete Kerndichtung	+	+	0	0	-	+	

<sup>)</sup> eingebundener Teil wird wie Spundwand als Innendichtung beurteilt

„+“: gut, „-“: schlecht, „0“: neutral

## 6.2 Dräns

Dräns können in innenliegende und außenliegende Dränsysteme unterschieden werden. Durch innenliegende Dränsysteme wird die Sickerlinie im Damm abgesenkt. Außenliegende Dränsysteme beeinflussen die Sickerlinie im Damm nicht, sondern sichern die Böschung durch ihre Auflast (siehe Bild 7).

Beim Entwurf von innenliegenden Dränsystemen ist sicherzustellen, dass ein möglichst großer Abstand zwischen dem Gewässerbett und dem Drän vorhanden ist. Damit soll die Entstehung eines "hydraulischen Kurzschlusses" zwischen Kanalwasser und Drän, der wegen der dabei auftretenden hohen hydraulischen Gradienten zu Materialtransport und rückschreitender Erosion bis zum Versagen des Damms führen kann, vermieden werden. Hinweise für die Dimensionierung von innenliegenden Dräns am luftseitigen Böschungsfuß sind z. B. in Kunz und Poweleit [20] zu finden.

Wird die druckentlastende Wirkung eines Dräns in der ständigen Bemessungssituation (BS-P) angesetzt (Kapitel 3), so muss seine Wartung und Kontrolle sichergestellt sein und die Funktion ohne

signifikante Einschränkung des Betriebes wiederhergestellt werden können. In diesem Fall muss der Ausfall des Dräns in der außergewöhnlichen Bemessungssituation (BS-A) durch geeignete Kontrollen festgestellt werden können. Bei der Dimensionierung von Dräns ist Folgendes zu beachten:

- Filterstabilität sowie hydraulische Wirksamkeit des Dräns gegenüber dem zu dränierenden Material (siehe MAK [22] und MAG [21]),
- Nachweis der rückstaufreien Abfuhr der dem Drän zuströmenden Wassermenge, ggf. ausreichende Leistungsfähigkeit der Dränleitung unter Berücksichtigung des höchsten Wasserstandes im Vorfluter (siehe DIN 4095:1990 [9]).

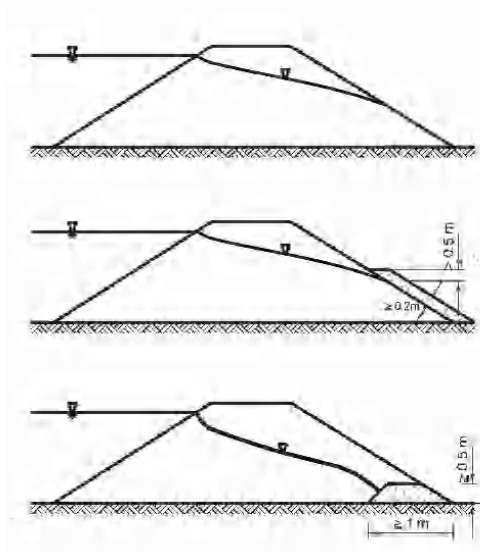


Bild 7: Auswirkung von außenliegenden und innenliegenden Dränsystemen auf die Sickerlinie

- Bei Auflastdräns ist die Oberkante mindestens 0,5 m über den Austrittspunkt der Sickerlinie zu legen, wie er sich nach der Berechnung (vgl. Kapitel 4.5) ohne Drän ergibt. Die Dicke von Dräns sollte 0,2 m nicht unterschreiten. Innenliegende Dräns am luftseitigen Böschungsfuß (Sohldräns und Dränageprismen) sollten mindestens 1 m in den Damm einbinden (siehe Bild 7).

Besteht die Gefahr einer Verockerung oder Versinterung, so sollte kein geotextiler Filter eingesetzt werden (siehe auch MAG [21]).

*Anmerkung: Verockerung und Versinterung können bei Verwendung eines geotextilen und eines mineralischen Filters zur Verringerung der Durchlässigkeit und damit zum Wasseraufstau hinter dem Drän führen. Ein mineralischer Drän ohne oder mit nur geringer Auflast kann in einem solchen Fall örtlich aufbrechen, was durch die Zugfestigkeit von Geotextilfiltern verhindert wird. In der Regel wird bei erhöhtem Wasserdruck hinter bzw. unter dem zugesetzten Filter ein Abheben des Dräns erfolgen, was einerseits eine Entlastung zur Folge hat, andererseits mit unerwünschtem Materialtransport verbunden sein kann. Da Bauweisen mit geotextilen Filtern i. A. leichter sind, ist bei diesen die Gefahr des Abhebens höher.*

Kornfilter können zur Verringerung der Gefahr von Verockerung oder Versinterung offener, aber mit längerem Fließweg dimensioniert werden, wenn ein gewisser Feinteilverlust in Kauf genommen werden kann.

Bei der Ausbildung von Dräns ist zu entscheiden, ob eine Dränschicht ausreicht oder ob zusätzlich eine Dränleitung erforderlich ist, um einen Abfluss zum Vorfluter zu ermöglichen. Bei Dräns, die über ihre gesamte Länge direkt in einen Seitengraben entwässern, ist im Allgemeinen keine Dränleitung erforderlich.

Dränleitungen sollten kontrollierbar ausgeführt werden und müssen am Fuß des Dräns verlegt werden um eine Unterläufigkeit zu vermeiden. Es empfiehlt sich die Ausführung mit 2/3 geschlitzten oder 2/3 gelochten Dränleitungen. Die Schlitz- bzw. Lochweite ist auf das Dränmaterial abzustimmen, ggf. ist ein Zweistufenfilter auszuführen. Kontrollschächte sind mit einem Sandfang auszustatten, um einen möglichen Materialtransport feststellen zu können. Ableitungen sind grundsätzlich an Kontrollschächte anzuschließen.

## **7 Bauwerke in Dämmen**

### **7.1 Allgemeines**

Bauwerke in Dämmen wie z. B. Düker, Durchlässe, Unterführungen, Widerlager von Kanalbrücken und Entnahmebauwerke stellen immer einen Fremdkörper mit erhöhtem Schadensrisiko dar. Infolge unterschiedlicher Steifigkeit von Damm und Bauwerk sind selbst bei einwandfrei ausgebildeten Anschlüssen Setzungsdifferenzen, die zu bevorzugten Sickerwegen führen können, nur schwer zu vermeiden. Dadurch besteht an den Grenzflächen zwischen Bauwerk und Dammschüttung bei Dammdurchströmung die Gefahr einer Fugenerosion bzw. rückschreitenden Erosion.

Wegen dieser Risiken muss beim Entwurf von Bauwerken in Dämmen sorgfältig geprüft werden, wo sich bevorzugte Sickerwege bei Durchströmung des Dammes, insbesondere bei Ausfall von Dichtungen (BS-A) einstellen können. Ein Austrag von Bodenmaterial in den Bereichen um das Bauwerk, in denen bei Durchströmung des Dammes ein Wasseraustritt aus dem Damm oder dem Untergrund auftreten kann, und eine dadurch verursachte rückschreitende Erosion ist durch konstruktive Maßnahmen (z. B. durch Auflastdräns im potenziellen Sickerwasseraustrittsbereich oder durch Sickerwegsverlängerungen) zu verhindern.

Die Untersuchung der Standsicherheit der Böschungen von Ein- und Auslaufgräben von Durchlässen oder Dükern ist nicht Gegenstand dieses Merkblattes. Die Grabenböschungen sind am Übergang zum Bauwerk konstruktiv zu sichern. Grundsätzlich sollte die Befestigung der Grabensohle und der Böschungen beim Anschluss an die Ein- bzw. Auslaufbauwerke durchlässig gestaltet werden, um einen Überdruck unter der Befestigung und damit ein Aufschwimmen zu vermeiden.

### **7.2 Nachweis gegen Fugenerosion**

#### **7.2.1 Vorgehensweise**

Um ausreichende Sicherheit gegen Piping (Fugenerosion) entlang der Grenzflächen zwischen Bauwerk und Damm bzw. Baugrund zu gewährleisten, darf bei Durchströmung des Dammes (z. B.

infolge einer Leckage in der Kanaldichtung) kein Austrag von Boden im Umfeld des Bauwerks stattfinden. Dazu ist unter Annahme ungünstiger geohydraulischer Randbedingungen nachzuweisen, dass:

- in den möglichen Bereichen des Austritts von Sickerwasser ausreichende Sicherheit gegen hydraulischen Grundbruch bzw. Aufschwimmen und gegen Böschungsbruch gegeben ist und
- der durchströmte Boden eine ausreichende Erosions- und Suffosionssicherheit besitzt.

Der im Folgenden beschriebene Nachweis der Sicherheit gegen Fugenerosion (siehe auch Kapitel 5.6.4) basiert auf numerischen Berechnungen der Dammdurchströmung im Bauwerksbereich. In den Strömungsberechnungen werden mögliche Hohlräume an den Grenzflächen zwischen Bauwerk und Dammschüttung berücksichtigt. Dabei ist überall dort eine offene Fuge und damit kein (bzw. nur ein geringer) Potenzialabbau anzusetzen, wo eine Hohlräumbildung wegen Besonderheiten des Baugrunds, der Bauwerksgeometrie oder des Bauverfahrens nicht ausgeschlossen werden kann. Tabelle 3 zeigt eine Übersicht über die Beurteilung der Gefahr einer Hohlräumbildung bei Bauwerken in Dämmen. Anhang 1 enthält Angaben zur modelltechnischen Berücksichtigung hydraulisch wirksamer Fugen in der Strömungsberechnung.

Ein Ausfall der hydraulischen Wirksamkeit von Teilen der Bauwerke (z. B. Flügelwand, Gleitsicherheitsspundwand) wird in der Regel nicht betrachtet. Bestehen jedoch Zweifel an ihrer hydraulischen Wirksamkeit, so ist die sickerwegsverlängernde Wirkung dieser Bauteile in keiner Bemessungssituation anzusetzen. Für den Ansatz von Dräns gelten die Kriterien aus Kapitel 3.

Zum Nachweis der Sicherheit gegen Fugenerosion ist die Standsicherheit des Dammes sowie die Erosions- und Suffosionssicherheit des Bodens unter Berücksichtigung der aus der Strömungsberechnung resultierenden Wasserdruck- und Strömungskräfte zu untersuchen. Um auf der sicheren Seite liegende Wasserdrücke und Strömungskräfte zu ermitteln, sind Strömungsberechnungen sowohl unter Annahme möglicher Fugen zwischen Bauwerk und Damm als auch ohne Ansatz von Fugen durchzuführen. In den Standsicherheitsnachweisen ist die Potenzialverteilung mit den jeweils ungünstigeren Wasserdrücken und Strömungskräften anzusetzen.

Die in den Kapiteln 3 bis 5 dargestellten Grundlagen für die Standsicherheitsuntersuchung von Dämmen sind auch auf Dämme im Bereich von Bauwerken anzuwenden. Insbesondere sind die gleichen Bemessungssituationen zu untersuchen.

Der Nachweis der Standsicherheit des Dammes im Bereich von Bauwerken mit dem Mindestquerschnitt (Kapitel 5.3.3) oder der Sonderregelung für niedrige Dämme (Kapitel 5.3.4) ist nicht zulässig.

Die aus den berechneten Potenzialverteilungen ermittelten Grundwasserdruckbelastungen auf das Bauwerk in den einzelnen Bemessungssituationen dienen auch als Eingangsgrößen für die Erstellung bzw. Überprüfung der Nachweise der inneren Standsicherheit (Bauwerksstatik) und der äußeren Standsicherheit (Grundbruch, Gleiten, Kippen, Aufschwimmen etc.) des Bauwerks im Dammkörper. Diese Nachweise sind in den einschlägigen Normen geregelt und nicht Inhalt des vorliegenden Merkblatts.

Tabelle 3: Beispiele zur Beurteilung der Gefahr einer Hohlraumbildung bei Bauwerken in Dämmen

Durchströmter Bereich	Potenzialabbau kann angesetzt werden	kein Potenzialabbau, Hohlraum (Fuge) nicht auszuschließen
Entlang einer geramnten Spundwand	X	
Entlang vertikaler, glatter und ebener Wände mit Hinterfüllung aus nichtbindigem Boden	X	
Unter einer in trockener Baugrube aus Ortbeton hergestellten Unterführungsanlage	X	
Unter einer in trockener Baugrube aus Fertigteilen hergestellten Unterführungsanlage		X
Unter einer vorgepressten oder eingeschwommenen Unterführungsanlage, die an Umfang / Sohlfuge verpresst wurde	X	
Unter einer vorgepressten oder eingeschwommenen Unterführungsanlage, die an Umfang / Sohlfuge <b>nicht</b> verpresst wurde		X
Unter flachgegründeten Bauteilen aus Ortbeton und Gründung	X	
Unter flachgegründeten Bauteilen aus Fertigteilen und Gründung		X
Unter pfahlgegründeten Bauteilen		X

### 7.2.2 Berechnung der Dammdurchströmung im Bauwerksbereich

Bei Durchströmung von Dämmen im Bauwerksbereich stellt sich infolge der Um- und Unterströmung sowie der räumlich begrenzten Ausdehnung möglicher hydraulisch wirksamer Fugen immer ein ausgeprägt dreidimensionales Strömungsfeld ein. Die aus der Dammdurchströmung resultierende Grundwasserpotenzialverteilung kann durch zweidimensionale (vertikal-ebene) Grundwasserströmungsmodelle nur unzureichend ermittelt werden. Auf Grund des hohen erforderlichen Aufwandes bei der Erstellung dreidimensionaler Grundwasserströmungsmodelle wird jedoch empfohlen, die Strömungsberechnung zunächst mittels vertikal-ebener Ersatzmodelle durchzuführen. Die vereinfachenden Annahmen sind dabei so zu wählen, dass mittels der Modellrechnungen jeweils auf der sicheren Seite liegende Potenzialverteilungen für die Standsicherheitsberechnungen ermittelt werden. Ergibt sich auf Grundlage der Berechnungen mit den vertikal-ebenen Ersatzmodellen keine ausreichende Dammstandsicherheit, so ist eine dreidimensionale Grundwasserströmungsmodellierung als verbesserte Grundlage für die Standsicherheitsberechnungen zu empfehlen. Diese Modellierung ist auch geeignet zur Überprüfung der Auswirkungen von geplanten Nachsorgemaßnahmen auf die Standsicherheit.

