

VEB Projektierung Wasserwirtschaft	Nachweis der Beständigkeit von Erdstoffen gegenüber der Einwirkung der Sickerwasserströmung  Kontakterosion bindiger Erdstoffe	<b>WAPRO</b> <b>4.04.</b> Blatt 5
--	---	---

Verbindlich ab 1. 4. 1970

Dieser Standard gilt für Talsperren und wasserwirtschaftliche Speicher mit Stauhöhen bis zu 50 m.

Die Festlegungen des Standards sind zur Anwendung empfohlen.

Inhaltsverzeichnis	Seite
1. Verwendete Bezeichnungen	1
2. Anwendungsbereich	2
3. Notwendige Arbeitsunterlagen	4
4. Grundgrößen zum Nachweis der Erosionsbeständigkeit	5
5. Nachweis der Erosionsbeständigkeit	6
6. Schlußfolgerungen aus dem Nachweis der Erosionsbeständigkeit	9
7. Anwendungsbeispiele	10

### 1. Verwendete Bezeichnungen

$c_o$	Zugfestigkeit des Dichtungstoffes im gesättigten und angeschwollenen Zustand
$d_{10}, d_{17} \dots$	Korndurchmesser, der bei 10, 17 ... Masseprozent der Kornverteilungslinie festgestellt wird
$d_p$	maßgebender Porendurchmesser des Filter- oder Stützkörpermaterials aus natürlichem Lockergestein
$d_{p,g}$	maßgebender Porendurchmesser des Filter- oder Stützkörpermaterials aus gebrochenem Material
$e_F$	Porenzahl des Filter- oder Stützkörpermaterials
$e_L$	Porenzahl an der Fließgrenze
$f$	Hilfswert zur schnellen Berechnung von $d_p$
$h$	Unterwasserhöhe
$H$	maximale Stauhöhe
$I$	mittlerer hydraulischer Gradient im Dichtungsstoff
$i_F$	hydraulischer Gradient im Filter- oder Stützkörpermaterial
$i_{kr.vers.}$	kritischer Gradient beim direkten Erosionsversuch

Fortsetzung Seite 2 bis 20

Bestätigt: 24. 1. 1970 , Direktor, Halle (Saale)

$i_A$	hydraulischer Austrittsgradient im Dichtungstoff
$I_P$	Plastizitätsindex
$j$	$\frac{d_{10}}{d_{17}}$
$k$	Durchlässigkeitsbeiwert
$m'$	Schichtdicke der Auflast
$n_F$	Porosität des Filter- oder Stützkörpermaterials
$S_R$	Sättigungsgrad
$t$ oder $t'$	Dicke der Dichtungsschicht
$U_F$	Ungleichförmigkeit des Filter- oder Stützkörpermaterials
$w_{\text{Einbau}}$	Wassergehalt beim Einbau des Erdstoffes
$w_L$	Fließgrenze
$w_n$	natürlicher Wassergehalt
$w_{\text{opt}}$	optimaler Wassergehalt
$w_s$	Schrumpfgrenze
$\alpha$	Winkel zwischen der Richtung der Strömungskraft und der Entlastungsebene
$\beta_1$	Winkel zwischen der Horizontalen und der Entlastungsebene
$\theta$	Winkel der luftseitigen Böschung
$\gamma$	Rohwichte
$\gamma'$	Rohwichte unter Auftrieb
$\gamma_{Fl}$	Wichte der Flüssigkeit
$\gamma_{sr}$	Rohwichte bei Wassersättigung
$\gamma_d$	Trockenrohichte
$\gamma_{d,L}$	Trockenrohichte für Erdstoffe an der Fließgrenze
$\gamma_s$	Reinwichte
$\delta$	$90^\circ - \alpha$
$\kappa$	Ungleichmäßigkeitsfaktor für die Verteilung der Poren im Filter- oder Stützkörpermaterial
$\xi$	Hilfswert zur Festlegung des Prüfgradienten
$\sigma_e$	Spannung an der Erosionsstelle
$\omega$	Konzentrationsfaktor für die Einschnürung der Stromlinien bei Hindernissen

## 2. Anwendungsbereich

Der Nachweis der Sicherheit gegen Kontakterosion bindiger Erdstoffe darf unter Einhaltung der in den Abschnitten 2.1. bis 2.4. genannten Randbedingungen auf rechnerischem Weg geführt werden. Ist auch nur eine in den genannten Abschnitten dargestellte Randbedingung nicht erfüllt, so muß nach den Festlegungen des Abschnittes 5.2. der experimentelle Nachweis erbracht werden.

### 2.1. Bauliche Anlagen

Je nach Art und Konstruktion der baulichen Anlage ist die Sicherheit gegen Erosion nachzuweisen für

- Einströmungsbereiche im Stützkörper, Filterschichten im Inneren des Damms, Dammfußprismen und Böschungfilter
- Dichtungsteppiche im Becken aus natürlichen Erdstoffen oder Tonbeton
- bindige Schichten unter dem Damm
- bindige Schichten im dammanahen Bereich der Luftseite
- bindige Schichten in Entwässerungsgräben
- Untergrundabdichtungen aus natürlichen Dichtungsstoffen und Tonbeton

Für Innendichtungen ist die Bemessung der wasserseitigen Filterschicht nach diesem Standard zulässig, wenn dynamische Einflüsse aus Wellenbeanspruchung nicht wirksam sind. Sind dynamische Einwirkungen nicht mit Sicherheit auszuschließen, so sind bei entsprechenden Institutionen spezielle Untersuchungen über die Erosionsbeständigkeit vornehmen zu lassen.

Die zu untersuchenden Kontaktzonen sind in Bild 1 eingezeichnet.

Indirekt kann die Festlegung der Dicke des Dichtungselementes erfolgen.

## 2.2. Filter- und Stützkörpermaterial

Für Filter- und Stützkörpermaterial mit plattiger Kornform ist wegen der Schwierigkeit der rechnerischen Bestimmung der vorhandenen Porengröße die rechnerische Methode des Sicherheitsnachweises nicht anwendbar.

Bei Talsperren geringer Größenordnung gilt der rechnerische Nachweis bis zum Porendurchmesser von  $d_p = 10$  mm, für andere Talsperren bis zu  $d_p = 5$  mm.

Bei größeren Porendurchmessern ist bis zu  $d_p = 20$  mm für alle Talsperren die Erosionssicherheit direkt durch Laborversuche zu prüfen.

Für künstlich gebrochenes und besonders scharfkantiges natürliches Material dient die rechnerische Methode nur zur groben Abschätzung.

Filter- und Stützkörpermaterial müssen mitteldicht gelagert sein oder diesem Dichtewert entsprechen. Sie müssen selbst suffosions- und erosions sicher sein (siehe WAPRO 4.04. Blatt 2 bis 4). Es dürfen insbesondere keine Ausfallkörnungen auftreten.

## 2.3. Materialeigenschaften und Entstehungsbedingungen des Dichtungselementes.

### 2.3.1. Forderungen an den Erdstoff

Das Dichtungsmaterial muß folgende Bedingungen erfüllen:

- $w_L > w_{\text{Einbau}} \cong w_{\text{opt}}$
- $I_p \cong 0,10$
- $d_{10} \cong 0,002$  mm
- $d_{50} \cong 10$  mm
- $d_{100} \cong 80$  mm
- Stetige Kornverteilung
- Chemisch beständiges Material
- Keine geschrumpften Erdstoffe ( $w_n > w_s$ )
- Erdstoff ohne vorgegebene Aggregate <sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Aggregate = Zusammenballung von mehreren Einzelkörnern des Schluff- oder Tonkornbereiches

### 2.3.2. Forderungen an die Herstellung

Das Dichtungsmaterial muß im eingebauten Zustand folgende Bedingungen erfüllen:

$$- S_r \geq 0,9$$

$$- \gamma_d > \gamma_{d,L} \quad (\gamma_{d,L} = \frac{\gamma_s}{1 + e_L} [p/cm^3]) \quad (1)$$

- Keine Schichtfugen - innige Verbindung aller Schichten

- Gleichmäßige Verdichtung

- Maßgebende Spannung an der Erosionsstelle

$$\sigma_e \geq 0,05 \text{ kp/cm}^2$$

$$[\sigma_e = \gamma' \cdot (m' + t')] \quad (2 a)$$

$$\text{oder } [\sigma_e = \gamma \cdot (m' + t')] \quad (2 b)$$

Darstellung der wirksamen Belastung siehe Bild 2.

