

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Article, Published Version

**Laursen, Charlotte**

## **Nachweis gegen Fugenerosion gemäß dem Merkblatt "Standsicherheit von Dämmen an Bundeswasserstraßen"**

BAWMitteilungen

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/102573>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Laursen, Charlotte (2011): Nachweis gegen Fugenerosion gemäß dem Merkblatt "Standsicherheit von Dämmen an Bundeswasserstraßen". In: BAWMitteilungen 94. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 47-58.

### **Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:**

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



# Nachweis gegen Fugenerosion gemäß dem Merkblatt „Standsicherheit von Dämmen an Bundeswasserstraßen“

## *Verification of Safety against Piping as Specified in the Code of Practice „Stability of Embankment Dams at German Inland Waterways“*

Dipl.-Ing. Charlotte Laursen, Bundesanstalt für Wasserbau

Die Bildung von Erosionskanälen entlang eines Bauwerks (Piping) ist eine der häufigsten Ursachen für das Versagen von Dämmen und Deichen. Die in der Literatur aufgeführten Berechnungsverfahren erlauben i. A. jedoch nur eine globale Beurteilung der Gefahr des Piping ohne Berücksichtigung der bauwerksspezifischen Besonderheiten. Im Merkblatt Standsicherheit von Dämmen an Bundeswasserstraßen (MSD), Ausgabe 2005 [1], wird für die Nachweisführung deshalb auf diese Verfahren verzichtet. Für Bauwerke in Dämmen wird ein Verfahren eingeführt, das den geometrischen und geohydraulischen Besonderheiten des Übergangsbereiches zwischen Baugrund und Bauwerk unter Berücksichtigung der Bauwerksherstellung wesentlich besser Rechnung trägt. Im folgenden Beitrag werden die Nachweisführung gemäß MSD vorgestellt und die Grundlagen dieses Ansatzes beleuchtet. Anhand eines Beispiels werden die Berechnungsergebnisse mit denen verschiedener anderer Nachweisverfahren verglichen.

*The development of erosion channels along constructions (i.e. piping) is one of the most frequent causes for the failure of embankment dams and dykes. Calculation methods known in the literature generally allow only a global assessment of the piping risk without taking particularities specific to the construction into account. Therefore BAW Code of Practice: Stability of Embankment Dams at German Inland Waterways (MSD), 2005 edition [1], doesn't use these methods for the verification against piping. A new method is introduced for structures embedded in embankment dams which takes the geometrical and geohydraulic particularities of the transition between subsoil and structures, considering also the installation of the structure, much better into account. The following article presents the*

*verification method against piping according to MSD and explains the basics of this approach. Based on a sample calculation, the calculation results of the new method are compared to those of other verification methods.*

### 1 Einleitung *Introduction*

Als Fugenerosion oder Piping wird ein hydrodynamischer Bodentransport an Grenzflächen bezeichnet. Für Fugenerosion gefährdete Grenzflächen finden sich sowohl zwischen verschiedenen Bodenschichten, i. A. zwischen einer bindigen Deckschicht und einer unterlagernden, durchlässigen Schicht als auch zwischen einem Bauwerk und dem Baugrund. Damit Fugenerosion stattfinden kann, ist – wie für jede Art des hydrodynamischen Bodentransports – eine Sickerströmung mit einer entsprechend großen Schleppkraft erforderlich. Die Strömungskraft des Wassers im Boden versetzt die Bodenkörner entlang der Grenzfläche in Bewegung und es kommt zu einer konzentrierten Unterspülung eines Bauwerkes oder der Deckschicht. Bei den bekannten Berechnungsverfahren handelt es sich überwiegend um statistisch empirische Verfahren, die für eine Fugenerosion unter Wehranlagen oder unter bindigen Deckschichten abgeleitet wurden und die nicht sinnvoll auf die Problematik von Bauwerken in Dämmen übertragbar sind. Das Nachweisverfahren nach MSD bietet demgegenüber die Möglichkeit die individuell verschiedenen Untergrund- und Bauwerksverhältnisse in dem zugrunde liegenden numerischen Modell zu berücksichtigen.

## 2 Nachweisverfahren *Assessment method*

### 2.1 Verfahren nach MSD *MSD method*

Grundlage des Verfahrens nach MSD für den Nachweis der Sicherheit gegen Fugenerosion entlang der Grenzflächen zwischen Bauwerk und Dammkörper bzw. Untergrund ist die numerische Berechnung der Durchströmung des Dammes und des Untergrundes im Bereich des Bauwerkes unter folgenden ungünstigen hydraulischen Randbedingungen:

- Annahme einer Zuströmung aus dem Kanal infolge eines hydraulischen Versagens der Kanaldichtung und
- Berücksichtigung von möglichen Hohlräumen (hydraulisch wirksamen Fugen) zwischen Bauwerk und Dammkörper bzw. Untergrund, in denen bei Durchströmung kein oder nur ein sehr geringer Potenzialabbau stattfindet.

Dabei werden an allen Grenzflächen zwischen den Bauwerksteilen und dem Dammkörper bzw. Untergrund hydraulisch wirksame Fugen angesetzt, an denen eine Hohlräumbildung auf Grund des Bodenmaterials der Dammschüttung und des Untergrunds, der Bauwerksgeometrie und des Bauverfahrens möglich ist. Diese Hohlräume können sowohl bei der Erstellung des Bauwerkes z. B. durch ungenügende Verdichtung oder ungleichmäßige Auflagerung als auch infolge von Setzungen oder infolge einer Durchströmung entstehen. In Tabelle 8 des MSD sind Beispiele zur Beurteilung der Gefahr einer Hohlräumbildung bei Bauwerken in Dämmen zu finden.

Zur Ermittlung der maßgebenden Beanspruchung werden zwei Strömungsberechnungen durchgeführt:

- In der ersten Berechnung unter Berücksichtigung hydraulisch wirksamer Fugen wird der zu berücksichtigende Dichtungsausfall auf einen realistischen Teilbereich der Kanaldichtung beschränkt. Dieses Vorgehen wurde gewählt um eine unrealistisch hohe Dammdurchströmung, die sich bei der Überlagerung von vollständigem Dichtungsausfall und möglicher hydraulisch wirksamer Fugen ergeben würde, zu vermeiden.

- Die zweite Berechnung erfolgt unter der Annahme eines vollständigen hydraulischen Ausfalls der Kanaldichtung jedoch ohne Berücksichtigung von möglichen Fugen zwischen Bauwerk und Damm bzw. Untergrund. Dies entspricht der Vorgehensweise bei Dämmen ohne darin eingebettete Bauwerke.