Für die Berechnung der Dammdurchströmung bei Ausfall der Dichtung und unter Berücksichtigung möglicher Fugen zwischen Bauwerk und Dammschüttung kann der zu berücksichtigende Dichtungsausfall auf einen Teilbereich beschränkt werden. Dies ist begründet durch die Ermittlung einer unrealistisch hohen Dammdurchströmung bei Überlagerung von vollständigem Dichtungsausfall und hydraulisch wirksamen Fugen. Für den Bereich des Dichtungsausfalls sollte in der vertikal-ebenen

Berechnung ein mindestens 2 m breiter (unendlich langer) Streifen und in der dreidimensionalen Berechnung eine Grundfläche von mindestens 50 m<sup>2</sup> (z. B. 2 m x 25 m) berücksichtigt werden. Dieser Bereich des Dichtungsausfalls ist so anzuordnen, dass sich ein möglichst kurzer Sickerweg zu den hydraulisch wirksamen Fugen ergibt. Für die Berechnung der Dammdurchströmung ohne Berücksichtigung von Fugen zwischen Bauwerk und Dammschüttung sollte dagegen in der Regel ein vollständiger Dichtungsausfall angenommen werden.

In begründeten Einzelfällen kann der Dichtungsausfall auch bei der Berechnung ohne Berücksichtigung von Fugen auf einen Teilbereich begrenzt werden. Ebenso kann der anzusetzende Bereich des Dichtungsausfalls bei der Berechnung mit Berücksichtigung von Fugen gegenüber den o. g. Größen verringert werden. Dies setzt jedoch voraus, dass durch ein geeignetes Beobachtungssystem ein größerer Dichtungsausfall erkannt wird und geeignete Sicherungsmaßnahmen durchgeführt werden können (siehe auch Kapitel 4.5).

Nachstehend sowie im Ablaufdiagramm in Anhang 3 ist die empfohlene Vorgehensweise bei der Grundwasserströmungsmodellierung für Dammbereiche mit Bauwerken dargestellt. Dabei wird angenommen, dass sich das Bauwerk im Bereich eines gedichteten Kanals befindet. Die Berechnungen für den durchströmten Damm sind hier für den Ausfall der Dichtung (BS-A) durchzuführen. Eine entsprechende Beispielrechnung für einen Dammbereich mit einem Durchlassbauwerk befindet sich in Anhang 4. Bei ungedichtetem Kanal oder Flussbett bzw. bei Dichtungen, die nur eine Sickerwegsverlängerung darstellen, ist die Dammdurchströmung für die ständige Bemessungssituation (BS-P) zu ermitteln. Bei hochwasserbelasteten Damfstrecken sind die maßgebenden Wasserstände in den einzelnen Bemessungssituationen entsprechend Kapitel 4.2.2 anzusetzen. Die nachstehend für Durchlass- oder Dükerbauwerke in gedichteten Kanalstrecken beschriebene Vorgehensweise kann auf andere Bauwerke sinngemäß übertragen werden.

### **Zweidimensionale (vertikal-ebene) Berechnungen**

- Im *ersten vertikal-ebenen Ersatzmodell* wird die Dammdurchströmung unter Berücksichtigung eines in der Regel vollständigen Ausfalls der Dichtung für den *Schnitt durch den Damm neben dem Bauwerk* ermittelt. Dies ist begründet durch die bei Berücksichtigung eines vollständigen Dichtungsausfalls zumeist nur geringe Beeinflussung der Dammaufsättigung durch ein vergleichsweise kleinräumiges Bauwerk. Zur Ermittlung der Standsicherheit der Dammböschung im Bereich des Bauwerks und der Wasserdruckbelastung auf die Bauwerksteile sind die ermittelten Grundwasserpotenziale auf den Dammquerschnitt mit dem Bauwerk zu übertragen.
- Im *zweiten vertikal-ebenen Ersatzmodell* wird die Dammdurchströmung ebenfalls unter Berücksichtigung eines in der Regel vollständigen Ausfalls der Dichtung für den *Schnitt durch den Damm mit dem Bauwerk jedoch ohne Berücksichtigung möglicher Fugen* zwischen Bauwerk und Boden ermittelt. Im Modell sind die Bauwerksteile, die im Wesentlichen senkrecht zur Strömungsrichtung angeordnet sind und die einen Aufstau des Grundwassers bewirken (Flügelwände, Spundwände, Ein- / Auslaufbauwerk), als undurchlässige Bereiche abzubilden. Nicht berücksichtigt wird das Durchlass- oder Dükerrohr, für dessen Bereich im Modell eine dem umgebenden Baugrund entsprechende Durchlässigkeit angesetzt wird. Dies ist begründet durch die vergleichsweise geringe Querausdehnung des Rohres und die durch die Umströmung nur geringfügig beeinflussten Grundwasserpotenziale. Falls unterhalb, neben oder oberhalb des Rohres ein Bodenmaterial mit deutlich erhöhter hydraulischer Durchlässigkeit einge-



baut wurde, ist dies im Modell entsprechend zu berücksichtigen. In diesem vertikal-ebenen Ersatzmodell werden die Auswirkungen der in Querrichtung als unendlich ausgedehnt angesetzten grundwasserstauenden Bauteile und durchlässigen Schichten auf die Dammdurchströmung überschätzt.

- Im *dritten vertikal-ebenen Ersatzmodell* wird die Dammdurchströmung ebenfalls für den *Schnitt durch den Damm mit dem Bauwerk jedoch mit Berücksichtigung möglicher Fugen* zwischen Bauwerk und Boden ermittelt. Diese hydraulisch wirksamen Fugen sind überall entlang des Bauwerks anzusetzen, wo auf Grund der Herstellung und der Anordnung der Bauwerksteile eine Hohlräumbildung nicht mit Sicherheit ausgeschlossen werden kann. Diese Fugen sind zusätzlich zu den ggf. zu berücksichtigenden Verfüllungsbereichen mit erhöhter hydraulischer Durchlässigkeit anzusetzen. In diesem Ersatzmodell kann der zu berücksichtigende Dichtungsausfall auf einen (senkrecht zur Strömungsrichtung unendlich ausgedehnten) Teilbereich des Berechnungsquerschnitts beschränkt werden (siehe oben).

Für die Grundwasserströmungsberechnung sind die Randbedingungen für die Grundwasserpotenziale im luftseitigen Grundwasseraustrittsbereich bzw. Grundwasserabstrombereich auf der sicheren Seite festzulegen. Ggf. sind die Randbedingungen für die Grundwasserströmungsberechnungen innerhalb ihrer möglichen Spannweite zu variieren (z. B. Wasserstände im Ein- / Auslaufgraben).

Auf Grundlage der mittels der drei vertikal-ebenen Ersatzmodelle berechneten Grundwasserpotenzialverteilungen sind die Wasserdruckbelastungen auf die Bauwerksteile zur Ermittlung / Überprüfung der inneren und äußeren Standsicherheit der Bauwerke zu bestimmen und die Nachweise für den Damm gegen Böschungsbruch, gegen hydraulischen Grundbruch bzw. Aufschwimmen im Ein- / Auslaufbereich und gegen Materialtransport zu führen. Dabei sind für die unterschiedlichen Nachweise jeweils die ungünstigsten Grundwasserpotenzialverteilungen der drei Ersatzmodelle zu berücksichtigen. Bei in das Gelände einschneidenden Ein- und Auslaufbereichen ergibt die Durchströmungsberechnung für den Schnitt durch den Damm neben dem Bauwerk (erstes vertikales Ersatzmodell) unrealistisch hohe Grundwasserpotenziale in den Ein- und Auslaufbereichen. In diesem Fall ist die Grundwasserpotenzialverteilung aus dem ersten vertikalen Ersatzmodell nicht maßgebend für den Nachweis gegen hydraulischen Grundbruch bzw. Aufschwimmen.

Falls die Berechnungen keine ausreichenden Sicherheiten ergeben, sollte zunächst untersucht werden, ob die erforderlichen Sicherheiten durch einfache, kostengünstige Maßnahmen hergestellt werden können. Ist dies nicht der Fall, ist zur Vermeidung eines unnötig hohen Instandsetzungsaufwandes eine dreidimensionale Grundwasserströmungsmodellierung als Grundlage für die Standsicherheitsermittlung und die Planung ggf. erforderlicher Instandsetzungsmaßnahmen zu empfehlen.

### **Dreidimensionale Berechnungen**

Im dreidimensionalen Grundwasserströmungsmodell sind alle die Dammdurchströmung beeinflussenden Bauwerksteile, Bodenschichten, hydraulischen Randbedingungen etc. hinreichend genau zu erfassen. Dabei sind wiederum Berechnungen sowohl mit Berücksichtigung hydraulisch wirksamer (hier räumlich begrenzter) Fugen zwischen Bauwerk und Boden als auch ohne Berücksichtigung von Fugen durchzuführen. Zusätzlich sind ggf. die hydraulischen Randbedingungen innerhalb ihrer möglichen Spannweite zu variieren.

- Im *ersten dreidimensionalen Strömungsmodell* werden *keine hydraulisch wirksamen Fugen* zwischen Bauwerk und Dammschüttung berücksichtigt. Die Berechnungen sind unter Annahme eines in der Regel *vollständigen Dichtungsausfalls* durchzuführen.
- Im *zweiten dreidimensionalen Strömungsmodell* sind *mögliche Fugen* zwischen Bauwerk und Dammschüttung zu berücksichtigen. Der in der Strömungsberechnung zu berücksichtigende *Dichtungsausfall* kann hier auf einen *realistischen Bereich* reduziert werden (siehe oben).

Für die Ermittlung der Wasserdruckbelastung auf die Bauwerksteile, der Sicherheit gegen Böschungsbruch im Bauwerksbereich und der Sicherheit gegen hydraulischen Grundbruch bzw. Aufschwimmen im Grundwasseraustrittsbereich (Bereich der Ein-/ Auslaufbauwerke) ist die jeweils ungünstigere Grundwasserpotenzialverteilung aus den beiden dreidimensionalen Modellrechnungen zu Grunde zu legen.

Die dreidimensionale Modellierung der Grundwasserströmung stellt im Unterschied zu den vereinfachten vertikal-ebenen Berechnungen auch ein geeignetes Hilfsmittel dar, um ggf. erforderliche Nachsorgemaßnahmen hinsichtlich ihrer standsicherheitserhöhenden Wirkung zu untersuchen.

## 8 Dammspektion

Alle Dämme sind durch Beobachtungen und ggf. durch ergänzende Messungen in ihrem Zustand zu überwachen um Schäden möglichst frühzeitig erkennen und den Soll-Zustand des Dammes wiederherstellen zu können. Dadurch soll vermieden werden, dass eine außergewöhnliche Bemessungssituation (Ausfall eines Sicherungselementes) zu einer ständigen Bemessungssituation wird. Die Durchführung der Dammspektion ist in der VV-WSV 2301 [29] geregelt.

Beobachtungssysteme in Dämmen dienen vor allem zur Ermittlung der Grundwasserströmungsverhältnisse und damit insbesondere zur Feststellung von Dammdurchströmungen, z.B. infolge einer Dichtungsleckage.

Hinsichtlich der Beobachtungssysteme ist in Dammstrecken ohne Bauwerke und Dammbereiche mit Bauwerken zu unterscheiden.

Bei Dammstrecken ohne Bauwerke, deren Standsicherheit nach MSD nachgewiesen ist, ist die visuelle Dammbesichtigung nach VV-WSV 2301 [29] ausreichend zur Überwachung des Dammes. Grundwasserbeobachtungssysteme sind nicht erforderlich, sofern sie nicht für die Grundwasserbeweissicherung oder an hochwasserbelasteten Dämmen zur Feststellung der Durchströmung benötigt werden. Wenn für den Nachweis der Dammstandsicherheit in der außergewöhnlichen Bemessungssituation nur ein Teilausfall der Dichtung zugrunde gelegt wurde, ist ein Beobachtungssystem erforderlich, mit dem eine Leckage möglichst frühzeitig erkannt werden kann.

Für Dammbereiche mit Bauwerken, deren Standsicherheit nach MSD nachgewiesen ist, ist das Erfordernis eines Beobachtungssystems im Einzelfall zu prüfen. Bei Bauwerken, die eine erhöhtes Gefährdungspotenzial des Dammes aufgrund möglicher bevorzugter Sickerwege an den Grenzflächen zwischen Bauwerk und Dammschüttung bewirken, ist ein System zur Beobachtung der Grundwasserhältnisse erforderlich. Dieses Beobachtungssystem soll die Feststellung einer erhöhten hydraulischen Belastung der Bauwerksteile sowie der Ein- und Auslaufbereiche und einer Leckage

bei gedichteten Kanälen ermöglichen. Bei Dräns, die hinter Bauwerksteilen zur Wasserdruckentlastung angeordnet sind, können Dränleitungen als Beobachtungssystem dienen, wenn sie eine Kontrolle der Grundwasserverhältnisse hinter dem Bauwerk ermöglichen (siehe auch Kapitel 3). Bei Bauwerken, von denen keine Erhöhung des Gefährdungspotenzials des Dammes ausgeht, ist wie bei Dammstrecken ohne Bauwerke eine visuelle Beobachtung nach VV-WSV 2301 [29] ausreichend.

*Anmerkung: Ein Bauwerk, von dem keine Erhöhung des Gefährdungspotenzials gegenüber der Dammstrecke ausgeht, kann z.B. ein tief unterhalb der Kanalsohle verlegter Rohrleitungsdüker sein, der keine oder weit vom Damm entfernt liegende Ein- und Auslaufbauwerke besitzt.*

## 9 Bewuchs auf Dämmen

### 9.1 Grundsätze

Bewuchs auf Dämmen wird in Grasnarbe (Gräser und Kräuter) und Gehölz (Bäume und Sträucher) unterschieden. Ein Gehölzbewuchs auf Dämmen ist grundsätzlich nicht zulässig. Der Bewuchs auf Dämmen soll aus einer dichten Grasnarbe bestehen, durch die der erforderliche Schutz der Dammböschung vor Erosion gewährleistet wird (siehe auch [11]). Auf mageren, trockenen und sonnigen Dammbereichen kann eine etwas lückenhafte Grasnarbe toleriert werden, solange der Oberboden an den offenen Stellen gut durchwurzelt ist. Die Grasnarbe wird durch Mähen ein- bis zweimal jährlich gepflegt, wobei der erste Schnitt nicht vor dem 15. Juli erfolgen sollte. Für die Dammbewachung kritische Bereiche müssen ggf. häufiger und früher gemäht werden. Wenn möglich ist das Mähgut abzutransportieren. Eine Düngung soll unterbleiben. Eine derartige Unterhaltung stellt sicher, dass die oberirdische lebende Pflanzenmasse in Bodennähe konzentriert ist und fördert eine gute Durchwurzelung des Oberbodens. Gehölze und hochwüchsige großblättrige Kräuter können sich nicht ausbreiten. Die Unterhaltung fördert auch den Artenreichtum und damit einen stockwerksartigen Aufbau des Wurzelsystems. Artenreiche magere Rasen können naturschutzfachlich wertvolle Lebensräume darstellen.