### 2.4. Richtung der Sickerwasserströmung

Die Richtung der Sickerwasserströmung darf beliebig sein.

Die Größe des Winkels  $\alpha$  entsprechend Bild 3 ist zu beachten.

## 3. Notwendige Arbeitsunterlagen

### 3.1. Geologische und mineralogische Angaben zum Dichtungsstoff

Zur allgemeinen Beurteilung der Erosionsbeständigkeit müssen bekannt sein:

- wasserlösliche Stoffe, wie Kalk, Gips und Salz
- besonders hoher Glimmergehalt
- Aggregatstruktur <sup>2)</sup> durch Überverdichtung, tektonische Verformung oder starke Austrocknung
- Gleichmäßigkeit der Zusammensetzung

### 3.2. Bodenmechanische Angaben

Zum rechnerischen Nachweis der Sicherheit gegen Erosion müssen die folgenden bodenmechanischen Angaben bekannt sein:

#### 3.2.1. Dichtungsstoff

$c_o$ ,  $w_n$ ,  $\gamma$ ,  $I_p$  Kornverteilung

#### 3.2.2. Filter- und Stützkörpermaterial

Kornverteilung mit  $d_{10}$ ,  $d_{17}$ ,  $d_{60}$ ,  $d_{100}$  und  $U_F$

Kornform

Porosität  $n_F$ .

### 3.3. Hydraulische Angaben

Folgende Angaben sind zur Berechnung des für die Erosion maßgebenden Gradienten erforderlich:

Stauhöhe  $H$ , Unterwasserhöhe  $h$  oder mittlerer Gradient  $\bar{I}$ , Wichte der Flüssigkeit  $\gamma_{F1}$

<sup>2)</sup> Aggregatstruktur = Erdstoffstruktur, bei der zwischen den Aggregaten nur eine geringe Haftung besteht.

### 3.4. Konstruktive Angaben

Es muß ein Regelquerschnitt zur Verfügung stehen, aus dem folgende Angaben der geplanten Konstruktion hervorgehen:

- Dicke des Dichtungselementes
- Neigung der Begrenzungsflächen des Dichtungselementes
- Lage der Entlastungsebene
- Anzahl der voraussichtlichen Filterschichten

Außerdem muß ein maßgebendes Querprofil - quer zum Damm - vom Untergrund vorhanden sein, in dem die für eine Erosion interessierenden Schichten eingetragen sind.

### 4. Grundgrößen zum Nachweis der Erosionsbeständigkeit

#### 4.1. Porengrößen

Für gerundetes Korn wird der maßgebende Porendurchmesser des Filters oder Stützkörpers bestimmt nach Gl. (3) oder (3 a)

$$\text{vorh. } d_p = \kappa \cdot 0,455 \cdot \sqrt[6]{U_F} \cdot e_F \cdot d_{17} \quad (3)$$

$$\text{vorh. } d_p = (1 + 0,05 U_F) \cdot 0,455 \cdot \sqrt[6]{U_F} \cdot e_F \cdot d_{17} \quad (3 a)$$

Für häufig vorkommende Werte bis  $U \approx 20$  darf zur Vereinfachung der Berechnung von  $d_p$  die Gl. (3 b) benutzt werden. Diese Vereinfachung wurde durch Wahl einer entsprechenden partiellen Sicherheit bei der Ableitung der Gl. (7) und (8) sowie (13) und (14) hinreichend berücksichtigt.

$$\text{vorh. } d_p = f \cdot d_{17} \quad (3 b)$$

Der Hilfwert  $f$  ist aus Bild 4 zu entnehmen.

Die Ermittlung des maßgebenden Porendurchmessers für gebrochenes Material ist nur in grober Näherung möglich. Es darf dafür die Gl. (4) benutzt werden.

$$d_{p,g} \approx 2 \cdot d_p \quad (4)$$

#### 4.2. Festigkeitswerte

Die Zugfestigkeit  $c_0$  ist aus mindestens 5 Zugversuchen an ausgeschwellten Proben mit Auflasten von  $0,05 \text{ kp/cm}^2$  und einem Einbauwassergehalt, der dem bei der Baudurchführung entspricht, zu entnehmen. Auf die direkte Ermittlung der Zugfestigkeit darf nur verzichtet werden, wenn durch die Abschätzung mit  $c_0 = 5 \text{ p/cm}^2$  ausreichende Sicherheit für einen beliebigen Erdstoff nachgewiesen wurde.

Für Vorbemessungen können die Werte  $c_0$  in Abhängigkeit vom Plastizitätsindex  $I_p$  der nachfolgenden Tabelle entnommen werden.

$I_p$	$c_0$ [p/cm <sup>2</sup> ]
0,10	5
$0,10 < I_p \leq 0,15$	10
$0,15 < I_p \leq 0,20$	15
$0,20 < I_p \leq 0,25$	20
$0,25 < I_p$	25

### 4.3. Hydraulischer Gradient

Die Größe des mittleren hydraulischen Gradienten  $\bar{I}$  ist aus hydrodynamischen Netzen zu entnehmen. Für ausgezeichnete Fälle kann die Größe von  $\bar{I}$  oder  $i_A$  nach den folgenden Darstellungen direkt berechnet werden.

Maßgebend für Erosionssicherheit ist der Austrittsgradient zur Entlastungszone hin. Er ist zu bestimmen aus

$$\text{vorh. } i_A = \frac{H-h}{t} \cdot \omega = \bar{I} \cdot \omega \quad (5)$$

Es bedeuten:

- H - h Differenz zwischen Ober- und Unterwasserspiegel
- t Dicke des Dichtungselementes
- $\omega$  Konzentrationsfaktor für die Einschnürung der Stromlinien bei Hindernissen

Es gilt näherungsweise:

$$\omega \approx \frac{1}{n_F} \quad (6)$$

$$\text{Damit erhält man } \text{vorh } i_A = \frac{H-h}{t} \cdot \frac{1}{n_F} \quad (5 a)$$

Singuläre Punkte werden bei der Berechnung des Austrittsgradienten nicht berücksichtigt.

Für homogene Dämme mit Dammfußprismen oder Flächenfiltern ist für den Austrittsgradienten

$$i_A = \frac{1}{n_F} \quad (5 b)$$

und für homogene Dämme mit Böschungfiltern ist  $i_A$  nach Bild 6 zu wählen.

Es bedeuten  $n_F$  die Berührungsporosität zwischen Dammmaterial und Filterschicht und  $\theta$  der Böschungswinkel. Für  $n_F$  kann mit hinreichender Genauigkeit die Porosität des Damm- oder Filtermaterials verwendet werden. Sie ist aus Bild 7 zu entnehmen, wenn sie nicht durch Versuche genauer bestimmt wird.

Wird bei wasserseitigen bindigen Schichten - künstlich eingebrachte Dichtungsteppiche oder natürliche Deckschichten - auf eine genaue Ermittlung des hydraulischen Gradienten verzichtet, so darf näherungsweise gesetzt werden:

$$i_A = \frac{H}{t} \cdot \frac{1}{n_F} \quad (5 c)$$

## 5. Nachweis der Erosionsbeständigkeit

### 5.1. Rechnerische Methode

Bei einer Strömungsrichtung annähernd rechtwinklig zur Entlastungsebene -  $\alpha \approx 90^\circ$  - wird für Talsperren geringer Größenordnung die zulässige Porengröße des Filter- oder Stützkörpermaterials nach Gl. (7) bestimmt:

$$\text{zul. } d_p = \frac{1}{4} \cdot \frac{c_0}{(i_A \cdot \gamma_{F1} \cdot 1,1 + \gamma \cdot \cos \beta_1)} \geq \text{vorh. } d_p \leq 1,0 \text{ cm} \quad (7)$$

Für größere Talsperren gilt unter der gleichen Voraussetzung:

$$\text{zul. } d_p = \frac{1}{4} \cdot \frac{c_0}{(i_A \cdot \gamma_{F1} \cdot 1,1 + \gamma \cdot \cos \beta_1)} \geq \text{vorh. } d_p \leq 0,5 \text{ cm} \quad (8)$$

Bei einer Strömungsrichtung unter der Bedingung  $90^\circ > \alpha > 10^\circ$  wird für alle Talsperren die zulässige Porengröße näherungsweise nach Gl. (9) bestimmt.

$$\text{zul. } d_p \approx \frac{1}{8\pi} \cdot \frac{c_o (\pi + 2 \cos \delta)}{i_A \cdot \gamma_{Fl} \cdot 1,1 + \gamma \cdot \cos(\delta - \beta_1)} \geq \text{vorh. } d_p \leq 0,5 \text{ cm} \quad (9)$$