Auf Grundlage der aus diesen beiden Berechnungen ermittelten Grundwasserpotenzialverteilungen sind die relevanten geotechnischen und geohydraulischen Nachweise zu führen. Maßgebend für die einzelnen Nachweise ist die jeweils ungünstigere Potenzialverteilung.

Im Einzelnen ist auf Grundlage der berechneten Grundwasserpotenzialverteilungen (vor allem für Sickerwassertrittsbereiche) zu untersuchen, ob

- ausreichende Sicherheiten gegen hydraulischen Grundbruch und Aufschwimmen sowie gegen Böschungsbruch gegeben sind und
- der Boden selbst eine ausreichende Erosions- und Suffosionssicherheit besitzt.

Sind die Sicherheiten erfüllt, ist nachgewiesen, dass auch unter ungünstigen geohydraulischen Annahmen keine Gefahr eines Bodenaustrags besteht. Umlagerungen im Baugrund können damit zwar nicht vollständig ausgeschlossen werden. Da aber kein Bodenmaterial das System verlassen kann, besteht auch keine Gefahr, dass durch rückschreitende Erosion (Piping) der Damm schrittweise zerstört wird. Dadurch ist der Nachweis einer ausreichenden Sicherheit gegen Fugenerosion erbracht.

Falls die relevanten geotechnischen und geohydraulischen Nachweise nicht erbracht werden können, sind geeignete Maßnahmen zur Verhinderung eines möglichen Bodenaustrags im Bauwerksbereich erforderlich (z. B. Sickerwegverlängerungen, Grundwasserdruckentlastungen oder Dräns). Dafür ist auf Grundlage der numerischen Berechnungen der Damm- und Untergrunddurchströmung unter Berücksichtigung der Maßnahmen der oben beschriebene Nachweis der Sicherheit gegen Fugenerosion zu erbringen.

Verfahren nach Bligh		Verfahren nach Lane	
Sickerwegquotient $C_B$ $C_B = L/H \geq C_{B,erf}$ mit $L = L_v + L_h$		Sickerwegquotient $C_L$ $C_L = L/H \geq C_{L,erf}$ mit $L = L_v + L_f/3$	
Bodenart	$C_{B,erf}$	Bodenart	$C_{L,erf}$
Feiner Schlick	18	Sehr feiner Sand, Schluff	8,5
Feiner, schlickartiger Sand	15	Feinsand	7,0
Grobsand	12	Grobsand	5,0
Mischungen aus Sand, Kies und Geröll	4 - 6	Kies und Geröll	3,0

Tabelle 1: Erforderliche Sickerwegquotienten nach Bligh ( $C_{B,erf}$ ) und Lane ( $C_{L,erf}$ )  
 Table 1: Required coefficients of seepage flow length according to Bligh ( $C_{B,erf}$ ) and Lane ( $C_{L,erf}$ )

## 2.2 Verfahren nach Bligh und Lane Methods by Bligh and Lane

Bei den Bemessungsansätzen von Bligh [2] und Lane [3] handelt es sich um statistisch-empirische Verfahren. Beiden Ansätzen liegt die Auswertung einer Vielzahl von Stauanlagen zu Grunde. Je nach anstehender Bodenart wird ein bestimmtes Verhältnis des Sickerweges  $L$  zur äußeren Potenzialdifferenz  $H$ , der sogenannte Sickerwegquotient  $C_{erf} = L/H$ , als erforderlich erachtet. Während Bligh bei seinen Untersuchungen den Sickerweg  $L$  als den der kürzesten Strömungsweg bei der Umströmung, d. h. den unterirdischen Umriss der Bauwerksgründung, zu Grunde legt, nimmt Lane ein Wichtung einzelner Abschnitte des Sickerwegs entsprechend ihrer Strömungsrichtung vor, indem die Wirksamkeit vertikaler bzw. mehr als 45° zur Horizontalen geneigter Strecken ( $L_v$ ) hydraulisch als dreimal so wirksam wie die horizontalen ( $L_h$ ) angesetzt werden.

In Tabelle 1 sind die Ansätze von Bligh und Lane zur Ermittlung des Sickerwegquotienten  $C$  sowie die erforderlichen Sickerwegsquotienten  $C_{erf}$  für verschiedene Bodenarten zusammengestellt.

## 2.3 Verfahren nach Tschugaev Tschugaev's method

Tschugaev (in [4]) wertete ebenfalls eine große Zahl von Staubauewerken aus. Auf Basis dieser Untersuchungen gibt er für verschiedene Bodenarten zulässige Kontrollgradienten  $I_{k,zul}$  an (Tabelle 2). Die Beurteilung der Erosionssicherheit erfolgt bei diesem Verfahren anhand

Verfahren nach Tschugaev	
$I_k = \frac{H}{T \sum \zeta_i} \quad I_k \leq I_{k,zul}$	
Bodenart	$I_{k,zul}$
Dichter Ton	0,40 - 0,52
Grobsand, Kies	0,25 - 0,33
Schluffiger Ton	0,20 - 0,26
Mittelsand	0,15 - 0,20
Feinsand	0,12 - 0,16

Tabelle 2: Zulässige Kontrollgradienten  $I_{k,zul}$  nach Tschugaev  
 Table 2: Permissible control gradients  $I_{k,zul}$  according to Tschugaev

der Gegenüberstellung des mittleren hydraulischen Gradienten  $I_k$  im Untergrund zum zulässigen Kontrollgradienten  $I_{k,zul}$ .

Bei der Ermittlung des hydraulischen Gradienten wird über Widerstandskoeffizienten ( $\zeta_i$ ) die Mächtigkeit der durchströmten Schicht unterhalb des Bauwerks ( $T$ ) sowie die Art der Umströmung erfasst (Fragmentenmethode), was zu einer realitätsnäheren Abbildung der Strömungsverhältnisse führt.