Gehölze auf Dämmen sind nur zugelassen, wenn der Querschnitt des Dammes über den in Kapitel 5.3.3 definierten Mindestquerschnitt hinausgeht (überbreiter und/oder überhoher Damm, siehe Kapitel 9.4).

Dämme, die keinen Mindestquerschnitt enthalten (siehe Kapitel 9.3), sind aus Gründen der Standsicherheit nicht mit Gehölzen zu bepflanzen.

*Anmerkung: Gehölze (Bäume und Sträucher) stellen für Dämme eine Gefährdung der Sicherheit dar, weil*

- *Gehölze die Ansiedlung von Wühltieren begünstigen, deren Gänge ebenso wie die Wurzeln abgestorbener Bäume bevorzugte Sickerwege sind,*
- *Windwurf von Bäumen zu einer erheblichen Schwächung des Dammquerschnitts führen kann und*
- *die Dammbewachung, die eine lückenlose Einsehbarkeit der luftseitigen Böschung voraussetzt, durch Bäume und Sträucher erheblich beeinträchtigt werden kann.*

Pappeln sind als Bewuchs an und auf Dämmen unbedingt zu vermeiden (siehe Anhang 5, Tabelle 1), da ihre Wurzeln nicht nur extrem weit reichen, sondern auch völlig unregelmäßig wachsen. Verrottete Pappelwurzeln stellen daher mit der durch sie hervorgerufenen Wasserwegigkeit eine besonders schwer abzuschätzende Gefährdung der Dammstandsicherheit dar. Pappeln sollten einen Mindestabstand von 30 m vom Dammfuß aufweisen [11].

Sich durch Samenanflug selbst entwickelnde Gehölze sind frühzeitig zur Vermeidung größerer Schäden und daraus erforderlicher größerer Eingriffe in den Dammkörper zu entfernen.

Abgestorbene bzw. zu entfernende Gehölze sind einschließlich des Wurzelstockes und der großen Wurzeln in einem Radius von mindestens 1 m um den Wurzelstock auszugraben. Dabei muss in jedem Einzelfall überprüft werden, ob die zur Wasserseite führenden Grobwurzeln ganz zu entfernen sind. Die Rodungslöcher sind mit gegenüber dem anstehenden Boden filterstabilem bzw. dem anstehenden Material aufzufüllen.

*Anmerkung: Bei den Rodungsarbeiten muss nicht jede einzelne Wurzel beseitigt werden. Entscheidend ist, dass die Rodungslöcher groß genug angelegt und mit filterstabilem Material gefüllt werden, so dass ein Austrag von Bodenmaterial bei einer konzentrierten Durchströmung im Bereich von verbliebenen, verrotteten Altwurzeln sicher durch den Filter verhindert wird.*

Ein Bewuchs von Auflast- oder Fußdräns und über bzw. in der Nähe von Dränleitungen durch Gehölze ist nicht zulässig und zu beseitigen, um ihre Funktionsfähigkeit durch das Wurzelwerk nicht zu gefährden. Hier ist nur dichter Grasbewuchs zulässig. Auf den Böschungen ist der Grasbewuchs kurz zu halten, um austretendes Sickerwasser sicher erkennen zu können.

Bei der Unterhaltung ist die HANATSCH-WSV [19] zu berücksichtigen.

## 9.2 Durchwurzelung von Oberflächendichtungen

Die Erfahrungen haben gezeigt, dass Wurzeln bei Oberflächendichtungen aus Asphalt durch diese hindurch wachsen und dadurch die Dichtungsfunktion beeinträchtigen können.

Bei Oberflächendichtungen aus Ton, insbesondere wenn sie nur mit einem geotextilen Filter und Schüttsteinen abgedeckt sind, und bei geosynthetischen Tondichtungsbahnen (GTD) muss ebenfalls von einer Durchwurzelung durch Röhrichte und Gehölze ausgegangen werden. Diese Situation wird begünstigt sobald sich im Ton Risse gebildet haben.

Nach Absterben der durchdringenden Wurzeln ist eine langfristig erhöhte Durchlässigkeit von Asphalt- oder Tondichtungen nicht auszuschließen.

Bei Dämmen mit Oberflächendichtungen ist deshalb auf der Wasserseite (Zone 1, Bild 9) eine Bepflanzung nicht zugelassen.

Spontanbewuchs ist frühzeitig zu entfernen. Vorhandener Röhrichtbewuchs ist, sofern er nicht gänzlich entfernt werden kann, zurückzuschneiden und dauerhaft durch Mähen (ggf. mehrmals jährlich) klein zu halten. Große Wurzelstöcke von Gehölzen sind zu entfernen. Die defekte Dichtung ist anschließend instand zu setzen.

Je nach Gefährdungspotenzial der betroffenen Dammabschnitte oder Dichtungsbauweisen kann auch eine grundlegende Instandsetzung mit vollständiger Beseitigung des Bewuchses erforderlich sein.

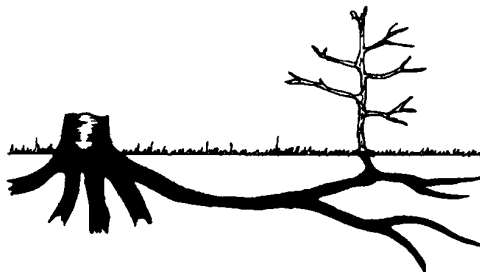
Bei Dämmen mit durchwurzelter Oberflächenabdichtung ist für den Nachweis der Standsicherheit in der ständigen Bemessungssituation (BS-P) eine Durchströmung auf Grund der verminderten Wirksamkeit der Dichtung im durchwurzelter Bereich zu berücksichtigen (siehe Kapitel 4.5). Für eine durchwuzelte Oberflächendichtung kann bis zur vollkommenen Entfernung des Bewuchses ein Durchlässigkeitsbeiwert von  $k = 5 \cdot 10^{-6}$  m/s bis 1 m Tiefe unterhalb des Normalstaus angesetzt werden. Voraussetzung hierfür ist, dass die Dichtung noch keine Auflösungserscheinungen infolge des Bewuchses zeigt. Bei dauerhaftem Bewuchs ist von einem Komplettausfall bis in 1 m Tiefe unterhalb des Normalstaus auszugehen.

Ggf. kann die Dammstandsicherheit bei durchwurzelter Dichtungen auch auf der Grundlage von Grundwasserstandsmessungen beurteilt werden (Beobachtungsmethode).

### 9.3 Dämme ohne Mindestquerschnitt

Gehölze auf Dämmen, die keinen Mindestquerschnitt nach Kapitel 5.3.3 enthalten, sind zu entfernen.

In einem 1. Schritt sind beschädigte, kranke und abgestorbene Gehölze sowie Gehölze, die Wurzelbrut (*Bild 8*) bilden (Pappeln und Robinien) sowie Gehölze im Bereich des unteren Drittels der luftseitigen Böschung zu entfernen. Die restlichen Gehölze sind in weiteren Schritten zu beseitigen.



*Bild 8: Wurzelbrut*

Bis zur Beseitigung der Gehölze und einer erforderlichen Sanierung ist in diesen Bereichen eine verstärkte Dammeobachtung durchzuführen.

Bei Dämmen ohne Dichtung oder mit Innendichtungen können auf der Wasserseite Röhricht und einzelne Strauchgruppen nach Anhang 5, Tabelle 2 mit einer maximalen Höhe von 4 m im Bereich der Wasserlinie und oberhalb davon zugelassen werden. Bei Dämmen mit Oberflächendichtungen sind die Regelungen aus Kapitel 9.2 zu beachten.

Vorhandene Gehölze, deren Erhalt aus naturschutzfachlichen Gründen erforderlich ist, müssen nicht entfernt werden, wenn die Gefährdung der Standsicherheit des Dammes ausgeschlossen werden kann. Dabei sind

- die möglichen Auswirkungen der Durchwurzelung,

- die Kraterbildung bei Windwurf und die damit verbundene Querschnittsschwächung des Damms sowie
- die Gefahr der Kolkbildung und Verklausung bei Hochwasser

zu betrachten.

Ohne entsprechende Nachweise sind vorhandene Gehölze nur zulässig, wenn

- der Wurzelkrater (Tiefe mind. 1,5 m) nicht in den potenziell durchströmten Dammbereich reicht und
- der Abstand der Gehölze von der wasserseitigen Böschungsschulter größer 5 m ist.

Bestehende Gehölze nach Anhang 5, Tabelle 3 sind auf einem Damm mit einer innenliegenden, durchwurzelungssicheren Wand (z. B. Spundwand) zulässig, wenn die Wand auf den aus einem Windwurf von Bäumen resultierenden Geländesprung bemessen ist. Der Abstand entsprechender Wände von der Wasserseite sollte 1 m über dem maßgebenden Wasserstand in der ständigen Bemessungssituation (BS-P) mindestens 5 m betragen (sinngemäß Bild 2, Mitte). Bei Oberflächenabdichtungen, deren Wirkung in der Standsicherheitsberechnung berücksichtigt wird, ist wasserseitig der Wand kein Bewuchs zulässig, da dieser die Dichtung durchwurzeln kann.

Das untere Drittel der Böschung ist auf jeden Fall gehölzfrei zu halten.

Eine Neuanpflanzung von Gehölzen auf Dämmen, die keinen Mindestquerschnitt enthalten, ist jedoch grundsätzlich nicht zulässig.

#### 9.4 Überbreite und überhohe Dämme

Bei Dämmen, deren Querschnitt über den in Kapitel 5.3.3 definierten Mindestquerschnitt hinausgeht, ist Bewuchs abhängig von dessen Lage zugelassen. Hierzu erfolgt eine Einteilung des Damms und des angrenzenden Hinterlandes in 5 Zonen. Einzelheiten über die zulässige Bepflanzung von Dämmen und des angrenzenden Geländes enthalten Tabelle 4 und Bild 9.

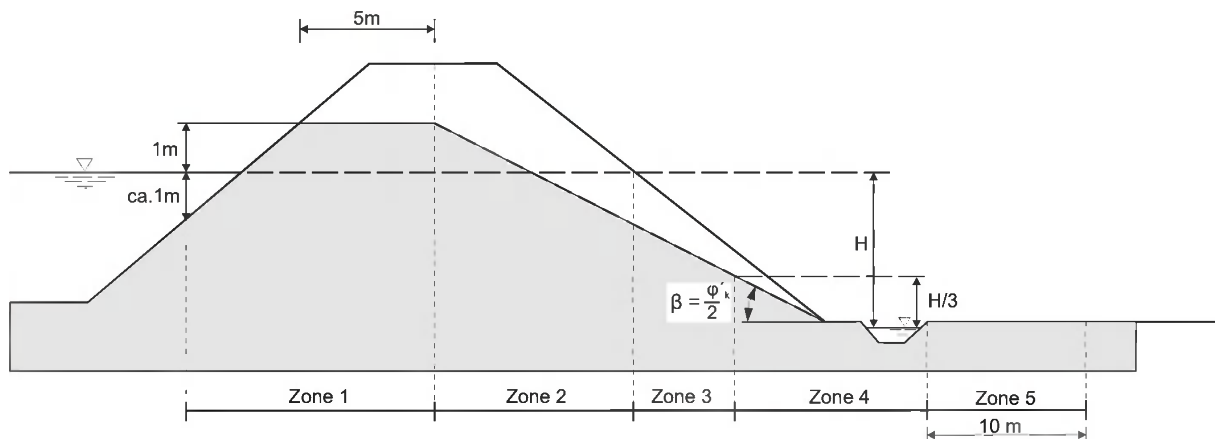


Bild 9: Zoneneinteilung für den zulässigen Bewuchs auf überbreiten und/oder überhohen Dämmen mit Mindestquerschnitt (schraffiert)

**Zone 1:**

Bei Dämmen mit Oberflächendichtung gelten die Regelungen aus Kapitel 9.2.

Bei Dämmen ohne Dichtung oder mit Innendichtungen können Röhricht und einzelne Strauchgruppen nach Anhang 5, Tabelle 2 mit einer maximalen Höhe von 4 m zugelassen werden. Größere Gehölze können wegen ihrer Windwurfgefährdung nicht zugelassen werden und sind zu entfernen. Bei Dämmen mit durchwurzelungssicherer Innendichtung gelten für bestehende Gehölze die Regelungen aus Kapitel 9.3.

Tabelle 4: Zoneneinteilung und zulässiger Bewuchs auf überbreiten und überhohen Dämmen

Zone	Bereich	Zulässiger Bewuchs bei überbreiten/überhohen Dämmen	Bemerkungen
1	Von ca. 1 m unterhalb der Wasserlinie bis zur luftseitigen Böschungsschulter des Mindestquerschnittes	Bei Dämmen mit Oberflächendichtung: Keine Gehölze, kein Röhricht	siehe Regelungen in Kapitel 9.2
		Bei Dämmen mit Innendichtung und Dämmen ohne Dichtung: Röhricht und einzelne Strauchgruppen möglich	
		Bei Dämmen mit durchwurzelungssicherer Innendichtung: Erhalt bestehender Gehölze zulässig	siehe Regelungen in Kapitel 9.3
2	Luftseitig der Dammkrone des Mindestquerschnittes	Bäume 2. und 3. Ordnung <sup>2+3</sup> ) und Sträucher (Anhang 5, Tabelle 3)	
3	Obere <sup>2</sup> / <sub>3</sub> der luftseitigen Dammböschung <sup>1)</sup>	Einzelgehölze und Gehölzgruppen aus Bäumen 2. und 3. Ordnung <sup>2+3</sup> ) und Sträuchern (Anhang 5, Tabelle 3)	Dammbeobachtung muss sichergestellt sein, maximale Flächendeckung durch Gehölze 50 %
4	Unteres Drittel der luftseitigen Dammböschung <sup>1)</sup>	Keine Gehölze	Bereich potenzieller Sickerlinienaustritte
5	Bis 10 m landseitig des Seitengrabens	Bäume 2. und 3. Ordnung <sup>2+3</sup> ) und Sträucher (Anhang 5, Tabelle 4)	Dammverteidigungsweg bzw. Betriebsstreifen beachten

<sup>1)</sup> Die Böschungseinteilung wird bezogen auf die Wasserspiegeldifferenz H zwischen dem oberen Betriebswasserstand und dem höchsten Wasserspiegel des Seitengrabens bzw. der Böschungsfußhöhe bei Fehlen eines Seitengrabens.