Bei einer Strömungsrichtung annähernd parallel zur Entlastungsebene ( $\alpha \leq 10^\circ$ ) wird für alle Talsperren die zulässige Porengröße ebenfalls näherungsweise nach Gl. (10) bestimmt.

$$\text{zul. } d_p \approx \frac{0,56}{i_F^2 + 1,1 \cdot i_F + 0,3} [\text{cm}] \geq \text{vorh. } d_p \leq 1,0 \text{ cm} \quad (10)$$

Für die Wichte des bindigen Erdstoffes ist zu setzen:

- zentrale und geneigte Innendichtungen oberhalb der Sickerlinie  $\gamma = \gamma_{sr}$   
unterhalb der Sickerlinie  $\gamma = \gamma'$
- horizontale Teppiche mit dem Grundwasserspiegel tiefer als UK Teppich  $\gamma = \gamma_{sr}$   
Grundwasserspiegel nicht tiefer als UK Teppich  $\gamma = \gamma'$
- luftseitige Dichtungsschichten und nach oben gerichtete Sickerströmung  $\gamma = +\gamma'$

Bei vorgegebenen Aggregaten<sup>3)</sup> gelten die Gl. (7) bis (10) nur bis zu einer Porengröße, die der Größe der Aggregate entspricht.

Winkel  $\beta_1, \alpha, \delta$  siehe Bild 3.

Mit Hilfe von zul.  $d_p$  werden vier Punkte der zu wählenden Kornverteilungslinie bestimmt. Dazu berechnet man der Reihe nach:

$$d_{17} = \frac{\text{zul. } d_p}{\mathcal{N} \cdot 0,455 \cdot \sqrt[6]{U_F \cdot e_F}} \quad (11)$$

oder unter Berücksichtigung der Gl. (3 b)

$$d_{17} = \frac{\text{zul. } d_p}{F} \quad (11 \text{ a})$$

und

$$d_{10} = j \cdot d_{17} \quad (12)$$

wobei  $j$  aus Bild 8 zu entnehmen ist. Man erhält weiter

$$d_{60} = U_F \cdot d_{10} \quad (13)$$

und

$$d_{100} \leq 100 \text{ mm bei stetiger Kornverteilung} \quad (14)$$

Ist das Filter- oder Stützkörpermaterial bekannt, so ist lediglich zu prüfen:

$$\text{zul. } d_p \geq \text{vorh. } d_p \leq 1,0 \text{ oder } 0,5 \text{ cm}$$

Dabei wird vorh.  $d_p$  nach Gl. (3 a) oder (3 b) und zul.  $d_p$  nach den Gl. (7) bis (10) bestimmt.

Für eine ausreichende hydraulische Entlastung darf unter der Voraussetzung, daß der bindige Erdstoff einen Durchlässigkeitsbeiwert von  $k \leq 1 \cdot 10^{-7}$  m/s hat, die Kornverteilungslinie des Filter- oder Stützkörpermaterials den unzulässigen Bereich nach Bild 9 nicht berühren. Steht zunächst nur ein danach ungeeignetes Material zur Verfügung, so darf dieses verwendet werden, wenn durch genauere rechnerische oder experimentelle hydraulische Untersuchungen eine ausreichende Entlastung nachgewiesen wird.

<sup>3)</sup> vorgegebene Aggregate = Aggregate, die ohne Einwirkung des Sickerwassers durch geologische, klimatische oder andere Einflüsse im bindigen Erdstoff entstanden sind.

Indirekt kann bei  $\alpha \approx 90^\circ$  die Mindestdicke des Dichtungselementes bestimmt werden. Für Talsperren geringer Größenordnung wird dann:

$$\text{zul. } i_A = \frac{1}{4} \cdot \frac{c_o}{d_p \cdot 1,1 \cdot \gamma_{Fl}} - \frac{\gamma \cdot \cos \beta_1}{1,1 \cdot \gamma_{Fl}} \quad \parallel \quad d_p \leq 1,0 \text{ cm} \quad (15)$$

Für größere Talsperren:

$$\text{zul. } i_A = \frac{1}{4} \cdot \frac{c_o}{d_p \cdot 1,1 \cdot \gamma_{Fl}} - \frac{\gamma \cdot \cos \beta_1}{1,1 \cdot \gamma_{Fl}} \quad \parallel \quad d_p \leq 0,5 \text{ cm} \quad (16)$$

## 5.2. Experimentelle Methoden

Die für den Nachweis der Sicherheit gegenüber der Einwirkung der Sickerwasserströmung erforderlichen experimentellen Untersuchungen sind von einer Baugrunduntersuchungsstelle durchführen zu lassen.

### 5.2.1. Ermittlung der Zugfestigkeit

Die Ermittlung der Zugfestigkeit ist bei allen bindigen Erdstoffen möglich, wenn der Kornanteil  $d_{60} \leq 10 \text{ mm}$  ist.

Folgende Unterlagen sind der Untersuchungsstelle zur Verfügung zu stellen:

- $\gamma_{d, \text{Einbau}}$
- $w_{\text{Einbau}}$  oder gewünschte Prüfwassergehalte
- Probemenge für gestörtes Material = 3 000 g für jeden Prüfwassergehalt
- Probemenge für ungestörtes Material:

Durchmesser der Probe  $d = 100 \text{ mm}$

Gesamtlänge der ungestörten Probe  $L = 200 \text{ mm}$

Länge von Einzelproben  $l = 50 \text{ mm}$

### 5.2.2. Direkte Ermittlung der Erosionsbeständigkeit

#### 5.2.2.1. Notwendigkeit der direkten Prüfung

Die Ermittlung der Erosionsbeständigkeit auf direktem Wege erfolgt, wenn

- die Forderungen aus dem Anwendungsbereich nach den Abschnitten 2.2. und 2.3. nicht eingehalten werden können,
- die Sicherheit auf rechnerischem Wege nach Abschnitt 5.1. nicht nachgewiesen werden kann,
- die vorhandene Porengröße vorh.  $d_p \leq 20 \text{ mm}$  und beim Filtermaterial  $d_{80} \leq 50 \text{ mm}$  ist,
- für  $d_{80} > 50 \text{ mm}$  der rechnerische Porendurchmesser des Filter- oder Stützkörpermaterials  $\leq 20 \text{ mm}$  bleibt und der Baugrunduntersuchungsstelle idealisierte Porenplatten mit  $d_p \leq 20 \text{ mm}$  zur Verfügung stehen.

#### 5.2.2.2. Unterlagen für die direkte Prüfung

Als Unterlagen sind zur Verfügung zu stellen:

- $\gamma_{d, \text{Einbau}}$
- $w_{\text{Einbau}}$  oder gewünschte Prüfwassergehalte
- mittlerer hydraulischer Gradient  $\bar{i}$  oder  $i_{\text{Versuchsbeginn}}$  und  $i_{\text{Versuchsende}}$



- Strömungsrichtung
- Kornverteilungskurve des an das Dichtungselement anschließenden Filter- oder Stützkörpermaterials.  
Liegt diese nicht vor, muß sie von der Untersuchungsstelle ermittelt werden.
- Probemenge 50 kg für jeden Prüfwassergehalt vom Dichtungsstoff, 200 kg vom Filter- oder Stützkörpermaterial.

#### 5.2.2.3. Prüfgradienten und Prüfumfang

Der Anfangsgradient beträgt  $0,25 \cdot \bar{i}$ , der Endgradient beträgt  $\xi \cdot \bar{i}$   
Für die Wahl von  $\xi$  gilt in Abhängigkeit von der Porengröße

$d_p$	$\xi$
$\leq 5$	2
10	10
15	50
20	100

Zwischenwerte sind geradlinig einzuschalten.

Die Durchströmungsrichtung ist im Regelfall von oben nach unten.

In besonderen Fällen darf mit der Untersuchungsstelle eine andere Durchströmungsrichtung vereinbart werden.

Für jeden gewünschten Einbauwassergehalt sind mindestens 2, besser 4 direkte Erosionsversuche durchzuführen.

#### 5.2.2.4. Schlußfolgerungen aus der direkten Prüfung

Das Material gilt als erosionsbeständig, wenn bei mindestens 2-tägiger stationärer Durchströmung mit  $\xi \cdot \bar{i}$

- für kleine Talsperren keine größere Abblätterung als bis zu  $\frac{d_p}{2}$  eintritt,
- für alle anderen Talsperren keine Abblätterung festgestellt wird.