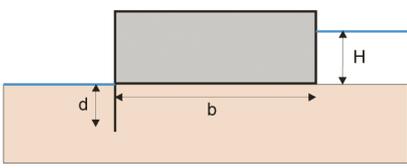
Verfahren nach Khosla		
	$G_E = \frac{H}{\pi \cdot d} \cdot \frac{1}{\sqrt{\lambda}}$ $G_E \leq G_{E,zul}$	$\lambda = \frac{1 + \sqrt{1 + \alpha^2}}{2} \text{ mit } \alpha = \frac{b}{d}$
Bodenart	Sicherheitsfaktoren	Zulässige Austrittsgradienten
Feinsand oder Schluff	6 - 7	0,17 - 0,14
Grobsand	5 - 6	0,2 - 0,17
Kies	4 - 5	0,25 - 0,2

Tabelle 3: Zulässige Austrittsgradienten  $G_{E,zul}$  u. empfohlene Sicherheitsfaktoren nach Khosla  
 Table 3: Permissible exit gradients  $G_{E,zul}$  and recommended safety factors according to Khosla

### 2.4 Methode der kritischen Austrittsgradienten von Khosla

#### *Khosla's method of critical exit gradients*

Khosla (in [5]) hat für verschiedene Arten und Formen von Wehren Formeln zur Bestimmung des zulässigen Austrittsgradienten an der stauabgewandten Seite erarbeitet. Tabelle 3 zeigt die Formeln zur Ermittlung des Auftrettsgradienten  $G_E$  und die von ihm vorgeschlagenen zulässigen Austrittsgradienten und die zugehörigen Sicherheitsfaktoren für eine Wehrgeometrie mit unterwasserseitiger Dichtwand.

- Kräftegleichgewicht für die Schleppkraft des strömenden Wassers und den Rollwiderstand der Sandkörner.

Mit Hilfe dieser Gleichungen kann die maximale Wasserstands-differenz an dem Staubaauwerk ermittelt werden, bei dem die Sandkörner gerade noch im Gleichgewicht sind. Dieser Wert ist abhängig von dem Verhältnis  $l/L$ , d. h. der Länge des Erosionskanals  $l$  und der Länge des Staubaauwerkes  $L$ , dem Schleppkraftkoeffizienten sowie der Durchlässigkeit, der Korngröße und dem Rollwiderstand der Sandkörner. Für das in Bild 1 darge-

### 2.5 Verfahren nach Sellmeijer

#### *Sellmeijer's method*

Sellmeijer (in [6]) entwickelte ein Nachweisverfahren für die rückschreitende Erosion unter einer bindigen Deckschicht. In Bild 1 ist das Grundmodell für das Berechnungsverfahren nach Sellmeijer dargestellt. Das Modell besteht aus einem undurchlässigen Bauteil der Länge  $L$ , das auf einem Untergrund aus Sand aufsteht. Das Bauteil ist beidseitig eingestaut, wobei zwischen Ober- und Unterwasserseite eine Wasserspiegeldifferenz  $\Delta H$  vorhanden ist. Im unterwasserseitigen Bereich der Aufstandsfläche befindet sich ein Erosionskanal der Länge  $l$ . Das mathematische Nachweisverfahren besteht aus einer Verbindung folgender Gleichungen:

- Potenzialgleichung zur Beschreibung des Grundwasserstroms in der Sandschicht,
- Strömungsgleichung für die laminare Strömung im Erosionskanal und

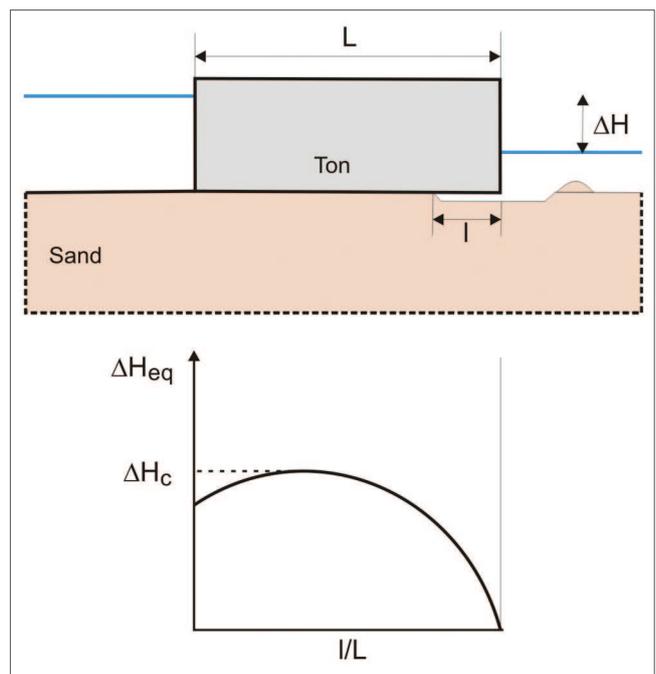


Bild 1: Grundmodell des Berechnungsansatzes nach Sellmeijer

Figure 1: Ground model of Sellmeijer's calculation approach

stellte Modell ergibt sich die maximale Wasserstands-differenz, die sogenannte kritische Wasserstands-differenz, bei der sich ein Gleichgewichtszustand einstellt, bei einem Verhältnis  $l/L = 0,5$ . Für Differenzen, die kleiner als diese kritische Wasserstands-differenz sind, entsteht ein Erosionskanal, dessen Länge von der Größe der Differenz abhängig ist. Bei zunehmenden Differenz nimmt die Länge des Erosionskanals zu bis ein neuer Gleichgewichtszustand erreicht ist. Der Erosionsprozess kommt immer wieder zum Stillstand solange die Wasserstands-differenz die kritische Differenz nicht überschreitet. Nach Überschreiten der kritischen Wasserstands-differenz nimmt die Länge des Erosionskanals zu bis ein Durchbruch zur Oberwasserseite entsteht. Nach Überschreiten dieses kritischen Punktes beschleunigt sich der Erosionsprozess sehr stark. Sellmeijer hat auf dieser Basis eine Vielzahl von Berechnungen durchgeführt, bei denen die maßgeblichen Parameter variiert wurden. Die analytische Formel für den Nachweis wurde durch Kurvenanpassung an diese Berechnungsergebnisse abgeleitet und durch großmaßstäbliche Versuche validiert.