<sup>2)</sup> Bäume 2. Ordnung: zu erwartende Wuchshöhe bis 25 m

<sup>3)</sup> Bäume 3. Ordnung: zu erwartende Wuchshöhe bis 10 m

### **Zone 2:**

Hier sind Gehölze nach Anhang 5, Tabelle 3 zugelassen. Die Wurzeln der Gehölze dürfen jedoch nicht in den Mindestquerschnitt wachsen. Hierbei kann von einer Wurzeltiefe von ca. 1,5 m ausgegangen werden.

### **Zone 3:**

Zur Bepflanzung können Sträucher und Bäume (Anhang 5, Tabelle 3) verwendet werden, wobei die Flächendeckung durch Gehölze maximal 50 % betragen darf und die Wurzeln der Gehölze nicht in den Mindestquerschnitt wachsen dürfen (Wurzeltiefe von ca. 1,5 m). Die Flächendeckung beschreibt den Deckungsgrad, d. h. die durch belaubte Gehölze erzeugte Schattenfläche in % der Bodenoberfläche bei senkrechter Bestrahlung.

Die Unterhaltung der Bäume und Sträucher ist so vorzunehmen, dass die erforderliche Dammbewachung gewährleistet ist. Wachsen die Bäume und Sträucher zusammen bzw. ineinander, bzw. haben sich weitere Gehölze von selbst angesiedelt, so müssen einzelne Gehölze entfernt werden. Es darf kein dichter Bewuchs zugelassen werden, der einem Befall mit Wühltieren Vorschub leistet und eine ordnungsgemäße Dammbewachung verhindert.

*Anmerkung: Ein „auf den Stock setzen“ führt in der Regel durch die Vermehrung der Austriebe zu einer Verdichtung der Bestände und sollte deshalb vermieden werden. Ein Auslichten des Bewuchses ist deshalb vorzuziehen.*

### **Zone 4:**

Das untere Drittel der luftseitigen Böschung einschließlich des dammseitigen Seitengrabens darf nicht mit Gehölzen bepflanzt werden. Vorhandene Gehölze sind zu entfernen, um eine ordnungsgemäße Dammbewachung zu gewährleisten. Der vorhandene Gras- und Krautbewuchs ist so häufig zu mähen, dass ein eventueller Sickerwasseraustritt und Befall durch Wühltiere frühzeitig erkannt werden kann.

Die landseitigen Böschungen der Dammseitengräben sind in der Regel aus ökologischen Gründen nicht zu mähen.

### **Zone 5:**

Bis zu einem Abstand von 10 m landseitig des Dammseitengrabens können unter Berücksichtigung eines Betriebsweges Bäume 2. und 3. Ordnung und Sträucher nach Anhang 5, Tabelle 4 gepflanzt bzw. zugelassen werden.

Im Abstand von mehr als 10 m landseitig des Seitengrabens gibt es keine Beschränkung für Gehölze mit Ausnahme der für Pappeln (siehe Kapitel 9.1).

## **9.5 Sonderregelung bei niedrigen Dämmen**

Bei niedrigen Dämmen (vgl. Kapitel 5.3.4) bei denen die Standsicherheit nach Bild 2 nachgewiesen wurde, sind nur die Forderungen für Zone 1 und 2 zu erfüllen.



## 10 Literatur

- [1] *Bilz, P. und Vieweg, J.: Zur Größe der Kapillarkohäsion von Sanden, Geotechnik, Jg. 16 (1993), S. 65 - 71*
- [2] *Busch, K.-F., Luckner, L. und Thiemer, K.: Geohydraulik, Gebrüder Bornträger, Berlin und Stuttgart, 1993*
- [3] *Cistin, J.: Zum Problem mechanischer Deformationen nichtbindiger Lockergesteine durch die Sickerwasserströmung in Erddämmen, Wasserwirtschaft, 1967, Heft 2*
- [4] *Davidenkoff, R.: Deiche und Erddämme, Werner Verlag, Düsseldorf, 1964*
- [5] *DIN 1054:2010: Baugrund - Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau - Ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-1; Beuth Verlag, Berlin, Dezember 2010*
- [6] *DIN 4048-1:1987: Wasserbau, Begriffe; Stauanlagen, Beuth Verlag, Berlin, Januar 1987*
- [7] *DIN 4054:1977: Verkehrswasserbau Begriffe; Beuth Verlag, Berlin, September 1977*
- [8] *DIN 4084:2009: Baugrund, Geländebruchberechnung; Beuth Verlag, Berlin, Januar 2009*
- [9] *DIN 4095:1990: Baugrund, Dränung zum Schutz von baulichen Anlagen - Planung und Ausführung; Beuth Verlag, Berlin, Juni 1990*
- [10] *DIN 4149:2005: Bauten in deutschen Erdbebengebieten - Lastannahmen, Bemessung und Ausführung üblicher Hochbauten; Beuth Verlag, Berlin, April 2005*
- [11] *DIN 19712:1997: Flussdeiche; Beuth Verlag, Berlin, November 1997*
- [12] *DIN EN 1990: 2010: Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung; Deutsche Fassung EN 1990, Beuth Verlag, Berlin, Dezember 2010*
- [13] *DIN EN 1997-1: 2009: Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik - Teil 1: Allgemeine Regeln; Deutsche Fassung EN 1997-1, Beuth Verlag, Berlin, September 2009*
- [14] *DVWK Merkblätter zur Wasserwirtschaft, 210: Flussdeiche, Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin, 1986*
- [15] *Empfehlungen des Arbeitsausschusses „Ausführung von Asphaltarbeiten im Wasserbau“ (EAAW), Deutsche Gesellschaft für Geotechnik (DGGT), 1996*
- [16] *Empfehlungen für die Anwendung von Geosynthetischen Tondichtungsbahnen (EAG-GTD), DGGT, Deutsche Gesellschaft für Geotechnik (DGGT), 2002*
- [17] *Empfehlungen zur Anwendung von Oberflächendichtungen an Sohle und Böschung von Bundeswasserstraßen, Mitteilungen der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) Karlsruhe, Nr. 85 (2002)*
- [18] *Hähne, K.: Der Einfluss von Gräser- und Gehölzwurzeln auf die Scherfestigkeit von Böden und damit auf die Standsicherheit von Hängen und Böschungen, Dissertation am Fachbereich 14, Landschaftsentwicklung der Technischen Universität Berlin, 1991*

- [19] *Handlungsanweisung für die Berücksichtigung von Naturschutz und Landschaftspflege bei der Unterhaltung von Bundeswasserstraßen (HANATSCH-WSV), Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, 1999*
- [20] *Kunz, C. und Poweleit, A.: Dimensionierung von Sohldränschichten in Erddämmen, Bauingenieur 62 (1987), S. 493 - 497*
- [21] *Merkblatt für die Anwendung von geotextilen Filtern an Wasserstraßen (MAG), Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) Karlsruhe, 1993*
- [22] *Merkblatt für die Anwendung von Kornfiltern (MAK), Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) Karlsruhe, 1989*
- [23] *Merkblatt Anwendung von Regelbauweisen für Böschungs- und Sohlensicherungen an Wasserstraßen (MAR), Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) Karlsruhe, 2008*
- [24] *Odenwald, B., Hekel, U., Thormann, H.: Kap. 10: Grundwasserströmung - Grundwasserhaltung; in: Witt, K.J. (Hrsg.) Grundbau-Taschenbuch, 7. Auflage, Teil 2: Geotechnische Verfahren, Ernst & Sohn, Berlin, 2009.*
- [25] *Richtlinien für Regelquerschnitte von Schifffahrtskanälen, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS), 2011*
- [26] *Sauke, U.: Nachweis der Sicherheit gegen innere Erosion körniger Erdstoffe, Geotechnik 29 (2006), S. 43 – 54*
- [27] *Technical Report on Sand Boils (Piping), Technical Advisory Committee on Flood Defences (TAW), The Netherlands, 1999*
- [28] *Verwaltungsvorschrift der WSV des Bundes VV-WSV 1102 "Objektkatalog (ObKat)", Ausgabe 2005, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS)*
- [29] *Verwaltungsvorschrift der WSV des Bundes VV-WSV 2301 "Damminspektion", Ausgabe 1981, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Wohnungswesen (BMVBW)*
- [30] *Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen - Wasserbau (ZTV-W) für Böschungs- und Sohlensicherungen (Leistungsbereich 210), 2006, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS)*

## Anhang 1: Hinweise zur numerischen Berechnung der Dammdurchströmung

Die folgenden Hinweise zur numerischen Berechnung der Dammdurchströmung werden für eine vertikal-ebene Modellierung und stationäre Strömungsverhältnisse sowie für die vereinfachten Modellannahmen eines homogenen Dammes mit isotroper Durchlässigkeit auf undurchlässigem Untergrund gegeben. In Bild 1 ist der für die numerischen Beispielrechnungen verwendete Modellquerschnitt dargestellt.

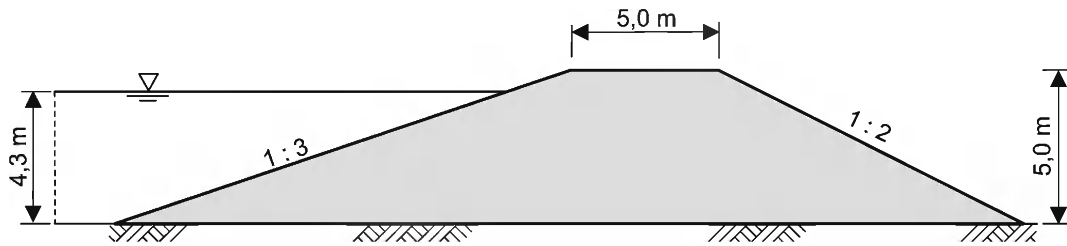


Bild 1: Vertikal-ebenes Berechnungsmodell eines Dammes

### Numerische Strömungsberechnung

Über die numerische Berechnung von Grundwasserströmungen existiert eine umfangreiche Fachliteratur (z. B. Pinder & Gray [1], Anderson & Woessner [2] oder Kinzelbach & Rausch [3]). Nachfolgend werden lediglich die Grundlagen für die Anwendung der Finite-Elemente-Methode zur stationären, vertikal-ebenen Berechnung der Dammdurchströmung kurz dargestellt.

Bei der Methode der Finiten Elemente wird die Diskretisierung (Unterteilung des Berechnungsmodells in Finite Elemente) zumeist mittels Dreieckselementen unterschiedlicher Größe durchgeführt, die eine flexible Anpassung der Diskretisierung an die Modellgeometrie und an Modellstrukturen (z. B. Bodenschichten, Einbauten oder hydraulische Randbedingungen) ermöglichen. Da bei der Diskretisierung mittels Dreieckselementen das Grundwasserpotenzial innerhalb der Elemente i. A. durch lineare Ansatzfunktionen abgebildet wird, müssen Bereiche mit großen Änderungen des hydraulischen Gradienten entsprechend fein diskretisiert werden, um die Potenzialänderungen ausreichend genau abbilden zu können. Im hier gewählten, vereinfachten Berechnungsmodell ist insbesondere eine relativ feine Diskretisierung für den Wasseraustrittsbereich an der luftseitigen Dammböschung (Sickerstrecke) erforderlich. Die wassergesättigten, hydraulischen Durchlässigkeiten werden innerhalb der einzelnen Elemente (bzw. Elementbereiche) als konstant angesetzt.

Zur Lösung der partiellen Differenzialgleichung zur Beschreibung stationärer, vertikal-ebener Grundwasserströmungen müssen entlang des gesamten Modellrandes des Berechnungsmodells Randbedingungen definiert werden. Dabei können i. A. entweder das Grundwasserpotenzial  $h$  (Randbedingung 1. Art) oder die Filtergeschwindigkeit  $v_n$  (spezifischer Zufluss bzw. Abfluss pro Fläche) senkrecht zum Modellrand (Randbedingung 2. Art) entlang einzelner Teilabschnitte des gesamten Modellrandes vorgegeben werden. Aus der Strömungsberechnung ergeben sich in den Randbereichen, für die Grundwasserpotenziale vorgegeben werden, Randzuflüsse bzw. -abflüsse. In den Randbereichen, für die Zu- bzw. Abflüsse vorgegeben werden, ergibt sich aus der Strömungsberechnung die Verteilung der Randpotenziale. Eine Sonderform der Randbedingung 2. Art stellt die Vorgabe einer Randstromlinie (Filtergeschwindigkeit senkrecht zum Modellrand  $v_n = 0$ ) entlang eines Teilabschnittes des Modell-

randes dar. In den auf der Methode der Finiten Elemente basierenden Programmsystemen zur numerischen Berechnung von Grundwasserströmungen ist diese Randbedingungsart i. A. als Standard gesetzt, d. h. ohne Vorgabe einer sonstigen Randbedingung wird am Modellrand eine Randstromlinie angesetzt.

In Bild 2 sind die einzelnen Modellränder mit den jeweiligen Randbedingungen für die Dammdurchströmung dargestellt. In dem hier dargestellten Fall wird als Berechnungsmodell nur der wassergesättigte Bereich des Dammes berücksichtigt. D.h. es wird angenommen, dass die Begrenzung des wassergesättigten Teils des Dammes bekannt ist und dass eine Durchströmung nur im wassergesättigten Bereich des Dammkörpers stattfindet.