### 6. Schlußfolgerungen aus dem Nachweis der Erosionsbeständigkeit

#### 6.1. Auswertung der Nachweise

Ist bei vorgegebenem suffosionssicheren Filter- oder Stützkörpermaterial die zulässige Porengröße nach den Gl. (7) bis (10)  $\geq$  der vorhandenen Porengröße, so sind keine weiteren Nachweise notwendig. Für ein unbekanntes Filter- oder Stützkörpermaterial ist nach den Gl. (11) bis (14) die ideale Kornverteilungskurve zur Verhinderung einer Erosion zu bestimmen. Die endgültige Kornzusammensetzung kann zum feineren Bereich hin von der idealen abweichen, wenn weiterhin die Suffosionssicherheit und ausreichende Durchlässigkeit gewährleistet sind.

Kann weder rechnerisch noch experimentell die Sicherheit gegen Erosion nachgewiesen werden, so sind unter Ausnutzung der im Anwendungsbereich genannten Porendurchmesser von 5 und 10 mm die Gradienten so zu bestimmen, daß keine Erosionsgefahr mehr besteht oder das Dichtungsmaterial ist so auszuwählen, daß ebenfalls keine Erosion eintritt.

#### 6.2. Ermittlung der Stärke des Dichtungselementes

Neben dem Nachweis der Erosionssicherheit kann auf der Grundlage der Ergebnisse der Gl. (15) oder (16) die Dicke des Dichtungselementes nach Gleichung

$$t = \frac{H - h}{\text{zul } i_A \cdot n_F} = \frac{H - h}{I} \quad (17)$$

und bei direkten Erosionsversuchen nach

$$t = \frac{H - h}{i_{\text{kr.vers.}} \cdot n_F} \quad (18)$$

bestimmt werden.

Die so ermittelten Dicken sind sicher gegen Erosion, auch wenn besondere Gesichtspunkte, wie

- konstruktive Anschlüsse an Untergrund und Bauwerke,
- Herstellbarkeit dünner Dichtungselemente,
- Rißgefahr infolge unterschiedlicher Setzungen oder Durchbiegungen,
- Beschaffenheit der Fugen bei der Herstellung des Dichtungselementes zu einer größeren Dicke führen.

### 6.3. Kolmationsfilter

Bei Rißgefahr oder bei vorgegebenen Fugen sind Kolmationsfilter mit  $d_p \leq 0,05 \text{ mm}$  und einer Dicke von 1,0 m anzuordnen, wenn nicht durch Versuche größere zulässige Porendurchmesser für den Kolmationsfilter nachgewiesen werden können.

## 7. Anwendungsbeispiele

### Beispiel 1

Nachweis der Eignung des suffosionssicheren Stützkörpermaterials unter einer geneigten Innendichtung nach Bild 5 für eine größere Talsperre:

$$\tan \beta_1 = 2,5$$

Ausgangswerte:

- a) mittleres Sickerwassergefälle im Querschnitt A - B

$$I = \frac{H - h}{t} = 5$$

- b) Dichtungserdstoff

$$\text{Plastizitätsindex } I_P = 0,11 > 0,10$$

$$\text{Zugfestigkeit } c_0 = 5 \text{ p/cm}^2$$

$$\gamma = \gamma_g = 2,0 \text{ Mp/m}^3 = 2,0 \text{ p/cm}^3$$

- c) Stützkörper- oder Filtermaterial nach Kornverteilungskurve 1 (Bild 10)

$$d_{17} = 2,0 \text{ mm} \quad U_F = 3,13 \quad n_F = 0,30$$

$$e_F = \frac{n_F}{1 - n_F} = \frac{0,30}{0,70} = 0,43$$

Berechnungsgang:

1. Ermittlung des Austrittsgradienten nach Gl. (5)

$$i_A = I \cdot \frac{1}{n_F} = 5 \cdot \frac{1}{0,30} = 16,7$$

## 2. Bestimmung des vorhandenen Porendurchmessers nach Bild 4 und Gl. (3 b)

$$f = 0,28$$

$$\text{vorh. } d_p = f \cdot d_{17} = 0,28 \cdot 2,0 = 0,56 \text{ mm} < 0,5 \text{ cm}$$

## 3. Berechnung des zulässigen Porendurchmessers nach Gl. (8)

$$\beta_1 = 21,8^\circ \quad \cos \beta_1 = 0,923$$

$$\text{zul } d_p = \frac{1}{4} \cdot \frac{5}{(16,7 \cdot 1,0 \cdot 1,1 + 2,0 \cdot 0,923)} = 0,0619 \text{ cm} > \text{vorh } d_p$$

Das Dichtungselement ist gegenüber dem Stutzkörpermaterial erosionsicher, da die Bedingung  $\text{zul } d_p > \text{vorh } d_p$  erfüllt ist.

## Beispiel 2

Berechnung der Kornverteilungslinie der Filterschicht, wenn der hydraulische Gradient für einen unter Auftrieb stehenden Dichtungsteppich vorgegeben ist.

Ausgangswerte:

a) mittleres Sickergefälle  $i = 15$  aus einem hydrodynamischen Netz

b) Dichtungserdstoff

$$I_p = 20 \quad c_o = 15 \text{ p/cm}^2$$

$$\gamma = \gamma' = 1,05 \text{ Mp/m}^3 = 1,05 \text{ p/cm}^3$$

Berechnungsgang:

1. Der Ungleichförmigkeitsgrad wird mit  $U_F = \frac{d_{60}}{d_{10}}$  gewählt. Aus Bild 7 erhält man für Sande und Kiese die Porosität  $n_F \approx 0,30$ .

2. Berechnung des Austrittsgefälles nach Gl. (5 a)

$$i_A = 15 \cdot \frac{1}{0,30} = 50$$

3. Ermittlung des zulässigen Porendurchmessers nach Gl. (7) oder (8)

$$\text{zul } d_p = \frac{1}{4} \cdot \frac{15}{(50 \cdot 1,0 \cdot 1,1 + 1,05 \cdot 1,0)} = 0,0668 \text{ cm} < 0,5$$

4. Ermittlung der Kornverteilungslinie

$$\text{Mit } n_F \approx 0,30 \text{ ist } e_F = 0,43$$

Die Berechnung von  $d_{17}$  erfolgt nach Gl. (11) oder einfacher nach Bild 4.

$$f = \frac{d_p}{d_{17}} = 0,34$$

$$d_{17} = \frac{0,668}{0,34} = 1,97 \text{ mm}$$

nach Gl. (12) und Bild 8

$$d_{10} = j \cdot d_{17} = 0,7 \cdot 1,97 = 1,48 \text{ mm}$$

$$d_{60} = U_F \cdot d_{10} = 10 \cdot 1,48 = 14,8 \text{ mm}$$

$$d_{100} \leq 100 \text{ mm bei stetiger Kornverteilung.}$$

Mit den erhaltenen Werten  $d_{10}$ ,  $d_{17}$ ,  $d_{60}$  und  $d_{100}$  kann die Kornverteilungskurve der Filterschicht gezeichnet werden. Sie ist als Grenze zum groben Bereich zu betrachten (siehe Bild 10 Kurve 2).

### Beispiel 3

Berechnung der erforderlichen Dicke der Schürze, wenn als anschließendes Material ein Schotterboden nach Kornverteilungskurve 3 (Bild 10) verwendet wird.