Sellmeijer hat diesen grundlegenden Ansatz auf die Situation in Bild 2 übertragen und folgende Formel für die Ermittlung der kritischen Wasserstands-differenz abgeleitet.

$$\Delta H_c = \alpha \cdot c \cdot \frac{\gamma_p}{\gamma_w} \cdot \tan \theta \cdot (0,68 - 0,10 \cdot \ln c) \cdot L$$

$$\alpha = \left(\frac{D}{L}\right)^{\left(\frac{0,28}{(D/L)^{2,8} - 1}\right)} \quad c = \eta \cdot d_{70} \cdot \left(\frac{1}{\kappa \cdot L}\right)^{\frac{1}{3}}$$

$$\kappa = \frac{\nu}{g} \cdot k = 1,35 \cdot 10^{-7} \cdot k$$

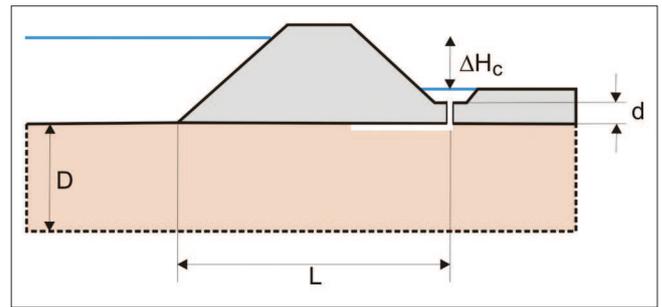


Bild 2: Grundmodell für den Nachweis nach Sellmeijer  
Figure 2: Ground model for the verification according to Sellmeijer

In TAW [6] wurde daraus eine praktikable Formel abgeleitet. Die Sicherheit gegen Fugenerosion ist demnach gegeben, wenn folgende Bedingung eingehalten wird:

$$(\Delta H - 0,3 \cdot d) \leq \frac{1}{\gamma} \Delta H_c$$

mit dem Sicherheitsfaktor  $\gamma = 1,20$  und der Länge  $d$  des Aufbruchkanals in [m].

Tabelle 4 beinhaltet eine Empfehlung für die Wahl der Parameter.

$\Delta H_c$	Kritische Potenzialdifferenz
$\gamma_p$	Wichte des Bodens unter Auftrieb [kN/m <sup>3</sup> ]
$\gamma_w$	Wichte Wasser [kN/m <sup>3</sup> ]
$\theta$	Reibungswinkel des Bodens [°]
$L$	Länge Sickerweg [m]
$D$	Dicke der durchströmten Schicht [m]
$\eta$	Schleppkraftkoeffizient [-]
$d_{70}$	Korndurchmesser bei 70% Siebdurchgang [m]
$\kappa$	Permeabilität [m <sup>2</sup> ]
$\nu$	kinematische Viskosität [m <sup>2</sup> /s]
$k$	Durchlässigkeit [m/s]
$g$	Schwerebeschleunigung [m <sup>2</sup> /s]

Parameter	Bezeichnung	Einheit	Art des repräsentativen Werts	Anmerkung/ Standard-/ abweichung $V_c$
$\Delta H$	Wasserstands­differenz	[m]	NHW - Grabensohle NHW - GOK	
L	Länge der Umströmung	[m]	geringer repräsentativer Wert	wenn keine Versuchs- werte vorhanden: $V_c = 0,10$
D	Mächtigkeit der durchströmten Schicht	[m]	hoher repräsentativer Wert	wenn keine Versuchs- werte vorhanden: $V_c = 0,10$
$\theta$	Rollwiderstandswinkel	[°]	nominal: 41°	
$\eta$	Schleppkraftfaktor	[-]	nominal: 0,25	
$\gamma_p$	Wichte des Bodens	[kN/m <sup>3</sup> ]	nominal: 17 kN/m <sup>2</sup>	
$\gamma_w$	Wichte des Wassers	[kN/m <sup>3</sup> ]	nominal: 10 kN/m <sup>2</sup>	
$\kappa$	Permeabilität	[m <sup>2</sup> ]	hoher repräsentativer Wert	
$d_{70}$	Korndurchmesser bei 70% Siebdurchgang	[m]	geringer repräsentativer Wert	0,25

Tabelle 4: Empfohlene Parameter nach TAW [1994] (in TAW, 1999)

Table 4: Recommended parameters according to TAW [1994] (in TAW, 1999)

Die charakteristischen Werte werden wie folgt ermittelt:

- hoher repräsentativer Wert  $= \mu (1 + t_{N-1}^{0,95} V_c)$
  - geringer repräsentativer Wert  $= \mu (1 - t_{N-1}^{0,95} V_c)$
- mit  $\mu$  = Mittelwert oder Schätzwert  
 $V_c$  = Standardabweichung  
 $t_{N-1}^{0,95}$  = Student- t- Faktor  
 (falls keine Versuchsergebnisse vorliegen:  
 $t_{N-1}^{0,95} = 1,65$ )

Da das Verfahren für den Nachweis der Fugenerosion unter einer bindigen Deckschicht entwickelt wurde, wird der Einfluss von Sickerwegverlängerungen bei diesem Ansatz nicht berücksichtigt, was hinsichtlich der kritische Wasserstands­differenz  $\Delta H_c$  zu auf der sicheren Seite liegenden Ergebnissen führt.

### 3 Beispielberechnung Sample calculation

Für die nachfolgenden Vergleichsberechnungen wird das Beispiel aus Anhang 4 des MSD (2005) verwendet. Es handelt sich hierbei um einen idealisierten Durchlass unter einem gedichteten Kanal mit einen Auslaufbauwerk und einen anschließenden Auslaufgraben. Die Bauwerks- und Dammgeometrie sowie die Bodenparameter sind in Bild 3 dargestellt. Der Durchlass besteht aus Betonfertigteilen, die vor dem Bau des Kanals in einem offenen Graben verlegt wurden. Die Grabenverfüllung entspricht dem vorhandenen Untergrundmaterial. Die Sohlplatte des Auslaufbauwerks besteht aus Fertigbeton.