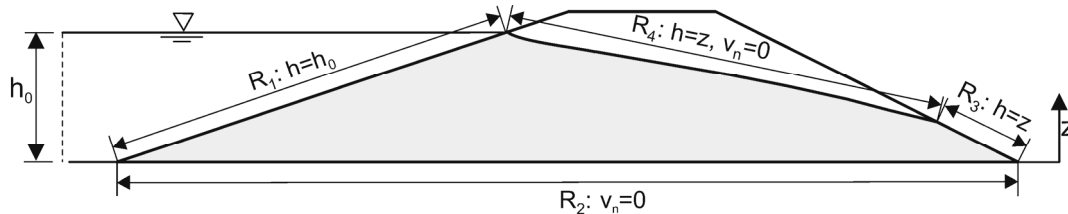


Bild 2: Randbedingungen für die Modellierung der wassergesättigten Dammdurchströmung

Am linken Modellrand im Bereich des Wassereinstaus ( $R_1$ ) wird ein Grundwasserpotenzial  $h$  entsprechend dem Wasserstand  $h_0$  über Bezugsniveau ( $h = h_0$ ) vorgegeben. Aus der Annahme einer undurchlässigen Aufstandsfläche folgt der Ansatz einer Randstromlinie ( $v_n = 0$ ) für den unteren Modellrand ( $R_2$ ).

Am rechten Modellrand ergibt sich ein Wasseraustritt (Sickerstrecke). Unter der (für die Dammdurchströmung gerechtfertigten) Annahme, dass kein Wasseraufstau infolge der Dammdurchströmung auf der Luftseite des Dammes erfolgt und das Wasser frei ausströmen kann, entspricht der Porenwasserdruck an der Dammoberfläche dem atmosphärischen Luftdruck. Da weiterhin i. A. angenommen werden kann, dass der äußere Luftdruck im gesamten Dammbereich konstant ist, kann dieser und somit auch der Porenwasserdruck an diesem Modellrand ( $R_3$ ) definitionsgemäß zu Null gesetzt werden ( $u = 0$ ). Das Grundwasserpotenzial an diesem Modellrand im Bereich des Wasseraustritts entspricht (wegen  $h = u/\gamma_w + z$ ) der geodätischen Höhe des Modellrandes über dem Bezugsniveau ( $h = z$ ). Demzufolge ist an diesem Modellrand ( $R_3$ ) ein Grundwasserpotenzial entsprechend der jeweiligen geodätischen Höhe über Bezugsniveau ( $h = z$ ) vorzugeben.

Durch den oberen Modellrand ( $R_4$ ) wird der wassergesättigte Bereich innerhalb des durchströmten Dammkörpers begrenzt (Sickerlinie), an dem der Porenwasserdruck dem atmosphärischen Luftdruck entspricht (definitionsgemäß  $u = 0$ ). Aufgrund der Annahme, dass eine Durchströmung nur im wassergesättigten Bereich des Dammkörpers stattfindet, stellt die Sickerlinie, die den wassergesättigten Bereich nach oben begrenzt, ebenfalls eine Randstromlinie ( $v_n = 0$ ) dar.

Der wassergesättigte Bereich bei der Durchströmung eines Dammes und damit die Lage der Sickerlinie innerhalb des Dammkörpers und die Ausdehnung der Sickerstrecke an der Dammoberfläche sind jedoch a priori nicht bekannt sondern müssen im Zuge der Durchströmungsberechnung ermittelt werden.

Eine Lösungsmöglichkeit besteht darin, die Ausdehnung des Berechnungsmodells solange iterativ anzupassen, bis entlang dem als Randstromlinie ( $v_n = 0$ ) definierten oberen Modellrand ( $R_4$ ) der Porenwasserdruck zu Null wird ( $u = 0$ ), bzw. bis das Grundwasserpotenzial entlang dieses Modellrands der geodätischen Höhe des Modellrands entspricht ( $h = z$ ). Eine derartige iterative, automatisierte Anpassung des Modells ist bei der numerischen Strömungsberechnung unter Verwendung einer vertikal-ebenen Modellierung, zumindest bei komplexeren Strukturen (Bodenschichtungen, Einbauten, etc.) und komplexeren geometrischen Verhältnissen (unterschiedliche Böschungsneigungen, Bermen, etc.) zumeist nicht möglich.

Deshalb wird die numerische Berechnung der Dammdurchströmung i. A. für ein festgelegtes, vertikal-ebenes Modell, das den gesamten Dammkörper beinhaltet, durchgeführt. Dies erfordert die Berechnung der Dammdurchströmung sowohl im wassergesättigten Bereich unterhalb der Sickerlinie als auch im wasserungesättigten Bereich oberhalb der Sickerlinie. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die hydraulische Durchlässigkeit  $k_u$  im wasserungesättigten Bereich oberhalb der Sickerlinie deutlich geringer ist als die Durchlässigkeit  $k$  im wassergesättigten Bereich. Die ungesättigte Durchlässigkeit ist abhängig von Wassergehalt innerhalb der Poren, der wiederum als Funktion des Porenwasserunterdrucks (unter atmosphärischem Luftdruck) beschrieben werden kann. Dadurch lässt sich die relative Durchlässigkeit  $k_r$  im ungesättigten Bereich (bezogen auf die gesättigte Durchlässigkeit) als Funktion des Porenwasserunterdrucks ( $-u$ ), der in der Literatur als Saugspannung bezeichnet wird, darstellen. Für stationäre Berechnungen gesättigt-ungesättigter Strömungen muss daher die funktionale Beziehung zwischen relativer Durchlässigkeit  $k_r$  und Saugspannung ( $-u$ ) bodenabhängig vorgegeben werden.

Für die Ermittlung der Dammdurchströmung als Grundlage für die Standsicherheitsuntersuchung ist eine allzu genaue Vorgabe dieser bodenabhängigen Funktionen jedoch nicht erforderlich. Der Abfluss in der ungesättigten Bodenzone ist hier vernachlässigbar und allein der wassergesättigte Bodenbereich ist maßgebend für die Durchströmung.

Grundsätzlich sind die Funktionen für die verschiedenen Böden jedoch so zu wählen, dass der Fluss in der ungesättigten Bodenzone qualitativ korrekt abgebildet wird. Als Grundlage für die numerische Berechnung der Dammdurchströmung wurden daher von der BAW aus Literaturangaben vier vereinfachte Typkurven für Kies, Sand, Schluff und Ton abgeleitet, die in Bild 3 dargestellt sind. Die Saugspannung ist dabei in Meter Wassersäule (mWS) angegeben.

In Tabelle 1 sind für die Typkurven die Stützstellen der Polygonzüge aufgeführt. Für die numerische Berechnung wurden die relativen Durchlässigkeiten bis zu einer Saugspannung von 100 m WS angegeben. Physikalisch haben die Werte für diese maximale Saugspannung keine Bedeutung. Die Auswahl der Typkurve bei der numerischen Berechnung der Dammdurchströmung für unterschiedliche Bodenmaterialien sollte in Abhängigkeit von der die Durchlässigkeit des jeweiligen Bodenmaterials bestimmenden Kornfraktion erfolgen.

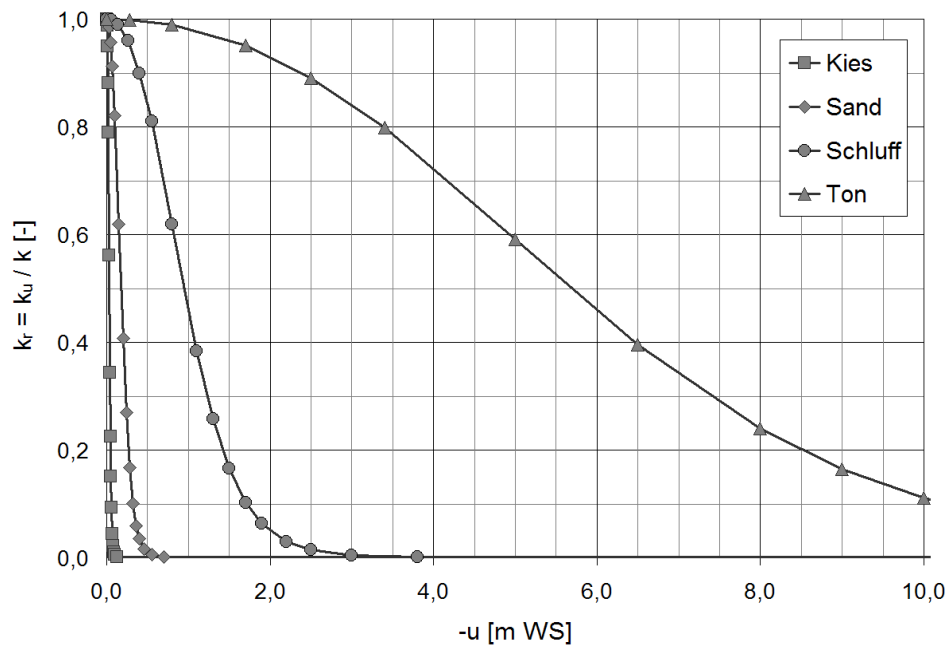


Bild 3: Typkurven für den funktionalen Zusammenhang zwischen relativer Durchlässigkeit ( $k_r$ ) und Saugspannung ( $-u$ )

Zur numerischen Berechnung gesättigt-ungesättigter Grundwasserströmungen ist eine iterative Lösung erforderlich, bei der innerhalb der einzelnen Iterationsschritte ein linearisiertes Gleichungssystem gelöst wird. Als Startwert für die iterative Lösung wird eine geschätzte Grundwasserpotenzialverteilung vorgegeben. In einer ersten Iteration wird die hydraulische Durchlässigkeit der Elemente, in denen sich wasserungesättigte Strömungsverhältnisse ergeben, auf Grundlage der für die einzelnen Bodenschichten vorgegebenen  $k_u(-u)$ -Funktionen angepasst. Dies erfolgt durch elementweise Ermittlung der ungesättigten Durchlässigkeit basierend auf dem Grundwasserpotenzial aus dem jeweilig vorgehenden Iterationsschritt und anschließender erneuter Lösung des linearisierten Gleichungssystems für die Grundwasserpotenziale. Diese erste Iteration wird beendet, wenn die Abweichung zwischen den berechneten Grundwasserpotenzialen zweier aufeinanderfolgender Iterationsschritte einen vorgegebene Wert  $\varepsilon$  (Iterationsschranke) unterschreitet.

Da die Ausdehnung der Sickerstrecke mit dem Austrittspunkt der Sickerlinie an deren oberen Ende zu Beginn der Berechnung ebenfalls nicht bekannt ist, ist ein weiterer iterativer Prozess zur Ermittlung der Sickerstrecke notwendig. Hierbei erfolgt an den Diskretisierungsknoten, deren Elementkanten die luftseitige Dammböschung repräsentieren, eine Anpassung der Randbedingungen an die berechneten Potenziale. Diese Iteration muss solange erfolgen, bis die Berechnung für alle Randdiskretisierungsknoten mit vorgegebenem Potenzial ( $h = z$ ) einen Abfluss ( $v_n < 0$ ) und für die sich daran anschließenden, eine Randstromlinie darstellenden Randdiskretisierungsknoten ( $v_n = 0$ ) eine Saugspannung (Porenwasserunterdruck:  $u < 0$  bzw.  $h < z$ ) ergibt.

Tabelle 1: Typkurven für den funktionalen Zusammenhang zwischen relativer Durchlässigkeit ( $k_r$ ) und Saugspannung ( $-u$ )

<b>Kies</b>		<b>Sand</b>		<b>Schluff</b>		<b>Ton</b>	
$-u$ [m WS]	$k_r = k_u/k$ [-]	$-u$ [m WS]	$k_r = k_u/k$ [-]	$-u$ [m WS]	$k_r = k_u/k$ [-]	$-u$ [m WS]	$k_r = k_u/k$ [-]
0,0	1,000	0,0	1,0	0,0	1,0	0,0	1,0
0,002	0,998	0,01	0,999	0,06	0,998	0,28	0,999
0,005	0,988	0,03	0,985	0,14	0,989	0,80	0,990
0,010	0,949	0,05	0,957	0,26	0,960	1,70	0,951
0,015	0,881	0,07	0,913	0,40	0,900	2,50	0,891
0,02	0,789	0,10	0,821	0,55	0,810	3,40	0,798
0,03	0,562	0,15	0,619	0,80	0,619	5,00	0,591
0,04	0,343	0,20	0,408	1,10	0,384	6,50	0,396
0,047	0,225	0,24	0,269	1,30	0,258	8,00	0,240
0,053	0,151	0,28	0,167	1,50	0,166	9,00	0,165
0,06	0,093	0,32	0,101	1,70	0,102	10,00	0,111
0,07	0,045	0,36	0,060	1,90	0,063	11,00	0,074
0,08	0,022	0,40	0,035	2,20	0,030	12,00	0,049
0,09	0,011	0,46	0,016	2,50	0,015	14,00	0,022
0,10	0,006	0,55	0,006	3,00	0,005	18,00	0,005
0,13	0,001	0,70	0,001	3,80	0,001	25,00	0,001
100,0	0,000	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0

Bei dem in der nachstehenden Beispielberechnung verwendeten Programm SS-FLOW2D der Firma GGU [4] wird die Iteration zur Ermittlung der Sickerstrecke manuell durchgeführt. Hierbei wird die Lage des Sickerlinienaustrittspunktes in einem ersten Schritt geschätzt. Anhand des Berechnungsergebnisses wird überprüft, ob entlang der geschätzten Sickerstrecke die oben genannten Randbedingungen erfüllt werden. Falls diese Bedingungen nicht eingehalten werden, ist die Berechnung mit entsprechend korrigierten Randbedingungen erneut durchzuführen.

Die Ergebnisse der numerischen Strömungsberechnung für das Berechnungsbeispiel sind in Bild 4 dargestellt. Dabei wurde die oben aufgeführte Typkurve für Sand zur Beschreibung der funktionalen Abhängigkeit der relativen Durchlässigkeit im ungesättigten Boden von der Saugspannung  $k_r(-u)$  verwendet.