#### Ausgangswerte

$$\text{Dichtungserdstoff: } I_P = 0,22 \quad c_o = 20 \text{ p/cm}^2 \quad \gamma = \gamma_g = 2,1 \text{ Mp/m}^3 = 2,1 \text{ p/cm}^3$$

$$\text{Schotterboden: } d_{17} = 13 \text{ mm} \quad U_F = 4,0 \quad n_F = 0,35 \quad e_F = 0,54$$

$$\text{Neigung der Entlastungsebene: } \tan \beta_1 = 2,5 \quad \cos \beta_1 = 0,923$$

#### Berechnungsgang:

1. Der vorhandene Porendurchmesser ergibt sich nach Bild 4 und Gl. (3 b) zu

$$\text{vorh } d_p = f \cdot d_{17} = 0,365 \cdot 13 = 4,75 \text{ mm} < 0,5 \text{ cm}$$

2. Das zulässige Austrittsgefälle wird für größere Talsperren nach Gl. (16) ermittelt

$$\text{zul } i_A = \frac{1}{4} \cdot \frac{20}{0,475 \cdot 1,1 \cdot 1,0} - \frac{2,1 \cdot 0,923}{1,1 \cdot 1,0} = 9,58 - 1,76 = 7,82$$

3. Das zulässige mittlere Sickergefälle berechnet sich nach Gl. (5 a) zu

$$\bar{i} = \text{zul } i_A \cdot n_F = 7,82 \cdot 0,35 = 2,73 \quad \text{und}$$

die erforderliche Dicke aus Gl. (17) zu

$$t_{\text{erf}} = \frac{H-h}{\bar{i}} = \frac{H-h}{2,73}$$

Als Vergleich hierzu ergibt sich mit Stützkörpermaterial des Beispiels 1 die erforderliche Dicke der Schürze zu

$$\text{zul } i_A = \frac{1}{4} \cdot \frac{20}{0,056 \cdot 1,1 \cdot 1,0} - \frac{2,1 \cdot 0,923}{1,1 \cdot 1,0} = 79,64$$

$$\bar{i} = 79,64 \cdot 0,35 = 27,9$$

$$t_{\text{erf}} = \frac{H-h}{27,9}$$

Obige Vergleichsrechnung zeigt, daß das Dichtungselement auf dem Schotterboden ökonomischer bemessen werden kann, wenn eine Filterschicht zwischengeschaltet wird.

### Beispiel 4

Berechnung der 1. Filterschicht für einen Entwässerungsgraben für schichtparalleles Strömen des Sickerwassers entsprechend Bild 11.

#### Ausgangswerte:

$$\text{Böschungneigung } 1 : 1,5 \quad \theta = 33,7^\circ \quad \alpha = 0$$

Berechnungsgang:

1. Der hydraulische Gradient wird zu

$$i_F = \sin \theta = 0,555 \text{ mit hinreichender Genauigkeit ermittelt.}$$

2. Berechnung des zulässigen Porendurchmessers nach Gl. (10)

$$\text{zul } d_p = \frac{0,56}{0,555^2 + 1,1 \cdot 0,555 + 0,3} = 0,46 \text{ cm} < 1,0 \text{ cm}$$

3. Mit der Wahl des Ungleichförmigkeitsgrades des Filters von  $U_F = 2$  ergibt sich nach Bild 7 die Porosität zu  $n_F = 0,40$ . Mithin ist  $e_F = 0,667$ .

4. Ermittlung von  $d_{17}$ ,  $d_{10}$ ,  $d_{60}$  und  $d_{100}$  analog Beispiel 2

$$f = \frac{d_p}{d_{17}} = 0,40$$

$$\max d_{17} = \frac{\text{zul } d_p}{f} = \frac{4,6}{0,4} = 11,5 \text{ mm}$$

$$\max d_{10} = j \cdot d_{17} = 0,9 \cdot 11,5 = 10,35 \text{ mm}$$

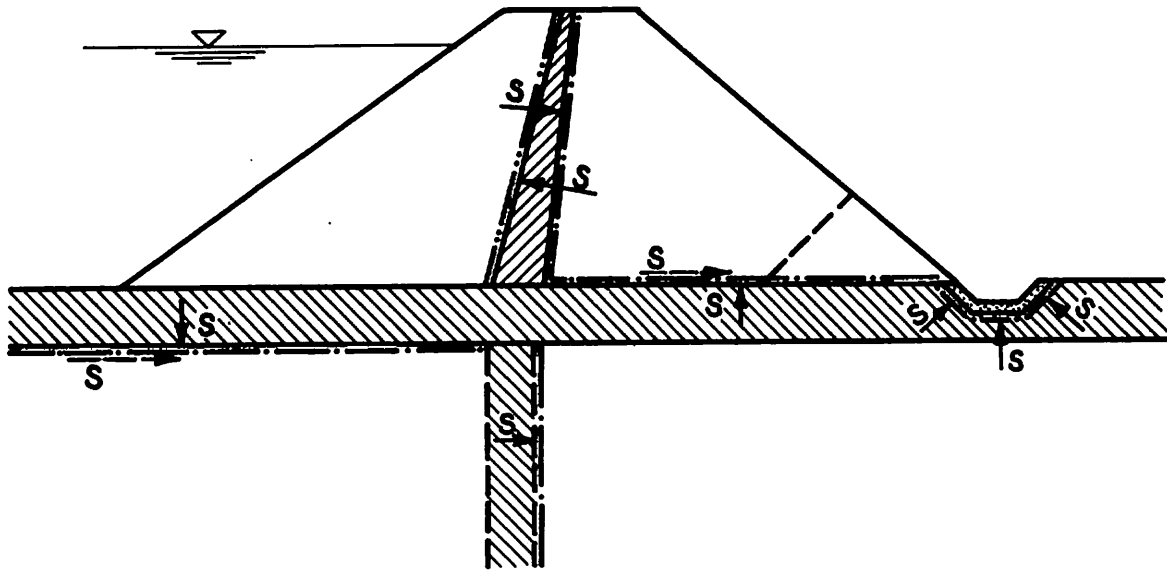
$$\max d_{60} = U_F \cdot d_{10} = 20,7 \text{ mm}$$

$$d_{100} < 100 \text{ mm}$$

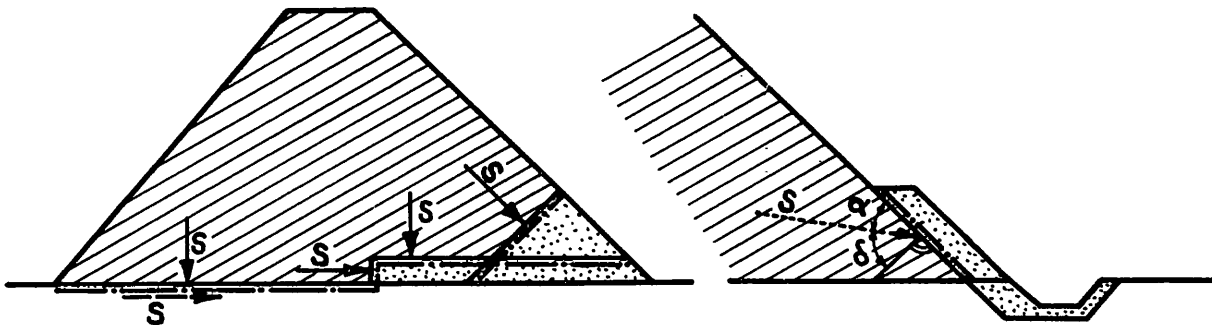
Die Kornverteilungskurve des Filters ist in Bild 10 Kurve 4 dargestellt.

#### Hinweise

- |                  |         |   |
|------------------|---------|---|
| TGL 11 459       | 12.68   | Baugrundmechanik, Formelzeichen   |
| TGL 11 460/2     | (12.67) | -, Bestimmung der Baugrundarten, Lockergestein  |
| WAPRO 4.04./2    | 6.68    | Nachweis der Beständigkeit von Erdstoffen gegenüber der Einwirkung der Sickerwasserströmung; Suffosion nichtbindiger Erdstoffe  |
| WAPRO 4.04./3    | 6.68    | -; Kontakterosion Typ 1/1, 1/3 und 3/1 sowie Durchlässigkeitsregeln für Filter aus nichtbindigen Erdstoffen, Hinweise für die Konstruktion von Wasserbaufiltern   |
| WAPRO 4.04./4    | 1.69    | -; Kontakterosion Typ 2/2, 3/2, 2/3 und 3/3 bei nichtbindigen Erdstoffen  |
| Kassiff, G. u.a. |         | Analyse der Filterforderungen bei verdichteten Tonen<br>Proceedings of the sixth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering<br>Canada 1965, Volume II, Divisions 3 - 6                           |
| Rehfeld, E.      |         | Verformungsbeständigkeit bindiger Lockergesteine bei Durchsickerung<br>Wasserwirtschaft - Wassertechnik 1968, H.7   |
| Wolski, W.       |         | Modellversuche über die Sickererosion im schluffigen Tonkern bei einem Erddamm<br>Proceedings of the sixth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering<br>Canada 1965, Volume II, Divisions 3 - 6 |
| VSN 02 - 65      |         | Anleitung für die Projektierung von Filtern für Wasserbauten<br>GPKEIE der UdSSR  |
| Mioduszewski, W. |         | Hydraulische Gradienten an der Stelle der Wasserstrahlenkonzentration an der luftseitigen Böschung des Kerns<br>Gospodarka Wodna, Warszawa 12 (1967)  |