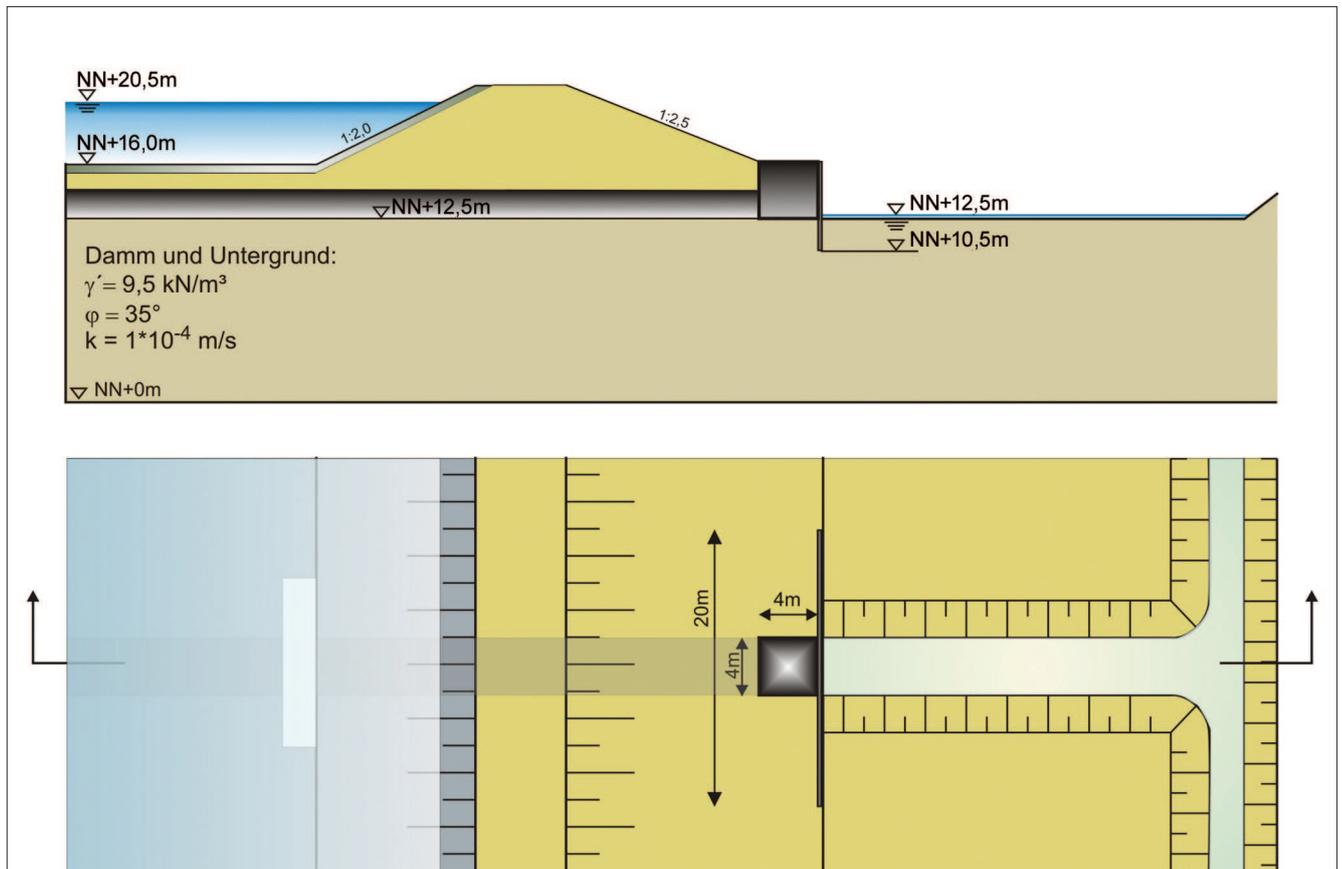


Bild 3: Durchlassbauwerk, Längsschnitt und Draufsicht  
 Figure 3: Culvert structure, longitudinal section, and top view

### 3.1 Verfahren nach MSD MSD method

Die Ermittlung der Dammdurchströmung erfolgt anhand eines dreidimensionalen FE-Modells. In der außergewöhnlichen Bemessungssituation werden zwei Modelle verwendet. Die Berechnungen im ersten Modell erfolgen unter Annahme eines vollständigen Ausfalls der Dichtung und ohne Berücksichtigung hydraulisch wirksamer Fugen. Im zweiten Modell wird eine 1 cm dicke durchgängige Fuge unter dem Durchlass und dem Auslaufbauwerk angenommen, da im vorliegenden Fall auf Grund des Herstellungsverfahrens des Durchlasses nicht auszuschließen ist, dass Hohlräume unter dem Durchlass vorhanden sind. Die Nachbildung dieser Fuge im FE-Modell erfolgt unter Annahme einer laminaren Strömung in der Fuge über eine 0,5 m mächtigen Schicht mit einer Durchlässigkeit von  $k = 1 \text{ m/s}$ . Der Dichtungsausfall wird in diesem Fall auf eine Leckagegröße von 12,5 m Länge und 2 m Breite am Übergang zwischen Sohl- und Böschungsdichtung begrenzt.

Bild 4 zeigt die anhand der beiden Modelle ermittelte Potenzialverteilung im Schnitt entlang der Achse des Durchlasses.

Da im Bereich der Fuge unter dem Durchlass kein oder nur ein geringer Potenzialabbau stattfindet, erfolgt im vorliegenden Beispiel der Potenzialabbau überwiegend im Zuströmbereich zwischen der Leckage und der Fuge sowie bei der Umströmung der Spundwand.

Betrachtet man nun die Nachweise, die nach MSD für den Nachweis der Sicherheit gegen Piping zu führen sind, so sind der Böschungsbruch und Materialtransport als unkritisch zu bewerten. Da im vorliegenden Fall keine bindige Deckschicht vorhanden ist, entfällt der Nachweis gegen Aufschwimmen.

Für den Nachweis gegen hydraulischen Grundbruch wird nach DIN 1054:2005-01 ein Bodenkörper vor dem Spundwandfuß betrachtet, dessen Höhe der luftseitigen Einbindetiefe der Spundwand in den Baugrund und dessen Breite der halben Höhe entspricht. In Bild 5 ist dieser Bodenkörper zusammen mit der anhand des zweiten 3D-Modells ermittelten Potenzialverteilung an