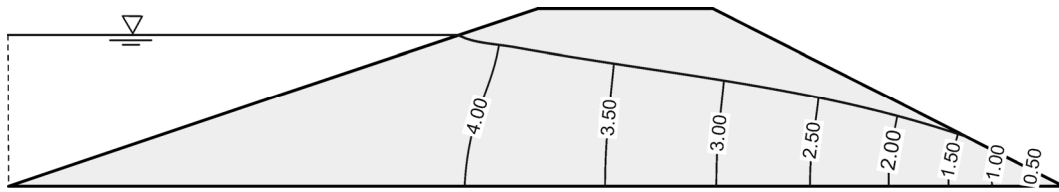


Bild 4: Berechnete Grundwasserpotenziale und Sickerlinie für homogenen Damm

### Berücksichtigung von Dräns

Bei der Berechnung der Durchströmung von Dämmen mit Dräns können bei großen Durchlässigkeitsunterschieden zwischen Dammmaterial und Drän Fehler bei der Ermittlung der Dammdurchströmung auftreten. Dies ist oft auf die Vorgabe ungenügender Funktionen zur Beschreibung der Abhängigkeit der ungesättigten Durchlässigkeit von der Saugspannung, durch die unterschiedlichen bodenphysikalischen Eigenschaften der einzelnen Mineralkorngemische nicht ausreichend berücksichtigt werden, zurückzuführen. Weiterhin können Fehler in der Durchströmungsberechnung auch durch eine zu grobe Diskretisierung, die keine ausreichende Abbildung der gesättigt-ungesättigten Strömung an der Grenzfläche zwischen Damm und Drän ermöglicht, verursacht werden. Um diese Fehler zu vermeiden, wird folgende Vorgehensweise bei der numerischen Berechnung der Durchströmung von Dämmen mit Dräns als Grundlage für eine hinsichtlich der Strömungsbelastung auf der sicheren Seite liegende Standsicherheitsermittlung empfohlen:

- Die numerische Berechnung der Dammdurchströmung wird ohne Berücksichtigung des Dräns durchgeführt. D. h., der Modellquerschnitt beinhaltet nur den Dammkörper, die den Drän darstellende Querschnittsfläche wird „ausgeschnitten“. Die Randbedingungen für den Grundwasseraustritt in den Drän werden an der Dammoberfläche ohne Berücksichtigung des Dräns vorgegeben.
- Die in der Strömungsberechnung ermittelten Grundwasserpotenziale werden in die Standsicherheitsberechnung übertragen. Die Standsicherheitsberechnung erfolgt unter Berücksichtigung des Dräns mit seinen zugehörigen Parametern (Feuchtwichte, Reibungswinkel). Innerhalb des Dräns werden keine Porenwasserdrücke bzw. keine Strömungskräfte berücksichtigt. (Aufgrund der geringen Wassersättigung des Dräns sind Strömungskräfte vernachlässigbar.) Porenwasserunterdrücke im Dammkörper oberhalb der Sickerlinie werden in der Strömungsberechnung ebenfalls nicht berücksichtigt. (Die standsicherheitserhöhende Wirkung von Porenwasserunterdrücken wird, auf der sicheren Seite liegend, nicht berücksichtigt, da diese bei Aufsättigung und Austrocknung reduziert bzw. aufgehoben werden kann.)

Diese Vorgehensweise wird nicht nur bei der Durchströmungs- und Standsicherheitsberechnung von Dämmen mit Dräns (Auflast- und Fußdräns) sondern auch bei der Modellierung von dränierenden Hinterfüllungen im Bereich von Querbauwerken empfohlen. Voraussetzung ist, dass das (gegenüber dem Dammmaterial filterstabile) Dränmaterial eine wesentlich (i. d. R. mindestens 50-fach) höhere wassergesättigte Durchlässigkeit als das Dammmaterial aufweist und der Wassereinstau innerhalb des Dräns vernachlässigt werden kann.



## Literatur

- [1] Pinder, G. F. & W. G. Gray: Finite Element Simulation in Surface and Subsurface Flow; Academic Press, New York, 1977
- [2] Anderson, M.P & W.W. Woessner: Applied Groundwater Modeling, Academic Press; San Diego, 2002
- [3] Kinzelbach, W. & R. Rausch: Grundwassermodellierung – Eine Einführung mit Übungen; Gebrüder Bornträger, Berlin Stuttgart, 1995
- [4] GGU SSFLOW2D: Software zur Berechnung von zweidimensionalen Grundwasserströmungen mit Finiten Elementen, Version 9.0; August 2008, GGU Braunschweig

## Anhang 2: Berücksichtigung von offenen Fugen in der Strömungsberechnung

Für die Strömungsberechnung müssen offene Fugen durch eine entsprechende Bodenschicht im Grundwasserströmungsmodell abgebildet werden. Dabei sollte der hydraulische Gradient in der (Ersatz-) Bodenschicht bei gleichem Durchfluss dem in der offenen Fuge entsprechen. Da die Fuge im Vergleich zur Längenausdehnung nur eine geringe Dicke aufweist, kann der Wasserfluss durch diese wassergefüllte Fuge als Fluss zwischen zwei unendlich ausgedehnten Platten angesehen werden. Dafür ergibt sich unter Annahme einer laminaren Strömung ein konstanter hydraulischer Gradient – unabhängig von der Rauigkeit der Oberflächen – nach Press & Schröder [1] von:

$$i = \frac{\Delta h}{\Delta x} = \frac{12 \nu q}{gd^3}$$

mit:

i: hydraulischer Gradient [-]

$\Delta h$ : Potenzialdifferenz [m]

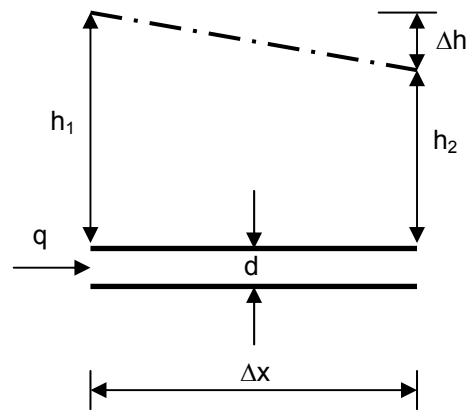
$\Delta x$ : Fließstrecke [m]

q: Durchfluss pro m Breite [ $m^2/s$ ]

d: Dicke der Fuge (Abstand der Platten) [m]

$\nu$ : kinematische Zähigkeit des Wassers [ $m^2/s$ ]

g: Erdbeschleunigung [ $m/s^2$ ]



Für den Grundwasserfluss durch eine wassergesättigte Schicht mit konstanter Dicke ergibt sich nach dem DARCY'schen Fließgesetz ebenfalls ein konstanter hydraulischer Gradient von:

$$i = \frac{\Delta h}{\Delta x} = \frac{q}{Dk}$$

mit:

i: hydraulischer Gradient [-]

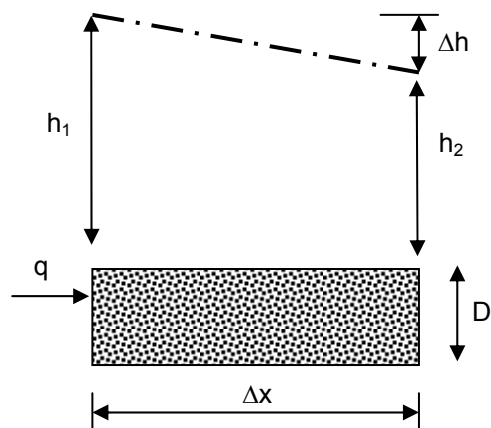
$\Delta h$ : Potenzialdifferenz [m]

$\Delta x$ : Fließstrecke [m]

q: Durchfluss pro m Breite [ $m^2/s$ ]

D: Dicke der Bodenschicht [m]

k: Durchlässigkeitsbeiwert des Bodens [m/s]



Unter der Voraussetzung, dass der hydraulische Gradient  $i$  bei gleichem Durchfluss  $q$  identisch sein soll, ergibt sich:

$$\frac{i}{q} = \frac{12\nu}{gd^3} = \frac{1}{Dk}$$

Für eine angenommene Dicke  $d$  der offenen Fuge und eine gewählte Dicke  $D$  der im Grundwassermodell verwendeten (Ersatz-)Bodenschicht ergibt sich der anzusetzende Durchlässigkeitsbeiwert  $k$  (für gleichen Quotienten aus hydraulischem Gradient  $i$  und Durchfluss  $q$ ) zu:

$$k = \frac{gd^3}{12\nu D}$$

Beispiel:

Dicke der Fuge:  $d = 1 \text{ cm} = 0,01 \text{ m}$

Dicke der (Ersatz-)Bodenschicht:  $D = 0,5 \text{ m}$

kinematische Zähigkeit des Wassers (bei  $\vartheta = 10^\circ\text{C}$ ):  $\nu = 1,3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

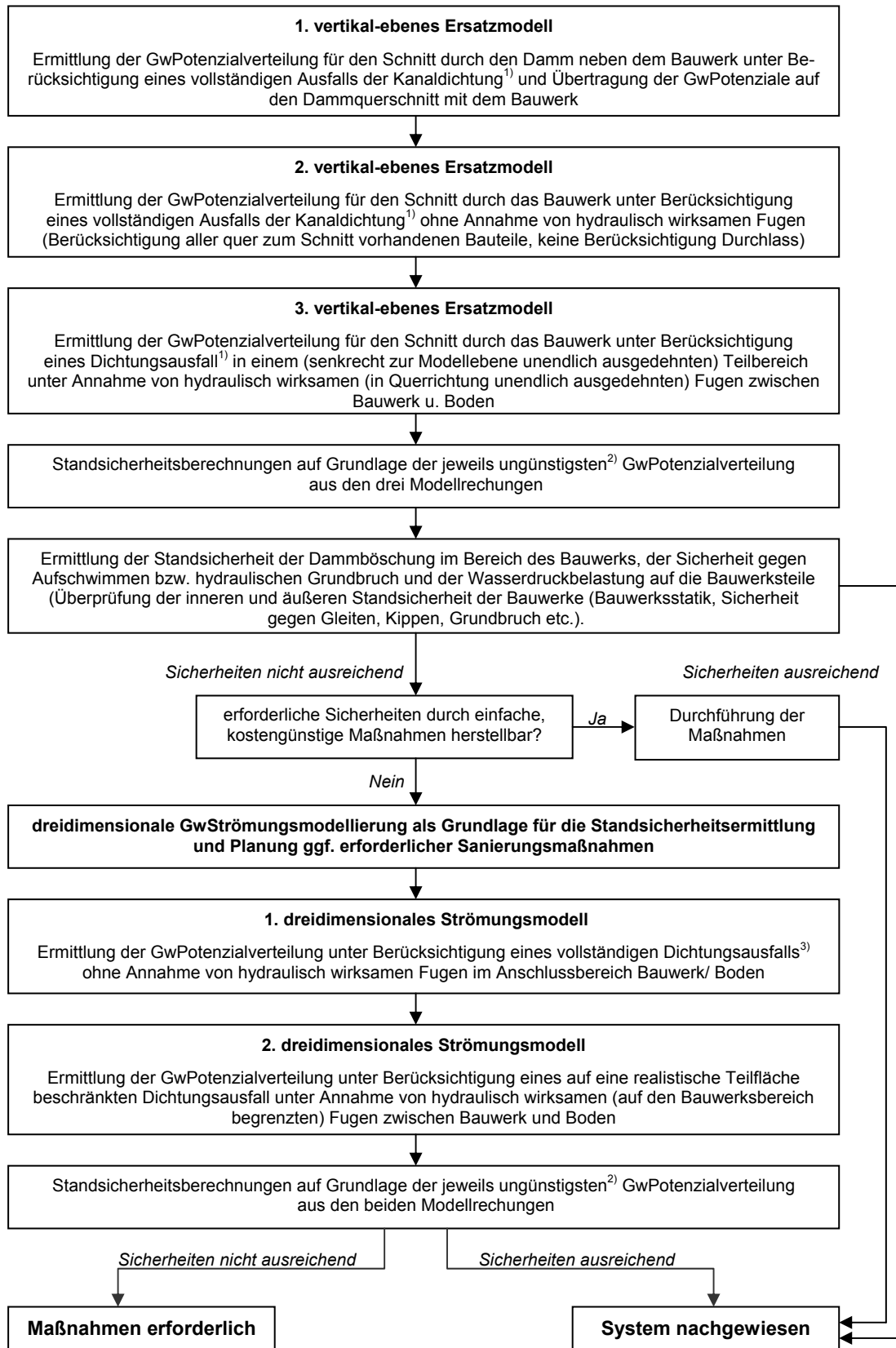
Erdbeschleunigung:  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

$\Rightarrow k \cong 1,26 \text{ m/s}$

**Literatur**

[1] Press, H. und Schröder, R.: Hydromechanik im Wasserbau; Wilhelm Ernst & Sohn; Berlin, München; 1966

### Anhang 3: Ablauf des Nachweises für Dammbereiche mit Bauwerken



<sup>1)</sup> Berechnung bei nicht gedichteten Strecken generell unter Berücksichtigung der Durchströmung

<sup>2)</sup> ungünstigste Potenzialverteilung kann für verschiedene Nachweise aus unterschiedlichen Ersatzsystemen resultieren

<sup>3)</sup> bei ausreichender Beobachtung kann der Dichtungsausfall in der Größe begrenzt werden;

## Anhang 4: Beispiel zu Bauwerken in Dämmen

### 1 Bauwerk und Baugrund

Zur Veranschaulichung der Vorgehensweise bei Bauwerken in Dämmen wird nachfolgend ein vereinfachtes Beispiel für einen Durchlass unter einem gedichteten Kanal mit Auslaufbauwerk, Auslaufgraben und Anschluss an einen parallel zum Damm verlaufenden Bach betrachtet. Der Durchlass ist in seinen Abmessungen im Längsschnitt und Grundriss im Bild 4.1 (nicht maßstäblich) dargestellt.