Zonendamm



Homogener Damm

- = annähernd rechtwinklig zur Entlastungsebene in die Entlastungszone einströmendes Sickerwasser
- = annähernd parallel zur Entlastungsebene in der Entlastungszone strömendes Sickerwasser
- = schräg unter einem Winkel  $\alpha = 90^\circ - \delta$  zur Entlastungsebene in die Entlastungszone einströmendes Sickerwasser
- .-.- = auf Erosion beanspruchte Kontaktzone, deren Sicherheit mit Hilfe dieses Standards nachgewiesen werden kann
- .-.- = auf Erosion beanspruchte Kontaktzone bei zentralen und geneigten Innendichtungen, deren Sicherheit mit Hilfe dieses Standards bedingt (siehe Abschnitt 1.1) nachgewiesen werden kann

Bild 1 Stauanlage

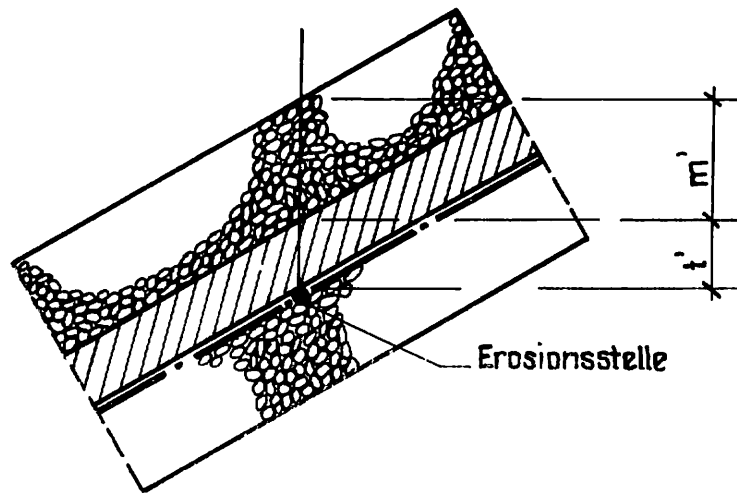


Bild 2 wirksame Belastung der Erosionsstelle

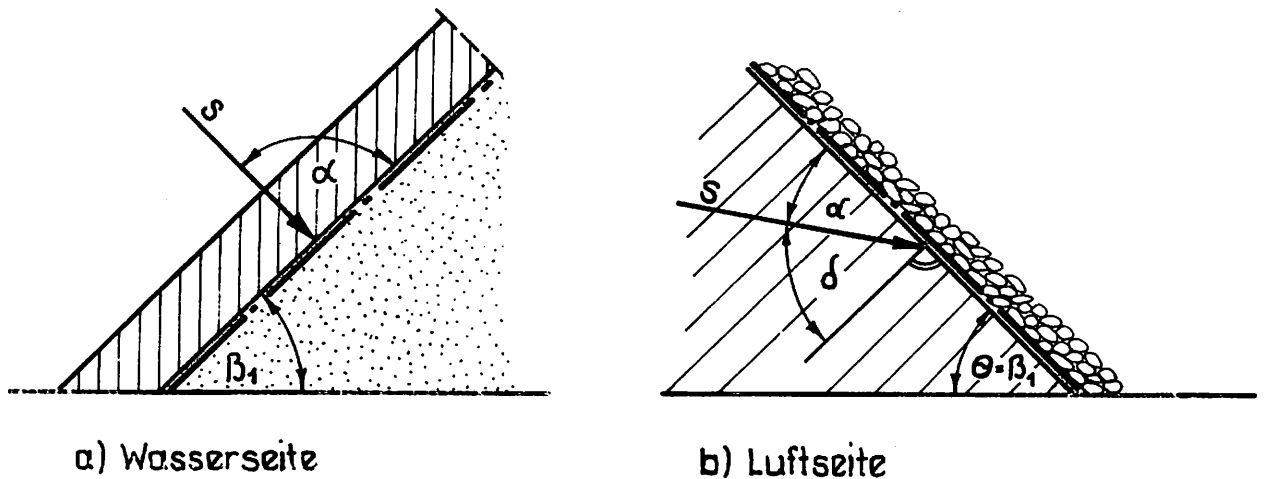


Bild 3 Richtung der Sickerwasserströmung und Winkel der Entlastungsebene

$\cos \beta_1$  ist positiv zu setzen, wenn die senkrechte Projektion der Strömungskraft in Richtung der Erdschwere wirkt und negativ, wenn sie entgegen der Erdschwere wirkt.