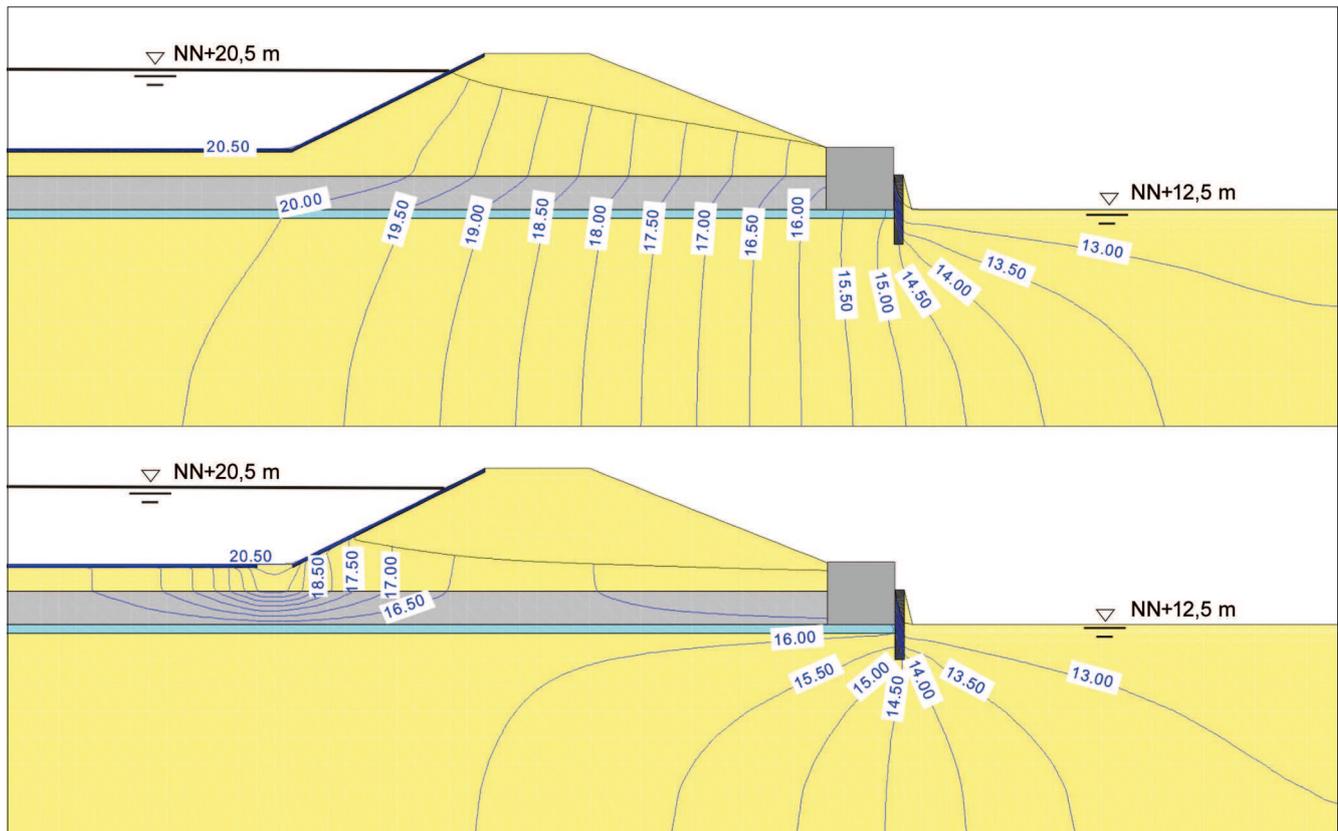


Bild 4: Potenzialverteilung für das erste (oben) und zweite (unten) 3-D-Modell im Vertikalschnitt entlang der Durchlassachse  
 Figure 4: Groundwater head distribution for the first (above) and the second (below) 3-D model; vertical section along the culvert axis

der Unterseite dieses Körpers (in Bauwerksachse) dargestellt. Das Potenzial an der Unterseite des Bodenkörpers ist in diesem Fall geringfügig größer als für das im ersten 3D-Modell und daher maßgebend für den Nachweis gegen hydraulischen Grundbruch. Die charakteristische Strömungskraft, die auf den Körper wirkt, errechnet sich mit einem mittleren Potenzial an der Unterseite des Körpers in der Höhe von NN + 13,98 m und einem Potenzial an der Oberseite entsprechend dem Wasserstand in Höhe der Grabensohle von NN + 12,5 m zu  $S'_k = 14,8 \text{ kN/m}$ . Die charakteristische Eigenlast des durchströmten Bodenkörpers unter Auftrieb berechnet sich zu 18,1 kN/m.

Im vorliegenden Beispiel erfolgt eine Durchströmung nur im Falle einer Dichtungsleckage. Dieser Fall ist eine außergewöhnliche Bemessungssituation (Lastfall 3) und mit den entsprechenden Teilsicherheitsbeiwerten für die Strömungskraft  $\gamma_H = 1,2$  und für die günstigen ständigen Einwirkungen  $\gamma_{G,stab} = 0,95$  ergibt sich für den Nachweis gegen hydraulischen Grundbruch:

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

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

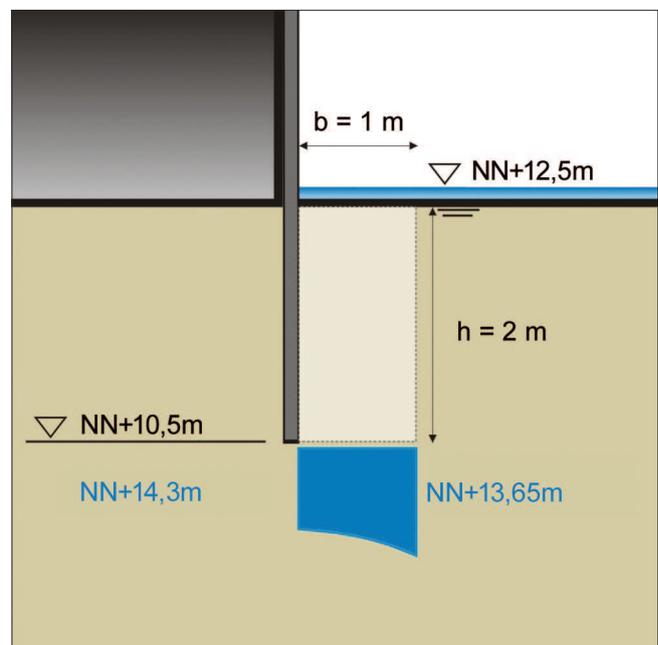


Bild 5: Nachweis gegen hydraulischen Grundbruch, vereinfachter Bodenkörper nach DIN 1054  
 Figure 5: Verification of hydraulic heave safety, simplified unstable block according to DIN 1054

d. h. die Sicherheit gegen hydraulischen Grundbruch ist gerade noch ausreichend.

### 3.2 Verfahren nach Bligh und Lane *Methods by Bligh and Lane*

Bei der Anwendung der Nachweisverfahren nach Bligh und Lane wurde für das Beispiel der in Bild 6 dargestellte Sickerweg festgelegt. Bei der vertikalen Sickerstrecke zwischen dem Übergang Sohl- und Böschungsdichtung und der Unterseite des Durchlasses handelt es sich genau genommen nicht um einen Bauwerksumriss. Dieser Teil der Sicherstrecke wird bei den Nachweisen nach Bligh und Lane einer Sickerstrecke entlang des Bauwerksumrisses gleichgesetzt. Für die beiden Nachweise ergeben sich die in Tabelle 5 zusammengestellten Zahlenwerte. Sie zeigen, dass der Nachweis gegen Fugenerosion für das Beispiel nach beiden Verfahren nicht erfüllt ist.