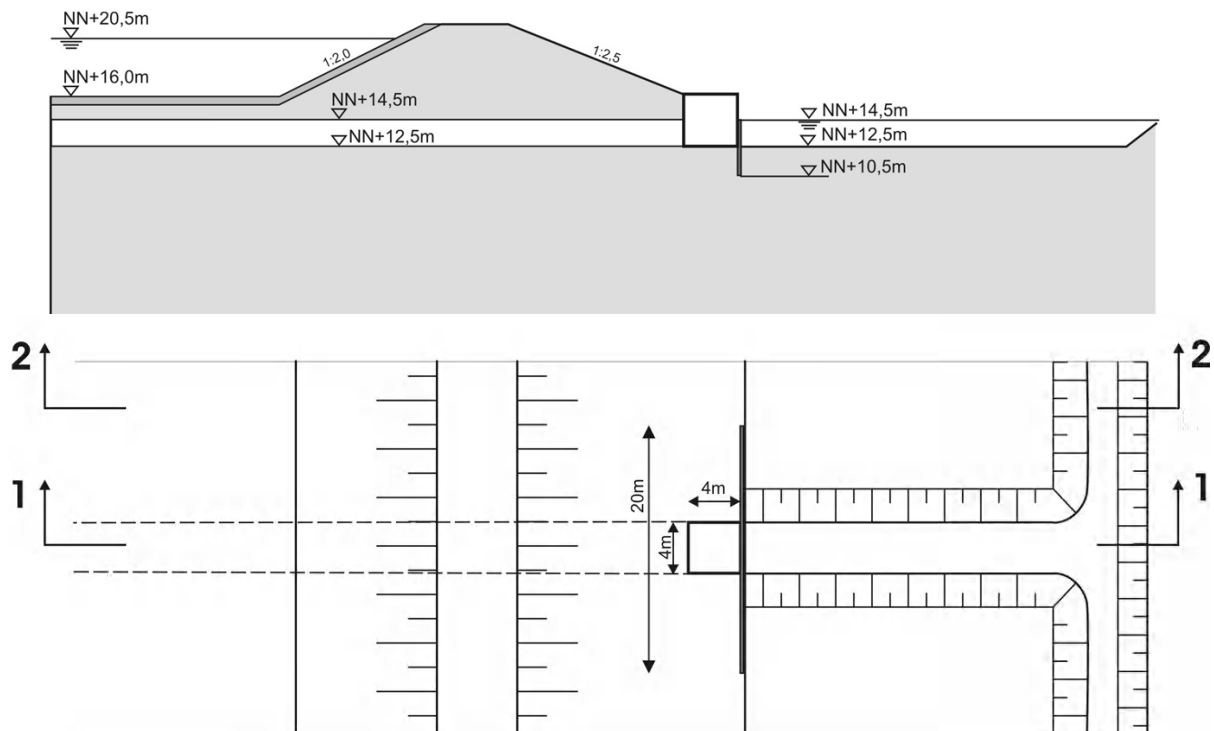


Bild 4.1: Längsschnitt 1-1 (oben) und Draufsicht des Durchlassbauwerks (unten)

Das Dammmaterial und der Untergrund bestehen aus Sand mit einer Durchlässigkeit von  $k = 1 \cdot 10^{-4}$  m/s. Unter NN+0 m folgen wasserstauende Schichten. Die Wichte des Dammmaterials und des Untergrunds unter Auftrieb beträgt  $\gamma' = 9,5$  kN/m<sup>3</sup>. Der Reibungswinkel beträgt  $\varphi_k' = 35^\circ$ . Die Sicherungspundwand am Ende des Durchlasses erstreckt sich auf eine Länge von 20 m und reicht bis NN +10,5 m. Der Durchlass hat einen Rechteckquerschnitt mit einer Breite von 4 m und einer Höhe von 2 m.

Für das Beispiel wird angenommen, dass der Durchlass aus Beton-Fertigteilelementen besteht, die in einem Graben vor Herstellung des Kanals im Trockenen verlegt wurden und dass der Durchlassgraben mit dem vorhandenen Untergrundmaterial verfüllt wurde.

## 2 Zweidimensionale (vertikal-ebene) Ersatzsysteme

### 2.1 Ermittlung der Grundwasserpotenzialverteilung

Das Modell für die vertikal-ebenen Ersatzsysteme hat eine Gesamtlänge von 76 m und reicht von Kanalmitte bis zur Mitte des parallel zum Damm verlaufenden Bachs. In der Vertikalen reicht das Modell bis NN +0 m (wasserstauende Schicht). Der linke sowie der rechte Modellrand und die untere Modellbegrenzung werden, auf der sicheren Seite liegend, als Randstromlinie definiert, d.h. diese Ränder werden als dicht angenommen. Im Auslaufgraben des Durchlasses und im parallel zum Kanal verlaufenden Bach wird das Potenzial zwischen NN +12,5 m und NN +14,5 m variiert.

#### Erstes vertikal-ebenes Ersatzmodell

Die Potenzialverteilung wird für den Schnitt durch den Damm neben dem Bauwerk (Schnitt 2-2, siehe Bild 4.1) unter Berücksichtigung eines vollständigen Ausfalles der Kanaldichtung ermittelt (Bild 4.2) und auf den Dammquerschnitt mit Bauwerk übertragen.

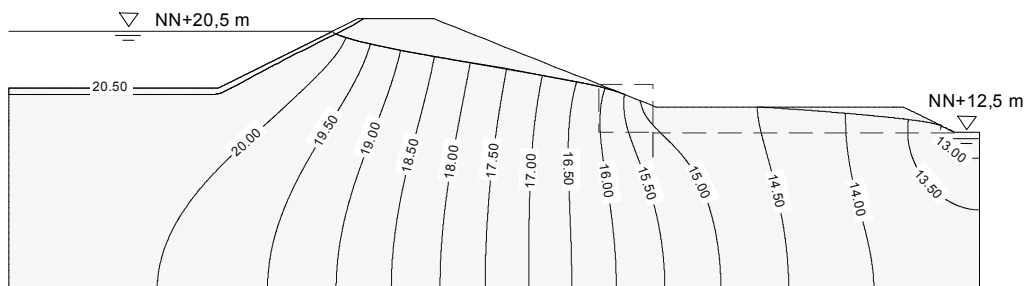


Bild 4.2: Potenzialverteilung für das erste vertikal-ebene Ersatzmodell mit Randbedingung NN +12,5 m

#### Zweites vertikal-ebenes Ersatzmodell

Die Potenzialverteilung wird für den Schnitt durch den Damm mit dem Bauwerk (Schnitt 1-1, siehe Bild 4.1) jedoch ohne Berücksichtigung möglicher Fugen zwischen Bauwerk und Boden ermittelt (Bild 4.3). Die Spundwand und das Bauwerk sind in diesem Fall als undurchlässige Körper abgebildet. Der Durchlass bleibt unberücksichtigt.

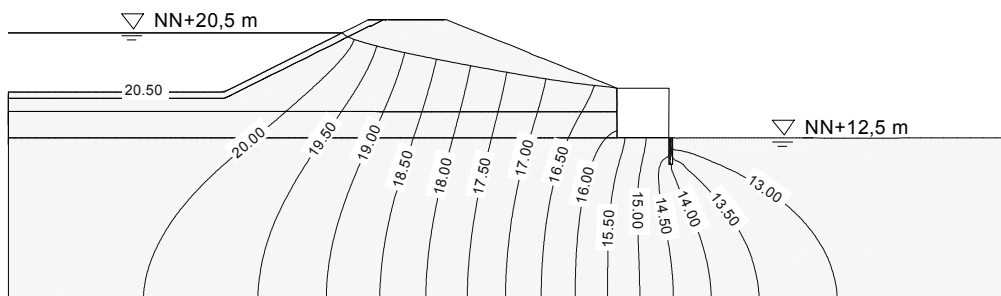


Bild 4.3: Potenzialverteilung für das zweite vertikal-ebene Ersatzmodell mit Randbedingung NN +12,5 m

### Drittes vertikal-ebenes Ersatzmodell

Die Ermittlung der Potenzialverteilung erfolgt für den Schnitt durch den Damm mit dem Bauwerk unter Berücksichtigung möglicher Fugen zwischen Bauwerk und Boden (Bild 4.4). Die Spundwand und das Bauwerk werden wie im 2. Ersatzsystem als undurchlässig angenommen. Der Durchlass bleibt auch in diesem Fall unberücksichtigt. Für die Fuge wird eine durchgängige Hohllage (unter Durchlass und Auslaufbauwerk) von 1 cm angesetzt. Sie wird im Modell (unter Annahme einer laminaren Strömung in der Fuge) durch eine 0,5 m mächtige Schicht mit einer Durchlässigkeit von  $k = 1 \text{ m/s}$  abgebildet (vgl. Anhang 2). Der Dichtungsausfall im Modell wird in diesem Fall auf einen (senkrecht zur Strömungsrichtung unendlich ausgedehnten) Streifen am Übergang von der Sohl- zur Böschungsdichtung mit einer Breite von 2 m begrenzt.

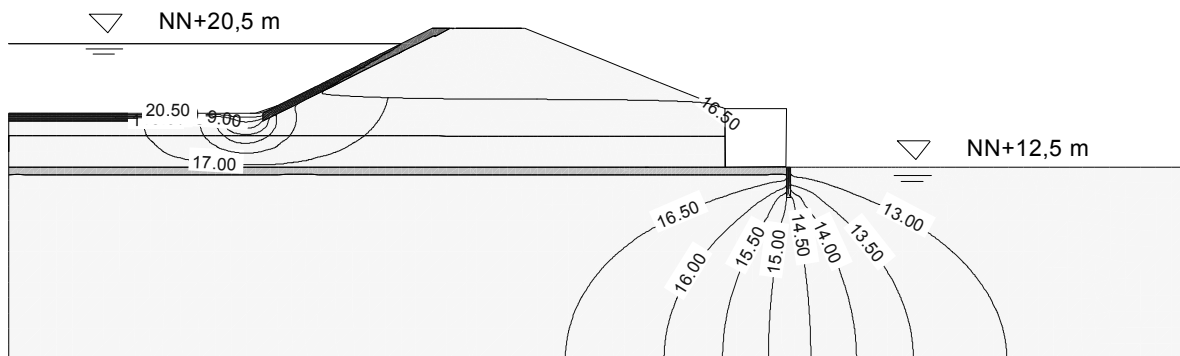


Bild 4.4: Potenzialverteilung für das dritte vertikal-ebene Ersatzmodell mit Randbedingung NN+12,5 m

## 2.2 Standsicherheitsnachweise

### *Globale Standsicherheit*

Der größte Ausnutzungsgrad für die Böschung über dem Auslaufbauwerk ergibt sich für das Ersatzsystem 2 unter Ansatz eines Wasserstandes im Auslaufbereich von NN +14,5 m. Er beträgt  $\mu = 0,74 \leq 1$  und ist somit ausreichend.

### *Lokale Standsicherheit*

Maßgebend für den Nachweis der lokalen Sicherheit sind die Ersatzsysteme 2 und 3, bei denen es zu einem Austritt der Sickerlinie an der luftseitigen Böschung oberhalb des Auflaufbauwerkes kommt. Die lokale Böschungsstandsicherheit unterhalb des Sickerlinienaustrittspunktes ist nicht ausreichend, da

$\tan \beta = 0,4 \not\geq 0,32 = \frac{1}{2} \tan \varphi_d$ , mit  $\tan \varphi_d = \tan \varphi_k / \gamma_\varphi$  und  $\gamma_\varphi = 1,1$  in der außergewöhnlichen Bemessungssituation BS-A

D.h. in diesem Bereich sind Maßnahmen zur Erhöhung der lokalen Sicherheit erforderlich, wenn lokale Schäden beim Auftreten einer Dammdurchströmung verhindert werden sollen.

Im nicht durchströmten Bereich der Böschung oberhalb des Sickerlinienaustrittspunktes ist dagegen die lokale Standsicherheit ausreichend, da

$$\tan \beta = 0,4 \leq 0,64 = \tan \varphi_d$$

### Hydraulischer Grundbruch

Nach DIN 1054:2010 ergibt sich der Nachweis gegen hydraulischen Grundbruch aus:

$$S'_k \cdot \gamma_H \leq G'_k \cdot \gamma_{G, \text{stb}}$$

Betrachtet wird ein Bodenkörper vor der Spundwand, dessen Breite  $b$  gleich der halben Einbindetiefe der Spundwand angenommen wird und dessen Höhe  $h$  der Einbindetiefe unterhalb der Grabensohle entspricht. Der für diesen Nachweis ungünstigste Fall ergibt sich aus dem dritten vertikal-ebenen Ersatzmodell (Randbedingung NN +12,5 m), da hier das hydraulische Gefälle vor der Spundwand am größten ist. Das über die Breite des Bodenkörpers gemittelte hydraulische Gefälle beträgt  $i = 0,84$ . Die charakteristische Strömungskraft  $S'_k$  auf den Bodenkörper errechnet sich zu  $S'_k = i \cdot \gamma_w \cdot h \cdot b = 16,8$  kN/m. Der Teilsicherheitsbeiwert für die Strömungskraft  $\gamma_H$  beträgt nach DIN 1054:2005-01 in der außergewöhnlichen Bemessungssituation BS-A bei dem hier anstehenden Untergrund, der als günstiger Untergrund einzustufen ist,  $\gamma_H = 1,20$ . Die charakteristische Eigenlast des Bodenkörpers unter Auftrieb  $G'_k$  beträgt 19 kN/m. Der Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{G, \text{stb}}$  für günstige ständige Einwirkungen in der außergewöhnlichen Bemessungssituation BS-A beträgt  $\gamma_{G, \text{stb}} = 0,95$ . Somit ergibt sich:

$$16,8 \text{ kN/m} \cdot 1,2 = 20,2 \text{ kN/m} \not\leq 18,1 \text{ kN/m} = 19 \text{ kN/m} \cdot 0,95$$

D.h. es ist keine ausreichende Sicherheit gegen hydraulischen Grundbruch gegeben.

### Belastung des Auslaufbauwerkes

Die maßgebliche Wasserdruckbelastung auf das Auslaufbauwerk ergibt sich im dritten vertikal-ebenen Ersatzmodell bei Ansatz der Randbedingung von NN +14,5 m. In Bild 4.5 ist diese Wasserdruckverteilung grafisch dargestellt.

## 3 Dreidimensionale Modelle

Als 3-D-Modell wurde ein Viertelmodell verwendet (siehe Bild 4.6). Das Modell hat quer zum Damm eine Länge von 76 m (von der Kanalachse bis zur Achse des parallel zum Damm verlaufenden Bachs) und in Richtung der Dammachse eine Länge von 60 m. Die vertikalen Modellränder sowie der untere Rand werden auf der sicheren Seite liegend als Randstromlinien definiert, d.h. diese Ränder werden als dicht angenommen.

Analog zu den Berechnungen der vertikal-ebenen Ersatzmodelle wird im Auslaufbereich des Durchlasses und im Bachlauf das Potenzial zwischen NN +12,5 m und NN +14,5 m variiert.