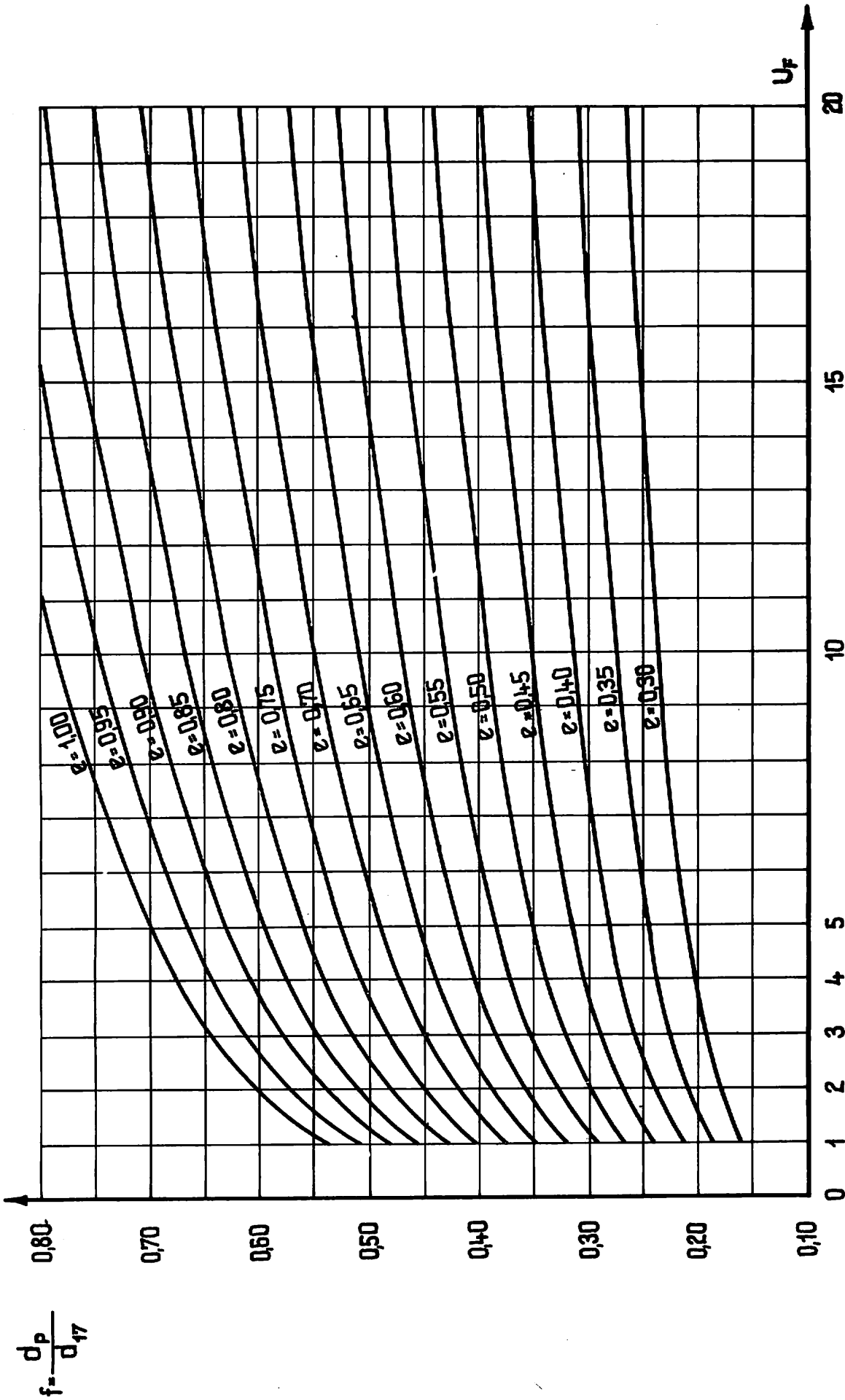


Bild 4 Diagramm zur Bestimmung des Porendurchmessers  $d_p = f \cdot d_{17}$



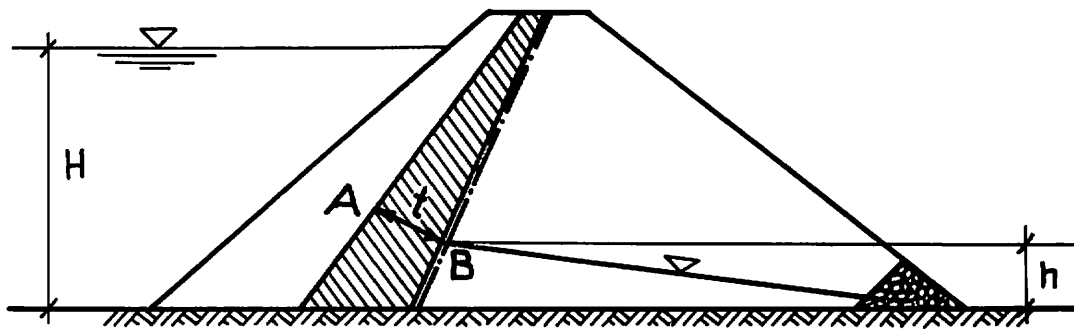
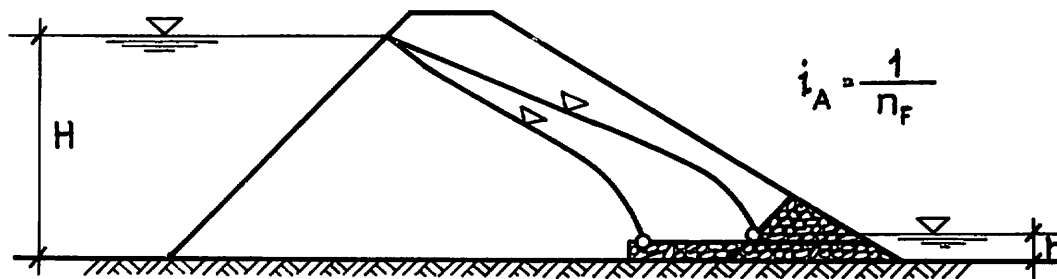
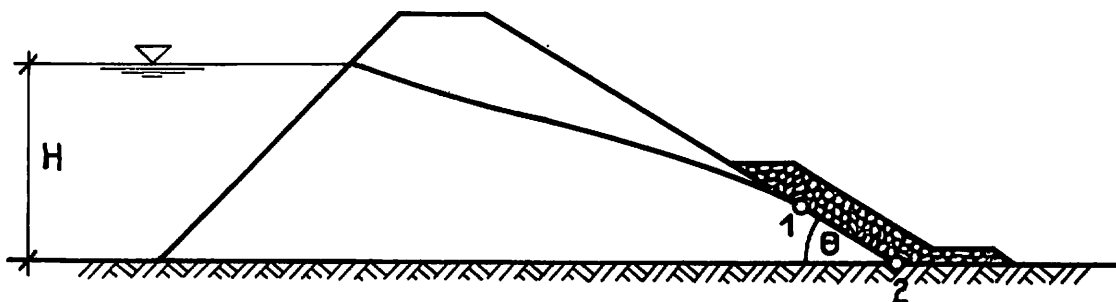


Bild 5



(a)



(b)

Bild 6

für Austrittspunkt 1:  $i_A = \sin \theta \cdot \frac{1}{n_F}$   
 für Austrittspunkt 2:  $i_A = \tan \theta \cdot \frac{1}{n_F}$

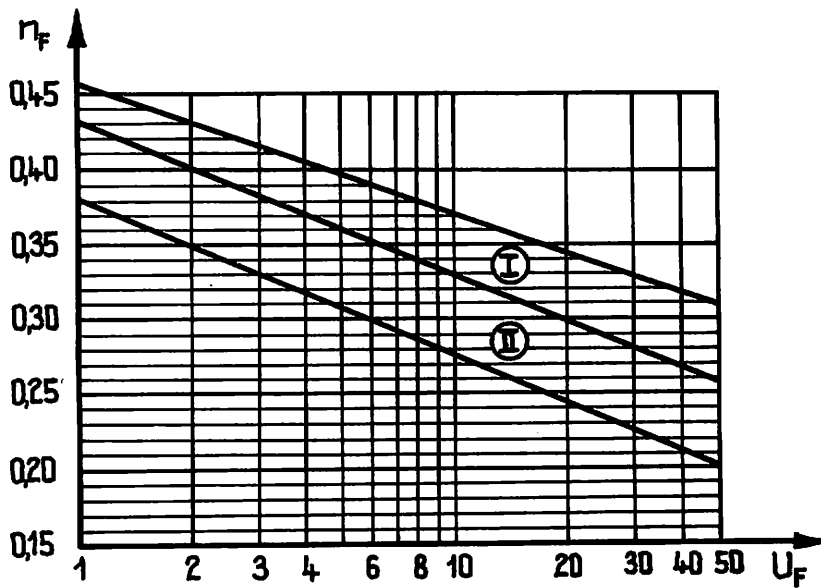


Bild 7 Diagramm  $n_F = f(U_F)$  der Porosität nichtbindiger Böden

- Ⓘ - Gebiet gebrochenen Materials (Splitt, Schotter)
- Ⓜ - Gebiet der Sande und Kiese