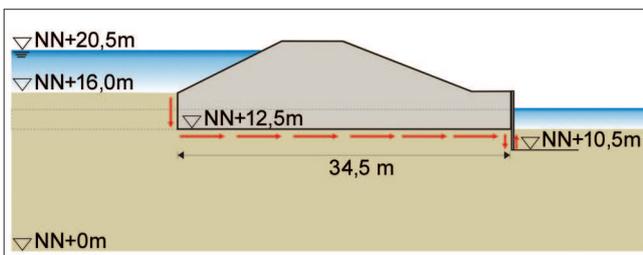


Bild 6: Sickerweg für die Nachweise nach Bligh und Lane für das Beispiel

Figure 6: Seepage flow path for the verification against piping according to Bligh and Lane applied to sample calculation

### 3.3 Verfahren nach Tschugaev *Tschugaev's method*

Wie bereits in Kapitel 2.3 beschrieben werden bei der Ermittlung des hydraulischen Gradienten  $I_k$  sogenannte Widerstandskoeffizienten ( $\zeta_i$ ) verwendet. Somit ist es möglich die Mächtigkeit der durchströmten Schicht unterhalb des Bauwerks (T) sowie die Art der Umströmung zu erfassen. MANSOUR, 2005 enthält im Anhang eine Zusammenstellung der Formeln, mit denen die einzelnen Widerstandskoeffizienten (Widerstand für Elemente im Zu- und Abströmbereich, Widerstand für innere Absperrungen und Absätze, Widerstand für horizontale Elemente) berechnet werden können. In Bild 7 sind die für das Beispiel ermittelten Widerstandskoeffizienten für die verschiedenen Bereiche der Umströmung dargestellt

Mit  $H = 8 \text{ m}$ ,  $T = 16 \text{ m}$  und  $\Sigma \xi = 4,11$  ergibt sich nach der in Tabelle 2 genannten Formel ein Kontrollgradient  $I_k = 0,12$ . Für einen Feinsand nennt Tschugaev zulässigen Kontrollgradienten  $I_{k,zul}$  zwischen 0,12 und 0,16. Der Nachweis gegen Fugenerosion nach Tschugaev ist somit für das Beispiel erbracht.

Verfahren nach Bligh	Verfahren nach Lane
Sickerwegquotient $C_B$ $C_B = L/H \geq C_{B,erf}$	Sickerwegquotient $C_L$ $C_L = L/H \geq C_{L,erf}$ mit $L = L_v + L_h/3$
$H = 8 \text{ m}$	$H = 8 \text{ m}$
$L = 3,5 \text{ m} + 34,5 \text{ m} + 2 \text{ m} + 2 \text{ m} = 42 \text{ m}$	$L_v = 3,5 \text{ m} + 2 \text{ m} + 2 \text{ m} = 7,5 \text{ m}$ , $L_h = 34,5 \text{ m}$ $L = 7,5 \text{ m} + 34,5 \text{ m}/3 = 19 \text{ m}$
Sand: $C_{B,erf} = 15$	Sand: $C_{L,erf} = 7$
$C_B = 42 \text{ m} / 8 \text{ m} = 5,25$	$C_L = 19 / 8 \text{ m} = 2,38$
$C_B = 5,25 < 15 = C_{B,erf}$	$C_L = 2,38 < 7 = C_{L,erf}$

Tabelle 5: Nachweise nach Bligh und Lane für das Beispiel

Table 5: Verification methods by Bligh and Lane applied to sample calculation

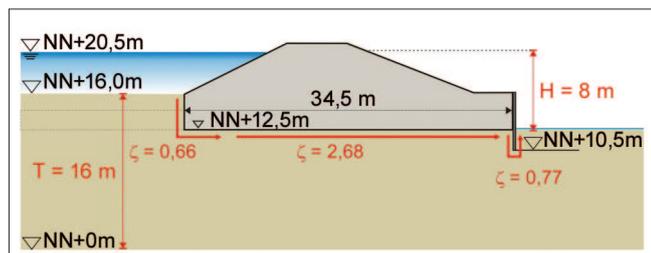


Bild 7: Nach dem Verfahren von Tschugaev ermittelte Widerstandskoeffizienten für die verschiedenen Bereiche der Umströmung

Figure 7: Resistance coefficients determined according to Tschugaev for different flow sections

### 3.4 Methode der kritischen Austrittsgradienten nach Khosla

#### *Khosla's method of critical exit gradients*

Zur Anwendung der Methode nach Khosla wird die für ein Wehr mit unterwasserseitiger Spundwand angegebene Formel (Tabelle 3) auf das Beispiel übertragen. Für die Eingangsparameter ergeben sich folgende Werte:

- Wasserspiegeldifferenz:  $H = 8 \text{ m}$
- Länge Spundwand/Sickerwegverlängerung  $d = 2 \text{ m}$
- horizontale Sicherstrecke unter dem Bauwerk:  $d = 34,5 \text{ m}$

Der Austrittsgradient berechnet sich mit diesen Werten zu  $G_e = 0,41$  und liegt deutlich über den von Khosla genannten zulässigen Austrittsgradienten (0,14 – 0,17). Der Nachweis gegen Fugenerosion ist nach dem Verfahren nach Kosla somit nicht erfüllt.

Parameter	Bezeichnung	Einheit		Anmerkung
$\Delta H$	Wasserstandsdifferenz	[m]	8	
L	Länge der Umströmung	[m]	34,5	
D	Mächtigkeit der durchströmten Schicht	[m]	12,5	
$\theta$	Rollwiderstandswinkel	[ ° ]	nominal: 41°	
$\eta$	Schleppkraftfaktor	[-]	nominal: 0,25	
$\gamma_p$	Wichte des Bodens	[kN/m³]	nominal: 17 kN/m²	
$\gamma_w$	Wichte des Wassers	[kN/m³]	nominal: 10 kN/m²	
$\kappa$	Permeabilität	[m²]	$1,35 \cdot 10^{-11}$	$\kappa = 1,35 \cdot 10^{-7} \cdot k$
$d_{70}$	Korndurchmesser bei 70% Siebdurchgang	[m]	0,0003	

Tabelle 6: Eingangsparameter für den Nachweis nach Sellmeijer für das Beispiel

Table 6: Initial parameters for the verification according to Sellmeijer applied to sample calculation

### 3.5 Verfahren nach Sellmeijer

#### *Sellmeijer's method*

Die Parameter für den Nachweis nach Sellmeijer auf Grundlage der Bauwerksgeometrie und des Untergrundmaterials sind in Tabelle 6 zusammengestellt.