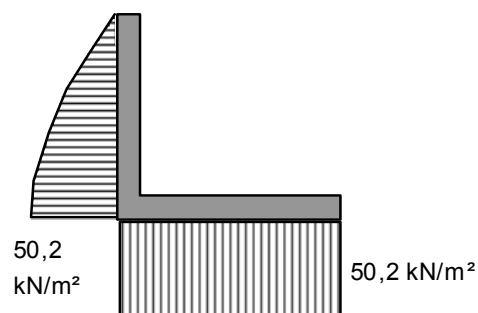


Bild 4.5: Wasserdruckverteilung auf das Auslaufbauwerk für das dritte vertikal-ebene Ersatzmodell (Randbedingung NN +14,5 m)



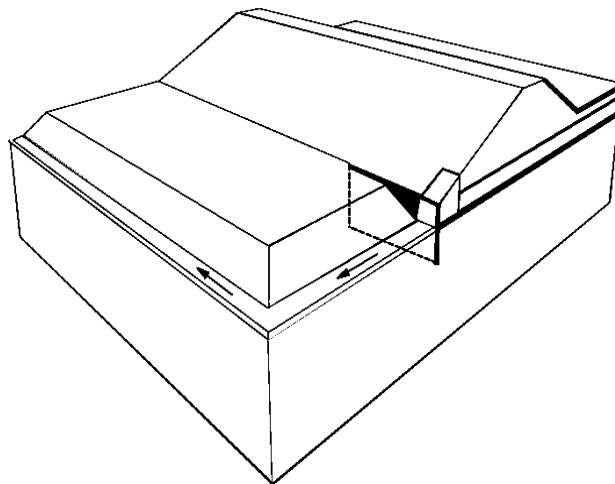


Bild 4.6: 3-D-Modell

### 3.1 Ermittlung der Grundwasserpotenzialverteilung

Die Berechnungen im ersten dreidimensionalen Strömungsmodell werden ohne Berücksichtigung hydraulisch wirksamer Fugen unter Annahme eines vollständigen Dichtungsausfalls durchgeführt. Wie aus Bild 4.7 ersichtlich, weicht die ermittelte Grundwasserpotenzialverteilung für den Vertikalschnitt entlang der Achse des Durchlasses nur relativ geringfügig von den berechneten Grundwasserpotenzialverteilungen für das erste und zweite vertikal-ebene Ersatzmodell (Bilder 4.2 und 4.3) ab. Dies ist begründet durch die geringe aufstauende Wirkung des Auslaufbauwerkes, da die Spundwand nicht in eine geringdurchlässige Bodenschicht einbindet und somit unterströmt wird.

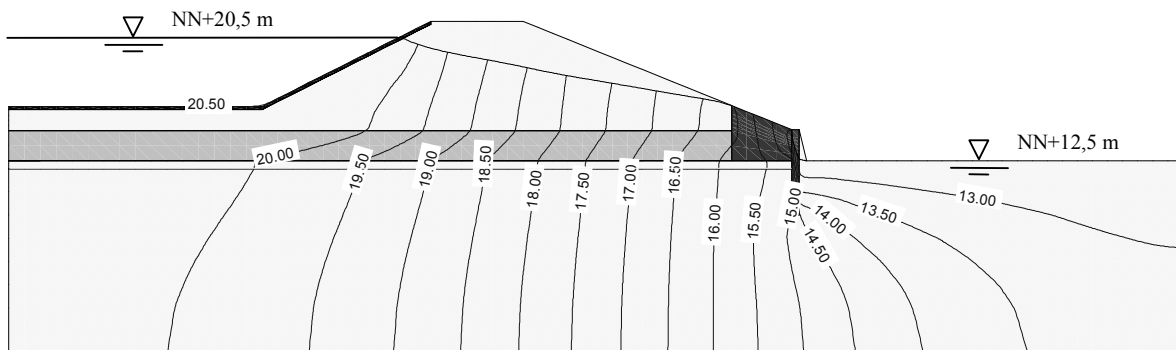


Bild 4.7: Potenzialverteilung für das erste dreidimensionale Strömungsmodell (Vertikalschnitt entlang Durchlassachse) mit Randbedingung NN +12,5 m

Im zweiten dreidimensionalen Grundwasserströmungsmodell wird eine hydraulisch wirksame Fuge unter dem Durchlass und dem Auslaufbauwerk angenommen (Berücksichtigung der Fuge in der Strömungsberechnung entsprechend drittem vertikal-ebenen Ersatzmodell). Der Dichtungsausfall wird in diesem Fall im Modell auf eine Fläche von 25 m<sup>2</sup> (2 m x 12,5 m) am Übergang von der Sohl- zur Böschungsdichtung begrenzt. Dies entspricht einer tatsächlichen Leckgröße von 50 m<sup>2</sup>.

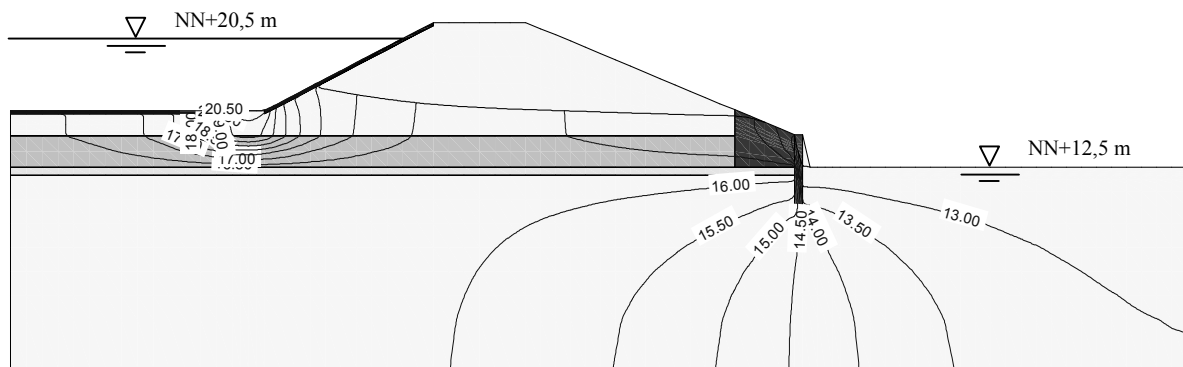


Bild 4.8: Potenzialverteilung für das zweite dreidimensionale Strömungsmodell (Vertikalschnitt entlang Durchlassachse) mit Randbedingung NN +12,5 m

Die ermittelte Grundwasserpotenzialverteilung für den Vertikalschnitt entlang der Achse des Durchlasses (Bild 4.8) ergibt im Vergleich zur entsprechenden zweidimensionalen Modellierung (drittes vertikal-ebenes Ersatzmodell, Bild 4.4) eine geringere hydraulische Belastung des Auslaufbauwerkes. Dies ist begründet durch die realistische Abbildung der Bauwerksverhältnisse im dreidimensionalen Modell, wodurch sich im Vergleich zum dritten vertikal-ebenen Ersatzmodell (keine Berücksichtigung des Durchlasses, unendliche Ausdehnung der hydraulisch wirksamen Fuge in der Breite) ein erhöhter Potenzialabbau bei der Zuströmung aus dem Kanal und der Umströmung des Durchlasses zu der hydraulisch wirksamen Fuge unterhalb des Durchlasses ergibt.

### 3.2 Standsicherheitsnachweise

#### Globale Standsicherheit

Der größte Ausnutzungsgrad ergibt sich für das erste dreidimensionale Strömungsmodell unter Annahme eines vollständigen Dichtungsausfalls bei Ansatz eines Wasserstandes im Auslaufbereich von NN +14,5 m. Er beträgt  $\mu = 0,66$  und ist somit kleiner als der größte Ausnutzungsgrad, der mit Hilfe der vertikal-ebenen Ersatzmodelle ermittelt wurde.

#### Lokale Standsicherheit

Für beide dreidimensionalen Modellierungen wird kein Austritt der Sickerlinie in der Böschung oberhalb des Bauwerks ermittelt. Die lokale Sicherheit ist somit ausreichend.

#### Hydraulischer Grundbruch

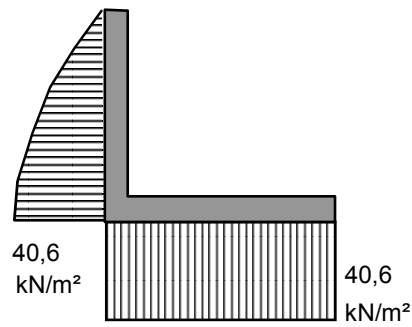
Die für den Nachweis des hydraulischen Grundbruchs maßgebliche Potenzialverteilung ergibt sich für das zweite dreidimensionale Strömungsmodell unter Annahme eines Wasserstandes im Auslaufbereich von NN +12,5 m. Das über die Breite des Bodenkörpers gemittelte hydraulische Gefälle beträgt  $i = 0,74$ . Es ergibt sich:

$$14,8 \text{ kN/m} \cdot 1,2 = 17,8 \text{ kN/m} \leq 18,1 \text{ kN/m} = 19 \text{ kN/m} \cdot 0,95$$

D.h. die Sicherheit gegen hydraulischen Grundbruch ist ausreichend.

*Belastung der Bauwerke*

Die maßgebliche Wasserdruckbelastung auf das Auslaufbauwerk ergibt sich für das zweite dreidimensionale Strömungsmodell bei Ansatz der Randbedingung von NN +14,5 m. In Bild 4.9 ist die Wasserdruckverteilung grafisch dargestellt.



*Bild 4.9: Wasserdruckverteilung auf das Auslaufbauwerk für das zweite 3-D-Modell (Randbedingung NN+14,5 m)*

## Anhang 5: Gehölzliste

**Tabelle 1:** Für Dämme und für das landseitige Dammvorland (alle Zonen) **nicht zulässige** Bäume

Populus alba	- Silberpappel	Populus tremula	- Zitterpappel
Populus canescens	- Graupappel	Alle Hybridpappeln	
Populus nigra	- Schwarzpappel	Robinia pseudoacacia	- Robinie

**Tabelle 2:** Für Dämme **zulässige** Sträucher bei innenliegender Dichtung und Dämmen ohne Dichtung (Zone 1)

Berberis vulgaris	- Berberitze	Salix purpurea	- Purpurweide
Cornus sanguinea	- Roter Hartriegel	Salix triandra	- Mandelweide
Ligustrum vulgare	- Rainweide	Sambucus nigra	- Schwarzer Holunder
Lonicera xylosteum	- Heckenkirsche	Sambucus racemosa	- Roter Holunder
Rosa canina	- Hundsrose	Viburnum lantana	- Wolliger Schneeball
Rubus caesius	- Kratzbeere	Viburnum opulus	- Wasserschneeball

**Tabelle 3:** Für Dämme **zulässige** Bäume und Sträucher bei Dammüberbreiten  $\geq 1$  m mit Einzelgehölzen und Gehölzgruppen (Zone 2 und 3)

Acer campestre	- Feldahorn	Prunus avium <sup>1)</sup>	- Vogelkirsche
Alnus glutinosa	- Schwarzerle	Prunus domestica <sup>1)</sup>	- Hauspflaume
Berberis vulgaris	- Berberitze	Prunus mahaleb <sup>1)</sup>	- Weichselkirsche
Carpinus betulus	- Hainbuche	Prunus spinosa	- Schlehdorn
Cornus mas	- Kornelkirsche	Rhamnus catharticus	- Kreuzdorn
Cornus sanguinea	- Roter Hartriegel	Alle Wildrosenarten	
Corylus avellana	- Hasel	Strauchweidenarten der Flussauen	
Crataegus monogyna	- Weißdorn (eingrifflich)	Sambucus nigra	- Schwarzer Holunder
Crataegus oxyacantha	- Weißdorn (zweigrifflig)	Sambucus racemosa	- Roter Holunder
Cytisus scoparius	- Besenginster	Sorbus aria	- Mehlbeere
Euonymus europaeus	- Spindelstrauch	Sorbus aucuparia	- Eberesche
Ligustrum vulgare	- Rainweide	Sorbus domestica	- Speierling
Lonicera periclymenum	- Waldgeißblatt	Sorbus intermedia	- Nordische Eberesche
Lonicera xylosteum	- Heckenkirsche	Sorbus torminalis	- Elsbeerbaum
Malus silvestris <sup>1)</sup>	- Holzapfel	Viburnum lantana	- Wolliger Schneeball
Pirus communis <sup>1)</sup>	- Holzbirne	Viburnum opulus	- Wasserschneeball

<sup>1)</sup> nur vereinzelt verwenden

**Tabelle 4:** Für einen 10 m breiten Streifen landseitig der luftseitigen OK des Seitengrabens zulässige Bäume und Sträucher (Zone 5)

Acer campestre	-	Feldahorn	Prunus mahaleb	-	Weichselkirsche
Acer platanoides	-	Spitzahorn	Prunus spinosa	-	Schlehdorn
Acer pseudoplatanus	-	Bergahorn	Rhamnus catharticus	-	Kreuzdorn
Alnus glutinosa	-	Schwarzerle	Alle Wildrosenarten		
Alnus incana	-	Grauerle	Rubus caesius	-	Kratzbeere
Betula pendula	-	Sandbirke	Rubus fruticosus	-	Brombeere
Carpinus betulus	-	Hainbuche	Rubus idaeus	-	Himbeere
Cornus mas	-	Kornelkirsche	Salix alba	-	Silberweide
Cornus sanguinea	-	Roter Hartriegel	Salix fragilis	-	Bruchweide
Corylus avellana	-	Hasel	Salix x rubens	-	Weißweide
Crataegus monogyna	-	Weißdorn (eingrifflich)	Strauchweidenarten der Flussauen		
Crataegus oxyacantha	-	Weißdorn (zweigrifflich)	Sambucus nigra	-	Schwarzer Holunder
Cytisus scoparius	-	Besenginster	Sambucus racemosa	-	Roter Holunder
Euonymus europaeus	-	Spindelstrauch	Sorbus aria	-	Mehlbeere
Ligustrum vulgare	-	Rainweide	Sorbus aucuparia	-	Eberesche
Lonicera periclymenum	-	Waldgeißblatt	Sorbus domestica	-	Speierling
Lonicera xylosteum	-	Heckenkirsche	Sorbus intermedia	-	Nordische Eberesche
Malus silvestris	-	Holzapfel	Sorbus torminalis	-	Elsbeerbaum
Pirus communis	-	Holzbirne	Viburnum lantana	-	Wolliger Schneeball
Prunus avium	-	Vogelkirsche	Viburnum opulus	-	Wasserschneeball
Prunus domestica	-	Hauspflaume			