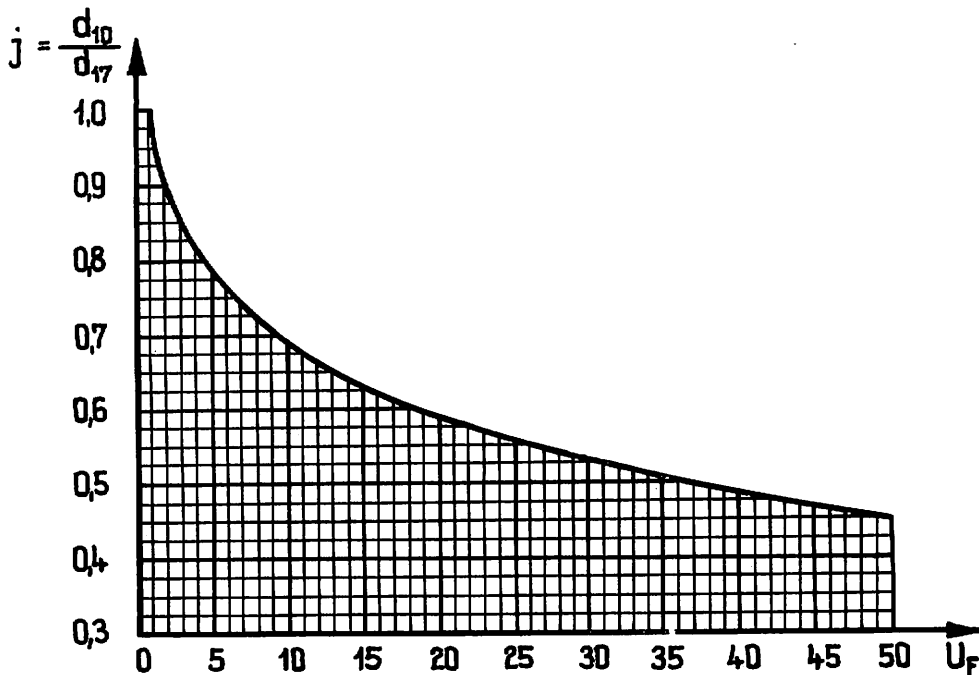


Bild 8 Diagramm  $j = f(U_F)$

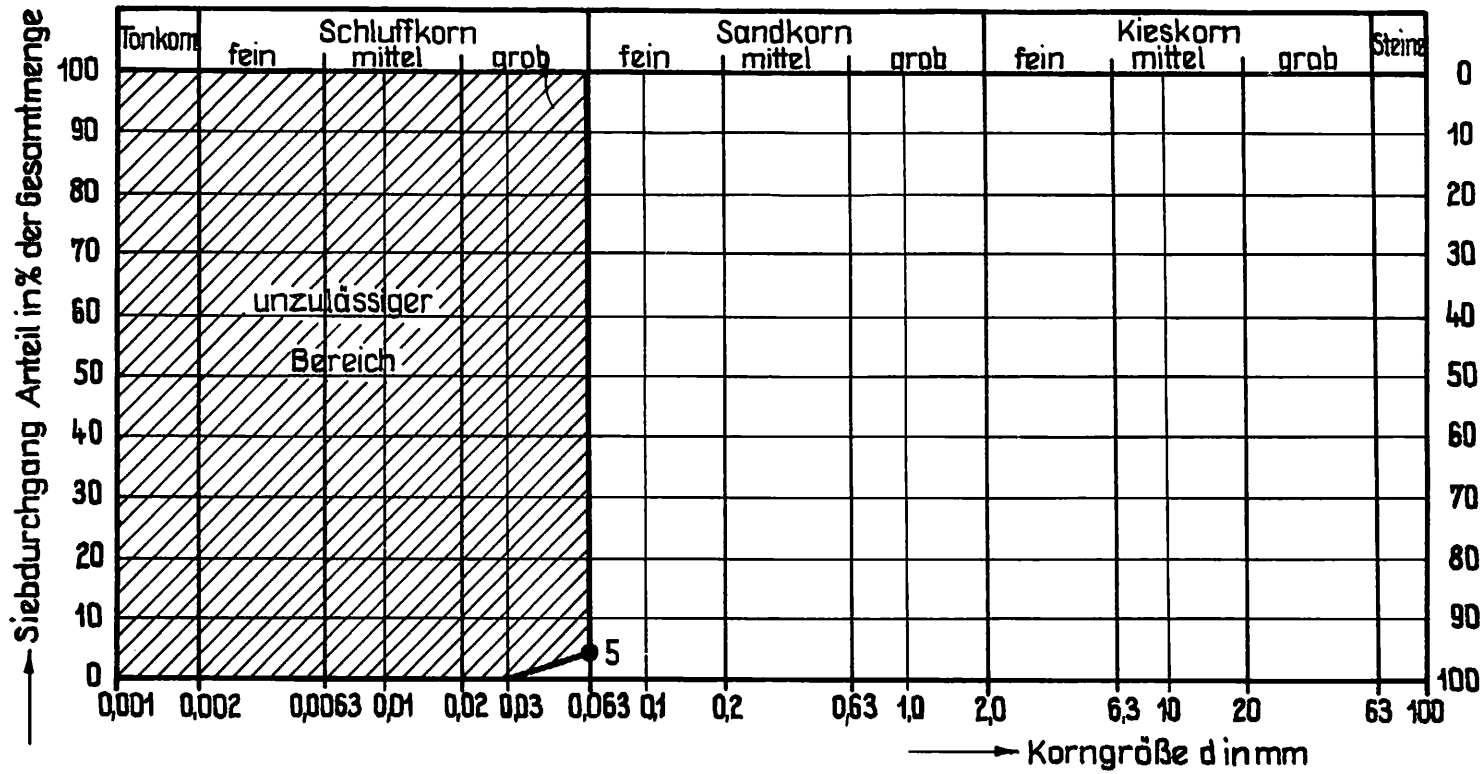


Bild 9 unzulässiger Grenzbereich für Filter- und Stützkörpermaterial

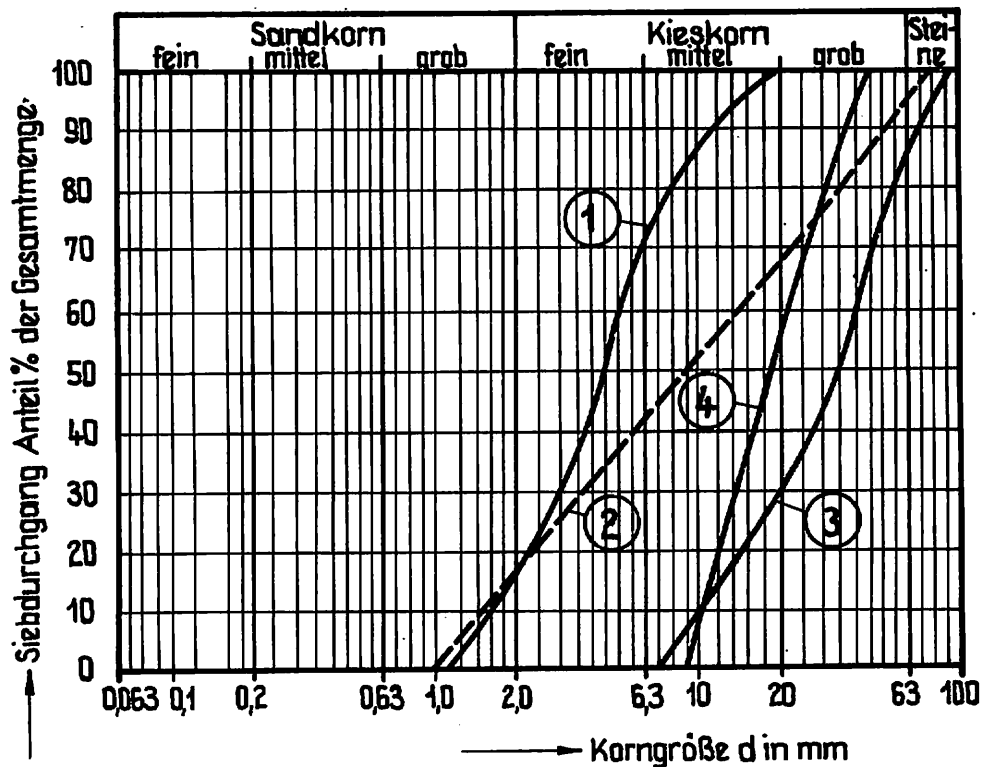


Bild 10 Kornverteilungslinien der Beispiele 1 bis 4

- |  |   |  |   |
|--|---|--|---|
| <p>① <math>d_{17} = 2,0\text{mm}</math><br/> <math>d_{10} = 1,6\text{mm}</math><br/> <math>d_{60} = 5,0\text{mm}</math><br/> <math>U_F = 3,13</math></p> | <p>② gegeben <math>U_F = 10</math><br/> errechnet <math>d_{17} = 1,97\text{mm}</math><br/> <math>d_{10} = 1,48\text{mm}</math><br/> <math>d_{60} = 14,8\text{mm}</math></p> | <p>③ <math>d_{17} = 13\text{mm}</math><br/> <math>d_{10} = 10\text{mm}</math><br/> <math>d_{60} = 40\text{mm}</math><br/> <math>U_F = 4,0</math></p> | <p>④ gegeben <math>U_F = 2</math><br/> errechnet <math>d_{17} = 11,5\text{mm}</math><br/> <math>d_{10} = 10,35\text{mm}</math><br/> <math>d_{60} = 20,7\text{mm}</math></p> |
|--|---|--|---|

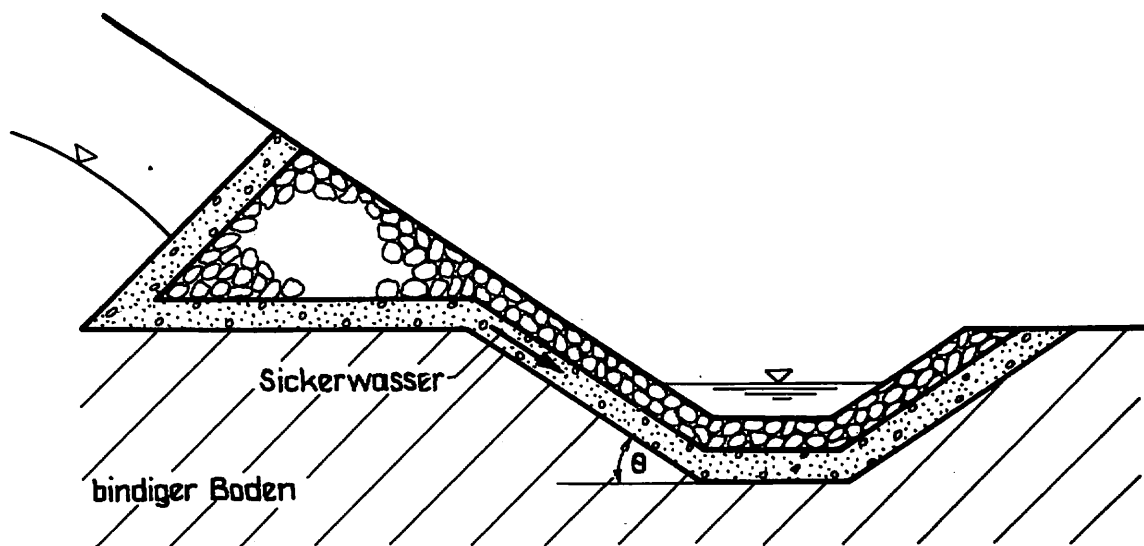


Bild 11