Nach den in Kapitel 2.5 genannten Formeln errechnet sich die die kritische Wasserstandsdifferenz zu  $\Delta H_c = 6,1 \text{ m}$ .

Nach dem in TAW (1999) vorgeschlagenen Nachweis ergibt sich:

$$(\Delta H - 0,3 \times d) = 8 \text{ m} \geq 5,08 \text{ m} = 1/\gamma \times \Delta H_c$$

mit  $d = 0$  (keine überlagernde Schicht und somit kein Aufbruchkanal vorhanden und dem in TAW (1999) vorgeschlagenen Sicherheitsfaktor  $\gamma = 1,20$ .

Der Nachweis gegen Fugenerosion nach dem Verfahren von Sellmeijer kann für das Beispiel nicht erbracht werden.

Nachweis nach		Nachweis erfüllt
MSD	$S'_d = 17,8 \text{ kN/m} \leq 18,1 \text{ kN/m} = G'_d$	ja
Bligh	$C_B = 5,3 < 15 = C_{B, \text{erf}}$	nein
Lane	$C_L = 2,4 < 15 = C_{L, \text{erf}}$	nein
Tschugaev	$I_K = 0,12 \leq 0,12 \text{ bis } 0,16 = I_{K, \text{zul}}$	ja
Khosla	$G_E = 0,41 > 0,14 \text{ bis } 0,17 = G_{E, \text{zul}}$	nein
Sellmejer	$(\Delta H - 0,3 \cdot d) = 8 \text{ m} \geq 5,08 \text{ m} = 1/\gamma \cdot \Delta H_c$	nein

Tabelle 7: Ergebnisse der Nachweise gegen Piping  
 Table 7: Results of the verification against piping

### 3.6 Zusammenstellung der Berechnungsergebnisse

#### Overview of the calculation results

In Tabelle 7 sind die Ergebnisse der genannten Nachweisverfahren zusammengestellt.

Die in den einzelnen Nachweisverfahren enthaltenen Sicherheiten sind sehr verschieden bzw. nicht bekannt. Die in den statistisch-empirischen Verfahren nach Bligh, Lane und Tschugaev enthaltene Sicherheit kann nicht quantifiziert werden, da das an den betrachteten Wehranlagen vorhandene Sicherheitsniveau gegen ein Versagen durch Fugenerosion nicht bekannt ist. Khosla gibt zulässige Austrittsgradienten an, die in Abhängigkeit von der Bodenart eine Sicherheit von 4 bis 7 beinhalten. Der auf das Verfahren nach Sellmejer basierende Nachweis in TAW, 1999 beinhaltet eine Sicherheit von 1,2.

Eine ausreichende Sicherheit gegen Fugenerosion ist nur nach dem Nachweis nach MSD und nach Tschugaev gegeben. Die geforderten Kriterien der anderen Nachweise werden nicht eingehalten.

Es ist jedoch zu beachten, dass die Sicherheit nach MSD auch nur für die außergewöhnliche Bemessungssituation (Lastfall 3) gegeben ist. Unter Berücksichtigung in der ständigen Bemessungssituation (Lastfall 1) und unter Verwendung der in diesem Fall anzusetzenden Teilsicherheitsbeiwerte ergibt sich ebenfalls keine ausreichende Sicherheit gegen Fugenerosion.

In dem Nachweisverfahren nach MSD wird jedoch, im Gegensatz zu den anderen aufgeführten Verfahren, die mögliche Bildung von Fugen an Bauwerken in Dämmen explizit berücksichtigt. Aus diesem Grund

ermöglicht das Verfahren nach MSD eine sehr gute Beurteilung der Gefährdung der Dammstandsicherheit durch Fugenerosion entlang von innen liegenden Bauwerken und Bauwerksteilen.

## 4 Zusammenfassung

### Conclusion

Im vorliegenden Beitrag wird die Vorgehensweise des Nachweises gegen Fugenerosion nach MSD vorgestellt. Im Unterschied zu anderen Verfahren werden bei dieser Methode Besonderheiten des Dammkörpers, des Baugrundes und des Bauwerkes sowie seiner Bauweise durch die Annahme möglicher hydraulisch wirksamer Fugen an den Grenzflächen zwischen Baugrund, Dammkörper und Bauwerk berücksichtigt. Grundprinzip dieser Methode ist die Forderung, dass die Standsicherheit von Dämmen auch unter ungünstigen geohydraulischen Randbedingungen, wie sie hier durch die Berücksichtigung eines Dichtungsausfalls und den Ansatz von Fugen gegeben sind, gewährleistet sein muss. Dies bedeutet, dass bei Durchströmung in bereits vorhandenen oder sich bildenden Fugen ein begrenzter Materialtransport stattfinden kann, jedoch kein Bodenmaterial auf Grund eines Versagens an der Geländeoberfläche ausgetragen werden kann. Somit kann keine rückschreitende Erosion (Piping) als Ursache für ein Versagen des Dammes auftreten. Das Verfahren wurde zwischenzeitlich für eine Vielzahl von Dämmen mit Bauwerken an Bundeswasserstraßen angewendet und hat sich als praktikabel und geeignet erwiesen.

## 5 Literaturverzeichnis

### *References*

- [1] MSD (2005): Merkblatt Standsicherheit von Dämmen an Bundeswasserstraßen, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe
- [2] Bligh, W.G.: The practical design of irrigation works; Constable, London, 1912.
- [3] Lane, E.: Security from under-Seepage Masory dams on earth foundation, Proceedings ASCE, Transactions No. 100, 1935
- [4] Mansour, B.G.S.: Investigation on design and rehabilitation options for river barrages with special respect to piping, Mitteilungen des Instituts für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau (IGBE), Universität Hannover, 2005
- [5] Khosla, A.N., Bose, N.K., Mckenzie, E.T.: Design of weirs on pervious foundations, Publication number 12 of the Central Board of Irrigation, Simla, India, 1936
- [6] TAW: Technical Report on Sand Boils (Piping), Technical Advisory Committee in Flood Defences, The Netherlands, 1999